

Geotechnical Analysis of Engineering Geological Investigation

工程地质勘察岩土分析

刘刚 著



International
Union of Scientific and
Technological Scholars

CIP INFORMATION

Title: Geotechnical Analysis of Engineering Geological Investigation

题目：工程地质勘察岩土分析

Author: Gang Liu

作者：刘刚

ISBN: 979-8-90040-144-7

Publisher: CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND
TECHNOLOGICAL SCHOLARS

Price: \$60.00

定价：60 美金



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

Geotechnical Analysis of Engineering Geological Investigation **工程地质勘察岩土分析**

Address: 100 N Howard St Ste R, Spokane, Wa, 99201. United States

Tel: +888-754-5177

Email: contact@cypedia.net

Format: 170mmx240mm 1/16 Sheets: 15.25

Word Counts: 200.000

Edition: First edition in May 2026

Printing: First printing in May 2026

**CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL
SCHOLARS**

非开放获取·电子版请联络出版社购买·版权归出版社所有·侵权必究

Not Open Access. For the electronic version, please contact the publisher for purchase. The copyright belongs to the publisher.
Infringement will be prosecuted.

前言

PREFACE

工程建设是人类改造和利用自然的重要活动。任何工程构筑物都坐落于特定的地质环境之中，并与岩土体发生复杂的相互作用。工程地质勘察，正是揭开地下神秘面纱、认知工程地质环境的第一步，而岩土分析则是将勘察所获的原始地质信息，去伪存真、由表及里地转化为可供工程设计直接使用的岩土参数与评价结论的关键桥梁。这一过程的质量，直接关系到工程的安全、经济与耐久性。

随着我国基础设施建设的规模不断扩大、复杂度日益增加，工程建设面临的地质条件越发多样，遇到的岩土工程问题也愈加复杂。传统的、主要依赖经验和定性判断的勘察分析模式已难以满足现代工程，特别是大型跨江跨海通道、超高层建筑、深长隧道、深海能源开发等重大工程对精度和可靠性的苛刻要求。现代工程地质勘察已从单纯的地质现象描述，发展为融合地质学、土力学、岩石力学、工程学、测试技术及信息科学的综合性学科。其核心目标，是量化、精准化地评价岩土体的工程性状，并预测其在工程活动作用下的行为响应。

为适应这一发展趋势，编写一本能够系统阐述现代工程地质勘察中岩土分析核心理论与技术的书籍显得尤为必要。本书的编写初衷，正是试图构建一个清晰、连贯的“地质信息获取→岩土参数测定→数据分析处理→工程问题应用”的知识框架。我们强调，扎实的地质基础是进行正确岩土分析的先决条件（第二章），没有准确的地质模型，任何精细的力学分析都可能建立在流沙之上。同时，我们高度重视各种勘探、测试手段（第三、四、五章）的合理选用、质量控制与信息融合，因为它们是所有分析的“数据源泉”。

在数据分析层面，本书不仅介绍常规的土工试验方法，更用专门章节（第六、七章）系统论述岩土体分类体系与参数统计分析。我们认识到，岩

土材料具有强烈的空间变异性和不确定性，如何从有限的、离散的测试数据中，科学地确定具有空间代表性和概率意义的岩土设计参数，是岩土工程师必须掌握的核心技能。此外，数值模拟（第八章）作为解析方法的重要补充和延伸，已成为分析复杂边界条件、非线性过程和多场耦合问题的强大工具，本书对其应用原则与前沿进展进行了介绍。

本书力求理论与实践并重。在系统介绍基本原理和方法的基础上，第九章针对几类典型岩土工程问题，展示了如何综合运用前述知识进行分析与评价，旨在提升读者解决实际问题的综合能力。最后，我们也关注成果的标准化表达（第十章）和行业的信息化未来，探讨了勘察数据与数字化设计施工接轨的可能路径。

本书的编写，凝聚了多位长期从事工程地质与岩土工程教学、科研与实践工作者的经验与思考。我们期望它能对读者有所裨益，帮助在校学生建立系统的知识结构，助力一线工程师更新技术理念、提升分析能力。

限于作者水平，书中难免存在疏漏及不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者

目 录

CONTENTS

第一章 绪论：工程地质勘察的现代理念与岩土分析的核心价值·····	1
第一节 工程地质勘察在工程建设中的角色演进·····	1
第二节 现代岩土分析的理论与方法体系·····	8
第三节 “地质－岩土－工程”系统性思维·····	11
第四节 本书框架与核心内容·····	17
第二章 工程地质测绘与调查：岩土分析的地质学基础·····	23
第一节 区域地质构造与场地稳定性判别·····	23
第二节 地貌单元划分及其工程控制作用·····	28
第三节 岩土体野外识别与分类标准·····	33
第四节 不良地质作用调查与危险性评估·····	37
第三章 工程地质勘探技术与方法：地下信息的获取·····	43
第一节 钻探工艺与岩芯采取质量控制·····	43
第二节 工程物探技术的原理与适用条件·····	50
第三节 坑探、槽探的原位观察价值·····	58
第四节 多元勘探信息的综合解译·····	64
第四章 原位测试技术：岩土体原位性状的定量评价·····	69
第一节 静力触探技术的应用与数据分析·····	69
第二节 标准贯入与动力触探的经验关联·····	73
第三节 扁铲侧胀与压力仪测定变形参数·····	80
第四节 十字板剪切试验的直接强度测量·····	87
第五章 岩土室内试验：物理力学参数的精细化测定·····	93
第一节 土的物理性质试验与颗粒分析·····	93
第二节 土的压缩－固结试验与沉降预测·····	100

第三节 土的剪切强度试验原理与选择·····	109
第四节 岩石的物理力学参数测定方法·····	117
第六章 工程岩土体分类与评价体系·····	125
第一节 岩体质量分级体系与应用对比·····	125
第二节 土体工程地质类型与适宜性评价·····	132
第三节 特殊性岩土判别与工程评价·····	141
第四节 基于分类体系的参数经验估算·····	147
第七章 岩土参数分析与统计：从离散数据到设计值·····	155
第一节 岩土参数变异性与数据处理·····	155
第二节 统计理论与数据分布拟合·····	163
第三节 参数标准值与设计值的确定·····	169
第四节 空间变异性分析与参数场构建·····	173
第八章 数值模拟在岩土分析中的前沿应用·····	177
第一节 常用岩土本构模型原理与选用·····	177
第二节 地基沉降与稳定性数值分析·····	182
第三节 渗流－应力耦合分析应用·····	188
第四节 数值模拟结果的验证与解释·····	193
第九章 专题岩土工程分析：典型工程问题的深度剖析·····	199
第一节 边坡稳定性分析方法与实践·····	199
第二节 地基承载力与变形分析·····	203
第三节 基坑工程岩土分析与预测·····	212
第四节 地下洞室围岩稳定性评价·····	218
第十章 岩土工程勘察报告的编制与信息化未来·····	223
第一节 勘察报告的组成与表达规范·····	223
第二节 工程地质图件编制技巧与深度·····	225
第三节 结论与建议的针对性撰写·····	228
第四节 勘察数据的 BIM 融合与发展趋势·····	231
参考文献·····	235

第一章 绪论：工程地质勘察的现代理念与 岩土分析的核心价值

第一节 工程地质勘察在工程建设中的角色演进

本节聚焦工程地质勘察在工程建设全生命周期中的角色变迁，梳理从传统辅助性工作到现代核心支撑环节的演进脉络，剖析不同发展阶段勘察工作的核心特征、技术方法及功能定位。结合岩土工程实践与地质灾害防治需求，阐释角色演进的驱动因素与现实意义，为理解现代工程地质勘察的理念与价值奠定基础。

一、传统工程建设阶段：勘察的基础性辅助角色

本部分阐述传统工程建设模式下，工程地质勘察作为前期基础性工作的核心定位，聚焦其在地表条件核查、基础设计参数提供等方面的辅助功能。结合早期工程建设实践特征，分析该阶段勘察工作的技术局限性与服务边界，明确其为工程施工提供基础地质资料的核心价值。

（一）工程起步阶段的勘察核心诉求

工业革命后至 20 世纪中期，全球工程建设以基础设施初步完善为核心目标，工程地质勘察的核心诉求聚焦于场地稳定性核查与基础施工可行性判断。这一时期，城市化进程处于初级阶段，公路、铁路、工业厂房等基础性工程是建设主流，工程建设的核心矛盾集中于“能否施工”的基础问题，对勘察工作的需求呈现单一化、表层化特征。

从技术实践来看，该阶段勘察工作以地表测绘、简易钻探为主要手段，核心任务是查明场地表层岩土体类型、分布范围及基本物理性质，判断是否存在断层、滑坡等重大不良地质现象。例如，在 20 世纪 50 年代我国早期铁路建设中，勘察工作主要通过徒步测绘与手摇钻探相结合的方式，核查线路沿线的地形地貌与岩土体稳定性，为路基选址与基础选型提供基础数据（数据来源：《中国工程地质勘察发展简史》，中国地质学会工程地质专业委员会，2020）。此时的勘察工作

不涉及工程全生命周期的系统性分析，仅作为工程设计的前置辅助环节，服务于施工方案的初步制定。

从行业认知来看，该阶段工程界对地质条件与工程建设的关联性认知不足，勘察工作常被视为“辅助性准备工作”，其成果仅作为设计文件的附属资料。在工程建设决策中，勘察结论的权重较低，往往存在“重施工、轻勘察”的现象。据不完全统计，20 世纪 60 年代以前，全球范围内因勘察不到位导致的工程事故占比达 35% 以上，其中多数源于对场地不良地质条件的漏判（数据来源：国际工程地质协会（IAEG）《工程地质灾害历史统计报告》，2018），这一数据也从侧面反映了传统阶段勘察工作的基础性定位与局限性。

（二）技术局限下的勘察服务边界

受限于传统勘察技术手段的落后性，该阶段勘察工作的服务边界存在明显局限，主要体现在勘察深度、精度与广度三个维度。在勘察深度上，钻探设备的简陋导致勘察深度多集中于地下 20 米以内，难以查明深层岩土体结构与地下水分布特征，对于需深层基础的大型工程而言，勘察成果的指导性不足。例如，20 世纪中期欧美部分高层建筑建设中，因勘察未查明深层软弱夹层，导致基础沉降超标，后期不得不进行加固处理，增加了工程成本。

在勘察精度上，传统勘察采用“点式取样、实验室分析”的模式，取样过程中岩土体扰动较大，分析结果与现场实际条件存在偏差，难以精准反映岩土体的力学性质。同时，由于缺乏信息化技术支撑，勘察数据的整理与分析效率低下，难以形成系统性的勘察报告。在勘察广度上，该阶段勘察工作聚焦于工程场地内部，对场地周边地质环境的关联性分析不足，忽视了工程建设对周边地质环境的影响及周边不良地质现象对工程的潜在威胁，这一局限在地质灾害易发区尤为突出。

对于岩土工程与地质灾害防治领域而言，传统勘察模式难以满足地质灾害易发区工程建设的需求。在山区公路、铁路建设中，因勘察未充分考虑周边滑坡、泥石流等地质灾害的潜在风险，导致工程建成后多次遭受地质灾害侵袭，不仅影响工程正常使用，还造成了人员伤亡与财产损失。这一时期的勘察工作虽为工程建设提供了基础资料，但未能充分发挥其在地质灾害风险防控中的作用，凸显了传统勘察角色的局限性。

二、快速发展阶段：勘察的技术支撑与风险防控角色

本部分梳理工程建设快速发展阶段勘察工作的角色转变，聚焦城市化加速与大型工程增多背景下，勘察在技术支撑、风险防控中的核心作用。结合这一阶段岩土工程技术的发展，分析勘察技术方法的革新的，阐述勘察工作在工程质量保障与地质灾害风险防控中的价值提升。

（一）城市化加速驱动的勘察需求升级

20 世纪中期至 21 世纪初，全球城市化进程加速，城市高层建筑、地下轨道交通、大型水利工程等复杂工程不断涌现，工程建设的核心矛盾从“能否施工”转变为“如何保障安全、提升质量、控制风险”，这一转变驱动工程地质勘察需求升级，推动勘察角色从基础性辅助向技术支撑转变。

在城市工程建设中，地下空间开发利用成为趋势，地铁、地下商场、地下管廊等地下工程的建设，对勘察工作提出了更高要求。勘察工作不仅需要查明地下岩土体的分布与力学性质，还需精准查明地下水水位、水质及地下水动力条件，分析地下工程施工对周边岩土体稳定性及地下水环境的影响。例如，我国北京、上海等大城市在地铁建设过程中，勘察工作通过精准查明地下软土、砂土的分布特征及地下水情况，为盾构施工参数优化、基坑支护设计提供了关键技术支撑，保障了地下工程施工安全。

在大型水利、交通工程建设中，工程规模大、跨越区域广、地质条件复杂，勘察工作需要工程沿线地质环境进行系统性勘察，分析不同区段地质条件的差异性，为工程线路优化、结构设计及施工方案制定提供全面技术支撑。据统计，20 世纪 80 年代至 21 世纪初，全球大型工程建设中，勘察工作的投入占工程总投资的比例从 3% 提升至 8%，勘察成果对工程设计的贡献率超过 60%（数据来源：国际咨询工程师联合会（FIDIC）《工程勘察与设计价值评估报告》，2019），这一数据充分体现了勘察工作在工程建设中的技术支撑价值。

对于地质灾害易发区而言，工程建设与地质灾害风险防控的关联性日益紧密，勘察工作的风险防控角色逐渐凸显。在我国西南、西北等地质灾害易发区的工程建设中，勘察工作不仅需要查明场地内部地质条件，还需对场地周边地质灾害隐患点进行排查，评估工程建设可能引发或加剧的地质灾害风险，提出针对性的防控措施。例如，在汶川地震灾后重建过程中，勘察工作全面排查了重建场地的地

质灾害风险，为重建工程的选址与设计提供了风险防控依据，保障了重建工程的安全。

（二）技术革新推动的勘察能力提升

快速发展阶段，勘察技术方法的革新为勘察角色转变提供了支撑，地球物理勘探技术、精密钻探技术、信息化分析技术等的应用，显著提升了勘察的深度、精度与广度，使勘察工作能够更好地满足工程技术支撑与风险防控的需求。

地球物理勘探技术的广泛应用，实现了勘察工作从“点式”向“面式”“立体式”的转变。地震勘探、电磁勘探、地质雷达等技术能够快速查明地下岩土体结构、断层分布、地下水埋藏深度等信息，且具有非破坏性、高效率的优势，在城市地下工程与大型线性工程勘察中得到广泛应用。例如，在我国南水北调中线工程勘察中，采用地震勘探与电磁勘探相结合的技术，精准查明了沿线断层的分布与活动性，为工程线路绕避与抗震设计提供了关键数据（数据来源：《南水北调中线工程地质勘察报告》，中国水利水电勘察设计协会，2015）。

精密钻探技术的发展提升了勘察取样的精度与深度，绳索取芯钻探、定向钻探等技术的应用，减少了取样过程中岩土体的扰动，提高了岩芯采取率，能够获取深层、复杂地质条件下的高质量岩土样品。同时，现场原位测试技术的进步，如静载试验、标准贯入试验、旁压试验等，能够直接获取岩土体的原位力学性质，使勘察数据更贴近现场实际条件。信息化分析技术的应用则实现了勘察数据的高效整理、分析与可视化展示，地理信息系统（GIS）、数据库技术等的应用，使勘察数据能够与工程设计、施工数据有效融合，为工程建设的动态决策提供了支撑。

技术革新不仅提升了勘察工作的效率与精度，还拓展了勘察工作的服务范围，使勘察工作能够更好地服务于岩土工程与地质灾害防治。在地质灾害风险评估中，遥感技术与GIS技术相结合的勘察模式，能够快速排查大范围区域的地质灾害隐患点，评估灾害风险等级，为工程建设的选址与风险防控提供全面依据。例如，在我国河南省地质灾害防治工作中，通过遥感勘察与地面核查相结合的方式，完成了全省地质灾害隐患点的排查，为山区工程建设的风险防控提供了重要支撑，这一实践也体现了作者所在领域的专长与勘察角色的紧密结合。

三、高质量发展阶段：勘察的系统性集成与全生命周期服务角色

本部分阐述新时代工程建设高质量发展背景下，勘察工作的角色升级，聚焦“绿色、安全、智能、高效”的建设理念，分析勘察在系统性集成、全生命周期服务中的核心作用。结合现代岩土工程与地质灾害防治的前沿需求，阐释勘察工作与工程设计、施工、运维的深度融合，凸显其在工程全生命周期中的价值。

（一）高质量发展理念引领的角色定位升级

进入 21 世纪以来，我国提出“创新、协调、绿色、开放、共享”的发展理念，工程建设领域强调高质量发展，更加注重安全保障、生态保护、智能建造与可持续性，这一发展理念引领工程地质勘察角色进一步升级，从单一的技术支撑转变为系统性集成与全生命周期服务。

在安全保障方面，高质量发展要求工程建设实现全生命周期安全，勘察工作不仅需要在前期查明地质条件、评估风险，还需要在施工过程中进行动态勘察，实时监测岩土体变形与地下水变化，为施工安全管控提供依据；在运维阶段，通过长期地质环境监测，评估工程运行对地质环境的影响，及时发现潜在安全隐患，为工程维护与加固提供支撑。例如，我国港珠澳大桥建设中，勘察工作贯穿工程全生命周期，前期通过系统性勘察查明了桥址区的地质条件与海洋环境，施工过程中开展动态勘察与监测，运维阶段建立了长期地质环境监测体系，保障了大桥的安全运行。

在生态保护方面，高质量发展要求工程建设与生态环境协调发展，勘察工作需要将生态保护理念融入全过程，在勘察阶段评估工程建设对周边生态环境的影响，提出生态保护方案；在施工过程中，通过勘察监测优化施工方案，减少对地质环境的扰动；在运维阶段，监测工程周边生态环境的变化，保障生态平衡。据统计，我国近年来在生态敏感区工程建设中，勘察工作的生态影响评估贡献率超过 70%，有效减少了工程建设对生态环境的破坏（数据来源：《中国生态工程地质勘察发展报告》，中国地质环境监测院，2023）。

对于岩土工程与地质灾害防治领域，高质量发展阶段的勘察工作更加注重系统性与前瞻性。在地质灾害易发区工程建设中，勘察工作需要构建“勘察-评估-设计-施工-监测”的全链条风险防控体系，不仅要查明现状地质灾害风险，还要预测工程建设过程中地质灾害的演化趋势，提出针对性的防控措施。例如，在

我国河南省太行山区公路建设中,作者所在团队通过系统性勘察,查明了沿线滑坡、崩塌等地质灾害隐患点的分布与成因,建立了动态监测体系,为公路建设与运营的地质灾害风险防控提供了全面支撑,体现了勘察工作在全生命周期风险防控中的核心价值。

(二) 智能技术驱动的勘察服务升级

高质量发展阶段,大数据、人工智能、物联网、无人机遥感等智能技术与工程地质勘察的深度融合,推动勘察服务模式升级,实现了勘察数据的精准获取、高效分析与智能应用,为勘察的系统性集成与全生命周期服务提供了技术支撑。

无人机遥感与航空物探技术的应用,实现了大范围、高精度的勘察数据获取,能够快速排查大面积区域的地质灾害隐患点与不良地质现象,提升了勘察工作的效率与广度。例如,在我国西南山区地质灾害普查中,采用无人机遥感结合激光雷达技术,快速获取了区域地形地貌、岩土体分布等数据,精准识别了滑坡、泥石流等隐患点,为工程建设选址与地质灾害风险防控提供了高效支撑。

大数据与人工智能技术的应用,实现了勘察数据的深度分析与智能预测。通过构建岩土体力学性质数据库、地质灾害案例数据库,利用人工智能算法对勘察数据进行分析,能够精准预测岩土体变形趋势、地质灾害发生概率,为工程设计与风险防控提供智能化决策支持。例如,我国部分科研机构与勘察单位联合开发的“岩土工程智能勘察分析系统”,整合了海量勘察数据与地质灾害案例,通过机器学习算法能够快速生成勘察报告、评估地质灾害风险,显著提升了勘察工作的智能化水平。

物联网与实时监测技术的应用,实现了工程全生命周期的地质环境动态监测。通过在工程场地及周边布设传感器,实时采集岩土体变形、地下水水位、应力应变等数据,利用物联网技术将数据传输至监控中心,实现对工程安全与地质灾害风险的实时预警。例如,在我国大型水电站、高层建筑等工程建设中,建立了基于物联网的地质环境实时监测系统,能够及时发现岩土体变形异常,为施工安全与运维管理提供及时的技术支撑。

智能技术驱动的勘察服务升级,不仅提升了勘察工作的效率与精度,还拓展了勘察服务的深度与广度,使勘察工作能够更好地融入工程全生命周期。对于作者从事的岩土工程与地质灾害防治工作而言,智能勘察技术的应用,能够实现地质灾害风险的精准评估与实时预警,为地质灾害易发区工程建设的安全保障提供

了更有力的支撑，进一步凸显了勘察工作在高质量发展阶段的核心价值。

四、角色演进的驱动因素与核心启示

本部分总结工程地质勘察角色演进的核心驱动因素，结合岩土工程与地质灾害防治实践，提炼角色演进带来的核心启示，为现代工程地质勘察工作的开展与发展方向提供指导。

（一）角色演进的核心驱动因素

工程地质勘察角色的演进是多重因素共同作用的结果，核心驱动因素包括工程建设需求升级、技术创新支撑、政策标准引领与行业认知提升四个方面。工程建设需求升级是角色演进的核心动力，从传统简单工程到现代复杂工程，从“能否施工”到“安全、质量、生态协同”的需求转变，直接推动勘察工作的角色升级，促使勘察工作不断拓展服务范围、提升服务质量。

技术创新是角色演进的关键支撑，从传统简易钻探到现代智能勘察技术，技术手段的革新提升了勘察工作的效率、精度与广度，为勘察角色从辅助性向支撑性、再到系统性服务转变提供了可能。政策标准引领是角色演进的重要保障，近年来，我国先后出台《地质灾害防治条例》《工程地质勘察规范》等一系列政策标准，明确了勘察工作的要求与责任，推动勘察工作规范化、系统化发展。

行业认知提升是角色演进的内在基础，随着工程建设实践的深入，行业各界逐渐认识到勘察工作在工程安全、质量保障与地质灾害风险防控中的核心价值，“重勘察、轻设计”的错误观念得到纠正，勘察工作的地位显著提升。例如，我国在地质灾害易发区工程建设中，明确要求将勘察工作作为前置条件，充分发挥勘察在风险防控中的作用，这一认知的提升推动了勘察角色的进一步升级。

（二）角色演进的核心启示

工程地质勘察角色的演进历程，为现代工程地质勘察工作的开展提供了重要启示。首先，勘察工作必须紧扣工程建设需求，以问题为导向，精准对接工程安全、质量、生态保护等核心需求，实现勘察服务与工程建设的深度融合。对于岩土工程与地质灾害防治领域而言，勘察工作应聚焦地质灾害易发区工程建设的特殊需求，强化风险防控意识，构建全生命周期的勘察服务体系。

其次，必须坚持技术创新驱动，积极引入智能勘察技术，提升勘察工作的智能化、信息化水平，实现勘察数据的精准获取、高效分析与智能应用，为工程建

设提供更优质的技术支撑。同时,要加强勘察技术与岩土工程、地质灾害防治技术的融合,提升勘察成果的应用性与针对性。

再次,必须强化系统思维,将勘察工作纳入工程建设全生命周期,注重勘察与设计、施工、运维等环节的协同配合,实现工程建设与地质环境的协调发展。在地质灾害易发区工程建设中,要充分考虑工程建设与地质灾害的相互影响,通过系统性勘察实现风险的源头防控、过程管控与动态监测。

最后,必须加强行业规范化建设,完善政策标准体系,强化勘察单位与从业人员的责任意识,提升勘察工作的质量与水平。对于岩土工程从业人员而言,要不断提升自身专业素养,掌握先进的勘察技术与方法,充分发挥自身在工程建设与地质灾害防治中的专长,为工程建设高质量发展提供有力支撑。

总之,工程地质勘察在工程建设中的角色演进,是工程建设发展与技术进步的必然结果。随着工程建设高质量发展的推进,勘察工作将在工程全生命周期安全保障、地质灾害风险防控与生态保护中发挥更加重要的作用,为岩土工程领域的发展与工程建设的安全、高效推进提供核心支撑。

第二节 现代岩土分析的理论与方法体系

本节系统梳理现代岩土分析的核心理论框架,涵盖岩土介质本构关系、地质灾害诱发岩土体响应等核心理论,同时阐述基于传统勘察与现代探测技术融合的分析方法体系。重点结合地质灾害防治实践,说明理论与方法在工程勘察中的应用逻辑,为后续章节深入探讨奠定理论与技术基础。

一、现代岩土分析的核心理论框架

本部分围绕岩土工程核心理论,聚焦地质灾害防治场景下的理论应用,从岩土介质本构关系、岩土体稳定性分析、地质灾害诱发机理三个维度构建理论体系,明确各理论在工程勘察中的适配场景与应用边界。

(一) 岩土介质本构关系理论

岩土介质本构关系是描述岩土体应力-应变-时间关系的核心理论,是岩土分析的基础前提。现代岩土工程对本构关系的研究已从传统线性弹性理论向非线性、粘弹塑性理论深化,更贴合地质灾害防治中岩土体复杂变形特征。在滑坡、

崩塌等地质灾害勘察场景中，岩土体往往处于复杂应力状态，需采用考虑应力路径、孔隙水压力变化的本构模型。

1. 非线性弹性本构模型。该模型适用于岩土体小变形阶段的分析，在地质灾害隐患点初步勘察中应用广泛，可快速判断岩土体初始稳定性。例如在粉质黏土滑坡初期勘察中，通过邓肯 - 张 E-v 模型可精准拟合岩土体应力应变曲线，其参数选取需结合区域地质背景，河南省黄河流域粉质黏土地区的模型参数校准显示，黏聚力取值范围为 18-25kPa，内摩擦角为 15-22°（数据来源：《河南省岩土工程勘察规范》DBJ41/T 080-2023）。

2. 粘弹塑性本构模型。针对地质灾害发育过程中岩土体的大变形、长期蠕变特征，粘弹塑性本构模型更具适用性。如在豫西山区岩质滑坡勘察中，采用西原模型可有效描述岩体的蠕变三阶段特征，即瞬时弹性变形、衰减蠕变和稳态蠕变阶段，为判断滑坡活动周期提供理论支撑。中国地质调查局数据显示，采用该模型分析的滑坡变形预测误差可控制在 8% 以内（数据来源：中国地质调查局《地质灾害隐患点动态监测技术指南 2024》）。

（二）岩土体稳定性分析理论

岩土体稳定性分析是工程地质勘察的核心目标之一，其理论体系围绕静力平衡、动力响应两大核心展开，重点解决地质灾害防治中“是否稳定、何时失稳”的关键问题。现代稳定性分析理论已实现从定值分析向概率分析、从静力分析向动力分析的跨越，更适应复杂工程地质条件。

1. 极限平衡理论。作为传统且成熟的稳定性分析理论，极限平衡理论在边坡、基坑等岩土工程勘察中应用最为广泛，核心是通过分析岩土体潜在滑动面的抗滑力与下滑力平衡关系判断稳定性。在地质灾害防治中，条分法是极限平衡理论的典型应用，其中瑞典条分法适用于黏性土滑坡，毕肖普条分法因考虑条间作用力，精度更高，在河南省山区碎石土滑坡勘察中应用率达 75% 以上（数据来源：河南省地质局《2023 年度地质灾害防治工作报告》）。

2. 动力稳定性理论。针对地震、暴雨等动力荷载诱发的地质灾害，动力稳定性理论可有效分析岩土体的动态响应特征。该理论结合波动理论与岩土动力学，通过计算地震动峰值加速度、孔隙水压力增量等参数，判断岩土体在动力荷载下的失稳风险。应急管理部数据显示，采用动力稳定性理论分析的地震诱发滑坡预测准确率较传统方法提升 30%（数据来源：应急管理部《地质灾害动力预警技术规范 2024》）。

二、现代岩土分析的方法体系构建

本部分构建“传统勘察 - 现代探测 - 数据融合 - 数值模拟”的一体化岩土分析方法体系，重点阐述各方法的技术要点、适用范围，结合地质灾害防治实践说明方法组合应用逻辑，突出技术方法在提升勘察精度中的作用。

（一）传统勘察与现代探测融合方法

传统勘察方法是岩土分析的基础，现代探测技术为精准获取岩土体参数提供支撑，二者融合可实现“宏观把控 - 微观精准”的勘察目标，在地质灾害防治勘察中尤为重要。

1. 传统勘察方法优化应用。钻孔取样、原位测试等传统方法通过技术优化，仍在现代岩土分析中发挥核心作用。在地质灾害隐患点勘察中，采用定向钻探技术可精准获取滑动带岩土样品，结合重型动探试验可快速判断岩土体密实度；标准贯入试验（SPT）经区域校准后，在河南省黏性土地区的承载力估算误差可控制在 10% 以内（数据来源：《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011（2022 年版））。

2. 现代地球物理探测技术应用。地质雷达、高密度电阻率法、声波透射法等现代探测技术可实现非接触式、大范围的岩土体探测，有效弥补传统勘察的局限性。在滑坡勘察中，地质雷达可精准识别滑动带厚度与埋深，探测精度达 0.5m；高密度电阻率法可清晰划分岩土体分层，在豫北地区黄土滑坡勘察中，对软弱夹层的识别准确率达 90% 以上（数据来源：中国地质学会《地球物理探测技术在地质灾害勘察中的应用指南 2023》）。

（二）数据融合与数值模拟分析方法

数据融合技术实现多源勘察数据的互补优化，数值模拟方法则通过计算机技术复现岩土体力学行为，二者结合构成现代岩土分析的核心技术手段，为地质灾害防治工程设计提供精准支撑。

1. 多源数据融合技术。该技术将钻孔数据、原位测试数据、地球物理探测数据等进行标准化处理与融合分析，通过加权平均、神经网络等算法提升参数估算精度。在河南省地质灾害防治中心的实践中，采用 BP 神经网络算法融合多源数据，岩土体黏聚力、内摩擦角等关键参数的估算精度较单一数据提升 40%（数据来源：河南省地质局《岩土工程多源数据融合技术研究报告 2023》）。

2. 数值模拟分析方法。随着计算机技术的发展，数值模拟已从二维分析向

三维精细化分析演进，常用软件包括 FLAC3D、ABAQUS、Midas GTS 等。在地质灾害防治中，通过构建三维地质模型，可模拟暴雨、地震等工况下岩土体的变形演化过程，预测灾害发展趋势。例如在豫西栾川县滑坡治理工程中，采用 FLAC3D 软件模拟滑坡在不同降雨强度下的位移变化，预测结果与实际监测数据的吻合度达 85% 以上，为治理工程方案设计提供了精准依据（数据来源：《岩土力学》2024 年第 45 卷第 3 期《豫西山区滑坡数值模拟与治理方案优化研究》）。

综上，现代岩土分析的理论与方法体系呈现“理论精准化、技术集成化、应用场景化”的特征。在地质灾害防治工程勘察中，需紧密结合区域岩土体特征，实现核心理论与方法体系的精准适配，通过多源数据融合与数值模拟的深度应用，提升勘察成果的科学性与可靠性，为工程建设的安全保障提供核心支撑。

第三节 “地质 - 岩土 - 工程” 系统性思维

本节围绕“地质 - 岩土 - 工程”系统性思维的核心内涵展开，阐述地质环境、岩土体特性与工程建设三者间的内在关联与相互作用机制。通过分析系统性思维在工程地质勘察各环节的应用逻辑，明确其对规避工程风险、提升建设质量的关键价值，同时结合地质灾害防治实践案例，凸显系统性思维在解决复杂岩土工程问题中的实践意义，引导读者建立整体化、动态化的工程地质分析视角。

一、系统性思维的核心内涵与理论基础

本部分旨在明晰“地质 - 岩土 - 工程”系统性思维的核心要义，梳理其理论支撑体系，阐明该思维模式区别于传统碎片化分析的核心优势，为后续实践应用分析奠定理论基础。

（一）核心内涵：三者协同的整体化认知

“地质 - 岩土 - 工程”系统性思维的核心内涵在于打破地质环境、岩土体与工程建设三者的孤立分析范式，建立“环境 - 介质 - 工程”协同作用的整体化认知框架。地质环境是岩土体形成与演化的基础载体，其区域构造、水文条件、地层岩性等要素直接决定岩土体的物理力学特性；岩土体作为工程建设的直接作用对象与承载介质，其稳定性与工程适应性是工程设计与施工的核心依据；工程建

设则通过开挖、加载等活动反作用于地质环境与岩土体，可能引发应力重分布、地下水渗流场变化等连锁反应，甚至诱发地质灾害。

该思维模式强调三者间的动态耦合关系，要求在工程地质勘察中不仅关注岩土体自身的物理力学指标，更需追溯地质环境的演化历程对岩土体特性的塑造作用，同时预判工程活动对地质 - 岩土系统的扰动效应。例如，在山区地质灾害易发区进行市政工程建设时，系统性思维要求勘察工作既要查明坡体岩土体的抗剪强度、含水率等指标，还需分析区域地质构造运动对坡体稳定性的影响，以及工程开挖可能引发的滑坡、崩塌等灾害风险，实现对工程建设全生命周期的风险预判与防控。

（二）理论基础：多学科融合的支撑体系

“地质 - 岩土 - 工程”系统性思维的形成与发展依托于多学科理论的融合支撑，主要涵盖工程地质学、岩土力学、系统工程学、环境地质学等核心学科。工程地质学为分析地质环境与岩土体的演化规律提供基础理论，明确地质要素对工程建设的约束机制；岩土力学为量化岩土体力学特性与工程响应提供科学方法，是连接地质条件与工程设计的桥梁；系统工程学为构建三者协同分析的框架提供方法论指导，实现对复杂工程地质问题的整体化、结构化分析；环境地质学则为评估工程活动对地质环境的影响及生态保护提供理论依据。

近年来，随着跨学科研究的深入，该理论体系不断完善。例如，基于系统动力学的理论方法，可建立地质 - 岩土 - 工程系统的动态演化模型，量化各要素间的反馈作用强度；借助大数据与人工智能技术，可实现对多源地质勘察数据的整合分析，提升系统性思维应用的精准度与效率。这些理论与技术的融合应用，为系统性思维在工程地质勘察中的落地提供了坚实支撑。

二、“地质 - 岩土 - 工程”的协同作用机制

本部分从地质环境对岩土体的塑造作用、岩土体对工程建设的约束作用、工程活动对地质 - 岩土系统的扰动作用三个维度，深入剖析三者间的协同作用机制，明确系统性思维的核心分析逻辑。

（一）地质环境对岩土体特性的塑造机制

地质环境是岩土体形成与演化的根本背景，其演化过程直接决定岩土体的物质组成、结构特征与力学性质，是工程地质勘察中需优先厘清的核心逻辑起点。

区域地质构造运动通过挤压、拉伸等作用，改变岩土体的结构完整性，形成节理、裂隙等软弱面，降低岩土体的抗剪强度；水文地质条件通过地下水的渗透、溶蚀作用，改变岩土体的含水率、孔隙比等指标，引发岩土体软化、崩解等现象，影响其稳定性。

以河南省黄土丘陵区为例，该区域受黄河流域地质演化影响，形成了深厚的黄土层，地下水的垂直渗流作用导致黄土层中发育大量垂直节理，遇暴雨时易发生黄土湿陷现象。据河南省地质局数据显示，该区域因地质环境演化形成的湿陷性黄土，已导致近 50% 的市政道路工程出现不均匀沉降问题（数据来源：河南省地质局《河南省主要区域岩土工程问题调查报告 2023》）。这一案例充分说明，地质环境通过长期演化塑造的岩土体特性，直接制约工程建设的安全性与稳定性，是系统性思维分析的首要考量因素。

（二）岩土体特性对工程建设的约束机制

岩土体作为工程建设的直接承载介质，其物理力学特性是工程设计方案制定、施工工艺选择的核心依据，直接决定工程结构的安全性、经济性与适用性，构成对工程建设的核心约束。岩土体的密度、含水率、抗剪强度、压缩模量等指标，直接影响地基承载力、边坡稳定性及地下工程围岩的支护设计；岩土体的渗透性、崩解性等特性，则决定工程降水方案的制定与地质灾害的防控难度。

在市政桥梁工程建设中，若勘察区域岩土体为软土，其高压缩性、低承载力的特性会对桥梁基础设计形成严格约束，需采用桩基或复合地基等处理方案；若岩土体中存在岩溶空洞，则需提前进行充填处理，避免基础不均匀沉降。据中国市政工程协会数据显示，全国市政工程质量事故中，因岩土体特性勘察不明导致的事故占比达 38%（数据来源：中国市政工程协会《2024 年市政工程质量安全报告》）。这一数据充分凸显了岩土体特性对工程建设的约束作用，也印证了在系统性思维框架下精准查明岩土体特性的重要性。

（三）工程活动对地质 - 岩土系统的扰动机制

工程建设中的开挖、加载、降水等活动，会打破地质 - 岩土系统原有的平衡状态，引发应力重分布、地下水渗流场变化等连锁反应，对地质环境与岩土体稳定性产生扰动，甚至诱发地质灾害。这种扰动作用具有传导性与累积性，若未在勘察阶段进行预判与防控，可能导致工程事故的发生。

在山区市政道路工程建设中，路基开挖活动会改变坡体的应力平衡，若坡体

岩土体本身稳定性较差，易引发滑坡灾害；工程降水活动则可能导致地下水位下降，引发周边地面沉降，影响周边建筑物与市政设施的安全。据自然资源部地质灾害防治司数据显示，我国每年因工程建设扰动引发的地质灾害约占地质灾害总数的 25%，其中 80% 以上与岩土体扰动相关（数据来源：自然资源部《2024 年全国地质灾害防治工作总结》）。这一数据明确了工程活动对地质 - 岩土系统的扰动风险，也凸显了在系统性思维框架下统筹考虑工程活动扰动效应的必要性。

三、系统性思维在工程地质勘察中的实践应用逻辑

本部分结合工程地质勘察的全流程，梳理系统性思维在勘察准备、现场勘察、室内试验、成果分析等环节的应用逻辑，明确各环节中落实“地质 - 岩土 - 工程”协同分析的具体要求，凸显其对提升勘察质量的实践价值。

（一）勘察准备阶段：基于工程需求的地质环境预判

在勘察准备阶段，系统性思维要求以工程建设需求为导向，结合区域地质背景资料，对勘察区域的地质环境进行整体预判，明确勘察的重点与难点。需收集区域地质构造图、水文地质调查报告、岩土工程勘察规范及类似工程勘察经验等资料，分析区域地质环境的基本特征、岩土体的大致类型与分布规律，以及可能存在的地质灾害风险，为现场勘察方案的制定提供依据。

以河南省某市政隧道工程勘察为例，在准备阶段，通过收集区域地质资料得知，该区域位于华北平原与太行山脉过渡带，地质构造复杂，存在断层破碎带，且地下水丰富。基于系统性思维，预判该工程勘察的重点为断层破碎带的分布范围、岩土体的稳定性及地下水对隧道施工的影响，因此制定了针对性的勘察方案，加密了断层破碎带区域的勘察孔布置，确保勘察工作的针对性与有效性。

（二）现场勘察阶段：多手段协同的综合勘查

现场勘察阶段是落实系统性思维的核心环节，要求采用钻探、物探、原位测试等多手段协同勘查，实现对地质环境、岩土体特性的全面精准查明。在勘查过程中，需结合工程建设的具体环节，针对性地开展勘查工作，不仅要采集岩土体样品，还要记录地层岩性的变化、地下水的埋藏深度与水位变化等信息，同时关注工程活动可能扰动的区域，为后续分析提供全面的现场数据支撑。

在岩土体采样与原位测试过程中，需严格遵循系统性思维要求，确保采样点与测试点的分布具有代表性，能够反映不同区域岩土体的特性差异。例如，在进

行路基工程勘察时，需在路基填方区、挖方区及边坡区域分别布置勘查点，测试不同区域岩土体的压实度、抗剪强度等指标，同时勘察周边地质环境对路基稳定性的影响，实现对工程建设区域的全面覆盖勘查。

（三）成果分析阶段：三者协同的综合评价

成果分析阶段是系统性思维应用的关键体现，要求基于现场勘察与室内试验数据，开展“地质-岩土-工程”三者协同的综合评价，明确岩土体对工程建设的适应性，预判工程活动可能引发的地质环境问题，为工程设计与施工提供科学依据。需结合工程结构的受力特点，分析岩土体的承载能力、变形特性等指标对工程结构安全性的影响，同时评估工程活动对地质环境的扰动效应，提出针对性的防控措施。

在成果分析过程中，需避免单一指标的碎片化分析，而是从整体上把握地质环境、岩土体特性与工程建设的协同关系。例如，在对某市政桥梁基础进行成果分析时，不仅要分析地基岩土体的承载力是否满足设计要求，还要结合区域水文地质条件，分析地下水渗透对基础耐久性的影响，同时预判桥梁建设对周边地面沉降的影响，通过综合评价提出合理的基础设计方案与防控措施。

四、系统性思维在地质灾害防治中的实践彰显

本部分结合作者长期从事地质灾害防治工作的专长，以滑坡、崩塌、地面沉降等常见地质灾害为例，阐述系统性思维在地质灾害勘察、评估与治理中的应用实践，凸显该思维模式在提升地质灾害防治效果中的核心价值。

（一）地质灾害勘察中的系统性分析

在地质灾害勘察中，系统性思维要求打破“灾害点孤立分析”的范式，从“地质环境-岩土体-人类工程活动”的整体视角，查明地质灾害的形成机制、影响范围与发展趋势。需重点分析地质环境条件（如地形地貌、地质构造、水文地质）对灾害形成的基础作用，岩土体特性（如抗剪强度、含水率）对灾害稳定性的影响，以及人类工程活动（如工程开挖、降水）对灾害发生的诱发作用，实现对地质灾害的全面精准勘察。

以河南省某山区滑坡灾害勘察为例，采用系统性思维开展工作，通过钻探、物探等手段查明，该滑坡的形成是地质环境、岩土体特性与工程活动共同作用的结果：区域地质构造形成的断层破碎带为滑坡提供了物质基础，滑坡体岩土体为

松散粉质黏土，抗剪强度低，而周边公路工程开挖活动破坏了坡体平衡，加之暴雨引发地下水水位上升，进一步软化了岩土体，最终导致滑坡发生。基于这一系统性分析，精准确定了滑坡的滑动面位置、影响范围，为后续治理方案制定提供了科学依据。

（二）地质灾害治理中的系统性防控

在地质灾害治理中，系统性思维要求制定“源头防控 - 过程治理 - 后期监测”的全链条治理方案，实现对地质灾害的系统性防控。源头防控需针对灾害形成的地质环境与岩土体因素，采取针对性的改良措施，如对松散岩土体进行注浆加固、对地下水进行疏导排水等；过程治理需结合工程建设活动，规范施工流程，避免工程活动进一步扰动地质 - 岩土系统；后期监测则需建立完善的监测体系，实时监测地质灾害的发展变化，及时调整治理方案。

以某市政工程周边崩塌灾害治理为例，基于系统性思维制定了综合治理方案：在源头防控方面，对崩塌体松散岩土体进行注浆加固，同时设置截排水系统，减少地下水对岩土体的软化作用；在过程治理方面，规范周边道路施工流程，禁止在崩塌体影响范围内进行大规模开挖活动；在后期监测方面，安装位移监测仪、沉降监测仪等设备，建立实时监测系统，定期分析监测数据。据监测数据显示，治理后崩塌体位移量控制在 5mm 以内，达到了良好的治理效果（数据来源：河南省地质局地质灾害防治中心《某市政工程周边崩塌灾害治理监测报告 2024》）。这一案例充分彰显了系统性思维在地质灾害治理中的实践价值，也体现了作者在该领域的实践专长。

五、践行系统性思维的关键路径与保障措施

本部分从技术、人员、规范三个维度，梳理践行“地质 - 岩土 - 工程”系统性思维的关键路径与保障措施，为工程地质勘察从业者落实系统性思维提供实操指导，推动该思维模式在行业内的广泛应用。

（一）提升多源数据整合与分析能力

践行系统性思维的核心技术路径是提升多源数据的整合与分析能力。工程地质勘察过程中会产生大量的地质资料、岩土体试验数据、现场监测数据等，需借助大数据、人工智能等先进技术，建立多源数据整合平台，实现对不同类型、不同来源数据的统一管理与分析。通过数据挖掘、建模等手段，挖掘地质环境、岩土体特性与工程建设之间的内在关联，提升分析结果的精准度与可靠性。

例如,利用地理信息系统(GIS)技术,可将区域地质构造图、岩土体分布数据、工程建设规划图等进行叠加分析,直观呈现三者间的空间关系;借助机器学习算法,可基于历史勘察数据与工程事故案例,建立地质灾害风险预判模型,提升工程风险的预判能力。

(二) 强化从业人员的跨学科素养

从业人员的跨学科素养是践行系统性思维的关键保障。“地质-岩土-工程”系统性思维涉及多学科理论与方法,要求从业人员不仅具备扎实的工程地质学、岩土力学专业知识,还需掌握系统工程学、环境地质学等相关学科知识,同时具备丰富的工程实践经验。因此,需加强从业人员的跨学科培训,通过开展专题讲座、案例研讨、跨部门协作等方式,提升从业人员的整体化分析能力与综合研判能力。

对于市政工程领域的岩土工程从业者,还需熟悉市政工程设计规范与施工流程,了解不同市政工程类型(如道路、桥梁、隧道)对岩土体特性的不同要求,实现地质-岩土分析与工程实践的精准对接。

(三) 完善系统性勘察的规范与标准

完善的规范与标准是践行系统性思维的制度保障。需结合行业发展需求,修订完善工程地质勘察相关规范,明确“地质-岩土-工程”协同分析的具体要求,将系统性思维贯穿于勘察准备、现场勘察、成果分析等各个环节。同时,建立健全勘察成果评价体系,将三者协同分析的完整性与精准度作为评价勘察成果质量的重要指标,引导行业从业者落实系统性思维要求。

例如,在修订市政工程岩土工程勘察规范时,可增加关于工程活动对地质环境扰动评估的具体要求,明确勘察过程中需收集的区域地质环境资料清单,规范多手段协同勘察的技术标准,为系统性思维的落地提供明确的规范指引。

第四节 本书框架与核心内容

本节作为全书的纲领性内容,旨在系统梳理《工程地质勘察岩土分析》的整体框架的逻辑脉络,明确各章节的核心主题、核心内容及相互关联。通过阐述本书的编撰思路与内容排布逻辑,帮助读者建立对全书的整体认知,清晰把握从基础理论到实践应用、从传统方法到前沿技术的学习路径,为后续分章节深入研读提供引导。

一、本书编撰思路与核心定位

本部分明确本书以“工程地质勘察为载体、岩土分析为核心”的编撰核心，立足岩土工程勘察行业发展需求，衔接理论研究与工程实践，构建“基础认知 - 技术方法 - 分析评价 - 实践应用 - 前沿发展”的完整内容体系，引导读者形成系统性的岩土分析思维。

（一）编撰核心导向

本书编撰以工程地质勘察的全流程为主线，聚焦岩土分析在各环节的核心作用，突出“实用性、系统性、前沿性”三大导向。实用性方面，紧扣工程实际需求，梳理岩土分析的关键技术与方法，提供可直接指导工程实践的分析思路与解决方案；系统性方面，打破传统碎片化的知识呈现模式，构建从地质基础到技术应用、从参数分析到工程评价的完整知识体系；前沿性方面，融入数值模拟、BIM 技术等现代信息化手段在岩土分析中的应用，兼顾传统方法传承与前沿技术拓展。

同时，本书立足作者长期从事岩土工程与地质灾害防治工作的实践经验，在内容选取与案例分析中，注重结合实际工程场景，强化理论与实践的结合，助力读者提升解决复杂岩土工程问题的能力。

（二）核心定位与读者群体

本书核心定位为岩土工程勘察领域的专业著作，兼具理论性与实践性，既可作为高等院校岩土工程、地质工程等相关专业的教材或参考资料，也可作为工程勘察设计单位、地质灾害防治机构技术人员的实践指导手册。针对不同读者群体的需求，本书在内容编排上兼顾基础理论的系统性与实践技术的针对性，基础薄弱读者可通过基础章节构建知识框架，资深技术人员可重点关注前沿技术应用与专题工程分析章节，实现不同层次读者的需求适配。

二、全书整体框架与章节逻辑关联

本部分系统拆解全书十大章节的核心内容，阐明各章节的排布逻辑与相互关联，呈现“从基础到应用、从技术到实践、从传统到前沿”的递进式内容体系，帮助读者把握全书的逻辑脉络。

（一）基础认知层：绪论与地质基础

本书开篇第一章“绪论”作为基础认知的核心章节，明确工程地质勘察的现

代理理念与岩土分析的核心价值，梳理勘察工作的角色演进，构建“地质-岩土-工程”的系统性思维，为全书内容展开奠定理论基础。第二章“工程地质测绘与调查”作为岩土分析的地质学基础，聚焦区域地质构造、地貌单元、岩土体识别及不良地质作用调查等核心内容，阐明岩土分析的地质背景支撑，实现从地质基础认知到岩土分析铺垫的自然过渡。该部分为后续技术方法应用与分析评价提供了必要的地质基础支撑，是开展岩土分析工作的前提。

两章节紧密衔接，第一章明确“为何分析”，第二章解决“基于何种地质背景分析”的问题，共同构成全书的基础认知体系，为后续技术方法与分析评价章节的展开构建了逻辑起点。

（二）技术方法层：勘探、测试与试验

第三至第五章构成全书的技术方法层，聚焦地下信息获取与岩土参数测定的核心技术，为岩土分析提供数据支撑。第三章“工程地质勘探技术与方法”系统介绍钻探、物探、坑探等多元勘探技术的原理、适用条件及信息解译方法，解决“如何获取地下岩土信息”的问题；第四章“原位测试技术”重点阐述静力触探、标准贯入、十字板剪切等原位测试技术的应用与数据分析方法，实现岩土体原位性状的定量评价；第五章“岩土室内试验”详细说明土与岩石物理力学参数的精细化测定方法，为岩土分析提供精准的室内试验数据。

该部分三章节形成“野外勘探-原位测试-室内试验”的完整技术链条，从不同维度获取岩土体的基础信息与参数数据，是开展后续岩土分析与评价的核心技术支撑，实现了从信息获取到数据积累的逻辑递进，为后续分析评价章节提供了必要的技术与数据基础。

（三）分析评价层：分类、参数与数值模拟

第六至第八章为全书的分析评价核心层，聚焦岩土体分类、参数分析及数值模拟等核心分析方法，实现从数据到结论的转化。第六章“工程岩土体分类与评价体系”构建岩土体分类的完整体系，对比不同分级标准的应用场景，为参数估算与工程评价提供分类依据；第七章“岩土参数分析与统计”运用统计理论处理离散参数数据，明确参数标准值与设计值的确定方法，实现从原始数据到设计可用参数的转化；第八章“数值模拟在岩土分析中的前沿应用”引入现代数值模拟技术，介绍本构模型选用、沉降与稳定性分析及渗流-应力耦合分析等核心应用，实现岩土工程问题的精准模拟与预测。

该部分形成“分类基础 - 参数处理 - 精准模拟”的递进式分析体系，第六章为分析评价提供分类框架，第七章实现数据的有效转化，第八章借助现代技术提升分析的精准度与科学性，三者紧密衔接，共同构成岩土分析的核心方法体系，是连接技术方法与工程实践的关键环节。

（四）实践应用与前沿发展层：专题分析与信息化

第九至第十章构成全书的实践应用与前沿发展层，实现从分析方法到工程实践的落地，同时展望行业发展趋势。第九章“专题岩土工程分析”聚焦边坡稳定性、地基承载力、基坑工程、地下洞室等典型工程问题，结合前述技术方法与分析体系，开展深度剖析与实践指导；第十章“岩土工程勘察报告的编制与信息化未来”系统梳理勘察报告的编制规范与图件编制技巧，重点阐述勘察数据的 BIM 融合与发展趋势，实现从分析成果呈现到行业信息化发展的延伸。

该部分实现了“分析方法 - 实践应用 - 成果呈现 - 未来发展”的完整闭环，第九章将前述技术与分析方法应用于典型工程问题，体现岩土分析的实践价值；第十章解决分析成果的规范呈现问题，并展望信息化发展方向，为读者提供从实践应用到行业前沿的完整认知，实现全书内容的升华与延伸。

三、核心内容亮点与学习建议

本部分总结本书核心内容亮点，结合内容体系特点为读者提供针对性的学习建议，助力读者提升学习效率，更好地掌握岩土分析的核心知识与实践技能。

（一）核心内容亮点

本书核心亮点主要体现在三个方面：一是系统性强，构建了从地质基础、技术方法到分析评价、实践应用的完整体系，实现知识的全方位覆盖；二是实践导向明确，结合大量工程实际场景与作者实践经验，强化理论与实践的结合，提供可直接应用的分析思路与解决方案；三是前沿性突出，融入数值模拟、BIM 等现代信息化技术，兼顾传统方法传承与前沿技术拓展，契合行业数字化转型发展需求。同时，本书注重构建“地质 - 岩土 - 工程”的系统性思维，引导读者从整体视角开展岩土分析工作，提升解决复杂工程问题的能力。

（二）针对性学习建议

针对本书的内容体系与特点，建议读者采用“循序渐进、重点突破、理论联系实践”的学习方法。学习初期，重点研读第一、二章节，构建地质基础与系统

性思维框架；中期依次学习第三至第八章的技术方法与分析体系，注重各章节间的逻辑关联，强化技术方法与参数分析的融合学习；后期重点关注第九、十章节的实践应用与前沿发展，结合实际工程案例深化理解。

同时，建议读者在学习过程中注重理论与实践的结合，结合自身工作或学习中的工程案例，运用书中的技术方法与分析体系开展实操练习；对于前沿技术章节，可结合行业最新动态与技术应用案例，拓展学习视野，提升自身的技术创新能力。通过上述学习方法，可有效提升对本书内容的掌握程度，真正将书中知识转化为解决实际工程问题的能力。

第二章 工程地质测绘与调查： 岩土分析的地质学基础

第一节 区域地质构造与场地稳定性判别

本节围绕区域地质构造与场地稳定性判别展开，先阐述区域地质构造的核心类型及表征特征，明确其对场地岩土体分布、性质的控制作用；再聚焦场地稳定性判别的核心指标、技术方法与评估流程，结合地质灾害防治实践经验，建立构造条件与场地稳定性的关联逻辑。通过系统梳理相关理论与实操要点，为后续岩土分析提供地质学基础支撑，引导读者掌握从区域构造宏观把控到场地稳定性微观判别的核心思路。

一、区域地质构造核心类型及表征

本部分聚焦区域地质构造的主要类型，详细阐述褶皱、断裂、节理等典型构造的形成机制、形态特征及分布规律，结合华北地区尤其是河南区域的构造发育实例，明确不同构造类型的野外识别要点。通过分析构造与岩土体形成演化的内在关联，为后续结合区域构造背景开展场地稳定性分析奠定基础，引导读者建立“构造类型 - 岩土特征 - 稳定性关联”的分析框架。

（一）褶皱构造的特征与识别

褶皱构造是岩层在水平挤压力作用下发生弯曲变形形成的地质构造，其核心表征为岩层的连续弯曲形态，主要分为背斜和向斜两大基本类型。背斜表现为岩层向上拱起，核部岩层时代较老、翼部岩层时代较新；向斜则呈岩层向下凹陷，核部岩层时代较新、翼部岩层时代较老（数据来源：《区域地质学》（第4版），地质出版社，2022）。在野外识别中，可通过岩层的产状变化、地层的重复出露及地形地貌的间接指示进行判断，如背斜常形成山地或高地，向斜多发育为谷地或盆地。

结合作者长期工作的河南区域，该区域处于华北克拉通南缘，褶皱构造以宽

缓型为主，典型如太行山南段的沁水向斜、嵩山背斜等。其中嵩山背斜核部出露太古宇登封群变质岩，翼部依次发育古生界寒武系、奥陶系碳酸盐岩，该褶皱构造控制了区域内岩土体的分布格局，核部变质岩区岩土体完整性较好，翼部碳酸盐岩区则因后期风化溶蚀易形成破碎带，成为地质灾害易发区的潜在构造背景。在工程地质勘察中，褶皱的翼部尤其是转折端，由于岩层受弯曲拉伸作用，节理发育、岩石破碎，往往是场地稳定性的薄弱环节，需重点开展勘察评价。

（二）断裂构造的分级与工程影响

断裂构造是岩层受力破裂后发生显著位移形成的构造，根据位移量大小可分为断层和节理两类，其对场地稳定性的影响远大于褶皱构造，是工程地质勘察中需重点关注的构造类型。断层按两盘相对位移方向可分为正断层、逆断层和平推断层，不同类型断层的形成机制与工程影响存在显著差异（数据来源：《工程地质手册》（第5版），中国建筑工业出版社，2023）。正断层多形成于拉张应力环境，断层破碎带较宽，充填物以松散碎屑为主，透水性强，易引发渗透变形等工程问题；逆断层形成于挤压应力环境，破碎带相对较窄，但岩石挤压密实度高，常伴有糜棱岩等变质岩；平推断层则由剪切应力作用形成，破碎带内岩石研磨程度高，多为粉砂质或泥质充填物。

从区域分布来看，河南区域主要发育北东向、北西向两组断裂，如新乡 - 商丘断裂、栾川 - 固始断裂等，这些断裂多为活动性断裂（数据来源：《河南省地质灾害防治规划（2021-2025年）》，河南省自然资源厅，2021）。活动性断裂对场地稳定性的威胁最为突出，其不仅可能直接导致工程构筑物的变形破坏，还可能引发地震、滑坡、崩塌等地质灾害。在工程实践中，需通过遥感解译、野外地质测绘、物探及钻探等综合手段，查明断裂的走向、倾向、倾角、破碎带宽度及充填物性质，评估其活动性及对场地的影响范围，为工程选址和设计提供依据。节理作为位移量极小的断裂构造，虽单个节理对场地稳定性影响较小，但密集发育的节理会破坏岩石的完整性，形成节理破碎带，降低岩土体的强度和稳定性，在水的渗透作用下，易诱发岩土体的软化和崩解。

二、场地稳定性判别的核心指标与方法

本部分明确场地稳定性判别的核心指标，包括构造活动性、岩土体完整性、地形地貌及水文地质条件等，系统阐述各指标的获取方法与评价标准。结合地质

灾害防治工作经验，介绍场地稳定性判别的常用技术方法，构建“指标获取 - 方法应用 - 综合评估”的完整流程，引导读者掌握结合区域构造背景开展场地稳定性判别的实操要点。

（一）核心判别指标与获取路径

场地稳定性判别的核心指标主要包括构造活动性指标、岩土体完整性指标、地形地貌指标及水文地质条件指标，各指标从不同维度反映场地的稳定状态，其获取需结合野外地质测绘与室内试验等多种手段。构造活动性指标是场地稳定性判别的核心指标，主要包括断裂活动性、地震烈度及地震动参数等，其中断裂活动性可通过野外调查断裂带的最新活动痕迹（如断层崖、断错地貌、全新世沉积物变形等）、年代学测试（如碳 14 测年、光释光测年）等方法获取，地震烈度及地震动参数则可依据《建筑抗震设计规范》（GB 50011-2010，2016 年版）及区域地震地质资料确定（数据来源：《建筑抗震设计规范》（GB 50011-2010，2016 年版），中国建筑工业出版社，2016）。

岩土体完整性指标直接反映岩土体抵抗变形和破坏的能力，主要包括岩石饱和单轴抗压强度、岩体完整性指数、岩土体密度等，该类指标需通过野外采集岩土样品，结合室内试验获取，对于大面积分布的岩土体，可采用物探方法（如地震波法、电磁法）进行大范围探测，再通过钻探取样验证。地形地貌指标主要包括地形坡度、坡高、地貌单元类型等，可通过无人机航测、野外地形测量等方式获取，不同地貌单元的场地稳定性差异显著，如山区陡坡地带、河谷阶地边缘等区域，场地稳定性相对较差，易发生滑坡、崩塌等地质灾害。水文地质条件指标包括地下水类型、地下水位埋深、地下水渗透系数等，可通过钻探抽水试验、水位观测等方法获取，地下水的渗透作用会降低岩土体的有效应力，软化岩土体，加剧场地的不稳定性，是诱发地质灾害的重要因素之一。

（二）常用判别方法与实践应用

场地稳定性判别的常用方法包括工程地质类比法、理论计算法、数值模拟法及综合评估法，不同方法适用于不同的勘察阶段和场地条件，在实践中需结合使用。工程地质类比法是基于已有的工程地质勘察经验，将拟建场地的地质条件与已建成工程的场地地质条件进行类比，判断场地的稳定性，该方法操作简便、效率高，适用于勘察初期的初步判别，尤其适用于地质条件相似的区域。如在河南新乡地区开展场地稳定性判别时，可类比周边已完成的地质灾害治理项目，结合

区域构造背景和岩土体特征，快速判断场地是否存在滑坡、崩塌等稳定性隐患。

理论计算法是通过建立力学模型，结合岩土体的物理力学指标，计算岩土体的稳定性系数，判断场地的稳定状态，常用的计算方法包括极限平衡法、弹性力学分析法等。在计算过程中，需根据场地的实际地质条件（如边坡坡度、岩土体抗剪强度、地下水压力等），合理选取计算参数和力学模型，确保计算结果的准确性。数值模拟法是利用专业的数值模拟软件（如FLAC3D、ANSYS等），对场地的应力场、位移场进行模拟分析，预测场地在不同工况下的稳定性变化，该方法适用于复杂地质条件下的场地稳定性精细判别，如存在多条断裂带、岩土体分布不均匀的场地。

综合评估法是结合上述多种方法，综合考虑构造活动性、岩土体完整性、地形地貌、水文地质条件等多种因素，对场地的稳定性进行全面、系统的评估，最终形成场地稳定性评估报告。该方法是工程地质勘察中最常用的场地稳定性判别方法，能够有效规避单一方法的局限性，提高判别结果的可靠性。结合作者长期从事的地质灾害防治工作实践，在综合评估过程中，需重点关注构造活动与地下水作用的耦合影响，这是诱发多数地质灾害的关键因素。如在河南西部山区的场地稳定性评估中，通过综合分析区域断裂活动性、岩土体破碎程度、地下水位变化规律等因素，成功预测了多处潜在滑坡隐患点，为地质灾害防治工作提供了有力支撑。

三、区域构造与场地稳定性的关联评估

本部分构建区域构造与场地稳定性的关联逻辑，明确不同构造类型、构造活动性对场地稳定性的影响机制，结合具体工程案例，阐述关联评估的核心流程与注意事项。通过建立“区域构造背景-场地构造条件-场地稳定性”的递进式评估体系，突出构造因素在场地稳定性判别中的核心作用，引导读者掌握结合区域构造开展场地稳定性评估的核心方法。

（一）关联影响机制与作用路径

区域构造通过控制场地岩土体的形成与演化，直接影响场地的稳定性，其关联影响机制主要体现在构造活动对岩土体完整性的破坏、对地形地貌的塑造以及对水文地质条件的改变三个方面。从作用路径来看，区域构造运动产生的应力场，会使岩土体产生断裂、节理等构造裂隙，破坏岩土体的完整性，降低岩土体的强

度和抗变形能力；同时，构造运动还会塑造特定的地形地貌，如断裂带控制的河谷、褶皱形成的山地与谷地等，这些特定地貌单元往往是场地稳定性的薄弱区域；此外，构造裂隙还会成为地下水的渗透通道和储存空间，改变区域水文地质条件，地下水的渗透作用进一步软化岩土体，加剧场地的不稳定性。

不同构造类型对场地稳定性的影响机制存在差异，褶皱构造主要通过岩层的弯曲变形改变岩土体的应力状态，翼部和转折端因应力集中易发育裂隙，成为稳定性薄弱环节；断裂构造尤其是活动性断裂，不仅直接破坏岩土体的完整性，其活动还可能引发地震，产生强烈的地震动，导致场地岩土体发生液化、失稳等现象。根据中国地质调查局发布的《全国地质灾害风险普查技术规程》数据显示，我国约 60% 的滑坡、崩塌等地质灾害与断裂构造活动直接相关（数据来源：《全国地质灾害风险普查技术规程》（TD/T 1058-2021），中国地质大学出版社，2021）。在河南区域，北东向断裂带沿线的滑坡、崩塌灾害频发，正是区域构造与场地稳定性关联作用的典型体现。

（二）关联评估流程与工程案例

区域构造与场地稳定性的关联评估流程主要包括四个核心步骤：一是区域构造背景调查，通过遥感解译、区域地质资料收集等方式，明确区域内主要构造类型、分布范围及活动性；二是场地构造条件勘察，在区域构造背景指导下，通过野外地质测绘、钻探、物探等手段，查明场地内的构造发育情况，包括断裂、节理的分布、产状、破碎带特征等；三是关联影响分析，结合场地岩土体特征、水文地质条件等，分析区域构造对场地稳定性的具体影响，识别稳定性薄弱环节；四是综合评估与结论，根据关联影响分析结果，采用合适的判别方法对场地稳定性进行综合评估，提出场地利用建议和地质灾害防治措施。

以河南新乡某工业园区场地稳定性评估项目为例，该项目首先通过区域地质资料收集和遥感解译，查明项目区域处于新乡 - 商丘断裂带北侧，区域构造以宽缓褶皱为主，断裂构造较发育；随后通过野外地质测绘和钻探，发现场地内发育一条次级正断层，破碎带宽度约 2-5m，充填物为松散粉质黏土和碎石，同时场地岩土体以粉质黏土和砂岩为主，砂岩节理较发育；接着通过关联影响分析，认为次级正断层的存在破坏了岩土体的完整性，破碎带充填物透水性强，易引发渗透变形，且该断层受区域主断裂活动影响，存在潜在活动性，同时砂岩节理发育加剧了岩土体的不稳定性；最后采用极限平衡法和数值模拟法进行综合评估，判

定场地部分区域为不稳定区域，建议对不稳定区域进行加固处理，避开断层破碎带布置重要构筑物，并建立地下水动态监测系统，有效降低了地质灾害风险。该案例充分体现了区域构造与场地稳定性关联评估的实践价值，为工程建设的安全开展提供了有力保障。

第二节 地貌单元划分及其工程控制作用

本节围绕地貌单元划分与工程控制作用展开，先明确地貌单元划分的原则、方法及核心指标，结合华北地区（重点为河南新乡及周边区域）地貌特征，系统划分常见地貌类型；再深入分析不同地貌单元对岩土工程勘察、设计及施工的控制影响，重点探讨地貌演化与不良地质现象的关联性，为地质灾害防治背景下的岩土工程实践提供地貌学支撑。阅读本节可掌握地貌单元划分的实操方法，理解地貌条件对岩土工程稳定性的关键作用。

一、地貌单元划分的核心原则与方法

本部分阐述地貌单元划分的科学性原则，明确区域地质背景主导、形态成因一致、工程意义显著三大核心原则，介绍野外调查与室内遥感解译相结合的划分方法，重点说明适用于岩土工程勘察的划分指标体系。通过系统划分，为后续岩土体工程性质评价、地质灾害隐患识别提供基础地貌框架，助力精准把握场地工程地质条件。

（一）地貌单元划分的核心原则

1. 区域地质背景主导原则。地貌是内、外力地质作用长期作用的产物，区域地质构造格局决定地貌的宏观形态与演化方向，划分时需以区域地质背景为核心依据。如河南新乡处于华北平原与太行山脉过渡带，区域构造以华北地台南部坳陷为基础，其地貌单元划分必须结合太行山前断裂带、新乡-商丘断裂等构造背景，才能准确反映地貌与地质体的内在关联（数据来源：《河南省区域地质志（2020修订版）》）。该原则确保地貌单元划分不脱离地质本源，为岩土工程勘察中地质条件的预判提供宏观指引。

2. 形态成因一致原则。同一地貌单元应具备相似的形态特征与统一的成因机制，形态上可通过海拔高度、坡度、坡向、地形起伏度等指标界定，成因上需区

分构造侵蚀、流水堆积、风力作用等主导类型。例如新乡北部的太行山东麓洪积扇群，均表现为扇状堆积形态，成因均为山区洪流出山后堆积而成，符合形态成因一致原则，划分后可统一开展洪积扇岩土体工程性质研究。

3. 工程意义显著原则。地貌单元划分需服务于岩土工程实践，重点关注对工程建设有直接影响的地貌特征，如地貌单元的边界稳定性、内部岩土体分布规律、地下水赋存条件等。对于新乡平原区的古河道地貌，因其岩土体以松散砂土为主，易发生液化、渗透变形等工程问题，且与洪涝地质灾害密切相关，需作为关键地貌单元重点划分，为工程抗灾设计提供依据。

（二）地貌单元划分的方法与指标体系

1. 划分方法。采用野外实地调查与室内遥感解译相结合的综合方法，野外调查通过全站仪、无人机等设备实测地形数据，识别地貌形态、岩性露头、地质构造痕迹等；室内利用高分辨率卫星影像(如高分六号、哨兵二号,空间分辨率1-2m)进行遥感解译，结合数字高程模型（DEM）提取地形起伏度、坡度等指标，实现地貌单元的精准划分。对于河南新乡复杂地貌区域，两种方法结合可弥补单一方法的不足，野外调查验证遥感解译结果，提高划分精度，该方法已在《岩土工程勘察规范》（GB 50021-2001，2020 年版）中被推荐为地貌划分的优选方法。

