

复杂地质条件下建筑结构稳定性分析

陈 磊

中冶沈勘秦皇岛工程设计研究总院有限公司 河北 秦皇岛 066000

摘 要：复杂地质条件，如地层变化大、地下水丰富、土质松软或含有孤石、岩溶等不良地质，不仅会增加施工难度，还可能导致基坑坍塌、周边建筑物受损、地下管线破裂等。因此，深入研究复杂地质条件下深基坑支护结构的稳定性施工技术，对于保障建筑施工安全具有重要意义。深基坑支护结构作为防止基坑开挖过程中土体坍塌、控制基坑变形、保护周边环境的重要措施，支护结构必须能够承受来自土体和地下水的压力，确保基坑在开挖过程中的稳定性。支护结构还需要考虑对周边环境造成的影响，如邻近建筑物的基础稳定性、地下管线的安全等，避免因施工造成次生灾害。

关键词：复杂地质条件下；建筑结构；稳定性

复杂地质条件下建筑结构稳定性分析需综合考虑地质构造、岩土特性、环境荷载等多重因素，多技术融合勘探，采用“物探（槽波勘探+地质雷达）+智能钻探+数据云平台”体系，实现地质构造三维可视化，精准识别断层、陷落柱等隐患。

1 复杂地质条件特点

（1）地质构造与岩体结构复杂。构造活动强烈。多断层、裂隙发育，岩体连续性差，易引发应力集中和滑动风险（如活动断裂带影响范围广）。褶皱与断裂变动明显，岩性岩相极不稳定，火成岩分布广泛。岩体完整性差。交叉节理密集，岩体易破碎，钻孔施工易坍塌、漏失。地层空洞发育（如岩溶、采空区或地下裂缝），易导致渐进性破坏或地表塌陷。

（2）地形地貌与岩土性质多变。地形起伏剧烈。山高谷深、斜坡陡峭，易诱发滑坡、崩塌等灾害。多级阶地交错分布，地貌形态多样且难以识别。岩土性质不均。第四系沉积物分布错综复杂（如卵砾石层、砂土层交错）。岩土体工程地质性质不良，承载力差异大，易产生不均匀沉降。

（3）水文与环境灾害风险高。地下水条件复杂。含水层埋深不一、稳定性差，补给与边界条件难以判定。地下水渗流软化岩土体，降低抗剪强度，加剧失稳风险。灾害叠加效应显著。极端降雨易触发泥石流、滑坡等链式灾害。地震可能引发液化、震陷，需额外动力响应分析。人类活动干扰大。工程开挖、采矿等活动破坏地质环境平衡，加剧灾害风险。

（4）对工程的影响。勘察难度大：需综合物探、钻探等技术精准识别隐患。施工风险高：易遇突水、坍塌，需特殊工艺（如盾构、注浆）控制变形。维护成本

高：需长期监测水文、应力变化，并制定应急预案。复杂地质条件表现为构造破碎、地形崎岖、岩土不均、水文紊乱、灾害频发的综合特征，对工程建设构成系统性挑战。

2 复杂地质条件成因

（1）板块构造活动主导（根本动力）。多板块交界作用。中国大陆处于印度洋板块与欧亚板块碰撞带（形成青藏高原）及太平洋板块向欧亚板块俯冲带（引发东部地震、火山），导致地壳应力集中、断裂发育。板块边界的强烈挤压与剪切作用，形成大规模褶皱、断层及岩体破碎带，如岷江上游受伸展运动与断裂带影响形成复杂地形。

（2）内外营力协同塑造（地形与岩性基础）。构造运动叠加侵蚀。新构造运动活跃（如地壳升降、断裂复活）形成阶梯状地貌（青藏高原→第二阶梯山地→东部平原），加剧地形高差与坡体不稳定。河流强烈下切（如雅鲁江下切超3000米）、冰川剥蚀等外力作用，进一步塑造峡谷、陡坡等险峻地形。岩石循环与变质作用。岩浆岩、沉积岩、变质岩在高温高压下相互转化，形成非均质岩层（如大理岩化灰岩、破碎化页岩），导致岩体力学性质差异显著。长期地质应力作用诱发节理、片理、微裂缝密集发育，破坏岩体完整性。

（3）水文气候催化（灾害诱因）。降水与地下水作用。季风气候区暴雨频繁（尤其西南山区），冲刷坡体并软化岩土，触发滑坡、泥石流。地下水渗流溶蚀可溶岩（如石灰岩），形成岩溶空洞；或软化软弱夹层，降低抗剪强度。极端事件叠加风险。地震引发液化、震陷（板块交界带频发）；冻融循环加速岩石风化破碎。

（4）人类活动加剧（干扰因素）。资源开发破坏地

质平衡。采矿形成采空区，诱发地表塌陷；隧道开挖扰动围岩应力，引发弃渣场滑坡复活。工程活动改变水文环境。水库蓄水抬升地下水位，加剧库岸滑坡风险；城市建设改变地表径流，增加局部渗流压力。

(5) 综合效应。时空尺度叠加：古老构造（如元古代断裂）与新构造运动（如喜马拉雅隆升）交织，导致不同时代地质体拼贴共存。多过程耦合：构造破碎+水力侵蚀+人为扰动形成链式反应（例如：断层带岩体破碎→地下水渗入软化→工程开挖触发滑坡）。复杂地质条件是板块动力奠基、内外营力雕刻、水文气候催化、人类活动加码共同作用的结果，其本质是地球多圈层长期相互作用的产物。

3 建筑结构稳定性分析方法

(1) 基础力学分析方法。静力平衡法。通过建立结构整体平衡方程（ $\sum F_x = 0$, $\sum F_y = 0$, $\sum M = 0$ ）验证抗倾覆能力，适用于简单荷载下的基础稳定性初步评估。欧拉临界荷载分析。但忽略材料非线性和初始缺陷，适用性受限。能量法。基于势能原理计算结构临界失稳状态，精度高于欧拉法，但计算复杂度高。

(2) 数值模拟技术。三维有限元分析（FEA）。模拟复杂荷载下结构-围岩相互作用（如调压井围岩应力分布），量化位移、塑性区扩展及失稳风险。极限状态验算。承载力极限状态：验算深层滑动风险（如地基抗剪强度）；正常使用极限状态：控制沉降变形量（如高填方建筑差异沉降）。

(3) 缺陷与风险控制方法。初始缺陷量化。引入焊接变形、材料不均匀性等缺陷因子，修正屈曲分析模型。地质力学模型试验。针对复杂地质体（如拱坝坝肩滑动块体），通过超载试验模拟失稳过程，确定安全系数。灾害链防控。对断层带、岩溶区等地质薄弱区，采用注浆加固+抗滑桩+实时监测（地质雷达+传感器网络）的综合策略。

4 多技术融合探测体系建