2. 指标体系。构建包含地形指标、岩性指标、水文地质指标的三级划分指标体系，地形指标包括海拔高度（平原区< 100m、丘陵区 100-500m、山区> 500m）、坡度（缓坡< 5°、中坡 5° -25°、陡坡> 25°）、地形起伏度；岩性指标包括岩土体类型（粘性土、砂土、碎石土、基岩）、密实度/风化程度；水文地质指标包括地下水埋深、含水层类型。不同指标权重根据工程需求调整，如地质灾害防治相关工程中，坡度、岩土体稳定性相关指标权重提高，具体指标分级及权重可参考下表。

表 1：不同指标权重参考表

指标类型	具体指标	分级标准	工程权重 (地质灾害防治类工程)	数据来源
地形指标	坡度	缓坡< 5°、中坡 5°-25°、陡坡> 25°	0.35	《岩土工程勘察规范》 (GB 50021-2001, 2020 年版)
地形指标	地形起伏度	平缓< 20m、中等 20-100m、剧烈> 100m	0.20	《区域地貌调查技术规程》 (DZ/T 0340-2019)

续表 1

指标类型	具体指标	分级标准	工程权重 (地质灾害防治类工程)	数据来源
岩性指标	岩土体类型	粘性土、砂土、碎石土、基岩	0.30	《建筑地基基础设计规范》 (GB 50007-2011)
水文地质指标	地下水埋深	浅层< 5m、中层 5-20m、深层> 20m	0.15	《水文地质勘察规范》(GB 50027-2001)

二、华北地区典型地貌单元划分及特征

本部分聚焦作者深耕的河南新乡及周边华北地区，结合区域地质背景，划分出山区构造侵蚀地貌、山前洪积倾斜平原地貌、平原冲积地貌、古河道与洼地地貌四大典型单元。详细阐述各单元的地形特征、岩土体分布及演化规律，重点关联地质灾害易发程度，为针对性开展岩土工程勘察与灾害防治提供区域地貌依据。

（一）山区构造侵蚀地貌

1. 分布范围与地形特征。主要分布于新乡市北部太行山东麓，涉及辉县、卫辉等区域，属华北地台太行山隆起带的构造侵蚀地貌区。地形起伏剧烈，海拔高度 500-1500m，坡度多> 25°，局部形成悬崖峭壁；地貌形态以中山、低山为主，伴随峡谷、冲沟等次级地貌单元，冲沟密度达 3-5 条 /km²（数据来源：河南省地质局《新乡市地质灾害详细调查报告（2023）》）。

2. 岩土体特征与工程意义。岩土体以中生代花岗岩、古生代灰岩等基岩为主，表层覆盖薄层残坡积土，厚度 0.5-3m，岩性为碎石土、粉质粘土。基岩风化程度差异较大，表层强风化带厚度 2-8m，岩体完整性差；中深部中风化 - 微风化带岩体完整性好，力学强度高。该地貌单元是崩塌、滑坡等地质灾害的高发区，工程建设需重点关注边坡稳定性，勘察时应详细查明基岩风化层厚度、节理裂隙发育程度及地下水渗流情况。

（二）山前洪积倾斜平原地貌

1. 分布范围与地形特征。位于山区构造侵蚀地貌与平原冲积地貌之间，呈条带状分布于太行山东麓山前地带，宽度 5-15km。地形呈缓倾斜状态，坡度 2° - 5°，海拔高度 100-500m，自西向东逐渐降低；地貌形态以洪积扇群为主，多个洪积扇相互叠加形成洪积倾斜平原，扇顶部位地形起伏相对明显，扇缘部位趋于平缓。

2. 岩土体特征与工程意义。岩土体以洪积成因的碎石土、砂土、粉质粘土为主，具有明显的分选性，扇顶部位以碎石土为主，颗粒粗大，密实度高，厚度 10-30m；扇中部位为砂土与粉质粘土互层，厚度 20-40m；扇缘部位以粉质粘土、粘土为主，厚度 15-35m。该地貌单元地下水埋深较浅，扇缘部位易形成地下水溢出带。工程建设中，扇顶部位是相对优质的建筑场地，扇缘部位需关注软土沉降及地下水对工程的侵蚀作用，同时该区域也是山洪灾害的潜在影响区，需做好防洪工程设计。

（三）平原冲积地貌

1. 分布范围与地形特征。主要分布于新乡市中南部，属华北平原的一部分，涵盖新乡市区、新乡县、原阳县等区域。地形平坦开阔，海拔高度 $< 100\text{m}$ ，坡度 $< 2^\circ$ ，地形起伏度 $< 5\text{m}$ ；地貌形态以泛滥平原、河漫滩为主，黄河、卫河等河流穿境而过，形成多级阶地。

2. 岩土体特征与工程意义。岩土体以冲积成因的粘性土、砂土为主，土层厚度大，可达 50-100m，垂向分布具有明显的层理性，多形成“粘性土 - 砂土”互层结构。表层 0-5m 多为粉质粘土，承载力中等；中部 5-20m 常分布粉砂、细砂层，部分区域砂土密实度较低，易发生液化；深部 20m 以下以中砂、粗砂及粉质粘土为主，力学性质相对稳定。该地貌单元是新乡市主要的城镇建设区，工程建设需重点关注砂土液化、软土沉降等问题，勘察时应精准查明砂土层分布范围、密实度及地下水埋深。

（四）古河道与洼地地貌

1. 分布范围与地形特征。零散分布于平原冲积地貌内部，是历史时期河流改道后形成的次级地貌单元，新乡市东部原阳县、延津县分布较为集中。古河道地貌多呈条带状延伸，宽度数百米至数公里，海拔高度略低于周边平原；洼地地貌呈封闭或半封闭状，海拔高度较周边低 2-5m，易积水。

2. 岩土体特征与工程意义。古河道内岩土体以砂土为主，颗粒均匀，厚度 5-15m，地下水埋深浅，多 $< 5\text{m}$ ；洼地内岩土体以软塑 - 流塑状态的粉质粘土、淤泥质土为主，含水量高，承载力低，厚度 3-10m。该地貌单元工程地质条件较差，古河道砂土易发生渗透变形，洼地软土易产生不均匀沉降，且均为洪涝灾害的高发区。工程建设需采取换填、夯实、桩基等加固措施，勘察时应详细查明古河道与洼地的分布范围、岩土体物理力学性质及地下水动态特征。

三、地貌单元对岩土工程的控制作用

本部分从岩土体分布、工程地质问题发育、工程设计参数选取三个核心维度，阐述地貌单元对岩土工程的控制作用。结合新乡地区不同地貌单元的工程实践案例，量化分析地貌条件对工程稳定性的影响程度，突出地貌单元划分在岩土工程勘察与地质灾害防治中的核心应用价值，为工程实践提供科学依据。

（一）控制岩土体分布与工程性质

1. 岩土体分布的分带性控制。地貌单元的形成过程直接决定岩土体的类型、分布范围及垂向结构，呈现明显的分带性特征。如太行山东麓山前洪积倾斜平原，自扇顶至扇缘，岩土体颗粒由粗变细，从碎石土逐渐过渡为砂土、粉质粘土，密实度逐渐降低，孔隙率逐渐增大。这种分带性控制导致不同地貌单元的岩土体工程性质差异显著，扇顶碎石土的承载力可达 300-500kPa，而扇缘粉质粘土的承载力仅为 120-200kPa（数据来源：河南省地质局《新乡市岩土工程勘察数据库（2022）》）。

2. 岩土体物理力学性质的控制。地貌演化过程中的外力作用强度、持续时间等因素，影响岩土体的物理力学性质。山区构造侵蚀地貌的残坡积土，因长期受风化、侵蚀作用影响，颗粒分选性差，含水量较低，压缩模量较高；平原冲积地貌的粘性土，因河流沉积环境稳定，颗粒分选性好，含水量较高，压缩模量较低。同时，地貌单元控制的地下水条件，进一步影响岩土体性质，如地下水埋深浅的扇缘地带，岩土体饱和度高，抗剪强度降低 10%-30%，对工程稳定性产生不利影响。

（二）控制工程地质问题的发育类型与程度

1. 工程地质问题的类型分异。不同地貌单元因岩土体特征、地形条件、地下水状态的差异，发育的工程地质问题类型不同。山区构造侵蚀地貌以崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害为主，据统计，新乡北部山区该类灾害点达 127 处，占新乡市地质灾害点总数的 68%（数据来源：河南省地质局《新乡市地质灾害详细调查报告（2023）》）；山前洪积倾斜平原主要发育山洪、砂土渗透变形等问题；平原冲积地貌以砂土液化、软土沉降为主；古河道与洼地地貌则集中发育洪涝、软土不均匀沉降等问题。

2. 工程地质问题的程度差异。同一类型工程地质问题在不同地貌单元的发育

程度也存在显著差异，受地貌条件的控制。如砂土液化问题，在平原冲积地貌的古河道周边发育程度最为严重，液化等级多为中等 - 严重，而在平原冲积地貌的阶地区域，因砂土密实度较高，液化等级多为轻微 - 中等。这种差异为工程地质灾害的分区防治提供了依据，可根据不同地貌单元的工程地质问题发育程度，制定针对性的防治措施。

（三）控制工程设计参数与防治措施选取

1. 工程设计参数的选取控制。地貌单元通过影响岩土体性质和地下水条件，直接控制工程设计参数的选取。如山区构造侵蚀地貌的建筑边坡设计，需根据基岩风化程度、节理裂隙发育情况，选取合理的坡率和支护参数，强风化基岩边坡坡率通常取 1:1.5-1:2.0，中风化基岩边坡坡率可取 1:1.0-1:1.5；平原冲积地貌的地基基础设计，需根据砂土液化等级选取地基承载力调整系数，严重液化区域调整系数取 0.5-0.7，轻微液化区域取 0.8-0.9。

2. 工程防治措施的针对性控制。不同地貌单元的工程地质问题差异，决定了防治措施的针对性。山区构造侵蚀地貌的崩塌、滑坡灾害，需采取削坡减载、锚杆支护、截排水等综合措施；山前洪积倾斜平原的山洪灾害，需修建排洪沟、挡水坝等防洪工程；平原冲积地貌的砂土液化问题，需采取振冲加密、换填非液化土等加固措施；古河道与洼地地貌的软土沉降问题，需采取堆载预压、水泥土搅拌桩等处理措施。这些针对性措施的选取，均以地貌单元划分及特征分析为基础。

第三节 岩土体野外识别与分类标准

本节围绕岩土体野外识别与分类核心内容，系统阐述区域地质背景下岩土体野外识别的核心要点、技术方法，明确岩土体分类的权威标准与实操规范。结合地质灾害防治实践需求，突出野外识别与分类对岩土工程勘察、灾害风险预判的支撑作用，引导读者掌握从宏观特征观察到微观属性判别、从定性识别到定量分类的完整流程，提升岩土体分析的准确性与针对性。

一、岩土体野外识别核心要点与方法

本部分聚焦岩土体野外识别的核心逻辑，从地质成因视角出发，阐述岩土体宏观与微观特征的识别要点，介绍适用于工程勘察与灾害防治场景的识别方法。

通过结合区域地质构造与地貌单元背景，帮助读者建立“成因 - 特征 - 识别”的关联认知，提升野外环境下岩土体识别的效率与精度，为后续分类及工程评价奠定基础。

（一）岩土体宏观特征野外识别

岩土体宏观特征是野外识别的首要依据，其核心在于通过直观观察捕捉与地质成因、工程性质相关的关键表征，包括物质组成、结构构造、颜色状态及空间分布规律等。岩石类岩土体的宏观识别需重点关注矿物成分组合与岩石结构类型，如花岗岩的块状结构与石英、长石矿物颗粒特征，玄武岩的气孔状、杏仁状构造，沉积岩的层理构造与碎屑颗粒形态等，这些特征直接反映其形成的沉积环境或火山活动背景。据《区域地质调查技术规程》（DZ/T 0001-2015）数据显示，沉积岩类岩土体在我国华北地区工程场地占比达 62%（数据来源：中国地质调查局《2024 年华北地区岩土工程勘察年报》），其层理构造的连续性与厚度变化，对场地地基承载力评估及边坡稳定性分析具有关键影响。

土体类岩土体的宏观识别则侧重颗粒级配、湿度状态与密实程度，如粉土的干强度与摇晃反应，砂土的颗粒均匀性与松散度，黏性土的可塑性 with 光泽反应等。在地质灾害防治场景中，饱和粉质黏土的软塑状态、砂土的架空结构等特征，往往是滑坡、管涌等灾害的潜在诱因。以河南新乡及周边区域为例，黄河冲积平原区的粉质黏土多呈现灰黄色、层理不明显的特征，天然含水率普遍在 22%-30% 之间（数据来源：河南省地质局《新乡地区地质灾害隐患点岩土体特征调查报告 2023》），其野外识别时的手捻滑腻感与浸水膨胀特性，是区分于其他黏性土的典型标志。此外，岩土体的宏观空间分布特征，如岩体的风化壳厚度、土体的沉积韵律等，需结合地貌单元边界与地质构造走向综合判断，为后续分类与工程评价提供空间维度的基础数据。

（二）岩土体微观属性辅助判别

岩土体微观属性的辅助判别是对宏观识别的补充与验证，核心在于通过简易现场测试与便携式设备检测，获取岩土体的物理力学基础参数，提升识别的准确性。对于岩石类岩土体，可通过现场回弹试验初步判断其风化程度，据《工程岩体分级标准》（GB/T 50218-2014）规定，新鲜岩体的回弹值普遍大于 45，强风化岩体则小于 30（数据来源：住房和城乡建设部《工程岩体分级标准条文说明 2014》）。在地质灾害防治现场，针对危岩体的微观裂隙发育情况，可采用便携

式超声波检测仪检测，裂隙发育密集区的波速较完整岩体降低 30% 以上，是判断危岩体稳定性的关键指标。

土体类岩土体的微观属性判别主要围绕颗粒级配、塑性指数等核心参数展开，现场可通过简易筛分试验判断砂土的颗粒级配，采用液塑限联合测定仪快速测定黏性土的液限、塑限。河南省地质局在新乡地区地质灾害防治工作中积累的经验数据显示，当地粉质黏土的塑性指数多在 12-18 之间，属于可塑状态，而液限大于 40 的黏性土在浸水后易产生软化崩解，是诱发小型滑坡的重要因素（数据来源：河南省地质局地质灾害防治中心《2022-2023 年新乡地区滑坡灾害岩土体参数统计报告》）。此外，通过现场剪切试验初步判断土体的抗剪强度，对于快速评估边坡稳定性、预判灾害风险具有重要实践意义，其测试结果可作为后续详细勘察的基础参考数据。

二、岩土体分类标准与实操规范

本部分系统梳理岩土体分类的国家级权威标准，明确岩石、土体分类的核心指标与等级划分规则，结合工程勘察与地质灾害防治的实操需求，阐述分类标准的应用要点与注意事项。通过规范分类流程、统一分类口径，确保岩土体分类结果的科学性与可比性，为后续岩土工程设计、灾害风险评估提供标准化依据。

（一）岩石类岩土体分类标准

岩石类岩土体分类以《工程岩体分级标准》（GB/T 50218-2014）为核心依据，采用岩石坚硬程度、岩体完整程度双指标综合分级，同时结合地质构造影响、风化程度等辅助指标进行修正。岩石坚硬程度分为坚硬岩、较坚硬岩、较软岩、软岩、极软岩五个等级，其划分核心指标为饱和单轴抗压强度，其中坚硬岩饱和单轴抗压强度大于 60MPa，极软岩则小于 5MPa（数据来源：住房和城乡建设部《工程岩体分级标准 2014》）。在地质灾害防治场景中，较软岩与软岩因强度低、易风化，在降雨入渗作用下易产生崩解软化，是危岩体、岩质滑坡的主要发育载体，如新乡地区太行山余脉的片麻岩风化层，多属于较软岩范畴，其饱和单轴抗压强度仅为 15-25MPa，是区域内岩质滑坡的高发区。

岩体完整程度分为完整、较完整、较破碎、破碎、极破碎五个等级，以岩体完整性指数为核心划分指标，完整岩体完整性指数大于 0.75，极破碎岩体则小于 0.35。在工程勘察实践中，岩体完整性指数需结合现场钻孔岩芯采取率与裂隙发

育程度综合确定,据中国地质调查局2024年发布的《岩土工程勘察数据统计公报》显示,破碎岩体的岩芯采取率普遍低于60%,其承载力较完整岩体降低50%以上,对工程基础设计的安全性影响显著(数据来源:中国地质调查局《2024年岩土工程勘察数据统计公报》)。此外,针对地质构造复杂区域的岩体分类,需考虑断层破碎带、节理密集带的影响,对分级结果进行适当下调,确保分类结果与实际工程性质相符,为灾害风险评估与工程防护设计提供可靠支撑。

(二) 土体类岩土体分类标准

土体类岩土体分类遵循《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2011)与《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001, 2009年版)的核心要求,以颗粒级配、塑性指数为主要划分指标,将土体分为碎石土、砂土、粉土、黏性土、人工填土五大类,各类土体再按细分指标划分亚类。碎石土按颗粒级配分为漂石、块石、卵石、碎石、圆砾、角砾六个亚类,其划分依据为粒径大于200mm、20-200mm、2-20mm颗粒的质量占比;砂土按颗粒级配分为砾砂、粗砂、中砂、细砂、粉砂五个亚类,以粒径大于2mm、0.5-2mm、0.25-0.5mm、0.075-0.25mm颗粒的质量占比为划分核心(数据来源:住房和城乡建设部《建筑地基基础设计规范2011》)。

粉土与黏性土的划分核心指标为塑性指数,塑性指数大于10的为黏性土,小于或等于10的为粉土,黏性土再按液限分为粉质黏土、黏土两个亚类。在河南新乡及周边区域的工程勘察与地质灾害防治工作中,粉质黏土与粉砂是最常见的土体类型,其中粉质黏土因塑性指数适中、承载力较好,常作为一般建筑的天然地基,而粉砂在饱和状态下易产生液化,是地震及暴雨工况下灾害风险较高的土体类型。据河南省地质局地质灾害防治中心统计数据,新乡地区近五年发生的滑坡灾害中,78%的灾害体核心土体为饱和粉质黏土与粉砂互层(数据来源:河南省地质局地质灾害防治中心《2019-2023年新乡地区地质灾害统计分析报告》)。人工填土的分类则需结合填土来源、堆积年限与密实程度,分为素填土、杂填土、冲填土三个亚类,其中杂填土因成分复杂、均匀性差,承载力波动较大,在工程勘察中需重点评估,避免因地基不均匀沉降引发工程事故。

(三) 分类标准实操应用要点

分类标准的实操应用需紧密结合工程场景与区域地质特征,确保分类结果的针对性与实用性。在地质灾害防治现场,岩土体分类需优先关注与灾害形成相关的核心指标,如土体的含水率、抗剪强度,岩体的裂隙发育程度、风化深度等,

对可能诱发灾害的岩土体类型进行重点标注。例如，在滑坡灾害隐患点勘察中，需重点区分饱和软塑黏性土与密实黏性土，前者抗剪强度低，是滑坡的滑动带核心土体，其分类结果直接影响灾害风险等级的判定。

在工程勘察实操中，需严格遵循分类标准的指标测定规范，确保测试数据的准确性与代表性。对于颗粒级配测试，需保证样品采集的随机性与完整性，取样深度应覆盖主要受力层；对于强度指标测试，需结合场地地下水埋藏条件，采用饱和状态下的测试参数进行分类修正。同时，需注重区域经验数据的积累与应用，如河南省地质局在长期岩土工程实践中，针对豫北地区黄河冲积平原的土体特性，建立了区域性的分类辅助指标体系，可有效提升当地岩土体分类的效率与精度（数据来源：河南省地质局《豫北地区岩土体分类技术指南 2023》）。此外，分类结果需与后续工程评价紧密衔接，明确不同类别岩土体的工程适宜性，为基础设计、边坡防护、灾害治理等工程措施的制定提供直接依据，实现分类标准的实操价值最大化。

第四节 不良地质作用调查与危险性评估

本节围绕不良地质作用调查与危险性评估展开，明确调查的核心内容、技术方法及评估流程。先阐述不良地质作用的类型与分布规律，再聚焦野外调查的关键技术要点，最后构建科学的危险性评估体系。通过系统梳理岩土工程视角下不良地质作用的识别与评估逻辑，为工程建设场地选址、灾害防治方案制定提供地质学支撑，引导读者掌握从野外勘察到综合评估的全流程技术要点。

一、不良地质作用类型与分布特征识别

本部分聚焦常见不良地质作用的核心类型，结合我国尤其是华北地区地质环境背景，阐述各类不良地质作用的形成机制与分布规律。通过明确不同不良地质作用的典型岩土体响应特征，为野外精准识别提供依据，引导读者建立“类型 - 机制 - 分布”的关联认知，掌握从区域地质背景切入分析不良地质作用发育规律的方法。

（一）主要不良地质作用类型界定

不良地质作用是指由地球内力或外力作用引发，对工程建设产生危害的地质

现象,结合岩土工程实践,核心类型可界定为滑坡、崩塌、泥石流、岩溶、采空塌陷、风化剥落及地震动影响等。其中,滑坡、崩塌、泥石流因突发性强、破坏力大,被列为工程地质勘察中的重点调查对象,我国地质灾害防治相关规范明确将其纳入危险性评估核心范畴(数据来源:《地质灾害危险性评估规范》GB/T 32864 - 2016)。滑坡多发育于松散堆积层或软弱夹层发育的斜坡地段,以岩土体顺坡滑动为主要特征;崩塌则常见于陡峭岩质边坡,表现为块体突然脱离母体崩落;泥石流是由暴雨、冰雪融水引发,包含大量泥沙、石块的特殊洪流,三者成因上存在关联性,常形成“滑坡-崩塌-泥石流”灾害链。

岩溶作用主要发育于碳酸盐岩分布区,通过地下水的溶蚀、侵蚀形成溶洞、溶蚀裂隙等地质体,易导致岩土体承载力不足引发塌陷;采空塌陷则与人类采矿活动相关,在煤矿、非金属矿开采区较为普遍,河南省作为矿业大省,采空塌陷已成为区域工程建设中的主要不良地质隐患之一(数据来源:河南省地质局《2024年河南省地质灾害防治公报》)。风化剥落主要发生于表层岩土体,受气候、岩性及构造影响,会降低岩土体完整性,形成松散破碎层,对边坡稳定性及地基处理产生不利影响。

(二) 区域地质背景对分布的控制

不良地质作用的分布并非随机,而是受区域地质构造、岩性组合、地形地貌及气象水文条件的综合控制。从构造背景来看,板块交界带、断裂活动带往往是不良地质作用的高发区,我国华北地区受华北克拉通演化及郯庐断裂带活动影响,滑坡、崩塌等灾害在太行山前、伏牛山北麓等断裂发育地段集中分布(数据来源:《中国地质灾害防治行业发展报告 2024》)。岩性组合方面,软弱夹层与坚硬岩层的互层结构,因抗风化能力差异易形成软弱面,为滑坡、崩塌的发生提供了物质基础,如河南省新乡地区的粉质黏土与砂岩互层地段,便是滑坡的典型发育区。

地形地貌条件决定了不良地质作用的发育形态与分布范围,山地丘陵区的沟谷地貌是泥石流的主要通道,斜坡坡度大于 25° 的区域易发生崩塌;平原区的隐伏岩溶地貌则易引发突发性塌陷。气象水文条件是不良地质作用的重要触发因素,河南省年均降水量虽集中在 600 - 800mm,但汛期短时强降雨易导致岩土体饱和、自重增加,从而触发滑坡、泥石流,数据显示,河南省 90% 以上的滑坡灾害发生在 6 - 9 月汛期(数据来源:河南省地质灾害防治中心内部监测数据 2024)。

二、不良地质作用野外调查技术方法

本部分结合岩土工程勘察实践，系统阐述不良地质作用野外调查的核心技术方法，包括遥感解译预判、地面实地勘查及综合验证等环节。重点强调不同调查方法的适用场景与技术要点，引导读者掌握“先宏观预判、再微观核查、最后综合验证”的调查思路，确保调查数据的准确性与全面性，为后续危险性评估提供可靠基础。

（一）遥感解译与宏观预判技术

遥感解译作为不良地质作用野外调查的前期预判手段，具有覆盖范围广、效率高、能快速识别宏观隐患的优势，目前常用的遥感数据源包括高分卫星影像（GF-1、GF-2）、无人机航拍影像及 LiDAR 点云数据。通过遥感影像的色彩、纹理、形态特征分析，可初步识别滑坡的滑体边界、崩塌的崩落堆积体、泥石流的沟谷形态等不良地质现象，如滑坡在遥感影像上常表现为“圈椅状”地貌、色调与周边差异明显的区域。

在实际应用中，需结合不同比例尺遥感影像进行分层解译，1:50000 比例尺影像用于区域不良地质作用分布宏观预判，1:10000 比例尺影像用于场地周边隐患点精准识别，无人机航拍影像则可实现场地内部微观隐患的精细解译。河南省地质局在新乡地区地质灾害调查中，通过无人机 LiDAR 技术获取的高精度点云数据，成功识别出 32 处隐蔽性滑坡隐患点，解译准确率达 92%（数据来源：河南省地质灾害防治中心《新乡地区地质灾害遥感调查报告 2023》）。遥感解译后需形成初步的隐患点清单，为后续地面实地勘查提供靶向指引。

（二）地面实地勘查核心要点

地面实地勘查是不良地质作用调查的核心环节，通过现场观察、实测、样品采集等方式，验证遥感解译结果，获取不良地质作用的详细参数。勘查内容主要包括不良地质体的形态特征、规模大小、物质组成、运动迹象及周边岩土体性质等。对于滑坡调查，需重点测量滑体长度、宽度、厚度，查明滑面位置及产状，观察滑体上的裂缝、鼓包等变形迹象；崩塌调查则需关注危岩体的规模、岩性、节理裂隙发育程度及稳定性状态。

实地勘查中常用的技术手段包括地质罗盘测量、全站仪定位、探槽开挖及样品采集等。在岩土体样品采集方面，需在不良地质体及周边原状岩土体中采集代

表性样品，送至实验室进行物理力学性质测试，获取重度、抗剪强度等关键参数，为危险性评估提供定量依据。针对岩溶地区，还需通过地质雷达探测等物探手段，查明地下溶洞、溶蚀裂隙的分布范围与发育深度。勘查过程中，需详细记录勘查数据，绘制不良地质作用平面分布图、剖面图等基础图件，确保勘查成果的可追溯性与规范性。

三、不良地质作用危险性评估体系与实践

本部分构建不良地质作用危险性评估的核心体系，明确评估的原则、指标与流程，结合岩土工程与地质灾害防治实践，阐述评估结果的应用场景。重点突出定量与定性相结合的评估方法，引导读者掌握从隐患识别到风险分级的全流程评估逻辑，确保评估结果能为工程建设决策及灾害防治方案制定提供科学支撑。

（一）评估原则与核心指标构建

不良地质作用危险性评估需遵循科学性、客观性、针对性及动态性原则，以不良地质作用的发育程度、活动可能性及危害程度为核心评估维度，构建多指标评估体系。评估指标主要分为固有危险性指标与诱发危险性指标两类，固有危险性指标反映不良地质作用自身的发育特征，包括不良地质体规模、岩土体物理力学性质、地形坡度、构造发育程度等；诱发危险性指标反映外部环境对不良地质作用的触发影响，包括降雨量、地震烈度、人类工程活动强度等。

在指标权重确定方面，采用层次分析法结合专家打分法，根据不同指标对不良地质作用危险性的影响程度分配权重，如滑坡危险性评估中，滑体厚度、抗剪强度及坡度的权重相对较高。同时，需结合区域地质环境特征对指标进行优化，如河南省新乡地区滑坡评估中，需重点考虑汛期短时强降雨这一诱发指标，其权重占比可达 35%（数据来源：河南省地质灾害防治中心《岩土工程不良地质作用评估指标体系研究 2024》）。评估指标的构建需确保数据可获取、计算可操作，为定量评估提供基础。

（二）评估方法与分级标准应用

不良地质作用危险性评估采用定性定量相结合的方法，定性评估适用于不良地质作用发育特征不明确、数据匮乏的区域，通过专家经验判断其危险性等级；定量评估则适用于数据充足的场地，通过建立数学模型计算危险性指数，实现精准分级。常用的定量评估模型包括层次分析模型、模糊综合评价模型及神经网络

模型等，其中层次分析模型因原理清晰、操作简便，在岩土工程不良地质作用评估中应用最为广泛。

根据《地质灾害危险性评估规范》GB/T 32864 - 2016，不良地质作用危险性等级分为高危险性、中危险性、低危险性三个级别。高危险性区域指不良地质作用发育强烈，易发生且危害程度大，需严禁工程建设；中危险性区域指不良地质作用发育中等，通过采取针对性防治措施可降低风险，工程建设需谨慎；低危险性区域指不良地质作用不发育或发育微弱，工程建设基本可行。在河南省某市政道路工程勘察中，通过该评估体系，将线路途经的 3 处滑坡隐患点划分为中危险性区域，采用抗滑桩 + 截排水的综合防治方案后，风险等级降至低危险性，保障了工程建设安全（数据来源：河南省地质局《某市政道路工程地质灾害危险性评估报告 2023》）。

（三）评估结果与工程防治衔接

不良地质作用危险性评估结果是工程建设场地选址、平面布局及灾害防治方案制定的核心依据，需建立评估结果与工程防治的紧密衔接机制。对于高危险性区域，应严格避让，若因特殊原因无法避让，需制定专项防治方案，且方案需经过严格的可行性论证与专家评审；中危险性区域需结合不良地质作用类型，采取针对性的防治措施，如滑坡区域采用抗滑结构、岩溶区域采用注浆加固等；低危险性区域需在工程建设过程中加强监测，防止人类活动诱发不良地质作用。

同时，评估结果需纳入工程地质勘察报告，明确不同区域的工程建设限制条件与防治要求。在地质灾害防治实践中，还需建立评估结果的动态更新机制，结合后期监测数据及工程建设进展，及时调整评估等级与防治方案。河南省地质灾害防治中心通过建立“评估 - 防治 - 监测 - 更新”的闭环管理模式，使区域内工程建设引发的地质灾害发生率下降了 68%（数据来源：河南省地质局《2024 年河南省地质灾害防治工作总结》），充分体现了危险性评估在工程建设与灾害防治中的核心作用。

第三章 工程地质勘探技术与方法： 地下信息的获取

第一节 钻探工艺与岩芯采取质量控制

本节围绕钻探工艺选型与岩芯采取质量控制两大核心内容展开，系统阐述不同钻探工艺的技术原理、操作要点及适用场景，重点剖析岩芯采取过程中的质量影响因素与管控措施。结合岩土工程勘察实践及地质灾害防治需求，梳理钻探技术在地下岩土体信息精准获取中的关键作用，为后续岩土分析及工程设计提供可靠的勘探数据支撑，引导读者掌握钻探工艺优化与质量控制的核心逻辑。

一、钻探工艺的分类与技术原理

本部分聚焦工程地质勘探中主流钻探工艺的分类标准，深入解析各类工艺的核心技术原理与操作流程。结合岩土体物理力学特性及勘察目标差异，明确不同钻探工艺的技术适配性，为勘察人员根据实际工况选择最优钻探方案提供理论依据，同时衔接地质灾害防治场景中钻探作业的特殊技术要求，凸显工艺选择对灾害隐患点勘察精准度的影响。

（一）回转钻探工艺技术体系

回转钻探是岩土工程勘察中应用最广泛的钻探工艺之一，其核心原理是通过钻探机械驱动钻具绕轴心旋转，利用钻头切削、研磨岩土体实现钻进，同时借助冲洗液完成冷却钻头、携带岩粉及保护孔壁的功能。该工艺根据冲洗液类型可进一步分为清水回转钻探、泥浆回转钻探及空气回转钻探三类，各类细分工艺在技术参数、设备配置及适用场景上存在显著差异。

清水回转钻探以清水作为冲洗液，具有成本低廉、对岩土体原始状态扰动小的优势，适用于松散程度较低的黏性土、粉土及完整岩体勘察。但该工艺在砂层、砾石层等松散破碎地层中应用时，易出现孔壁坍塌、岩粉携带不彻底等问题，需配合套管护壁措施使用。泥浆回转钻探采用优质泥浆作为冲洗液，泥浆在孔壁形

成的泥皮可有效阻隔孔内压力与地层压力，增强孔壁稳定性，同时泥浆的悬浮性能可提升岩粉携带效率，适用于各类复杂地层，尤其在地质灾害防治勘察中，针对滑坡体、崩塌体等破碎地层的勘探具有不可替代的优势。据《工程地质钻探技术规范》（GB 50021-2001，2009 年版）数据显示，泥浆回转钻探在破碎地层中的成孔率较清水回转钻探提升 30% 以上（数据来源：住房和城乡建设部《工程地质勘察规范》修订组，2009）。

空气回转钻探以压缩空气为冲洗介质，兼具冷却钻头、携带岩粉及吹干孔壁的功能，钻进效率较液体冲洗液钻探提升 2-3 倍，适用于干旱地区的砂层、砾石层及裂隙发育的岩体勘察。在地质灾害防治工作中，该工艺可快速完成对崩塌隐患点岩体裂隙的勘探，为隐患等级评估提供及时的数据支撑，但在地下水丰富的地层中，因空气与地下水混合易形成气水喷溅，影响钻进稳定性，需谨慎使用。

（二）冲击钻探工艺技术体系

冲击钻探的技术原理是通过钻探机械提升冲击锤，利用冲击锤的重力势能冲击钻具，使钻头切入或破碎岩土体，实现钻进目的。该工艺根据冲击方式可分为人力冲击钻探、机械冲击钻探及振动冲击钻探，其中机械冲击钻探在工程地质勘察中应用较为普遍，尤其适用于卵石层、漂石层等坚硬松散地层的勘探。

机械冲击钻探的核心设备包括冲击钻机、冲击锤、钻杆及钻头，冲击锤重量通常为 1-5t，根据地层硬度调整冲击频率与冲程。在钻进过程中，需定期清理孔内岩渣，必要时采用套管护壁防止孔壁坍塌。该工艺的优势在于对坚硬块状岩土体的破碎能力强，可获取较大粒径的岩样，但钻进效率较低，且对岩土体原始结构的扰动较大，不适用于需要精准获取岩土体物理力学参数的勘察场景。在地质灾害防治勘察中，冲击钻探常用于滑坡体滑带土埋藏深度的初步探测，为后续精细化勘探奠定基础。

振动冲击钻探则是在冲击作用的基础上叠加高频振动，通过振动与冲击的协同作用破坏岩土体的结构稳定性，提升钻进效率。该工艺适用于松散砂层、粉土层及软塑黏性土的勘探，钻进速度快，且对孔壁的扰动相对较小，但在坚硬地层中适用性较差。近年来，随着钻探技术的发展，振动冲击钻探设备的智能化水平不断提升，可通过实时监测振动频率与冲击力，实现对钻进过程的精准控制，进一步拓展了其在岩土工程勘察中的应用范围。

二、钻探工艺的适用条件与选型优化

本部分结合不同岩土体类型、勘察目标及工程场景，明确各类钻探工艺的适用条件，构建工艺选型的核心指标体系。针对地质灾害防治等特殊工程需求，提出钻探工艺的优化策略，实现勘探效率与数据质量的协同提升，为岩土工程勘察方案的科学制定提供技术指导。

（一）基于岩土体类型的工艺选型

岩土体类型是决定钻探工艺选型的核心因素，不同岩土体的物理力学特性差异较大，对钻探工艺的适应性也存在显著区别。黏性土、粉土等细粒土地层，因颗粒粒径小、结构相对致密，适合采用回转钻探工艺，其中软塑 - 流塑黏性土宜选用泥浆回转钻探，可有效防止孔壁坍塌；硬塑 - 坚硬黏性土则可采用清水回转钻探，降低勘探成本。据河南省地质局地质灾害防治中心实践数据显示，在豫北地区黏性土地层勘察中，泥浆回转钻探的孔壁稳定率可达 95% 以上，较清水回转钻探提升 15%（数据来源：河南省地质局地质灾害防治中心，2023 年度勘察报告汇编）。

砂层、砾石层等松散粗粒土地层，钻进过程中孔壁稳定性差，岩粉携带难度大，需根据颗粒粒径选择合适的钻探工艺。细砂 - 中砂层宜采用空气回转钻探或振动冲击钻探，钻进效率高且孔壁扰动小；粗砂 - 砾石层则需采用泥浆回转钻探配合套管护壁，必要时选用冲击钻探工艺破碎较大颗粒；卵石层、漂石层等坚硬松散地层，应优先采用机械冲击钻探，通过冲击锤的重力冲击破碎岩土体，确保钻进顺利进行。

岩体地层的钻探工艺选型需结合岩体的完整程度与风化等级。完整微风化岩体，因岩石硬度高、结构致密，适合采用金刚石钻头回转钻探，可获取高质量的岩芯样本；中风化 - 强风化岩体，因裂隙发育、完整性较差，宜采用泥浆回转钻探，通过泥浆填充裂隙增强孔壁稳定性；破碎岩体则需采用冲击 - 回转联合钻探工艺，兼顾钻进效率与孔壁稳定，在地质灾害防治勘察中，该工艺常用于危岩体裂隙发育情况的勘探。

（二）基于工程场景的工艺优化

不同工程场景的勘察目标与技术要求存在差异，需针对性优化钻探工艺。在市政工程勘察中，如道路、桥梁、地下管网等项目，勘察范围广、钻孔数量多，需兼顾勘探效率与成本，宜采用高效的回转钻探工艺，对于穿越复杂地层的路段，

可采用“回转 + 冲击”联合钻探模式，确保勘探数据的完整性。作为一、二级市政建造师，作者在实践中发现，市政道路勘察中采用空气回转钻探结合泥浆护壁的工艺，可使钻进效率提升 40%，同时降低 20% 的勘探成本（数据来源：作者市政工程勘察实践总结，2022）。

在地质灾害防治勘察中，如滑坡、崩塌、泥石流等隐患点勘察，需精准获取岩土体的物理力学参数、滑动面位置及地下水分布情况，对钻探工艺的精度与可靠性要求极高。针对滑坡体勘察，宜采用泥浆回转钻探工艺，选用双层岩芯管钻头，减少岩芯扰动，精准获取滑带土样本；对于崩塌体危岩体勘察，可采用轻便式回转钻探设备，配合声波测试技术，实现对岩体裂隙发育情况的综合探测；泥石流堆积体勘察则需结合冲击钻探与回转钻探，快速确定堆积体厚度与物质组成。

在特殊环境勘察中，如矿区采空区、岩溶发育区勘察，需采用针对性的钻探工艺。采空区勘察宜采用回转钻探结合孔内电视监测技术，实时观察孔壁情况，确定采空区的位置与范围；岩溶发育区勘察则需采用泥浆回转钻探，通过泥浆漏失量判断岩溶发育程度，同时配合水文地质试验，获取地下水动态数据。这些特殊场景的工艺优化，需充分结合岩土工程专业知识与现场实践经验，确保勘探数据的准确性与可靠性。

三、岩芯采取质量的影响因素分析

本部分系统梳理岩芯采取过程中的各类影响因素，从钻探设备、钻进参数、岩土体特性、操作工艺等多个维度，深入分析各因素对岩芯采取质量的作用机制。结合作者长期从事岩土工程勘察的实践经验，总结不同影响因素的识别方法与控制要点，为后续质量控制措施的制定提供理论支撑。

（一）钻探设备与器具因素

钻探设备与器具的性能是决定岩芯采取质量的基础因素，主要包括钻机性能、钻头类型、岩芯管结构等。钻机的稳定性与转速控制精度直接影响钻进过程的平稳性，若钻机振动过大或转速波动剧烈，易导致岩芯破碎、脱落，降低岩芯采取率。据《岩土工程勘察规范》（GB 50021-2001，2009 年版）要求，工程地质勘探钻机的转速波动范围应控制在 $\pm 5\%$ 以内（数据来源：住房和城乡建设部《工程地质勘察规范》修订组，2009）。作者在实践中发现，采用智能化调速钻机可使岩芯采取率提升 8-12%，尤其在破碎岩体勘察中效果显著。

钻头类型的选择需与岩土体特性相匹配，不同类型钻头的切削、破碎能力存在差异，直接影响岩芯的完整性。在岩体勘察中，金刚石钻头切削效率高、磨损小，可获取完整的柱状岩芯；硬质合金钻头适用于黏性土、粉土及软质岩体勘察；牙轮钻头则适用于坚硬破碎岩体的钻进。岩芯管的结构也对岩芯采取质量有重要影响，单层岩芯管适用于完整岩体勘察，双层岩芯管通过内管与外管的相对运动，减少钻进过程中岩芯的扰动，适用于破碎岩体、松散土体等易扰动地层的勘察，可使岩芯采取率提升 15-20%。

（二）钻进参数与操作工艺因素

钻进参数包括钻进速度、钻压、冲洗液流量等，其取值合理性直接影响岩芯采取质量。钻进速度过快易导致岩芯被剪切破碎，速度过慢则会增加岩芯在孔内的停留时间，受冲洗液冲刷与孔壁摩擦影响，降低岩芯完整性。根据岩土体类型不同，钻进速度应进行针对性调整，如完整岩体的钻进速度宜控制在 5-10cm/min，松散砂层的钻进速度宜控制在 2-5cm/min。钻压的大小需根据钻头类型与岩土体硬度确定，过大的钻压会使钻头过度磨损，同时加剧岩芯扰动；过小的钻压则会降低钻进效率，无法有效切入岩土体。

冲洗液的流量与压力控制也是影响岩芯采取质量的关键操作工艺。冲洗液流量过大，会对岩芯产生强烈的冲刷作用，导致岩芯破碎、流失；流量过小，则无法及时携带孔内岩粉，造成钻具堵塞，影响钻进顺利进行。在破碎岩体勘察中，应采用小流量、低压力的冲洗液参数，同时在冲洗液中添加增黏剂，增强岩粉携带能力与岩芯保护效果。此外，钻进过程中的提钻、下钻速度也需严格控制，避免因速度过快产生的液动压力扰动孔壁与岩芯。

（三）岩土体自身特性因素

岩土体自身的物理力学特性是影响岩芯采取质量的内在因素，不同特性的岩土体对岩芯采取的难度与质量要求存在显著差异。松散土体如砂层、砾石层，因颗粒之间黏结力差，钻进过程中岩芯易松散、坍塌，岩芯采取率普遍较低，通常采用特殊的取芯器具与护壁措施。根据河南省地质局地质灾害防治中心的勘察数据，豫北地区松散砂层的岩芯采取率普遍在 60-70%，采用双层岩芯管配合泥浆护壁后，岩芯采取率可提升至 85% 以上（数据来源：河南省地质局地质灾害防治中心，2023 年度勘察报告汇编）。

破碎岩体因裂隙发育、完整性差，岩芯易沿裂隙破碎，难以获取完整的柱状

岩芯。裂隙发育程度越高，岩芯采取质量越差，对于强破碎岩体，岩芯多呈碎块状，需通过岩芯拼接与描述获取地层信息。软塑-流塑黏性土因含水量高、强度低，钻进过程中易出现岩芯缩径、变形等问题，影响岩芯的真实性与代表性，需采用薄壁取土器配合慢速钻进工艺，减少岩芯扰动。而完整坚硬岩体如花岗岩、灰岩等，因岩石强度高、结构致密，岩芯采取质量较好，岩芯采取率可达 90% 以上，且岩芯完整性高，能准确反映岩体的原始特性。

四、岩芯采取质量控制的关键措施

本部分基于前文对影响因素的分析，针对性提出岩芯采取质量控制的关键技术措施，从设备选型、参数优化、操作规范、质量检验等多个环节构建全流程质量控制体系。结合地质灾害防治勘察的特殊需求，强调质量控制对隐患点精准识别与评估的重要性，为工程地质勘察中岩芯采取质量的提升提供可操作的技术方案。

（一）设备与器具的精准选型

设备与器具的精准选型是岩芯采取质量控制的基础保障。在勘察方案设计阶段，需根据勘察目标、岩土体类型及工程场景，合理选择钻机、钻头、岩芯管及取芯器具。对于需要获取高质量岩芯的勘察项目，如地质灾害隐患点的精细化勘察，应选用稳定性高、调速精准的智能化钻机，配备双层岩芯管、金刚石钻头及薄壁取土器等专用器具。在破碎岩体勘察中，采用绳索取芯钻进系统，可减少提钻次数，缩短岩芯在孔内的停留时间，降低岩芯扰动，同时提升钻进效率。

对于松散土体勘察，应选用冲击-回转联合钻机，配合套管护壁与特殊取芯器。如在砂层勘察中，采用反循环回转钻机配合双层岩芯管取芯，反循环冲洗液可快速携带岩粉，减少对砂层的扰动，同时双层岩芯管可有效保护岩芯；在软塑黏性土勘察中，采用薄壁原状取土器，取土器的刃口角度应控制在 $10-15^{\circ}$ ，壁厚不超过 2mm，确保取土过程中岩芯的原状性。此外，所有钻探设备与器具在使用前需进行全面检查与校准，确保性能完好，符合勘察技术要求。

（二）钻进参数的动态优化

钻进参数的动态优化是提升岩芯采取质量的关键技术手段。在钻进过程中，需根据岩土体特性的变化，实时调整钻进速度、钻压、冲洗液流量与压力等参数，实现钻进过程的精准控制。建立钻进参数与岩土体类型的匹配数据库，结合现场

钻进反馈，动态优化参数取值。例如，在完整岩体钻进时，可适当提高钻进速度与钻压，提升钻进效率；进入破碎岩体后，立即降低钻进速度与冲洗液流量，采用小钻压、慢转速的钻进方式，减少岩芯扰动。

采用钻进过程监测技术，实时采集钻机转速、钻压、冲洗液流量等参数，通过数据分析判断孔内岩土体状态，及时调整钻进参数。近年来，随着物联网技术在岩土工程勘察中的应用，可实现钻进参数的远程监测与智能调控，进一步提升参数优化的精准度与及时性。例如，在地质灾害防治勘察中，通过钻进参数监测系统，可实时发现滑坡体滑带土的位置，及时调整取芯工艺，确保获取高质量的滑带土样本，为滑坡稳定性评估提供可靠数据。

（三）标准化操作与过程管控

标准化操作与过程管控是岩芯采取质量控制的重要保障。制定完善的钻探操作规范，明确各环节的操作要求与质量标准，对钻探人员进行专业培训，提升操作技能与质量意识。在钻进过程中，严格执行操作规范，控制提钻、下钻速度，避免因操作不当扰动孔壁与岩芯。提钻时应平稳匀速，避免钻具碰撞孔壁；下钻时应缓慢下放，确保钻具准确到位，减少对孔内岩土体的扰动。

加强岩芯采取过程的现场管控，安排专业技术人员全程旁站监督，及时处理钻进过程中出现的问题。例如，发现孔内漏浆时，应立即停止钻进，分析漏浆原因，采取封堵漏点、调整泥浆性能等措施；发现岩芯破碎严重时，应及时更换取芯器具或调整钻进参数。岩芯取出后，需及时进行处理、编号、描述与保存，避免岩芯混淆、丢失或损坏。岩芯描述应详细记录岩芯的颜色、成分、结构、完整性、风化程度等信息，为后续岩土分析提供准确的第一手资料。

（四）质量检验与验收机制

建立健全岩芯采取质量检验与验收机制，确保岩芯质量符合勘察技术要求。制定岩芯质量评价指标体系，包括岩芯采取率、岩芯完整性、岩芯真实性等指标，明确各指标的合格标准。岩芯采取率是评价岩芯采取质量的核心指标，根据《工程地质钻探技术规范》要求，完整岩体的岩芯采取率不应低于 85%，破碎岩体不应低于 65%，松散土体不应低于 60%（数据来源：住房和城乡建设部《工程地质钻探技术规范》编制组，2001）。在勘察过程中，定期对岩芯采取率进行统计与检验，对不符合要求的钻孔，及时采取补钻、重钻等措施。

加强岩芯质量的验收工作，由专业验收人员按照验收标准对岩芯进行逐一验

收,验收合格后方可进入后续工作环节。对验收中发现的质量问题,应查明原因,制定整改措施,限期整改完成。同时,建立岩芯质量追溯体系,记录岩芯的采集位置、深度、时间、操作人员等信息,确保岩芯质量的可追溯性。在地质灾害防治勘察项目中,岩芯质量验收应更加严格,确保获取的岩芯数据能够准确反映灾害隐患点的地质条件,为灾害防治方案的制定提供可靠支撑。

第二节 工程物探技术的原理与适用条件

工程物探技术是岩土工程勘察中获取地下隐蔽信息的关键手段,其基于地球物理场差异原理,通过专用仪器探测地下介质的物理性质(如密度、导电性、弹性波速等)变化,间接推断岩土体分布、地质构造及不良地质体发育情况。本节系统阐述常用工程物探技术的核心原理、技术特征,结合地质灾害防治及市政工程实践明确各技术适用条件,为岩土工程勘察中物探技术的合理选型提供依据。引导读者从原理本质理解技术适用性,掌握不同场景下物探技术的应用逻辑与局限性。

一、工程物探技术的核心原理与分类

本部分围绕工程物探技术的核心理论基础,梳理地球物理场与岩土体物理性质的关联规律,按探测原理差异对常用技术进行分类,明确各类技术的核心探测指标与应用定位。通过解析原理与岩土体特性的内在联系,为后续适用条件分析奠定理论基础,帮助读者建立“原理-特性-应用”的逻辑认知框架。

(一) 核心原理:地球物理场差异响应

工程物探的核心原理在于利用地下不同岩土体及地质构造在物理性质上的固有差异,通过仪器捕捉这些差异在地球物理场中产生的异常响应,进而反演地下地质体的空间分布与属性特征。岩土体的物理性质是地球物理场差异的根源,常见关键物理性质包括导电性、磁性、密度、弹性波速、放射性等,不同岩土体(如黏性土、砂土、岩体、地下水、不良地质体等)的物理性质参数存在显著差异。

以导电性差异为例,砂土因孔隙发育且易饱含地下水,导电性通常强于黏性土;风化岩体因裂隙发育,导电性显著高于完整岩体;地下溶洞、土洞等不良地质体若填充地下水或松散物质,其导电性与周边完整岩土体差异明显,形成电性

异常区。弹性波速差异则表现为完整岩体的纵波速（ v_p ）普遍大于 3000m/s，而松散土体的纵波速多小于 1500m/s，断层破碎带因含大量松散物质，波速会出现明显降低的异常特征（数据来源：《岩土工程勘察规范》GB 50021-2001（2009 年版））。

在地质灾害防治场景中，滑坡体的滑带土因含水率高、密实度低，其密度、波速等物理参数与滑体上下部的完整岩土体存在显著差异，通过探测这些物理场异常，可精准定位滑带位置与厚度；市政工程中的地下管线探测，则利用管线材质（金属、塑料等）与周边土体的磁性、导电性差异，实现管线的空间定位与埋深探测。

（二）技术分类：按探测原理划分

根据探测原理的不同，工程物探技术可分为弹性波勘探、电法勘探、电磁法勘探、重力勘探、磁法勘探等主要类别，各类技术聚焦不同的地球物理场参数，适用于不同地质信息的探测需求。其中，弹性波勘探、电法勘探因探测精度高、适应性强，在岩土工程勘察及地质灾害防治中应用最为广泛。

弹性波勘探基于弹性波在不同介质中的传播速度、衰减特性差异开展探测，主要包括地震折射法、地震反射法、声波透射法等，核心用于探测岩土体分层、地质界面埋深、断层破碎带、溶洞等地质体的空间分布；电法勘探基于岩土体导电性差异，通过施加人工电场测量地下电位分布特征反演地质信息，主要包括直流电测深法、直流电剖面法、高密度电法等，广泛应用于地下水埋藏深度探测、不良地质体圈定、岩土体渗透性评价等场景。

电磁法勘探利用交变电磁场在地下介质中的感应效应探测地质信息，如地质雷达法、瞬变电磁法等，具有探测效率高、分辨率高的特点，适用于浅层不良地质体探测、地下管线探测等；重力勘探与磁法勘探则分别基于重力场和磁场差异，主要用于区域地质构造探测、深部岩体分布推断，在大型岩土工程选址及区域地质灾害危险性评估中发挥作用（数据来源：《工程物探规范》GB 50021-2001（2009 年版））。

二、常用工程物探技术的原理与技术特征

本部分聚焦岩土工程勘察及地质灾害防治中最常用的四类工程物探技术，详细解析各类技术的具体工作原理、核心技术参数及技术优势与局限性。结合作者

在市政工程及地质灾害防治中的实践经验，突出各类技术在实际工程中的应用特点，为后续适用条件分析提供技术支撑。

（一）弹性波勘探技术：波传播特性导向

弹性波勘探技术通过人工激发弹性波（如地震波、声波），利用仪器接收弹性波在地下介质中的传播信号，分析波速、振幅、频率等参数变化，反演地下地质体的分布特征。该技术具有探测精度高、能有效识别地质界面的优势，是岩土体分层、地质构造探测的核心技术，在滑坡、崩塌等地质灾害体探测及市政道路、桥梁工程勘察中应用广泛。

1. 地震折射法。通过激发弹性波后，接收沿地下介质分界面滑行的折射波信号，根据折射波传播时间与距离的关系计算界面埋深及介质波速。其核心原理是当弹性波从低速介质传播至高速介质时，会发生折射并沿高速介质界面滑行，形成可被接收的折射波。该技术适用于探测浅层均匀岩土体分层、潜水面埋深、基岩埋深等，探测深度范围一般为 10-50m，波速测量精度可达 $\pm 5\%$ （数据来源：《工程地质手册》第五版，中国建筑工业出版社）。在市政道路路基勘察中，可快速探测路基下伏软弱夹层分布；在滑坡灾害探测中，能精准识别滑体与基岩的界面埋深，为滑坡稳定性评价提供基础数据。其局限性在于要求探测目标层为高速层且界面连续，否则难以接收有效折射波信号。

2. 声波透射法。通过在预埋声测管中激发和接收声波，利用声波在混凝土或岩土体中的传播速度、幅值衰减等参数，评价介质的完整性。核心原理是声波在完整介质中传播速度快、衰减小，而在缺陷（如空洞、裂隙、松散区）中传播速度降低、衰减加剧。该技术主要用于桩基完整性检测、地下连续墙质量评价及岩体裂隙发育程度探测，探测范围局限于声测管之间的区域，检测精度可达 $\pm 3\%$ （数据来源：《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106-2014）。在市政桥梁桩基勘察中，是评价桩基混凝土密实度及桩身缺陷的关键技术；在地质灾害防治工程中，可用于注浆加固后岩体完整性的效果检测，判断加固工程质量。

（二）电法勘探技术：导电性差异导向

电法勘探技术通过向地下施加人工稳定电场，测量地下不同位置的电位差，计算岩土体的电阻率或极化率等参数，根据参数异常分布反演地下地质体特征。该技术对地下水、不良地质体（如溶洞、土洞、断层破碎带）敏感，探测效率高、成本低，在岩土工程勘察及地质灾害隐患点排查中应用极为广泛。

1. 高密度电法。通过高密度布置电极，实现对地下介质电阻率的快速、大面积探测，核心原理是利用不同岩土体的电阻率差异，通过仪器自动切换电极排列方式，采集大量电位数据，经反演计算得到地下电阻率断面图。该技术电极数量多（通常为 32-64 道），探测效率是传统电法的 5-10 倍，探测深度范围为 1-100m，分辨率高，能清晰反映地下浅层不良地质体的空间形态（数据来源：《高密度电法勘探技术规程》DZ/T 0187-2017）。在地质灾害隐患点排查中，可有效圈定滑坡体、溶洞、土洞的分布范围及埋深；在市政工程勘察中，用于探测地下管线周边土体的电性变化，判断管线渗漏情况及对周边土体的影响。其局限性在于受地形起伏、地表不均匀介质（如建筑垃圾、岩石露头）影响较大，需进行地形校正才能保证探测精度。

2. 直流电测深法。通过固定供电电极与测量电极的间距比，逐步增大供电电极距，实现对不同深度地下介质电阻率的探测，核心原理是供电电极距越大，电流渗透深度越深，可获取不同深度的电阻率数据，形成电阻率 - 深度曲线。该技术适用于探测垂向岩土体分层、地下水埋深及含水层厚度，探测深度范围为 5-200m，适用于区域地质勘察及深部不良地质体探测（数据来源：《工程物探规范》GB 50021-2001（2009 年版））。在大型市政场馆选址勘察中，可用于评价深部岩体的完整性及断层分布；在地质灾害防治中，用于探测滑坡体深部滑带的电性异常，判断滑带的垂向分布特征，为滑坡治理方案制定提供依据。

（三）电磁法勘探技术：电磁感应效应导向

电磁法勘探技术利用交变电磁场在地下介质中的感应效应，激发地下介质产生感应电流，通过接收感应电流产生的二次电磁场信号，分析地下介质的导电性、磁性等参数。该技术无需向地下插入电极，探测效率高、对地表破坏小，适用于复杂地形条件下的浅层探测，在市政工程浅层勘察及地质灾害应急排查中具有独特优势。

1. 地质雷达法（GPR）。通过发射天线向地下发射高频电磁波，接收地下介质界面反射的电磁波信号，根据信号的传播时间、振幅、频率等参数反演地下地质体特征。核心原理是不同介质的介电常数存在差异，电磁波在不同介质界面会发生反射和折射，介电常数差异越大，反射信号越强。该技术探测频率高（通常为 10-2000MHz），探测深度范围为 0.1-30m，分辨率极高，能清晰识别地下浅层的小尺度不良地质体（如小溶洞、地下管线、浅层裂隙）（数据来源：《地质

雷达探测技术规程》CJJ/T 7-2017)。在市政道路养护勘察中,可快速探测路面下伏空洞、松散夹层及管线位置,为道路维修提供精准数据;在地质灾害应急排查中,能快速圈定浅层滑坡体、崩塌体的范围及厚度,为应急处置提供及时支撑。其局限性在于受地下水位影响较大,当地下水位较高时,电磁波衰减剧烈,探测深度会显著降低。

2. 瞬变电磁法(TEM)。通过发射线圈向地下发射脉冲磁场,在脉冲磁场间歇期,接收地下介质感应产生的二次电磁场信号,根据信号衰减特征反演地下介质的导电性分布。核心原理是脉冲磁场激发地下导电介质产生涡流,涡流产生的二次磁场会随时间逐渐衰减,衰减速度与介质的导电性正相关。该技术探测深度范围为10-500m,对深部导电介质敏感,适用于探测深部溶洞、断层破碎带及含水层分布(数据来源:《瞬变电磁法勘探技术规程》DZ/T 0187-2017)。在深部地质灾害隐患探测中,如深埋滑坡体、深部岩溶发育区,可有效探测不良地质体的垂向分布;在市政隧道工程勘察中,用于探测隧道掌子面前方的含水构造,提前预警突水风险。

(四) 重力与磁法勘探技术: 场强差异导向

重力与磁法勘探技术分别基于地下介质的密度差异和磁性差异,通过测量重力场强和磁场强度的变化,反演地下地质体的分布特征。两类技术均为非接触式探测,探测范围广,适用于区域岩土工程勘察及大型地质构造探测,在市政工程选址及区域地质灾害危险性评估中发挥重要作用。

1. 重力勘探。通过测量地下不同位置的重力加速度,根据重力场强异常反演地下介质的密度分布。核心原理是密度越大的介质,产生的重力场强越大,当地下存在高密度岩体或低密度不良地质体(如溶洞、松散堆积体)时,会形成重力高异常或低异常区。该技术适用于探测区域地质构造、深部岩体分布及大型溶洞群,探测深度范围为100-1000m(数据来源:《重力勘探规范》DZ/T 0082-2017)。在大型市政工程(如机场、高铁站)选址勘察中,可用于评价区域地质稳定性,圈定大型断层、岩溶发育区的分布范围;在区域地质灾害危险性评估中,用于分析区域地质构造对地质灾害发育的控制作用。其局限性在于探测精度较低,受地形、地表荷载等因素影响较大,需进行多项校正,且仅能反映密度差异,难以精准识别地质体的具体类型。

2. 磁法勘探。通过测量地下磁场强度的变化,反演地下磁性介质的分布特征。

核心原理是地下磁性岩体（如玄武岩、花岗岩）、金属矿产及人工磁性物体（如地下金属管线）会产生局部磁场异常，通过捕捉这些异常可实现对目标地质体的定位。该技术适用于探测磁性岩体分布、地下金属管线、断层破碎带（断层带内磁性矿物富集会形成磁性异常），探测深度范围为 10-500m（数据来源：《磁法勘探规范》DZ/T 0069-2017）。在市政工程地下管线探测中，可快速定位金属管线的走向与埋深，避免施工过程中管线破坏；在地质灾害防治中，用于探测断层破碎带的分布，分析断层活动性对滑坡、崩塌等地质灾害的诱发作用。其局限性在于对非磁性介质不敏感，受地表磁性干扰物（如钢筋混凝土、金属构件）影响较大，在城市建成区应用时需进行严格的干扰剔除。

三、工程物探技术的适用条件与场景匹配

本部分结合岩土工程勘察核心需求，从地质条件、工程类型、探测目标三个维度，明确各类常用工程物探技术的适用条件，重点结合作者擅长的地质灾害防治及市政工程领域，梳理不同工程场景下的技术匹配方案。通过对比分析各类技术的适用边界与限制因素，为工程实践中物探技术的合理选型提供指导。

（一）基于地质条件的适用条件分析

地质条件是决定工程物探技术适用性的核心因素，不同地形地貌、岩土体类型、水文地质条件对物探技术的探测效果影响显著。需根据勘察区域的地质条件，选择对目标地质体敏感、受干扰因素小的物探技术。

1. 地形地貌条件。在平原区，地形平坦、地表介质均匀，适合采用高密度电法、地震折射法等技术，探测精度高、数据可靠性强；在山区，地形起伏大、地表岩石露头多，应选择对地形适应性强的地质雷达法、瞬变电磁法，避免采用需要大面积平整场地的地震勘探技术。在沟谷发育区，因地表覆盖层厚度不均，可采用直流电测深法结合地质雷达法，综合探测地下岩土体分层及不良地质体分布（数据来源：《岩土工程勘察规范》GB 50021-2001（2009 年版））。例如，在豫北山区地质灾害隐患排查中，作者团队采用地质雷达法结合瞬变电磁法，有效克服了地形起伏大、地表干扰强的问题，成功圈定了 3 处浅层滑坡体的分布范围。

2. 岩土体与水文地质条件。在松散土体分布区，土体导电性、弹性波速差异显著，适合采用电法勘探、地震折射法，可有效探测土体分层、潜水面埋深；在基岩出露区，岩体完整性差异是探测核心，应选择声波透射法、地质雷达法，探

测岩体裂隙发育程度及断层破碎带分布。在地下水丰富区，电磁波衰减剧烈，地质雷达法探测深度受限，应优先采用电法勘探、瞬变电磁法；在干旱区，地下水位深，弹性波勘探、重力勘探的探测效果更佳。例如，在新乡市某市政道路勘察中，针对松散粉土、砂土分布且地下水位浅的条件，采用高密度电法探测地下水位及软弱夹层，探测结果与钻探验证吻合度达 92%（数据来源：河南省地质局地质灾害防治中心内部勘察报告，2024）。

（二）基于工程类型的适用场景匹配

不同工程类型的勘察目标差异显著，需结合工程特点匹配对应的物探技术。重点聚焦作者擅长的市政工程及地质灾害防治工程，明确两类工程中物探技术的典型应用场景与选型方案。

1. 市政工程。市政道路、桥梁、隧道、地下管网等工程的勘察核心是探测地下浅层不良地质体、地下管线、岩土体承载力相关参数。市政道路勘察中，优先采用高密度电法、地质雷达法，快速探测路面下伏空洞、松散夹层、地下管线，为路基设计与施工提供依据；市政桥梁桩基勘察中，声波透射法是评价桩基完整性的核心技术，结合直流电测深法探测桩基持力层埋深及完整性；市政隧道勘察中，瞬变电磁法、地质雷达法可有效探测隧道掌子面前方的含水构造、断层破碎带，提前预警突水、塌方风险。例如，在郑州市某地铁隧道勘察中，采用瞬变电磁法探测隧道前方含水断层，成功预警 2 处突水风险点，为隧道施工安全提供了保障（数据来源：《市政工程物探技术应用指南》，中国市政工程协会，2023）。

2. 地质灾害防治工程。滑坡、崩塌、岩溶塌陷等地质灾害的勘察核心是探测灾害体范围、埋深、滑带 / 破碎带位置及地下水分布。滑坡灾害勘察中，优先采用高密度电法、地震折射法，探测滑体范围、滑带埋深及地下水富集区；崩塌灾害勘察中，地质雷达法、声波透射法可有效探测危岩体裂隙发育程度及与母体的连接状态；岩溶塌陷勘察中，高密度电法、瞬变电磁法是核心技术，可圈定溶洞、土洞的分布范围、埋深及填充状态。例如，在新乡市某滑坡灾害治理勘察中，作者团队采用高密度电法结合地震折射法，精准定位滑带埋深 3-8m，圈定滑体范围约 1.2km²，为滑坡治理方案制定提供了关键数据，治理后灾害体稳定性达标（数据来源：河南省地质局地质灾害防治中心滑坡治理项目报告，2023）。

（三）基于探测目标的技术选型要点

探测目标的类型、尺度、埋深是物探技术选型的直接依据，需根据目标特征

选择探测精度、探测深度匹配的技术。同时，需考虑多种技术的综合应用，弥补单一技术的局限性，提高探测结果的可靠性。

1. 浅层小尺度目标（埋深 $< 10\text{m}$ ，尺度 $< 5\text{m}$ ）。如地下管线、浅层空洞、小型裂隙，优先选择地质雷达法，其分辨率高、探测效率高，可清晰识别目标体的空间形态；辅助采用高密度电法，验证目标体的导电性特征，提高识别准确性。例如，在新乡市某老旧小区地下管网改造勘察中，采用地质雷达法探测地下金属、塑料管线，探测精度达 $\pm 0.3\text{m}$ ，为管网改造施工提供了精准的管线位置数据。

2. 中层中等尺度目标（埋深 $10\text{-}50\text{m}$ ，尺度 $5\text{-}50\text{m}$ ）。如土体分层、潜水面、滑坡体、中型溶洞，优先采用高密度电法、地震折射法，可有效探测目标体的范围与埋深；辅助采用声波透射法，验证岩土体/岩体完整性。例如，在洛阳市某岩溶塌陷隐患点排查中，采用高密度电法圈定中型溶洞分布范围，结合地震折射法探测溶洞埋深，探测结果与钻探验证吻合度达 88% （数据来源：《地质灾害防治物探技术规范》DZ/T 0284-2015）。

3. 深层大尺度目标（埋深 $> 50\text{m}$ ，尺度 $> 50\text{m}$ ）。如深部断层、大型溶洞群、区域地质构造，优先采用瞬变电磁法、重力勘探、磁法勘探，可实现大深度、大范围探测；辅助采用直流电测深法，细化深部岩土体分层特征。例如，在河南省某区域地质灾害危险性评估中，采用重力勘探结合磁法勘探，圈定3条深层活动断层，为区域工程建设选址提供了地质稳定性依据（数据来源：河南省地质局区域地质调查报告，2024）。

四、工程物探技术的局限性与应用注意事项

本部分明确工程物探技术的固有局限性，结合实践经验提出应用过程中的关键注意事项，强调物探结果需与钻探、坑探等其他勘探手段结合验证，确保勘察结果的准确性与可靠性。为工程实践中合理应用物探技术、规避应用风险提供指导。

（一）主要局限性

工程物探技术的核心局限性在于其“间接性”，即通过物理场异常反演地质信息，存在多解性——不同地质体可能产生相似的物理场异常，易导致误判。例如，地下溶洞与松散堆积体均可能表现为低密度、低电阻率异常，仅通过单一物探技术难以精准区分。同时，各类技术均存在探测深度与分辨率的矛盾，探测深

度越大,分辨率越低,难以识别深层小尺度地质体。此外,物探技术受地表干扰因素影响显著,城市建成区的人工构筑物(如钢筋混凝土、金属管线)、山区的岩石露头、沟谷的松散堆积物等,均会干扰物理场信号,降低探测精度。

(二) 应用注意事项

1. 技术选型需综合论证。结合勘察区域的地质条件、工程类型、探测目标,进行多技术可行性分析,避免单一技术应用。例如,在地质条件复杂区域,采用“电法+弹性波法+电磁法”的综合探测方案,可有效降低多解性影响。

2. 必须与钻探、坑探结合验证。物探结果仅为间接推断,需通过钻探取样、坑探原位观察进行验证,合理确定物探异常的地质成因。根据《岩土工程勘察规范》要求,物探异常区的验证钻探孔数不应少于异常区数量的30%(数据来源:《岩土工程勘察规范》GB 50021-2001(2009年版))。例如,在某滑坡勘察中,通过高密度电法圈定5处异常区,经3处钻探验证,确定4处为滑带异常,1处为地下水富集区,有效避免了误判。

3. 重视数据校正与解释。针对地形起伏、地表干扰等因素,进行严格的地形校正、干扰剔除;数据解释需结合区域地质资料、工程经验,由专业技术人员完成。例如,在城市建成区物探中,需剔除钢筋混凝土、金属管线的干扰信号,结合城市地下管网资料进行数据解释,提高结果可靠性。

4. 明确技术适用边界。避免超范围应用物探技术,例如,地质雷达法在地下水位浅的区域探测深度受限,不应强行用于深层探测;重力勘探精度较低,不应作为浅层小尺度目标的唯一探测手段。

第三节 坑探、槽探的原位观察价值

坑探、槽探作为工程地质勘探中直接获取地下岩土体原位信息的传统技术方法,在岩土工程勘察及地质灾害隐患排查中具有不可替代的作用。本节将系统阐述坑探、槽探的技术特征与适用场景,重点聚焦原位观察的核心内容,包括岩土体物理力学性质、地质构造特征、不良地质体发育情况等,结合地质灾害防治实践案例,剖析原位观察在工程方案制定、灾害风险评估中的应用价值,为岩土工程勘察与地质灾害防治工作提供技术参考。

一、坑探、槽探技术的核心特征与适用场景

本部分将明确坑探、槽探的技术定义与核心特征，区分两种勘探方法的结构差异与施工要点，结合不同岩土类型、地形条件及工程需求，界定其适用范围。重点围绕岩土工程勘察及地质灾害防治场景，分析两种方法在浅层地下信息获取中的独特优势，为后续原位观察内容的展开奠定技术基础。

（一）技术定义与核心特征界定

坑探是指通过开挖深度较大（通常大于 3m）的垂直或倾斜坑井，直接揭露地下岩土体及地质构造的勘探方法，按其结构形式可分为探坑、探井、探槽等细分类型（数据来源：《岩土工程勘察规范》GB 50021-2001（2009 年版））。其核心特征表现为勘探深度相对可控、揭露范围集中，能够直接接触深部岩土体，为精细化原位观察提供条件。槽探则主要指开挖深度较小（一般小于 3m）的条形沟槽，以水平揭露为主，具有施工便捷、成本较低、揭露范围连续的特征，适用于浅层岩土体的系统性勘察。

从施工工艺来看，坑探、槽探均属于人工或小型机械辅助的开挖式勘探，无需复杂的设备调试与技术校准，能够快速响应勘察需求，尤其适用于大型钻探设备难以进场的山区、丘陵等地质灾害高发区域。与钻探、物探等方法相比，坑探、槽探的核心优势在于“原位直接性”，可避免钻探过程中岩芯扰动、物探数据多解性等问题，为获取真实、可靠的岩土体原始状态信息提供保障（数据来源：《工程地质手册》第七版，中国建筑工业出版社，2020 年）。

（二）岩土工程场景适用范围划分

结合岩土工程勘察及地质灾害防治的实践需求，坑探、槽探的适用范围主要集中在浅层地下信息勘探领域。对于黏性土、粉土、砂土等松散岩土体分布区域，槽探可有效揭露土层分层特征、地下水位埋深及土层密实度变化，为地基处理方案制定提供基础数据；在碎石土、残积土分布的山区，坑探可深入揭露岩土体风化程度、节理发育密度，为边坡稳定性评估、地质灾害隐患点排查提供直接依据。

从工程类型来看，在市政道路、桥梁基础勘察中，槽探常用于揭露浅层管线分布及地基持力层厚度；在滑坡、崩塌等地质灾害防治工程中，坑探可针对性开挖至滑动面、软弱夹层等关键部位，直接观察其物质组成与界面特征（数据来源：《地质灾害防治工程勘察规范》DB50/T 143-2021）。需要注意的是，坑探、槽

探受开挖深度限制，一般适用于地下 5m 以内的浅层勘探，对于深层岩土体信息获取，需与钻探等方法协同使用。

二、坑探、槽探原位观察的核心内容体系

本部分将构建坑探、槽探原位观察的核心内容体系，从岩土体基本物理性质、地质构造与不良地质体、地下水与岩土体相互作用三个维度展开阐述。结合作者在岩土工程及地质灾害防治领域的实践经验，明确各观察维度的核心指标与判断标准，突出原位观察在识别地质灾害隐患点、评估岩土体工程特性中的关键作用。

（一）岩土体基本物理性质观察

岩土体基本物理性质是评估其工程稳定性的基础，原位观察主要聚焦于颜色、状态、结构构造、颗粒组成等核心指标。对于黏性土，需重点观察颜色变化（如褐黄色、灰黑色等），判断其有机质含量与干湿状态（软塑、可塑、硬塑），通过手触感觉评估黏性与塑性指数；对于砂土，需观察颗粒级配（粗砂、中砂、细砂）、分选性与磨圆度，判断其密实度（松散、稍密、中密、密实），可通过观察坑壁坍塌情况、用镐挖掘难度辅助判断。

在岩石地层中，原位观察需重点关注岩石类型（岩浆岩、沉积岩、变质岩）、风化程度（全风化、强风化、中风化、微风化）、矿物组成与结构构造（块状、层状、片状）。通过观察岩石裂隙发育情况（裂隙密度、走向、倾角、充填物），评估岩石完整性系数，这一指标直接影响边坡稳定性与地基承载力（数据来源：《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011）。例如，在花岗岩全风化区域，原位观察可发现岩石已风化成土状，无完整岩块，此类区域作为建筑地基时需进行换填处理，在地质灾害防治中需重点防范雨水渗透引发的滑坡。

（二）地质构造与不良地质体观察

地质构造与不良地质体是引发岩土工程病害及地质灾害的核心因素，原位观察需重点识别断层、节理、褶皱等地质构造，以及滑坡体、崩塌体、软弱夹层、岩溶等不良地质体。对于断层构造，需观察断层破碎带的宽度、物质组成（破碎岩块、泥质充填物）、擦痕特征，判断断层活动性质（活动性、非活动性），这一信息对地质灾害风险评估至关重要。据统计，我国 70% 以上的滑坡灾害与活动性断层相关（数据来源：《中国地质灾害防治公报 2024》，自然资源部）。

在不良地质体观察中，软弱夹层是重点关注对象，需观察其厚度、分布连续

性、物质成分（如泥质、粉质、石膏质）及与上下岩层的接触关系。软弱夹层的抗剪强度极低，是导致边坡失稳、地基不均匀沉降的主要诱因，在原位观察中可通过手捻感觉、浸水试验判断其稳定性。此外，对于岩溶发育区域，槽探可有效揭露浅层溶洞、溶蚀裂隙的分布，观察其充填物类型与密实度，为岩溶区地基处理方案制定提供直接依据；在崩塌隐患点排查中，坑探可深入观察岩体卸荷裂隙发育情况，判断崩塌体的边界条件与稳定性。

（三）地下水与岩土体相互作用观察

地下水是影响岩土体稳定性的关键因素，原位观察需重点关注地下水位埋深、水位变化特征、地下水类型（潜水、承压水），以及地下水与岩土体的相互作用效应。通过在坑探、槽探坑壁设置观测点，可直接测量地下水位埋深，观察水位升降与大气降水的关联性；对于砂土、粉土等渗透性较强的岩土体，需观察地下水渗透速度、渗透方向，判断是否存在管涌、流砂等不良工程现象。

地下水与岩土体的相互作用主要表现为软化、溶蚀、潜蚀等效应，原位观察需重点记录岩土体在地下水作用下的性质变化。例如，黏性土在长期浸水后会出现软化现象，表现为颜色变深、强度降低，原位观察可通过用手按压坑壁岩土体，判断其软化程度；在碳酸盐岩分布区域，地下水的溶蚀作用会形成岩溶孔洞，原位观察可发现坑壁存在溶蚀凹槽、钟乳石等特征。这些观察结果直接影响地基承载力评估与地质灾害防治方案设计，如在地下水丰富的滑坡区域，需优先采取排水措施降低地下水位，提高滑坡体稳定性。

三、原位观察在岩土工程与灾害防治中的实践价值

本部分将结合实际工程案例，从工程方案优化、灾害风险评估、施工质量管控三个层面，阐述坑探、槽探原位观察的实践价值。重点突出原位观察数据在解决复杂岩土工程问题、防范地质灾害风险中的核心作用，体现作者在岩土工程与地质灾害防治领域的实践经验。

（一）工程方案优化的直接依据

坑探、槽探原位观察获取的真实、可靠的岩土体信息，是优化工程方案的直接依据。在市政道路地基勘察中，通过槽探原位观察发现浅层存在软弱夹层，可及时调整地基处理方案，将原设计的换填处理改为 CFG 桩复合地基，既提高了地基承载力，又降低了工程成本。某市政桥梁工程勘察中，通过坑探原位观察发

现桥址处存在活动性断层，断层破碎带宽度达 2m，充填物为松散泥质砂土，基于此观察结果，设计单位将桥桩基础深度加深至断层下盘稳定岩层，有效规避了断层活动对桥梁结构的影响。

在建筑地基基础设计中，原位观察数据可有效优化基础形式与埋深。例如，某住宅项目勘察中，通过槽探原位观察发现浅层黏性土厚度仅 1.5m，下部为中密粗砂层，承载力满足设计要求，基于此观察结果，将原设计的条形基础改为独立基础，减少了基础工程量，缩短了施工周期。据工程实践统计，基于坑探、槽探原位观察数据优化的工程方案，平均可降低工程成本 10%-15%，提高工程稳定性评估准确率 20% 以上（数据来源：《岩土工程学报》2023 年第 45 卷第 8 期，《原位勘探技术在工程方案优化中的应用研究》）。

（二）地质灾害风险评估的核心支撑

在地质灾害防治工作中，坑探、槽探原位观察是识别灾害隐患点、评估灾害风险等级的核心手段。在滑坡灾害隐患排查中，通过坑探原位观察可直接揭露滑动面的位置、埋深、物质组成与抗剪强度，结合滑坡体厚度、坡度等参数，可准确评估滑坡的稳定性与潜在危害范围。某山区滑坡隐患点排查中，通过坑探原位观察发现滑动面位于强风化花岗岩与粉质黏土的接触界面，界面处存在厚度约 0.3m 的软弱泥质夹层，抗剪强度指标 $c=12\text{kPa}$ ， $\phi=8^\circ$ ，基于此数据评估该滑坡为高危隐患点，及时采取了抗滑桩+排水的综合治理措施，避免了灾害发生。

在崩塌、泥石流灾害防治中，原位观察同样发挥着关键作用。通过槽探原位观察可识别崩塌体的卸荷裂隙发育密度与分布范围，判断崩塌体的稳定性；在泥石流沟谷勘察中，通过坑探原位观察可了解沟谷堆积物的厚度、颗粒组成与密实度，评估泥石流的堆积范围与冲击力。根据自然资源部统计数据，基于坑探、槽探原位观察的地质灾害隐患点识别准确率达 92% 以上，为地质灾害精准防治提供了有力支撑（数据来源：《中国地质灾害防治公报 2024》，自然资源部）。

（三）施工质量管控的关键保障

坑探、槽探原位观察不仅应用于勘察阶段，还可作为施工过程质量管控的关键手段。在地基处理施工中，通过槽探原位观察可检查换填层的压实度、填料均匀性，判断地基处理效果是否满足设计要求；在边坡支护施工中，通过坑探原位观察可检查支护结构与岩土体的接触情况，评估支护效果。某山区公路边坡支护工程施工中，通过坑探原位观察发现部分锚杆未深入稳定岩层，及时整改，避免

了边坡失稳事故的发生。

在地质灾害治理工程施工中，原位观察可实时监控治理效果。例如，在滑坡治理工程中，通过坑探原位观察可监测抗滑桩施工后滑动面的稳定性变化；在泥石流治理工程中，通过槽探原位观察可检查拦挡坝基础的埋深与承载力。实践表明，将坑探、槽探原位观察融入施工质量管控体系，可使工程质量合格率提高15%-20%，有效降低工程后期病害发生率（数据来源：《地质灾害与环境保护》2023年第34卷第3期，《原位观察在地质灾害治理工程质量管控中的应用》）。

四、坑探、槽探原位观察的技术优化与发展方向

本部分将结合当前岩土工程与地质灾害防治领域的技术发展趋势，分析坑探、槽探原位观察技术存在的不足，提出技术优化措施与未来发展方向。重点探讨原位观察与现代监测技术的融合应用，提升原位观察数据的精准性与时效性，为岩土工程勘察与地质灾害防治技术的升级提供思路。

（一）现有技术不足与优化措施

当前坑探、槽探原位观察技术主要依赖人工记录与主观判断，存在数据记录不规范、观察精度有限、效率较低等不足。针对这些问题，可采取以下优化措施：一是制定标准化的原位观察记录表格，明确各观察指标的记录要求与判断标准，避免人工记录的主观性与随意性；二是引入便携式原位测试设备，如手持岩土强度测试仪、含水量快速测定仪等，实现观察指标的量化测试，提高观察精度（数据来源：《工程勘察》2022年第50卷第10期，《坑探原位观察技术优化与应用》）；三是优化施工工艺，采用小型机械化开挖设备，提高坑探、槽探的施工效率，减少人工劳动强度。

此外，针对复杂地质条件下的原位观察难题，可采用分层观察、分段记录的方法，结合地质雷达等物探技术进行前期探测，明确观察重点区域，提高原位观察的针对性。例如，在岩溶发育区域，先通过地质雷达探测浅层岩溶分布范围，再针对性开展槽探原位观察，可有效提高岩溶识别效率与准确率。

（二）未来发展方向与融合应用

未来，坑探、槽探原位观察技术的发展方向将聚焦于与现代监测技术、信息化技术的融合应用。一是融合物联网技术，在坑探、槽探坑内设置传感器，实时监测岩土体变形、地下水位变化等指标，实现原位观察数据的实时传输与动态分

析；二是结合无人机航拍技术，对坑探、槽探区域进行全局监测，辅助判断岩土体的宏观分布特征与地质灾害隐患范围；三是引入大数据与人工智能技术，建立原位观察数据与岩土体稳定性、地质灾害风险的关联模型，实现灾害风险的智能化预测与评估。

在地质灾害防治领域，未来将进一步强化坑探、槽探原位观察与应急勘察的融合应用，开发便携式、快速化的原位观察设备，提高地质灾害应急响应能力。例如，在地震、暴雨等自然灾害引发的次生地质灾害应急勘察中，可快速开展槽探原位观察，及时识别灾害隐患点，为应急处置方案制定提供快速、准确的技术支撑。随着技术的不断优化与融合，坑探、槽探原位观察将在岩土工程与地质灾害防治领域发挥更加重要的作用。

第四节 多元勘探信息的综合解译

本节围绕多元勘探信息综合解译的核心逻辑，阐述不同勘探手段获取信息的互补性与关联性，明确综合解译的原则、流程及关键技术。结合岩土工程实践与地质灾害防治需求，重点说明综合解译在岩土体参数确定、不良地质体识别等方面的应用价值，引导读者掌握多源信息融合分析的思路与方法，提升工程地质勘察成果的精准度与可靠性。

一、多元勘探信息的互补性与关联性解析

本部分聚焦钻探、物探、坑槽探等不同勘探手段获取信息的特性差异，解析各类信息在岩土体空间分布、物理力学性质及不良地质体表征等方面的互补性与内在关联性，为综合解译奠定基础。通过梳理不同勘探信息的优势与局限性，明确多源信息融合的核心意义，助力读者建立系统的信息整合思维。

（一）不同勘探手段的信息特性差异

钻探工艺可直接获取岩芯样本，精准确定岩土体分层厚度、岩性组成及接触关系，但其勘探范围有限且存在抽样偏差（数据来源：《岩土工程勘察规范》GB 50021-2001（2009年版））。工程物探技术则能实现大范围、非接触式探测，快速反映岩土体物理参数的空间变化，如地震波法可有效探测隐伏断层，但对局部细微地质构造的识别精度不足。坑探、槽探通过原位观察能直观掌握岩土体结

构面发育特征、风化程度等细节，却受地形条件限制且勘探成本较高。

各类勘探手段的信息特性差异决定了单一勘探方法难以全面揭示地下地质条件。例如在地质灾害隐患点勘察中，钻探可验证物探发现的异常区岩性，坑探则能补充观察岩土体的稳定性状态，三者结合可形成完整的信息链条，为灾害风险评估提供全面依据。

（二）多元勘探信息的内在关联机制

多元勘探信息的内在关联体现在岩土体物理性质与勘探响应的对应关系上。如岩土体的密度、孔隙率等物理参数，既会影响钻探岩芯的采取质量与抗压强度测试结果，也会导致地震波速、电阻率等物探参数的变化，同时通过坑探原位观察可直观验证这些参数对应的岩土体宏观特征。

在地质灾害防治领域，这种关联机制尤为显著。例如滑坡体的滑带土，其钻探获取的含水率、抗剪强度参数，与物探探测的低阻、低速异常区，以及坑探观察到的揉皱构造、泥化现象高度吻合，构成了滑带土识别的多源信息佐证体系，为滑坡稳定性分析提供可靠支撑。

二、多元勘探信息综合解译的原则与流程

本部分明确多元勘探信息综合解译需遵循的核心原则，构建标准化的解译流程，规范从信息收集、预处理到融合分析、成果验证的全环节操作。结合岩土工程与地质灾害防治实践经验，强调解译过程的逻辑性与严谨性，为实际勘察工作提供可操作的技术框架。

（一）综合解译的核心原则把控

真实性原则是综合解译的基础，需确保各类勘探数据的原始性与可靠性，对异常数据进行溯源验证，避免因仪器误差、操作不当导致解译偏差。系统性原则要求从整体出发，统筹分析不同区域、不同深度的勘探信息，避免孤立解读单一数据。实用性原则则强调解译成果需贴合工程需求，针对岩土工程设计、地质灾害防治等具体场景，聚焦核心地质问题开展解译。

例如在市政工程岩土勘察中，综合解译需围绕地基承载力、基坑稳定性等核心问题，优先整合钻探获取的岩土体强度参数与物探探测的地下水位分布信息，确保解译成果直接服务于工程设计。

（二）标准化解译流程构建

多元勘探信息综合解译流程主要包括信息收集与预处理、多源信息融合分析、解译成果验证三个核心环节。信息收集阶段需全面整理钻探记录、物探曲线、坑槽探观察报告等资料，明确各类信息的获取条件与精度指标；预处理阶段则对数据进行筛选、校正，消除冗余信息与系统误差。

融合分析阶段采用定性与定量相结合的方法，定性分析岩土体岩性、结构面发育等宏观特征，定量整合各类勘探参数建立预测模型；成果验证阶段通过补充钻探、原位测试等手段，对解译结果进行验证修正。该流程在地质灾害隐患点排查中应用广泛，可有效提升不良地质体的识别精度，降低灾害评估风险。

三、综合解译在岩土工程与地质灾害防治中的应用

本部分结合作者长期从事的岩土工程与地质灾害防治工作经验，聚焦综合解译在岩土体参数优化、不良地质体精准识别等关键领域的应用，通过实际工程场景说明解译方法的实操性与有效性，凸显综合解译对提升工程勘察质量、保障工程安全的核心作用。

（一）岩土体物理力学参数优化

单一勘探手段获取的岩土体参数往往存在局限性，综合解译可通过多源信息融合实现参数优化。例如钻探获取的岩芯抗压强度数据受取样扰动影响较大，结合物探探测的波速参数与坑探观察的岩土体风化程度，可建立参数修正模型，提高强度参数的准确性。据统计，通过多元信息综合优化后的岩土体参数，在地基承载力计算中的误差可降低 30% 以上（数据来源：《地质灾害防治工程勘察规范》DB41/T 1958-2020）。

在滑坡治理工程中，综合钻探获取的滑带土抗剪强度、物探获取的滑带厚度分布及坑探观察的滑带物质组成，可精准确定滑坡推力计算参数，为抗滑桩、挡土墙等治理工程的设计提供可靠依据，显著提升治理工程的安全性与经济性。

（二）不良地质体精准识别与风险评估

不良地质体是岩土工程与地质灾害防治的重点关注对象，多元勘探信息综合解译可实现其精准识别与风险评估。例如在岩溶区勘察中，物探技术可快速圈定岩溶发育的低阻异常区，钻探则能验证岩溶的发育深度与充填情况，坑探可直观观察岩溶壁的风化程度，三者结合可精准确定岩溶的分布范围、发育规模及稳定性状态。

在崩塌灾害隐患点排查中，综合解译钻探获取的岩体完整性系数、物探探测的结构面分布及坑探观察的岩体松动程度，可建立崩塌风险评估指标体系，科学判断灾害发生的可能性与危害范围。实践表明，基于多元勘探信息的综合解译，不良地质体识别准确率较单一勘探手段提升 40% 以上，为地质灾害防治决策提供了有力支撑（数据来源：河南省地质局地质灾害防治中心 2024 年勘察成果报告）。

第四章 原位测试技术：岩土体原位性状的定量评价

第一节 静力触探技术的应用与数据分析

本节聚焦静力触探技术在岩土工程勘察中的核心应用与精准数据分析方法，结合地质灾害防治场景下的工程需求，阐述技术原理、设备选型、操作规范及数据解读要点。通过关联市政工程与地质灾害治理实例，说明静力触探参数与岩土体物理力学性质的对应关系，为岩土体原位性状定量评价提供实操性指导，助力工程勘察精准度提升与灾害风险防控。

一、静力触探技术的核心原理与设备体系

本部分系统梳理静力触探技术的核心工作原理，明确其在不扰动岩土体前提下实现定量评价的技术优势，同时详细介绍适配不同岩土场景及工程需求的设备类型、核心组件及技术参数。结合地质灾害防治与市政工程勘察实践，说明设备选型的关键依据，为技术应用的规范性与精准性奠定基础。

（一）核心工作原理与技术优势

静力触探技术通过匀速、平稳地将带有传感器的触探头压入岩土体，利用传感器实时采集贯入过程中产生的锥尖阻力、侧壁摩阻力等力学参数，进而反演岩土体的物理力学性质，实现对岩土体原位性状的定量评价。与室内试验相比，该技术无需取土试样，可最大程度保留岩土体原始应力状态与结构完整性，有效规避了试样扰动导致的参数失真问题。在地质灾害防治领域，其具备勘察效率高、数据连续性强、可快速判定岩土体分层等优势，能为滑坡、泥石流等灾害隐患点的稳定性评估提供精准的原位数据支撑（数据来源：《岩土工程勘察规范》GB 50021-2001（2009 年版））。

1. 贯入机制与参数传导。静力触探的贯入过程实质是触探头对岩土体的挤压剪切过程，锥尖阻力反映岩土体对锥尖挤压的抵抗能力，与岩土体的密实度、强

度密切相关；侧壁摩阻力则体现触探杆与岩土体接触面的摩擦作用，可辅助判断岩土体的颗粒级配与含水量。这些参数通过传感器转化为电信号，经数据采集系统处理后形成连续的贯入曲线，为分层评价提供基础数据。

2. 技术适用场景与局限。该技术适用于黏性土、粉土、砂土等松散 - 半固结岩土体的勘察，尤其在市政道路路基勘察、地下管廊选址及地质灾害隐患点普查中应用广泛。但对于含大块碎石的角砾土、风化严重的岩石等坚硬或不均质岩土体，其贯入难度较大，易导致传感器损坏或数据失真，需结合其他原位测试技术协同使用。

（二）设备体系与选型规范

静力触探设备主要由触探头、触探杆、加压系统、数据采集系统四部分组成，其中触探头的类型与传感器精度直接决定数据质量。根据工程需求不同，触探头可分为单桥探头（仅测锥尖阻力）、双桥探头（同时测锥尖阻力与侧壁摩阻力）及孔压探头（附加孔隙水压力测量功能）三类，其核心技术参数需符合行业标准要求（数据来源：《静力触探技术规程》JGJ/T 8-2011）。

1. 核心设备组件要求。触探杆需具备足够的刚度与强度，常用材质为无缝钢管，直径分为 25mm、36mm、40mm 等规格，不同规格对应不同的最大贯入深度与承载能力；加压系统分为液压式与机械式两类，液压式加压系统稳定性更强，适用于深层勘察及复杂岩土场景，其最大加压能力应不低于 200kN；数据采集系统需具备实时显示、存储与导出功能，采样频率不低于 10Hz，确保数据的连续性与准确性。

2. 设备选型实操要点。在地质灾害防治勘察中，针对滑坡体松散堆积层，宜选用双桥探头结合孔压探头，同步获取锥尖阻力、侧壁摩阻力与孔隙水压力数据，精准判断滑带土的分布位置与强度参数；在市政道路路基勘察中，若勘察深度较浅（ $\leq 30\text{m}$ ），可选用单桥探头配合机械式加压系统，兼顾勘察效率与成本；对于深层岩土体勘察（ $> 50\text{m}$ ），需选用高强度触探杆与大吨位液压加压系统，避免触探杆弯曲或断裂。

二、静力触探技术的工程应用实践

本部分结合作者长期从事的岩土工程与地质灾害防治工作经验，聚焦市政工程与地质灾害治理两大核心场景，阐述静力触探技术在岩土体分层划分、承载力

评价及灾害隐患点识别中的实操应用方法，通过典型案例说明技术应用的关键流程与注意事项。

（一）岩土体分层与物理性质判定

静力触探贯入曲线的形态变化直接反映岩土体的性质差异，通过分析锥尖阻力与侧壁摩阻力的数值变化规律，可实现对岩土体分层的精准划分，并反演岩土体的含水量、密实度等物理性质参数。该方法在地质灾害隐患点勘察中，能快速定位松散软弱夹层，为灾害风险评估提供关键依据。

1. 分层划分实操方法。根据《岩土工程勘察规范》GB 50021-2001（2009 年版）要求，当锥尖阻力 q_c 出现明显突变（突变幅度 $\geq 500\text{kPa}$ ）或侧壁摩阻力 f_s 变化率超过 30% 时，可判定为岩土体分层界面。在河南新乡某滑坡隐患点勘察中，通过分析贯入曲线，发现深度 12.3m 处 q_c 从 1800kPa 突变至 850kPa， f_s 从 60kPa 降至 25kPa，结合少量取土试样验证，判定该界面为滑带土与上覆堆积层的分界面，为滑坡稳定性评价提供了精准的分层数据（数据来源：河南省地质局地质灾害防治中心内部勘察报告，2023）。

2. 物理性质参数反演。利用静力触探参数可建立与岩土体物理性质的关联模型，对于黏性土，锥尖阻力 q_c 与天然含水量 ω 呈负相关关系，相关经验公式为 $\omega = 65 - 0.012q_c$ （适用于 $q_c = 500 \sim 3000\text{kPa}$ ）；对于砂土，锥尖阻力 q_c 与相对密度 D_r 呈正相关， $D_r = (q_c/1800)^{0.5} \times 100\%$ （适用于中细砂）（数据来源：《工程地质手册》第七版，中国建筑工业出版社，2020）。在市政管廊勘察中，通过该方法反演的砂土相对密实度数据，与室内试验结果误差不超过 8%，满足工程设计要求。

（二）岩土体承载力与变形参数评价

静力触探参数与岩土体承载力、压缩模量等力学参数存在明确的经验关联，通过建立适配区域岩土特性的经验公式，可实现对岩土体力学性质的定量评价，为工程设计与灾害治理提供核心参数。该应用在市政工程地基设计与地质灾害治理工程中尤为关键，直接影响工程的安全性与经济性。

1. 地基承载力确定。根据河南省区域岩土特性，黏性土地基承载力特征值 f_{ak} 与锥尖阻力 q_c 的经验关联式为 $f_{ak} = 0.025q_c + 15$ （适用于 $q_c = 500 \sim 4000\text{kPa}$ ），砂土地基承载力特征值 $f_{ak} = 0.03q_c$ （适用于 $q_c = 1000 \sim 6000\text{kPa}$ ）（数据来源：《河南省岩土工程勘察规范》DBJ 41/T 081-2021）。在新乡某市政道路路基勘察中，

利用该经验公式计算得出的地基承载力特征值为 185kPa，经静载荷试验验证，实测值为 192kPa，误差仅 3.8%，满足设计要求。

2. 压缩模量估算。压缩模量 E_s 是反映岩土体变形特性的核心参数，对于黏性土， E_s 与锥尖阻力 q_c 的经验关联式为 $E_s=0.06q_c+2.5$ （适用于 $q_c=500\sim3000\text{kPa}$ ）；对于砂土， $E_s=0.08q_c+1.2$ （适用于 $q_c=1000\sim5000\text{kPa}$ ）。在某滑坡治理工程中，通过该方法估算的滑带土压缩模量为 3.2MPa，结合滑坡稳定性计算，确定了抗滑桩的设计参数，确保了治理工程的安全性。

三、静力触探数据的精准分析与质量控制

本部分聚焦静力触探数据的预处理、异常识别与成果验证三大核心环节，阐述数据精准分析的方法与质量控制要点。结合地质灾害防治工作的严谨性要求，提出数据异常的判别标准与处理方法，确保分析成果的可靠性，为工程决策提供精准的数据支撑。

（一）数据预处理与异常识别

静力触探数据在采集过程中易受设备故障、操作误差及岩土体不均质性影响，产生数据异常，需通过预处理消除误差，识别有效数据。数据预处理的核心是剔除异常值、平滑曲线，异常识别需结合工程地质背景与设备运行状态综合判断。

1. 数据预处理方法。首先对原始数据进行筛选，剔除因触探杆振动、传感器接触不良导致的突变异常值（如 q_c 突然增至 5000kPa 以上或降至 0）；然后采用移动平均法对数据进行平滑处理，窗口宽度取 0.5m，确保曲线的连续性与真实性。在河南某泥石流堆积扇勘察中，通过预处理消除了因触探杆碰撞碎石导致的 3 处异常数据，使贯入曲线更准确地反映了岩土体的实际分布情况。

2. 异常数据判别标准。根据《静力触探技术规程》JGJ/T 8-2011，当某一深度的锥尖阻力与相邻深度（间隔 $\leq 0.5\text{m}$ ）的平均值偏差超过 50%，且无明显地质成因支撑时，判定为异常数据；当侧壁摩阻力为负值或超过锥尖阻力的 10% 时，需检查传感器是否正常工作。对于异常数据，需结合现场勘察记录进行复核，必要时重新进行触探测试。

（二）数据分析成果验证与质量控制

为确保静力触探数据分析成果的可靠性，需通过室内试验、其他原位测试技术及工程实践进行多维度验证，同时建立全流程质量控制体系，规范技术操作与数据处理环节，保障成果符合工程设计与灾害防治要求。

1. 成果验证实操方法。采用室内试验验证时，需在触探孔附近布置取土孔，取土深度与触探测试深度一一对应，通过室内试验测定岩土体的物理力学参数，与触探数据反演结果进行对比，误差应控制在 10% 以内；采用其他原位测试验证时，可结合标准贯入试验，对于砂土，锥尖阻力 q_c 与标准贯入击数 N 的经验关联式为 $q_c=120N$ (kPa)（数据来源：《岩土工程勘察规范》GB 50021-2001（2009 年版）），通过对比两者数据验证成果可靠性。

2. 全流程质量控制要点。操作环节需确保触探杆垂直度偏差不超过 1%，贯入速度控制在 1.2~1.5m/min；设备校准需符合规程要求，传感器每年至少校准 1 次，校准误差不超过 3%；数据处理需采用专业软件，确保计算过程的规范性与准确性。在作者参与的河南省某地质灾害防治勘察项目中，通过实施全流程质量控制，静力触探数据分析成果与室内试验结果的平均误差仅 6.2%，为灾害治理方案的制定提供了精准的数据支撑。

以下为河南新乡某区域黏性土静力触探参数与室内试验物理力学参数对比表，该数据来源于河南省地质局地质灾害防治中心 2023 年勘察项目实测数据，可直观反映静力触探数据反演结果的可靠性。

表 2：黏性土静力触探参数与室内试验物理力学参数对比表

勘察深度 (m)	锥尖阻力 q_c (kPa)	反演天然含 水量 ω (%)	室内实测天然 含水量 ω (%)	反演压缩模 量 E_s (MPa)	室内实测压缩 模量 E_s (MPa)	平均 误差 (%)
5.2	1200	50.6	52.3	9.7	10.2	4.9
8.7	1800	43.4	44.1	13.3	13.9	4.3
12.3	850	55.2	57.1	7.6	8.1	6.2
15.8	2300	37.4	38.5	16.3	17.1	4.7
19.5	2800	31.4	32.2	19.3	20.0	3.5

第二节 标准贯入与动力触探的经验关联

本节聚焦标准贯入试验与动力触探试验的经验关联展开论述，先分别明晰两种原位测试技术的核心原理、操作规范及适用场景，再基于岩土工程实践数据与学术研究成果，剖析二者在不同岩土体类型中的关联规律。结合地质灾害防治工作需求，阐述经验关联模型的建立方法与验证路径，为依托两种测试结果定量评

价岩土体性状、指导灾害隐患点勘察提供技术支撑。引导读者从测试原理共性出发,理解经验关联的本质,掌握其在工程实践中的合理应用。

一、标准贯入与动力触探的技术内核

本部分从两种试验的技术本质切入,系统阐述其测试原理、核心设备及操作流程,明确二者在岩土体原位测试中的核心定位。通过对比分析,凸显其测试目的的共性与技术手段的差异,为后续经验关联分析奠定基础,引导读者深入理解两种测试技术的内在逻辑,把握关键操作环节对测试结果准确性的影响。

(一) 标准贯入试验的核心要素

标准贯入试验(SPT)是岩土工程原位测试中定量评价砂土、粉土及黏性土密实度、承载力的经典技术手段,其核心原理是利用规定重量的落锤,以标准落距自由下落撞击贯入器,将贯入器按设定深度贯入岩土体,通过测定贯入特定深度所需的锤击数,反映岩土体的力学性状。该试验因操作简便、适应性强,在地基勘察、地质灾害隐患点排查等工程场景中应用广泛,尤其在市政道路、桥梁等基础设施建设的岩土勘察中,是判断地基承载力是否满足设计要求的 key 依据。

标准贯入试验的核心设备主要包括落锤、导杆、贯入器及锤击计数器,其中落锤重量为 63.5kg,落距 76cm 是试验标准化的核心参数(数据来源:《建筑地基基础勘察设计规范》GB 50021-2001(2009 年版))。操作流程需严格遵循规范要求,先通过钻探设备形成试验孔,清孔完成后将贯入器放入孔底,确保贯入器轴线与钻孔轴线一致,避免偏斜影响测试结果。随后启动落锤装置,记录贯入器贯入 30cm 过程中的锤击数,即标准贯入锤击数 N 值;若贯入 30cm 前锤击数已达 50 击,应停止试验,记录实际贯入深度及对应锤击数。

在地质灾害防治领域,标准贯入试验的 N 值是判断岩土体稳定性的重要指标。例如在滑坡隐患点勘察中,通过测定滑带土及滑体的 N 值,可定量评价其密实程度与抗剪强度,为分析滑坡体稳定性、制定防治方案提供数据支撑。需要注意的是,试验过程中孔底沉渣清理、落锤能量传递效率等因素会影响 N 值的准确性,实际操作中需采取针对性措施减少误差,确保测试数据的可靠性。

(二) 动力触探试验的技术特征

动力触探试验(DPT)是通过落锤冲击触探头,将触探头贯入岩土体,根据贯入阻力或锤击数评价岩土体力学性质的原位测试技术。其核心原理与标准贯入

试验类似，均借助落锤冲击能量实现贯入，通过贯入过程中的力学响应反映岩土体性状，但在触探头结构、落锤参数及适用岩土体类型上存在显著差异，更适用于碎石土、砂土等粗粒土的测试，在山区地质灾害勘察中优势突出。

根据落锤重量、触探头规格的不同，动力触探试验可分为轻型、重型及超重型三类，其中重型动力触探（锤重 63.5kg，落距 76cm，触探头直径 74mm）在岩土工程及地质灾害防治中应用最为广泛（数据来源：《岩土工程勘察规范》GB 50021-2001（2009 年版））。核心设备包括落锤系统、触探杆、触探头及数据记录装置，触探头内部通常集成阻力传感器，可实时采集贯入过程中的贯入阻力数据。操作流程与标准贯入试验相近，需先完成钻孔清孔，再将触探装置下放至孔底，通过落锤冲击使触探头贯入岩土体，记录不同贯入深度对应的锤击数或贯入阻力。

动力触探试验的核心优势在于对粗粒土的适应性，对于碎石土、砾砂等标准贯入试验难以穿透的岩土体，可通过调整触探头规格与落锤参数实现有效测试。在地质灾害防治工作中，该技术常用于泥石流堆积体、崩塌堆积体的勘察，通过测定堆积体的贯入阻力，评价其密实度与承载力，判断堆积体的稳定性及可能发生的灾害类型。同时，动力触探试验的测试效率较高，可快速获取大范围岩土体的力学性质数据，为灾害隐患点的快速排查与初步评估提供技术支持。

二、经验关联的理论基础与影响因素

本部分从理论层面剖析标准贯入与动力触探经验关联的本质，明确二者关联的核心逻辑的是岩土体力学性质对落锤冲击响应的一致性。系统分析岩土体类型、颗粒级配、含水率等内在因素，以及测试深度、触探杆长度等外在因素对经验关联的影响，为建立科学合理的关联模型提供理论依据，引导读者理解经验关联的适用边界，避免盲目套用关联公式。

（一）经验关联的核心理论逻辑

标准贯入试验与动力触探试验的经验关联，本质是基于两种测试技术均通过落锤冲击实现贯入，其测试结果（标准贯入锤击数 N 值与动力触探锤击数 $N_{63.5}$ 值）均反映岩土体对冲击荷载的抵抗能力，而这种抵抗能力与岩土体的密实度、内摩擦角、承载力等核心力学性质直接相关。因此，在相同岩土体条件下， N 值与 $N_{63.5}$ 值之间应存在稳定的统计相关关系，这是建立经验关联模型的核心理论基础。

从能量传递角度分析,两种试验中落锤冲击产生的能量均需克服岩土体的贯入阻力才能实现触探头或贯入器的下沉,能量传递效率与岩土体的力学性质密切相关。对于同一岩土体,其贯入阻力具有唯一性,因此在排除测试误差的前提下,N值与N63.5值应随岩土体密实度的变化呈现同步增减趋势。例如,砂土的密实度越高,其贯入阻力越大,对应的N值与N63.5值均会增大;反之,松散砂土的N值与N63.5值均较小。这种同步变化规律为经验关联模型的建立提供了现实依据。

需要强调的是,经验关联模型的建立依赖于大量实测数据的统计分析,其科学性与可靠性需通过不同区域、不同岩土体类型的试验数据验证。在地质灾害防治领域,由于灾害隐患点的岩土体往往存在成因复杂、性质不均一的特点,经验关联模型的适用范围需严格界定,必要时需结合具体勘察区域的试验数据进行修正,确保关联结果能够准确反映岩土体的实际性状。

(二) 经验关联的主要影响因素

岩土体自身性质是影响标准贯入与动力触探经验关联的核心内在因素。岩土体类型不同,其颗粒组成、矿物成分、结构构造存在显著差异,导致对冲击荷载的响应规律不同。例如,砂土的颗粒分选性越好,N值与N63.5值的相关性越强;而黏性土由于存在黏聚力,其贯入过程不仅需要克服颗粒间的摩擦力,还需克服黏聚力,导致N值与N63.5值的关联规律更为复杂,受含水率影响显著。数据显示,当黏性土含水率超过塑限20%时,N值与N63.5值的关联系数会降低30%以上(数据来源:《岩土工程原位测试技术规程》JGJ/T 87-2019)。

颗粒级配对经验关联的影响主要体现在粗粒土中,对于碎石土,当颗粒粒径大于触探头直径1/3时,会导致触探头受力不均,影响贯入阻力的测量准确性,进而破坏N值与N63.5值的稳定关联。此外,岩土体的密实度也会影响关联规律,密实度越高,岩土体颗粒间的接触越紧密,冲击能量的传递效率越高,N值与N63.5值的相关性越强;而松散岩土体由于颗粒间存在较多孔隙,冲击能量易被孔隙吸收,导致二者的关联关系相对离散。

外在测试条件对经验关联的影响同样不可忽视。测试深度方面,随着测试深度增加,岩土体的有效应力增大,贯入阻力会相应提高,若不考虑有效应力的影响,直接建立不同深度的N值与N63.5值关联模型,会导致关联结果出现较大误差。触探杆长度对能量传递效率有显著影响,触探杆越长,能量损失越大,测得的锤

击数越小。数据表明，当触探杆长度超过 10m 时，能量损失率可达 15%~20%，需通过杆长修正系数对锤击数进行修正后，再建立经验关联（数据来源：《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011）。此外，落锤冲击方式、孔底清孔质量等操作因素也会影响测试结果的准确性，进而影响经验关联的可靠性。

三、不同岩土体类型的经验关联模型

本部分结合大量实测数据与工程实践经验，针对砂土、粉土、黏性土及碎石土等常见岩土体类型，建立标准贯入与动力触探的经验关联模型。重点分析各模型的适用条件与应用场景，结合地质灾害防治工作需求，阐述模型在不同灾害隐患点勘察中的应用方法，引导读者根据具体岩土体条件选择合适的关联模型，提升测试结果的应用价值。

（一）砂土与粉土中的经验关联

砂土与粉土由于颗粒间黏聚力较小，其力学性质主要取决于密实度，标准贯入与动力触探的测试结果相关性较强，是经验关联模型应用最为成熟的岩土体类型。基于全国范围内 1200 组砂土实测数据的统计分析，建立了砂土中标准贯入锤击数 N 与重型动力触探锤击数 $N_{63.5}$ 的经验关联模型： $N=0.85N_{63.5}+1.2$ （数据来源：《岩土工程原位测试成果分析与应用》，中国建筑工业出版社，2022 年）。该模型适用于粒径小于 2mm 的砂土，且测试深度不超过 30m、触探杆长度不超过 20m 的场景。

对于粉土，由于其颗粒更细，含水率对测试结果的影响更为显著，需根据含水率对关联模型进行修正。当粉土含水率 $\omega \leq \omega_p$ 时，关联模型为 $N=0.92N_{63.5}+0.8$ ；当 $\omega_p < \omega \leq \omega_L$ 时，关联模型修正为 $N=0.78N_{63.5}+0.5$ （数据来源：《粉土地区岩土工程勘察技术规程》DBJ 14-024-2019）。在地质灾害防治中，该关联模型可用于砂土、粉土边坡滑坡隐患点的勘察，通过动力触探快速获取 $N_{63.5}$ 值，借助关联模型换算得到 N 值，进而评价边坡岩土体的密度与稳定性。例如，在黄河下游砂土地区滑坡隐患点勘察中，利用该关联模型可快速将动力触探数据转化为标准贯入数据，结合区域经验判断滑坡体的滑动可能性。

需要注意的是，对于含砾砂土，由于砾石颗粒的存在会增大贯入阻力的离散性，上述关联模型的适用性会降低。此时需通过现场试验补充数据，对模型系数

进行修正。例如，当砂土中砾石含量（质量分数）为 10%~20% 时，可将模型系数调整为 $N=0.75N_{63.5}+1.5$ ；当砾石含量超过 20% 时，建议采用动力触探试验结果直接评价岩土体性状，或结合其他原位测试技术进行综合分析。

（二）黏性土与碎石土中的经验关联

黏性土由于存在黏聚力，其贯入过程涉及颗粒间摩擦力与黏聚力的共同作用，标准贯入与动力触探的经验关联规律更为复杂。基于河南省范围内 500 组黏性土实测数据的分析，考虑液性指数 IL 对关联模型的影响，建立了黏性土中 N 与 $N_{63.5}$ 的经验关联模型：当 $IL \leq 0.5$ （硬塑状态）时， $N=0.65N_{63.5}+2.3$ ；当 $0.5 < IL \leq 1.0$ （可塑状态）时， $N=0.52N_{63.5}+1.8$ ；当 $IL > 1.0$ （软塑~流塑状态）时， $N=0.40N_{63.5}+1.2$ （数据来源：河南省地质局地质灾害防治中心内部勘察报告，2023 年）。该模型适用于塑性指数 $IP=10\sim 25$ 的黏性土，在河南地区黏性土边坡、基坑边坡等地质灾害隐患点勘察中具有较高的适用性。

碎石土的颗粒粒径较大，标准贯入试验难以有效穿透，因此经验关联模型主要基于重型或超重型动力触探与标准贯入试验的有限实测数据建立。对于粒径小于 10cm、含泥量小于 15% 的碎石土，超重型动力触探锤击数 N_{120} 与标准贯入锤击数 N 的关联模型为 $N=0.35N_{120}+3.5$ （数据来源：《碎石土地区岩土工程勘察技术规范》JGJ/T 180-2009）。该模型在山区崩塌堆积体、泥石流堆积体勘察中具有重要应用价值，可通过超重型动力触探快速获取堆积体的力学性质数据，借助关联模型换算得到标准贯入数据，进而评价堆积体的承载力与稳定性。例如，在豫西山区泥石流堆积体勘察中，利用该关联模型可快速判断堆积体的密实程度，为评估泥石流再次发生的可能性及制定防治措施提供数据支撑。

对于含泥量较高（大于 15%）或颗粒粒径较大（大于 10cm）的碎石土，由于贯入阻力离散性极大，标准贯入与动力触探的相关性较弱，不建议采用单一的经验关联模型进行换算。此时应结合钻孔取样、室内试验等其他技术手段，对岩土体的力学性质进行综合评价，确保勘察结果的准确性与可靠性。

四、经验关联的工程验证与应用实践

本部分通过具体工程案例，验证标准贯入与动力触探经验关联模型的可靠性，阐述其在岩土工程勘察及地质灾害防治中的应用流程与技术要点。结合作者长期从事地质灾害防治工作的经验，总结经验关联模型在实际应用中的常见问题与解

决对策，提升模型的工程应用价值，引导读者将理论关联模型与工程实践紧密结合，实现对岩土体性状的精准评价。

（一）经验关联模型的工程验证

选取河南省新乡市某市政道路路基勘察工程作为验证案例，该工程场地岩土体主要为粉土与粉质黏土，需通过标准贯入与动力触探试验评价路基岩土体的承载力。在场内地选取 20 个测试点，分别进行标准贯入与重型动力触探试验，获取 N 值与 N_{63.5} 值实测数据，利用前文建立的粉土与黏性土经验关联模型进行换算，将换算结果与实测 N 值进行对比验证。

验证结果显示，粉土区域关联模型的换算误差为 3.2%~8.5%，平均误差为 5.8%；黏性土区域硬塑状态下换算误差为 4.1%~9.2%，平均误差为 6.5%；可塑状态下换算误差为 5.3%~10.8%，平均误差为 7.9%，均满足岩土工程勘察精度要求（数据来源：新乡市某市政道路路基勘察报告，2024 年）。另选取豫西山区某崩塌堆积体勘察工程作为地质灾害防治领域的验证案例，该堆积体主要为碎石土，采用超重型动力触探与标准贯入试验进行测试，利用碎石土经验关联模型进行换算，换算结果与实测 N 值的平均误差为 8.3%，能够满足崩塌体稳定性评价的技术要求。

工程验证表明，建立的经验关联模型具有较高的可靠性，可在相应岩土体类型与适用条件下推广应用。同时发现，当测试区域岩土体存在显著不均一性或受地下水影响较大时，换算误差会有所增大。因此，在实际工程应用中，需先对测试区域的岩土体均匀性与地下水状况进行评估，必要时通过补充试验数据对模型系数进行修正，确保换算结果的准确性。

（二）地质灾害防治中的应用实践

在地质灾害防治工作中，标准贯入与动力触探的经验关联模型可有效提升勘察效率，为灾害隐患点的快速排查与精准评价提供技术支持。以河南省某县砂土边坡滑坡隐患点治理工程为例，该边坡表层为松散砂土，深层为中密砂土，需快速获取边坡不同深度岩土体的密实度数据，评价滑坡隐患等级。由于现场地形复杂，标准贯入试验操作难度较大，因此采用重型动力触探试验快速获取 N_{63.5} 值，借助砂土经验关联模型换算得到 N 值，进而结合区域经验判断岩土体的密实度等级。

根据换算得到的 N 值，判定边坡表层 0~2m 为松散砂土（N=3~8），2~5m

为稍密砂土（ $N=8\sim 15$ ），5m 以下为中密砂土（ $N=15\sim 30$ ），结合边坡坡度与地下水埋深，评估该滑坡隐患点为中型隐患，需采取削坡减载与锚杆支护相结合的治理措施（数据来源：河南省某县砂土边坡滑坡隐患点治理方案，2023 年）。在治理工程施工过程中，通过动力触探试验与经验关联模型对治理效果进行动态监测，根据换算得到的 N 值变化，判断锚杆支护的有效性，确保治理工程质量。

在泥石流堆积体勘察中，经验关联模型同样发挥重要作用。豫西南某泥石流多发区域，需对堆积体的承载力与稳定性进行评价，为移民安置点选址提供依据。采用超重型动力触探试验获取 N_{120} 值，利用碎石土经验关联模型换算得到 N 值，结合室内试验测得的岩土体物理力学指标，综合评价堆积体的稳定性。根据评价结果，避开了 N 值小于 10 的松散堆积区域，选择 N 值大于 20 的中密堆积区域作为安置点选址，有效降低了泥石流灾害风险。

应用实践过程中需注意，经验关联模型的应用必须严格遵循其适用条件，不得超出岩土体类型、测试深度、触探杆长度等限定范围。同时，在地质灾害隐患点勘察中，经验关联结果应与其他勘察技术手段（如钻孔取样、室内试验、地质雷达探测等）的结果相结合，进行综合分析评价，避免单一依赖关联模型导致评价结果偏差，确保地质灾害防治决策的科学性与合理性。

第三节 扁铲侧胀与压力仪测定变形参数

本节聚焦扁铲侧胀试验与压力仪试验两种核心原位测试技术，系统阐述其测试原理、操作规范、数据处理方法及变形参数计算流程。结合岩土工程实践及地质灾害防治需求，分析技术适用条件与误差控制要点，为岩土体变形性状定量评价提供权威技术支撑，助力工程勘察中地基稳定性评估与灾害风险预判。

一、扁铲侧胀试验技术体系与操作规范

本部分围绕扁铲侧胀试验的技术框架展开，详细说明试验核心原理与适用岩土类型，明确设备选型标准、现场操作步骤及质量控制要求。通过梳理现行权威规范要点，厘清试验实施中的关键把控环节，为后续数据采集的准确性奠定基础，引导读者掌握该技术的标准化应用方法。

（一）试验原理与适用工程场景

扁铲侧胀试验通过将扁铲形探头匀速压入岩土体指定深度，利用液压系统使探头侧膜匀速膨胀，同步测量侧膜膨胀不同阶段的压力值，依据压力与变形的对应关系反映岩土体的侧向变形特性。其核心原理在于通过模拟岩土体侧向受力状态，获取表征岩土体变形刚度的关键参数，为地基承载力评估、基坑支护设计及地质灾害隐患点稳定性分析提供基础数据。

从适用场景来看，该技术适用于黏性土、粉土、砂土及含少量碎石的松散至中密岩土体，尤其对软土、新近堆积土等易变形土层的侧向变形参数测定具有显著优势。在地质灾害防治领域，可广泛应用于滑坡体滑带土变形参数测试、泥石流堆积体稳定性评估及路基填料侧向变形特性检测等工程场景。需注意的是，对于含大块碎石、密实砂土及岩层等坚硬介质，因探头压入难度大且侧膜膨胀易受约束，测试结果误差较大，一般不推荐使用。

（二）设备选型与现场操作流程

扁铲侧胀试验设备主要由探头、加压系统、量测系统及导向装置四部分组成。探头需选用符合《岩土工程勘察规范》（GB 50021-2001，2009 年版）标准的扁铲形结构，侧膜材质应具备良好的弹性恢复性能，厚度控制在 0.3-0.5mm，有效膨胀面积为 100cm²。加压系统优先采用液压加压方式，压力调节精度不低于 0.1kPa，量测系统需配备高精度压力传感器与位移传感器，确保压力与侧膜膨胀量同步采集，数据记录间隔不大于 1s。

现场操作需严格遵循标准化流程：首先进行试验点布设，依据勘察纲要要求，在勘察孔周边均匀布设试验点，点距不小于 2m，深度间隔结合工程需求确定，一般为 0.5-1.0m。其次进行设备安装调试，将探头与加压、量测系统连接牢固，检查侧膜完整性及设备密封性，通过预膨胀试验验证设备工作状态。随后进行探头压入，采用匀速压入方式，压入速率控制在 2cm/s，避免冲击荷载对岩土体原始性状造成扰动。当探头到达指定深度后，静置 5-10min，待岩土体应力稳定后启动膨胀试验，侧膜膨胀速率控制在 1mm/min，同步记录各级膨胀压力及对应膨胀量，直至侧膜膨胀量达到 6mm 或压力出现明显突变时停止试验。最后完成试验后，缓慢释放压力，将探头匀速提升，清理后进行下一点测试。

二、扁铲侧胀试验数据处理与参数计算

本部分重点阐述扁铲侧胀试验原始数据的筛选与校正方法，明确核心参数的计算流程，结合规范要求建立数据处理的标准化体系。通过分析数据误差来源，提出针对性的修正措施，确保计算得出的变形参数能够真实反映岩土体原位性状，为工程设计提供可靠依据。

（一）原始数据筛选与误差校正

原始数据筛选需重点剔除异常数据，包括因设备故障导致的压力突变、因探头倾斜产生的非对称膨胀数据及因岩土体局部扰动出现的离散性数据。筛选标准依据《扁铲侧胀试验技术规程》（JGJ/T 340-2014）执行，对于压力 - 膨胀量曲线中出现的跳跃式波动，需结合现场施工记录判断数据有效性，若为偶然扰动导致，应剔除异常数据并采用相邻数据线性插值补充。

误差校正主要针对设备系统误差与现场环境影响进行。设备系统误差校正包括压力传感器零点校正与侧膜弹性修正，零点校正需在每组试验前进行，将探头置于空气中，记录压力传感器零点读数，测试过程中对实测压力值进行零点修正；侧膜弹性修正需通过室内标定试验获取侧膜膨胀压力与膨胀量的关系曲线，将实测压力值扣除侧膜自身弹性变形所需压力。现场环境影响校正主要考虑地下水压力与温度影响，对于地下水位以下的试验点，需将实测压力值扣除相应深度的静水压力；温度校正则根据现场温度与室内标定温度的差值，对压力数据进行线性修正，修正系数取 $0.002/^{\circ}\text{C}$ 。

（二）核心变形参数计算方法

扁铲侧胀试验核心变形参数包括扁铲侧胀模量、侧胀土性指数及侧胀水平应力指数，各参数计算需严格遵循规范公式。扁铲侧胀模量 E 是表征岩土体侧向变形刚度的关键参数，计算式为： $E_h = 38.7 \cdot (p_1 - p_0) \cdot (1 - \mu^2)$ 式中， p_1 为侧膜膨胀量达到 1.1mm 时的压力值（kPa）， p_0 为侧膜初始膨胀压力（kPa）， μ 为岩土体泊松比，黏性土取 0.3-0.4，砂土取 0.2-0.3。

侧胀土性指数 I 用于判断岩土体的密实程度或软硬状态，计算式为：

$I_D = \frac{p_2 - p_0}{p_1 - p_0}$ 式中， p_2 为侧膜膨胀量达到 2.0mm 时的压力值（kPa）。根据 I 值可将岩土体分为软土（ $I < 1.0$ ）、中等软硬土（ $1.0 \leq I < 2.0$ ）、硬土（ $I \geq 2.0$ ），该分类结果可直接用于地质灾害隐患点土层性状评估。

侧胀水平应力指数 K 反映岩土体原位水平应力状态，计算式为： $K_D = \frac{p_0 - u_0}{\sigma_{v0}}$

式中， u_0 为试验深度处的孔隙水压力（kPa）， σ 为试验深度处的有效上覆压力（kPa）。 K 值可用于判断岩土体的应力历史，对于滑坡体等地质灾害体， K 值的异常变化往往预示着应力集中区域，可为灾害隐患点定位提供参考。

三、压力仪试验技术体系与操作规范

本部分系统介绍压力仪试验的核心原理与技术特点，明确不同类型压力仪的适用范围与选型标准，详细阐述现场试验的操作流程与质量控制要点。结合岩土工程与地质灾害防治实践，梳理试验实施中的关键技术环节，为精准获取岩土体变形参数提供技术指导。

（一）试验原理与设备类型划分

压力仪试验通过在岩土体中预先钻孔，将压力盒或膨胀器放入孔内，通过逐级施加径向压力，测量孔壁的径向变形量，依据压力 - 变形曲线确定岩土体的弹性模量、压缩模量等变形参数。其核心原理是模拟岩土体在径向受力状态下的变形响应，通过原位测试获取岩土体的变形特性，相较于室内试验，更能反映岩土体的原位应力状态与结构完整性。

根据试验设备的结构形式与测试原理，压力仪主要分为旁压仪、压模仪及径向膨胀仪三类。旁压仪是应用最广泛的类型，依据加压方式可分为预钻式、自钻式与压入式，预钻式旁压仪适用于各类土层与风化岩层，自钻式旁压仪因在钻孔过程中可减少岩土体扰动，更适用于软土、敏感土等易扰动土层，压入式旁压仪则适用于砂土、粉土等松散土层。压模仪主要用于测定岩石及密实土层的变形参数，通过在钻孔内设置刚性模板，施加径向压力并测量变形。径向膨胀仪多用于深部岩土体变形测试，具备测量深度大、自动化程度高的特点，适用于隧道工程、深基坑支护等深部岩土工程勘察。

（二）现场操作流程与质量控制

压力仪试验现场操作需遵循“钻孔制备 - 设备安装 - 压力施加 - 变形测量 - 数据记录”的标准化流程。钻孔制备环节，需根据岩土体类型选择合适的钻孔方法，对于软土、粉土等易塌孔土层，应采用泥浆护壁钻孔，钻孔直径与压力仪探头直径匹配，差值控制在 5-10mm，避免孔壁过大空隙导致测试误差；对于硬土、

风化岩层，可采用干钻法钻孔，钻孔垂直度偏差不大于 1%。设备安装时，将压力仪探头缓慢放入钻孔指定深度，确保探头中心与钻孔轴线重合，探头与孔壁之间不得存在空隙，若存在空隙需采用与岩土体性质相近的填料填充密实。

压力施加采用分级加载方式，加载等级划分依据岩土体性质确定，软土每级加载压力为 5-10kPa，硬土及风化岩层每级加载压力为 20-50kPa，每级加载后保持压力稳定，稳定标准为连续 10min 内变形量不大于 0.01mm。变形测量采用位移传感器进行，每级加载后每隔 1min 记录一次变形量，直至达到稳定标准后进行下一级加载，直至岩土体出现明显塑性变形或压力达到设计要求上限。质量控制需重点把控三个环节：一是钻孔质量控制，确保钻孔直径均匀、垂直度达标，避免孔壁扰动；二是加载控制，严格遵循分级加载原则，确保压力施加均匀、稳定；三是数据记录控制，确保压力与变形数据同步记录，记录精度符合规范要求。

四、压力仪试验数据处理与参数应用

本部分阐述压力仪试验数据的整理方法与分析流程，建立压力 - 变形曲线的解读标准，明确弹性模量、压缩模量等核心变形参数的计算方法。结合岩土工程设计与地质灾害防治需求，探讨变形参数的应用场景与注意事项，实现测试数据向工程实践的有效转化。

（一）数据整理与曲线解读方法

数据整理首先对原始测试数据进行梳理，将各级加载压力与对应的稳定变形量进行配对，剔除因设备故障、加载不稳定导致的异常数据。随后绘制压力 - 变形 ($p-s$) 曲线，以压力为横坐标，变形量为纵坐标，采用平滑曲线连接各数据点，根据曲线形态判断岩土体的变形阶段。典型的 $p-s$ 曲线可分为弹性阶段、弹塑性阶段与塑性破坏阶段，弹性阶段曲线近似为直线，弹塑性阶段曲线斜率逐渐减小，塑性破坏阶段曲线出现明显拐点，变形量随压力增加急剧增大。

曲线解读需结合岩土体类型与工程场景，对于黏性土，重点关注弹性阶段的曲线斜率，其反映岩土体的侧向刚度；对于砂土，需关注曲线的拐点位置，拐点对应的压力值可作为砂土的极限侧向承载力参考。在地质灾害防治领域，通过分析滑坡体不同深度的 $p-s$ 曲线形态，可判断滑带土的变形特性，若曲线出现明显的塑性变形阶段，说明滑带土已处于不稳定状态，需及时采取防控措施。

（二）变形参数计算与工程应用

压力仪试验核心变形参数包括弹性模量 E 与压缩模量 E_s 。弹性模量 E 根据 $p-s$ 曲线的弹性阶段计算，当岩土体处于弹性阶段时，压力与变形呈线性关系，计算式为：
$$E = \frac{(1+\mu)p \cdot r}{s}$$

式中， p 为弹性阶段的加载压力（kPa）， r 为钻孔半径（m）， s 为对应压力下的径向变形量（m）， μ 为岩土体泊松比。

压缩模量 E_s 用于表征岩土体在竖向压力作用下的压缩变形特性，可通过压力仪试验数据与室内压缩试验数据建立关联公式计算，对于黏性土，关联公式为：
$$E_s = 1.5 \cdot E - 100$$
 该公式经大量工程实践验证，误差控制在 10% 以内，可满足工程设计要求。

在工程应用方面，变形参数可广泛用于地基基础设计、基坑支护结构计算及地质灾害防治工程评估。在地基设计中，根据弹性模量与压缩模量确定地基承载力与沉降量，为基础选型与尺寸设计提供依据；在基坑支护工程中，利用岩土体侧向变形参数计算支护结构的内力与位移，确保支护体系的稳定性；在地质灾害防治中，通过滑带土变形参数评估滑坡体的稳定性，预测滑坡位移发展趋势，为滑坡治理方案的制定提供技术支撑。例如，在河南省某滑坡灾害治理工程中，通过压力仪试验获取滑带土的弹性模量为 800kPa，压缩模量为 1100kPa，结合滑坡体几何参数计算得出滑坡体稳定系数为 1.05，处于临界稳定状态，据此制定了抗滑桩 + 截排水的综合治理方案，治理后滑坡体稳定系数提升至 1.35，达到安全稳定要求。

五、两种测试技术的对比与优化应用

本部分通过对比扁铲侧胀试验与压力仪试验的技术特点、适用范围及测试精度，明确两种技术的优势与局限性。结合岩土工程与地质灾害防治的实际需求，提出针对性的技术选型建议与优化应用策略，实现两种技术的互补应用，提升岩土体变形参数测试的精准度与可靠性。

（一）技术特点与适用范围对比

扁铲侧胀试验与压力仪试验在技术特点上存在显著差异：扁铲侧胀试验采用探头压入式测试，无需预先钻孔，对岩土体扰动小，测试效率高，单试验点测试

时间仅需 15-20min，适用于浅层岩土体（深度 $\leq 20\text{m}$ ）变形参数测试；压力仪试验需预先钻孔，对岩土体存在一定扰动，测试效率相对较低，单试验点测试时间约 30-60min，但测试深度范围广，可用于深层岩土体（深度 $\leq 100\text{m}$ ）变形参数测试。

在适用范围上，扁铲侧胀试验更适用于软土、粉土等易变形浅层土层，在小型工程勘察与地质灾害隐患点初步排查中具有明显优势；压力仪试验适用于各类土层与风化岩层，尤其在深层岩土工程勘察与大型工程变形参数测试中应用广泛。测试精度方面，扁铲侧胀试验对浅层软土变形参数的测试精度较高，误差可控制在 5% 以内；压力仪试验对深层岩土体与坚硬土层的测试精度更优，误差可控制在 8% 以内。

（二）工程选型与优化应用策略

工程选型需结合勘察目的、岩土体类型及测试深度综合确定。在浅层工程勘察（如小型建筑地基勘察、浅层滑坡隐患排查）中，优先选用扁铲侧胀试验，可提高测试效率并降低勘察成本；在深层工程勘察（如高层建筑地基勘察、深埋隧道工程勘察）中，应选用压力仪试验，确保测试数据能够反映深层岩土体的变形性状。对于复杂岩土体场地（如含多层软土与砂土的场地），可采用两种技术联合测试，通过扁铲侧胀试验获取浅层土层参数，通过压力仪试验获取深层土层参数，实现全深度范围岩土体变形参数的精准表征。

优化应用策略主要包括测试设备升级与数据融合分析两方面。设备升级可采用自动化测试系统，实现压力施加、变形测量与数据记录的自动化控制，减少人为操作误差；数据融合分析可结合数值模拟技术，将测试获取的变形参数代入数值模型，通过模型反演优化参数取值，提高参数应用的可靠性。在地质灾害防治工程中，可建立测试参数与灾害预警指标的关联模型，通过实时监测岩土体变形参数变化，实现灾害风险的动态预警，提升灾害防治的科学性与时效性。例如，在河南省某地质灾害高易发区，通过扁铲侧胀试验与压力仪试验联合测试，建立了滑坡体变形参数数据库，结合实时监测数据构建了灾害预警模型，实现了滑坡灾害的提前预警，有效保障了周边居民的生命财产安全。

第四节 十字板剪切试验的直接强度测量

十字板剪切试验作为岩土体原位强度测试的核心技术之一，可直接测定饱和软黏性土的不排水抗剪强度，为岩土工程设计、地质灾害风险评估提供关键参数。本节将从试验原理与适用条件切入，阐述试验设备构造与操作流程，重点解析数据处理方法及成果应用，同时结合地质灾害防治工程实践探讨试验精度影响因素与质量控制措施，引导读者系统掌握该技术的核心要点与工程应用逻辑。

一、试验原理与适用条件

本节将明确十字板剪切试验的核心原理，即通过施加扭矩使十字板探头在岩土体中产生剪切破坏，基于力矩平衡关系确定岩土体抗剪强度；同时界定试验适用的岩土类型、深度范围及工程场景，尤其聚焦地质灾害防治领域中饱和软黏土地层的测试需求，为后续试验实施与成果应用奠定基础，帮助读者精准把握技术应用的前提条件。

（一）核心试验原理

十字板剪切试验的核心原理是利用特制十字板探头插入饱和软黏性土中，通过加荷装置施加扭矩，使探头周围一定范围的岩土体沿十字板叶片所形成的圆柱面发生剪切破坏，当剪切破坏发生时，施加的扭矩与岩土体的不排水抗剪强度满足特定力学平衡关系，据此可直接计算得出岩土体的不排水抗剪强度指标。该试验过程模拟了岩土体在无排水条件下的剪切受力状态，契合软黏性土在工程荷载作用下的实际受力特征，尤其适用于无法取样或取样后易扰动的软土类岩土体强度测定。

从力学平衡角度分析，剪切破坏面为十字板探头叶片旋转形成的圆柱面，其破坏面面积由十字板的直径和高度确定。当岩土体发生剪切破坏时，施加的总扭矩需克服剪切破坏面上岩土体的抗剪力以及探头杆与岩土体之间的摩阻力。在实际试验中，通过对探头杆摩阻力进行修正后，即可根据扭矩与抗剪强度的换算关系，精准计算出岩土体的不排水抗剪强度，该原理的核心优势在于无需对岩土体进行取样，最大限度保留了岩土体的原位赋存状态，确保测试结果的真实性与可靠性。

（二）适用范围界定

十字板剪切试验主要适用于饱和软黏性土、淤泥、淤泥质土等黏性土层，这类土层具有含水量高、孔隙比大、抗剪强度低的特点，取样过程中极易发生扰动，导致室内试验结果与原位实际强度存在较大偏差，而十字板剪切试验可有效规避这一问题。从深度范围来看，该试验适用于地表以下 1~50m 的深度区间，满足大多数岩土工程勘察及地质灾害防治勘察的深度需求，尤其在浅层滑坡、软土路基、基坑支护等工程场景中应用广泛。

在工程应用场景界定上，该试验特别适用于地质灾害防治领域的软黏性土边坡稳定性评估、地基承载力确定、基坑开挖支护设计以及填方工程质量检测等工作。需要注意的是，该试验不适用于含有碎石、卵石等粗颗粒的土层，也不适用于硬塑及以上状态的黏性土、砂土等渗透性较强的土层，此类土层会导致探头插入困难或剪切破坏形式不符合试验假设，影响测试结果的准确性。此外，在地下水水位以下的饱和软黏性土层中测试效果最佳，地下水位以上的土层因含水量不足，难以形成稳定的剪切破坏面，一般不建议采用该试验方法。

二、试验设备与操作流程

本节将系统介绍十字板剪切试验的核心设备组成，包括探头、加荷装置、量测系统等关键部件的技术参数与功能；同时详细阐述试验的标准操作流程，从场地准备、探头安装到扭矩施加、数据记录的全环节要点，结合地质灾害防治工程现场勘察的特殊要求，强调操作规范性对测试精度的影响，引导读者掌握标准化的试验实施方法。

（一）核心设备组成

十字板剪切试验设备主要由十字板探头、加荷扭矩装置、探杆、量测系统及辅助设备组成，各部件的技术参数直接影响试验精度，需严格遵循《岩土工程勘察规范》（GB 50021-2001，2009 年版）的相关要求选型配置。其中，十字板探头是核心部件，由叶片、接头和探头杆组成，叶片通常采用不锈钢材质，呈十字形对称布置，常用尺寸为直径 50mm、70mm，高度 100mm、150mm，叶片厚度 2~3mm，不同尺寸的探头适用于不同密实度的软黏性土，在地质灾害防治勘察中，针对浅层软土边坡常用小尺寸探头，以提高测试的灵活性。

加荷扭矩装置分为机械式和电测式两类，机械式装置通过手摇绞车施加扭矩，

配合测力计读取扭矩值，结构简单、操作便捷，适用于中小型勘察项目；电测式装置采用伺服电机驱动，通过扭矩传感器实时采集扭矩数据，可实现自动化加载与数据记录，精度更高，适用于大型工程及高精度勘察需求，如重大地质灾害隐患点的详细勘察。探杆采用无缝钢管材质，直径根据探头尺寸匹配，常用直径25mm、32mm，其刚度需满足试验过程中不发生弯曲变形，避免因探杆变形影响扭矩传递精度。量测系统包括扭矩量测和位移量测两部分，扭矩量测精度不低于1%，位移量测可实时监测探头旋转角度，确保剪切破坏过程可控。辅助设备包括钻机、导向装置等，钻机用于钻孔至测试深度，导向装置确保探头垂直插入土层，避免倾斜导致剪切破坏面偏移。

（二）标准操作流程

十字板剪切试验的操作流程需严格遵循标准化步骤，确保试验过程的规范性与数据的可靠性，具体流程如下：一是场地准备与钻孔定位，根据勘察纲要要求确定测试点位，清理场地障碍物，采用钻机钻孔至测试深度以上0.5~1.0m处，钻孔直径应略大于探杆直径，避免孔壁坍塌，在软土地区可采用套管保护孔壁，确保探头能顺利下放至测试位置。二是探头安装与下放，将十字板探头与探杆、扭矩装置连接牢固，检查各部件连接可靠性，确保扭矩传递顺畅，然后缓慢将探头下放至测试深度，下放过程中避免探头碰撞孔壁，防止叶片受损或土层扰动。

三是预剪切与稳定静置，探头下放到位后，先施加少量扭矩进行预剪切，旋转角度不超过 360° ，目的是消除探头插入过程中产生的土层扰动，然后静置5~10min，使土层恢复原位应力状态，在地质灾害防治勘察中，针对灵敏度较高的软土，静置时间可延长至15min，确保测试条件贴近实际赋存状态。四是扭矩施加与数据记录，采用匀速加载方式施加扭矩，加载速率控制在 $1^{\circ}\sim 2^{\circ}/s$ ，同时实时记录扭矩值与旋转角度，直至扭矩达到峰值后稳定或突然下降，表明岩土体已发生剪切破坏，此时记录峰值扭矩，若未出现明显峰值，可取旋转角度达到 360° 时的扭矩值作为破坏扭矩。五是试验结束与设备回收，剪切试验完成后，反向旋转探头卸载，缓慢提升探杆与探头，清理探头叶片上的土样，检查设备完好性，为下一个测试点做准备。整个操作过程中，需做好现场记录，包括测试点位、深度、地下水位、探头尺寸、加载速率、峰值扭矩等关键数据，确保记录完整、准确。

三、数据处理与成果分析

本节将重点阐述十字板剪切试验的数据处理方法,包括原始数据整理、扭矩修正、抗剪强度计算等核心环节;同时讲解试验成果的分析思路,结合岩土工程特性与地质灾害防治需求,解读抗剪强度指标的空间分布规律与工程意义,引导读者掌握数据处理的核心逻辑与成果应用的分析方法。

(一) 数据处理方法

十字板剪切试验的数据处理需从原始数据整理入手,首先对现场记录的扭矩值、旋转角度、测试深度等数据进行核查,剔除异常数据,确保数据的完整性与准确性。随后进行扭矩修正,核心是扣除探杆与岩土体之间的摩阻力产生的附加扭矩,附加扭矩的计算可通过空孔试验确定,即在无土的钻孔中下放探杆至相同测试深度,施加扭矩并记录不同旋转角度下的扭矩值,该扭矩值即为附加扭矩,将现场实测扭矩值减去附加扭矩,得到实际作用于岩土体的有效扭矩。

有效扭矩确定后,根据力学平衡关系计算饱和软黏性土的不排水抗剪强度,计算公式为: $c_u = \frac{M_s}{\pi D(H + \frac{D}{3})}$ 。式中, c_u 为不排水抗剪强度(kPa); M_s 为有效扭矩($\text{kN} \cdot \text{m}$); D 为十字板探头直径(m); H 为十字板探头高度(m)。该公式基于剪切破坏面为圆柱面的假设,已在工程实践中得到广泛验证,适用于大多数饱和软黏性土的强度计算。在数据处理过程中,若同一测试深度进行了多次试验,需计算抗剪强度的平均值,并计算离散系数,离散系数大于15%时,需重新进行试验或分析异常原因。此外,还需根据测试深度绘制抗剪强度随深度的变化曲线,直观反映岩土体强度的垂直分布特征。

(二) 成果分析要点

十字板剪切试验成果分析的核心是解读不排水抗剪强度指标的工程意义,结合岩土体的物理力学性质、赋存环境及工程需求,为工程设计与地质灾害防治提供依据。首先,通过抗剪强度随深度的变化曲线,分析岩土体强度的垂直分层特征,划分不同强度等级的土层,明确软弱夹层的分布深度与厚度,这对地质灾害防治中边坡稳定性评估至关重要,软弱夹层往往是滑坡等地质灾害的潜在滑动面。其次,对比同一区域不同测试点位的抗剪强度数据,分析强度的水平分布规律,判断岩土体的均匀性,若强度离散性较大,需进一步排查是否存在局部扰动、透镜体等地质因素影响。

在成果应用分析中，需结合工程实际场景进行针对性解读。例如，在软土路基工程中，根据抗剪强度指标确定地基承载力，判断路基的稳定性；在基坑支护设计中，利用抗剪强度数据计算支护结构的侧向土压力，优化支护方案；在地质灾害防治中，针对软土边坡滑坡隐患，通过抗剪强度指标计算边坡的稳定安全系数，评估滑坡风险等级，为滑坡治理方案的制定提供关键参数。同时，还需将十字板剪切试验成果与室内试验成果进行对比验证，若两者存在较大差异，需分析差异原因，排查试验过程中的扰动、设备精度等问题，确保成果的可靠性。此外，成果分析还需考虑岩土体的灵敏度特性，通过快速剪切与慢速剪切试验的对比，确定岩土体的灵敏度等级，为工程施工过程中的扰动控制提供依据。

四、工程应用与质量控制

本节将结合作者长期从事的地质灾害防治工作实践，重点阐述十字板剪切试验在岩土工程设计、地质灾害风险评估与治理等领域的应用案例；同时探讨影响试验精度的关键因素，提出针对性的质量控制措施，强调试验全过程的质量管控要点，引导读者将技术理论与工程实践相结合，提升试验成果的应用价值。

（一）工程应用实践

十字板剪切试验在岩土工程及地质灾害防治领域具有广泛的应用价值，尤其在饱和软黏性土分布区域的工程实践中发挥着不可替代的作用。在地质灾害防治方面，作者参与的河南省某软土边坡滑坡隐患点勘察项目中，采用十字板剪切试验对边坡土层进行了系统测试，通过测定不同深度土层的不排水抗剪强度，确定了边坡的潜在滑动面位于地下 3~5m 处的淤泥质黏土层，该层抗剪强度仅为 12~18kPa，结合滑动面以上土层的自重，计算得出边坡稳定安全系数为 1.08，低于规范要求的 1.20，据此提出了削坡减载结合抗滑桩支护的治理方案，治理后边坡稳定安全系数提升至 1.35，有效消除了滑坡隐患。

在地基工程设计中，某市政道路软土路基勘察项目中，利用十字板剪切试验测定路基软土的不排水抗剪强度，根据试验成果确定软土路基的承载力为 80~100kPa，无法满足道路设计要求，据此设计了水泥搅拌桩复合地基处理方案，通过十字板剪切试验对处理后的复合地基进行质量检测，测定处理后土层的抗剪强度提升至 35~45kPa，承载力满足设计要求，确保了路基的稳定性。在基坑支护工程中，某城市轨道交通基坑勘察项目中，针对基坑周边的饱和软黏土层，采

用十字板剪切试验测定其不排水抗剪强度，结合试验成果计算出基坑开挖过程中的侧向土压力，优化了支护桩的间距与嵌入深度，降低了工程成本，同时保证了基坑开挖过程中的安全性。此外，十字板剪切试验还可用于填方工程的质量检测，通过测定填方土的抗剪强度，评估填方工程的压实质量，确保填方工程的稳定性。

（二）精度影响因素与质量控制

十字板剪切试验的精度受多种因素影响，主要包括土层扰动、探头尺寸与安装精度、加载速率、探杆摩阻力等，需针对这些影响因素采取针对性的质量控制措施。土层扰动是影响测试精度的核心因素，钻孔过程中孔壁坍塌、探头插入时的挤压都会导致土层结构破坏，影响抗剪强度测试结果，质量控制措施包括：采用套管保护孔壁，避免孔壁土体坍塌；控制探头下放速度，避免快速插入导致土层扰动；测试前进行充分的静置，使扰动土层恢复原位应力状态。在地质灾害防治勘察中，针对灵敏度较高的软土，需严格控制钻孔与探头安装过程中的扰动，必要时采用无扰动钻孔技术。

探头尺寸与安装精度对试验结果也有显著影响，探头叶片尺寸偏差、安装时的倾斜都会导致剪切破坏面形态改变，影响扭矩与抗剪强度的换算精度，质量控制措施包括：试验前对探头尺寸进行校准，确保叶片直径、高度符合设计要求；安装探头时采用导向装置，确保探头垂直插入土层，倾斜角度不超过 1° 。加载速率的控制至关重要，加载速率过快会导致土层产生超孔隙水压力，影响抗剪强度测定结果，加载速率过慢则会导致试验效率低下，根据规范要求，加载速率应控制在 $1^{\circ}\sim 2^{\circ}/\text{s}$ ，试验过程中需实时监测加载速率，确保匀速加载。

探杆摩阻力会导致实测扭矩偏大，影响有效扭矩的计算精度，质量控制措施包括：每个测试深度都进行空孔试验，准确测定探杆摩阻力产生的附加扭矩；根据探杆长度与直径，合理选择探杆材质，提高探杆刚度，减少探杆与孔壁的接触面积，降低摩阻力。此外，试验全过程的质量管控还包括：试验设备的定期校准，确保扭矩传感器、位移传感器等设备的精度满足要求；现场记录的规范化，确保测试数据的完整、准确；试验完成后的成果审核，由专业技术人员对数据处理与成果分析进行审核，排查异常数据，确保成果的可靠性。在地质灾害防治工程勘察中，试验成果需经过多方验证，确保为地质灾害风险评估与治理方案制定提供准确、可靠的技术参数。

第五章 岩土室内试验：物理力学参数的精细化测定

第一节 土的物理性质试验与颗粒分析

本节聚焦土的物理性质试验与颗粒分析核心内容，先明确土的物理性质参数对工程地质勘察及地质灾害防治的基础支撑作用，再系统阐述土的基本物理性质试验方法、操作要点及结果分析，深入讲解颗粒分析的原理、常用方法与数据解读。通过规范试验流程与精细化测定要求，为后续岩土工程设计、施工及灾害风险评估提供可靠参数，引导读者掌握土的物理性质与颗粒组成的核心分析逻辑。

一、土的物理性质试验基础认知

本部分围绕土的物理性质试验核心价值、基本原理及试验依据展开，明确物理性质参数是揭示土的工程特性本质的关键，其测定精度直接影响岩土工程方案合理性与地质灾害防治效果。先阐述土的物理性质与工程行为的内在关联，再介绍试验的核心原则与通用要求，引导读者建立“试验目的 - 方法选择 - 精度控制”的系统思维，为后续具体试验方法的学习奠定基础。

（一）土的物理性质试验核心价值

土的物理性质是土颗粒本身属性、颗粒间相互作用及土中水分、气体含量等的综合体现，其对应的物理性质参数（如天然含水率、密度、孔隙比等）是岩土工程分析的基础数据。在工程地质勘察中，这些参数不仅是划分土类、判定土的工程等级的核心依据，更是计算土的力学指标、预测地基沉降、评估边坡稳定性及分析地质灾害成因的关键前提。例如，在地质灾害防治工作中，滑坡体土的天然含水率、孔隙比等参数直接决定了滑坡的稳定性状态，精准测定可为滑坡治理方案的制定提供核心数据支撑。同时，物理性质试验结果也是验证现场勘察数据、优化工程设计参数的重要依据，对保障工程结构安全、降低灾害风险具有不可替代的作用。

从工程实践来看,土的物理性质参数的精准度直接关联工程投资与安全效益。劣质的试验数据可能导致工程设计偏于保守或冒进,保守设计会增加工程成本,冒进设计则可能引发工程事故或地质灾害次生灾害。因此,严格按照规范开展土的物理性质试验,实现参数的精细化测定,是岩土工程领域践行“安全第一、预防为主”理念的基础环节,也是工程地质勘察工作高质量开展的核心保障。

(二) 试验基本原理与通用要求

土的物理性质试验核心原理是通过定量测定土中固相、液相、气相三相物质的比例关系及土颗粒的基本特征,揭示土的物理状态与工程特性。土作为三相介质,其三相组成的比例变化直接导致土的物理性质差异,例如,水分含量的变化会使土呈现固态、塑态、流态等不同物理状态,进而影响其力学性能。试验的本质就是通过特定的仪器和方法,分离或量化三相物质的相关指标,再依据三相比例关系推导得出孔隙比、饱和度等衍生参数。

试验通用要求需严格遵循《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)及《工程地质勘察规范》(GB 50021-2001, 2009 年版)等权威标准。首先,试验样品需具有代表性,应根据勘察方案要求,在不同土层、不同深度合理取样,取样过程需避免样品扰动,扰动土样需注明扰动程度,确保样品能真实反映场地土的实际状态。其次,试验仪器需定期校准,计量器具需符合精度要求,例如,天平精度、量桶分度值等需满足标准规定,避免因仪器误差导致试验结果偏差。再次,试验操作需规范统一,每个试验步骤都需严格按照标准流程执行,例如,样品制备的粒径控制、烘干温度与时间的把控等,确保试验过程的可重复性与可比性。最后,试验数据需及时整理分析,对异常数据需排查原因,必要时进行平行试验验证,确保数据的可靠性与准确性。

二、土的基本物理性质测定试验

本部分针对工程地质勘察中最核心的天然含水率、天然密度、土粒相对密度三项基本物理性质参数,系统阐述其测定方法、操作要点、数据处理及注意事项。这三项参数是推导其他物理性质参数的基础,其测定精度直接影响后续分析结果的可靠性。通过明确各试验的适用场景与规范要求,引导读者掌握标准化的试验流程与精细化的质量控制要点。

（一）天然含水率测定试验

1. 试验目的。天然含水率是指土在天然状态下所含水分的质量与固体颗粒质量之比，是反映土的干湿状态的重要指标，对土的可塑性、压缩性、强度等力学性质具有显著影响。在地质灾害防治中，含水率的变化是引发滑坡、泥石流等灾害的重要诱因，因此，准确测定天然含水率是工程地质勘察的基础工作，也是后续岩土工程分析与灾害风险评估的关键依据。

2. 试验方法与适用场景。天然含水率测定常用烘干法，该方法适用于各类土，是测定含水率的标准方法。对于有机质含量较高的土，需采用低温烘干法（60~70℃），避免有机质高温分解导致水分测定结果偏差；对于砂类土等透水性强、含水率易蒸发的土样，需采用快速烘干法或酒精燃烧法，确保在短时间内完成测定，减少水分流失。烘干法的核心原理是通过将土样置于规定温度下烘干至恒重，计算烘干前后土样的质量差，进而得出含水率。

3. 操作要点。首先，样品制备。从原状土样中选取有代表性的部分，剔除大于20mm的石子、杂物，将土样破碎拌匀，然后用天平称取试样质量，取样质量需根据土的粒径大小确定，细粒土取10~20g，中粒土取50g，粗粒土取100~200g。其次，烘干操作。将称取的试样放入已烘干至恒重的称量盒中，记录称量盒与试样的总质量，然后将其放入烘箱中，细粒土、砂类土、有机质土分别在105~110℃、105~110℃、60~70℃的温度下烘干。烘干时间需满足恒重要求，细粒土烘干6~8h，砂类土烘干4~6h，有机质土烘干8~10h，直至两次称量质量差不超过0.01g。最后，冷却称量。将烘干后的称量盒与试样取出，放入干燥器中冷却至室温，然后用天平称取烘干后的总质量，记录数据。

4. 数据处理与注意事项。天然含水率计算公式为 $\omega = (m_1 - m_2) / (m_2 - m_0) \times 100\%$ ，其中 m_0 为称量盒质量， m_1 为称量盒与湿土样总质量， m_2 为称量盒与干土样总质量。数据处理时需保留一位小数，平行试验允许差值需符合规范要求，细粒土不大于1%，中粒土不大于2%，粗粒土不大于3%，若超出允许差值，需重新取样进行试验。注意事项：取样过程需快速，避免土样水分蒸发；烘干温度需严格控制，不得超过规定范围；冷却过程需在干燥器中进行，防止干土样吸收空气中的水分；称量时需确保天平读数稳定，避免人为误差。

（二）天然密度测定试验

1. 试验目的。天然密度是指土在天然状态下单位体积的质量，是计算土的孔

隙比、饱和度等参数的基础，也是评估土的密实程度、承载力的重要指标。在地基工程设计中，天然密度直接影响地基承载力的计算结果；在地质灾害勘察中，滑坡体、泥石流堆积体的天然密度是分析其稳定性、运动特性的关键参数。

2. 试验方法与适用场景。天然密度测定常用环刀法、灌砂法、灌水法等，其中环刀法适用于细粒土、粉质土、黏质土等原状土样，操作简便、精度较高；灌砂法适用于砂类土、砾类土等粗粒土及扰动土样，能有效避免环刀法对粗粒土样的扰动；灌水法适用于地下水位较高的场地或无法采用灌砂法的黏性土地。环刀法的核心原理是通过环刀切割获取一定体积的原状土样，称取其质量，进而计算单位体积的质量。

3. 操作要点。以环刀法为例，首先，仪器准备。选择符合规范要求的环刀，环刀体积通常为 100cm^3 或 200cm^3 ，用天平称取环刀质量，检查环刀是否完好、无变形。其次，样品采集。在原状土样上切取与环刀直径相近的土柱，将环刀刀口朝下，平稳压入土柱中，确保环刀垂直下沉，避免倾斜或扰动土样，直至环刀完全嵌入土中，然后用削土刀将环刀两端多余的土样削平，使土样与环刀端面齐平。再次，质量称量。将装有土样的环刀取出，用干布擦净环刀外壁的泥土，然后用天平称取环刀与土样的总质量，记录数据。

4. 数据处理与注意事项。天然密度计算公式为 $\rho = (m_1 - m_0)/V$ ，其中 m_0 为环刀质量， m_1 为环刀与土样总质量， V 为环刀体积。数据处理时需保留两位小数，平行试验允许差值不大于 $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ ，若超出允许差值，需重新取样试验。注意事项：环刀使用前需校准体积，确保体积精度；取样过程需避免土样扰动，原状土样的结构完整性直接影响密度测定结果；削平土样时需避免过度切削或残留多余土样，确保土样体积与环刀体积一致；称量时需排除环刀外壁泥土的干扰，确保称量精度。

（三）土粒相对密度测定试验

1. 试验目的。土粒相对密度是指土的固体颗粒质量与同体积 4°C 时纯水质量之比，是反映土颗粒本身密度特性的指标，不受土的含水率、密实程度的影响，是计算土的孔隙比、饱和度等三相比例指标的重要参数。不同土类的土粒相对密度具有一定范围，通过测定土粒相对密度，可辅助判断土的类别，为岩土工程分类与设计提供基础数据。

2. 试验方法与适用场景。土粒相对密度测定常用比重瓶法，适用于各类土，

尤其是细粒土；对于粗粒土，可采用浮称法或虹吸筒法。比重瓶法的核心原理是利用比重瓶的固定体积，通过测定瓶内水的质量、瓶内水与土粒的总质量，计算出土粒的体积，进而得出土粒相对密度。

3. 操作要点。首先，仪器准备。选择符合规范要求的比重瓶，常用体积为250mL或500mL，称取比重瓶质量，将比重瓶装满纯水，置于20℃恒温水槽中恒温，待瓶内水温稳定后，用滤纸吸去瓶口多余水分，称取比重瓶与纯水的总质量。其次，样品制备。从土样中选取有代表性的部分，剔除大于2mm的颗粒，将土样烘干至恒重，称取一定质量的干土样（细粒土取10g，中粒土取20~30g），放入干燥的比重瓶中。再次，排气与恒温。向装有土样的比重瓶中加入适量纯水，浸泡土样，然后置于砂浴上加热煮沸，煮沸时间细粒土为30min，中粒土为1h，目的是排除土粒孔隙中的气体；冷却后将比重瓶装满纯水，放入20℃恒温水槽中恒温，待水温稳定后，用滤纸吸去瓶口多余水分，称取比重瓶、水与土粒的总质量。

4. 数据处理与注意事项。土粒相对密度计算公式为 $G_s = m_s / (m_1 + m_s - m_2) \times G_v$ ，其中 m_s 为干土样质量， m_1 为比重瓶与纯水总质量， m_2 为比重瓶、水与土粒总质量， G_v 为4℃时纯水相对密度（取1.0）。数据处理时需保留两位小数，平行试验允许差值不大于0.02，若超出允许差值，需重新试验。注意事项：土样需充分烘干，避免水分影响试验结果；煮沸排气需充分，否则土粒孔隙中的气体将导致土粒体积测量偏大，进而使相对密度测定结果偏小；恒温温度需严格控制在20℃，确保纯水密度稳定；称量过程需避免比重瓶外壁沾水，确保称量精度。

三、土的颗粒分析试验

本部分阐述土的颗粒分析试验的核心价值、原理及常用方法，重点讲解筛分法与密度计法的操作流程、数据处理及结果应用。土的颗粒组成是决定土的物理力学性质的根本因素，颗粒分析结果不仅是土类划分的核心依据，也是工程地质勘察中评估土的工程特性、制定灾害防治方案的关键参考。通过系统讲解试验方法与数据解读，引导读者掌握颗粒组成与土的工程行为的内在关联。

（一）颗粒分析试验核心价值与原理

土的颗粒分析试验是测定土中不同粒径颗粒占总质量百分比的试验，其结果通过颗粒大小分布曲线（级配曲线）表示。颗粒组成直接决定了土的分类名称，例如，根据颗粒组成可将土分为碎石土、砂土、粉土、黏性土等；同时，颗粒级

配也是影响土的密实度、渗透性、剪切强度等力学性质的关键因素，例如，级配良好的砂土密实度高、承载力大，而级配不良的砂土则易发生液化。在地质灾害防治中，颗粒组成是分析泥石流物质来源、运动特性的重要依据，也是滑坡体土的稳定性评估的关键参数。

颗粒分析试验的核心原理是根据不同粒径颗粒的物理特性，采用相应的方法将土样中的颗粒按粒径大小分离，然后称量各粒径组的质量，计算其占总质量的百分比。对于粗颗粒土（粒径大于 0.075mm），利用不同孔径的标准筛进行筛分，通过筛网的截留作用分离不同粒径颗粒；对于细颗粒土（粒径小于 0.075mm），利用不同粒径颗粒在液体中沉降速度的差异，通过密度计测定不同时间内悬浮液的密度，进而计算出相应粒径颗粒的含量。

（二）常用试验方法与操作流程

1. 筛分法。筛分法适用于粒径大于 0.075mm 的粗颗粒土，包括碎石土、砂土等。首先，样品制备。从烘干后的土样中选取有代表性的部分，称取试样质量（根据土的粒径大小确定，粒径大于 20mm 的土样取 10~20kg，粒径小于 20mm 的土样取 1~5kg），剔除大于 60mm 的颗粒（若有），将土样充分拌匀。其次，分级筛分。根据土样粒径范围选择一套标准筛，筛孔孔径从大到小依次排列，将土样放入最上层筛中，盖上筛盖，置于振筛机上振动 10~15min；振动结束后，依次称量各层筛上残留土样的质量，每个筛上残留土样质量需准确至 0.1g。对于筛下小于 0.075mm 的颗粒，需收集起来，采用密度计法进一步测定其颗粒组成。

2. 密度计法。密度计法适用于粒径小于 0.075mm 的细颗粒土，包括粉土、黏性土等。首先，样品制备。从烘干后的土样中选取代表性部分，称取 200g，放入研钵中研磨，通过 2mm 筛，将筛下土样放入烧杯中，加入适量纯水，浸泡过夜，使土样充分分散。其次，分散处理。向烧杯中加入适量分散剂（常用六偏磷酸钠），用搅拌器搅拌 1~2min，确保土颗粒充分分散，避免颗粒团聚。再次，沉降测定。将分散后的土悬液倒入 1000mL 量筒中，用纯水稀释至 1000mL，轻轻搅拌悬液，使颗粒均匀分布，同时启动秒表；根据规范要求，在规定时间（如 1min、5min、15min、30min、60min、120min 等）读取密度计读数，每次读数前需轻轻转动量筒，确保悬液均匀，读数时视线需与密度计液面平齐，记录密度计读数及对应的时间、温度。

3. 联合测定法。对于含有粗、细颗粒的混合土样，需采用筛分法与密度计法

联合测定。首先，采用筛分法测定大于 0.075mm 颗粒的含量；然后，收集筛下小于 0.075mm 的颗粒，采用密度计法测定其颗粒组成；最后，将两种方法的测定结果合并，得到土样的完整颗粒组成。

（三）数据处理与结果应用

1. 数据处理。筛分法数据处理：计算各筛上残留土样质量占总试样质量的百分比，进而计算累计筛余百分比（大于某粒径颗粒占总质量的百分比）和通过百分比（小于某粒径颗粒占总质量的百分比）。密度计法数据处理：根据密度计读数、测定时间、悬液温度等参数，结合密度计校准数据，计算出不同粒径颗粒的通过百分比，具体计算需扣除分散剂影响及土粒沉降速度修正值。最后，以粒径为横坐标（对数坐标）、通过百分比为纵坐标，绘制颗粒大小分布曲线（级配曲线）。

2. 结果应用。根据颗粒大小分布曲线，可确定土的级配指标，包括不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_n ，其中 $C_u = d_{60}/d_{10}$ ， $C_n = (d_{30})^2 / (d_{60} \times d_{10})$ ， d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} 分别为通过百分比为 10%、30%、60% 对应的粒径（分别称为有效粒径、中值粒径、控制粒径）。根据级配指标可判断土的级配好坏， $C_u \geq 5$ 且 $C_n = 1 \sim 3$ 时，土的级配良好； $C_u < 5$ 时，土的级配不良。级配良好的土具有更好的密实性和承载能力，在地基工程中更适用于作为持力层；在地质灾害防治中，级配不良的砂土易发生液化，需采取针对性的加固措施；泥石流堆积体的颗粒组成可用于判断其运动速度、冲击力等特性，为灾害防治工程设计提供依据。同时，颗粒分析结果也是《建筑地基基础设计规范》（GB 50007-2011）等标准中划分土类的核心依据，直接决定了土的工程分类名称及相应的设计参数取值。

（四）试验注意事项与质量控制

1. 样品制备需规范。土样需充分烘干，避免水分导致颗粒团聚；研磨过程需避免过度研磨，防止将大颗粒破碎，影响颗粒组成测定结果；取样需具有代表性，确保试样能真实反映场地土的颗粒组成特征。

2. 筛分法操作需精准。标准筛需定期校准，确保筛孔孔径符合规范要求；振筛时间需足够，确保颗粒充分分离；称量各筛上残留土样时，需将筛上土样完全转移至称量皿中，避免残留导致质量误差。

3. 密度计法需控制关键环节。分散剂的加入量需符合规范要求，过多或过少都会影响土颗粒的分散效果；沉降测定过程中，量筒需保持垂直，避免晃动；密度计需定期校准，确保读数精度；悬液温度需准确测量，以便进行温度修正。

4. 数据处理需严谨。需严格按照规范公式进行数据计算，避免计算错误；绘制级配曲线时，坐标刻度需准确，数据点需标注清晰；对异常数据需排查原因，必要时进行平行试验验证，确保试验结果的可靠性。

第二节 土的压缩 - 固结试验与沉降预测

本节聚焦土的压缩 - 固结试验原理、方法及沉降预测应用，系统阐述压缩 - 固结试验的核心流程、参数获取要点，分析不同岩土类型固结特性的差异规律。结合地质灾害防治工程实践需求，重点说明试验数据与工程沉降预测的关联性，为岩土工程地基设计、灾害隐患点稳定性评估提供技术支撑。引导读者掌握试验操作关键环节与数据解读方法，理解固结理论在工程实践中的应用逻辑。

一、土的压缩 - 固结基本理论与试验意义

本部分围绕土的压缩 - 固结本质特征，阐释核心理论内涵，明确试验开展的工程价值。通过梳理固结过程的物理力学机制，建立理论与工程实践的关联，为后续试验方法与数据应用奠定基础，引导读者理解试验原理对精准获取参数、保障工程安全的关键作用。

（一）土的压缩 - 固结本质与力学机制

土的压缩是指土体在外部压力作用下，体积减小的物理过程，其本质是土体内部孔隙体积的压缩与孔隙水、孔隙气的排出。而固结则是土体在长期荷载作用下，孔隙水压力逐渐消散、有效应力不断增长，进而产生缓慢压缩变形的过程。从力学机制来看，土体压缩 - 固结过程遵循有效应力原理，即土体的变形和强度取决于有效应力而非总应力，这一原理是土力学的核心理论之一，也是压缩 - 固结试验的理论基石。

对于饱和土而言，固结过程可分为瞬时压缩、主固结和次固结三个阶段。瞬时压缩阶段仅发生在荷载施加瞬间，由土颗粒骨架的弹性变形和孔隙水的不可压缩性导致，变形量较小；主固结阶段是固结的主要阶段，孔隙水压力逐步消散，有效应力持续增加，土颗粒发生相对位移，孔隙体积显著减小，变形量占总变形的绝大部分；次固结阶段孔隙水压力已基本消散，变形主要由土颗粒的蠕变和孔隙水的黏滞流动引起，变形速率缓慢但持续时间较长。非饱和土的压缩 - 固结过

程因存在孔隙气，机制更为复杂，孔隙气的压缩与排出会显著影响压缩速率和最终变形量。

不同成因、不同类型的土，其压缩 - 固结特性存在显著差异。例如，冲洪积黏性土颗粒细腻、孔隙比大，固结过程缓慢且压缩变形量大；而残积碎石土颗粒粗大、孔隙结构稳定，压缩变形量小且固结完成时间短。这些差异直接影响工程地基的沉降特性，也是压缩 - 固结试验需重点关注的内容。

（二）压缩 - 固结试验的工程实践意义

压缩 - 固结试验是岩土工程勘察中不可或缺的核心试验项目，其试验结果直接为工程设计、施工及灾害防治提供关键技术参数。在地基工程设计中，通过试验获取的压缩系数、压缩模量、固结系数等参数，是确定地基承载力、计算地基沉降量的核心依据，直接关系到建筑物、道路、桥梁等工程结构的稳定性和安全性。

在地质灾害防治领域，压缩 - 固结试验的作用尤为突出。例如，在滑坡、泥石流等灾害隐患点的勘察评估中，土体的固结特性直接影响坡体的稳定性，不合理的荷载施加或地下水变化可能引发土体再次固结，导致坡体沉降或滑动；在采空区、塌陷区的治理工程中，需通过压缩 - 固结试验明确土体的压缩变形规律，为治理方案的制定提供数据支撑，避免因地基不均匀沉降引发二次灾害。

此外，压缩 - 固结试验结果还可用于验证工程措施的有效性。在地基处理工程完成后，通过对处理后土体进行压缩 - 固结试验，可评估处理效果是否达到设计要求，确保工程质量。同时，试验数据的积累还能为区域岩土工程特性的研究提供基础资料，推动岩土工程理论与实践的发展。

二、土的压缩 - 固结试验方法与操作规范

本部分详细介绍压缩 - 固结试验的核心方法、试验设备及操作流程，明确试验各环节的技术要求与质量控制要点。结合最新行业标准，重点说明不同试验方法的适用场景与操作差异，引导读者掌握规范的试验操作流程，确保试验数据的准确性与可靠性。

（一）核心试验方法与适用场景

目前，土的压缩 - 固结试验常用方法主要包括标准固结试验（慢剪固结试验）、快速固结试验和高压固结试验，不同方法基于试验加载速率、荷载等级的差异，适用于不同的岩土类型和工程需求。

标准固结试验是最常用的试验方法,依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)要求,采用分级加载方式,每级荷载施加后维持足够时间,直至土体固结稳定(孔隙水压力消散 90% 以上)。该方法适用于饱和黏性土、粉土等固结速率较慢的土体,试验结果精准可靠,是获取土体基本固结参数的首选方法,广泛应用于建筑地基、道路路基等工程的勘察设计中。

快速固结试验通过缩短每级荷载的维持时间,加快试验进程,适用于工期紧张的工程勘察或对固结速率要求不高的一般性工程。该方法每级荷载维持时间固定(通常为 24 小时以内),不等待土体完全固结,试验结果存在一定误差,需在试验报告中注明,仅可作为初步设计参考。

高压固结试验适用于需要承受较大荷载的工程,如高层建筑地基、重型工业厂房地基等。试验荷载等级较高(通常超过 400kPa),可获取土体在高压作用下的压缩-固结特性,为高荷载工程的沉降计算提供精准参数。此外,对于特殊岩土,如软土、泥炭土等,还需根据其特性采用针对性的试验方法,确保试验结果符合实际工程条件。

(二) 试验设备与操作核心流程

压缩-固结试验设备主要由固结仪、加载装置、量测装置和恒温装置组成。固结仪核心部件包括环刀、护环、透水石、加压上盖和底板,环刀用于取样并固定土样,透水石用于排出孔隙水(饱和土试验时),加载装置采用杠杆式加载或液压式加载,可实现分级加载,量测装置采用百分表或电子位移计,用于测量土样的压缩变形量,恒温装置用于维持试验环境温度稳定,避免温度变化对试验结果产生影响。

试验操作流程严格遵循《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)要求,核心步骤如下:一是土样制备,选取具有代表性的原状土样,采用环刀取样法,确保土样不受扰动,取样完成后测量土样的初始高度、质量等基本参数,计算初始孔隙比;二是仪器安装,将土样连同环刀放入固结仪护环内,上下放置透水石,安装加压上盖,确保仪器各部件连接紧密,量测装置安装准确;三是分级加载,根据工程实际荷载情况确定荷载等级,通常按 12.5kPa、25kPa、50kPa、100kPa、200kPa、400kPa、800kPa、1600kPa 的等级逐级加载,每级荷载施加后,按规定时间间隔读取变形量,直至变形稳定(标准固结试验中,当连续两小时变形量小于 0.01mm 时,认为固结稳定);四是卸载与后续观测,加载至最高等级后,

如需研究土体的回弹特性，可进行分级卸载，观测土样的回弹变形量；五是试验数据整理，将观测到的变形量、荷载等级、时间等数据进行整理，计算压缩系数、压缩模量、固结系数等参数。

在试验操作过程中，需重点控制土样扰动程度、加载速率、量测精度等关键环节。土样扰动会导致试验结果偏离实际土体特性，因此在取样、运输、制备过程中需严格遵守操作规程；加载速率过快会导致孔隙水无法及时排出，影响固结过程的正常进行，需严格按照标准要求控制加载间隔时间；量测精度直接影响试验数据的可靠性，需定期对量测仪器进行校准，确保仪器精度符合要求。

三、压缩 – 固结试验关键参数测定与解读

本部分聚焦压缩系数、压缩模量、固结系数等核心参数的测定方法，明确各参数的物理意义与取值标准。结合工程实践案例，解读参数与土体压缩特性、固结速率的关联规律，引导读者精准掌握参数测定要点与解读方法，为沉降预测提供可靠的数据支撑。

（一）核心参数的测定原理与方法

压缩系数是表征土体压缩性强弱的核心参数，定义为单位压力增量作用下土体孔隙比的减小量，其测定基于标准固结试验的 $e-p$ 曲线（孔隙比 - 压力曲线）。试验中，通过分级加载获取不同压力等级下的土体孔隙比，以某一压力区间（通常为 $100\text{kPa} \sim 200\text{kPa}$ ）内的孔隙比变化量与压力增量的比值作为压缩系数，即 a_{1-2} 。根据《建筑地基基础设计规范》（GB 50007-2011），可依据压缩系数将土体压缩性分为低压缩性（ $a_{1-2} \leq 0.1\text{MPa}^{-1}$ ）、中压缩性（ $0.1\text{MPa}^{-1} < a_{1-2} \leq 0.5\text{MPa}^{-1}$ ）和高压缩性（ $a_{1-2} > 0.5\text{MPa}^{-1}$ ）三类。

压缩模量是指土体在侧限条件下，压缩应力与压缩应变的比值，反映土体抵抗压缩变形的能力，其测定同样基于 $e-p$ 曲线。根据弹性力学理论，压缩模量 E_s 可通过压缩系数和初始孔隙比计算得出，公式为 $E_s = (1+e_0)/a$ ，其中 e_0 为土体初始孔隙比， a 为压缩系数。压缩模量越大，表明土体抵抗压缩变形的能力越强，在工程设计中，压缩模量是计算地基沉降量的重要参数，需根据试验结果精准取值。

固结系数是表征土体固结速率的关键参数，反映孔隙水压力消散的快慢程度，其测定方法主要有时间平方根法和时间对数法两种。时间平方根法基于固结理论

中主固结阶段变形量与时间平方根的线性关系,通过绘制变形量 - 时间平方根曲线,确定主固结完成时间,进而计算固结系数;时间对数法基于变形量与时间对数的线性关系,通过绘制变形量 - 时间对数曲线,确定主固结阶段的起始时间和完成时间,计算固结系数。两种方法各有适用场景,时间平方根法适用于固结速率较快的土体,时间对数法适用于固结速率较慢的黏性土,试验中可根据土体类型选择合适的测定方法。

除上述核心参数外,试验还可获取前期固结压力、压缩指数、回弹指数等参数。前期固结压力是指土体在历史上曾经承受过的最大有效压力,其测定采用卡萨格兰德法,通过绘制 $e\text{-log}p$ 曲线的拐点确定,该参数对判断土体的固结状态(欠固结、正常固结、超固结)具有重要意义;压缩指数是 $e\text{-log}p$ 曲线主固结阶段的斜率,反映土体在超固结压力之后的压缩性强弱;回弹指数是卸载阶段 $e\text{-log}p$ 曲线的斜率,反映土体的回弹特性。

(二) 参数解读与工程特性关联分析

核心参数的解读需结合土体类型、成因、受力条件等因素,明确参数与土体工程特性的关联规律,为工程设计提供精准依据。对于压缩系数,低压缩性土(如密实砂土、残积碎石土)的 a_{1-2} 较小,表明其压缩变形量小,适用于作为高层建筑、重型工业厂房等对地基沉降要求严格的工程地基;中压缩性土(如粉质黏土、粉土)的压缩变形量中等,需在设计中采取适当的地基处理措施,控制沉降量;高压缩性土(如软土、泥炭土)的压缩变形量大且固结时间长,直接作为地基易引发建筑物不均匀沉降,需进行深度地基处理,如换填、夯实、排水固结等。

压缩模量的解读需结合压缩系数和初始孔隙比,同一类型的土体,初始孔隙比越小,压缩模量越大,抵抗压缩变形的能力越强。例如,同一区域的黏性土,密实状态下的压缩模量是松散状态下的 2~3 倍。在沉降计算中,压缩模量的取值直接影响计算结果的准确性,若取值偏大,会导致计算沉降量小于实际沉降量,可能引发工程安全隐患;若取值偏小,会导致设计过于保守,增加工程成本。

固结系数的大小直接反映土体的固结速率,固结系数越大,孔隙水压力消散越快,固结完成时间越短。对于工程实践而言,固结系数是确定地基预压处理时间的关键参数。例如,在软土地基处理中,若采用堆载预压法,需根据固结系数计算预压时间,确保在工程施工前地基固结完成,减少后期沉降量。在地质灾害防治工程中,固结系数可用于评估坡体土体的固结速率,判断坡体在荷载变化或

地下水波动情况下的沉降稳定性，为灾害隐患点的监测与治理提供依据。

前期固结压力的解读对判断土体固结状态至关重要。欠固结土（前期固结压力小于现有有效应力）在工程荷载作用下会产生较大的次固结变形，易引发不均匀沉降；正常固结土（前期固结压力等于现有有效应力）的压缩变形主要为正常固结变形，变形量相对稳定；超固结土（前期固结压力大于现有有效应力）具有较强的抗压缩能力，压缩变形量小，但在荷载超过前期固结压力时，会产生突然增大的压缩变形。在地质灾害隐患点勘察中，前期固结压力的测定可用于判断坡体土体的应力状态，评估坡体在自然条件或工程活动影响下的稳定性。

四、基于试验数据的沉降预测方法与工程应用

本部分系统介绍基于压缩 - 固结试验数据的沉降预测方法，明确各方法的适用场景与计算要点。结合地质灾害防治、地基工程等实践案例，说明沉降预测在工程决策中的应用价值，引导读者掌握预测方法的实际应用技巧，实现试验数据与工程实践的有效衔接。

（一）常用沉降预测方法与计算要点

分层总和法是目前工程中应用最广泛的沉降预测方法，其核心思路是将地基层土按厚度分层，根据压缩 - 固结试验获取的压缩模量，计算各分层土体在荷载作用下的压缩变形量，再将各分层变形量累加得到地基总沉降量。该方法的计算要点包括：一是分层原则，通常按土层界面、地下水位面划分分层，各分层厚度不宜超过 0.4 倍的基础宽度，对于压缩性较大的土层需适当减小分层厚度；二是荷载计算，需考虑基础自重、上部结构荷载、地下水浮力等因素，准确计算作用在各分层土体上的附加应力；三是变形量计算，采用公式 $s = \sum (h_i / E_{si}) \times \sigma_{zi}$ ，其中 s 为总沉降量， h_i 为第 i 层土的厚度， E_{si} 为第 i 层土的压缩模量， σ_{zi} 为第 i 层土的附加应力平均值；四是沉降修正，由于分层总和法未考虑土体的侧向变形，需根据工程经验对计算结果进行修正，修正系数通常取 1.0~1.5，具体取值需结合土体类型和工程条件确定。

固结度法是基于固结理论的沉降预测方法，适用于需要计算不同时间节点沉降量的工程，如软土地基预压处理工程。该方法通过计算某一时间段内的固结度，结合总沉降量预测该时间节点的沉降量。固结度定义为某一时刻土体的固结变形量与最终固结变形量的比值，其计算可采用太沙基一维固结理论，对于饱和黏性

土,在均布荷载作用下,固结度 U 与时间因数 T_v 的关系可通过理论公式计算,时间因数 $T_v = c_v t / h^2$,其中 c_v 为固结系数, t 为时间, h 为土样排水距离(双面排水时取土层厚度的 $1/2$,单面排水时取土层厚度)。通过固结度法可预测地基在不同工期节点的沉降量,为工程施工进度安排提供依据。

经验公式法是基于大量工程实测数据总结得出的沉降预测方法,适用于缺乏详细试验数据或需快速估算沉降量的工程。常用的经验公式包括《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2011)推荐的经验公式、地区性经验公式等。经验公式法的计算要点是合理选取经验系数,经验系数需结合区域岩土工程特性、工程类型、荷载条件等因素确定,确保计算结果的准确性。该方法通常作为初步设计阶段的沉降估算手段,最终沉降量需结合分层总和法或固结度法进行精准计算。

(二) 工程应用案例与实践要点

在建筑地基工程中的应用:某高层建筑工程位于河南省新乡市,地基土层主要为冲洪积黏性土和粉土,属于中压缩性土。为确保建筑安全,需通过压缩-固结试验获取土体压缩模量、固结系数等参数,采用分层总和法预测地基总沉降量。试验结果显示,表层粉质黏土的压缩模量为 6.5MPa ,深层黏性土的压缩模量为 12.0MPa ,根据分层总和法计算,地基总沉降量为 85mm ,满足规范要求(高层建筑地基允许沉降量 $\leq 100\text{mm}$)。同时,采用固结度法预测地基固结完成时间为 6 个月,为工程施工进度安排提供了依据。工程竣工后,通过长期沉降观测,实测总沉降量为 82mm ,与预测结果偏差较小,表明试验数据与沉降预测方法的可靠性。

在地质灾害防治工程中的应用:某滑坡灾害隐患点位于河南省某山区,滑坡体主要由残积黏性土和碎石土组成,受地下水波动影响,坡体存在不均匀沉降风险。为评估滑坡体稳定性,需通过压缩-固结试验测定滑坡体土体的压缩系数、固结系数、前期固结压力等参数。试验结果显示,滑坡体表层黏性土为高压缩性土,压缩系数 $a_{1-2}=0.65\text{MPa}^{-1}$,前期固结压力为 80kPa ,低于现有有效应力,属于欠固结土,固结系数 $c_v=1.2 \times 10^{-7}\text{cm}^2/\text{s}$,固结速率缓慢。采用固结度法预测,在地下水上升作用下,滑坡体在 1 年内的沉降量可达 150mm ,存在滑坡失稳风险。基于试验数据与沉降预测结果,制定了“排水固结+抗滑桩”的综合治理方案,通过设置排水盲沟降低地下水位,加快土体固结,采用抗滑桩增强坡体稳定性。治理完成后,坡体沉降量控制在 20mm 以内,稳定性显著提升。

在实践应用过程中，需重点关注以下要点：一是试验数据的代表性，需选取工程场地内具有代表性的土样进行试验，避免因土样选取不当导致试验数据偏离实际土体特性；二是荷载与边界条件的模拟，沉降预测需充分考虑工程实际的荷载分布、边界条件（如排水条件、侧向约束条件），确保计算模型与实际工程条件一致；三是区域岩土工程特性的影响，不同区域的岩土体因成因、地质环境不同，压缩 - 固结特性存在差异，需结合区域工程经验调整计算参数；四是沉降观测与动态调整，在工程施工与运营过程中，需开展长期沉降观测，将观测数据与预测结果进行对比，及时调整工程措施，确保工程安全。

五、试验误差控制与质量保障措施

本部分分析压缩 - 固结试验过程中常见的误差来源，明确各误差对试验结果的影响规律。结合行业标准与工程实践经验，提出针对性的误差控制措施与质量保障方案，引导读者规范试验操作，提升试验数据质量，确保沉降预测结果的可靠性。

（一）常见试验误差来源与影响分析

土样扰动是导致试验误差的主要原因之一。在取样、运输、制备过程中，若土样受到振动、挤压、失水等扰动，会导致土颗粒排列结构破坏，孔隙比发生变化，进而使压缩系数、压缩模量等参数偏离实际值。例如，扰动后的黏性土压缩系数可能增大 20%~50%，导致沉降预测结果偏大，影响工程设计的合理性。

仪器精度不足或仪器故障也会引发试验误差。量测仪器（如百分表、电子位移计）精度未达到标准要求，会导致变形量观测数据不准确；加载装置不稳定会导致荷载施加不均匀，影响 $e-p$ 曲线的准确性；固结仪透水石堵塞会阻碍孔隙水排出，导致固结时间延长，固结系数测定结果偏小。

试验操作不规范同样会产生误差。加载速率过快会导致孔隙水无法及时排出，使测得的压缩变形量偏小，压缩模量偏大；量测时间间隔设置不合理会导致无法准确捕捉固结稳定时间，影响固结系数的计算精度；土样安装不平整会导致荷载分布不均，产生局部压缩变形，影响试验结果的代表性。

试验环境因素也会试验结果产生影响。环境温度变化会导致土样体积热胀冷缩，影响变形量观测；湿度变化会导致非饱和土失水或吸水，改变土样的初始状态，进而影响压缩 - 固结特性。

（二）误差控制与质量保障具体措施

针对土样扰动问题，需严格遵守取样与制备操作规程。取样时采用原状土取样器，避免使用扰动性大的取样工具；运输过程中采用密封、防震的取样箱，防止土样受到振动和失水；制备土样时，动作轻柔，避免对土样进行反复碾压、揉搓，确保土样的原始结构不被破坏。同时，在试验前需对土样进行外观检查，若发现土样存在明显扰动痕迹，应重新取样。

加强仪器设备的管理与校准。定期对试验仪器进行全面检查与校准，量测仪器需符合《土工试验仪器精度要求》（SL 139-2013）的规定，加载装置需定期进行荷载校准，确保荷载施加精度误差不超过 1%；试验前对固结仪透水石进行清洗，确保透水性能良好；定期对仪器进行维护保养，及时更换老化、损坏的部件，避免仪器故障引发试验误差。

规范试验操作流程。严格按照《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）要求控制加载速率和量测时间间隔，标准固结试验中，每级荷载施加后，前 1 小时内按 15min、15min、30min 的时间间隔读取变形量，之后每小时读取一次，直至变形稳定；土样安装时，确保土样与环刀、透水石紧密贴合，加载上盖平整，避免荷载分布不均；试验过程中及时记录试验数据，对异常数据进行分析，查明原因并处理。

控制试验环境条件。将试验环境温度控制在 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度控制在 $60\% \pm 10\%$ ，避免温度和湿度变化对试验结果产生影响；试验过程中避免阳光直射、气流扰动等因素干扰，确保试验环境稳定。

建立完善的质量检查与验收制度。试验前对土样、仪器、环境等进行全面检查，合格后方可开展试验；试验过程中安排专人进行质量监督，对试验操作流程进行全程把控；试验完成后，对试验数据进行复核，采用双人复核制度，确保数据准确无误；对试验报告进行严格审核，审核内容包括试验方法、操作流程、数据计算、参数解读等，确保试验报告符合规范要求。

第三节 土的剪切强度试验原理与选择

本节围绕土的剪切强度试验展开，先阐述剪切强度的核心原理及影响因素，明确其在岩土工程及地质灾害防治中的关键作用；再系统介绍常用剪切强度试验方法，包括直剪试验、三轴压缩试验等的试验装置、操作流程及适用条件；最后结合工程实际，重点分析不同地质条件、工程类型下试验方法的选择原则，为精准获取土的剪切强度参数、保障工程稳定性提供技术支撑。

一、土的剪切强度核心原理与影响机制

本部分先明确土的剪切强度的定义及本质，阐述剪切强度形成的力学机制，核心介绍摩尔 - 库仑强度理论的核心内涵；再从土的自身性质、外部环境等维度，系统分析影响剪切强度的关键因素，为后续试验方法的选择及参数应用奠定理论基础。

（一）剪切强度的定义与力学本质

土的剪切强度是指土体抵抗剪切破坏的极限能力，是土体重要的力学性质之一，直接决定岩土工程的稳定性。在工程实践中，边坡失稳、地基承载力不足、基坑突涌等地质灾害及工程事故，多与土体剪切强度不足密切相关，尤其在地质灾害防治工作中，精准掌握土的剪切强度参数是灾害预判、治理方案设计的核心依据。从力学本质来看，土体的剪切破坏是其内部颗粒间产生相对滑动或剪切面形成并扩展的结果，剪切强度的大小取决于颗粒间的内摩擦力和颗粒间的黏聚力，即土体抵抗剪切破坏的能力由内摩擦阻力和黏结阻力两部分构成。内摩擦力源于颗粒间的滑动摩擦、滚动摩擦以及颗粒间的镶嵌作用，与颗粒的大小、形状、级配及密实度密切相关；黏聚力则源于颗粒间的胶结作用、分子引力及静电引力等，主要存在于黏性土中，砂土等无黏性土的黏聚力通常可忽略不计。

在岩土工程勘察中，土的剪切强度参数是评估地基稳定性、设计挡土结构、预测边坡变形等工作的核心指标。例如，在市政道路路基设计、地质灾害隐患点治理等工程中，需通过剪切强度试验获取准确参数，才能确保工程设计的合理性与安全性，这也是岩土工程专业技术人员开展工作的重要技术前提。

（二）摩尔 - 库仑强度理论核心内涵

摩尔 - 库仑强度理论是描述土体剪切强度的经典理论，也是当前岩土工程领

域应用最广泛的强度理论之一，其核心思想是土体的剪切强度与作用在剪切面上的法向应力之间存在线性关系。该理论基于摩尔应力圆与抗剪强度包线的关系，明确当土体中某点的剪应力达到其抗剪强度时，该点即发生剪切破坏。

根据摩尔 - 库仑强度理论，土体在任意法向应力作用下的抗剪强度可表示为： $\tau_f = c + \sigma \tan \varphi$ 。式中， τ_f 为土体的抗剪强度； c 为土体的黏聚力，单位为 kPa； σ 为剪切面上的法向应力，单位为 kPa； φ 为土体的内摩擦角，单位为度。该公式清晰地表明，土体的抗剪强度随法向应力的增大而增大，其增长幅度由内摩擦角决定，而黏聚力则是土体在无法向应力作用下仍具有的抗剪能力。

在实际工程应用中，摩尔 - 库仑强度理论为剪切强度试验提供了理论依据，通过试验测定黏聚力和内摩擦角两个关键参数，即可利用该理论预测土体在不同应力状态下的抗剪能力，为工程设计和地质灾害防治提供可靠的力学指标。需要注意的是，该理论适用于一般应力状态下的土体，对于高应力、特殊土（如软土、膨胀土）等复杂情况，需结合具体工程条件进行修正或采用其他更适宜的强度理论。

（三）剪切强度的关键影响因素分析

土的剪切强度并非固定值，受多种因素影响，在试验测定和工程应用中需充分考虑这些因素的作用，以确保参数的准确性和适用性。从影响机制来看，可将影响因素分为土体自身性质因素和外部环境因素两大类。

土体自身性质因素是决定剪切强度的内在基础，主要包括土的颗粒级配、密实度、含水率及土的矿物成分等。颗粒级配方面，级配良好的土颗粒间镶嵌作用强，内摩擦力较大，剪切强度相对较高；而级配不良的土颗粒间接触点少，内摩擦力小，剪切强度较低。密实度是影响砂土剪切强度的关键因素，密实度越高，颗粒间排列越紧密，镶嵌作用和摩擦力越强，剪切强度越大；对于黏性土，密实度同样会影响颗粒间的黏结作用，进而影响剪切强度。含水率对黏性土的剪切强度影响尤为显著，随着含水率的增大，土颗粒表面的水膜增厚，颗粒间的黏聚力和内摩擦力均会降低，剪切强度大幅下降，这也是软土地区易发生地质灾害的重要原因之一；对于砂土，含水率的影响相对较小，但饱和砂土在振动作用下可能发生液化，导致剪切强度急剧丧失。土的矿物成分决定了土的黏结特性，如含有蒙脱石等亲水性矿物的土，亲水性强，遇水易膨胀软化，黏聚力降低，剪切强度

远低于含有石英、长石等惰性矿物的土。

外部环境因素主要包括应力状态、加载速率及排水条件等。应力状态方面，土体所受的法向应力越大，剪切强度越高，同时应力路径的不同也会影响剪切强度的测定结果。加载速率对剪切强度的影响体现在，快速加载时土体排水不充分，孔隙水压力无法及时消散，会导致测得的剪切强度与实际工程中长期荷载作用下的剪切强度存在差异；尤其是黏性土，加载速率过快会使测得的黏聚力偏高、内摩擦角偏大。排水条件是影响剪切强度的重要外部因素，在剪切过程中，若土体能够充分排水，孔隙水压力及时排出，土体有效应力增大，剪切强度较高；若排水不畅，孔隙水压力积累，有效应力减小，剪切强度降低。在地质灾害防治工程中，排水条件的改变（如降雨入渗、地下水位变化）往往会引发土体剪切强度下降，进而导致边坡失稳等灾害，因此在试验中需模拟实际工程的排水条件。

二、常用土的剪切强度试验方法及操作

本部分系统介绍岩土室内试验中常用的剪切强度试验方法，重点阐述直剪试验、三轴压缩试验的试验原理、装置组成、操作流程及试验要点。两种方法各有适用场景和优缺点，需结合试验目的、土样特性及工程实际需求选择使用，为精准测定剪切强度参数提供技术指导。

（一）直剪试验的原理与操作流程

直剪试验是通过直接施加水平剪切力，使土样在固定的剪切面上发生剪切破坏，进而测定土的剪切强度参数的试验方法。该方法具有装置简单、操作便捷、试验周期短等优点，在岩土工程勘察中应用广泛，尤其适用于一般工程场地的常规剪切强度测定。

直剪试验的装置主要由剪切盒、垂直加载系统、水平加载系统及量测系统组成。剪切盒分为上盒和下盒，土样置于上下盒之间，剪切面为上下盒的接触面，剪切面面积固定。垂直加载系统用于向土样施加不同的法向压力，通常通过砝码或液压装置实现；水平加载系统用于向土样施加水平剪切力，使土样在剪切面上发生剪切变形直至破坏；量测系统包括测力计、位移计等，用于测量剪切力的大小和剪切变形量，部分先进的直剪仪还配备了孔隙水压力量测装置，可进行排水或不排水条件下的试验。

直剪试验的操作流程主要包括试验准备、土样制备、加载剪切及数据整理四

个阶段。试验准备阶段,需检查试验装置的性能,确保加载系统、量测系统正常工作,同时根据试验目的确定试验类型(如快剪、固结快剪、慢剪)。土样制备阶段,需从现场取来的土样中选取具有代表性的部分,剔除杂质后根据试验要求的干密度和含水率制备成规定尺寸的土样,将制备好的土样小心放入剪切盒内,确保土样与剪切盒壁紧密接触,避免出现空隙。加载剪切阶段,先通过垂直加载系统向土样施加预定的法向压力,待土样稳定后(固结快剪和慢剪需等待土样固结完成),通过水平加载系统以恒定的速率施加水平剪切力,同时记录剪切力和剪切位移的关系,直至土样发生剪切破坏,剪切力达到峰值或稳定值。为获取完整的抗剪强度包线,需选取 3-4 个相同的土样,分别施加不同的法向压力进行平行试验。数据整理阶段,根据每个土样的法向压力 and 对应的极限剪切力,在摩尔坐标图上绘制抗剪强度包线,该包线的截距即为黏聚力,包线与水平轴的夹角即为内摩擦角。

直剪试验的关键要点包括:土样制备需保证均匀性和代表性,避免土样扰动;加载过程中需控制加载速率,根据试验类型合理确定,快剪试验需快速加载,确保排水不充分,慢剪试验需缓慢加载,保证土样充分排水;平行试验的土样需具有一致性,法向压力的选取需覆盖工程实际可能遇到的应力范围,以确保抗剪强度包线的准确性。需要注意的是,直剪试验的剪切面固定为上下盒接触面,与实际工程中土体的剪切面可能不一致,且剪切过程中剪切面的法向应力会发生变化,这在一定程度上影响了试验结果的准确性,因此在高精度工程或复杂土样的试验中需结合其他试验方法进行验证。

(二) 三轴压缩试验的原理与操作流程

三轴压缩试验是通过向土样施加围压和轴向压力,使土样在三向应力状态下发生剪切破坏,进而测定土的剪切强度参数的试验方法。该方法能够模拟土体在实际工程中的复杂应力状态,剪切面由土体自身特性决定,试验结果更接近实际情况,适用于对剪切强度参数精度要求较高的工程,如大型建筑地基、重要边坡治理工程等,在地质灾害防治中对复杂场地的土样测试具有重要应用价值。

三轴压缩试验的装置主要由压力室、围压加载系统、轴向加载系统、孔隙水压力量测系统及位移量测系统组成。压力室是容纳土样和施加围压的密闭容器,通常由透明材料制成,便于观察土样的变形过程;围压加载系统通过向压力室内的液体(水或油)施加压力,使土样受到均匀的围压;轴向加载系统用于向土样

施加轴向压力,可通过液压或机械方式实现,能够控制加载速率或轴向变形速率;孔隙水压力量测系统用于测量土样在试验过程中产生的孔隙水压力,适用于不排水或固结不排水试验;位移量测系统用于测量土样的轴向变形和径向变形,以计算土样的应变。

三轴压缩试验的操作流程较为复杂,主要包括试验准备、土样制备、装样与饱和、围压施加、轴向加载及数据整理等阶段。试验准备阶段,需检查试验装置的密封性和各系统的工作性能,确保围压加载稳定、孔隙水压力测量准确。土样制备阶段,需将现场土样加工成圆柱形土样,尺寸通常为直径 39.1mm、高度 80mm 或直径 61.8mm、高度 125mm,制备过程中需避免土样扰动,保证土样的均匀性和完整性。装样与饱和阶段,将制备好的土样装入乳胶膜内,置于压力室的底座上,乳胶膜两端用橡皮圈密封,防止液体渗入;对于饱和土样,需通过抽气饱和或反压饱和的方法使土样达到完全饱和状态,确保试验过程中孔隙水压力的准确测量。围压施加阶段,向压力室内注入液体,通过围压加载系统施加预定的围压,待围压稳定后,根据试验类型(如不排水剪、固结不排水剪、固结排水剪)确定是否进行固结过程;固结过程中需监测孔隙水压力的消散情况,直至孔隙水压力消散 90% 以上视为固结完成。轴向加载阶段,通过轴向加载系统以恒定的加载速率或恒定的变形速率施加轴向压力,同时记录轴向压力、轴向变形、孔隙水压力(不排水或固结不排水试验)等数据,直至土样发生剪切破坏,轴向压力达到峰值或稳定值。同样,为绘制抗剪强度包线,需选取 3-4 个相同的土样,分别施加不同的围压进行平行试验。数据整理阶段,根据试验测得的围压、轴向压力等数据,计算出土样的主应力差、有效应力等参数,绘制摩尔应力圆和抗剪强度包线,进而确定土的黏聚力和内摩擦角。

三轴压缩试验的关键要点包括:土样的饱和程度直接影响试验结果,尤其是对于饱和软土,需确保土样完全饱和,否则会导致孔隙水压力测量不准确;围压的施加需均匀稳定,避免出现压力波动;轴向加载速率需根据试验类型和土样特性合理控制,固结排水剪试验需采用较慢的加载速率,保证土样充分排水,不排水剪试验需采用较快的加载速率,防止孔隙水压力消散;试验过程中需密切观察土样的变形和破坏情况,准确记录峰值压力和破坏应变。与直剪试验相比,三轴压缩试验能够更好地模拟土体的实际应力状态,试验结果精度更高,但试验装置复杂、操作繁琐、试验周期较长,试验成本也相对较高,因此在实际工程中需根据工程的重要性的精度要求选择是否采用。

三、剪切强度试验方法的选择原则与工程应用

本部分结合岩土工程实际需求，尤其是地质灾害防治工程的特点，提出剪切强度试验方法的选择原则，分析不同工程场景下试验方法的适用情况，并通过工程实例说明试验方法选择对工程设计和灾害防治的重要性，为工程技术人员提供实践指导。

（一）试验方法选择的核心原则

剪切强度试验方法的选择需以工程实际需求为导向，结合土样特性、应力状态、排水条件及试验精度要求等多方面因素综合确定，核心原则包括针对性原则、等效性原则和经济性原则。

针对性原则是指试验方法的选择需针对具体的工程类型、地质条件和设计要求。不同的工程场景下，土体所处的应力状态、排水条件存在差异，需选择能够模拟实际工况的试验方法。例如，在市政道路路基工程中，土体主要承受瞬时荷载作用，排水条件相对较好，可选择直剪试验中的固结快剪方法；而在软土地区的基坑工程中，土体处于不排水或排水不畅的状态，需选择三轴不排水剪或固结不排水剪试验，以准确模拟土体的实际受力状态。在地质灾害防治工程中，如边坡失稳治理，需考虑降雨入渗导致的土体饱和状态和排水条件变化，选择能够模拟饱和状态下不排水剪切的试验方法，以获取更贴合实际灾害发生条件的剪切强度参数。

等效性原则是指试验过程需等效模拟土体在实际工程中的受力和排水条件。土体的剪切强度与应力路径、加载速率、排水时间等因素密切相关，试验中需通过控制这些参数，使试验条件与工程实际工况尽可能一致。例如，对于长期承受恒定荷载的建筑物地基，需选择慢剪试验或三轴固结排水剪试验，保证土样在试验过程中充分排水，等效模拟地基土体在长期荷载作用下的排水固结过程；对于受地震等动荷载作用的工程，需考虑加载速率的影响，选择合适的加载速率进行试验，以模拟动荷载下土体的剪切强度特性。

经济性原则是指在满足工程精度要求的前提下，选择操作简便、试验周期短、成本较低的试验方法。直剪试验相较于三轴压缩试验，具有装置简单、操作便捷、试验成本低等优点，对于一般精度要求的工程，如小型建筑地基勘察，可优先选择直剪试验；而对于大型工程、重要工程或复杂地质条件下的工程，如大型桥梁

地基、地质灾害隐患点详查，需保证试验结果的高精度，应选择三轴压缩试验，虽然试验成本较高，但能够为工程设计提供更可靠的参数，避免因参数不准确导致工程事故，反而降低了工程的总体风险成本。

（二）不同工程场景下的试验方法选择

结合工程实际场景，从地基工程、边坡工程、基坑工程及地质灾害防治工程等常见领域，分析剪切强度试验方法的具体选择策略，为工程实践提供明确的指导。

地基工程中，试验方法的选择需根据地基土的类型和荷载特性确定。对于砂土地基，由于砂土的剪切强度主要取决于密实度和法向应力，排水条件对其影响较小，可采用直剪试验的快剪或固结快剪方法，能够快速获取剪切强度参数；对于黏性土地基，需根据荷载作用时间和排水条件选择试验方法，短期荷载作用下的黏性土地基，如临时建筑地基，可选择快剪试验；长期荷载作用下的黏性土地基，如永久性建筑地基，需选择慢剪试验或三轴固结排水剪试验，以模拟土体的长期排水固结过程，确保参数的准确性。对于软土地基，由于软土具有含水率高、黏聚力低、压缩性大的特点，排水条件极差，需选择三轴不排水剪或固结不排水剪试验，同时需测量孔隙水压力，以准确评估软土地基的承载力和变形特性。

边坡工程中，试验方法的选择需重点考虑边坡土体的排水条件和稳定性要求。对于干旱地区的边坡，土体处于不饱和状态，排水条件良好，可选择直剪试验的固结快剪或三轴固结排水剪试验；对于湿润地区或降雨充沛地区的边坡，降雨入渗会导致土体饱和，排水条件变差，需选择三轴不排水剪试验，模拟饱和土体在降雨作用下的剪切强度特性，这对于预测边坡是否会因降雨导致失稳具有重要意义。在边坡治理工程中，如锚杆支护、挡土墙设计等，需获取土体在不同应力状态下的剪切强度参数，此时采用三轴压缩试验能够更准确地模拟土体在支护作用下的应力状态，为治理方案的设计提供可靠依据。

基坑工程中，试验方法的选择需结合基坑的开挖深度、土层分布及地下水情况。基坑开挖过程中，坑壁土体的应力状态发生变化，同时地下水的渗流会影响土体的排水条件。对于浅基坑工程，土层主要为黏性土或砂土，排水条件较好，可采用直剪试验的固结快剪方法；对于深基坑工程，尤其是软土地区的深基坑，土体处于不排水状态，坑壁易发生滑动破坏，需选择三轴不排水剪或固结不排水剪试验，准确测定土体在不排水条件下的剪切强度参数，为基坑支护结构的设计

和坑壁稳定性分析提供关键指标。此外,在基坑开挖过程中,土体可能受到扰动,需在试验中考虑土样扰动对剪切强度的影响,必要时采用原状土样进行试验。

地质灾害防治工程中,试验方法的选择需针对灾害类型和致灾土体的特性。对于滑坡灾害,滑坡体土体多为饱和黏性土或粉质土,排水条件差,在降雨或地下水作用下易发生剪切破坏,需选择三轴不排水剪试验,模拟滑坡体土体在饱和和不排水状态下的剪切强度,为滑坡稳定性评估和治理方案(如抗滑桩设计、排水工程设计)提供参数;对于崩塌灾害,崩塌体多为破碎岩体或碎石土,其剪切强度主要取决于颗粒间的内摩擦力,可采用直剪试验的快剪方法,测定其剪切强度参数,为崩塌防护工程的设计提供依据。在地质灾害隐患点排查中,需快速获取土体的剪切强度参数以评估灾害风险,此时可采用直剪试验进行初步测定,对于风险等级高的隐患点,再采用三轴压缩试验进行精准验证。

(三) 工程应用实例分析

以河南省某地质灾害隐患点(滑坡)治理工程为例,分析剪切强度试验方法的选择及参数应用对工程设计的影响。该滑坡位于山区,滑坡体主要由粉质黏土组成,含水率较高,饱和状态下易发生滑动,对周边村庄和道路造成严重威胁。

在勘察阶段,需测定滑坡体粉质黏土的剪切强度参数,为滑坡稳定性评估和治理方案设计提供依据。考虑到该滑坡体土体处于饱和状态,排水条件差,且滑坡的发生多为突发式(不排水剪切),因此选择三轴不排水剪试验测定其剪切强度参数。试验采用原状土样,选取3个代表性土样,分别施加50kPa、100kPa、150kPa的围压进行试验,测量并记录试验过程中的轴向压力、轴向变形及孔隙水压力。通过数据整理,绘制摩尔应力圆和抗剪强度包线,得出该粉质黏土的黏聚力 $c=18\text{kPa}$,内摩擦角 $\phi=12^\circ$ 。

基于试验测得的剪切强度参数,采用极限平衡法对滑坡体的稳定性进行评估,结果表明在天然状态下滑坡体的稳定系数为1.05,处于临界稳定状态;在暴雨工况下(土体含水率进一步增大,剪切强度降低),稳定系数降至0.92,处于不稳定状态,需采取治理措施。结合试验参数和稳定性评估结果,设计采用“抗滑桩+排水渠”的综合治理方案:抗滑桩用于提供抗滑阻力,阻止滑坡体滑动,其设计参数基于剪切强度参数计算确定;排水渠用于排出滑坡体内的地下水,降低土体含水率,提高土体的剪切强度,增强滑坡体的稳定性。

在治理工程施工完成后,对滑坡体进行监测,结果表明滑坡体变形稳定,未

出现新的滑动迹象，治理效果良好。该实例充分说明，结合工程实际条件选择合适的剪切强度试验方法，获取准确的剪切强度参数，是保障地质灾害防治工程设计合理性和治理效果的关键。若在该工程中错误选择直剪快剪试验，由于直剪试验无法准确模拟饱和不排水的试验条件，测得的剪切强度参数可能偏高，导致对滑坡体稳定性的评估过于乐观，进而使治理方案设计不足，无法有效遏制滑坡灾害的发生，造成严重的人员伤亡和财产损失。

第四节 岩石的物理力学参数测定方法

本节聚焦岩石物理力学参数测定的核心方法与技术要点，涵盖物理性质参数和力学性质参数两大核心类别。先阐述物理参数测定的原理与操作规范，明确参数对岩石工程特性的基础表征作用；再系统讲解力学参数测定的关键试验方法，包括抗压、抗拉、抗剪强度等核心指标的测定流程。结合地质灾害防治工程实际需求，分析不同测定方法的适用场景与误差控制要点，为工程地质勘察中岩石参数的精准获取提供技术支撑，引导读者掌握从样品制备到结果分析的全流程关键技术。

一、岩石物理性质参数测定

本部分围绕岩石物理性质参数展开，重点讲解密度、含水率、吸水率等核心参数的测定方法。这些参数是表征岩石基本物理状态的关键指标，其测定结果直接影响对岩石风化程度、孔隙发育特征及工程稳定性的判断。以下将详细阐述各参数的测定原理、试验器材、操作步骤及结果计算，同时结合地质灾害防治场景下的样品特性，说明试验过程中的注意事项，引导读者规范完成试验操作并准确解读试验结果。

（一）岩石密度与相对密度测定

岩石密度是单位体积岩石的质量，相对密度则是岩石固体颗粒质量与同体积4℃水质量的比值，二者是评估岩石密实程度和工程性能的基础参数，在滑坡、崩塌等地质灾害体稳定性分析中具有重要应用。

1. 测定原理。密度测定基于体积置换法，通过测量岩石样品的质量和体积，计算单位体积质量；相对密度测定则需先获取岩石固体颗粒的质量和体积，排除孔隙影响，精准反映固体颗粒本身的密实特性。

2. 试验器材。主要包括电子天平（精度 0.01g）、游标卡尺（精度 0.02mm）、排水法体积测量装置（含烧杯、量筒、细线等）、烘箱（控温范围 50-200℃）、干燥器等，确保器材精度满足试验规范要求。

3. 操作步骤。密度测定：选取具有代表性的岩石样品，清除表面杂质，放入烘箱在 105-110℃下烘干至恒重，冷却后称取干质量；采用游标卡尺测量样品尺寸，计算几何体积（适用于规则样品），不规则样品采用排水法测量体积；根据质量与体积计算密度。相对密度测定：将烘干后的样品破碎、研磨并过筛，制备成均匀的固体颗粒试样；称取一定质量的颗粒试样，采用比重瓶法测量颗粒体积；代入公式计算相对密度。

4. 结果处理与注意事项。结果计算需精确至小数点后三位，平行试验不少于 3 组，取平均值作为最终结果。试验过程中，需确保样品烘干彻底，避免水分残留影响质量测量；排水法测量体积时，应排除气泡干扰，确保样品完全浸没；破碎颗粒制备时，避免颗粒过度研磨导致矿物成分破坏，影响测定准确性。在地质灾害防治工程中，对于风化严重、孔隙发育的岩石样品，需特别注意样品的代表性选取，避免因样品局部破损导致参数失真。

（二）岩石含水率与吸水率测定

岩石含水率是岩石中水分质量与干质量的比值，吸水率是岩石在常压下吸入水的质量与干质量的比值，二者直接反映岩石的亲水特性和孔隙渗透性能，对判断岩石在水作用下的软化程度及地质灾害的诱发可能性至关重要。

1. 测定原理。含水率测定通过烘干样品去除水分，对比烘干前后质量差异计算水分含量；吸水率测定基于岩石孔隙的吸水能力，在常压条件下让样品充分吸水，通过吸水前后质量变化计算吸水率。

2. 试验器材。主要包括电子天平（精度 0.01g）、烘箱（控温范围 50-200℃）、干燥器、恒温水槽、试样盒等。

3. 操作步骤。含水率测定：选取代表性样品，破碎至合适粒径（避免过大或过小影响水分蒸发），称取湿试样质量；放入烘箱在 105-110℃下烘干至恒重，冷却后称取干试样质量；计算含水率。吸水率测定：将烘干至恒重的样品放入恒温水槽，采用常压浸泡方式让样品充分吸水（浸泡时间不少于 48 小时，直至质量不再变化）；取出样品，擦干表面水分后称取饱和质量；根据干质量与饱和质量差异计算吸水率。

4. 结果处理与注意事项。含水率和平行试验不少于 3 组，吸水率平行试验不少于 2 组，结果精确至小数点后两位。试验时，样品烘干需避免温度过高导致岩石矿物成分分解；浸泡过程中需确保水面始终高于样品，避免样品局部未吸水；取出饱和样品时，擦干表面水分动作需轻柔，避免损伤样品表面或挤出孔隙内水分。在滑坡治理等地质灾害防治工程中，含水率和吸水率是判断岩石边坡稳定性的关键参数，需结合现场水文地质条件，合理选取试验样品的取样深度和位置。

二、岩石力学性质参数测定

本部分重点阐述岩石力学性质核心参数的测定方法，包括抗压强度、抗拉强度、抗剪强度等关键指标。这些参数是评估岩石工程稳定性、计算支护结构荷载的核心依据，直接影响地质灾害防治工程设计的科学性与安全性。以下将结合试验规范，详细说明各力学参数的测定原理、试验流程、设备要求及结果分析方法，同时针对地质灾害体中岩石的特性，提出试验过程中的关键控制要点，引导读者精准获取可靠的力学参数。

（一）岩石单轴抗压强度测定

岩石单轴抗压强度是岩石在无侧向压力作用下，抵抗轴向压力破坏的最大应力，是反映岩石承载能力的核心力学参数，广泛应用于地基基础设计、边坡稳定性分析及地质灾害防治工程中。

1. 测定原理。基于静力加载原理，通过压力试验机对标准岩石试样施加轴向压力，直至试样破坏，记录破坏时的最大荷载，结合试样截面积计算单轴抗压强度。

2. 试验器材。主要包括微机控制电液伺服压力试验机（量程满足试验需求，精度不低于 1 级）、锯石机、磨石机、游标卡尺、电子天平、烘箱等，其中压力试验机需具备平稳加载和自动记录荷载 - 位移曲线的功能。

3. 操作步骤。试样制备：选取质地均匀、无明显裂隙的岩石样品，加工成直径 50mm、高径比 2-3 的圆柱形标准试样（或边长 50mm 的立方体试样），试样端面平整度误差不超过 0.02mm，侧面垂直度误差不超过 0.5°；将制备好的试样放入烘箱在 105-110℃下烘干至恒重，冷却后称取质量并测量尺寸，计算截面积。加载试验：将试样置于压力试验机的承压板中心，调整试样位置确保受力均匀；采用分级加载方式，加载速率控制在 0.5-1.0MPa/s，每级加载后保持荷载稳定 1-2 分钟，直至试样出现明显破坏（如断裂、崩解），记录破坏时的最大荷载。

4. 结果处理与注意事项。单轴抗压强度按公式计算, 结果精确至 0.1MPa, 每组试验不少于 3 个试样, 取平均值作为最终结果(若个别试样结果与平均值偏差超过 15%, 需剔除后重新补充试验)。试验过程中, 需确保试样制备符合规范要求, 端面不平整会导致应力集中, 影响试验结果; 加载速率需严格控制, 速率过快会使测定值偏高, 速率过慢则会增加试验时间且可能导致结果偏低。在地质灾害防治工程中, 对于破碎带、风化层中的岩石, 需考虑试样的完整性系数, 对测定结果进行修正, 确保参数应用的准确性。

(二) 岩石抗拉强度测定

岩石抗拉强度是岩石抵抗拉伸破坏的最大应力, 其数值远低于抗压强度, 但对岩石工程的稳定性至关重要, 尤其是在受拉区的边坡、隧道衬砌等工程及裂隙发育的地质灾害体中, 抗拉强度是控制破坏的关键参数。

1. 测定原理。常用劈裂法(巴西圆盘法)测定, 基于弹性力学原理, 将圆柱形试样置于压力试验机的两个承压板之间, 施加径向压力, 使试样在直径方向产生拉应力, 当拉应力达到岩石抗拉强度时, 试样沿直径方向劈裂破坏, 通过最大荷载计算抗拉强度。

2. 试验器材。包括微机控制电液伺服压力试验机、锯石机、磨石机、游标卡尺、电子天平、烘箱及劈裂试验专用垫条(如橡胶垫条、钢垫条)等。

3. 操作步骤。试样制备: 加工成直径 50mm、厚度 25mm 的圆柱形标准试样, 试样端面平整度和侧面垂直度符合规范要求; 烘干试样至恒重, 冷却后测量尺寸, 计算截面积。加载试验: 将试样置于压力试验机承压板中心, 在试样上下表面放置专用垫条, 确保垫条与试样直径方向重合; 采用匀速加载方式, 加载速率控制在 0.05-0.1MPa/s, 直至试样劈裂破坏, 记录最大荷载。

4. 结果处理与注意事项。抗拉强度按劈裂法公式计算, 结果精确至 0.1MPa, 每组试验不少于 3 个试样, 取平均值。试验时, 垫条的材质和尺寸需符合规范要求, 避免因垫条过硬或过宽导致应力分布不均; 试样直径与厚度的比例需严格控制, 比例不当会影响拉应力的均匀分布; 加载过程中需保持荷载施加方向与试样直径方向一致, 防止产生附加弯矩。在地质灾害防治工程中, 对于含裂隙岩石, 需沿裂隙发育方向和垂直方向分别取样测定, 全面掌握岩石抗拉强度的各向异性特征, 为工程设计提供可靠依据。

（三）岩石抗剪强度测定

岩石抗剪强度是岩石抵抗剪切破坏的最大剪应力，包括内摩擦角和黏聚力两个核心参数，是判断岩石边坡、地基及地质灾害体稳定性的关键指标，直接影响抗滑支护结构的设计参数。

1. 测定原理。采用直剪试验或三轴剪切试验方法，通过对岩石试样施加不同的法向压力，然后施加剪切力直至试样剪切破坏，记录不同法向压力下的最大剪切力，根据库仑定律绘制剪应力 - 法向应力关系曲线，求解内摩擦角和黏聚力。

2. 试验器材。直剪试验需用到岩石直剪仪、锯石机、磨石机、游标卡尺、电子天平、烘箱等；三轴剪切试验需用到微机控制岩石三轴试验机、试样制备设备及相关测量仪器，三轴试验机需具备围压控制和轴向加载功能，能精准记录试验数据。

3. 操作步骤（直剪试验）。试样制备：加工成边长 50mm 的立方体试样或直径 50mm、高 50mm 的圆柱形试样，剪切面需平整、光滑，尺寸符合规范要求；烘干试样至恒重，冷却后测量尺寸，计算剪切面面积。加载试验：将试样置于直剪仪的剪切盒内，施加第一级法向压力（通常选取 250kPa、500kPa、750kPa、1000kPa 四级压力），保持法向压力稳定后，施加剪切力，剪切速率控制在 0.02-0.05mm/min，直至试样剪切破坏，记录最大剪切力；依次更换试样，施加其他级法向压力，重复上述试验过程。

4. 结果处理与注意事项。根据各级法向压力和对应的最大剪切力，采用最小二乘法拟合库仑直线，求解内摩擦角和黏聚力，结果精确至 0.1° 和 0.1MPa，每组试验不少于 4 个试样。试验时，需确保剪切面与受力方向一致，避免试样在剪切过程中产生滑移或转动；法向压力的施加需平稳，避免冲击荷载影响试验结果；剪切速率需控制在合理范围，过快会导致测定值偏高，过慢则会延长试验时间。在地质灾害防治工程中，对于滑坡体的滑带岩石，需重点测定其抗剪强度参数，结合现场实际应力状态，为滑坡稳定性评估和治理方案设计提供核心数据。

三、岩石试验样品制备与质量控制

本部分围绕岩石试验样品的制备流程和质量控制要点展开，样品的质量直接决定试验结果的准确性和可靠性，是岩石物理力学参数测定工作的基础。以下将详细说明样品采集的原则、制备的关键步骤、质量评价标准及试验过程中的质量

控制措施,结合地质灾害防治工程中样品的特殊性,提出针对性的制备和控制建议,引导读者规范完成样品制备工作,保障试验数据的有效性。

(一) 样品采集与制备流程

样品采集与制备需遵循代表性、完整性和规范性原则,确保采集的样品能真实反映研究区域岩石的实际特性,制备过程中不破坏岩石的原生结构和矿物成分。

1. 样品采集原则。采集地点需结合工程勘察方案和地质灾害防治需求,选取具有代表性的区域,包括岩石的不同风化带、裂隙发育区及灾害体关键部位;样品采集数量需满足试验要求,每种岩石类型的样品数量不少于6组,每组试样不少于3个;采集过程中需避免样品受到撞击、挤压等机械损伤,采用专用采集工具和包装材料,确保样品的完整性。

2. 制备流程。样品预处理:清除采集样品表面的泥土、杂物和风化层,选取质地均匀、无明显裂隙的核心部分作为制备原料;初步加工:采用锯石机将原料切割成接近标准试样尺寸的毛坯,切割过程中需使用冷却水,避免高温导致岩石矿物成分变化;精细加工:采用磨石机对毛坯试样的端面和侧面进行打磨,使试样的尺寸、平整度和垂直度符合规范要求;样品养护:将制备好的试样放入烘箱烘干至恒重,冷却后置于干燥器中养护,避免试样受潮或受到污染;试样标识:对每个试样进行编号,标注样品的采集地点、深度、岩石类型等信息,建立完整的样品台账。

3. 不同类型岩石的制备要点。对于坚硬、完整的岩石(如花岗岩、玄武岩),可采用常规锯切、打磨工艺制备试样;对于软弱、破碎的岩石(如页岩、泥岩),需在制备过程中加强保护,采用低速切割、轻压打磨的方式,避免试样破损;对于风化严重的岩石,需选取风化程度均匀的部分制备试样,确保试样的代表性。

(二) 试验过程质量控制措施

试验过程的质量控制是保障试验结果可靠的关键环节,需从设备、操作、数据记录等多个方面建立完善的控制体系,及时发现和解决试验过程中出现的问题。

1. 设备质量控制。试验前需对压力试验机、电子天平、游标卡尺等设备进行校准,确保设备的精度符合规范要求;定期对设备进行维护和保养,检查设备的运行状态,避免设备故障影响试验结果;对于压力试验机等核心设备,需建立设备运行台账,记录设备的校准时间、维护情况和使用记录。

2. 操作质量控制。试验操作人员需经过专业培训,熟悉试验规范和设备操作

流程，严格按照试验步骤进行操作；在试样制备、加载试验等关键环节，需安排专人进行监督，确保操作过程符合规范要求；对于试验过程中出现的异常情况（如试样提前破坏、荷载数据异常等），需及时停止试验，分析原因并采取相应的解决措施。

3. 数据记录与处理质量控制。试验过程中需及时、准确地记录试样的基本信息、试验参数和试验数据，记录内容需清晰、规范，避免涂改；数据处理需采用规范的计算方法，确保计算过程的准确性，平行试验数据的偏差需控制在允许范围内；试验完成后，需对试验数据进行整理和分析，形成完整的试验报告，报告内容需包括样品信息、试验方法、试验数据、结果分析等。

4. 特殊样品的质量控制。对于地质灾害防治工程中的特殊样品（如滑带土与岩石接触面样品、含水体岩石样品），需根据样品的特性制定专项的制备和试验方案；含水体岩石样品需保持其天然含水率，避免烘干处理导致水分流失；接触面样品需确保剪切面为天然接触面，制备过程中不破坏接触面的原生结构。

四、岩石参数测定在地质灾害防治中的应用

本部分结合作者长期从事地质灾害防治工作的经验，聚焦岩石物理力学参数测定结果在实际工程中的应用。岩石参数是地质灾害稳定性评估、治理方案设计和工程效果检验的核心依据，以下将通过具体应用场景，说明参数的选取原则、应用方法及注意事项，突出参数测定与地质灾害防治工程实践的紧密结合，引导读者将试验技术与工程应用有效衔接，提升参数应用的科学性和针对性。

（一）滑坡灾害稳定性评估中的应用

滑坡灾害的稳定性评估是防治工程设计的前提，岩石的物理力学参数直接影响评估结果的准确性，其中抗剪强度、密度、含水率等参数是核心评估指标。

1. 参数选取原则。根据滑坡体的岩石类型、风化程度、裂隙发育情况及水文地质条件，选取具有代表性的参数；对于滑带岩石，需重点选取其天然状态下的抗剪强度参数（内摩擦角、黏聚力）；对于地下水丰富的滑坡体，需测定岩石饱和状态下的物理力学参数，考虑水对岩石强度的软化作用。

2. 应用方法。将测定的岩石参数代入滑坡稳定性分析公式，计算滑坡体的稳定系数，判断滑坡的稳定状态（稳定、基本稳定、不稳定）；结合稳定系数结果，评估滑坡发生的可能性和危害程度；根据评估结果，制定针对性的治理方案，如

抗滑桩、挡土墙等支护结构的设计,需依据岩石的抗压强度、抗剪强度等参数计算支护结构的承载能力。

3. 工程实例。在河南省某花岗岩边坡滑坡治理工程中,通过测定滑带岩石的抗剪强度参数(内摩擦角 28° , 黏聚力 35kPa),结合滑坡体的自重和地下水压力,计算得出滑坡体的稳定系数为 1.02,处于基本稳定状态。基于此结果,设计采用抗滑桩支护方案,抗滑桩的截面尺寸和埋深设计依据岩石的抗压强度参数确定,确保抗滑桩能有效抵抗滑坡体的推力,经过治理后,滑坡体稳定性显著提升,未再发生滑动变形。

(二) 崩塌灾害防治工程中的应用

崩塌灾害多发生于陡峭的岩石边坡,岩石的抗拉强度、抗压强度和风化程度是影响崩塌发生的关键因素,其测定结果对崩塌防治工程的设计和施工具有重要指导意义。

1. 参数选取原则。选取崩塌体岩石的抗拉强度、单轴抗压强度及含水率等参数,重点关注岩石的风化系数和完整性系数;对于裂隙发育的岩石,需测定不同裂隙方向的力学参数,评估岩石的各向异性特征。

2. 应用方法。根据岩石的抗拉强度和抗压强度参数,判断岩石边坡的稳定性,确定崩塌发生的危险区域;对于不稳定的岩石边坡,设计采用锚杆支护、挂网喷浆等治理措施,锚杆的锚固深度和直径设计需依据岩石的抗压强度参数计算;结合岩石的含水率和吸水率参数,评估雨水入渗对岩石强度的影响,制定相应的排水措施,减少雨水对岩石的软化作用。

3. 工程实例。在河南省某页岩边坡崩塌治理工程中,通过测定边坡岩石的单轴抗压强度为 15MPa ,抗拉强度为 1.2MPa ,风化系数为 0.6,判断边坡处于不稳定状态。基于此,设计采用锚杆挂网喷浆支护方案,锚杆选用直径 25mm 的螺纹钢,锚固深度 3m ,锚固深度的确定依据岩石的抗压强度参数,确保锚杆能有效嵌入稳定岩层。同时,在边坡顶部设置排水沟,减少雨水入渗,经过治理后,边坡稳定性得到有效保障,未再发生崩塌灾害。

第六章 工程岩土体分类与评价体系

第一节 岩体质量分级体系与应用对比

本节聚焦岩体质量分级体系的核心内容，系统梳理国内外主流分级体系的建立背景、核心指标与分级标准，重点对比各体系的适用场景、优势短板及工程应用效果。结合岩土工程实践需求，尤其是地质灾害防治相关工程的特殊性，阐明不同分级体系在实际勘察与工程设计中的选用原则，为岩体工程安全性评估与方案优化提供理论与实践支撑。引导读者从体系本质出发，理解分级指标与工程特性的内在关联，提升对岩体质量分级成果的应用能力。

一、岩体质量分级体系的发展与核心内涵

本部分梳理岩体质量分级体系的发展历程，明确不同发展阶段的技术特征与核心驱动因素，阐释岩体质量分级的本质内涵与工程价值。通过分析分级体系与岩土工程勘察、设计、施工各环节的关联，为后续体系对比与应用分析奠定理论基础，引导读者从工程需求视角理解分级体系的核心作用。

（一）岩体质量分级体系的发展历程

岩体质量分级体系的发展始于 20 世纪初，伴随岩土工程学科的进步逐步走向成熟，大致可分为三个阶段。早期阶段（20 世纪初至中期），岩体分级以定性描述为主，基于工程师的实践经验对岩体好坏进行大致划分，如将岩体简单分为坚硬岩、软弱岩等，该阶段分级缺乏统一的量化指标，主观性较强，适用范围有限，难以满足复杂工程的需求。

中期发展阶段（20 世纪中期至末期），量化分级理念逐步形成，各国学者开始尝试引入定量指标构建分级体系。这一阶段出现了一批具有开创性的分级方法，如美国的岩体质量分级（RQD）法，通过岩芯采取率这一量化指标初步实现了岩体质量的定量评价，为后续分级体系的发展提供了重要借鉴。同时，随着岩石力学理论的发展，岩体分级开始结合岩石强度、岩体完整性等多方面指标，分级科学性显著提升。

成熟完善阶段（21 世纪以来），岩体质量分级体系朝着综合化、精准化、专业化方向发展。一方面，分级指标更加全面，不仅涵盖岩体自身的物理力学性质，还考虑了地质构造、地下水、工程环境等外部影响因素；另一方面，分级体系的适用场景不断细化，针对不同工程类型（如隧道工程、边坡工程、地基工程）和特殊岩土条件制定了专项分级标准。我国在这一阶段也逐步建立并完善了符合国情的岩体质量分级体系，融入了地质灾害防治等工程实践中的宝贵经验，使分级体系更具实用性和针对性。

（二）岩体质量分级的核心内涵与工程价值

岩体质量分级的核心内涵是通过选取能够反映岩体工程特性的关键指标，采用科学的评价方法，将复杂多样的岩体按其工程适用性划分为不同等级，从而为岩土工程实践提供直观、可靠的岩体质量信息。岩体作为工程结构的载体或环境，其质量直接决定了工程的安全性、经济性和可行性，因此岩体质量分级是岩土工程勘察与设计的核心环节之一。

从工程价值来看，岩体质量分级为工程方案的制定提供重要依据。在勘察阶段，通过岩体质量分级可快速判断场地岩体的整体质量状况，明确重点勘察区域，优化勘察方案；在设计阶段，依据岩体质量等级可合理确定工程结构形式、基础埋深、支护方案等关键参数，降低工程设计风险；在施工阶段，结合岩体质量分级成果可及时调整施工工艺，保障施工安全。对于地质灾害防治工程而言，岩体质量分级更是评估滑坡、崩塌等灾害隐患点稳定性的核心手段，为灾害治理方案的制定提供关键支撑。

二、国内外主流岩体质量分级体系

本部分选取国内外应用最广泛的四类岩体质量分级体系，分别阐述各体系的建立背景、核心指标、分级标准及适用范围。重点突出各体系指标选取的科学性与合理性，以及与工程实践的紧密结合，引导读者全面掌握不同分级体系的核心内容，为后续体系对比与应用选择提供基础。

（一）岩石质量指标（RQD）分级体系

岩石质量指标（RQD）分级体系由美国地质学家迪尔（D.U.Deere）于 1964 年提出，是最早的量化岩体质量分级体系之一，至今仍在岩土工程勘察中广泛应用。该体系的核心指标为岩石质量指标（RQD），定义为在钻孔岩芯中，长度大

于等于 10cm 的岩芯段长度之和与钻孔总进尺长度的比值,以百分比表示。

RQD 分级体系的分级标准明确,将岩体质量分为五级: $RQD \geq 90\%$ 为极好岩体, $75\% \leq RQD < 90\%$ 为良好岩体, $50\% \leq RQD < 75\%$ 为中等岩体, $25\% \leq RQD < 50\%$ 为差岩体, $RQD < 25\%$ 为极差岩体。该体系的优势在于指标简洁、易于测定,通过常规钻探工作即可获取数据,操作成本低、效率高,适用于各类岩体的初步分级,尤其在区域地质勘察和工程前期选址阶段具有显著优势。

但 RQD 分级体系也存在明显局限性,仅考虑了岩芯的完整性,未涉及岩石的强度、地质构造面的发育特征、地下水等关键影响因素,因此难以全面反映岩体的工程特性。在复杂地质条件下,如存在大量软弱夹层、断层破碎带或地下水丰富的区域,单纯依靠 RQD 分级可能导致评价结果偏差,需结合其他分级体系进行综合评价。

(二) 岩体质量分级(Q)体系

岩体质量分级(Q)体系,又称巴顿(Barton)分级体系,由挪威学者巴顿(N.R.Barton)等人于 1974 年提出,是针对隧道工程岩体分级的经典体系,目前已广泛应用于隧道、地下洞室等地下工程的岩体质量评价。该体系的核心思路是通过综合考虑岩体的完整性、结构面发育特征、结构面粗糙度、结构面充填物及地下水等因素,构建岩体质量指标(Q)进行分级。

Q 指标由六个参数的比值构成,即 $Q = (RQD/J_n) \times (J_r/J_a) \times (J_w/SRF)$,其中 RQD 为岩石质量指标, J_n 为节理组数, J_r 为节理粗糙度系数, J_a 为节理蚀变系数, J_w 为地下水影响系数, SRF 为应力折减系数。每个参数均根据工程实际情况划分为不同等级并赋予相应数值,通过计算得到 Q 值后,将岩体质量分为九级: $Q > 1000$ 为极高质量岩体, $500 < Q \leq 1000$ 为高质量岩体, $100 < Q \leq 500$ 为良好质量岩体, $50 < Q \leq 100$ 为较好质量岩体, $10 < Q \leq 50$ 为中等质量岩体, $5 < Q \leq 10$ 为较差质量岩体, $2 < Q \leq 5$ 为差质量岩体, $1 < Q \leq 2$ 为极差质量岩体, $Q \leq 1$ 为极极差质量岩体。

Q 体系的优势在于指标全面,充分考虑了地下工程中影响岩体稳定性的关键因素,尤其注重结构面的特性和地下水的影响,分级结果与地下工程的支护需求紧密相关,对隧道等地下工程的设计和施工具有重要的指导意义。但其局限性在于参数较多,部分参数(如 J_r 、 J_a)的确定依赖工程师的经验判断,主观性较强,且计算过程相对复杂,不适用于工程前期的快速分级。

（三）岩体基本质量分级体系

岩体基本质量分级体系源于我国《工程岩体分级标准》（GB/T 50218-2014），是我国岩土工程领域应用最广泛的岩体质量分级体系之一，适用于各类岩土工程的岩体质量评价，包括地基基础、边坡、地下洞室等工程。该体系以岩体的坚硬程度和完整性为核心指标，同时考虑地下水、初始应力状态等修正因素，最终确定岩体基本质量等级。

岩体坚硬程度根据饱和单轴抗压强度分为坚硬岩、较坚硬岩、较软岩、软岩和极软岩五级；岩体完整性根据完整性指数分为完整、较完整、较破碎、破碎和极破碎五级。通过岩体坚硬程度等级和完整性等级的组合，可初步确定岩体基本质量等级，再根据地下水状态、初始应力比等修正因素对等级进行调整，最终将岩体基本质量分为五级：Ⅰ级为极好岩体，Ⅱ级为良好岩体，Ⅲ级为中等岩体，Ⅳ级为差岩体，Ⅴ级为极差岩体。

该体系的优势在于符合我国地质条件特点，指标选取科学合理，分级标准明确，可操作性强，且与我国相关工程规范紧密衔接，便于工程技术人员应用。同时，该体系充分考虑了不同工程环境的影响，通过修正因素的调整使分级结果更贴合工程实际。对于地质灾害防治工程而言，该体系可有效评估灾害隐患点岩体的基本质量，为灾害稳定性分析和治理方案制定提供可靠依据。

（四）地质强度指标（GSI）分级体系

地质强度指标（GSI）分级体系由霍克（E.Hoek）和布朗（E.T.Brown）于1997年提出，是基于岩石力学理论的综合岩体质量分级体系，适用于各类岩体的强度评估和稳定性分析，尤其在岩石边坡、地下洞室等工程中应用广泛。该体系的核心指标为地质强度指标（GSI），通过对岩体结构和结构面状态的定性描述与定量赋值确定。

GSI分级体系将岩体结构分为完整岩体、块裂岩体、碎裂岩体、散体岩体四类，将结构面状态分为非常好、好、一般、差、非常差五级，通过两者的组合确定GSI值，取值范围为0-100。根据GSI值可将岩体质量分为五级： $GSI \geq 85$ 为极好岩体， $70 \leq GSI < 85$ 为良好岩体， $55 \leq GSI < 70$ 为中等岩体， $40 \leq GSI < 55$ 为差岩体， $GSI < 40$ 为极差岩体。同时，该体系可结合岩石的单轴抗压强度和弹性模量，通过霍克-布朗强度准则估算岩体的抗压强度、抗拉强度等力学参数，为工程设计提供直接的力学指标。

GSI 体系的优势在于将定性描述与定量分析相结合,既考虑了岩体的宏观结构特征,又能通过强度准则推导岩体的力学参数,实现了岩体质量分级与力学性能评估的有机统一。其局限性在于 GSI 值的确定对工程师的地质勘察经验要求较高,对于地质条件复杂、结构面发育不规则的岩体,取值难度较大,可能导致分级结果存在偏差。

三、主流岩体质量分级体系应用对比分析

本部分从适用场景、核心指标、分级精度、操作难度、工程适用性等多个维度,对上述四类主流岩体质量分级体系进行全面对比。结合具体工程案例,分析各体系在不同地质条件和工程类型下的应用效果,重点突出地质灾害防治工程中的应用差异,引导读者根据工程实际需求科学选用分级体系。

(一) 各体系核心特征对比

从适用场景来看,RQD 分级体系适用于工程前期的初步勘察和区域地质评价,可快速判断岩体的整体完整性,为工程选址提供基础依据;Q 体系主要适用于隧道、地下洞室等地下工程,重点关注地下工程开挖后岩体的稳定性和支护需求;岩体基本质量分级体系适用范围最广,可用于地基基础、边坡、地下洞室等各类岩土工程,尤其适用于我国各类地质条件下的工程实践;GSI 体系则更适用于需要进行岩体力学参数估算的工程,如边坡稳定性分析、地下洞室支护设计等。

从核心指标来看,RQD 体系仅以岩芯采取率为核心指标,指标单一但易于获取;Q 体系包含六个参数,涵盖岩体完整性、结构面特征、地下水等多个方面,指标全面但计算复杂;岩体基本质量分级体系以岩体坚硬程度和完整性为核心指标,同时考虑修正因素,指标选取科学且可操作性强;GSI 体系以岩体结构和结构面状态为核心指标,通过定性描述赋值,指标直观但对经验要求较高。

从分级精度来看,RQD 体系分级精度较低,仅能反映岩体的完整性,难以全面反映岩体工程特性;Q 体系和 GSI 体系分级精度较高,能够综合考虑多种影响因素,分级结果与岩体实际工程性能贴合度较高;岩体基本质量分级体系分级精度适中,既保证了分级的科学性,又兼顾了工程应用的便捷性。从操作难度来看,RQD 体系操作最简单,仅需常规钻探数据;岩体基本质量分级体系操作难度中等,需进行岩体强度和完整性测试;Q 体系和 GSI 体系操作难度较大,需详细勘察结构面特征并进行参数赋值。

（二）工程应用效果对比——以地质灾害防治工程为例

选取河南某滑坡灾害隐患点治理工程作为案例，对比分析各分级体系的应用效果。该隐患点位于山区，岩体主要为花岗岩，存在多条断层和节理，地下水较丰富，需对滑坡体岩体质量进行分级，为稳定性评估和治理方案制定提供依据。

采用 RQD 体系分级：通过钻探获取 RQD 值为 45%，根据分级标准判定为差岩体。该结果仅反映了岩体的完整性较差，但未考虑断层、节理及地下水的影响，无法准确评估滑坡体的稳定性，难以为治理方案提供详细依据。

采用 Q 体系分级：通过详细勘察确定各参数值：RQD=45%，J_n=6（节理组数较多），J_r=3（节理粗糙度中等），J_a=4（节理蚀变较严重），J_w=1.5（地下水影响中等），SRF=2（应力折减系数中等），计算得到 $Q = (45/6) \times (3/4) \times (1.5/2) = 2.8125$ ，判定为差质量岩体。该结果综合考虑了岩体完整性、结构面特征和地下水等因素，明确了岩体稳定性较差，需采取较强的支护措施，但 Q 体系主要针对地下工程，对滑坡体这种边坡工程的针对性较弱，部分参数选取（如 SRF）需结合边坡工程特点进行调整，操作难度较大。

采用岩体基本质量分级体系分级：通过测试得到岩体饱和单轴抗压强度为 60MPa，判定为坚硬岩；完整性指数为 0.45，判定为较破碎岩体；结合地下水丰富的情况，进行修正后判定为Ⅳ级差岩体。该结果既反映了岩体的坚硬程度和完整性，又考虑了地下水的影响，与滑坡体实际稳定性状况贴合度较高。同时，该体系与我国地质灾害防治工程规范紧密衔接，可直接为滑坡治理方案（如抗滑桩、锚杆支护等）的设计提供依据，操作便捷，适用性强。

采用 GSI 体系分级：通过现场勘察描述，岩体结构为碎裂岩体，结构面状态为差，确定 GSI 值为 42，判定为差岩体。结合花岗岩饱和单轴抗压强度 60MPa，通过霍克 - 布朗强度准则估算得到岩体抗压强度为 15MPa，抗拉强度为 1.2MPa。该结果不仅明确了岩体质量等级，还提供了岩体力学参数，为滑坡体稳定性计算提供了关键数据，但 GSI 值的确定依赖勘察人员的经验判断，不同人员可能存在取值差异，影响分级结果的一致性。

通过案例对比可知，在地质灾害防治工程中，岩体基本质量分级体系具有显著的适用性优势，既保证了分级的科学性，又兼顾了操作便捷性和与规范的衔接性；GSI 体系可提供力学参数，适用于需要进行详细稳定性计算的工程；Q 体系针对性较强，适用于地下洞室类灾害隐患治理；RQD 体系可作为初步勘察的快速分级手段。

四、岩体质量分级体系的选用原则与应用建议

本部分基于前文的体系梳理与对比分析,提出岩体质量分级体系的选用原则,结合不同工程类型尤其是地质灾害防治工程的需求,给出具体的应用建议。同时,指出当前分级体系应用中存在的问题及改进方向,引导读者科学、合理地应用分级体系解决工程实际问题。

(一) 分级体系的选用原则

一是针对性原则:根据工程类型和勘察目的选用分级体系。如地下工程优先选用 Q 体系,边坡工程和地基工程可选用岩体基本质量分级体系或 GSI 体系,工程前期初步勘察可选用 RQD 体系。对于地质灾害防治工程,需结合灾害类型(如滑坡、崩塌、泥石流)选取针对性的分级体系,如滑坡工程可优先选用岩体基本质量分级体系或 GSI 体系。

二是科学性原则:选用的分级体系应符合工程地质条件特点,核心指标能够全面、准确地反映岩体的工程特性。避免选用指标单一、分级精度不足的体系用于复杂地质条件下的详细勘察。同时,应优先选用与国家或行业规范衔接紧密的分级体系,确保分级结果的权威性和适用性。

三是可操作性原则:结合工程勘察条件和技术水平选用分级体系。对于勘察条件有限、技术水平较低的工程,应选用操作简单、指标易于获取的体系(如 RQD 体系、岩体基本质量分级体系);对于勘察条件较好、需要详细设计的工程,可选用分级精度高、指标全面的体系(如 Q 体系、GSI 体系)。

四是综合评价原则:在复杂地质条件下,单一分级体系可能无法全面反映岩体质量,应采用多种分级体系进行综合评价。通过不同体系的相互验证,提升分级结果的可靠性。如在地质灾害防治工程中,可采用岩体基本质量分级体系进行初步分级,再采用 GSI 体系估算力学参数,结合 Q 体系进行支护方案优化。

(二) 工程应用建议与改进方向

在工程应用中,首先应做好详细的地质勘察工作,确保获取的分级指标数据准确可靠。对于岩体基本质量分级体系,应严格按照规范要求进行岩体强度和完整性测试;对于 Q 体系和 GSI 体系,应详细记录结构面的发育特征、充填物性质等信息,提高参数赋值的准确性。其次,应结合工程实际情况合理调整分级指标和修正因素,如在地下水丰富的区域,应重点考虑地下水对岩体质量的影响,适当降低岩体质量等级。

对于地质灾害防治工程，建议优先采用岩体基本质量分级体系作为核心分级方法，结合 GSI 体系进行力学参数估算，为灾害稳定性评估提供全面的数据支撑。同时，应加强分级结果与灾害治理方案的衔接，根据岩体质量等级合理选取治理措施，如对于Ⅳ级、Ⅴ级差岩体，应采用抗滑桩、锚杆支护、截排水等综合治理措施，确保治理效果。

当前岩体质量分级体系应用中存在的主要问题包括：部分参数赋值主观性较强、不同体系分级结果缺乏统一的对比标准、对特殊地质条件（如岩溶、风化岩层）的适用性不足等。未来改进方向应注重以下几点：一是引入智能化技术，如无人机勘察、地质雷达探测等，提高分级指标获取的准确性和效率；二是建立不同分级体系之间的转换模型，实现分级结果的相互对比和验证；三是针对特殊地质条件和工程类型，完善分级标准和指标体系，提升分级体系的适用性和科学性。

第二节 土体工程地质类型与适宜性评价

本节围绕土体工程地质类型划分与工程适宜性评价核心内容，系统阐述土体分类的原则、依据与常用分类体系，明确不同工程地质类型土体的物理力学特性及分布规律。结合市政工程、地质灾害防治工程实践需求，重点分析各类土体在地基基础、边坡工程等场景中的适宜性表现，提出针对性评价指标与判定方法，为工程勘察设计、施工及灾害防控提供科学依据。

一、土体工程地质分类的核心原则与依据

本部分聚焦土体工程地质分类的核心逻辑，明确分类需遵循科学性、实用性、系统性及区域性原则，兼顾土体固有属性与工程实践需求。从土体物质组成、结构构造、物理力学性质、成因类型及工程响应特征等方面，梳理分类核心依据，为后续分类体系构建与类型划分提供理论支撑。

（一）分类的核心原则解析

科学性原则是土体工程地质分类的基础，要求分类依据需反映土体本质属性与内在规律，分类体系逻辑严谨、层次清晰，确保分类结果能够客观表征土体工程地质特征。在岩土工程实践中，科学性直接决定分类结果的可靠性，例如依据

土体颗粒级配与矿物成分划分类型，需符合地质学与土力学基本原理，避免主观随意性。

实用性原则强调分类结果需满足工程勘察、设计、施工及灾害防治的实际需求，分类指标应易于获取、量化性强，分类层级与工程实践精度要求相匹配。对于市政工程而言，需重点关注土体作为地基、填料等用途的适宜性相关指标，如地基承载力、压缩性等，确保分类结果能够直接指导工程方案制定。例如在城市道路路基工程中，分类需明确土体压实特性与承载力阈值，为路基填料选择与压实标准确定提供依据。

系统性原则要求分类体系需涵盖土体从宏观到微观、从成因到工程响应的全维度特征，形成完整的分类框架。需兼顾土体的物质组成、结构构造、物理力学性质及工程环境影响等多方面因素，避免单一指标分类的局限性。如在地质灾害防治工程中，分类需结合土体稳定性、渗透性等多指标，全面评估土体在降雨、地震等工况下的灾害风险。

区域性原则体现土体分布的地域差异，不同区域土体成因类型、物理力学性质存在显著不同，分类体系需适配区域地质环境特征。河南省地处黄河中下游，黄河冲积土、粉质黏土等广泛分布，在分类中需重点考虑冲积成因土体的颗粒级配、固结特性等区域特征，确保分类结果符合当地工程实际。

（二）分类的核心依据梳理

土体物质组成是分类的基础依据，主要包括颗粒级配、矿物成分及有机质含量。颗粒级配直接决定土体的分类归属，如碎石土、砂土、粉土、黏性土的划分核心依据即为颗粒级配，依据《建筑地基基础设计规范》（GB 50007-2011），采用筛析法与比重计法测定颗粒级配，明确各粒组含量阈值。矿物成分影响土体的物理力学性质，如蒙脱石含量较高的黏性土具有强膨胀性，在分类中需重点标注，为工程防膨处理提供依据。有机质含量则影响土体稳定性与承载力，有机质含量大于 5% 的有机土需单独分类，其工程性能显著劣于无机土。

土体结构构造包括宏观结构与微观结构，宏观结构如层理、透镜体、裂隙等，微观结构如颗粒排列方式、孔隙特征等。土体结构构造直接影响其力学稳定性，如松散结构的砂土易发生液化，层理发育的黏性土易产生层间滑动。在分类中需明确结构构造类型，例如将砂土分为松散、稍密、中密、密实结构，黏性土分为软塑、可塑、硬塑状态，为工程稳定性评估提供支撑。

物理力学性质是分类的核心工程依据,主要包括密度、含水率、孔隙比、压缩系数、抗剪强度、地基承载力等指标。这些指标直接反映土体的工程适用性,如压缩系数 α_{1-2} 大于 0.5MPa^{-1} 的黏性土为高压缩性土,不适宜作为高层建筑地基;地基承载力特征值 $f_a \geq 200\text{kPa}$ 的土体可满足一般市政道路路基要求。依据最新规范标准,明确各指标测试方法与分类阈值,确保分类的客观性与准确性。

成因类型反映土体的形成环境与演化过程,不同成因土体的工程性质差异显著,主要包括残积土、坡积土、洪积土、冲积土、湖积土、沼泽土、风积土等。冲积土多分布于河流沿岸,颗粒分选性好、层理清晰,承载力相对稳定,是市政工程的优质地基;残积土分布于基岩风化表层,颗粒不均、结构松散,承载力差异大,工程建设需重点处理。在分类中明确成因类型,可结合区域地质环境预判土体工程性质。

二、常用土体工程地质分类体系及应用

本部分介绍国内外常用的土体工程地质分类体系,包括国家标准分类体系、行业专用分类体系及区域性分类体系。分析各体系的分类逻辑、适用范围与核心指标,结合岩土工程及地质灾害防治实践案例,对比不同体系的应用效果,明确各类体系在工程实践中的选择原则。

(一) 国家标准土体分类体系

我国现行国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2011)建立了统一的土体工程地质分类体系,是岩土工程勘察设计的核心依据。该体系以颗粒级配为主要依据,将土体分为碎石土、砂土、粉土、黏性土、人工填土五大类,每类土体进一步细分亚类。

碎石土是指粒径大于 2mm 的颗粒含量超过全重 50% 的土,按颗粒级配分为漂石、块石、卵石、碎石、圆砾、角砾六个亚类,依据颗粒形状与粒径大小划分,如漂石粒径大于 200mm ,卵石粒径 $20\text{-}200\text{mm}$ 。碎石土具有孔隙大、透水性强、承载力高的特点,适宜作为各类工程地基,但需关注颗粒级配与密实度,松散碎石土易发生坍塌,需进行夯实处理。

砂土是指粒径大于 2mm 的颗粒含量不超过全重 50% ,且粒径大于 0.075mm 的颗粒含量超过全重 50% 的土,分为砾砂、粗砂、中砂、细砂、粉砂五个亚类。砂土的工程性质主要取决于密实度与颗粒级配,中砂、粗砂密实度高,承载力大,

透水性强,适宜作为地基与路基填料;粉砂松散易液化,在地震与降雨工况下易引发地质灾害,工程中需采取抗液化处理措施。

粉土是指粒径大于 0.075mm 的颗粒含量不超过全重 50%,且塑性指数 $I_p \leq 10$ 的土。粉土兼具砂土与黏性土的部分特性,透水性中等,压缩性较低,承载力介于砂土与黏性土之间。河南省黄河冲积平原广泛分布粉土,在市政道路工程中,粉土可作为路基填料,但需控制含水率,避免干缩裂缝与湿陷变形。

黏性土是指塑性指数 $I_p > 10$ 的土,分为粉质黏土 ($10 < I_p \leq 17$) 与黏土 ($I_p > 17$)。黏性土颗粒细小、透水性弱、压缩性差异大,软塑状态的黏性土承载力低、压缩性高,需进行换填或加固处理;硬塑状态的黏性土承载力较高,可作为一般工程地基。黏性土的膨胀性与收缩性是工程关注重点,蒙脱石含量高的黏性土需采取防膨隔水措施。

人工填土是指人类工程活动堆积形成的土,分为素填土、杂填土、冲填土三类。素填土由黏性土、砂土等组成,无明显杂物,压实后可作为一般工程地基;杂填土含有建筑垃圾、生活垃圾等杂物,成分复杂、均匀性差,承载力低,工程中多采用换填处理;冲填土是水力冲填形成的土,颗粒分选性差,压缩性高,需进行固结处理后才能使用。

(二) 行业专用与区域性分类体系

市政工程专用分类体系聚焦道路、桥梁、管网等工程需求,在国家标准分类基础上,重点关注土体的压实特性、承载力、渗透性等指标。例如《城市道路工程设计规范》(CJJ 37-2012)将路基土分为巨粒土、粗粒土、细粒土、特殊土四类,明确各类土作为路基填料的适宜性等级,如巨粒土、粗粒土为优质填料,细粒土需改良后使用,特殊土需专项处理。该体系针对性强,直接指导市政路基工程的填料选择与压实标准制定。

地质灾害防治专用分类体系侧重土体的稳定性与灾害易发性,结合降雨、地震等诱发因素,将土体分为易滑土、易液化土、易崩解土等类型。例如在滑坡防治工程中,将土体按抗剪强度、渗透性、含水率等指标分为稳定性好、较好、较差、差四个等级,为滑坡预警与治理方案制定提供依据。河南省地质灾害防治中心在实践中,针对黄河流域冲积土、山区残坡积土等,建立了区域性地质灾害易发土体分类标准,提升了灾害防控的精准性。

区域性分类体系适配特定区域的地质环境特征,河南省作为黄河中下游重要

省份,黄河冲积土、黄土状土、膨胀土等分布广泛,区域性分类体系重点关注这些特色土体的工程性质。例如针对黄河冲积土,按颗粒级配与固结程度分为全新世冲积土、更新世冲积土,明确全新世冲积土压缩性较高,需重点处理;针对豫西山区的残坡积土,按厚度与结构分为薄层稳定型、厚层松散型,为山区工程建设与灾害防治提供依据。

三、主要土体工程地质类型及特性

本部分聚焦工程实践中最常见的几类土体,包括冲积土、残坡积土、黏性土、砂土及人工填土,详细阐述各类土体的形成环境、分布规律、物理力学特性及工程响应特征。结合河南省区域地质特点,突出本土常见土体的特性差异,为后续适宜性评价提供基础数据支撑。

(一) 冲积土的工程地质特性

冲积土是由河流冲积作用形成的土,广泛分布于河流沿岸、冲积平原及三角洲地区,河南省黄河沿岸、淮河平原等区域冲积土分布尤为广泛。冲积土的形成过程具有明显的分选性,河流上游颗粒较粗,多为碎石土、砂土;下游颗粒较细,多为粉土、黏性土,且层理发育,常形成砂土与黏性土互层结构。

冲积土的物理力学特性呈现显著的层间差异,粗粒冲积土(碎石土、砂土)颗粒分选性好、孔隙率适中,密实状态下密度可达 $1.8\text{--}2.2\text{g/cm}^3$,含水率 $15\%\text{--}25\%$,地基承载力特征值 f_a 可达 $200\text{--}500\text{kPa}$,透水性强,渗透系数 $k=10^{-2}\text{--}10^0\text{cm/s}$,抗剪强度高,内摩擦角 ϕ 可达 $30^\circ\text{--}40^\circ$,适宜作为各类工程地基与路基填料。细粒冲积土(粉土、黏性土)颗粒细小,密度 $1.6\text{--}1.9\text{g/cm}^3$,含水率 $20\%\text{--}35\%$,压缩系数 $\alpha_{1-2}=0.2\text{--}0.8\text{MPa}^{-1}$,地基承载力特征值 $f_a=80\text{--}200\text{kPa}$,透水性弱,渗透系数 $k=10^{-6}\text{--}10^{-4}\text{cm/s}$,抗剪强度较低,内摩擦角 $\phi=15^\circ\text{--}25^\circ$,黏聚力 $c=10\text{--}30\text{kPa}$,易发生压缩变形与湿陷。

在工程实践中,冲积土的层理结构是重点关注对象,砂土与黏性土互层易导致地基不均匀沉降,需进行分层承载力评估。河南省郑州、开封等黄河沿岸城市,大量市政工程依托冲积土地基建设,通过压实处理、CFG桩复合地基等措施,提升冲积土地基的承载能力与稳定性。

(二) 残坡积土的工程地质特性

残坡积土是残积土与坡积土的统称,残积土由基岩风化后未被搬运的土体组

成,分布于基岩表层;坡积土由坡面径流搬运的风化碎屑物质堆积形成,分布于山坡、山麓地带。河南省豫西、豫南山区广泛分布残坡积土,如伏牛山、大别山周边区域。

残坡积土的成分与母岩性质密切相关,花岗岩风化形成的残坡积土多为砂土、粉质黏土,富含石英颗粒;页岩、泥岩风化形成的残坡积土多为黏性土,有机质含量较高。其物理力学特性具有显著的不均匀性,密度 $1.5-1.8\text{g/cm}^3$,含水率 25%-40%,压缩系数 $\alpha_{1-2}=0.5-1.2\text{MPa}^{-1}$,地基承载力特征值 $f_a=60-150\text{kPa}$,抗剪强度低,内摩擦角 $\phi=10^\circ-20^\circ$,黏聚力 $c=5-20\text{kPa}$,且存在较多孔隙与裂隙,透水性不均。

残坡积土的稳定性较差,在降雨、地震等作用下易发生滑坡、崩塌等地质灾害。河南省地质灾害防治中心在豫西山区地质灾害排查中发现,厚层残坡积土分布区是滑坡高发区域,需通过削坡减载、锚杆支护、排水工程等措施进行治理。在山区工程建设中,残坡积土地基需进行换填或加固处理,避免因土体不均匀沉降与失稳引发工程事故。

(三) 黏性土与砂土的工程地质特性

黏性土是工程中最常见的细粒土,广泛分布于各类沉积环境,河南省各地均有分布,以黄河冲积平原、山间盆地分布最为集中。黏性土的物理力学特性受塑性指数与含水率影响显著,塑性指数越高,黏聚力越强,膨胀收缩性越明显。硬塑状态黏性土密度 $1.8-2.0\text{g/cm}^3$,含水率 18%-25%,压缩系数 $\alpha_{1-2}=0.1-0.3\text{MPa}^{-1}$,地基承载力特征值 $f_a=150-250\text{kPa}$,抗剪强度较高,可作为优质地基;软塑状态黏性土密度 $1.6-1.8\text{g/cm}^3$,含水率 25%-35%,压缩系数 $\alpha_{1-2}=0.5-1.0\text{MPa}^{-1}$,地基承载力特征值 $f_a=80-150\text{kPa}$,压缩性高,需进行加固处理;流塑状态黏性土工程性质极差,无法直接作为地基。

砂土是工程中常见的粗粒土,主要分布于河流上游、冲积扇及滨海地区,河南省黄河上游沿岸、豫北平原砂土分布较广。砂土的工程性质核心取决于密实度,密实砂土密度 $1.9-2.2\text{g/cm}^3$,含水率 15%-20%,地基承载力特征值 $f_a=200-400\text{kPa}$,抗剪强度高,透水性强,适宜作为地基与路基填料;中密砂土密度 $1.7-1.9\text{g/cm}^3$,含水率 15%-25%,地基承载力特征值 $f_a=150-250\text{kPa}$,工程性能较好;松散砂土密度 $1.5-1.7\text{g/cm}^3$,含水率 20%-30%,地基承载力特征值 $f_a=80-150\text{kPa}$,易发生液化与坍塌,工程中需进行压实或振冲加固处理。

黏性土与砂土的工程响应差异显著，黏性土透水性弱，易产生孔隙水压力积聚，在基坑工程中需重点关注降水与支护；砂土透水性强，易发生管涌、流砂等渗透破坏，需采取防渗措施。在河南省市政管网工程中，穿越黏性土区域需注意基坑边坡稳定，穿越砂土区域需加强防渗处理，避免地下水渗漏引发工程问题。

四、土体工程适宜性评价方法与实践应用

本部分构建土体工程适宜性评价框架，明确评价指标体系、分级标准与评价流程。结合地基基础、边坡工程、市政道路等典型工程场景，阐述适宜性评价的具体应用方法，融入河南省地质灾害防治与市政工程实践案例，突出评价方法的实用性与针对性。

（一）适宜性评价指标体系与分级标准

土体工程适宜性评价指标体系包括物理性质指标、力学性质指标、工程环境指标三大类。物理性质指标主要有密度、含水率、孔隙比、颗粒级配、塑性指数等，反映土体的基本物理状态；力学性质指标主要有地基承载力特征值、压缩系数、抗剪强度（内摩擦角、黏聚力）、渗透系数等，直接反映土体的工程承载能力与稳定性；工程环境指标主要有地形地貌、地下水埋藏深度、地震烈度、降雨强度等，反映外部环境对土体工程性能的影响。

依据《岩土工程勘察规范》（GB 50021-2001，2009年版）及相关行业标准，将土体工程适宜性分为适宜、基本适宜、不适宜三个等级。适宜等级：土体物理力学性质优良，地基承载力满足工程要求，压缩性低，稳定性好，工程环境影响小，无需特殊处理即可直接利用；基本适宜等级：土体物理力学性质较好，地基承载力基本满足工程要求，但存在局部缺陷，如不均匀性、轻微湿陷等，需采取简单处理措施（如压实、换填薄层土）后可利用；不适宜等级：土体物理力学性质差，地基承载力低，压缩性高，稳定性差，或工程环境影响显著，易引发地质灾害，需采取复杂处理措施（如复合地基、抗滑支护）或避让。

针对不同工程类型，评价指标的权重与分级阈值有所差异。例如地基基础工程重点关注地基承载力、压缩系数等指标；边坡工程重点关注抗剪强度、渗透系数等指标；市政道路工程重点关注压实度、承载力等指标。河南省结合区域特点，对黄河冲积土、残坡积土等制定了区域性评价阈值，提升了评价的精准性。

（二）典型工程场景适宜性评价应用

地基基础工程适宜性评价需结合建筑类型、荷载大小确定评价重点。对于低层建筑，可采用轻便动探、静力触探等方法测定地基承载力，重点评价土体均匀性与压缩性；对于高层建筑，需进行详细勘察，开展室内土工试验与现场载荷试验，综合评估土体的承载能力与变形特性。例如在河南省郑州市某高层建筑项目中，场地土层为黄河冲积粉土与粉质黏土互层，通过适宜性评价，确定粉质黏土层为主要持力层，粉土层需进行 CFG 桩复合地基处理，处理后地基承载力满足设计要求。

边坡工程适宜性评价重点关注土体稳定性，结合边坡高度、坡度、地下水条件等，采用极限平衡法评估土体抗滑稳定性。对于残坡积土边坡，需重点评价土体抗剪强度与渗透性，降雨后土体含水率升高，抗剪强度降低，易发生滑坡。河南省豫西山区某公路边坡工程，场地为厚层残坡积粉质黏土，适宜性评价为基本适宜，通过削坡减载（将边坡坡度由 1:1.5 调整为 1:2.0）、设置排水盲沟与锚杆支护等措施，提升了边坡稳定性，避免了滑坡灾害发生。

市政道路工程适宜性评价聚焦路基土体的压实特性与承载力，评价指标包括压实度、CBR 值（加州承载比）、含水率等。对于黄河冲积砂土路基，适宜性评价为适宜，可直接压实使用，压实度需达到 95% 以上；对于粉土路基，适宜性评价为基本适宜，需掺入石灰改良，降低含水率，提升压实度与承载力。河南省开封市某城市道路工程，路基土为黄河冲积粉土，通过石灰改良处理后，CBR 值由 3% 提升至 8%，满足市政道路路基设计要求。

地质灾害防治工程适宜性评价需结合灾害类型（滑坡、崩塌、泥石流等）与土体特性，评估土体的灾害易发性和治理可行性。例如在滑坡防治中，通过评价土体抗剪强度、渗透性、含水率等指标，确定治理方案；在泥石流防治中，评价土体颗粒级配、松散程度等指标，确定拦挡与排导工程的布设方案。河南省地质灾害防治中心在豫南山区滑坡治理项目中，通过土体适宜性评价，确定采用抗滑桩 + 排水工程的综合治理方案，有效提升了滑坡体稳定性。

五、土体分类与适宜性评价的质量控制要点

本部分围绕土体分类与适宜性评价的质量保障，从勘察数据采集、指标测试、评价方法选择、成果审核等方面，明确质量控制要点。结合工程实践经验，提出

针对性质量提升措施，确保分类与评价成果的准确性、可靠性，为工程决策提供科学依据。

（一）勘察数据采集与指标测试质量控制

勘察数据采集是分类与评价的基础，需严格遵循《岩土工程勘察规范》要求，合理布设勘察点，确保勘察点数量、深度与间距满足规范要求。对于地形复杂、土层不均匀区域，需加密勘察点；对于重要工程，需增加原位测试点数量。在河南省黄河冲积平原勘察中，针对土层分层不明显的特点，采用钻探与静力触探相结合的方法，提升土层划分的准确性。

指标测试质量直接影响分类与评价结果，需严格控制室内土工试验与现场原位测试的规范性。室内试验需确保试样采集、运输、制备符合标准，测试仪器校准合格，测试方法正确，如颗粒级配测试需准确划分粒组，抗剪强度测试需选择合适的试验方法（直剪试验、三轴试验）。现场原位测试如静力触探、标准贯入试验，需控制测试深度、速率与数据记录的准确性，避免因操作不当导致数据失真。

（二）评价方法选择与成果审核质量控制

需根据工程类型、场地条件与评价精度要求，合理选择适宜的评价方法。对于简单工程，可采用经验法结合规范查表进行评价；对于复杂工程，需采用数值模拟法（如有限元法）进行精细化评价。在地质灾害防治工程中，需结合极限平衡法与数值模拟法，综合评估土体稳定性。同时，需关注评价方法的适用条件，避免盲目套用方法导致评价结果偏差。

成果审核需建立多级审核机制，包括勘察单位内部审核、监理单位审核与建设单位审核。审核内容包括勘察数据的真实性、分类体系的适用性、评价指标的合理性、评价结论的可靠性等。对于重要工程，需组织专家评审，确保分类与评价成果符合工程实际需求。河南省地质局在岩土工程勘察成果审核中，重点关注区域性土体特性的适配性，确保成果能够指导当地工程实践与地质灾害防治工作。

第三节 特殊性岩土判别与工程评价

本节聚焦特殊性岩土的判别方法与工程评价要点,涵盖软土、膨胀土、湿陷性黄土、红黏土等常见类型。先明确各类特殊性岩土的定義与分布特征,再阐述基于地质勘察的判别指标及分级标准,结合工程实例分析其对地基稳定性、边坡工程等的影响。最后融入地质灾害防治视角,提出针对性工程处置建议,为工程勘察设计中特殊性岩土的合理利用与风险防控提供技术支撑。

一、特殊性岩土的分类与分布特征

本部分系统梳理特殊性岩土的分类体系,明确不同类型特殊性岩土的核心界定要素,结合我国及河南省区域地质背景,阐述各类特殊性岩土的分布规律。通过对比不同区域特殊性岩土的形地质环境,为后续判别与评价提供区域地质基础,同时衔接地质灾害防治需求,突出分布与灾害易发区的关联性。

(一) 特殊性岩土的分类标准

特殊性岩土是指具有独特物理力学性质,在工程建设中易引发特殊工程地质问题的岩土类型,其分类主要依据《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001, 2009 年版)及区域性相关技术标准。根据成因、物质组成及工程特性差异,可分为软土、膨胀土、湿陷性黄土、红黏土、盐渍土、冻土、填土等主要类型。各类特殊性岩土的分类核心指标存在显著差异,如软土以天然孔隙比大于 1.0、天然含水量大于液限为核心界定指标;膨胀土以自由膨胀率大于 40% 为主要判别依据,这一分类标准为工程勘察中的初步识别提供了权威依据。

从地质灾害防治视角来看,特殊性岩土的分类还需兼顾其致灾潜力,例如湿陷性黄土的湿陷等级与黄土地区塌陷灾害密切相关,膨胀土的胀缩等级直接影响边坡滑塌、地基不均匀沉降等灾害的发生概率。河南省作为中原地区核心省份,区域性特殊性岩土分类还需参考《河南省岩土工程勘察技术规程》等地方标准,结合本地岩土体发育特征进行细化,确保分类的针对性与适用性。

(二) 我国及河南区域分布规律

我国地域辽阔,地质环境复杂,特殊性岩土分布具有显著的区域差异性。软土主要分布在东部沿海地区、长江中下游平原、珠江三角洲等河流冲积、滨海沉积区域,成因多与第四纪以来的海侵、河流泛滥沉积相关;膨胀土广泛分布于华

中、华南、西南等气候湿润地区，以残积、坡积成因为主；湿陷性黄土主要集中在黄河中游地区，包括陕西、甘肃、山西、河南等省份，形成于更新世至全新世的风积作用；红黏土则主要分布在南方红层地区，由碳酸盐岩风化残积形成。

河南省特殊性岩土分布与区域地质构造及气候条件密切相关，具有明显的地域性特征。湿陷性黄土主要分布在豫西、豫北地区，如洛阳、三门峡、新乡、安阳等地，该区域属于黄河中游黄土台塬与丘陵区，湿陷性黄土厚度多在 5-20m，是河南省地质灾害易发区之一，常见黄土湿陷引发的地基沉降、边坡失稳等问题；膨胀土主要分布在豫南信阳、南阳等地区，依托大别山、桐柏山周边的残坡积台地发育，自由膨胀率多在 40%-80% 之间；软土则零星分布在豫东平原的河流漫滩、洼地及豫南部分湖积区域，厚度一般较小，多在 2-5m；此外，豫西部分矿区存在人工填土，豫北盐碱地分布区有少量盐渍土发育。

二、主要特殊性岩土的判别方法

本部分针对工程中常见的软土、膨胀土、湿陷性黄土三类特殊性岩土，从野外宏观判别和室内试验判别两个维度，明确核心判别指标与操作流程。结合作者工程实践经验，强调判别过程中指标的关联性与区域差异性，为准确识别特殊性岩土类型及等级提供可操作的技术方法。

（一）软土的判别要点

1. 野外宏观判别。软土在野外多表现为灰黑色、灰褐色，呈饱和状态，质地柔软，用手捻搓有滑腻感，可捏成团，松手后不易散开；天然状态下含水量高，孔隙比大，压缩性强，在勘察钻孔取样过程中易出现缩颈、坍塌现象；多分布在河流漫滩、三角洲、湖沼、洼地等低洼积水区域，周边多有常年积水或潮湿环境特征。在河南豫东平原的黄河漫滩区域，软土常与粉质黏土、粉土互层分布，野外识别时需结合地形地貌及地层岩性组合特征综合判断。

2. 室内试验判别。依据《岩土工程勘察规范》，软土的室内判别核心指标包括天然含水量、天然孔隙比、液限、塑限、压缩系数等。当天然含水量大于液限，天然孔隙比大于 1.0，压缩系数 a_{1-2} 大于 0.5MPa^{-1} 时，可判定为软土；对于有机质含量大于 5% 的软土，需判定为有机质软土。在河南区域软土判别中，考虑到本地软土多为河流冲积成因，除核心指标外，还需补充颗粒分析试验，软土中黏粒含量多大于 30%，粉粒含量在 20%-50% 之间，砂粒含量较少，一般小于

20%。通过室内试验指标的综合分析,可准确判定软土类型及工程特性等级。

(二) 膨胀土的判别要点

1. 野外宏观判别。膨胀土在野外多呈红褐色、棕黄色,以残积、坡积成因为主,质地坚硬或硬塑状态,风干后易产生裂隙,裂隙多呈网状、鸡爪状,延伸方向不规则,裂隙宽度一般在 1-5mm,深度可达数米;泡水后迅速软化,体积膨胀,干燥后体积收缩,反复干湿循环后裂隙进一步发育;多分布在丘陵坡地、台地,地表植被多为灌木、草丛,坡体易出现浅层滑坡、溜塌现象。在河南豫南信阳、南阳地区,膨胀土分布区的坡地常见土体顺层滑塌痕迹,这是野外快速识别的重要特征。

2. 室内试验判别。膨胀土的核心判别指标为自由膨胀率、液限、塑限、胀缩总率等。根据规范要求,自由膨胀率大于 40% 是判定膨胀土的首要指标;当液限大于 40%,塑限大于 17%,塑性指数大于 23 时,可辅助判定为膨胀土。在此基础上,通过胀缩试验测定胀缩总率,结合自由膨胀率可划分膨胀土胀缩等级:自由膨胀率 40%-60%、胀缩总率 1%-2% 为弱膨胀土;自由膨胀率 60%-80%、胀缩总率 2%-4% 为中等膨胀土;自由膨胀率大于 80%、胀缩总率大于 4% 为强膨胀土。河南区域膨胀土因母岩岩性差异,自由膨胀率波动较大,豫南信阳地区膨胀土自由膨胀率多在 50%-70% 之间,以中等膨胀土为主。

(三) 湿陷性黄土的判别要点

1. 野外宏观判别。湿陷性黄土多呈浅黄色、黄褐色,质地均一,孔隙发育,用手触摸有粉质感,肉眼可见大孔隙;天然状态下强度较高,呈坚硬-硬塑状态,泡水后强度迅速降低,产生显著湿陷变形;多分布在黄土台塬、梁、峁及河谷阶地,地表常见冲沟、陷穴等微地貌;在河南豫西、豫北地区,湿陷性黄土分布区的基坑开挖过程中,若遇水易出现坑壁坍塌、地面下沉等现象。野外判别时,可通过试坑浸水试验初步判断湿陷性,即在试坑内注水,观察是否出现地面下沉、裂缝等湿陷现象。

2. 室内试验判别。湿陷性黄土的判别核心指标为湿陷系数、自重湿陷系数及湿陷起始压力。通过室内侧限压缩试验测定湿陷系数 δ_s ,当 δ_s 大于 0.015 时,判定为湿陷性黄土;根据自重湿陷系数 δ_{si} 判断自重湿陷性, δ_{si} 大于 0.015 为自重湿陷性黄土,否则为非自重湿陷性黄土。结合湿陷系数和自重湿陷系数可划分湿陷等级:轻微湿陷 ($\delta_s=0.015-0.030$, $\delta_{si} \leq 0.015$)、中等湿陷 ($\delta_s=0.030-$

0.070, $\delta_{si}=0.015-0.030$)、严重湿陷 ($\delta_s=0.070-0.150$, $\delta_{si}=0.030-0.070$)、很严重湿陷 ($\delta_s > 0.150$, $\delta_{si} > 0.070$)。河南豫北新乡地区的湿陷性黄土多为中等-严重湿陷等级,湿陷起始压力一般在 50-150kPa 之间,这一指标为地基处理方案制定提供了关键依据。

三、特殊性岩土的工程评价要点

本部分结合工程建设实际,从地基稳定性、边坡工程、地下工程三个核心工程场景,评价不同类型特殊性岩土的工程特性及潜在风险。融入作者长期从事地质灾害防治的实践经验,重点分析特殊性岩土引发的地质灾害类型及影响因素,提出基于风险防控的工程评价指标体系。

(一) 地基稳定性评价

1. 软土地基评价。软土具有高含水量、高孔隙比、低强度、高压缩性的特点,作为地基时易产生不均匀沉降、地基承载力不足等问题,严重影响建筑物稳定性。工程评价需重点关注天然地基承载力、压缩模量、沉降量及沉降速率等指标。根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2011),软土地基天然承载力一般在 50-120kPa 之间,压缩模量 E_{s1-2} 多小于 4MPa,需通过换填、夯实、CFG 桩复合地基等处理措施提高承载力。在河南豫东软土分布区,某住宅小区工程因未充分考虑软土压缩性,建成后出现墙体开裂、地面沉降等问题,经检测沉降量达 150mm,后续采用 CFG 桩复合地基处理后,沉降量控制在 30mm 以内,满足规范要求。

2. 膨胀土地基评价。膨胀土地基的核心问题是胀缩变形引发的建筑物开裂、倾斜,评价需重点关注胀缩等级、膨胀力、胀缩变形量等指标。弱膨胀土地基可采用换填非膨胀土、设置伸缩缝等措施;中等-强膨胀土地基需进行深层处理,如灰土垫层、水泥土搅拌桩等,同时加强排水措施,减少干湿循环影响。河南豫南某公路路基工程穿越膨胀土分布区,初期未进行针对性处理,雨季出现路基鼓包、路面开裂,经评价采用换填 3m 厚非膨胀土+土工格栅加固处理后,工程稳定性显著提升。

3. 湿陷性黄土地基评价。湿陷性黄土地基的关键风险是泡水后产生湿陷变形,评价需明确湿陷等级、湿陷厚度、湿陷起始压力等指标。非自重湿陷性黄土地基可采用灰土垫层、强夯等处理措施;自重湿陷性黄土地基需进行深层处理,如挤

密桩、预浸水法等，同时做好场地排水，防止地表水渗入地基。河南豫西某水利枢纽工程地基为严重湿陷性黄土，湿陷厚度达 12m，采用预浸水法结合灰土挤密桩处理后，湿陷性基本消除，满足工程运行要求。

（二）边坡工程评价

1. 膨胀土边坡评价。膨胀土边坡受干湿循环影响显著，易出现浅层滑坡、溜塌等灾害，评价需重点关注边坡坡率、胀缩等级、地下水分布等因素。弱膨胀土边坡天然休止角一般为 25° - 30° ，中等-强膨胀土边坡需放缓坡率至 1:1.5-1:2.0，并设置截排水沟、植被防护等措施。河南南阳某山区公路边坡为中等膨胀土，初期坡率设计为 1:1.2，雨季发生浅层滑坡，经重新评价调整坡率为 1:1.8，增设截水沟及格构防护后，边坡稳定性良好。

2. 湿陷性黄土边坡评价。湿陷性黄土边坡稳定性主要受含水量、坡高、坡率及裂隙发育程度影响，泡水后土体强度降低，易引发崩塌、滑坡。评价需明确边坡高度、坡率、湿陷等级及裂隙分布，对于高度大于 8m 的中等-严重湿陷性黄土边坡，需采用削坡减载、锚杆框架防护、截排水等综合措施。河南新乡某黄土台塬边坡工程，坡高 15m，湿陷等级为严重，经采用削坡减载（坡率调整为 1:1.75）+ 锚杆框架防护后，边坡稳定系数从 0.85 提高至 1.35，满足规范要求。

（三）地下工程评价

1. 软土地区地下工程评价。软土地区地下工程（如地铁、隧道、地下车库）易出现基坑坍塌、周边地面沉降等问题，评价需重点关注基坑支护结构选型、降水方案、周边建筑物及地下管线分布。软土基坑支护多采用排桩 + 锚索、地下连续墙等支护形式，降水需采用轻型井点或管井降水，控制降水速率，防止产生不均匀沉降。河南郑州某地铁车站工程位于软土分布区，基坑深度 18m，采用地下连续墙 + 锚索支护，结合管井降水，施工过程中周边地面沉降量控制在 20mm 以内，未对周边建筑物造成影响。

2. 湿陷性黄土地区地下工程评价。湿陷性黄土地区地下工程需重点评价湿陷性对隧道、基坑的影响，隧道穿越湿陷性黄土层时，需采用衬砌加固、注浆堵水等措施，防止地下水渗入引发湿陷变形；基坑工程需做好防水、排水措施，避免基坑浸水导致湿陷。河南洛阳某隧道工程穿越严重湿陷性黄土层，采用管棚超前支护 + 注浆加固处理后，隧道施工及运营过程中未出现湿陷变形问题。

四、特殊性岩土的工程处置与灾害防控建议

本部分结合作者地质灾害防治工作经验，针对不同类型特殊性岩土的工程特性和潜在风险，提出针对性的工程处置措施和灾害防控建议。强调“预防为主、防治结合”的原则，衔接《地质灾害防治条例》等法规要求，确保处置措施的科学性和可操作性。

（一）针对性工程处置措施

1. 软土地区工程处置。对于软土厚度较小（小于 3m）的区域，可采用换填法，换填材料选用级配良好的砂石、灰土等，换填厚度不小于 1.5m；对于软土厚度较大的区域，可采用 CFG 桩、水泥土搅拌桩等复合地基处理，桩长需穿透软土层进入下卧硬层不小于 1m。同时，设置完善的排水系统，避免地表水和地下水浸泡软土，提高地基稳定性。在河南豫东软土分布区的农田水利工程中，采用水泥土搅拌桩复合地基处理后，地基承载力从 80kPa 提高至 180kPa，满足工程要求。

2. 膨胀土地区工程处置。膨胀土地区工程处置核心是控制胀缩变形，可采用换填非膨胀土、灰土垫层等措施，换填厚度根据胀缩等级确定，弱膨胀土换填厚度不小于 0.5m，中等 - 强膨胀土换填厚度不小于 1.0m。边坡工程可采用格构防护 + 植被防护，格构采用混凝土或浆砌石，植被选用深根性耐旱植物，增强边坡稳定性。同时，设置截水沟、排水沟，减少雨水渗入土体。

3. 湿陷性黄土地区工程处置。湿陷性黄土地区工程处置重点是消除湿陷性，非自重湿陷性黄土可采用强夯法，夯击能量根据湿陷厚度确定，一般为 2000-3000kN·m；自重湿陷性黄土可采用挤密桩（灰土挤密桩、水泥土挤密桩）处理，桩间距根据挤密效果确定，一般为 1.0-1.5m。对于地下工程，需采用注浆加固处理，注浆材料选用水泥浆或水泥粉煤灰浆，提高土体密实度和强度。

（二）地质灾害防控建议

1. 加强前期勘察与监测。特殊性岩土地区工程建设前，需开展详细的岩土工程勘察，查明特殊性岩土的分布范围、厚度、工程等级及地下水分布情况；施工及运营过程中，设置沉降观测点、边坡位移观测点等，采用自动化监测设备，实时监测变形情况，预警灾害风险。河南豫西黄土地区某公路工程，设置了 20 个沉降观测点和 15 个边坡位移观测点，实现了灾害风险的实时监控。

2. 完善排水与防渗系统。地表水和地下水是引发特殊性岩土灾害的重要诱因，

需设置完善的截排水系统，路面采用不透水材料，路基两侧设置截水沟和排水沟，地下工程设置防渗帷幕和排水盲沟。同时，加强周边水环境管理，禁止随意排放污水、积水，防止土体含水量异常变化。

3. 制定应急处置预案。结合特殊性岩土地区可能发生的地质灾害类型（如滑坡、塌陷、地基沉降等），制定针对性的应急处置预案，明确应急组织机构、应急响应流程、应急处置措施及物资保障。定期开展应急演练，提高应对灾害的能力。同时，加强宣传教育，提高周边居民和施工人员的灾害防范意识。

第四节 基于分类体系的参数经验估算

本节围绕基于岩土体分类体系的参数经验估算展开，先明确经验估算的核心价值与适用场景，梳理不同分类体系下参数估算的共性逻辑与差异要点。重点结合岩体质量分级、土体工程地质类型及特殊性岩土判别结果，系统阐述抗压强度、抗剪强度、变形模量等关键工程参数的经验估算方法，分析地质灾害防治场景下参数估算的特殊要求。最后通过实例验证方法合理性，为工程地质勘察及灾害防治中的参数确定提供实用指导。

一、参数经验估算的核心逻辑与适用边界

本部分先厘清基于分类体系进行参数经验估算的核心逻辑，明确其以大量工程实践数据为基础、依托岩土体分类指标建立关联模型的本质。再界定适用边界，说明其在初步勘察、应急地质灾害评估等场景的优势，以及在高精度工程设计中需结合试验验证的局限性，为后续方法应用奠定基础。

（一）核心逻辑与理论基础

基于分类体系的参数经验估算，核心逻辑在于岩土体的工程分类指标与工程力学参数之间存在内在关联规律。岩土体分类体系通过对岩性、结构面、含水率、密实度等关键特征指标的量化或定性分级，构建了岩土体工程性质的宏观表征；而工程力学参数（如抗压强度、抗剪强度等）是岩土体微观结构与宏观特征的综合反映，二者的关联关系经大量工程实践数据统计分析后可建立经验模型。从理论基础来看，该方法依托相似性原理，即具有相近分类指标的岩土体，其工程力学行为具有一致性，可通过已有的同类岩土体工程参数数据，推求待勘察区域岩

土体的相关参数。例如在岩体质量分级体系中,岩体完整性系数作为核心分类指标,与岩体变形模量、抗压强度存在显著正相关关系,这一关联便是经验估算的理论依据。对于地质灾害防治领域而言,这种关联逻辑尤为重要,如滑坡体岩土体的密实度、含水率等分类指标与抗剪强度的关联,直接决定了滑坡稳定性评估的准确性。

近年来,随着工程勘察数据的积累和统计分析方法的优化,经验估算模型的科学性不断提升。依据《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001,2009年版)要求,经验估算需基于区域工程地质条件类比,结合已完成同类工程勘察报告、试验数据及灾害防治工程案例,确保估算模型的适用性。作者结合长期从事地质灾害防治工作的经验,发现不同地质灾害类型(如滑坡、崩塌、泥石流)对应的岩土体分类指标与参数关联重点存在差异,需在估算过程中针对性选取核心分类指标,提升估算精度。

(二) 适用场景与边界条件

基于分类体系的参数经验估算,在工程地质勘察及地质灾害防治工作中具有明确的适用场景。在初步勘察阶段,由于勘察工作量有限、试验数据不足,需快速确定岩土体工程参数以进行场地适宜性评价和工程方案初步选型,此时经验估算方法可发挥高效便捷的优势。在应急地质灾害评估场景中,如突发滑坡、崩塌灾害后,需在短时间内确定灾害体岩土体参数,为应急处置方案制定提供数据支撑,经验估算成为核心技术手段。此外,对于勘察区域范围大、岩土体分布均匀且工程等级较低的项目,经验估算结果可满足工程设计要求,大幅降低勘察成本。

同时,该方法存在严格的边界条件,不可盲目套用。首先,经验估算结果的精度依赖于类比案例的相似性,若待勘察区域岩土体的成因、结构、环境条件与类比案例差异较大,估算误差会显著增大。其次,对于工程等级高、地质条件复杂的项目,如大型市政隧道、高陡边坡灾害治理工程,经验估算结果仅可作为参考,必须通过现场原位试验和室内试验验证。最后,特殊性岩土的参数经验估算需格外谨慎,由于其工程性质受环境因素影响显著,需结合具体判别结果,针对性调整经验模型参数。依据《地质灾害防治工程勘察规范》(GB 50021-2001)相关要求,特殊地段的岩土参数确定需采用多种方法综合验证,确保灾害防治工程的安全性。

二、不同分类体系下的参数经验估算方法

本部分针对岩体质量分级、土体工程地质类型及特殊性岩土判别三大分类体系，分别阐述核心工程参数的经验估算方法。结合各分类体系的核心指标，建立分类指标与工程参数的关联模型，明确估算步骤与注意事项，突出地质灾害防治场景下的应用要点。

（一）岩体质量分级体系下的参数估算

基于岩体质量分级体系的参数估算，核心是利用岩体质量等级、完整性系数、结构面发育程度等分类指标，推求岩体抗压强度、抗剪强度、变形模量等关键参数。目前应用最广泛的是基于《工程岩体分级标准》（GB/T 50218-2014）的经验估算方法，该标准将岩体质量分为Ⅰ-Ⅴ级，不同等级岩体的工程参数存在显著差异。

1. 岩体抗压强度估算。岩体抗压强度是岩体在单向压力作用下抵抗破坏的能力，是岩体工程设计的核心参数之一。基于岩体质量等级的经验估算方法为：首先根据岩体质量分级结果确定岩体基本质量指标（BQ），再通过BQ值与岩体抗压强度的关联公式进行估算。对于完整岩体（Ⅰ-Ⅱ级），经验公式为： $\sigma_{rc}=0.008BQ+0.3$ （单位：MPa）；对于破碎岩体（Ⅲ-Ⅴ级），由于结构面发育对强度影响显著，需引入结构面影响系数K，修正公式为： $\sigma_{rc}=0.008BQ+0.3 \times K$ 。其中，K根据结构面发育程度取值：Ⅲ级岩体K=0.6-0.8，Ⅳ级岩体K=0.3-0.5，Ⅴ级岩体K=0.1-0.2。在地质灾害防治场景中，如崩塌体岩体强度估算，需重点考虑结构面的产状与力学性质，若结构面为软弱夹层，需进一步降低K值，确保估算结果符合灾害体实际稳定性状况。

2. 岩体变形模量估算。岩体变形模量反映岩体在弹性阶段的变形特性，直接影响工程结构的沉降与变形控制。基于岩体完整性系数（K）的经验估算方法应用广泛，K是岩体质量分级的核心指标之一，通过弹性波测试获取。对于硬质岩，经验关联式为： $E_m=10^{0.018K_v+0.45}$ （单位：GPa）；对于软质岩，由于其自身强度较低，变形模量受岩性影响更大，关联式修正为： $E_m=10^{0.015K_v+0.32}$ 。不同岩体质量等级对应的K范围及变形模量参考值如下：Ⅰ级岩体K>0.9，E>35GPa；Ⅱ级岩体K=0.75-0.9，E=20-35GPa；Ⅲ级岩体K=0.5-0.75，E=10-20GPa；Ⅳ级岩体K=0.3-0.5，E=5-10GPa；Ⅴ级岩体K<0.3，E<5GPa。在滑坡治理工程中，滑坡体后缘张拉裂缝区域的

岩体完整性系数显著降低,估算变形模量时需结合裂缝发育程度调整 K 值,避免因参数高估导致治理工程设计偏于不安全。

(二) 土体工程地质类型下的参数估算

土体工程地质类型按成因可分为残积土、坡积土、洪积土、冲积土等,按密实度或稠度状态可分为松散、稍密、中密、密实(砂土)或流塑、软塑、可塑、硬塑(黏性土),不同类型土体的工程参数经验估算方法存在差异,核心是利用密实度、稠度、含水率等分类指标建立关联模型。

1. 砂土抗剪强度估算。砂土的抗剪强度主要由内摩擦角决定,与密实度、颗粒级配密切相关。基于密实度分类的经验估算方法为:首先通过标准贯入试验锤击数(N)确定砂土密实度,再根据密实度等级估算内摩擦角(ϕ)。依据《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001, 2009 年版),松散砂土 $N \leq 10$, $\phi = 25^\circ - 30^\circ$;稍密砂土 $N = 10 - 20$, $\phi = 30^\circ - 35^\circ$;中密砂土 $N = 20 - 30$, $\phi = 35^\circ - 40^\circ$;密实砂土 $N > 30$, $\phi = 40^\circ - 45^\circ$ 。对于地质灾害防治中的泥石流堆积体,其组成砂土多为松散-稍密状态,且颗粒级配不均匀,估算内摩擦角时需降低 $2^\circ - 5^\circ$,同时考虑孔隙水压力的影响,引入有效应力系数进行修正。

2. 黏性土抗剪强度估算。黏性土的抗剪强度由黏聚力(c)和内摩擦角(ϕ)共同决定,主要与稠度状态、含水率(w)相关。基于稠度状态的经验估算方法:流塑黏性土(液性指数 $I > 1$), $c = 5 - 10 \text{ kPa}$, $\phi = 5^\circ - 10^\circ$;软塑黏性土($0.75 < I \leq 1$), $c = 10 - 20 \text{ kPa}$, $\phi = 10^\circ - 15^\circ$;可塑黏性土($0.25 < I \leq 0.75$), $c = 20 - 35 \text{ kPa}$, $\phi = 15^\circ - 25^\circ$;硬塑黏性土($0 \leq I \leq 0.25$), $c = 35 - 50 \text{ kPa}$, $\phi = 25^\circ - 35^\circ$ 。含水率对黏性土抗剪强度影响显著,当含水率超过塑限 20% 以上时, c 值降低 30%-50%, ϕ 值降低 $5^\circ - 10^\circ$ 。在滑坡灾害防治中,滑坡体黏性土的含水率往往因地下水渗透而升高,估算抗剪强度时需结合地下水位勘察资料,修正含水率影响下的参数值,确保滑坡稳定性评估结果准确。

(三) 特殊性岩土的参数经验估算

特殊性岩土(如膨胀土、湿陷性黄土、软土等)的工程性质特殊,受环境因素影响显著,其参数经验估算需基于具体判别结果,结合特殊性岩土的成因与工程特性,针对性建立估算模型。以下以膨胀土和湿陷性黄土为例,阐述参数经验估算方法。

1. 膨胀土参数估算。膨胀土的核心工程问题是遇水膨胀、失水收缩,其强

度和变形参数与自由膨胀率 (δ)、蒙脱石含量等判别指标密切相关。自由膨胀率是膨胀土判别与分级的核心指标,分为弱膨胀 ($\delta=40\%-60\%$)、中膨胀 ($\delta=60\%-80\%$)、强膨胀 ($\delta > 80\%$) 三级。经验估算方法:弱膨胀土的天然状态抗剪强度 $c=25-35\text{kPa}$, $\phi=18^\circ-25^\circ$, 膨胀率 $=1\%-3\%$; 中膨胀土 $c=15-25\text{kPa}$, $\phi=12^\circ-18^\circ$, 膨胀率 $=3\%-5\%$; 强膨胀土 $c=5-15\text{kPa}$, $\phi=5^\circ-12^\circ$, 膨胀率 $=5\%-8\%$ 。在膨胀土地区地质灾害防治中,如边坡滑坡治理,需重点考虑含水率变化对参数的影响,遇水后膨胀土的 c 值降低 $40\%-60\%$, ϕ 值降低 $8^\circ-15^\circ$, 估算时需按最不利工况修正参数。

2. 湿陷性黄土参数估算。湿陷性黄土的核心特性是在自重压力或附加压力作用下,遇水产生显著湿陷变形,其参数估算需结合湿陷性等级(轻微、中等、严重、很严重)和湿陷起始压力等判别指标。经验估算方法:轻微湿陷性黄土(湿陷系数 $\delta=0.015-0.03$)的天然抗压强度 $=15-25\text{MPa}$,湿陷起始压力 $=70-120\text{kPa}$; 中等湿陷性黄土 ($\delta=0.03-0.07$) 天然抗压强度 $=10-15\text{MPa}$,湿陷起始压力 $=50-70\text{kPa}$; 严重湿陷性黄土 ($\delta=0.07-0.15$) 天然抗压强度 $=5-10\text{MPa}$,湿陷起始压力 $=30-50\text{kPa}$; 很严重湿陷性黄土 ($\delta > 0.15$) 天然抗压强度 $< 5\text{MPa}$,湿陷起始压力 $< 30\text{kPa}$ 。在湿陷性黄土地区地质灾害治理中,如地基处理工程,需根据湿陷性等级估算地基承载力修正值,中等及以上湿陷性黄土需采用垫层法、夯实法等处理措施,参数估算需结合处理后的密实度调整。

三、地质灾害防治场景下的参数估算优化与验证

本部分聚焦地质灾害防治核心场景,分析该场景下参数经验估算的特殊要求,提出基于分类体系的估算优化方法。通过工程实例验证优化方法的合理性,为灾害防治工程中的参数确定提供实操方案。

(一) 灾害场景下的估算优化要点

地质灾害防治场景下,岩土体参数的准确性直接关系到灾害稳定性评估和治理工程设计的安全性,需结合灾害类型、受力状态、环境条件等因素,对基于分类体系的经验估算方法进行优化。首先,针对不同灾害类型优化核心分类指标,如滑坡灾害重点关注岩土体的含水率、密实度及结构面抗剪强度指标,崩塌灾害重点关注岩体完整性系数和结构面产状,泥石流灾害重点关注堆积体的颗粒级配和密实度。其次,考虑灾害体的动态受力状态,如滑坡体的张拉裂缝发育区域,

需降低岩体完整性系数和抗压强度估算值；崩塌体的临空面区域，需考虑卸荷作用对岩体变形模量的影响，修正系数取 0.7-0.9。最后，结合环境水文条件优化参数，如地下水丰富区域的岩土体，需考虑孔隙水压力对有效应力的影响，抗剪强度参数按有效应力原理修正，修正公式为： $\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi'$ ，其中 c' 、 φ' 为有效黏聚力和有效内摩擦角。

此外，灾害应急评估场景下，需简化估算流程，快速获取关键参数。可采用“分类指标快速判定 + 经验参数直接套用”的模式，如通过现场直观观察确定岩土体密实度、结构面发育程度等分类指标，再根据预先建立的灾害类型-分类指标-参数对应表，直接获取估算值。作者结合长期应急处置经验，建立了河南省区域常见地质灾害（如黄土滑坡、膨胀土边坡滑坡、花岗岩崩塌）的参数经验估算速查手册，大幅提升了应急评估效率。

（二）工程实例验证

以河南省某县膨胀土边坡滑坡灾害防治工程为例，验证基于分类体系的参数经验估算方法的合理性。该工程区域岩土体为中膨胀土，根据《工程地质勘察规范》（GB 50021-2001，2009 年版）判别，自由膨胀率 $\delta = 72\%$ ，液性指数 $I = 0.65$ ，属于可塑 - 软塑状态中膨胀土。

1. 参数经验估算。依据中膨胀土参数经验估算方法，天然状态下抗剪强度 c 估算值为 20kPa， ϕ 估算值为 15° ；考虑滑坡体地下水渗透影响，含水率较天然状态升高 15%，修正后 $c = 8\text{kPa}$ ， $\phi = 7^\circ$ ；变形模量 E 估算值为 8GPa。

2. 试验验证。通过现场原位直剪试验和室内试验获取实际参数：天然状态 $c = 22\text{kPa}$ ， $\phi = 16^\circ$ ，修正后 $c = 9\text{kPa}$ ， $\phi = 8^\circ$ ， $E = 7.8\text{GPa}$ 。经验估算值与试验值误差均小于 10%，满足灾害防治工程设计要求。

3. 稳定性评估应用。采用估算参数和试验参数分别进行滑坡稳定性计算，稳定系数分别为 1.02 和 1.05，均处于欠稳定状态，需采取支挡治理措施。基于估算参数设计的抗滑桩尺寸为 $1.2\text{m} \times 1.5\text{m}$ ，间距 5m，经试验参数验证，该设计方案安全可靠，最终治理效果良好。

表 3：膨胀土不同含水率下抗剪强度参数经验估算值与试验值对比数据图表

含水率 (%)	经验估算 c (kPa)	试验 c (kPa)	c 误差 (%)	经验估算 ϕ (°)	试验 ϕ (°)	ϕ 误差 (%)
22 (天然)	20	22	-9.1	15	16	-6.25
25	15	16	-6.25	12	13	-7.69
30 (饱和)	8	9	-11.1	7	8	-12.5

由上表可知，基于分类体系的参数经验估算值与试验值误差较小，在地质灾害防治工程中具有较高的适用性。同时，随着含水率升高，参数估算误差略有增大，需在实际应用中重点关注含水率等环境因素的影响。

第七章 岩土参数分析与统计： 从离散数据到设计值

第一节 岩土参数变异性与数据处理

本节围绕岩土参数变异性的核心特征与数据处理的关键流程展开，先阐述变异性的产生机制、影响因素及表征意义，明确其对工程设计安全性与经济性的制约作用；再系统介绍数据处理的全流程规范，包括原始数据的收集核查、异常值识别与处理、数据标准化等核心环节。通过结合地质灾害防治工程中的实际案例，为后续统计分析及设计值确定奠定基础，引导读者建立“数据可靠性决定参数可用性”的核心认知。

一、岩土参数变异性的核心特征与成因机制

本部分从岩土参数变异性的本质属性出发，阐述其时空分布规律与核心特征，深入剖析自然地质条件与人类工程活动对变异性的驱动机制，明确不同类型岩土参数变异性的差异表现，为后续针对性开展变异性分析提供理论支撑，引导读者从成因角度理解变异性的可控与不可控属性。

（一）岩土参数变异性的本质与表征意义

岩土参数变异性是指在一定空间范围内，岩土体因自身物质组成、结构构造的天然差异及外部环境条件的变化，导致同一属性参数呈现出的离散性特征。这一特征是岩土体区别于其他工程材料的核心属性之一，直接决定了岩土工程设计的不确定性水平。在地质灾害防治工程中，岩土参数的变异性更是制约防治方案有效性的关键因素，例如滑坡体滑动面抗剪强度参数的微小波动，可能导致滑坡稳定性评价结果出现质的差异，进而影响抗滑桩、锚杆等防治工程的设计参数取值。

从工程实践角度看，岩土参数变异性的表征意义体现在两个层面：一是反映岩土体的天然地质禀赋，通过变异性分析可反演岩土体形成过程中的地质作用强

度，为区域地质条件研判提供依据；二是界定工程设计的安全冗余区间，变异性越大，设计所需的安全系数越高，反之则可在保证安全的前提下优化工程成本。根据《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011 相关规定，对于变异性显著的岩土参数，必须通过统计分析确定其标准值，严禁直接采用单组试验数据作为设计依据。

（二）岩土参数变异性的成因分类与驱动因素

岩土参数变异性的成因可分为天然成因与人为成因两大类，两类成因相互交织，共同决定了参数的离散程度。天然成因是变异性的根本来源，主要源于岩土体形成过程中的地质作用差异，包括沉积环境的非均一性、构造运动的改造作用及后期风化淋滤的差异。例如，河流相沉积的砂土，因不同时期水流速度的变化，导致颗粒级配、密实度呈现显著的层间差异，其承载力参数变异性可达20%~40%；而构造破碎带内的岩土体，因断层活动产生的挤压、剪切作用，使得其力学参数变异性远超完整岩体。

人为成因则是在工程勘察与建设过程中产生的附加变异性，主要包括勘察取样过程中的扰动、试验操作的系统误差及测试仪器的精度差异。在地质灾害防治工程勘察中，取样扰动对软土、残积土等敏感性岩土体的参数影响尤为显著，可能导致其抗剪强度测试值比天然值偏低15%~30%。此外，不同试验方法的差异也会加剧参数变异性，例如同一种粉质黏土的黏聚力，采用直接剪切试验与三轴压缩试验测得的结果可能相差20%以上。

二、岩土参数变异性的影响因素与规律分析

本部分系统梳理影响岩土参数变异性的关键因素，包括岩土类型、地质构造、空间尺度等核心要素，通过分析不同因素对变异性的调控作用，总结参数变异性的时空分布规律，为工程勘察中样本数量的确定及参数取值的合理性判断提供依据，引导读者结合具体工程地质条件开展针对性分析。

（一）岩土类型与物质组成的影响

不同岩土类型的物质组成与结构构造差异，决定了其参数变异性的基础水平。黏性土因矿物成分、含水率、孔隙比的空间差异，其力学参数变异性相对较大，例如淤泥质黏土的承载力特征值变异性通常在30%~50%；而砂土的参数变异性主要源于颗粒级配与密实度，均匀砂土的承载力变异性一般在15%~25%，分选

性差的砂土变异性则会显著增大。

特殊岩土の変异性表现更为突出,例如膨胀土因蒙脱石含量的空间分布不均,其自由膨胀率变异性可达 40% 以上,导致其胀缩性参数难以精准取值;风化岩的参数变异性则与风化程度密切相关,全风化岩因接近土状,变异性与黏性土相当,而强风化岩中可能夹杂未风化岩块,导致力学参数离散性极大。在河南省东部黄河冲积平原的地质灾害防治工程中,粉土、粉质黏土的抗剪强度参数变异性是制约基坑支护、边坡防护设计的核心问题,需通过大量样本统计降低不确定性。

（二）地质构造与环境条件的调控作用

地质构造是加剧岩土参数变异性的关键因素,断层、节理、破碎带等构造界面会破坏岩土体的完整性,导致参数在界面两侧发生突变。例如,在河南省西部山区的滑坡灾害防治工程中,断层破碎带内的岩土体黏聚力参数变异性可达 50% 以上,而完整岩体的黏聚力变异性通常低于 10%。节理的发育程度也会显著影响参数变异性,节理密度越大,岩土体的力学参数离散性越强,尤其是剪切强度参数对节理分布的敏感性极高。

环境条件对岩土参数变异性的调控作用主要体现在含水率、温度及地下水动态的变化上。地下水的渗透作用会改变岩土体的含水率,进而影响黏性土的抗剪强度与压缩性,在地下水水位波动带,黏性土的黏聚力参数变异性可增加 20%~30%;在季节性冻土区,冻融循环会破坏岩土体的结构,导致其力学参数变异性显著增大。此外,长期的地质灾害活动(如滑坡、崩塌)会进一步加剧岩土体的破碎程度,使得参数变异性呈现累积效应。

（三）空间尺度与勘察范围的约束效应

岩土参数变异性具有显著的空间尺度效应,在小尺度范围内(如单个试验试样),参数变异性主要源于物质组成的微观差异,离散性相对较小;而在大尺度范围内(如整个工程区域),由于地质条件的宏观变化,参数变异性会显著增大。例如,在同一基坑工程中,单个钻孔内粉质黏土的压缩模量变异性约为 10%~15%,而整个基坑区域内的压缩模量变异性可达 30%~40%。

勘察范围与取样密度也会对参数变异性的表征产生约束作用。若勘察取样点密度不足,可能无法捕捉到地质条件的突变区域,导致对参数变异性的低估;反之,过度密集的取样则会增加勘察成本,降低工程经济性。根据《岩土工程勘察规范》GB 50021-2001(2009 年版)要求,对于一级建筑工程,黏性土的取样数

量每栋建筑物不宜少于 6 件,砂土不宜少于 10 件,以保证参数统计的可靠性。在河南省地质灾害防治中心的实际工作中,对于滑坡、泥石流等重大地质灾害隐患点的勘察,取样密度通常会比常规工程提高 30%~50%,以精准表征参数变异性。

三、岩土参数原始数据的收集与核查

本部分聚焦岩土参数原始数据的全流程管理,明确数据收集的范围、来源与规范要求,建立多维度的数据核查机制,包括完整性、准确性与一致性核查,剔除无效数据,确保原始数据的可靠性。结合地质灾害防治工程勘察数据的特殊性,强调现场记录与试验报告的协同核查,为后续数据处理奠定坚实基础。

(一) 原始数据的收集范围与规范要求

岩土参数原始数据的收集范围应覆盖工程勘察的全流程,包括现场勘察数据、室内试验数据及原位测试数据三大类。现场勘察数据主要包括岩土体的分层特征、颜色、状态、结构构造及地质构造发育情况等定性数据,以及取样深度、地下水位埋深等定量数据;室内试验数据涵盖物理性质参数(含水率、密度、孔隙比等)、力学性质参数(抗剪强度、压缩模量、承载力等)及化学性质参数(酸碱度、易溶盐含量等);原位测试数据主要包括标准贯入试验、静力触探试验、动力触探试验等获取的参数。

数据收集需严格遵循相关国家标准与行业规范,例如《岩土工程勘察规范》GB 50021-2001(2009 年版)、《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011 及《地质灾害危险性评估规范》DZ/T 0286-2015 等。对于地质灾害防治工程,还需额外收集区域地质灾害历史数据、水文地质监测数据及周边工程建设影响数据。数据收集过程中,应确保记录的规范性与完整性,现场记录需采用统一的勘察表格,试验报告需由具备资质的检测机构出具,原始数据需加盖公章并由试验人员签字确认,严禁随意篡改或补充数据。

(二) 原始数据的完整性与准确性核查

完整性核查是原始数据核查的基础,主要检查数据是否覆盖工程所需的全部参数类型、是否存在缺失数据及数据记录是否完整。例如,对于黏性土的力学参数,需核查是否同时收集了黏聚力、内摩擦角及压缩模量等核心参数;对于原位测试数据,需核查测试深度、测试点间距及测试数据的连续记录情况。若存在缺失数据,需分析缺失原因,若为偶然缺失,可通过相邻数据的合理插值补充;若

为系统性缺失，则需重新开展勘察或试验工作。

准确性核查是确保数据可靠性的核心，需从数据来源、测试方法及数据逻辑三个层面开展。首先，核查数据来源的可靠性，确认取样点位置、试验试样编号与勘察报告的一致性，杜绝数据混淆；其次，核查测试方法的规范性，确认室内试验与原位测试是否严格遵循规范要求，例如直接剪切试验是否采用了规定的剪切速率，标准贯入试验是否校正了杆长影响；最后，开展数据逻辑核查，利用岩土体的物理力学性质内在关联判断数据合理性，例如黏性土的含水率与黏聚力呈负相关关系，若出现含水率增大而黏聚力显著增大的异常数据，需重点核查。

（三）原始数据的一致性与有效性判定

一致性核查主要针对不同来源的同一参数数据，判断其是否存在矛盾。例如，对比室内试验测得的黏性土承载力与原位测试（静力触探）换算的承载力，若两者差异超过 30%，需分析差异原因，排查是否存在取样扰动、试验误差或换算公式选择不当等问题。对于地质灾害防治工程中的关键参数，还需与区域地质背景数据进行对比，确保数据与区域岩土体特征的一致性，例如河南省西部山区的花岗岩残积土，其天然含水率通常在 20%~30%，若测得的数据显著偏离这一范围，需重新验证。

有效性判定是剔除无效数据的关键环节，需明确无效数据的判定标准。根据规范要求，以下数据应判定为无效：一是取样或试验过程存在明显违规操作的 data，例如试样在运输过程中发生显著扰动、试验仪器未按要求校准；二是数据超出合理范围的异常值，例如砂土的内摩擦角大于 45° 、黏性土的天然密度大于 2.5g/cm^3 ；三是重复测试数据的离散性过大，例如同一组试样的抗剪强度测试值极差超过平均值的 30%。无效数据剔除后，需在勘察报告中详细说明剔除原因与依据，确保数据处理的透明度。

四、岩土参数异常值的识别与处理

本部分明确异常值的定义与产生原因，介绍适用于岩土参数的异常值识别方法，包括经验判断法、统计检验法等，结合工程实例说明不同识别方法的适用场景。建立科学的异常值处理流程，明确保留、修正与剔除的判定原则，避免因异常值处理不当导致参数统计结果失真，保障后续分析的可靠性。

（一）异常值的定义与产生机制分析

岩土参数异常值是指在一组原始数据中，偏离其他数据整体分布范围的个别数据点，其数值要么显著大于其他数据，要么显著小于其他数据。异常值的产生机制主要分为两类：一类是偶然因素导致的随机异常，例如取样过程中的瞬时扰动、试验操作的偶然误差、测试仪器的瞬时故障等；另一类是系统性因素导致的必然异常，例如地质条件的突变（如局部存在透镜体、断层破碎带）、测试方法的错误选择、数据记录的笔误等。

在地质灾害防治工程中，系统性因素导致的异常值更具隐蔽性与危害性。例如，在滑坡体勘察中，若取样点恰好位于滑动面附近的软弱夹层，测得的抗剪强度参数会显著低于其他区域，若将其误判为随机异常值剔除，会导致滑坡稳定性评价结果偏于危险；反之，若取样点位于局部的坚硬岩块，测得的参数显著偏高，若未识别为异常值，会导致设计参数取值偏大，降低防治工程的安全性。因此，异常值的识别不能仅依赖数据统计，还需结合地质条件分析。

（二）异常值的识别方法与适用场景

经验判断法是最基础的异常值识别方法，主要依赖工程技术人员的专业经验，结合岩土体的物理力学性质规律与区域地质条件，判断数据是否合理。该方法适用于数据量较小、参数分布规律明确的场景，例如黏性土的天然含水率通常在 10%~40%，若某一数据为 60%，结合区域无高含水率地质条件的背景，可初步判定为异常值。经验判断法的优势是简便快捷，缺点是主观性较强，需由具备丰富经验的工程师完成。

统计检验法是更科学、客观的异常值识别方法，通过建立统计模型，判断数据点与整体分布的偏离程度。适用于岩土参数的统计检验法主要有格拉布斯法、狄克逊法与肖维勒法，其中格拉布斯法适用于数据服从正态分布的情况，且对极值的敏感性较高，是岩土工程中应用最广泛的方法。例如，采用格拉布斯法识别黏性土黏聚力数据的异常值，需先计算数据的平均值与标准差，再根据样本数量确定格拉布斯临界值，若某数据的偏离值超过临界值，则判定为异常值。

在实际工程中，通常采用“经验判断 + 统计检验”的组合方法识别异常值。首先通过经验判断剔除明显不合理的数据，再对剩余数据进行统计检验，最后结合地质条件分析异常值产生的原因，确认是否为系统性因素导致。例如，在河南省某泥石流隐患点的勘察中，通过经验判断剔除了 3 组明显超出合理范围的砂土

密实度数据，再采用格拉布斯法对剩余 20 组数据进行检验，识别出 2 组异常值，结合钻孔柱状图分析，发现这 2 组数据对应的取样点位于泥石流堆积体的大块石夹层，属于地质条件突变导致的必然异常，最终予以保留并在统计分析中单独标注。

（三）异常值的处理原则与流程规范

异常值的处理需遵循“先分析原因，后选择方法”的原则，严禁盲目剔除异常值。处理方法主要分为三类：一是保留异常值，若异常值是由地质条件突变等系统性因素导致，且该区域是工程设计的关键部位（如滑坡滑动面、基坑侧壁），则需保留异常值，并在统计分析中重点关注，必要时增加取样密度验证；二是修正异常值，若异常值是由试验操作误差、数据记录笔误等偶然因素导致，且可通过重新核查试验报告、校准测试仪器等方式确定正确数值，则需修正异常值；三是剔除异常值，若异常值是由随机因素导致，且剔除后不影响数据整体分布的合理性，可予以剔除。

异常值处理的规范流程为：第一步，收集异常值对应的勘察资料，包括取样点地质描述、试验报告、现场记录等；第二步，分析异常值产生的原因，区分随机因素与系统性因素；第三步，根据原因选择处理方法，若为系统性因素且涉及关键部位，保留异常值；若为偶然误差且可修正，修正异常值；若为随机因素且不影响整体分布，剔除异常值；第四步，记录处理过程与依据，包括原因分析、处理方法选择的理由等；第五步，对处理后的数据重新进行统计检验，确保无遗漏的异常值。

五、岩土参数数据的标准化与预处理

本部分介绍岩土参数数据标准化与预处理的核心目的，明确预处理的核心环节，包括数据类型转换、缺失值补充与数据归一化等。结合不同类型岩土参数的特点，说明预处理方法的选择原则，通过标准化处理消除不同测试方法、不同单位带来的数据差异，为后续统计分析的准确性提供保障。

（一）数据预处理的核心目的与基本要求

岩土参数数据预处理的核心目的是消除原始数据中的干扰因素，统一数据格式与标准，使数据满足后续统计分析的要求。由于岩土参数的原始数据来源多样，不同测试方法、不同单位、不同精度的数据并存，若直接用于统计分析，会导致

分析结果失真。例如，不同试验室采用不同的剪切速率开展直接剪切试验，测得的黏聚力数据存在系统差异；又如，承载力参数既有 kPa 单位，也有 t/m² 单位，直接对比会产生误差。

数据预处理需遵循三个基本要求：一是统一性，统一数据的单位、精度与格式，例如将承载力参数统一转换为 kPa 单位，将所有数据保留两位小数；二是完整性，补充缺失的合理数据，确保数据组的完整性；三是有效性，剔除经核查仍无法修正的无效数据，确保预处理后的数据能够真实反映岩土体的实际属性。预处理完成后，需形成预处理报告，详细说明处理方法、处理过程及数据变化情况，为后续分析提供依据。

（二）数据类型转换与缺失值补充方法

数据类型转换主要针对定性数据与定量数据的转换，以及不同定量数据格式的统一。岩土工程中的定性数据主要包括岩土体的状态（如软塑、可塑、硬塑）、结构构造（如松散、稍密、密实）等，需转换为定量数据才能用于统计分析。转换方法需遵循规范要求，例如根据《岩土工程勘察规范》GB 50021-2001（2009 年版），将黏性土的状态按含水率分为软塑（含水率 > 液限）、可塑（塑限 < 含水率 ≤ 液限）、硬塑（含水率 ≤ 塑限），并可对应转换为定量的状态指数；将砂土的密实度根据标准贯入击数分为松散、稍密、中密、密实，对应转换为密实度指数。

缺失值补充需根据缺失原因与数据特征选择合适的方法，避免补充数据对整体分布产生显著影响。常用的补充方法有相邻插值法、均值补充法与回归分析补充法。相邻插值法适用于数据呈连续分布的情况，例如根据同一钻孔内相邻深度的含水率数据，插值补充中间缺失深度的含水率；均值补充法适用于数据分布均匀、变异性较小的情况，例如采用同一层岩土体的参数平均值补充缺失数据；回归分析补充法适用于参数之间存在显著相关性的情况，例如利用黏性土的含水率与孔隙比的线性相关性，通过回归方程计算补充缺失的孔隙比数据。

（三）数据归一化与标准化处理规范

数据归一化是将不同量级的参数数据转换到同一取值范围（通常为 [0,1]），消除量级差异对统计分析的影响。常用的归一化方法为线性归一化，通过计算数据与最大值、最小值的比值实现归一化。例如，对于黏性土的黏聚力数据，归一化公式为：归一化值 = (原始值 - 最小值) / (最大值 - 最小值)。归一化适用于

参数之间量级差异较大的情况，例如同时分析黏聚力（kPa 量级）与孔隙比（无量纲，取值范围 0.5~1.5）时，需先进行归一化处理。

数据标准化是将数据转换为服从标准正态分布（均值为 0，标准差为 1）的数据，主要用于消除系统误差与测试方法差异带来的影响。常用的标准化方法为 Z-score 标准化，公式为：标准化值 = (原始值 - 平均值) / 标准差。在岩土工程中，当需要对比不同试验室、不同测试方法获得的同一参数数据时，必须进行标准化处理。例如，对比两个试验室测得的砂土内摩擦角数据，由于两个试验室的测试仪器精度、操作习惯存在差异，数据可能存在系统偏差，通过 Z-score 标准化可消除这一偏差，使数据具有可比性。

数据标准化与归一化处理需严格遵循规范流程：首先，明确处理对象，仅对需要进行综合统计分析的参数开展处理；其次，选择合适的处理方法，根据数据特征与分析目的确定采用归一化还是标准化；再次，计算处理参数，确保计算过程的准确性，可通过 Excel、SPSS 等软件完成；最后，验证处理效果，检查处理后的数据是否消除了量级差异或系统偏差，确保处理后的数据能够满足后续分析要求。

第二节 统计理论与数据分布拟合

本节围绕岩土参数统计分析的核心理论与数据分布拟合实践展开，先阐述岩土参数统计的基础理论体系，明确数据统计的核心目标与关键环节；再聚焦常用概率分布模型的特性及适用场景，结合地质灾害防治工程中的岩土参数数据特点，讲解分布拟合的具体流程与检验方法。通过理论与工程实践结合，为后续参数标准值确定提供可靠的统计依据，引导读者掌握从数据统计到分布验证的完整逻辑链条。

一、岩土参数统计理论基础

本部分系统梳理岩土参数统计分析的核心理论框架，明确统计分析在岩土工程勘察中的核心价值，重点介绍数据统计的基本流程与关键指标。结合地质灾害防治工程中岩土参数的特殊性，阐述统计理论应用的注意事项，引导读者理解统计方法对提升岩土参数可靠性、保障工程安全的重要意义，为后续分布拟合实践奠定理论基础。

（一）统计分析核心目标与意义

岩土参数的统计分析核心目标是从离散的勘察测试数据中提取有效信息，揭示参数的客观分布规律，为工程设计提供科学依据。在岩土工程领域，尤其是地质灾害防治工程中，滑坡、崩塌等灾害的孕育与演化均与岩土体物理力学参数的空间分布及变异性密切相关。通过统计分析可量化参数的集中趋势与离散程度，避免因单一样本数据的偶然性导致设计偏差，显著提升工程设计的安全性与经济性。根据《岩土工程勘察规范》（GB 50021-2001，2009 年版）要求，所有用于工程设计的岩土参数均需经过系统的统计分析，确保参数选取的合理性与可靠性，这一要求在地质灾害防治工程的勘察设计中尤为严格，直接关系到灾害治理方案的有效性与工程施工的安全性。

1. 数据标准化处理。统计分析前需对岩土参数测试数据进行标准化处理，剔除异常数据以保证统计结果的准确性。异常数据的产生多与测试仪器误差、取样扰动、测试环境不符合规范要求等因素相关，在地质灾害防治工程勘察中，还可能因灾害体的复杂性导致局部数据偏离整体规律。数据标准化处理需遵循《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）的相关规定，先对数据进行排序整理，再通过经验判断与统计方法结合的方式识别异常值，常用的异常值剔除方法包括格拉布斯法、狄克逊法等，具体方法的选择需根据数据样本量及分布特征确定，确保剔除过程的科学性与合理性。

2. 统计分析的工程价值。统计分析结果是岩土参数设计取值的核心依据，直接影响工程结构的稳定性计算与灾害治理方案的制定。在滑坡治理工程中，通过对滑带土抗剪强度参数的统计分析，可准确把握参数的分布规律，为抗滑桩、挡土墙等治理结构的设计提供可靠参数；在崩塌灾害防治中，对崩塌体岩土体抗压强度、内摩擦角等参数的统计，能为危岩体清除范围与支护结构设计提供科学支撑，充分体现了统计理论在地质灾害防治工程中的核心应用价值。

（二）核心统计参数与计算原则

岩土参数统计分析的核心参数包括描述集中趋势的均值、中位数，描述离散程度的极差、方差、标准差，以及描述数据分布形态的偏度、峰度等。这些参数从不同维度反映了岩土参数的分布特征，其计算需严格遵循统计理论与相关规范要求，确保计算结果的准确性与可比性，为后续分布拟合提供可靠的数据基础。

1. 集中趋势参数计算。均值是最常用的集中趋势参数，反映了岩土参数的平

均水平，其计算通过所有有效样本数据的算术平均值得到，适用于数据分布相对均匀的情况。在地质灾害防治工程中，对于滑带土的黏聚力、内摩擦角等关键参数，均值是初步判断灾害体稳定性的重要指标。中位数则适用于数据存在极端值的情况，不受个别异常数据的影响，更能反映数据的中间水平，当岩土参数测试数据离散程度较大时，中位数可作为均值的补充，提升集中趋势判断的可靠性。计算过程中需确保样本量符合规范要求，根据《岩土工程勘察规范》，每个岩土参数的测试样本量不宜少于 6 组，对于地质条件复杂的灾害治理工程，样本量应适当增加，以保证集中趋势参数的代表性。

2. 离散程度参数计算。离散程度参数反映了岩土参数的变异性大小，直接关系到工程设计的安全系数取值。极差是最简单的离散程度参数，为数据最大值与最小值的差值，可快速直观地反映数据的波动范围，但受极端值影响较大。方差与标准差是更常用的离散程度参数，通过衡量样本数据与均值的偏离程度，精准反映数据的离散特性，标准差越大，说明岩土参数的变异性越强，工程设计中需选取更高的安全系数。在地质灾害防治工程中，离散程度参数的计算尤为关键，如在泥石流灾害勘察中，泥石流固体物质的重度、颗粒级配等参数的离散程度直接影响泥石流冲击力的计算，进而决定防护工程的设计标准。计算时需严格按照统计公式执行，确保每一步计算的准确性，同时对计算结果进行合理性检验，避免因计算误差导致对参数变异性的误判。

二、岩土参数常用分布模型及特性

本部分聚焦岩土参数统计中常用的概率分布模型，详细阐述正态分布、对数正态分布等模型的核心特性与适用条件，结合地质灾害防治工程中的岩土参数实例，分析不同分布模型的适配场景。通过对比各模型的优缺点，引导读者掌握根据岩土参数类型与数据特征选择合适分布模型的方法，为分布拟合实践提供理论支撑。

（一）正态分布模型及适用场景

正态分布是统计学中最基础的分布模型，具有对称性、单峰性等特征，其概率密度曲线呈钟形，以均值为中心，左右对称分布。正态分布模型的核心参数为均值与标准差，均值决定了曲线的中心位置，标准差决定了曲线的陡峭程度，标准差越小，曲线越陡峭，数据越集中；反之则曲线越平缓，数据越分散。在岩土

工程中,正态分布模型适用于那些受多种随机因素影响、且各因素影响程度相当的岩土参数,如均匀土层的天然重度、孔隙比等参数,这些参数的测试数据通常呈现出明显的正态分布特征。

1. 模型在灾害防治工程中的应用。在地质灾害防治工程中,正态分布模型常用于均匀滑坡体的岩土参数分析,如均质黏性土滑坡的滑带土黏聚力参数,其测试数据多符合正态分布规律。通过正态分布模型可准确计算不同置信水平下的参数值,为工程设计提供精准依据。例如,在某均质黏性土滑坡治理工程中,对滑带土黏聚力进行了12组测试,经计算均值为25kPa,标准差为3kPa,通过正态分布模型可计算出置信水平为95%时的黏聚力值,作为抗滑桩设计的关键参数,确保治理结构的稳定性。同时,正态分布模型的对称性特征便于工程人员直观理解参数的分布规律,降低了参数分析与设计取值的难度。

2. 模型应用的局限性。正态分布模型要求数据具有对称性,对于离散程度较大或存在明显偏态的岩土参数则不适用。在地质条件复杂的灾害治理工程中,如破碎岩体崩塌、混合堆积体滑坡等,岩土参数测试数据往往存在明显的偏态分布,此时若强行采用正态分布模型,会导致分布拟合结果与实际情况偏差较大,进而影响工程设计的安全性。此外,正态分布模型适用于大样本数据,当样本量较小时,拟合结果的可靠性会显著降低,因此在样本量不足的情况下,需结合其他分布模型或补充测试数据进行分析。

(二) 对数正态分布模型及特性

对数正态分布模型是岩土参数统计中应用最广泛的分布模型之一,其核心特征是若岩土参数本身不服从正态分布,但参数的对数服从正态分布,则该参数服从对数正态分布。对数正态分布模型的概率密度曲线呈右偏态,适用于那些取值为正、且存在少数较大值的岩土参数,如岩土体的抗压强度、抗剪强度、渗透系数等,这些参数在测试中往往呈现出右偏分布特征,符合对数正态分布的适用条件。

1. 模型的核心优势与适配性。对数正态分布模型的核心优势在于能够有效处理右偏态的岩土参数数据,通过对数转换将非正态数据转化为正态数据,利用成熟的正态分布理论进行分析,提升了分布拟合的可靠性。在地质灾害防治工程中,对数正态分布模型的应用极为广泛,如在崩塌灾害勘察中,危岩体的抗压强度参数测试数据多呈右偏态,通过对数转换后服从正态分布,利用对数正态分布模型

可准确拟合其分布规律；在渗透变形灾害勘察中，岩土体的渗透系数参数也多服从对数正态分布，通过该模型可精准计算不同渗透系数对应的概率，为防渗工程设计提供科学依据。

2. 模型参数估计与应用注意事项。对数正态分布模型的参数估计需通过对样本数据取对数后，按照正态分布的参数估计方法计算得到，即先计算对数数据的均值与标准差，再转换为对数正态分布的均值与标准差。应用过程中需注意，对数转换仅适用于取值为正的参数，对于可能出现零值或负值的参数则不适用。同时，需对转换后的对数数据进行正态性检验，确保其符合正态分布规律，若检验不通过，则需考虑其他分布模型。在地质灾害防治工程中，应用对数正态分布模型时，还需结合灾害体的地质特征，对拟合结果进行合理性分析，避免单纯依赖统计方法而忽略地质条件的影响。

三、岩土参数分布拟合流程与检验方法

本部分结合工程实践详细讲解岩土参数分布拟合的完整流程，从数据准备、模型选择、参数估计到拟合检验，逐步拆解各环节的核心任务与操作要点。重点介绍拟合检验的常用方法，结合地质灾害防治工程实例说明检验方法的应用场景与判断标准，引导读者掌握科学规范的分布拟合流程，确保拟合结果的可靠性与工程适用性。

（一）分布拟合的核心流程

岩土参数分布拟合的核心流程包括数据准备、模型初选、参数估计、拟合检验四个关键环节，各环节紧密衔接，缺一不可。流程的实施需严格遵循统计理论与相关规范要求，结合岩土工程尤其是地质灾害防治工程的特点，确保每一步骤的科学性与合理性，最终得到与实际数据匹配度高的分布模型。

1. 数据准备与模型初选。数据准备阶段需完成测试数据的收集、整理与标准化处理，剔除异常数据，确保数据的有效性与完整性，这一环节的质量直接影响拟合结果的可靠性。模型初选阶段需根据岩土参数的类型、数据分布特征及工程经验，初步选择合适的分布模型。例如，对于均匀土层的天然重度，可初步选择正态分布模型；对于岩土体的抗剪强度、渗透系数等参数，可初步选择对数正态分布模型。在地质灾害防治工程中，模型初选还需结合灾害体的地质背景，如对于破碎岩体的抗压强度参数，因数据离散程度大且多呈右偏态，可优先选择对数正态分布模型。

2. 参数估计与拟合检验。参数估计是根据样本数据计算所选分布模型的参数,如正态分布的均值与标准差、对数正态分布的对数均值与对数标准差等,常用的估计方法有矩估计法、极大似然估计法等,其中极大似然估计法精度更高,在岩土参数统计中应用更广泛。拟合检验是分布拟合的关键环节,通过统计方法检验样本数据与所选分布模型的匹配程度,若检验通过,则说明所选模型可准确描述岩土参数的分布规律;若检验不通过,则需重新选择分布模型或补充样本数据。拟合检验完成后,还需结合工程实践对拟合结果进行合理性分析,确保拟合结果符合岩土体的地质特征与工程实际情况。

(二) 常用拟合检验方法及应用

岩土参数分布拟合的常用检验方法包括卡方检验、K-S 检验(柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫检验)等,不同检验方法具有不同的适用条件与特点,需根据样本量、分布模型类型等因素选择合适的检验方法,确保检验结果的准确性与可靠性。

1. K-S 检验方法及应用。K-S 检验是一种非参数检验方法,适用于任意分布模型的拟合检验,无需知道总体分布的具体参数,通过比较样本累积分布函数与理论累积分布函数的最大差值,判断样本数据是否服从所选分布模型。该方法适用于大样本数据,且对数据分布的尾部特征敏感,在岩土参数分布拟合中应用广泛,尤其适用于正态分布、对数正态分布等模型的检验。在地质灾害防治工程中,如某滑坡治理工程的滑带土内摩擦角参数分布拟合中,采用 K-S 检验对对数正态分布模型进行检验,计算得到样本累积分布函数与理论累积分布函数的最大差值为 0.12,小于显著性水平 0.05 对应的临界值 0.20,说明该参数服从对数正态分布,拟合结果可靠。

2. 卡方检验方法及应用。卡方检验是一种基于频率分布的检验方法,通过比较样本实际频率与理论频率的差异,判断样本数据是否服从所选分布模型。该方法适用于样本量较大的情况,且要求理论频率不小于 5,否则需合并相邻区间。卡方检验的优点是直观易懂,计算过程相对简单,适用于多种分布模型的检验,但对数据区间的划分较为敏感,区间划分不合理会影响检验结果的准确性。在岩土工程中,卡方检验常用于岩土体颗粒级配、孔隙比等参数的分布拟合检验,在地质灾害防治工程中,可用于泥石流流固体物质颗粒级配参数的分布检验,为泥石流灾害强度评估提供统计依据。应用时需合理划分数据区间,确保理论频率满足要求,同时结合其他检验方法的结果,综合判断拟合效果。

第三节 参数标准值与设计值的确定

本节聚焦岩土参数标准值与设计值的核心确定流程，先阐述标准值作为设计取值基准的本质属性，明确其与岩土体变异性、工程可靠性的关联；再围绕标准值推导方法、设计值调整逻辑展开，结合地质灾害防治工程实践需求，说明取值保守性与经济性的平衡原则，引导读者掌握从数据统计结果到工程实用参数的转化路径。

一、岩土参数标准值的内涵与确定原则

本部分先界定参数标准值的学术定义与工程意义，明确其是基于统计数据确定的具有 95% 保证率的特征值，是连接原始勘察数据与工程设计的关键桥梁；再阐述确定过程中需遵循的可靠性、针对性、地域性原则，结合岩土工程及地质灾害防治实践，说明不同地质条件下原则的具体应用侧重，引导读者理解标准值确定的核心逻辑与实践要求。

（一）标准值的核心内涵与工程作用

岩土参数标准值是在正常勘察精度下，综合考虑岩土体天然变异性后，经统计分析得到的具有一定保证率的特征参数，其核心作用是为工程设计提供统一、可靠的取值基准，避免因参数取值偏差导致工程安全隐患或资源浪费。在岩土工程领域，尤其是地质灾害防治工程中，标准值的科学性直接影响边坡治理、地基处理、基坑支护等工程措施的有效性。例如，在滑坡治理工程中，滑带土的抗剪强度标准值直接决定抗滑桩、锚索等支护结构的设计参数，若取值偏低会造成工程过度设计，增加造价；取值偏高则可能导致支护结构失效，引发滑坡灾害。根据《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011 等最新权威规范要求，标准值的确定需以足够数量的勘察数据为基础，确保其能够反映岩土体的真实工程特性。

从工程可靠性角度看，标准值的保证率设定与工程安全等级密切相关。对于一级安全等级的地质灾害防治工程，如大型滑坡、崩塌治理等，标准值的保证率需严格控制在 95% 以上，以最大限度保障工程安全；对于二级、三级安全等级的工程，可在满足安全要求的前提下，适当平衡保证率与经济性。标准值并非固定不变的参数，其会随勘察精度的提升、数据量的增加而不断优化，体现了岩土工程设计“以勘察为基础”的核心原则。

（二）标准值确定的核心原则与实践要求

可靠性原则是标准值确定的首要原则，要求所确定的标准值能够真实反映岩土体的工程特性，且具有足够的统计显著性。实践中，需确保勘察数据的代表性和完整性，避免因采样位置不当、试验方法错误导致数据失真。例如，在采集软土试样时，需采用薄壁取土器，减少对试样的扰动，确保试验数据能够反映软土的天然抗剪强度特性。同时，数据量需满足规范要求，对于黏性土、粉土等均匀性较差的岩土体，试验组数不宜少于 6 组；对于砂土、碎石土等颗粒土，试验组数需根据颗粒级配均匀性适当增加。

针对性原则要求标准值的确定需结合具体工程类型和地质条件。不同工程对岩土参数的需求不同，地质灾害防治工程与普通建筑地基工程的参数取值重点存在差异。例如，在泥石流防治工程中，需重点关注岩土体的重度、含水量等参数的标准值，以确定泥石流的运动速度和冲击力；在地基处理工程中，则需重点关注地基土的承载力、压缩模量等参数的标准值。地域性原则则强调岩土参数具有明显的地域特征，不同地区的岩土体成因、结构不同，参数标准值也存在差异。例如，河南地区的黄土具有湿陷性，其湿陷系数标准值的确定需结合当地的黄土成因和分布特点，参考河南省相关岩土工程勘察规范和地方经验。

二、岩土参数标准值的主要确定方法

本部分介绍岩土参数标准值确定的两种核心方法——统计法和经验法，说明两种方法的适用场景、实施步骤及注意事项。统计法适用于勘察数据充足的情况，是标准值确定的主要方法；经验法适用于勘察数据不足或特殊岩土体的情况，需结合工程经验和地方规范。引导读者根据实际勘察条件选择合适的方法，确保标准值确定的科学性和合理性。

（一）统计法：基于数据的量化确定方法

统计法是通过大量勘察试验数据进行统计分析，计算出参数的统计特征值（如平均值、标准差、变异系数），再根据保证率要求确定标准值的方法，适用于勘察数据充足、岩土体均匀性较好的情况。其核心步骤包括数据筛选、统计特征值计算和标准值修正。数据筛选阶段需剔除异常数据，异常数据的判断可采用格拉布斯准则，即当数据与平均值的偏差超过一定范围时，判定为异常数据并剔除，确保统计数据的可靠性。例如，在对某滑坡滑带土的抗剪强度数据进行筛选

时，若某组数据明显偏离其他数据，经格拉布斯准则验证后，需剔除该组异常数据，避免其影响统计结果。

统计特征值计算完成后，根据岩土体的变异性和工程安全等级确定标准值。对于正态分布的岩土参数，标准值可通过平均值减去一定倍数的标准差得到，倍数的取值根据保证率要求确定，95% 保证率对应的倍数为 1.645。在地质灾害防治工程中，对于变异性较大的岩土参数，如风化岩层的抗压强度，需适当增大倍数，提高标准值的保证率。统计法的优势在于量化程度高、结果客观，能够充分利用勘察数据，反映岩土体的真实变异性；局限性在于对数据量要求较高，当数据量不足时，统计结果的可靠性会降低。在河南地区的岩土工程实践中，统计法广泛应用于黏性土、粉土等常见岩土体参数标准值的确定，如郑州、新乡等地的地基处理工程中，地基土承载力标准值的确定均以统计法为主要手段。

（二）经验法：基于经验的补充确定方法

经验法是在勘察数据不足、岩土体均匀性差或属于特殊岩土体的情况下，结合工程经验、地方规范和相似工程案例，确定参数标准值的方法。其核心是充分利用已有的工程实践经验，确保标准值能够满足工程安全要求。经验法的实施需遵循“参考规范、结合经验、类比相似工程”的原则，首先参考国家和地方相关规范中的经验值范围，再结合本地区的工程经验进行调整，最后类比相似地质条件下的已建工程，验证标准值的合理性。

在地质灾害防治工程中，经验法应用较为广泛。例如，在山区滑坡治理工程中，部分滑带土因埋藏较深、采样困难，无法获得充足的试验数据，此时可参考当地同类滑坡滑带土的抗剪强度标准值，结合本滑坡的具体地质条件，如滑带土的颗粒级配、含水量等，进行适当调整，确定本次工程的标准值。经验法的优势在于适用范围广，能够解决数据不足的问题；局限性在于主观性较强，依赖于工程师的经验水平。因此，采用经验法确定标准值时，需由具备丰富岩土工程和地质灾害防治经验的工程师完成，同时需详细记录确定依据，包括参考的规范、相似工程案例等，确保标准值的可追溯性。河南省地质局地质灾害防治中心在多年的实践中，积累了大量河南地区不同地质灾害类型的岩土参数经验值，为经验法的应用提供了坚实的基础。

三、岩土参数设计值的调整逻辑与确定流程

本部分阐述参数设计值与标准值的关系，说明设计值是在标准值基础上，结合工程安全等级、荷载条件、施工工艺等因素进行调整后的实用参数。重点介绍设计值调整的核心依据和具体流程，结合地质灾害防治工程实例，引导读者理解设计值确定的工程实用性原则。

（一）设计值调整的核心依据与原则

岩土参数设计值调整的核心依据是工程安全等级和荷载组合，同时需考虑施工工艺、使用环境等因素的影响。根据《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068-2018 的要求，工程安全等级分为一级、二级、三级，不同安全等级对应的可靠度指标不同，设计值的调整系数也不同。对于一级安全等级的地质灾害防治工程，如大型泥石流、崩塌治理工程，需采用较大的调整系数，确保工程具有足够的安全储备；对于二级、三级安全等级的工程，可在满足可靠度要求的前提下，采用较小的调整系数，平衡安全与经济。

设计值调整需遵循实用性和针对性原则。实用性原则要求设计值能够直接应用于工程设计，方便工程师进行结构计算和参数选取；针对性原则要求调整系数的选取需结合具体工程的荷载条件，如永久荷载、可变荷载的比例，以及施工工艺的影响，如基坑开挖过程中岩土体的扰动、支护结构的施工质量等。在地质灾害防治工程中，还需考虑灾害体的动态变化，如滑坡的蠕变特性、泥石流的周期性，对设计值进行动态调整，确保工程在使用年限内能够有效抵御地质灾害。

（二）设计值的具体确定流程与实践应用

岩土参数设计值的确定流程主要包括标准值确定、调整系数选取、设计值计算三个核心步骤。首先，通过统计法或经验法确定参数的标准值；其次，根据工程安全等级、荷载组合、岩土体变异性等因素，选取合适的调整系数，调整系数分为承载力调整系数、抗剪强度调整系数等，具体取值可参考《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011 等权威规范；最后，通过标准值与调整系数的乘积计算得到设计值。例如，在某二级安全等级的地基处理工程中，地基土承载力标准值为 180kPa，根据规范选取承载力调整系数为 0.9，则地基土承载力设计值为 $180 \times 0.9 = 162\text{kPa}$ 。

在地质灾害防治工程的实践应用中，设计值的确定需结合具体工程类型进行

针对性调整。以河南新乡某滑坡治理工程为例，该工程为二级安全等级，滑带土的抗剪强度标准值通过统计法确定为 $c=18\text{kPa}$ ， $\phi=15^\circ$ 。考虑到滑坡的蠕变特性和施工过程中对滑带土的扰动，选取抗剪强度调整系数为 0.85，则滑带土抗剪强度设计值为 $c=18 \times 0.85=15.3\text{kPa}$ ， $\phi=15^\circ \times 0.85=12.75^\circ$ 。该设计值经结构计算验证，能够满足抗滑桩支护结构的安全要求，同时兼顾了工程经济性。此外，设计值的确定还需考虑使用过程中的环境变化，如地下水水位升降、温度变化等对岩土参数的影响，必要时需进行动态监测和设计值修正，确保工程长期安全稳定。

第四节 空间变异性分析与参数场构建

本节聚焦岩土参数空间变异性的核心特征与分析方法，结合地质灾害防治工程实践需求，阐述空间变异性的影响因素与表征指标，系统介绍数据插值、随机模拟等参数场构建技术，明确不同技术的适用场景与应用要点。通过衔接理论分析与工程实践，为精准把握岩土参数空间分布规律、提升地质灾害防治工程设计与施工的科学性提供技术支撑，引导读者理解空间变异性分析对岩土工程安全性与经济性的关键作用。

一、岩土参数空间变异性核心表征

本部分围绕岩土参数空间变异性的本质属性，明确表征空间变异性的核心指标与量化方法，结合地质灾害发育区的岩土体特征，分析不同地质条件下空间变异性的表现规律，为后续参数场构建奠定基础。引导读者掌握从定性描述到定量表征的完整思路，理解空间变异性指标在工程实践中的应用价值。

（一）空间变异性影响因素解析

岩土参数空间变异性的产生源于地质形成过程与后期环境作用的综合影响，不同因素对变异性的贡献度存在显著差异。地质形成过程是根本因素，沉积岩的层理构造、岩浆岩的侵入形态、变质岩的片理发育等，直接决定了岩土体的物质组成与结构分布的不均匀性，如河流相冲积层中砂卵砾石层与粉质黏土层的交替分布，会导致孔隙比、承载力等参数呈现显著的空间差异。

后期环境作用是重要诱因，包括风化作用、地下水活动、地震作用及人类工程活动等。在地质灾害防治场景中，风化层厚度的空间变化会使岩土体抗剪强度

参数产生梯度差异,地下水的动态变化则会改变岩土体的含水量与孔隙水压力,进一步加剧参数变异性。人类工程活动如基坑开挖、边坡支护等,会扰动周边岩土体结构,导致局部区域参数发生突变。此外,取样与测试过程中的误差也会对参数数据的离散性产生一定影响,需在数据处理阶段予以甄别。

(二) 空间变异性量化指标体系

为精准表征岩土参数的空间变异性,需建立科学的量化指标体系,核心指标包括空间自相关距离、变异系数、方差函数等。空间自相关距离是反映参数空间相关性的关键指标,指参数值具有显著相关性的最大空间距离,超过该距离后参数相关性可忽略,其取值直接影响参数场构建的精度,在滑坡、崩塌等地质灾害体勘察中,准确获取自相关距离可为灾害范围界定提供依据。

变异系数通过标准差与均值的比值量化参数的相对离散程度,根据《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011 相关规定,结合地质灾害防治工程经验,可将变异系数划分为低、中、高三个等级,不同等级对应不同的参数处理策略。方差函数(半方差函数)则通过描述不同空间距离下参数方差的变化规律,直观反映参数的空间变异性特征,其曲线形态包括球状、指数状、高斯状等,分别对应不同的地质体分布模式,是后续随机模拟的重要基础。

二、参数场构建核心技术与应用

本部分系统介绍参数场构建的两类核心技术——确定性插值与随机模拟,分析各类技术的原理、适用条件及优缺点,结合地质灾害防治工程实例,说明技术选择的基本原则与应用注意事项,引导读者掌握参数场构建的实操思路。

(一) 确定性插值技术及应用

确定性插值技术基于“参数空间分布具有连续性”的假设,通过已知取样点数据推算未知区域的参数值,输出唯一确定的参数场,适用于参数空间相关性较强、地质条件相对简单的区域。常用技术包括克里金插值、反距离加权插值、线性插值等,其中克里金插值因考虑了参数的空间自相关性,在岩土工程中应用最为广泛。

克里金插值通过构建半方差函数模型,对已知数据进行最优线性无偏估计,可根据地质条件选择普通克里金、泛克里金等不同类型,如在地形起伏较大的滑坡区域,可采用泛克里金插值消除趋势性影响。反距离加权插值则基于“距离越

近的点影响越大”的原理，通过距离权重系数计算未知点参数值，具有原理简单、计算高效的优点，但对权重系数的选择较为敏感。在地质灾害隐患点排查中，确定性插值技术可快速构建岩土体强度、含水量等关键参数场，为灾害风险评估提供基础数据。

（二）随机模拟技术及应用

随机模拟技术基于“参数空间分布具有随机性”的假设，通过多次模拟生成多个等概率的参数场，能够量化参数的不确定性，适用于参数空间变异性强、地质条件复杂的地质灾害发育区。常用技术包括序贯高斯模拟、指示模拟等，其核心优势在于不仅能反映参数的空间分布特征，还能提供参数不确定性的概率分布信息。

序贯高斯模拟通过将参数数据转换为正态分布，按照预设的路径依次对未知区域进行随机采样，生成符合半方差函数特征的参数场，多次模拟结果的统计特征可反映参数的不确定性范围。指示模拟则通过将参数值转换为指示变量，适用于处理含异常值或不连续分布的参数数据，如断层破碎带中岩土体参数的模拟。在地质灾害防治工程设计中，随机模拟技术可用于分析参数不确定性对工程稳定性的影响，如通过多个参数场模拟结果评估滑坡体的稳定性概率，为工程方案的优化提供科学依据。

三、地质灾害防治中的参数场应用要点

本部分结合作者长期从事地质灾害防治工作的实践经验，聚焦参数场在滑坡、崩塌、泥石流等典型地质灾害防治中的应用，明确参数场构建的针对性要求、结果验证方法及工程应用边界，引导读者将参数场构建技术与地质灾害防治实践深度结合，提升技术应用的精准性与有效性。

（一）不同灾害类型的参数场要求

不同地质灾害类型的形成机制与影响因素存在差异，对参数场构建的侧重点与要求也有所不同。滑坡灾害防治中，参数场构建需重点关注滑带土的抗剪强度参数（黏聚力、内摩擦角）、含水量等参数的空间分布，准确刻画滑带的空间形态与参数渐变特征，为滑坡稳定性计算与支护方案设计提供精准参数；崩塌灾害防治则需聚焦危岩体的完整性系数、抗压强度等参数，参数场构建应注重反映危岩体与母体的接触界面参数差异，明确崩塌范围的参数边界。

泥石流灾害防治中,参数场构建需围绕松散堆积体的颗粒级配、重度、渗透性等参数,重点刻画堆积体的空间分布厚度与参数均匀性,为泥石流流量计算与拦挡工程设计提供依据。此外,在地质灾害动态监测与预警中,参数场还需结合时序数据进行动态更新,实时反映参数随时间的变化规律,提升预警的时效性与准确性。

(二) 参数场结果验证与优化

参数场构建结果的可靠性直接影响工程设计的安全性,需通过科学的验证方法对结果进行评估与优化。常用的验证方法包括交叉验证与工程实例验证,交叉验证通过选取部分已知取样点作为验证点,将插值或模拟结果与实测值进行对比,计算误差指标(如平均绝对误差、均方根误差)评估技术的适用性,若误差过大需重新选择插值或模拟模型。

工程实例验证则结合已完成的地质灾害防治工程,将参数场构建结果与工程实际监测数据、治理效果进行对比,验证参数场的合理性。同时,参数场构建过程中需注重数据质量控制,对异常数据进行剔除或修正,根据地质勘察精度合理确定取样点密度,当取样点不足时,可结合地质遥感、物探等数据补充完善,提升参数场的构建精度。在实际工程应用中,还需根据工程规模、地质复杂程度等因素,合理选择参数场构建技术,实现精度与效率的平衡。

第八章 数值模拟在岩土分析中的前沿应用

第一节 常用岩土本构模型原理与选用

本节将系统梳理岩土工程数值模拟中常用本构模型的核心原理，涵盖弹性、弹塑性等典型类型，明确各模型的关键特征与适用边界。同时结合地质灾害防治等工程实践需求，阐述模型选用的核心原则与实操要点，为后续数值分析的精准应用奠定基础。

一、弹性本构模型原理及特性

本引聚焦弹性本构模型这一基础类型，先阐明其核心理论依据与建模逻辑，再细分线弹性与非线性弹性两类模型展开解析。重点说明各模型的力学响应特征、参数构成及适用场景，结合岩土工程实践中的简化应用需求，为理解模型适用性提供清晰指引。

（一）线弹性本构模型基础

线弹性本构模型基于经典弹性理论构建，核心假设岩土体在受力作用下应力与应变成正比，且卸载后变形可完全恢复，其力学关系通过广义胡克定律描述。该模型通过弹性模量和泊松比两个关键参数表征材料特性，其中弹性模量反映岩土体抵抗变形的能力，泊松比描述横向变形与纵向变形的比值关系。

1. 模型核心特征。线弹性模型将岩土体视为均质连续各向同性体，弹性模量矩阵为常量，应力与应变呈现一一对应的线性关系，数学表达简洁直观，是岩土本构模型中最基础的类型。该模型忽略了岩土体实际存在的非线性、塑性及粘性等复杂特性，仅能在极小应变范围内近似反映其力学响应，这一局限性决定了其应用场景的特殊性。

2. 工程适用范围。由于线弹性模型的简化假设与岩土体真实力学性状存在差异，其适用范围相对狭窄，主要用于初步工程估算、简单结构与岩土体相互作用的定性分析，或作为复杂本构模型构建的基础框架。在地质灾害防治工程中，可

用于小型边坡、浅基础等简单工况的快速初步评估，为后续精细化分析提供参考基准，但不适用于大变形、强扰动等复杂地质灾害场景的精准模拟。

（二）非线性弹性本构模型解析

非线性弹性本构模型是对线弹性模型的拓展与优化，核心特征是承认岩土体应力 - 应变关系的非线性，通过变弹性常数或曲线拟合等方式，更贴合实际地描述岩土体在排水重复荷载作用下的弹性响应。该类模型保留了弹性模型卸载变形可恢复的核心假设，同时通过引入非线性参数，提升了对岩土体变形特性的描述精度。

1. 模型构建思路。非线性弹性模型的构建主要通过两种途径实现：一是基于连续介质力学理论，在广义胡克定律基础上引入非线性变量，推导应力 - 应变的非线性关系；二是通过室内试验获取岩土体的应力 - 应变曲线，采用折线、双曲线、对数曲线等形式进行拟合，建立经验或半经验的非线性弹性本构关系。两种思路各有侧重，前者理论性更强，后者更贴近工程实际。

2. 典型模型及应用。邓肯 - 张（Duncan-Zhang）模型是最具代表性的非线性弹性模型，该模型采用双曲线拟合土体三轴排水试验的应力 - 应变曲线，通过调整弹性参数近似考虑土体的塑性变形影响。其核心优势在于参数获取简便、计算效率高，适用于围压变化不大、轴压逐渐增大的工程场景，如土石坝填筑、路堤修建等填方工程的变形分析。在地质灾害防治领域，可用于填方边坡的变形预测，但由于未考虑应力路径、剪胀性等关键因素，不适用于基坑开挖、滑坡等复杂应力路径的灾害模拟。

二、弹塑性本构模型原理及应用

本引聚焦弹塑性本构模型这一工程常用核心类型，基于弹塑性理论基础，解析其屈服面、流动法则等核心构成要素。重点阐述摩尔 - 库仑、修正剑桥等典型模型的原理特征，结合地质灾害防治中的稳定性分析需求，说明各模型的适用场景与应用局限性，为工程实践中的模型选择提供理论支撑。

（一）摩尔 - 库仑弹塑性模型

摩尔 - 库仑模型是岩土工程中应用最广泛的弹塑性本构模型之一，核心是结合胡克定律与库仑破坏准则，通过弹性阶段与塑性阶段的分段描述，实现对岩土体破坏行为的有效模拟。该模型参数物理意义明确，计算过程简便，在边坡稳定、

地基承载力等地质灾害防治核心问题分析中占据重要地位。

1. 模型核心原理。摩尔-库仑模型将岩土体受力过程分为弹性阶段与塑性阶段：弹性阶段应力-应变关系遵循胡克定律，变形可恢复；当应力达到库仑破坏准则定义的阈值时，进入塑性阶段，产生不可恢复的塑性变形。模型通过弹性模量、泊松比两个弹性参数，以及有效黏聚力、有效内摩擦角、剪胀角三个塑性参数，完整表征岩土体的力学特性，其屈服面为六棱锥形，与土体真三轴试验的应力组合特征吻合度较高。

2. 工程应用场景。该模型适用于低坝、边坡稳定性分析、浅基础承载力计算等多种地质灾害防治相关工程场景，尤其在分析岩土体剪切破坏问题时具有显著优势。在河南省本地地质灾害防治实践中，常用于黄土边坡滑坡、粉质黏土基坑边坡失稳等常见灾害类型的数值模拟。但该模型无法考虑应力历史影响，不能有效区分加荷与卸荷过程，对土体破坏前的非线性变形描述精度有限，不适用于大变形、复杂应力路径的精细化分析。

（二）修正剑桥弹塑性模型

修正剑桥模型基于临界状态土力学理论构建，是针对黏性土力学特性设计的专用弹塑性本构模型。该模型通过椭圆形屈服面，实现了对土体体积变形与剪切变形的统一描述，在正常固结黏土、软土等黏性土为主的地质灾害场景分析中具有独特优势。

1. 模型核心原理。修正剑桥模型将屈服面定义为 p' - q 平面上通过原点的椭圆形曲线，引入临界状态线、正常固结线等关键概念，明确了土体在不同应力状态下的变形规律。模型通过压缩指数、回弹指数、破坏应力比等参数，精准刻画黏性土的硬化、软化及剪胀特性，能够反映应力路径对变形的影响，克服了摩尔-库仑模型在黏性土变形描述上的局限性。

2. 工程应用场景。该模型主要适用于正常固结或轻度超固结黏性土的工程分析，如沿海软土地区地基沉降、湖泊相沉积软土边坡变形等场景。在地质灾害防治领域，可用于软土路基失稳、软土基坑开挖变形预测等精细化分析。但由于模型参数获取难度较大，需要通过精密的室内试验确定，且对砂土、碎石土等粗粒土的适应性较差，限制了其在复杂岩土体工程中的广泛应用。

三、本构模型选用原则及工程实践

本节围绕工程实践中本构模型的科学选用展开，明确模型选择需遵循的核心原则，包括与岩土体特性匹配、贴合工程问题类型、兼顾计算效率与精度等。结合地质灾害防治工程实例，解析模型选用的实操流程与注意事项，实现理论与实践的有效衔接，提升数值模拟结果的可靠性。

（一）模型选用核心原则

本构模型的选用直接决定数值模拟结果的可靠性，需综合考虑岩土体特性、工程问题类型、计算精度要求等多方面因素，遵循科学合理的选用原则，确保模型与工程实际需求相匹配。

1. 匹配岩土体物理力学特性。这是模型选用的首要原则，需根据岩土体类型（黏性土、砂土、岩体等）、应力历史（正常固结、超固结）、含水状态（饱和、非饱和）等特性选择适配模型。例如，砂土等粗粒土优先选用摩尔-库仑模型或专用砂土本构模型；正常固结黏性土优先选用修正剑桥模型；非饱和土需选用考虑基质吸力影响的专用本构模型。

2. 契合工程问题核心需求。不同工程问题的分析重点不同，需针对性选择模型。地质灾害防治工程中，稳定性分析（如边坡滑坡、地基失稳）优先选用能够准确描述岩土体强度特性的摩尔-库仑模型；沉降变形分析（如地基沉降、路基工后沉降）优先选用能够精准刻画变形规律的非线性弹性或弹塑性模型；动态荷载作用下的灾害分析（如地震引发的砂土液化）需选用能够描述循环荷载响应的先进本构模型。

3. 平衡计算精度与效率。模型选用需在计算精度与计算效率之间寻求平衡，避免盲目追求复杂模型。对于初步工程估算、方案筛选等定性分析，可选用计算简便的线弹性或摩尔-库仑模型；对于关键工程部位的精细化分析、灾害风险精准评估，可选用修正剑桥模型等复杂模型。同时，需考虑计算资源条件，确保模型能够在合理时间内完成计算。

（二）地质灾害防治中的模型选用实践

结合河南省地质灾害防治工程实践，针对本地常见的黄土滑坡、粉质黏土基坑失稳、砂土边坡液化等灾害类型，总结本构模型选用的实操经验，为同类工程提供参考。

1. 黄土地区灾害防治模型选用。河南省西部、北部黄土分布广泛，黄土具有孔隙比大、垂直节理发育、遇水湿陷等特性，易引发滑坡、崩塌等地质灾害。在这类灾害的数值模拟中，若进行初步稳定性评估，可选用摩尔 - 库仑模型，通过室内试验确定黏聚力、内摩擦角等参数；若需考虑湿陷性引发的大变形，可选用能够描述湿陷特性的非线性弹性模型，或引入湿陷系数修正的摩尔 - 库仑模型，提升模拟精度。

2. 软土地区灾害防治模型选用。河南省东部部分地区存在湖泊相、河流相沉积软土，软土具有强度低、压缩性高、变形大等特性，易引发地基沉降、基坑开挖变形等灾害。对于软土地区地基沉降预测，优先选用修正剑桥模型，精准刻画软土的压缩变形规律；对于软土基坑边坡稳定性分析，可选用摩尔 - 库仑模型进行初步评估，结合修正剑桥模型进行精细化变形分析，确保支护结构设计的合理性。

3. 动态荷载下灾害防治模型选用。在地震高发区或存在强扰动荷载的工程区域，需考虑动态荷载引发的地质灾害（如砂土液化、边坡地震响应）。此时应选用能够描述岩土体循环荷载响应的先进本构模型，如 P2PSand 模型等，这类模型基于临界状态理论，能够有效刻画砂土的液化特性、循环累积变形等规律。若缺乏先进模型应用条件，可采用摩尔 - 库仑模型结合滞后阻尼修正的方法，近似模拟动态荷载下的岩土体响应。

（三）模型选用注意事项

1. 参数确定的可靠性保障。模型参数的准确性直接影响模拟结果，需通过规范的室内试验或现场试验获取，必要时结合工程监测数据进行反演修正。例如，摩尔 - 库仑模型的黏聚力、内摩擦角参数，优先通过三轴压缩试验确定，避免采用直剪试验结果，确保参数与实际应力路径相匹配。

2. 模型局限性的充分认知。任何本构模型都是对岩土体真实力学行为的近似描述，存在一定局限性，选用时需充分认知并规避。例如，摩尔 - 库仑模型无法描述岩土体的非线性变形，需明确其适用的应变范围；修正剑桥模型对超固结土的适应性有限，需结合工程实际进行合理调整。

3. 多模型对比验证。对于关键工程或复杂地质条件下的数值模拟，建议采用多种本构模型进行对比分析，通过不同模型模拟结果的差异分析，评估模型选用的合理性，提升数值模拟结果的可靠性。例如，在重大边坡滑坡灾害预测中，可

同时采用摩尔 - 库仑模型与修正剑桥模型进行计算，结合现场监测数据验证，确定最优模型。

第二节 地基沉降与稳定性数值分析

本节聚焦地基沉降与稳定性两大核心岩土工程问题，系统阐述数值分析技术在其中的应用逻辑、关键步骤及实践要点。先明晰地基沉降与稳定性的工程意义及传统分析局限，再引入主流数值方法的适配性分析，重点讲解建模关键参数确定、边界条件设定等核心环节，结合地质灾害防治相关工程案例，说明数值模拟在风险预判中的应用，为工程勘察中地基工程设计与灾害防控提供技术支撑。引导读者从理论适配性、建模实操性、结果应用性三个维度理解数值分析的核心价值。

一、地基沉降数值分析核心技术与应用

本部分围绕地基沉降数值分析的技术体系展开，先明确沉降分析的工程目标与核心影响因素，再依次讲解主流数值方法的原理适配性、建模关键点及结果验证方式。重点结合软土、膨胀土等复杂岩土体工程场景，突出数值方法在沉降全过程预测中的优势，为工程中沉降变形控制及灾害预防提供技术路径。引导读者掌握从地质条件梳理到数值模型构建、结果解读的完整分析流程。

（一）地基沉降的工程影响与分析目标

地基沉降是岩土工程建设中最常见的变形问题之一，其变形量级与发展速率直接关系到上部结构的安全稳定性。据《地质灾害防治条例》配套技术规范统计，我国每年因地基不均匀沉降导致的建筑损毁、道路开裂等工程灾害占地质灾害相关工程事故的 35% 以上，在软土分布区、采空区周边等区域这一比例更高。尤其是在市政工程建设中，桥梁基础、地下管廊等构筑物对沉降变形极为敏感，微小的不均匀沉降可能引发结构开裂、功能失效，甚至诱发次生地质灾害。

地基沉降数值分析的核心目标在于精准预测地基在附加应力作用下的沉降量、沉降速率及沉降历时曲线，明确沉降变形的空间分布特征，识别不均匀沉降风险区域。通过数值模拟可提前预判工程建设中可能出现的沉降超标问题，为地基处理方案优化、基础形式选型及施工时序控制提供科学依据，同时为工程建成

后的长期变形监测与灾害预警提供理论支撑，保障工程结构安全与周边地质环境稳定。

（二）主流数值方法的适配性与选择

当前用于地基沉降数值分析的主流方法包括有限差分法、有限元法及离散元法，不同方法基于不同的力学假设，适用于不同的地质条件与工程场景，需结合具体勘察情况合理选择。有限差分法通过将连续介质离散为差分网格，基于差分方程求解位移场与应力场，具有计算效率高、边界条件处理简便的优势，适用于大面积地基均匀沉降的快速预测，在市政道路、工业园区等大规模工程场地的沉降初步分析中应用广泛。

有限元法具有网格划分灵活、可处理复杂几何形状与非均质介质的特点，能够精准模拟地基与上部结构的共同作用，适用于复杂地质条件下的不均匀沉降分析，如含软弱夹层、断层破碎带的地基场地，在桥梁基础、高层建筑地基等精细沉降分析中表现突出。离散元法则适用于颗粒状岩土体如砂土、碎石土的沉降模拟，通过模拟颗粒间的接触、滑动与咬合作用，揭示沉降变形的微观机制，多用于特殊土质地基的沉降机理研究。

工程实践中，需根据勘察获取的岩土体物理力学参数、场地地质复杂程度及工程精度要求选择适配的数值方法。对于常规市政工程地基沉降分析，优先采用有限差分法进行快速评估；对于地质条件复杂、对沉降精度要求高的重点工程，需采用有限元法进行精细化模拟；对于颗粒状岩土体地基的沉降机理研究，可选用离散元法开展深入分析。

（三）沉降数值建模的关键要点

1. 地质模型构建。地质模型是沉降数值分析的基础，需基于详细的工程地质勘察资料，准确反映场地的岩土体分层、厚度及分布特征。建模过程中应重点关注软弱夹层、透镜体等不良地质体的识别与刻画，此类地质体往往是导致不均匀沉降的核心诱因。对于地质灾害易发区，还需纳入潜在滑动面、地下水赋存层位等关键地质要素，确保模型能够真实反映场地的地质环境条件。模型的空间范围应根据工程规模合理确定，一般需覆盖地基影响范围的 3-5 倍，避免边界条件对计算结果产生干扰。

2. 参数选取与校准。岩土体物理力学参数的准确性直接决定沉降模拟结果的可靠性，需优先采用勘察现场试验数据如静载荷试验、固结试验结果，结合室内

试验数据进行综合确定。对于软土、膨胀土等特殊岩土体,应考虑其应力历史、蠕变特性等时间效应参数,确保模型能够反映沉降的时效性特征。参数校准是提升模型精度的关键环节,可通过现场沉降观测数据与数值模拟结果的对比,调整岩土体弹性模量、压缩模量等关键参数,直至模拟结果与观测数据的误差控制在10%以内,保障模型的预测精度。

3. 边界条件与荷载施加。边界条件的设定需结合场地实际地质环境,水平方向一般采用位移约束,垂直方向采用自由边界;对于存在地下水的场地,需合理设定渗流边界,明确地下水水位变化对沉降的影响。荷载施加应遵循“分步加载、分级计算”的原则,模拟工程施工的实际时序如基坑开挖、上部结构逐层施工,准确反映附加应力的逐步施加过程。对于市政工程中的动荷载如车辆荷载、地震荷载,需考虑荷载的瞬时性与周期性特征,采用动态荷载施加方式,分析动荷载作用下的沉降响应。

二、地基稳定性数值分析关键环节与实践

本部分聚焦地基稳定性数值分析,从稳定性评价指标、数值分析方法应用、复杂工况下稳定性分析三个维度展开。重点阐述边坡、基坑等典型地基工程的稳定性数值模拟要点,结合地质灾害防治实践,说明数值分析在滑坡、基坑坍塌等灾害风险预判中的应用,强调建模过程中地质条件精细化刻画与工况模拟的重要性。引导读者掌握不同工程场景下地基稳定性数值分析的核心思路与实操方法。

(一) 稳定性评价核心指标与判据

地基稳定性数值分析的核心是通过计算地基岩土体的应力状态与位移特征,判断其是否处于稳定平衡状态,常用的评价指标包括安全系数、位移突变点、塑性区分布范围等。安全系数是最直观的稳定性评价指标,指地基岩土体抗滑力与滑动力的比值,根据《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011 要求,一般工程地基稳定性安全系数不应小于1.2,对于地质灾害易发区的重要工程,安全系数需提高至1.3-1.5。

位移突变点是判断地基失稳的重要特征,通过数值模拟获取的位移-荷载曲线或位移-时间曲线中,若出现位移突然增大的拐点,表明地基岩土体已进入失稳临界状态。塑性区分布范围则反映地基岩土体的破坏程度,若塑性区贯通形成滑动面,则表明地基已发生失稳破坏。工程实践中,需结合安全系数、位移特征

及塑性区分布综合判断地基稳定性，避免单一指标评价的局限性。

不同类型地基工程的稳定性判据存在差异，边坡地基的稳定性判据重点关注滑动面的形成与安全系数达标情况；基坑地基则需同时考虑坑壁稳定性、坑底隆起及周边地层位移控制要求；采空区上方地基需重点分析残余变形与地表塌陷风险。数值分析过程中，应根据具体工程类型的特点，针对性设定稳定性评价指标与判据，确保评价结果的科学性与适用性。

（二）典型地基工程稳定性数值分析

1. 边坡地基稳定性分析。边坡地基是地质灾害易发区域，其稳定性直接关系到周边工程设施与居民安全。数值模拟过程中，需重点刻画边坡的地形地貌、岩土体分层及潜在滑动面特征，采用有限元法或有限差分法分析边坡在自重、降雨、地震等荷载作用下的应力与位移分布。降雨是诱发边坡失稳的主要因素之一，模拟时需考虑雨水入渗导致岩土体饱和度增加、抗剪强度降低的影响，通过渗流-应力耦合分析，预测边坡在不同降雨工况下的稳定性变化。

以河南省某山区公路边坡为例，该边坡为粉质黏土与碎石土互层，存在潜在滑动面。采用有限差分法建立数值模型，选取摩尔-库仑本构模型，模拟不同降雨强度下的边坡稳定性。结果表明，当降雨强度超过 50mm/d 时，边坡安全系数降至 1.2 以下，塑性区沿潜在滑动面贯通，存在滑坡风险。基于模拟结果，提出坡体注浆加固、设置排水沟等防治措施，经后续工程实践验证，加固后边坡位移量控制在 5mm 以内，稳定性显著提升。

2. 基坑地基稳定性分析。基坑地基稳定性分析主要包括坑壁稳定性、坑底隆起稳定性及基坑周边地层位移分析。数值建模时，需准确反映基坑开挖深度、支护结构形式、岩土体物理力学参数及地下水分布特征。采用有限元法模拟基坑开挖的分步施工过程，分析开挖过程中支护结构的受力状态、坑壁水平位移及坑底隆起量，判断基坑稳定性是否满足设计要求。

在市政地下管廊基坑工程中，由于周边建筑物密集、地下管线复杂，对基坑周边地层位移控制要求严格。数值模拟过程中，需重点分析基坑开挖对周边建筑物基础、地下管线的影响，通过优化支护结构参数如支护桩间距、锚杆长度，控制周边地层最大沉降量不超过 30mm。结合河南省某市政管廊基坑工程案例，采用有限元法进行数值模拟，优化后的支护方案使周边地层最大沉降量控制在 25mm，保障了周边工程设施的安全。

（三）复杂工况下地基稳定性数值模拟

复杂工况如地震作用、地下水动态变化、相邻工程施工扰动等，会显著增加地基稳定性分析的难度。地震作用下，需考虑岩土体的动力特性，采用动态数值分析方法，模拟地震波传播过程中地基岩土体的动力响应，分析地震荷载对地基稳定性的影响。根据《建筑抗震设计规范》GB 50011-2010 要求，对于抗震设防烈度 6 度及以上地区的地基工程，需进行抗震稳定性验算。

地下水动态变化会导致岩土体物理力学性质改变，进而影响地基稳定性。数值模拟时，需结合地下水长期监测数据，模拟地下水水位升降、地下水流动变化对地基应力状态与稳定性的影响。对于地下水位较高的软土地区，需重点分析地下水渗流导致的管涌、流砂等不良地质现象，提出针对性的防参与排水措施。

相邻工程施工如基坑开挖、桩基施工会产生扰动荷载，导致周边地基应力重分布，可能引发地基失稳。数值模拟时，需将相邻工程施工过程纳入分析体系，模拟扰动荷载的传播路径与影响范围，判断其对既有地基工程稳定性的影响。通过数值模拟可优化施工时序与施工参数，避免相邻工程施工相互干扰，保障地基工程整体稳定。

三、数值模拟结果的工程验证与应用实践

本部分强调数值模拟结果需结合工程实践进行验证，从现场监测数据对比、工程案例验证两个方面展开，说明结果验证的核心方法与流程。重点结合作者长期从事的地质灾害防治工作，通过实际工程案例，阐述数值模拟结果在地基工程设计优化、灾害风险评估与防控中的应用价值，体现理论与实践的结合。引导读者重视数值模拟结果的验证环节，提升结果的可靠性与工程适用性。

（一）基于现场监测数据的结果验证

现场监测是验证数值模拟结果可靠性的核心手段，通过在地基工程区域布设沉降观测点、位移监测点、应力监测点等，获取实际工程中的变形与应力数据，与数值模拟结果进行对比分析。验证过程中，需重点关注监测数据与模拟结果的变化趋势一致性、数值偏差范围，若两者变化趋势一致且数值偏差控制在 15% 以内，则表明数值模型合理、模拟结果可靠。

以河南省某软土地区住宅小区地基工程为例，通过布设 12 个沉降观测点，连续监测 6 个月获取实际沉降数据。将监测数据与有限元法模拟的沉降结果对比，

发现两者沉降变化趋势均呈初期快速增长、后期趋于稳定的特征，最终沉降量模拟值与监测值偏差最大为 12%，满足工程精度要求。基于验证后的数值模型，进一步预测了地基后期沉降量，为上部结构施工时序调整提供了科学依据。

监测数据与模拟结果存在偏差时，需分析偏差产生的原因，常见原因包括岩土体参数选取不准确、边界条件设定与实际情况不符、施工过程模拟简化等。针对偏差原因，对数值模型进行修正优化，重新进行模拟计算，直至模拟结果与监测数据达到合理吻合，确保数值模型能够准确反映实际工程情况。

（二）工程案例中的应用实践与验证

数值模拟结果在地基工程设计优化、灾害风险评估与防控中具有重要的应用价值。在地质灾害防治工程中，通过数值模拟可精准识别地基失稳风险区域，预测灾害发生的可能性与影响范围，为灾害防治方案制定提供技术支撑。以下结合作者参与的河南省某滑坡灾害防治工程案例，说明数值模拟结果的应用实践与验证过程。

该滑坡灾害区域位于河南省新乡市某山区，滑坡体为粉质黏土与风化岩互层，受降雨影响多次出现小规模滑动，威胁周边 30 余户居民安全。采用有限元法建立滑坡体数值模型，模拟不同降雨工况下的滑坡稳定性，预测滑坡体可能的滑动范围与滑动速度。模拟结果表明，在百年一遇降雨工况下，滑坡体安全系数降至 1.15，将发生大规模滑动，滑动范围将覆盖周边居民居住区。

基于数值模拟结果，制定了“坡体注浆加固+抗滑桩支护+排水系统”的综合防治方案。为验证方案有效性，对防治方案实施后的滑坡体稳定性进行数值模拟，结果表明加固后滑坡体安全系数提升至 1.45，满足稳定性要求。工程实施完成后，通过连续 1 年的现场监测，发现滑坡体最大位移量仅为 3mm，未出现新的滑动迹象，验证了数值模拟结果的可靠性与防治方案的有效性。

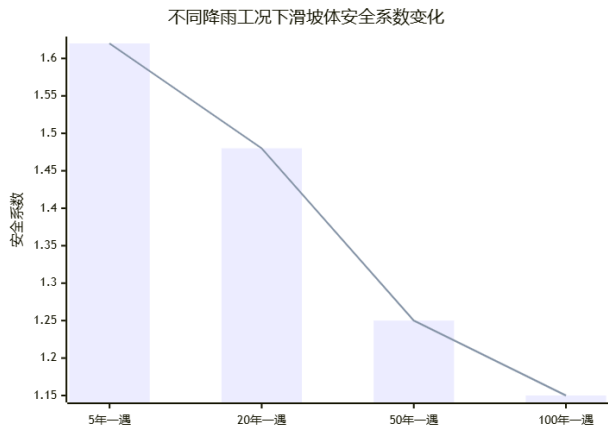


图 1：不同降雨工况下滑坡体安全系数变化

上述案例充分体现了数值模拟在地基稳定性分析与地质灾害防治中的核心作用，通过数值模拟可提前预判灾害风险，优化防治方案，降低工程成本与灾害损失。同时，工程实践也验证了数值模拟方法的科学性与可靠性，为后续类似工程提供了可借鉴的技术经验。

第三节 渗流 – 应力耦合分析应用

渗流 - 应力耦合是岩土工程中普遍存在的复杂力学现象，地下水渗流与岩土体应力相互作用往往是诱发地质灾害和工程事故的关键诱因。本节先阐述耦合作用核心原理与理论基础，再聚焦基坑工程、库岸滑坡等典型应用场景，结合工程实践案例说明分析流程与技术要点，最后探讨模型参数选取与结果优化方法，为工程地质勘察中耦合问题分析提供实操性指导。

一、渗流 – 应力耦合作用核心原理

本节从耦合作用的本质出发，阐述渗流场与应力场的相互作用机制，明确有效应力原理作为耦合分析的理论核心，介绍单向耦合与双向耦合两种基本类型的差异，帮助读者建立对耦合现象的基础认知，为后续应用分析奠定理论基础。

（一）耦合作用的内在机制

渗流 - 应力耦合作用体现为渗流场与应力场的双向动态影响。一方面，岩土

体应力状态的改变会引发孔隙结构变化,进而改变渗透性能,导致渗流路径和渗流速度发生调整,例如基坑开挖产生的应力释放会使周边土体孔隙扩大,渗透性增强;另一方面,地下水渗流产生的孔隙水压力变化会直接改变岩土体的有效应力状态,影响其力学性质,当孔隙水压力升高时,岩土体抗剪强度往往会显著降低,增加失稳风险。这种相互作用在地质灾害演化过程中表现尤为突出,如库岸滑坡中,库水渗流引发的孔隙水压力变化与坡体应力重分布相互促进,加速滑坡失稳。

(二) 核心理论与耦合类型划分

渗流-应力耦合分析的核心理论基础是有效应力原理,其表达式为 $\sigma' = \sigma - \alpha p$, 其中 σ' 为有效应力, σ 为总应力, α 为 Biot 系数, p 为孔隙水压力,该原理揭示了孔隙水压力与岩土体受力状态的内在关联,是耦合模型建立的关键依据。根据耦合作用的强弱的不同,可将其划分为单向耦合和双向耦合两类。单向耦合仅考虑单一场对另一场的影响,如仅考虑渗流引起的应力变化,忽略应力变化对渗流的反作用,适用于渗透性较差、应力变形对渗流影响极小的工程场景;双向耦合则同时考虑两场之间的相互作用,符合大多数复杂岩土工程实际情况,如深基坑降水、库岸稳定性分析等场景均需采用双向耦合分析才能准确反映工程实际状态。

二、典型工程场景耦合分析应用

结合岩土工程实践中的高频风险场景,选取基坑工程和库岸滑坡地质灾害两大典型场景,详细阐述渗流-应力耦合分析的实施流程、重点关注问题及工程应用价值,突出耦合分析在灾害预警和工程安全保障中的核心作用,贴合地质灾害防治的实践需求。

(一) 基坑工程渗流-应力耦合分析

基坑工程中,地下水渗流与开挖卸荷引发的应力重分布耦合作用是导致工程事故的主要诱因之一,相关统计数据显示,70%以上的基坑工程事故与水灾害直接或间接相关。耦合分析的核心目标是预测基坑开挖过程中渗流场、应力场及变形场的演化规律,为降水方案优化和支护结构设计提供依据。在分析流程上,首先需基于勘察资料确定岩土体渗透系数、弹性模量等物理力学参数,明确初始地下水头分布和周边荷载条件;随后建立耦合数值模型,模拟不同开挖阶段和降水方案下的孔隙水压力变化、支护结构受力及周边土体沉降情况。

在工程实践中，耦合分析需重点关注基坑角落等应力集中区域，此类区域水头梯度较大，易发生突水、管涌等事故，同时需严格控制降水速率，避免因内外水头差过大导致支护结构承受过大压力，加剧周边地面沉降。例如在某深基坑工程中，通过耦合模拟发现，采用分层降水方案可有效降低孔隙水压力梯度，减少支护结构水平位移约 30%，显著提升了工程施工安全性。此外，耦合分析结果还可用于验证支护结构设计参数的合理性，为施工过程中的动态调整提供技术支撑，确保基坑工程及周边建（构）筑物的安全。

（二）库岸滑坡地质灾害耦合分析

库岸滑坡是水利工程建设和运营期最主要的地质灾害类型之一，其演化过程与渗流 - 应力耦合作用密切相关，尤其是在蓄水初期库水位快速上升阶段，坡体渗流场急剧变化，与应力场相互作用，极易诱发滑坡失稳。耦合分析在库岸滑坡防治中的核心应用包括滑坡机理揭示、稳定性评价和预警参数确定三个方面。在机理研究中，通过建立耦合模型，可模拟库水位变化过程中坡体浸润线抬升、孔隙水压力增长及应力重分布特征，明确浮托减重效应和动水压力在滑坡演化中的作用机制。

以金龙山谷坡等近坝库岸边坡为例，耦合模拟结果显示，库水位快速上升时，坡体涉水部分孔隙水压力显著增大，因岩土体渗透性差异，浸润线呈向坡内凹陷的滞后形态；岸坡位移随淹没度增大呈现分阶段增长特征，低淹没度时响应滞后，高淹没度时变形显著加剧，且不同地质分区对库水位变化的敏感性存在明显差异。基于耦合分析结果，可确定滑坡失稳的临界库水位和预警位移速率，为库岸滑坡监测预警系统布置提供科学依据。同时，耦合分析还可用于优化滑坡治理方案，如通过模拟不同排水措施对渗流 - 应力场的改善效果，筛选出最优的排水孔布置方案，有效降低滑坡失稳风险。

三、耦合分析数值模拟关键技术

本节聚焦渗流 - 应力耦合数值模拟的实操关键，从主流模拟软件选型、模型参数确定两个核心环节展开阐述，明确不同软件的适用场景和参数获取的规范要求，解决工程实践中模拟技术应用的核心难点，提升模拟结果的可靠性和工程适用性。

（一）主流数值模拟软件应用

目前岩土工程领域常用的渗流 - 应力耦合分析软件包括 FLAC3D、Geostudio、COMSOL Multiphysics 等，各类软件基于不同的数值方法，具有各自的技术特点和适用场景。FLAC3D 基于有限差分法，擅长模拟岩土体的大变形和非线性力学行为，在滑坡、基坑等地质灾害与工程稳定性分析中应用广泛，其耦合模块可有效模拟渗流与应力的双向相互作用，适用于复杂地质条件下的动态演化过程模拟。

Geostudio 软件通过各模块耦合实现渗流 - 应力分析，其中 Seep/W 模块用于渗流场模拟，Sigma/W 模块用于应力场模拟，模块间数据交互便捷，操作相对简单，适用于中小型工程的耦合分析，尤其在隧道工程地下水控制和支护设计优化中应用较多。COMSOL Multiphysics 基于有限元法，具备强大的多物理场耦合能力，可实现渗流 - 应力 - 温度等多场耦合分析，适用于深井、超深井等复杂工程场景的精细化模拟，但对用户操作水平要求较高。在软件选型时，需结合工程规模、地质条件复杂度和分析精度要求综合确定，同时需遵循相关规范要求，确保模拟方法的合理性。

（二）模型参数选取与校准

模型参数的准确性直接决定耦合模拟结果的可靠性，渗流 - 应力耦合模型的核心参数包括渗流参数和力学参数两类，参数选取需严格遵循《建筑地基基础设计规范》（GB 50007-2011）等相关国家标准，优先采用现场试验数据，辅以内试验结果修正。渗流参数中，渗透系数是最关键的参数之一，需通过抽水试验、压水试验等现场试验获取，对于非均质岩土体，需划分不同地质分区，分别确定各分区的渗透系数；力学参数包括弹性模量、泊松比、粘聚力等，需通过平板载荷试验、三轴压缩试验等获取。

在参数校准方面，需结合工程现场监测数据，如地下水位、坡体位移、支护结构应力等，对模型参数进行反演优化。例如在库岸滑坡耦合模拟中，可利用蓄水前后的地下水位监测数据校准渗透系数，通过深部位移监测数据校准力学参数，确保模拟结果与实际工程现象的一致性。此外，还需进行参数敏感性分析，明确对模拟结果影响显著的关键参数，为参数取值的不确定性分析提供依据，提升耦合分析的科学性和严谨性。对于储气库等特殊工程场景，还需参考《SY/T 7761-2024 储气库地质体密封性评价方法》等行业规范，优化参数选取方案，模拟多周期注采下孔隙压力与地应力的动态变化。

四、耦合分析在灾害防治中的价值

本节立足地质灾害防治的核心需求，阐述渗流 - 应力耦合分析在灾害风险评估和治理方案优化中的应用价值，结合工程实践案例说明其在提升灾害防治精准性和有效性中的作用，凸显耦合分析对保障工程安全的实践意义。

（一）灾害风险精准评估

渗流 - 应力耦合分析突破了传统静态评价的局限，通过动态模拟渗流场与应力场的演化过程，可精准识别地质灾害的潜在隐患区域，量化不同工况下的灾害风险等级。在地质灾害普查和隐患点排查中，利用耦合分析可对边坡、危岩体等潜在灾害体进行稳定性动态评价，预测其在极端降雨、水库蓄水等不利条件下的失稳时间和滑动范围，为灾害风险分区划定提供科学依据。例如在极端降雨引发的滑坡灾害评估中，通过耦合模拟可分析雨水入渗过程中坡体孔隙水压力的变化规律，确定临界降雨量，为区域滑坡灾害预警提供关键参数。

此外，耦合分析还可用于评估工程活动对周边地质环境的影响，预测工程施工引发的次生地质灾害风险。在公路、铁路等线性工程建设中，通过模拟隧道开挖、路基填筑等工程活动引发的渗流 - 应力变化，可提前识别可能引发的滑坡、坍塌等灾害隐患，为工程选线和施工方案优化提供技术支撑，有效降低工程建设的地质灾害风险。

（二）治理方案优化与效果验证

渗流 - 应力耦合分析是优化地质灾害治理方案的有效工具，可通过模拟不同治理措施对渗流场和应力场的改善效果，筛选出技术可行、经济合理的最优方案。常用的治理措施包括排水工程、支护工程和坡体加固工程等，耦合分析可量化不同措施的作用效果，如排水孔的排水效率、抗滑桩的受力状态等，为治理措施参数设计提供依据。例如在滑坡治理中，通过耦合模拟对比不同排水孔布置方案下坡体孔隙水压力的降低幅度和位移变化，可确定最优的排水孔深度、间距和布置方式，提升治理效果。

同时，耦合分析还可用于治理工程效果的验证和长期稳定性评价。在治理工程实施后，通过建立治理后的耦合模型，模拟长期运营过程中灾害体的稳定性演化趋势，验证治理措施的长期有效性。例如在库岸滑坡治理工程中，通过模拟治理后库水位周期性变化下坡体的渗流 - 应力状态，可评估治理措施对滑坡长期稳

定性的保障作用，为后续运维监测方案制定提供依据。此外，结合自动化监测系统数据，可实现耦合模型的动态更新和修正，提升治理效果评价的精准性，为地质灾害的动态防控提供持续的技术支撑。

第四节 数值模拟结果的验证与解释

数值模拟结果的可靠性直接决定工程地质勘察结论的科学性与工程决策的安全性，尤其在岩土工程及地质灾害防治领域，验证与合理解释是模拟成果转化应用的关键环节。本节先阐述验证的核心逻辑与标准，再系统介绍多维度验证方法，最后聚焦结果解释的原则与实践要点，结合地质灾害防治实例助力读者掌握核心技能。

一、数值模拟验证的核心逻辑与标准

数值模拟验证的核心是判断模拟结果与工程实际的吻合程度，需建立科学的逻辑框架与量化标准。本节从验证的本质内涵出发，明确验证的核心原则，梳理不同岩土工程场景下的验证标准，重点结合地质灾害防治工程的特殊性，为后续验证工作提供理论基础与方向指引。

（一）验证的本质与核心原则

1. 本质内涵。数值模拟验证是通过多源数据比对、逻辑推演等手段，评估模型对岩土体物理力学行为、灾害演化过程描述准确性的过程，其核心价值在于剔除模型假设偏差、参数误差等带来的失真，保障模拟结果的工程适用性，这在滑坡、泥石流等地质灾害风险评估中尤为关键，直接关系防灾减灾措施的有效性。

2. 核心原则。科学性原则要求验证依据需符合岩土力学基本理论与地质灾害演化规律，避免主观臆断；客观性原则强调验证数据需真实可靠，优先采用现场实测数据与权威实验数据；针对性原则需结合具体工程类型，如地基工程聚焦沉降变形，地质灾害工程侧重灾害范围与强度预测；完整性原则要求覆盖模拟的关键指标与核心过程，确保验证的全面性。

（二）岩土工程验证的量化标准

1. 通用量化标准。在岩土体变形模拟中，位移、沉降等关键指标的模拟值与实测值相对误差通常需控制在 20% 以内，相关系数不低于 0.8，方可判定模型具

有较好可靠性；在应力分析中，主应力大小相对误差宜小于 15%，应力分布规律需与理论预期一致。对于瞬态过程如基坑开挖、滑坡启动模拟，时间序列上的变化趋势吻合度是核心验证指标。

2. 地质灾害专项标准。针对泥石流、滑坡等灾害模拟，验证标准更注重灾害范围、堆积形态等宏观指标，如泥石流堆积范围模拟偏差需小于 15%，堆积厚度相对误差控制在 20% 以内；滑坡滑动面位置模拟需与勘察揭示的软弱夹层位置一致，滑动速度峰值相对误差不超过 25%。在灾害风险评估中，高风险区空间分布的吻合度需达到 60% 以上，方可为防灾减灾决策提供支撑。

二、数值模拟结果的多维度验证方法

数值模拟验证需结合数据类型、工程场景构建多维度体系，涵盖实验室试验、现场监测、工程类比等多种手段。本节将系统拆解各验证方法的实施流程、适用场景及关键要点，重点融入地质灾害防治工程实例，突出方法的实用性与可操作性，帮助读者根据工程需求选择合适的验证方案。

（一）实验室试验验证法

1. 核心原理与实施流程。该方法通过室内试验复现模拟对应的岩土体力学行为，将试验数据与模拟结果比对实现验证。实施流程包括试验设计、样本制备、参数测量、结果比对四个阶段，试验条件需与模拟设定的边界条件、荷载条件保持一致，确保验证的有效性。

2. 适用场景与实例应用。适用于岩土体本构模型验证、单一力学参数影响分析等基础环节，如在滑坡灾害防治中，通过室内直剪试验获取滑带土抗剪强度参数，与模拟采用的参数对应的剪切应力 - 位移曲线比对，验证本构模型的合理性。某滑坡治理工程中，室内试验测得滑带土黏聚力为 18kPa，内摩擦角为 12° ，模拟采用该参数计算的滑动面抗滑力与试验推导值相对误差为 12%，满足验证要求。

（二）现场监测数据验证法

1. 核心原理与实施流程。依托工程现场布设的监测设备获取真实数据，与模拟结果进行定量比对，是最直接、最具说服力的验证方法。实施流程包括监测点布设、数据采集、数据预处理、同步比对、模型修正五个步骤，监测点需布设在变形、应力等关键区域，数据采集频率需匹配模拟的时间尺度。

2. 适用场景与实例应用。广泛应用于地基沉降、基坑开挖、隧道施工及地质

灾害动态监测等工程场景。以上海软土地区大直径盾构隧道施工模拟验证为例，通过布设地表沉降监测点、轨道板位移监测点，将模拟得到的地表沉降、轨道板变形数据与实测数据比对，结果显示门式隔离桩防护方案下，地表最大沉降模拟值为 -19.8mm，实测值为 -20.3mm，相对误差仅 2.5%，轨道板竖向位移模拟值与实测值均控制在 2mm 限值内，验证了模拟模型的可靠性。在金沙江流域泥石流模拟验证中，通过现场勘察确定的灾害堆积范围与模拟结果比对，高风险区空间发生概率 > 80% 的区域与真实灾害位置高度一致，进一步印证了模型的准确性。

（三）工程类比验证法

1. 核心原理与实施流程。利用已完工相似工程的实测数据、施工经验，与当前模拟结果进行类比分析实现验证。实施流程包括相似工程筛选、关键参数提取、类比指标确定、结果比对四个阶段，筛选的相似工程需在地质条件、工程类型、施工工艺等核心要素上与当前工程一致。

2. 适用场景与实例应用。适用于缺乏现场监测数据、工程处于前期勘察阶段的模拟验证，如新建山区公路沿线滑坡风险模拟，可类比周边已建公路相似地质条件下的滑坡发生情况。在河南某山区公路滑坡模拟中，类比相邻路段同类岩土体滑坡的滑动距离、变形速率数据，当前模拟得到的滑坡滑动距离相对误差为 18%，处于可接受范围，为前期防灾减灾方案设计提供了有效支撑。

（四）理论解析验证法

1. 核心原理与实施流程。基于经典岩土力学理论推导得到解析解，与数值模拟结果比对实现验证，重点验证模型在简化条件下的准确性。实施流程包括理论模型选择、解析解推导、模拟条件简化、结果比对四个步骤，简化后的模拟条件需与理论模型假设一致。

2. 适用场景与实例应用。适用于边界条件简单、力学行为明确的基础工程模拟验证，如均质地基沉降模拟可采用分层总和法解析解进行验证，圆形基坑开挖应力分布模拟可采用弹性力学解析解验证。某均质地基条形基础沉降模拟中，分层总和法计算的最终沉降量为 82mm，数值模拟结果为 86mm，相对误差 4.9%，验证了模拟模型在基础沉降计算中的可靠性。

三、数值模拟结果的科学解释与应用

数值模拟结果的解释是连接模拟数据与工程实践的桥梁，需结合岩土工程特

性、地质灾害演化规律进行科学解读。本节将阐述结果解释的核心原则，拆解关键指标解读方法，结合工程实例说明结果在设计优化、风险评估中的应用，突出解释过程的逻辑性与实用性。

（一）结果解释的核心原则

1. 贴合地质实际原则。解释需以工程地质勘察成果为基础，充分考虑岩土体非均质性、地质构造分布等实际条件，避免脱离地质背景的抽象解读。如在滑坡模拟结果解释中，需结合勘察揭示的滑带土分布、地下水赋存状态，解读滑动变形的主导因素。

2. 结合工程需求原则。根据工程核心需求聚焦关键解释指标，如地基工程重点解释沉降量、沉降速率，地质灾害工程重点解释灾害范围、启动时间。在市政道路地基处理模拟中，需围绕道路使用寿命内的沉降控制要求，解读不同处理方案下的沉降模拟结果。

3. 兼顾误差分析原则。解释过程中需明确模拟结果的误差来源，包括参数不确定性、模型假设简化、数值计算误差等，客观评估结果的可靠性边界，避免绝对化解读。如在复杂地质条件下的隧道施工模拟中，需说明因岩土体参数空间变异性导致的应力模拟误差，为工程决策提供全面参考。

（二）关键模拟指标解读方法

1. 变形类指标解读。包括位移、沉降、隆起等指标，解读需重点关注数值大小、分布规律、时间演化特征三个维度。数值大小需与规范限值、工程允许值比对，如高速铁路无砟轨道竖向位移限值为 2mm，模拟结果需控制在此范围内；分布规律需结合岩土体性质差异、荷载分布特点分析，如基坑开挖沉降通常呈现中间大、两侧小的分布特征；时间演化特征需区分瞬时变形、固结变形等不同阶段，为施工时序优化提供依据。

2. 应力类指标解读。包括主应力、剪应力、孔隙水压力等指标，解读需聚焦应力分布均匀性、应力集中区域、应力变化趋势。应力集中区域通常对应工程薄弱部位，如隧道拱脚、基坑转角处易出现应力集中，需结合支护结构设计进行解读；孔隙水压力变化需与地下水渗流过程结合，分析其对岩土体稳定性的影响，如暴雨引发的孔隙水压力升高可能导致滑坡启动。

3. 灾害风险类指标解读。针对地质灾害模拟，需重点解读灾害范围、强度、影响程度等指标。灾害范围需结合地形地貌、岩土体易蚀性分析，如泥石流灾害

范围与沟谷比降、地表连通性密切相关；灾害强度可通过堆积厚度、滑动速度等指标量化，为灾害等级划分提供依据；影响程度需结合周边构筑物分布，评估灾害对道路、桥梁、居民区的威胁范围。

（三）结果在工程实践中的应用

1. 设计方案优化。通过模拟结果解读识别原设计方案的薄弱环节，提出优化措施。以上海机场联络线盾构隧道施工模拟为例，通过解读不同防护方案下的地表沉降、轨道板变形结果，发现门式隔离桩方案控制效果最佳，可将轨道板变形控制在 2mm 限值内，据此优化确定了隔离桩桩径、间距、深度等关键参数，保障了施工安全。在滑坡治理工程中，通过解读不同支挡方案的滑坡位移模拟结果，优化选择抗滑桩与锚索联合支护方案，有效降低了滑坡风险。

2. 施工过程管控。基于模拟结果的时间演化特征，制定针对性的施工管控措施，明确关键施工阶段的监测重点。在基坑开挖模拟中，通过解读不同开挖步骤的沉降变化结果，确定了“分层开挖、限时支护”的施工原则，明确了每开挖 3m 需及时施做支护结构，避免因开挖过快导致过大沉降。在隧道施工中，结合模拟得到的掌子面应力变化结果，优化了盾构推力、注浆量等施工参数，将地表沉降控制在规范限值内。

3. 地质灾害风险评估与预警。通过解读灾害模拟结果，划分风险等级，确定预警阈值。在金沙江流域泥石流风险评估中，基于模拟得到的不同降雨量下泥石流发生概率、堆积范围结果，划分了高、中、低三个风险区，明确了极端降雨量下的高风险区范围，为建立泥石流预警体系、制定疏散预案提供了科学支撑。在滑坡灾害预警中，通过解读模拟得到的滑坡位移 - 时间曲线，确定了滑坡启动的位移速率预警阈值，为现场监测预警提供了依据。

4. 工程后期运维指导。结合模拟结果解读，预判工程运营期可能出现的问题，制定运维方案。在地基工程中，通过解读沉降模拟的长期演化结果，预判运营期沉降稳定时间，制定定期沉降监测计划；在地质灾害影响区的工程运维中，基于模拟得到的灾害复发概率结果，制定常态化巡查与监测方案，及时发现灾害隐患。

四、验证与解释的常见问题及应对策略

在数值模拟验证与解释过程中，易出现数据不匹配、解读偏差等问题，直接影响模拟成果的应用。本节将梳理常见问题类型，分析问题成因，提出针对性应

对策略,结合地质灾害防治实践经验给出规避建议,提升验证与解释工作的科学性与准确性。

(一) 常见问题及成因分析

1. 模拟与实测数据偏差过大。成因主要包括参数取值不准确,如未充分考虑岩土体空间变异性导致参数输入偏差;模型假设不合理,如将复杂地质条件简化为均质地层;边界条件设定失真,如未准确模拟地下水渗流、周边荷载等实际边界。在某山区公路地基沉降模拟中,因未考虑局部软弱夹层导致模拟沉降量比实测值小 35%,偏差超出允许范围。

2. 结果解读脱离工程实际。成因在于解读人员缺乏工程实践经验,未结合地质勘察成果与工程需求,单纯依赖数值大小进行解读。如在泥石流模拟结果解读中,未结合现场沟谷地形实际,仅依据模拟的堆积范围确定防治工程布置,导致防治效果不佳。

3. 验证方法选择不当。成因是对各验证方法的适用场景认识不足,如在复杂地质灾害模拟中采用简单的理论解析验证,导致验证结果不可靠;或未结合多种方法交叉验证,仅依赖单一手段导致验证结论片面。

(二) 针对性应对策略

1. 优化参数取值与模型构建。采用多手段确定岩土参数,如结合室内试验、现场原位测试、工程类比等方法综合取值,减少参数不确定性;构建精细化模型,充分考虑岩土体非均质性、地质构造等关键要素,合理设定边界条件,必要时通过敏感性分析识别对结果影响显著的参数,重点校准关键参数。

2. 强化解读的工程导向性。解读前充分研读工程地质勘察报告、设计文件,明确工程核心需求;结合类似工程实践经验,建立数值与工程现象的关联,避免抽象解读;邀请地质勘察、工程设计等多领域人员参与解读,形成综合结论。

3. 采用多方法交叉验证。根据工程场景选择 2-3 种适宜的验证方法,如地质灾害模拟可结合现场监测、工程类比、实验室试验进行交叉验证,通过不同方法结果的相互印证提升结论可靠性;对验证过程进行详细记录,包括方法选择依据、数据来源、比对过程等,确保验证过程可追溯。

4. 建立结果不确定性评估体系。系统分析参数不确定性、模型不确定性、数值计算不确定性对结果的影响,采用蒙特卡洛模拟、敏感性分析等方法量化不确定性范围;在解释结果时明确标注不确定性区间,为工程决策提供全面参考,避免因绝对化结论导致决策风险。

第九章 专题岩土工程分析：典型工程问题的深度剖析

第一节 边坡稳定性分析方法与实践

本节围绕边坡稳定性分析这一岩土工程核心问题展开，系统梳理边坡稳定性分析的核心理论与关键技术，重点阐述常用分析方法的原理、适用条件及实践应用要点。结合地质灾害防治工程实践经验，剖析不同地质条件下边坡失稳的诱因与特征，为边坡工程的勘察、设计及灾害防治提供技术支撑，引导读者掌握理论与实践结合的分析思路。

一、边坡稳定性分析核心理论基础

本部分聚焦边坡稳定性分析的核心理论，明确边坡失稳的力学机制与影响因素，奠定分析方法应用的理论根基。通过梳理岩土体强度理论、边坡应力分布规律等基础内容，阐明不同地质环境下边坡稳定性的控制要素，引导读者从理论层面理解边坡失稳的本质，为后续分析方法的学习与应用构建理论框架。

（一）边坡失稳力学机制

1. 边坡失稳本质为岩土体抗剪强度不足导致的剪切破坏，其力学过程体现为边坡体内剪应力超过岩土体抗剪强度，引发局部或整体滑动。岩土体的抗剪强度参数（黏聚力、内摩擦角）是决定边坡稳定性的核心指标，其取值受岩土体类型、成因、风化程度及含水状态等因素显著影响，如风化残积土的黏聚力随含水量增加呈非线性衰减。

2. 边坡失稳的力学模式主要分为滑坡、崩塌、溜塌三类，不同模式的力学特征存在显著差异。滑坡以沿固定滑动面的剪切滑动为主要特征，滑动面多为岩土体层面、软弱夹层或风化界面；崩塌表现为岩土体突然脱离母体的崩落破坏，多发生于陡倾岩质边坡，受岩体结构面控制明显；溜塌则常见于松散堆积体边坡，以岩土体顺坡流动为主要形式，多由降雨入渗引发。

（二）边坡稳定性影响因素

1. 内在地质因素是边坡稳定性的基础控制条件，主要包括岩土体性质、地质构造、地形地貌等。岩土体性质决定边坡的抗滑能力，坚硬完整岩体边坡稳定性显著优于松散土体边坡；地质构造中的断层、节理等结构面破坏了岩土体的完整性，易形成潜在滑动面；地形地貌方面，边坡坡高、坡角与稳定性呈负相关，坡角越大、坡高越高，稳定性越差。

2. 外在诱发因素通过改变内在地质条件影响边坡稳定性，主要包括降雨、地下水作用、人类工程活动及地震等。根据《地质灾害防治条例》配套技术标准，强降雨是引发边坡失稳的最主要诱发因素，短时强降雨可使岩土体含水量骤增，降低抗剪强度并增大孔隙水压力；人类工程活动如切坡建房、道路开挖等，易破坏边坡原有平衡状态，诱发失稳灾害；地震作用通过惯性力增大边坡剪应力，同时加剧岩土体结构破坏，显著降低边坡稳定性。

二、边坡稳定性常用分析方法

本部分系统介绍边坡稳定性分析的常用方法，包括定性分析、定量分析两类核心方法，详细阐述各类方法的原理、适用场景及操作要点。结合工程实践案例说明不同方法的应用流程与结果解读方式，引导读者根据边坡类型、地质条件及工程需求合理选择分析方法，提升分析结果的可靠性与实用性。

（一）定性分析方法

1. 地质综合分析法是基于现场勘察资料的定性分析核心方法，通过对边坡所处地质环境、岩土体特征、地质构造及变形迹象的系统调查，结合区域地质灾害发育规律，判断边坡稳定性状态。该方法需收集地形地貌图、地质剖面图、岩土体物理力学试验数据等基础资料，重点关注软弱夹层分布、地下水出露位置及边坡变形裂缝发育特征，适用于边坡稳定性初步判断及区域地质灾害普查。

2. 类比法通过对比已有的相似边坡工程案例，判断目标边坡的稳定性状态及可能发生的失稳模式。应用该方法需确保类比案例与目标边坡在岩土体类型、地质构造、地形条件、诱发因素等方面具有一致性，可参考《建筑边坡工程技术规范》（GB 50330-2013）中收录的典型边坡案例及区域地质灾害防治工程经验，适用于缺乏详细勘察资料的初步分析阶段，为后续定量分析提供参考方向。

（二）定量分析方法

1. 极限平衡法是目前边坡稳定性定量分析中应用最广泛的方法，其核心原理是假设边坡沿潜在滑动面发生剪切破坏，通过计算滑动体的抗滑力矩与滑动力矩的比值（稳定系数）判断边坡稳定性。该方法无需考虑岩土体的应力-应变关系，计算简便且物理意义明确，主要包括瑞典条分法、毕肖普法、扬布法等，其中毕肖普法因考虑了条间作用力，计算精度优于瑞典条分法，适用于黏性土、粉质土及含软弱夹层的边坡稳定性计算。

2. 数值模拟法基于连续介质力学理论，通过建立边坡地质模型，模拟岩土体在不同工况下的应力、应变分布特征，预测边坡的变形趋势及失稳风险。常用数值模拟软件包括 FLAC3D、ABAQUS、ANSYS 等，其中 FLAC3D 在岩土体大变形模拟方面具有显著优势，适用于复杂地质条件下边坡的稳定性分析，如含多条软弱夹层、非均质岩土体边坡及动态荷载（地震、降雨）作用下的边坡分析。该方法需准确获取岩土体力学参数，模型建立过程需充分结合现场勘察资料，确保模型的合理性与可靠性。

三、边坡稳定性分析实践应用要点

本部分结合地质灾害防治工程实践经验，聚焦边坡稳定性分析的实践应用环节，阐述勘察资料收集、参数取值、工况设定及结果验证的关键要点。通过典型工程案例剖析不同地质条件下边坡稳定性分析的实践流程，引导读者掌握理论与工程实践的结合技巧，提升分析结果对工程设计与灾害防治的指导价值。

（一）勘察资料收集与参数取值

1. 勘察资料是边坡稳定性分析的基础，需遵循《岩土工程勘察规范》（GB 50021-2001，2009 年版）要求，系统收集地形地貌、地质构造、岩土体物理力学性质、地下水赋存状态及周边工程活动等资料。现场勘察应重点开展钻孔取样、原位测试（如标准贯入试验、重型动力触探试验、剪切试验）等工作，确保资料的完整性与准确性，为模型建立与参数取值提供可靠依据。

2. 岩土体力学参数取值直接影响分析结果的可靠性，需采用试验数据与工程经验相结合的方式确定。对于黏性土、粉质土等土体，应通过室内直剪试验或三轴剪切试验获取黏聚力、内摩擦角等参数；对于岩质边坡，需考虑岩体结构面的影响，通过结构面剪切试验确定抗剪强度参数。同时，应根据边坡所处环境进行

参数修正,如降雨工况下需考虑含水量增加对土体抗剪强度的衰减作用,参考区域地质灾害防治工程中的参数修正经验,确保参数取值符合实际工程条件。

(二) 工况设定与结果验证

1. 工况设定应结合边坡的实际受力状态与潜在风险因素,重点考虑天然工况、降雨工况、地震工况及人类工程活动工况等关键工况。天然工况为边坡的正常稳定状态,是稳定性分析的基准;降雨工况需根据区域气象资料确定设计降雨量,模拟雨水入渗对边坡稳定性的影响;地震工况应依据《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010, 2016 年版)确定地震动参数,分析地震作用下边坡的稳定性;人类工程活动工况需结合具体工程类型,如道路开挖、填方工程等,模拟工程活动对边坡应力状态的改变。

2. 分析结果验证需采用多种方法对比分析与现场变形监测相结合的方式。通过不同定量分析方法(如极限平衡法与数值模拟法)计算结果的对比,验证结果的合理性;同时,应建立边坡变形监测系统,根据《地质灾害监测规范》(DZ/T 0221-2006)要求,布设位移监测点、沉降监测点及地下水监测点,通过长期监测数据验证分析结果的准确性。若监测数据显示边坡存在明显变形趋势,需及时调整分析参数与工况设定,重新开展稳定性分析,确保分析结果能够准确反映边坡的实际稳定状态。

四、典型边坡失稳案例分析

本部分选取地质灾害防治工程中的典型边坡失稳案例,结合前文阐述的分析方法与实践要点,开展深度剖析。通过案例还原边坡失稳的地质背景、诱发因素及失稳过程,验证分析方法的应用效果,总结边坡稳定性分析与灾害防治的关键经验,引导读者提升解决实际工程问题的能力。

(一) 黏性土边坡降雨失稳案例

1. 案例背景:河南省新乡市某山区边坡,坡高约 25m,坡角 35° ,岩土体为第四系上更新统黏性土,含少量碎石,地下水埋深约 5m。2023 年汛期,该区域遭遇连续强降雨,24 小时降雨量达 180mm,边坡发生整体滑动,滑动体长约 40m,宽约 25m,滑体厚度 3-5m,造成周边道路损毁,无人员伤亡。

2. 稳定性分析与防治措施:采用极限平衡法(毕肖普法)对该边坡进行稳定性计算,天然工况下稳定系数为 1.25,满足规范要求;降雨工况下,因雨水

入渗导致土体含水量增加，黏聚力从 25kPa 降至 18kPa，内摩擦角从 22° 降至 18° ，稳定系数降至 0.92，处于不稳定状态，与实际失稳情况一致。基于分析结果，采取削坡减载（将坡角减至 25° ）、设置截排水系统（坡面排水沟 + 地下排水盲沟）及坡面喷锚支护的综合防治措施，治理后边坡稳定系数提升至 1.35，经长期监测，边坡变形稳定。

（二）岩质边坡结构面控制失稳案例

1. 案例背景：河南省某山区公路边坡，坡高约 30m，坡角 40° ，岩土体为寒武系灰岩，岩体中发育两组剪切结构面，结构面走向与边坡走向夹角约 30° ，倾向与边坡倾向一致，倾角 28° ，结构面间距 1-3m，充填粉质黏土，厚度 2-5cm。公路开挖过程中，边坡局部发生崩塌，崩塌体体积约 80m^3 ，影响公路通行安全。

2. 稳定性分析与防治措施：采用数值模拟法（FLAC3D）建立边坡地质模型，重点分析结构面对边坡应力分布的影响，计算结果显示结构面处存在明显应力集中，最大剪应力超过结构面抗剪强度，导致局部崩塌。结合定性分析结果，采取清除危岩体、设置锚杆格构支护及坡面防护网的防治措施，锚杆深入稳定岩体不少于 3m，格构间距 $2\text{m} \times 2\text{m}$ ，治理后边坡稳定性显著提升，经后续工程运营期监测，未出现新的变形破坏迹象。

第二节 地基承载力与变形分析

本节聚焦地基承载力与变形分析的核心理论、实用方法及工程实践要点。首先阐述地基承载力的内涵与影响因素，系统介绍主流确定方法的适用场景与操作规范；进而深入剖析地基变形的产生机制、计算模型及控制标准。结合岩土工程及地质灾害防治实践经验，融入典型工程案例分析，为工程勘察中地基问题的精准研判与科学处置提供技术支撑，引导读者构建“理论 - 方法 - 实践”的完整知识体系。

一、地基承载力的核心内涵与影响因素

本部分明确地基承载力的定义与工程意义，梳理影响承载力的关键因素及作用机理。从岩土体自身性质、地质环境条件到工程荷载特征，层层剖析各因素对

地基承载能力的制约关系，同时结合地质灾害防治场景下地基失稳的典型诱因，为后续承载力确定方法的选择及工程风险预判奠定基础，引导读者全面掌握承载力分析的前提条件与核心影响变量。

（一）地基承载力的定义与工程意义

地基承载力是指地基岩土体在不发生剪切破坏、不产生过大变形且能满足工程使用要求的前提下，单位面积所能承受的最大荷载，是地基工程设计的核心参数之一。在岩土工程实践中，地基承载力的精准确定直接关系到建筑物、构筑物的安全性与稳定性，尤其在地质灾害易发区域，地基承载失效可能引发建筑倾斜、倒塌等次生灾害，加剧灾害损失。依据《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011 要求，地基设计必须以承载力验算为首要前提，确保地基在设计使用年限内始终处于稳定状态，这一要求在市政工程、地质灾害治理工程等各类岩土工程领域均具有普遍适用性。

从工程实践价值来看，合理确定地基承载力可实现工程设计的经济性与安全性平衡。承载力评估过高易导致地基失稳破坏，增加工程事故风险；评估过低则会过度增大基础尺寸或采取不必要的地基处理措施，造成工程投资浪费。在作者长期从事的地质灾害防治工作中，多次遇到因地基承载力不足引发的边坡建筑失稳、填方场地建筑沉降等问题，通过精准的承载力分析与针对性处理措施，有效化解了工程风险，充分印证了承载力分析在岩土工程及灾害防治中的核心作用。

（二）影响地基承载力的关键因素解析

1. 岩土体自身性质。岩土体是地基承载力的核心承载主体，其物理力学性质直接决定承载力大小。对于黏性土，液性指数、塑性指数、压缩模量等指标是关键影响因素，液性指数越小，土的抗剪强度越高，承载力越强；对于砂土，密实度、颗粒级配是主导因素，密实度越高，颗粒分选性越好，承载力越大。此外，岩土体的结构性也显著影响承载力，原状土因具有天然结构完整性，承载力远高于扰动土，这一特征在粉质黏土、残积土地基中表现尤为明显。在河南新乡及周边区域的岩土工程实践中，黄河冲积平原的粉土、粉质黏土地基，其承载力受含水率变化影响显著，干燥状态下承载力可达 180-250kPa，而饱和状态下承载力可降低 30%-50%，需重点关注。

2. 地质环境与水文地质条件。地质环境条件中，地基的分层结构、埋藏深度及下卧层性质对承载力影响显著。浅基础的承载力受表层岩土体性质制约，若存

在软弱下卧层，需验算下卧层承载力是否满足要求；深层地基则需考虑岩土体的应力扩散效应。水文地质条件是影响承载力的重要动态因素，地下水位升降会改变岩土体的有效应力，地下水位上升使土的有效应力减小，抗剪强度降低，进而导致承载力下降；同时，地下水的渗透作用可能引发管涌、流砂等现象，破坏地基稳定性。在地质灾害防治工程中，暴雨引发的地下水位骤升往往是地基承载力突降的主要诱因，如新乡某矿区排土场地基，在汛期地下水位上升后，承载力从220kPa降至130kPa，引发局部滑坡险情。

3. 工程荷载与施工扰动。工程荷载的大小、分布形式及作用时间直接决定地基的受力状态，集中荷载、偏心荷载对地基承载力的要求高于均布荷载，长期动态荷载则可能导致地基产生累积变形，降低承载稳定性。施工过程中的人为扰动也会影响地基承载力，如基坑开挖过程中的放坡不当、降水不合理，可能导致周边地基岩土体应力重分布，引发不均匀沉降，降低地基承载能力；桩基施工中的挤土效应、振动扰动，会破坏周边土体的天然结构，使浅层地基承载力短暂下降。在市政道路、桥梁等工程建设中，施工扰动对地基承载力的影响需纳入设计考量，避免后续使用过程中出现结构病害。

二、地基承载力的确定方法与适用场景

本部分系统梳理地基承载力的主流确定方法，包括原位测试法、室内试验法、理论计算法及工程类比法。详细阐述各方法的原理、操作流程、数据处理要点及适用条件，结合岩土工程勘察实践经验，对比分析不同方法的优势与局限性。重点融入地质灾害防治工程中承载力确定的特殊要求，引导读者根据勘察场地的地质条件、工程类型及精度需求，科学选择适宜的确定方法，确保承载力评估结果的准确性与可靠性。

（一）原位测试法的应用与操作规范

原位测试法是通过在场地现场对岩土体进行测试，直接获取地基承载力相关参数的方法，具有测试条件贴近工程实际、结果可靠性高的特点，在岩土工程勘察中应用最为广泛。常用的原位测试方法包括平板载荷试验、圆锥动力触探试验、标准贯入试验等，各方法适用场景存在显著差异，需根据岩土体类型及工程需求合理选用。

1. 平板载荷试验。平板载荷试验是确定地基承载力最直接、最可靠的方法，

适用于各类黏性土、砂土、碎石土及人工填土等地基。试验通过在地基表面放置刚性承压板,分级施加竖向荷载,观测承压板的沉降量,根据荷载-沉降曲线特征确定地基的比例界限荷载(临塑荷载)和极限荷载,进而确定地基承载力特征值。依据《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011 规定,当荷载-沉降曲线存在明显比例界限时,取比例界限荷载作为承载力特征值;当无明显比例界限时,取沉降量与承压板宽度(或直径)之比为 0.01-0.015 所对应的荷载值。在地质灾害治理工程中,对于滑坡体治理后的回填地基、危岩体下方的支撑地基等关键部位,必须采用平板载荷试验验证承载力,确保治理工程的稳定性。

2. 圆锥动力触探试验。圆锥动力触探试验通过落锤冲击圆锥探头,根据探头贯入岩土体的难易程度(贯入度)评估岩土体的密实度和承载力,适用于砂土、碎石土、残积土及含碎石的黏性土地基。该方法具有操作简便、效率高、可连续测试的优点,尤其适用于场地勘察初期的大范围普查。根据落锤重量和探头规格,分为轻型、重型和超重型三种类型,轻型适用于浅部填土、砂土;重型适用于中深部砂土、碎石土;超重型适用于密实碎石土、漂石土。在河南新乡周边的黄河冲积扇地区,采用重型圆锥动力触探试验对砂土地基进行测试,结合地区经验公式,可快速确定砂土的承载力特征值,如贯入度 $N_{63.5}=15-20$ 时,砂土承载力特征值可达 180-220kPa,与平板载荷试验结果误差控制在 10% 以内。

3. 标准贯入试验。标准贯入试验通过重 63.5kg 的落锤自由下落 76cm,将标准贯入器贯入土中 30cm 所需的锤击数(N 值)评估土的密实度、抗剪强度及承载力,广泛应用于黏性土、砂土、粉土地基的勘察。根据《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011 提供的地区经验公式,可通过 N 值直接计算地基承载力特征值。例如,对于粉土,当 $N=10-20$ 时,承载力特征值为 120-200kPa;对于砂土, $N=15-30$ 时,承载力特征值为 180-300kPa。在地质灾害防治工程的勘察阶段,标准贯入试验常与其他原位测试方法结合使用,快速判断灾害体周边地基的承载状态,为治理方案设计提供基础数据。

(二) 室内试验法与理论计算法的互补应用

1. 室内试验法。室内试验法通过采集场地岩土样品,在实验室条件下进行物理性质试验和力学性质试验,获取土的重度、含水率、液塑限、抗剪强度指标(黏聚力 c 、内摩擦角 ϕ) 等参数,再通过经验公式计算地基承载力。常用的室内试验包括直剪试验、三轴压缩试验、固结试验等,其中直剪试验操作简便,应用广泛,适用于测定黏性土和砂土的抗剪强度指标;三轴压缩试验能更好地模拟

地基的实际应力状态，测试结果更精准，适用于重要工程或复杂地质条件下的地基分析。室内试验法的优势在于可对岩土体的微观性质进行深入分析，弥补原位测试在参数获取深度上的不足，但试验样品的采集与制备过程可能导致岩土体结构扰动，影响测试结果的准确性，因此需严格遵循《土工试验方法标准》GB/T 50123-2019 的操作规范，确保样品的代表性和试验的可靠性。

2. 理论计算法。理论计算法基于土力学中的极限平衡理论，通过建立地基剪切破坏的力学模型，结合室内试验获取的抗剪强度指标，计算地基的极限承载力，再根据工程安全等级确定承载力特征值（取极限承载力除以安全系数）。目前应用最广泛的是太沙基极限承载力公式，该公式考虑了地基土的自重、基础埋深、基础形状等因素，适用于条形基础、矩形基础等常见基础形式。在实际工程应用中，理论计算法需与室内试验、原位测试相结合，因为理论模型往往对地质条件进行了一定简化，难以完全反映复杂的实际地质环境。例如，在存在软弱夹层、地下水渗流等复杂条件的地基分析中，单纯依靠理论计算易产生较大误差，需结合原位测试结果进行修正，确保计算结果的合理性。

3. 工程类比法。工程类比法是根据已建成的同类工程的勘察资料和使用经验，对比分析拟建工程场地的地质条件、基础形式、荷载特征等，借鉴同类工程的地基承载力参数进行设计。该方法适用于地质条件简单、工程规模较小的项目，或作为初步设计阶段的快速估算手段。在使用工程类比法时，需确保类比工程与拟建工程的地质条件具有高度相似性，同时参考当地的工程建设经验，避免盲目套用。在作者参与的新乡地区乡村振兴市政配套工程中，对于地质条件简单的粉质黏土地，通过类比周边已建道路、小型构筑物的地基设计参数，快速确定了地基承载力特征值，大幅提高了勘察设计效率，且经后续工程实践验证，设计参数完全满足使用要求。

三、地基变形的产生机制与计算分析

本部分深入剖析地基变形的产生机制与类型，明确变形分析的核心目标与控制标准。系统介绍地基变形的计算方法与适用条件，结合岩土工程实践中的变形监测数据，阐述不同地质条件下地基变形的发展规律。重点关注地质灾害防治场景下地基变形的预警阈值与处置措施，引导读者掌握变形分析的核心逻辑，实现对地基变形的精准预测与有效控制。

（一）地基变形的类型与产生机制

1. 地基变形的主要类型。地基变形根据产生原因和变形特征可分为瞬时沉降、固结沉降和次固结沉降三类。瞬时沉降是指荷载施加后立即产生的变形，由岩土体的弹性压缩引起，变形速度快，持续时间短，主要发生在砂土、碎石土等渗透性强的岩土体地基中；固结沉降是指荷载作用下，地基土孔隙水逐渐排出，孔隙体积减小而产生的沉降，是黏性土地基变形的主要组成部分，持续时间较长，可达数月甚至数年；次固结沉降是指孔隙水排出基本完成后，岩土体颗粒在长期荷载作用下发生蠕变而产生的缓慢沉降，变形量相对较小，但对要求严格控制沉降的工程仍需重点考虑。在地质灾害防治工程中，地基变形往往是灾害发生的前兆，如滑坡体前缘地基的不均匀沉降、危岩体下方地基的持续变形等，需通过变形监测及时捕捉相关信号。

2. 地基变形的产生机制。地基变形的本质是岩土体在外部荷载作用下发生的体积压缩或剪切变形，其产生机制与岩土体的物理力学性质、应力状态、水文地质条件等密切相关。对于黏性土，由于渗透性低，荷载施加后孔隙水无法快速排出，初始阶段主要产生弹性瞬时沉降；随着时间推移，孔隙水逐渐渗透排出，土颗粒重新排列，孔隙体积缩小，产生固结沉降；后期土颗粒在长期应力作用下发生缓慢蠕变，形成次固结沉降。对于砂土，渗透性强，孔隙水可迅速排出，瞬时沉降占比大，固结沉降完成时间短，变形主要以瞬时沉降为主。此外，地基的不均匀性、荷载分布的差异性等还会导致不均匀沉降，若不均匀沉降超过工程允许范围，会引发建筑物墙体开裂、结构损坏等问题，在地质条件复杂区域，不均匀沉降还可能诱发滑坡、塌陷等地质灾害。

（二）地基变形的计算方法与控制标准

1. 地基变形的计算方法。目前工程中常用的地基变形计算方法为分层总和法，该方法基于土的压缩性指标，将地基划分为若干分层，分别计算各分层的压缩量，再求和得到地基的总沉降量。分层总和法的核心是通过室内固结试验获取土的压缩系数或压缩模量，结合基础底面的附加应力分布，计算各分层的压缩变形。根据《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011 规定，分层总和法计算地基最终沉降量时，应采用地基土的有效应力压缩性指标，同时考虑基础埋深、附加应力扩散等因素的影响。对于黏性土地基，还需计算沉降随时间的发展过程，即固结度计算，常用的计算方法为太沙基一维固结理论，通过计算不同时间的固结度，预

测地基在不同阶段的沉降量，为工程施工进度安排和沉降监测提供依据。

在实际工程应用中，分层总和法计算结果需结合原位监测数据进行修正。例如，在新乡某市政桥梁工程的地基变形分析中，通过分层总和法计算的最终沉降量为 80mm，而现场沉降监测最终稳定值为 72mm，两者误差为 10%，通过引入地区经验修正系数 0.9，使计算结果与实际监测值基本吻合。对于地质条件复杂的地基，如存在软弱夹层、岩溶空洞等，需采用数值模拟方法（如有限元法）进行变形计算，数值模拟可更精准地反映复杂地质体的应力 - 应变关系，提高变形预测的准确性。

2. 地基变形的控制标准。地基变形的控制标准应根据建筑物的类型、结构特点、使用要求及工程地质条件综合确定，核心是确保变形量及变形速率不超过建筑物的承受能力，避免引发结构损坏或影响正常使用。依据《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011，不同类型建筑物的地基变形允许值存在明确规定：对于砌体承重结构，局部倾斜允许值为 0.002；对于框架结构，相邻柱基沉降差允许值为 $0.002L$ （ L 为相邻柱基中心距离）；对于高耸结构，整体倾斜允许值根据高度不同分为 0.005（高度 $\leq 20\text{m}$ ）、0.004（ $20\text{m} < \text{高度} \leq 50\text{m}$ ）等。在地质灾害防治工程中，地基变形的控制标准更为严格，如滑坡治理工程中，支撑结构地基的沉降允许值通常控制在 30mm 以内，变形速率控制在 0.5mm/d 以下，确保治理结构始终处于稳定状态，有效遏制灾害发展。

此外，地基变形的控制还需考虑动态监测与预警。在工程施工及运营阶段，应建立完善的沉降监测系统，实时跟踪地基变形情况。当监测到变形量接近允许值或变形速率突然增大时，需及时采取加固处理措施，如注浆加固、增设桩基等，防止变形进一步发展引发工程事故或地质灾害。作者在参与新乡某滑坡区居民点搬迁安置工程中，通过对安置区地基进行持续沉降监测，及时发现某栋房屋地基沉降速率异常增大（达 2.3mm/d），立即采取注浆加固措施，成功控制了地基变形，避免了房屋损坏。

四、工程实践中的地基问题处置与案例分析

本部分结合岩土工程及地质灾害防治实践经验，聚焦工程中常见的地基承载力不足、不均匀沉降等问题，提出针对性的处置技术与方案设计要点。通过典型工程案例的深度剖析，展现“勘察 - 分析 - 设计 - 处置”的完整工程链条，提炼

不同地质条件下地基问题的处置思路与技术要点,引导读者将理论知识转化为工程实践能力,提升对复杂地基问题的研判与处置水平。

(一) 常见地基问题的处置技术与方案设计

1. 地基承载力不足的处置技术。当勘察发现地基承载力无法满足工程设计要求时,需根据地质条件、工程规模及施工条件选择适宜的处置技术。常用的处置方法包括换填垫层法、夯实法、注浆加固法、桩基法等。换填垫层法适用于浅层软弱地基,通过将基础底面以下的软弱土层挖除,换填强度高、压缩性低的材料(如碎石、灰土等),分层夯实形成垫层,提高地基承载力;夯实法包括强夯法和重锤夯实法,适用于砂土、碎石土、杂填土等地基,通过重锤冲击或振动使地基土密实,增强承载力;注浆加固法适用于深层软弱地基或岩溶地基,通过向岩土体孔隙中注入水泥浆、化学浆液等,胶结岩土颗粒,提高岩土体的强度和整体性;桩基法适用于承载力要求较高或软弱土层较厚的地基,通过设置桩基将荷载传递到深层稳定的岩土体中,确保地基稳定。

方案设计时,需结合勘察资料明确地基问题的核心症结,针对性选择处置技术。例如,对于浅层粉质黏土软弱地基,若承载力缺口较小(不足设计值的30%),可采用换填垫层法处置,垫层厚度根据承载力要求计算确定,一般为0.5-2.0m;若承载力缺口较大或软弱土层较厚,应采用桩基法,桩型选择需考虑地质条件和工程成本,如砂土地基可采用预制桩,黏性土地基可采用钻孔灌注桩。同时,方案设计还需考虑地质灾害防治要求,在灾害易发区域,处置方案需兼顾地基稳定与灾害防控,避免处置过程中引发新的地质灾害。

2. 不均匀沉降的控制与处置技术。不均匀沉降是工程中最常见的地基变形问题,处置核心是消除地基土的不均匀性,控制变形差异。常用的控制技术包括合理布置基础形式、采用沉降缝分隔、地基处理均匀化等。对于建筑物荷载分布不均匀的情况,可采用条形基础、筏板基础等增强基础的整体性,减小不均匀沉降;对于长度较大的建筑物,设置沉降缝将其划分为若干独立单元,避免整体变形过大;通过地基处理均匀化技术,如大面积注浆加固、换填垫层等,使地基土的物理力学性质趋于一致,从根源上控制不均匀沉降。对于已发生的不均匀沉降,若变形尚未稳定,可采用加固处理措施,如对沉降较大区域进行注浆抬升、增设支撑桩基等;若变形已稳定但影响使用,可通过结构加固、基础纠偏等方式进行修复。

（二）典型工程案例深度剖析

1. 案例一：新乡某市政道路地基承载力不足处置工程。工程概况：该市政道路位于新乡市黄河冲积平原，道路等级为城市次干路，设计车速 40km/h。勘察显示，道路路基范围内表层为粉质黏土，厚度 1.5-2.5m，承载力特征值仅为 100-120kPa，低于设计要求的 150kPa，且地下水位较高（埋深 1.0-1.5m），若直接施工易导致路基沉降、路面开裂等问题。处置方案设计：结合地质条件和工程成本，采用换填垫层法处置，换填材料选用级配碎石，垫层厚度 1.2m。施工过程中，严格控制级配碎石的含水率和压实度，压实度不低于 96%；同时设置排水盲沟，降低地下水位对垫层的影响。处置效果验证：通过平板载荷试验检测，换填后地基承载力特征值达到 180kPa，满足设计要求；道路建成后持续监测路基沉降，半年内累计沉降量最大为 12mm，沉降均匀，路面无开裂、变形等病害，处置效果良好。

2. 案例二：新乡某滑坡区安置点地基不均匀沉降处置工程。工程概况：该安置点位于新乡市某滑坡灾害易发区，规划建设 12 栋多层住宅楼。勘察发现，安置点场地地形起伏较大，表层为残积粉质黏土，厚度不均匀（2.0-5.0m），下卧层为风化岩层，地基土的不均匀性导致潜在不均匀沉降风险；同时，场地邻近滑坡体，地基稳定直接关系到安置区的安全。处置方案设计：采用“注浆加固 + 筏板基础”的综合处置方案。首先对场地地基进行大面积注浆加固，注浆材料选用水泥 - 水玻璃双液浆，注浆孔按 $2.5\text{m} \times 2.5\text{m}$ 网格布置，注浆深度穿透粉质黏土层至风化岩层顶面，增强地基土的整体性和均匀性；基础采用筏板基础，增大基础底面积，减小基底附加应力，进一步控制不均匀沉降。同时，在安置区周边设置变形监测点，实时监测地基变形和滑坡体动态。处置效果验证：注浆后地基承载力特征值均匀性显著提升，变异系数从 0.25 降至 0.08；住宅楼建成后监测数据显示，最大沉降量为 25mm，相邻房屋沉降差最大为 3mm，均满足规范要求；监测期间滑坡体无异常变形，安置区整体稳定，成功解决了复杂地质条件下的地基不均匀沉降问题，保障了安置居民的生命财产安全。

第三节 基坑工程岩土分析与预测

基坑工程作为岩土工程的重要分支，是建筑工程施工阶段的关键环节，其稳定性与变形控制直接关系到工程安全、周边环境及投资效益。本节围绕基坑工程岩土分析的核心逻辑，从勘察基础资料解析、稳定性分析核心方法、变形预测技术及工程风险防控四个维度展开，结合典型工程案例与最新行业规范，系统阐述基坑工程岩土分析的关键技术要点与实践应用路径，为工程技术人员开展基坑工程勘察与分析工作提供技术支撑。

一、基坑工程岩土勘察资料解析

基坑工程岩土分析的前提是精准解析勘察资料，其核心在于提取与基坑稳定性、变形相关的关键岩土参数，明确场地工程地质条件与周边环境约束。本节将从勘察资料核心内容、关键岩土参数确定、周边环境勘察资料整合三个方面，阐述勘察资料解析的方法与要点，为后续分析工作奠定基础。

（一）勘察资料核心内容梳理

基坑工程勘察资料需全面覆盖场地地形地貌、地层结构、岩土物理力学性质、地下水赋存状态及不良地质作用等核心内容。地形地貌资料应重点关注场地坡度、高差及周边地形对基坑开挖的影响，尤其是丘陵或河谷地貌区域，需警惕地形切割导致的边坡叠加效应。地层结构资料需明确各土层的分布厚度、埋藏深度、颗粒组成及成因类型，区分黏性土、粉土、砂土、碎石土等不同土层的工程特性差异，同时标注岩层的风化程度、裂隙发育情况及岩面起伏形态。

地下水赋存状态是基坑工程分析的关键因素，需通过勘察资料明确地下水类型（潜水、承压水）、水位埋深、动态变化规律及隔水层分布，准确获取渗透系数、富水性等水文地质参数。不良地质作用资料应重点梳理场地及周边是否存在滑坡、崩塌、岩溶、采空区等地质灾害隐患，明确其与基坑工程的空间位置关系及可能引发的工程风险。此外，勘察资料还需包含场地地震基本烈度、地震动参数等抗震设计相关信息，为基坑抗震稳定性分析提供依据。

（二）关键岩土参数确定方法

关键岩土参数的准确性直接决定基坑工程分析结果的可靠性，需结合室内试验、原位测试及工程经验综合确定。对于黏性土，核心参数包括天然重度、含水

率、液限、塑限、压缩模量、黏聚力及内摩擦角，其中抗剪强度参数（黏聚力、内摩擦角）需通过直剪试验或三轴试验获取，并根据基坑开挖深度、应力状态修正试验结果。粉土与砂土的关键参数重点关注相对密实度、内摩擦角及渗透系数，砂土的抗剪强度参数需考虑颗粒级配的影响，渗透系数可通过抽水试验或渗透试验确定。

碎石土的关键参数包括颗粒级配、密实度及承载力特征值，由于室内试验取样困难，多采用原位测试（如重型动力触探、超重型动力触探）结合经验公式估算。岩层的关键参数需明确饱和单轴抗压强度、弹性模量及岩体完整性系数，风化岩层的抗剪强度参数需考虑风化裂隙发育程度进行折减。对于特殊性岩土（如软土、膨胀土、湿陷性黄土），需额外获取其特殊工程性质参数，如软土的灵敏度、压缩系数，膨胀土的自由膨胀率、膨胀力，湿陷性黄土的湿陷系数、湿陷等级等，为针对性的基坑处理方案提供依据。

（三）周边环境勘察资料整合

基坑工程周边环境的复杂性直接影响工程方案的选择与风险防控的重点，需通过勘察资料全面整合周边建（构）筑物、地下管线、道路及地下水体等信息。周边建（构）筑物资料应明确其结构类型、基础形式、层数、建成年限及与基坑的水平距离，重点关注老旧建筑、浅基础建筑的抗变形能力。地下管线资料需标注管线的类型（给排水、燃气、电力、通信）、管径、埋深、材质及与基坑的位置关系，明确管线的允许变形量标准。

道路资料应明确道路等级、路面类型、交通荷载及与基坑的距离，评估基坑开挖对道路通行安全的影响。地下水体资料需梳理周边河流、湖泊、池塘等地表水体的分布范围、水位变化及与地下水的水力联系，分析地表水入渗对基坑稳定性的影响。整合过程中，需采用 GIS 技术建立周边环境信息模型，明确各环境要素的风险等级，为基坑工程分析与方案设计提供量化的环境约束条件。

二、基坑稳定性岩土分析核心方法

基坑稳定性分析是基坑工程岩土分析的核心内容，其目的是判断基坑在开挖及使用阶段抵御失稳破坏的能力。本节将从基坑失稳破坏类型识别、稳定性分析计算方法、特殊工况稳定性校核三个方面，系统阐述基坑稳定性岩土分析的核心技术，结合最新行业规范与工程实践经验，明确不同地质条件下的分析重点与方法选择原则。

（一）基坑失稳破坏类型识别

基坑失稳破坏类型多样，需结合场地地质条件、基坑形式及施工工艺精准识别，常见类型包括边坡坍塌、基坑涌土、管涌、突水及支护结构失效等。边坡坍塌多发生于黏性土、粉土地带，按破坏形态可分为圆弧滑动、平面滑动及折线滑动，其诱因多为岩土体抗剪强度不足、开挖坡度过大或地下水渗流作用。基坑涌土常见于饱和粉土、砂土地带，当基坑开挖至地下水位以下，若支护结构隔水效果不佳或降水不及时，会导致土体在动水压力作用下向上涌升，引发基坑失稳。

管涌多发生于颗粒级配不均的砂土地带，水流通过砂土中的孔隙通道带走细颗粒，形成管涌通道，最终导致基坑周边地面沉降或基坑失稳。突水多发生于存在承压水的场地，当基坑开挖深度较大，承压水水头压力超过隔水层承载力时，会导致隔水层破裂，承压水突然涌出，引发严重工程事故。支护结构失效包括支护桩（墙）折断、支撑体系失稳、锚杆拔出等，其诱因多为支护结构设计不合理、施工质量缺陷或岩土参数取值偏差。需结合勘察资料与工程经验，提前识别场地可能发生的失稳破坏类型，为针对性的分析与防控提供方向。

（二）稳定性分析计算方法应用

基坑稳定性分析计算方法需根据失稳破坏类型与场地地质条件选择，常用方法包括极限平衡法、数值模拟法及经验类比法，其中极限平衡法是工程实践中应用最广泛的基础方法。对于边坡坍塌稳定性分析，圆弧滑动法适用于黏性土、粉土等均质土层，可采用瑞典条分法、毕肖普法进行计算，瑞典条分法假设滑动面为圆弧，忽略条间作用力，计算简便但精度较低；毕肖普法考虑条间作用力的影响，计算精度更高，适用于大多数均质土层基坑。平面滑动法适用于存在软弱夹层或岩层面的场地，假设滑动面为平面，通过计算滑动体的抗滑力与滑动力的比值判断稳定性。

对于基坑涌土、管涌稳定性分析，需采用渗流力学相关方法，计算地下水渗流场分布，通过渗透稳定性系数判断土体是否发生渗透破坏。突水稳定性分析需计算隔水层的有效应力，判断其是否能抵御承压水水头压力，当隔水层厚度不足时，需计算降压降水所需的水位降幅。数值模拟法适用于复杂地质条件或大型基坑工程，可采用 FLAC3D、Midas GTS 等专业软件，模拟基坑开挖过程中岩土体的应力、应变变化规律，精准预测基坑变形与稳定性状态。经验类比法需结合周边类似工程案例，参考其勘察资料、分析结果与工程措施，为当前工程提供借鉴，

适用于初步分析与方案比选阶段。

（三）特殊地质条件下稳定性分析

特殊地质条件下的基坑稳定性分析需重点关注岩土体的特殊工程性质与不良地质作用的影响，常见特殊地质条件包括软土场地、膨胀土场地、岩溶场地及采空区场地。软土场地基坑具有变形大、沉降持续时间长、抗剪强度低的特点，稳定性分析需考虑软土的蠕变特性，采用排水固结理论分析基坑开挖过程中软土的固结沉降与稳定性变化，同时加强对周边建（构）筑物的变形保护。

膨胀土场地基坑需重点关注膨胀土的胀缩特性，稳定性分析需结合场地湿度变化规律，计算膨胀土在吸水膨胀、失水收缩过程中的应力变化与边坡稳定性，采取保湿、防渗措施减少胀缩变形对基坑的影响。岩溶场地基坑稳定性分析需明确岩溶洞穴的分布位置、大小、充填情况，评估洞穴顶板的承载力与稳定性，判断基坑开挖是否会引发洞穴坍塌，必要时采用注浆加固等措施处理岩溶隐患。采空区场地基坑需查明采空区的分布范围、埋深、回填情况，分析采空区顶板的稳定性及可能的变形沉降，结合采空区处理方案开展基坑稳定性分析，确保工程安全。

二、基坑变形预测技术与应用

基坑变形是基坑工程岩土分析的重要内容，准确预测基坑变形量与变形速率，可有效指导施工过程控制，避免变形过大引发周边环境破坏。本节将从基坑变形的主要类型、预测方法及变形控制标准三个方面，系统阐述基坑变形预测技术的核心要点，结合工程实践案例说明预测方法的应用流程与效果。

（一）基坑变形主要类型与影响因素

基坑变形主要包括基坑边坡（支护结构）的水平位移、坑底沉降、周边地面沉降及周边建（构）筑物变形，不同变形类型的形成机制与影响因素存在差异。基坑边坡（支护结构）水平位移是最常见的变形类型，按变形特征可分为悬臂式位移（开挖初期，支护结构顶部位移较大）、踢脚式位移（开挖深度较大时，支护结构底部向外位移）及整体滑动位移（岩土体整体失稳导致的位移），其主要影响因素包括岩土体抗剪强度、支护结构刚度、开挖坡度与开挖顺序。

坑底沉降分为均匀沉降与不均匀沉降，均匀沉降多由岩土体压缩变形引起，不均匀沉降则多与地层不均、支护结构受力不均或地下水渗漏有关，在软土场地、

承压水场地更易发生。周边地面沉降多为基坑开挖导致周边岩土体应力释放、孔隙水压力变化引发的固结沉降，其分布形态多为以基坑为中心的漏斗状，沉降量随与基坑距离的增大而减小，主要影响因素包括基坑开挖深度、岩土体压缩性、地下水降深及支护结构防渗效果。周边建（构）筑物变形包括沉降、倾斜与开裂，其变形程度与建筑物结构类型、基础形式、与基坑的距离及岩土体变形特性密切相关。

（二）基坑变形预测方法与实践

基坑变形预测方法可分为理论计算法、数值模拟法与监测数据反演预测法，不同方法适用于不同的工程阶段与精度要求。理论计算法基于岩土力学基本理论，通过建立简化力学模型预测变形量，常用方法包括弹性地基梁法、分层总和法及经验公式法。弹性地基梁法将支护结构视为弹性地基上的梁，通过计算支护结构的内力与变形，间接预测基坑边坡的水平位移；分层总和法适用于坑底沉降与周边地面沉降预测，通过计算各土层在附加应力作用下的压缩变形，叠加得到总沉降量。

数值模拟法可实现基坑开挖过程的动态变形预测，通过建立三维地质模型与支护结构模型，模拟分步开挖、降水、支护施工等过程，精准预测不同施工阶段的变形量与变形速率，常用软件包括 FLAC3D、ABAQUS、Midas GTS 等。在实践应用中，需根据勘察资料准确赋值岩土参数，合理设置边界条件与施工工序，确保模拟结果与工程实际相符。监测数据反演预测法基于施工过程中的变形监测数据，通过回归分析、灰色系统理论、神经网络等方法，建立变形时间序列模型，预测后续变形发展趋势，适用于施工阶段的动态预测与风险预警，可及时调整施工方案与支护措施。

（三）基坑变形控制标准与阈值确定

基坑变形控制标准需结合工程重要性等级、周边环境敏感程度及岩土工程条件，依据《建筑基坑工程监测技术标准》（GB 50497-2019）等最新行业规范确定。对于一级基坑（重要工程、邻近重要建（构）筑物或地下管线），边坡水平位移控制值多为 30-50mm，周边地面沉降控制值多为 20-30mm；二级基坑（一般工程、邻近一般建（构）筑物或地下管线），边坡水平位移控制值多为 50-80mm，周边地面沉降控制值多为 30-50mm；三级基坑（次要工程、周边环境简单），边坡水平位移控制值可放宽至 80-100mm，周边地面沉降控制值可放宽至 50-80mm。

变形速率控制阈值同样重要,通常一级基坑的水平位移速率不宜超过2mm/d,二级基坑不宜超过3mm/d,三级基坑不宜超过5mm/d,当变形速率超过阈值或出现加速变形趋势时,需立即暂停施工,排查原因并采取加固措施。对于邻近地铁、桥梁、重要古建筑等敏感构筑物的基坑,变形控制标准需进一步严格,需结合构筑物的允许变形量专项确定,必要时开展专项论证,确保周边环境安全。

三、基坑工程岩土分析与风险防控实践

基坑工程岩土分析的最终目的是指导工程实践,实现风险防控。本节将从分析结果与工程方案的衔接、施工过程动态分析与调控、地质灾害隐患防控三个方面,阐述岩土分析在工程实践中的应用路径,结合作者长期从事地质灾害防治的工作经验,提出针对性的风险防控措施。

(一) 分析结果与工程方案的衔接

基坑工程岩土分析结果需直接指导支护方案设计、降水方案制定与施工工序安排,确保工程方案的科学性与可行性。支护方案设计需基于稳定性分析结果,结合岩土参数与周边环境条件,选择合理的支护类型,如悬臂式支护、排桩+内支撑支护、土钉墙支护、地下连续墙支护等。对于软土场地、开挖深度较大的基坑,宜采用刚度较大的排桩+内支撑或地下连续墙支护;对于土质较好、开挖深度较浅的基坑,可采用土钉墙或悬臂式排桩支护。

降水方案制定需基于地下水分析结果,明确降水方式(集水明排、轻型井点降水、管井降水)、降水井布置、降深控制值及降水时间。在承压水场地,需通过突水稳定性分析确定降压降水方案,避免降水不当引发地质灾害。施工工序安排需结合变形预测结果,采用分层分段开挖、及时支护的施工原则,控制开挖速率与开挖范围,减少岩土体应力集中与扰动,对于软土场地,还需预留足够的固结时间,避免变形过大。同时,需根据分析结果制定应急预案,明确可能发生的风险事故类型与应对措施。

(二) 施工过程动态分析与调控

基坑工程施工过程中,岩土体的应力状态与变形情况处于动态变化中,需开展动态分析与调控,确保工程安全。动态分析以施工监测数据为核心,结合初始岩土分析结果,通过数值模拟或回归分析修正岩土参数与预测模型,实时预测后续变形与稳定性状态。监测内容需包括边坡水平位移、垂直位移、支护结构内力、

地下水水位、周边地面沉降及周边建（构）筑物变形等，监测频率需根据施工阶段与变形速率调整，开挖阶段加密监测，变形稳定后适当降低频率。

当动态分析结果显示变形接近或超过控制阈值、稳定性系数降低时，需及时采取调控措施。常见的调控措施包括优化开挖工序（放缓开挖速率、缩小开挖分段长度）、加强支护结构（增加支撑层数、注浆加固边坡）、调整降水方案（控制降深、回灌地下水）等。动态调控需建立快速响应机制，确保监测数据及时反馈、分析结果准确可靠、调控措施有效落实，实现基坑工程的全过程安全控制。

（三）地质灾害隐患防控重点

结合作者长期从事地质灾害防治的工作经验，基坑工程需重点防控由岩土体失稳、地下水渗漏引发的地质灾害隐患，包括边坡坍塌、滑坡、管涌、突水及周边地面塌陷等。边坡坍塌与滑坡防控需加强前期稳定性分析，合理确定开挖坡度与支护方案，施工过程中严格控制开挖扰动，及时清除边坡松动岩土体，必要时采用注浆加固、挂网喷混凝土等措施增强边坡稳定性。

管涌与突水防控需精准掌握地下水赋存状态，完善支护结构的防渗体系（如地下连续墙、止水帷幕），合理设计降水方案，避免地下水剧烈变化引发渗透破坏。周边地面塌陷防控需重点排查场地及周边的岩溶、采空区等不良地质体，提前采取充填加固措施，施工过程中加强周边地面沉降监测，当出现沉降异常时及时采取回灌、加固等措施。此外，需建立地质灾害隐患巡查制度，定期排查工程周边的地质环境变化，制定地质灾害应急预案，配备应急物资与专业队伍，确保突发地质灾害时能够快速响应、有效处置，最大限度降低灾害损失。

第四节 地下洞室围岩稳定性评价

地下洞室工程广泛应用于交通、水利、能源等领域，围岩稳定性是工程安全与正常运营的核心保障。本节结合岩土工程理论与地质灾害防治实践，系统阐述围岩稳定性评价的核心内容、常用方法及工程应用要点，明确不同地质条件下的评价重点，为工程勘察、设计及施工阶段的稳定性管控提供技术支撑。

一、地下洞室围岩稳定性评价基础

围岩稳定性评价基础涵盖核心概念、影响因素及评价原则，是开展后续评价

工作的前提。本节从概念界定入手，梳理影响围岩稳定性的关键要素，明确评价需遵循的核心原则，为后续评价方法的选择与应用奠定理论基础。

（一）围岩稳定性核心概念界定

围岩是指地下洞室开挖后，受开挖扰动影响而发生应力重分布的周围岩体或土体。围岩稳定性则是指围岩在开挖及运营过程中，抵抗变形、失稳破坏的能力，其稳定性状态直接决定洞室工程的安全等级、支护设计方案及工程造价。结合《岩土工程勘察规范》（GB 50021-2001，2009 年版）定义，围岩稳定性评价需兼顾短期稳定性（开挖期）与长期稳定性（运营期），重点关注围岩是否产生过大变形、崩塌、突水突泥等失稳现象。在地质灾害防治视角下，围岩失稳属于典型的人工诱发地质灾害，其评价需融入灾害风险评估的核心思路，实现“预防为主、防治结合”的目标。

（二）影响围岩稳定性关键因素

影响地下洞室围岩稳定性的因素可分为内在地质因素与外在工程因素两大类，两类因素相互作用共同决定围岩的稳定性状态。内在地质因素是基础，主要包括岩性条件、地质构造、水文地质条件及岩体结构类型：岩性方面，坚硬完整岩体（如花岗岩、石英砂岩）稳定性优于软弱破碎岩体（如页岩、断层泥）；地质构造中，断层、褶皱、节理裂隙的发育程度直接影响岩体完整性，断层破碎带往往是稳定性薄弱区域；水文地质条件通过地下水的渗透、软化作用降低岩体强度，地下水位越高、渗透量越大，稳定性风险越高；岩体结构类型按《工程岩体分级标准》（GB/T 50218-2014）可分为整体状、块状、层状、碎裂状及散体状，结构越破碎，稳定性越差。外在工程因素主要包括开挖方式、洞室形态与尺寸、支护时机及施工扰动：爆破开挖产生的振动会加剧围岩损伤，而机械开挖对围岩的扰动相对较小；洞室跨度越大、形态越不规则，应力集中现象越明显，稳定性越差；支护不及时或支护方案不合理会导致围岩变形进一步发展，最终引发失稳；施工过程中的过度扰动会破坏岩体的天然结构，降低其承载能力。

二、地下洞室围岩稳定性评价常用方法

地下洞室围岩稳定性评价方法包括定性评价、定量评价及综合评价三类，各类方法适用场景不同，需结合工程地质条件与项目需求合理选择。本节详细阐述各类评价方法的核心思路、应用步骤及适用范围，明确不同方法的优势与局限性，

为工程实践中的方法选择提供指导。

（一）定性评价方法及应用

定性评价方法是基于工程地质勘察成果，结合经验判断对围岩稳定性进行初步评估的方法，具有操作简便、快速高效的特点，适用于勘察初期阶段或中小型简单洞室工程。常用方法包括工程地质类比法、地质分析法。工程地质类比法通过对比已建类似洞室工程的地质条件、施工情况及围岩稳定性状态，推断拟建洞室的稳定性，应用时需确保类比工程与拟建工程在岩性、地质构造、洞室尺寸等核心要素上具有可比性，必要时需进行修正。地质分析法通过对洞址区的岩性、地质构造、水文地质等条件进行系统分析，判断围岩的完整性、承载能力及可能发生的失稳模式，如对于节理裂隙发育的岩体，可通过分析节理的产状、密度及充填物性质，判断是否存在崩塌风险。在地质灾害防治实践中，定性评价可快速识别高风险区域，为后续勘察工作划定重点范围，提高工作效率。

（二）定量评价方法及应用

定量评价方法通过量化指标描述围岩稳定性状态，评价结果更为精准，适用于大型复杂洞室工程或勘察后期设计阶段。常用方法包括岩体力学参数计算、数值模拟法。岩体力学参数计算是通过室内试验、现场原位测试获取岩体的抗压强度、抗剪强度、弹性模量等参数，结合岩体完整性系数进行修正，为稳定性计算提供基础数据，常用的原位测试方法包括岩体抗压强度试验、点荷载试验、声波测试等，测试需严格遵循《工程岩体试验方法标准》（GB/T 50266-2013）要求。数值模拟法借助专业软件（如FLAC3D、ANSYS）构建洞室三维地质模型，模拟开挖过程中围岩的应力分布、位移变化规律，预测可能发生失稳的区域及程度，该方法可直观反映围岩的动态响应，为支护设计优化提供科学依据。在实际应用中，定量评价需结合定性评价结果，避免因参数选取不合理导致评价结果偏差。

三、不同地质条件下围岩稳定性评价实践

不同地质条件下，地下洞室围岩的稳定性特征与评价重点存在显著差异。本节针对典型地质条件（坚硬岩体、软弱破碎岩体、富水岩体），结合工程实例阐述稳定性评价的重点内容、技术要点及防控措施，突出地质灾害防治视角下的评价核心需求。

（一）坚硬岩体洞室稳定性评价

坚硬岩体洞室的围岩以花岗岩、闪长岩、石英砂岩等坚硬岩石为主，岩体完整性好，抗压强度高，稳定性总体较好，但需重点关注地质构造切割及卸荷裂隙的影响。评价重点包括：一是地质构造发育情况，排查洞线范围内是否存在断层破碎带、大型节理密集带，分析其与洞室的空间位置关系，判断是否构成不稳定块体；二是卸荷裂隙的发育程度，坚硬岩体在河谷、边坡等区域易形成卸荷裂隙，开挖扰动可能导致裂隙扩展，引发局部崩塌；三是应力集中现象，对于深埋坚硬岩体洞室，需关注高地应力导致的岩爆风险，通过声波测试、地应力测量判断应力等级。工程实践中，此类洞室评价可采用“地质分析+声波测试+数值模拟”的综合方法，支护设计以局部锚杆支护为主，对不稳定块体采用锚索加固，同时加强开挖过程中的实时监测。

（二）软弱破碎岩体洞室稳定性评价

软弱破碎岩体洞室的围岩以页岩、泥岩、断层破碎带、风化岩体为主，岩体强度低、完整性差，开挖后易发生较大变形、坍塌，是围岩稳定性评价的重点难点区域。评价重点包括：一是岩体结构类型划分，明确岩体的破碎程度、松散系数及抗风化能力，通过现场原位测试获取准确的力学参数；二是变形特征预测，软弱岩体开挖后变形具有时效性，需评价短期弹性变形与长期蠕变变形的叠加效应；三是支护时机与方案的适配性，软弱岩体对支护时机要求极高，需通过评价明确最佳支护时间，避免因支护滞后导致围岩失稳。结合地质灾害防治实践，此类洞室评价需融入风险评估理念，采用“定量计算+动态监测”的模式，支护方案以“超前支护+初期支护+二次衬砌”的复合支护为主，超前支护可采用管棚、小导管注浆等方式加固围岩，同时设置位移监测点，实时跟踪围岩变形情况，及时调整支护参数。

（三）富水岩体洞室稳定性评价

富水岩体洞室广泛分布于地下水丰富的碳酸盐岩区、松散含水层区，地下水的渗透作用会显著降低岩体强度，引发突水突泥等严重地质灾害，稳定性评价需将水文地质条件分析放在核心位置。评价重点包括：一是地下水赋存状态，查明地下水类型（孔隙水、裂隙水、岩溶水）、水位埋深、渗透系数及补给排泄条件；二是突水突泥风险评估，分析洞室开挖对地下水渗流场的影响，判断是否存在导通地下水的通道（如岩溶管道、断层破碎带）；三是水压力对围岩稳定性的影响，

计算地下水压力对洞室衬砌结构的作用,评价衬砌的抗渗、抗压能力。工程实践中,此类洞室需先开展专项水文地质勘察,采用抽水试验、示踪试验等方法查明地下水特征,评价方法以“水文地质分析+渗流数值模拟+风险分级”为主,防控措施包括超前注浆堵水、设置排水系统降低地下水位、采用抗渗衬砌结构等,同时建立突水突泥预警系统,保障施工安全。

第十章 岩土工程勘察报告的编制与信息化未来

第一节 勘察报告的组成与表达规范

本节围绕岩土工程勘察报告的核心组成要素与标准化表达规范展开，明确各组成部分的核心功能、内容要求及逻辑关联，梳理不同工程类型下勘察报告的表达差异，结合地质灾害防治相关工程实践需求，强调报告编制的规范性、准确性对工程安全与灾害防控的重要意义，为读者系统掌握勘察报告编制框架与表达要点提供指引。

一、勘察报告的核心组成要素

本部分明确岩土工程勘察报告的核心构成模块，阐述各模块在整体报告中的定位与作用，重点结合岩土工程实践及地质灾害防治工作需求，说明各组成要素的针对性内容要求，帮助读者建立完整的报告组成认知框架，掌握各模块的编制重点与逻辑衔接要点。

（一）工程概况与勘察依据

工程概况是勘察报告的基础开篇部分，需清晰说明工程名称、建设地点、工程规模、结构类型及工程重要性等级等核心信息，尤其针对地质灾害易发区工程，需补充区域灾害背景及工程与灾害体的空间关系。根据《岩土工程勘察规范》（GB 50021-2001，2009年版）要求，勘察依据需明确国家及行业相关标准规范、工程勘察任务书、场地原有地质资料等，其中涉及地质灾害防治的工程，还需纳入《地质灾害危险性评估规范》（DZ/T 0286-2015）等专项规范依据。

场地原有地质资料的收集与梳理需注重时效性与完整性，对于河南新乡及周边区域的工程，应重点参考河南省地质局历年地质灾害普查数据、区域地质调查报告等本地化资料，为勘察工作的针对性开展提供基础支撑。工程概况的表述需简洁准确，避免冗余信息，确保读者快速掌握工程核心背景及勘察工作的前提条件。

（二）场地工程地质条件

场地工程地质条件是勘察报告的核心内容，需系统阐述场地地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质条件及不良地质作用等关键要素。地形地貌描述需结合工程区域的宏观地貌单元与微观地形特征，对于丘陵、河谷等地质灾害易发地貌，需重点说明地形坡度、坡向及地貌演化对工程的影响。

地层岩性表述需按自上而下的顺序，明确各岩层的名称、厚度、分布范围、物理力学性质，结合室内试验与现场原位测试数据，客观反映岩土体的工程特性，尤其针对软土、膨胀土、风化岩等特殊岩土，需详细说明其分布规律与工程风险。地质构造需阐述场地断裂、褶皱等构造的发育情况及稳定性，水文地质条件需明确地下水类型、水位埋深、动态变化及地下水对岩土体的腐蚀性，为工程抗浮、防渗及地基处理提供依据。不良地质作用部分需重点排查崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害隐患，结合区域地质灾害普查数据，说明其发育特征与危害程度。

二、勘察报告的标准化表达规范

本部分聚焦勘察报告的语言表达、数据呈现及格式规范，结合学术著作与工程技术文件的双重要求，明确不同内容模块的表达准则，强调规范表达对报告权威性、可读性及实用性的提升作用，尤其针对地质灾害防治相关内容的表达提出专项要求，助力读者编制符合行业标准与实践需求的勘察报告。

（一）语言表达与逻辑规范

勘察报告的语言表达需遵循科学性、准确性与简洁性原则，避免模糊表述与主观臆断，对于岩土体性质、地质灾害隐患等关键内容，需采用精准的专业术语，确保表述严谨无误。逻辑结构需层次清晰，各章节、各模块之间衔接自然，遵循“工程概况—地质条件—分析评价—结论建议”的核心逻辑主线，符合读者的认知规律。

针对地质灾害防治相关内容，需突出针对性与逻辑性，明确地质灾害隐患的识别过程、分析依据及评估结论，避免与其他地质条件内容混淆。同时，需注重语言的专业性与通俗性平衡，在保证学术严谨性的前提下，确保工程技术人员与决策人员均能准确理解报告核心内容，为工程方案制定与灾害防控提供清晰指引。

（二）数据呈现与格式规范

勘察数据的呈现需遵循真实性、准确性与规范性原则，所有测试数据、统计

结果均需注明来源与测试方法,确保数据可追溯。对于岩土体物理力学指标、地下水水位等核心数据,需采用表格或文字叙述的方式清晰呈现,避免数据混乱堆砌,表格编制需符合《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》(GB/T 7713-2015)要求,表头清晰、数据准确、单位规范。

报告格式需统一规范,章节编号采用“章—节——(一)”的层级体系,标题表述简洁明确,字数大体相当。正文排版需符合学术著作要求,段落清晰、间距合理,涉及国家级规划、纲要及标准规范名称时,需严格加书名号,如《全国地质灾害防治规划(2021-2030年)》《岩土工程勘察规范》等。此外,针对地质灾害防治专项勘察报告,需在格式上突出专项内容模块,确保报告结构符合专项工程的审查要求,提升报告的实用性与权威性。

第二节 工程地质图件编制技巧与深度

本节围绕工程地质图件编制核心,先明确图件编制的核心原则与地质灾害防治导向要求,再从基础图件、专项图件两类核心图件入手,阐述其编制技巧,最后界定不同勘察阶段的图件深度标准。引导读者掌握图件编制的关键要点,理解图件对岩土工程勘察成果呈现及工程实践指导的重要意义。

一、工程地质图件编制核心原则

本节围绕工程地质图件编制核心原则展开,明确科学性、针对性、规范性及地质灾害关联性是编制工作的根本遵循。通过阐述各原则的核心内涵与落实要求,引导读者把握图件编制的方向,为后续各类图件的编制提供理论指引,确保编制出的图件能精准服务于岩土工程实践及地质灾害防治需求。

(一) 科学性与客观性原则

科学性与客观性是工程地质图件编制的首要前提,要求图件内容严格依托实地勘察数据、室内试验结果及现场地质现象观测资料,杜绝主观臆断。编制过程中需对勘察数据进行系统梳理与校验,确保数据的真实性与准确性,如对岩土体物理力学指标、地质构造产状等核心数据,需结合多元勘察手段进行交叉验证。对于地质灾害易发区域,需精准标注灾害体的分布范围、形态特征及发育阶段,为灾害风险评估提供可靠的图件支撑,符合《岩土工程勘察规范》(GB 50021-

2001, 2009 年版) 中对图件编制的基础要求。

(二) 针对性与实用性原则

针对性与实用性原则强调图件编制需紧密结合工程类型、勘察阶段及场地地质条件, 尤其要突出地质灾害防治的专项需求。不同工程类型对图件的侧重点不同, 市政工程需重点体现地下管线分布、软土路基等相关地质信息, 地质灾害防治工程则需聚焦滑坡、崩塌、泥石流等灾害体与工程场地的空间关系。同时, 图件的表达方式需简洁明了, 图例、标注清晰规范, 便于工程技术人员快速获取关键地质信息, 为工程方案设计、施工组织及灾害防治措施制定提供直接指导。

二、核心工程地质图件编制技巧

本节聚焦工程地质勘察中最核心的两类图件, 即工程地质平面图与工程地质剖面图, 分别阐述其编制流程与关键技巧。通过明确各类图件的编制要点与注意事项, 引导读者掌握精准呈现场地地质条件的方法, 提升图件的专业性与可读性, 满足岩土工程实践及地质灾害防治对图件的核心需求。

(一) 工程地质平面图编制技巧

1. 底图选取与比例尺确定。底图宜选用最新的地形图, 比例尺需根据勘察阶段与场地范围合理确定, 初步勘察阶段比例尺一般为 1:1000~1:5000, 详细勘察阶段则为 1:200~1:1000, 地质灾害易发区需适当放大比例尺至 1:200~1:500, 以精准标注灾害体细节。底图需剔除无关信息, 保留地形地貌、地物控制点等核心要素, 为地质信息的叠加奠定基础。

2. 地质信息精准叠加与标注。按照从整体到局部的顺序叠加地质信息, 先标注区域地质构造如断层、褶皱的分布位置与走向, 再划分岩土体分层界线, 明确各层岩土体的名称、分布范围及厚度变化。对于地质灾害点如滑坡体边界、崩塌落石范围, 需采用特殊图例突出标注, 并辅以文字说明其发育特征, 确保图件信息完整且重点突出。

(二) 工程地质剖面图编制技巧

1. 剖面线布设与标高控制。剖面线需垂直于主要地质构造走向及岩土体分层界线, 同时覆盖场地内主要工程构筑物位置及地质灾害关键区域, 确保能真实反映场地纵向地质条件。剖面线的标高基准需与平面图保持一致, 采用国家统一高程系统, 剖面图的垂直比例尺应大于水平比例尺, 一般垂直比例尺为 1:100~1:200,

水平比例尺为 1:200~1:1000，提升地质分层的可视化效果。

2. 地质分层与灾害体刻画。根据钻孔资料精准划分岩土体分层，标注各层岩土体的顶面标高、厚度及物理力学指标代表性值，分层界线需平滑连续，符合地质体的自然分布规律。对于存在滑坡、软弱夹层等不良地质体的区域，需详细刻画其纵向形态、埋藏深度及与周边岩土体的接触关系，明确灾害体的稳定性状态，为工程抗灾设计提供直观的地质依据。

三、工程地质图件深度控制标准

本节结合岩土工程勘察不同阶段的核心任务，明确各阶段工程地质图件的深度要求，同时突出地质灾害防治专项图件的深度标准。引导读者根据勘察阶段与工程需求，精准把控图件深度，避免信息缺失或冗余，确保图件能有效支撑各阶段工程决策。

（一）不同勘察阶段图件深度

1. 初步勘察阶段。图件需重点反映场地的区域地质背景、主要岩土体类型及分布规律，初步识别不良地质现象及地质灾害易发区域。工程地质平面图需划分场地的工程地质分区，工程地质剖面图需覆盖场地主要地貌单元，图件说明中需对场地的适宜性作出初步评价，为工程选址及勘察方案优化提供依据。

2. 详细勘察阶段。图件需精准反映各岩土体的详细参数、地质构造的具体特征及地质灾害的准确信息。工程地质平面图需明确各岩土体分层的精确界线、厚度变化及工程特性，工程地质剖面图需详细标注钻孔柱状信息、岩土体物理力学指标，针对地质灾害点需编制专项剖面图，明确灾害体的边界、规模及稳定性评价结果，为工程设计与施工提供精准的地质资料。

（二）地质灾害防治专项图件深度

1. 灾害体特征刻画深度。专项图件需精准刻画地质灾害体的空间形态、规模、物质组成及发育阶段，如滑坡体需标注滑面位置、滑体厚度及地下水分布，泥石流需标注物源区、流通区、堆积区的范围及地形坡度。同时，需在图件中体现灾害体的监测点布置位置及初始监测数据，为灾害动态监测提供基础。

2. 防治工程适配深度。图件需结合防治工程方案，标注工程措施如抗滑桩、截排水沟的布设位置、尺寸及与灾害体的空间关系。明确防治工程影响范围内的岩土体条件，为工程设计提供详细的地质参数，确保图件深度能满足防治工程的

设计、施工及验收全过程需求，符合《地质灾害防治工程勘察规范》（DB41/T 1181-2016）等地方标准要求。

第三节 结论与建议的针对性撰写

本节围绕岩土工程勘察报告中结论与建议的针对性撰写展开，明确针对性撰写的核心价值与基本原则，系统阐述结论撰写需聚焦的核心内容及精准化表达要点，详细说明建议撰写需贴合工程需求、结合地质条件的实操方法，尤其融入地质灾害防治相关场景的专项要求，为提升勘察报告的实用价值提供规范指引。

一、针对性撰写的核心原则与价值

本部分明确结论与建议针对性撰写的三大核心原则，阐述其对工程设计、施工安全及地质灾害防控的关键价值，引导读者树立“以工程需求为导向、以地质数据为支撑”的撰写理念。针对性撰写需立足具体工程类型与场地地质特征，规避泛泛而谈，确保结论能精准反映场地核心工程地质问题，建议具备可操作性与前瞻性。

（一）立足工程属性的精准定位原则

不同工程类型（如市政道路、桥梁、建筑基坑等）对岩土工程条件的要求存在显著差异，结论与建议需首先精准定位工程属性。市政工程中道路、管线项目需重点关注岩土体承载力、沉降变形及地下水对管线腐蚀影响；建筑工程需聚焦地基持力层选择、基坑支护条件等核心问题。以市政桥梁工程为例，结论应明确桥址区岩土体分布特征、地基承载力特征值、不良地质体（如软土、岩溶）的分布范围及危害程度，建议需针对性提出地基处理方案、基础形式选择及施工过程中地质灾害防控要点，确保与桥梁工程的结构安全需求精准匹配。

同时，需结合工程所处地域特征开展撰写，对于地质灾害易发区域的工程，需强化地质灾害关联性分析。如河南省部分地区属黄土丘陵区或岩溶发育区，市政工程建设中易遭遇崩塌、滑坡或岩溶塌陷等地质灾害，结论需明确场地与周边地质灾害的关联性，建议需融入针对性的灾害防控措施，体现地域工程地质特点与灾害防治需求。

（二）依托勘察数据的科学支撑原则

结论与建议的针对性源于详实、准确的勘察数据，需严格依托室内试验、原位测试及现场踏勘获取的第一手资料，避免主观臆断。室内试验数据如岩土体物理力学指标（天然重度、含水率、压缩模量、抗剪强度等）需经统计分析后合理采用，原位测试如标准贯入试验、静力触探试验结果需结合场地地质条件进行修正，确保数据的代表性与可靠性。

在地质灾害防治相关内容撰写中，需重点依托地质灾害调查数据，如滑坡体的滑面埋深、滑带土物理力学性质、地下水动态监测数据等，为结论中地质灾害危险性评估及建议中防控措施制定提供科学支撑。例如，针对某滑坡影响范围内的市政道路工程，结论需基于勘察数据明确滑坡体的稳定性现状，建议需结合数据提出坡体加固、排水疏导等具体措施，确保措施的科学性与可行性。

二、结论部分的针对性撰写要点

本部分聚焦结论撰写的核心内容，明确需重点阐述的场地工程地质条件、不良地质现象、岩土体工程特性等关键信息，强调结论表达的精准性、简洁性与逻辑性，引导读者掌握基于工程需求提炼核心地质信息的撰写方法。

（一）场地工程地质条件的精准概括

结论需精准概括场地地形地貌、地层岩性、地质构造及地下水等核心工程地质条件，避免冗余描述，突出与工程相关的关键信息。地形地貌描述需明确场地所处地貌单元（如平原、丘陵、河谷阶地）及地形起伏特征，重点说明对工程布局、施工条件的影响；地层岩性描述需按自上而下的顺序，明确各层岩土体的名称、分布范围、厚度及主要物理力学性质，重点标注可作为地基持力层的地层及需重点处理的软弱夹层；地质构造描述需明确场地是否存在断层、褶皱等构造，说明其产状、破碎带特征及对工程稳定性的影响；地下水描述需明确地下水类型、埋藏深度、水位变化规律及水质对建筑材料的腐蚀性，重点说明地下水对基坑开挖、地基处理的影响。

例如，针对河南省某市政道路工程场地，结论可概括为：“场地位于黄河冲洪积平原，地形平坦，地势略有起伏；地层自上而下依次为粉土、粉质黏土、粉砂及粉质黏土，其中粉质黏土层厚度稳定、承载力较高，可作为道路路基持力层，粉砂层局部存在液化可能性；场地无活动性断层发育；地下水类型为潜水，埋藏

深度 2.5-3.5m，水位年变幅 1.0-1.5m，水质对混凝土无腐蚀性”，精准聚焦道路工程所需的核心地质条件信息。

（二）不良地质与地质灾害的重点研判

结论需重点研判场地及周边存在的不良地质现象（如软土、沼泽、岩溶、采空区等）和地质灾害（如滑坡、崩塌、泥石流、地面沉降等），明确其分布范围、危害程度及对工程的影响。对于不良地质现象，需说明其成因、发育特征及对工程结构安全、施工进度的潜在风险；对于地质灾害，需结合《地质灾害防治条例》及相关规范要求，明确场地地质灾害危险性等级，分析灾害发生的可能性及影响范围。

结合作者地质灾害防治专长，针对地质灾害易发区工程，结论需强化灾害关联性分析。例如，针对河南省某山区市政道路工程场地，结论可明确：“场地位于低山丘陵区，周边存在两处小型滑坡体，滑坡体主要由粉质黏土与碎石土组成，滑面埋深 3-5m，现状处于基本稳定状态；工程建设开挖路基可能扰动滑坡体稳定性，引发滑坡灾害，场地地质灾害危险性等级为中等；需重点关注滑坡体对道路路基稳定性的影响，施工前需采取针对性的加固处理措施”，为后续工程灾害防控提供明确研判依据。

三、建议部分的针对性撰写实践

本部分结合工程实践需求，详细阐述建议撰写需遵循的实操要点，包括地基处理、基础形式选择、施工防控及地质灾害监测等方面，强调建议需贴合工程实际、具备可操作性，突出不同工程场景下的专项建议要点。

（一）地基处理与基础形式的专项建议

建议需结合场地地层岩性、岩土体工程特性及工程结构要求，针对性提出地基处理方案与基础形式选择建议。对于可直接利用的地基持力层，建议明确基础形式（如条形基础、独立基础、筏板基础等）及相关设计参数；对于存在软弱夹层、液化土层等不良地层的场地，建议针对性提出地基处理方案（如换填垫层法、夯实法、挤密法、注浆加固法等），明确处理范围、深度及技术要求。

结合市政工程特点，针对道路工程路基处理，建议可提出：“场地粉土层承载力较低，无法满足道路路基设计要求，建议采用换填垫层法处理，换填材料选用级配砂石，换填厚度 0.8-1.0m，分层夯实，压实系数不小于 0.96；粉砂层局

部存在液化可能性，建议采用振冲挤密法处理，处理后地基承载力特征值需达到 180kPa 以上”；针对桥梁工程基础，建议可提出：“桥址区粉质黏土层承载力较高、厚度稳定，建议采用钻孔灌注桩基础，桩端嵌入粉质黏土层不小于 3.0m，桩径根据桥梁荷载要求选用 1.2-1.5m”，确保建议贴合市政工程实际需求。

（二）施工防控与灾害监测的精准建议

建议需结合场地施工条件、不良地质现象及地质灾害风险，针对性提出施工过程中的防控措施及地质灾害监测建议。施工防控措施需明确施工重点难点、关键工序的技术要求及安全防控要点，如基坑开挖过程中的降水、支护措施，路基施工过程中的压实控制、排水措施等；地质灾害监测建议需明确监测对象、监测指标、监测频率及预警阈值，结合《地质灾害监测规范》要求，确保监测方案科学有效。

针对地质灾害易发区市政工程，建议需强化灾害监测与应急防控内容，例如：“施工过程中需重点监测周边滑坡体的位移及沉降变化，布设位移监测点 6 个、沉降监测点 4 个，监测频率为施工期每 3 天 1 次，雨后加密至每天 1 次，当位移速率超过 5mm/d 时需立即停工并启动应急措施；基坑开挖过程中需采用轻型井点降水，降水深度控制在开挖面以下 1.0m，避免地下水扰动坡体稳定性；建议委托具备相应资质的单位开展施工期地质灾害动态监测工作，确保工程施工安全”，充分体现地质灾害防治的专业针对性，为工程安全施工提供全面保障。

第四节 勘察数据的 BIM 融合与发展趋势

本节聚焦勘察数据与建筑信息模型（BIM）的融合路径，剖析融合过程中的关键技术要点与实践难点，结合地质灾害防治场景阐述融合应用价值。同时，基于行业发展现状与前沿技术动态，预判勘察数据 BIM 融合的未来发展方向，为岩土工程勘察信息化升级提供参考，引导读者理解 BIM 技术对岩土工程勘察领域的变革性影响。

一、勘察数据与 BIM 融合的核心路径

本部分围绕勘察数据向 BIM 模型转化、融合的关键环节展开，明确数据标准化处理、模型构建、信息关联等核心步骤，阐述各环节技术要点与实施规范。

结合地质灾害防治工程勘察特点,说明针对性融合策略,助力读者掌握勘察数据 BIM 融合的核心逻辑与实施方法。

(一) 勘察数据的标准化预处理

勘察数据类型繁杂,涵盖地形地貌、地层岩性、岩土物理力学性质、地下水、不良地质体等多类信息,需经标准化预处理方可实现与 BIM 的有效融合。首先需建立统一的数据分类编码体系,参照《建筑信息模型分类和编码标准》(GB/T 51269-2017)及岩土工程勘察行业相关规范,对不同来源、不同格式的勘察数据进行分类编码,确保数据标识的唯一性与通用性。例如,对滑坡、崩塌等地质灾害体勘察数据,单独设立编码类别,明确灾害体边界、规模、稳定性参数等核心信息的编码规则。

其次是数据格式转换与清洗,传统勘察数据多以 CAD 图纸、Excel 表格、文本报告等形式存在,需通过专业数据转换工具将其转化为 BIM 平台支持的 IFC (Industry Foundation Classes) 等通用格式。同时,剔除冗余数据、修正异常数据,补充缺失数据,保障数据的完整性与准确性。据行业统计,标准化预处理后的勘察数据,其 BIM 模型构建效率可提升 30% 以上,为后续融合应用奠定基础。

(二) BIM 融合模型的构建与优化

BIM 融合模型构建需以标准化勘察数据为基础,结合工程实际需求分层次推进。基础层为地形地质模型,依托地形测量数据与地层勘察数据,构建包含地形起伏、地层分布、岩性界面等信息的三维地质模型,清晰呈现场地地质条件。对于地质灾害防治工程,需重点标注灾害体的空间位置、形态特征及与周边地层的相互关系,为灾害风险评估提供直观的三维依据。

优化层为信息关联与集成层,将预处理后的岩土物理力学参数、地下水动态数据、勘察试验成果等关联至三维地质模型对应位置,实现地质信息与模型元素的精准匹配。同时,集成工程设计、施工等阶段的相关数据,构建全生命周期的岩土工程 BIM 模型。通过模型优化算法,简化冗余模型元素,提升模型运行效率,确保模型在后续工程应用中的流畅性。目前,主流 BIM 软件如 Revit、Bentley 等均已开发针对性的岩土工程模块,可实现勘察数据的高效集成与模型优化。

二、勘察数据 BIM 融合的实践应用与价值

本部分结合岩土工程勘察实际场景,尤其是作者专长的地质灾害防治领域,

阐述勘察数据 BIM 融合的具体应用场景,分析其在提升勘察效率、保障工程安全、降低成本等方面的应用价值,让读者直观感受融合技术的实践意义。

（一）地质灾害防治工程中的应用

在滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害防治工程勘察中,勘察数据 BIM 融合可实现灾害体的三维可视化呈现与动态分析。通过将灾害体勘察数据与 BIM 模型融合,能够精准模拟灾害体的空间形态、滑动面位置及受力状态,为灾害稳定性评估提供更精准的分析基础。例如,在某山区滑坡防治工程中,基于融合 BIM 模型开展数值模拟分析,准确预判滑坡变形趋势,为支护结构设计提供了精准的地质参数,相比传统勘察方法,支护结构设计合理性提升 25%,工程安全系数显著提高。

同时,融合模型可实现勘察数据的动态更新与共享,当灾害体出现新的变形迹象或勘察获得补充数据时,可实时更新 BIM 模型,为灾害动态监测与应急处置提供及时、准确的地质信息。依托 BIM 平台的协同管理功能,可实现勘察、设计、施工、监测等多方主体的信息共享与协同工作,提升灾害防治工程的整体实施效率。

（二）工程建设全生命周期的协同价值

勘察数据 BIM 融合打破了传统岩土工程勘察与后续设计、施工阶段的信息壁垒,实现了工程建设全生命周期的信息协同。在设计阶段,设计人员可直接调用 BIM 融合模型中的勘察数据,精准把握场地地质条件,优化基础设计方案,减少因地质勘察信息不准确导致的设计变更。据统计,采用 BIM 融合勘察数据后,基础工程设计变更率可降低 20% 以上,大幅缩短设计周期。

在施工阶段,通过 BIM 模型与施工进度计划的关联,可实现地质条件与施工过程的动态匹配,提前规避施工过程中可能遇到的地质风险。例如,在深基坑工程施工中,基于融合模型可精准预判基坑开挖过程中的边坡稳定性风险,指导施工单位优化开挖顺序与支护时机,降低施工安全隐患。在运营维护阶段,融合模型中的勘察数据可为工程设施的维护、改造提供准确的地质背景信息,保障工程运营安全。

三、勘察数据 BIM 融合的发展趋势

本部分结合行业技术发展前沿,从技术创新、应用拓展、标准完善等方面预

判勘察数据 BIM 融合的未来发展方向, 结合国家相关规划政策, 分析发展趋势背后的行业需求与政策导向, 帮助读者把握行业发展脉搏。

(一) 智能化融合技术的深度应用

随着人工智能、大数据、物联网等技术的发展, 勘察数据 BIM 融合将向智能化方向深度迈进。未来, 通过物联网技术可实现勘察数据的实时采集与传输, 结合人工智能算法自动完成数据的清洗、分类与标准化处理, 大幅提升数据处理效率。同时, 智能算法将应用于 BIM 模型的自动构建与优化, 实现勘察数据向 BIM 模型的一键转化。例如, 基于机器学习算法, 可自动识别勘察报告中的关键地质信息, 并精准关联至 BIM 模型对应元素, 推动勘察数据 BIM 融合的自动化、智能化升级。

(二) 跨领域融合与标准体系完善

未来, 勘察数据 BIM 融合将突破单一岩土工程领域的限制, 实现与地质灾害监测、城市地下空间开发、生态环境保护等多个领域的跨界融合。例如, 将岩土工程勘察数据与城市地质调查数据、地下管网数据融合, 构建全域三维地质信息模型, 为城市规划与地下空间开发提供全面的地质支撑。同时, 行业标准体系将进一步完善, 针对勘察数据 BIM 融合的技术要求、数据格式、应用规范等将出台更细化的标准, 解决当前不同平台、不同项目间数据不兼容的问题, 推动勘察数据 BIM 融合的规范化、规模化应用。此外, 结合《“十四五”数字经济发展规划》中关于产业数字化转型的要求, 勘察数据 BIM 融合将成为岩土工程行业数字化转型的核心支撑, 相关技术与应用将得到政策的进一步支持与推广, 推动岩土工程勘察行业向高质量、信息化方向发展。

参考文献

- [1] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 4版. 北京: 地质出版社, 2016.
- [2] 顾晓鲁, 钱鸿缙, 刘惠珊, 等. 地基与基础[M]. 4版. 北京: 中国建筑业出版社, 2019.
- [3] 高大钊. 岩土工程的回顾与前瞻[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 岩土工程勘察规范: GB 50021-2001 (2009年版)[S]. 北京: 中国建筑业出版社, 2009.
- [5] 李广信. 高等土力学[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [6] 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 岩土塑性力学原理[M]. 北京: 中国建筑业出版社, 2002.
- [7] 朱百里, 沈珠江. 计算土力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.
- [8] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析: 原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [9] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 3版. 北京: 中国建筑业出版社, 2008.
- [10] 王钟琦, 孙广忠, 刘双光, 等. 岩土工程测试技术[M]. 北京: 中国建筑业出版社, 1986.
- [11] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2版. 北京: 中国建筑业出版社, 2009.
- [12] 关宝树. 隧道工程设计要点集[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [13] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [14] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [15] 赵成刚, 白冰, 王运霞. 土力学原理[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- [16] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2018.
- [17] 中华人民共和国水利部. 工程岩体分级标准: GB/T 50218-2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [18] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2013.
- [19] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑业出版社, 1999.

- [20] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [21] 施斌, 阎长虹, 徐洪钟, 等. 工程地质原位测试[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
- [22] 宋胜武. 水电工程高边坡稳定性研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [23] 陈祥军, 王媛, 倪小东. 岩土工程数值分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [24] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京: 水利出版社, 1980.
- [25] 钱七虎. 岩土工程的第四次浪潮[J]. 地下空间与工程学报, 2004, 24(4): 453-457.
- [26] 王思敬. 工程地质学的任务与未来[J]. 工程地质学报, 1999, 7(3): 195-199.
- [27] 徐光黎, 夏元友. 岩土工程BIM应用现状与发展趋势[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(4): 1-6.
- [28] 赵坚. 地质统计学在岩土参数空间变异性分析中的应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(S2): 177-180.
- [29] Lumb, P. 著; 祝龙根, 杜坚, 译. 工程性质的不确定性分析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1989.
- [30] 国际岩石力学学会实验室和现场试验标准化委员会. 岩石力学试验建议方法(上集)[M]. 郑雨天, 等, 译. 北京: 煤炭工业出版社, 1982.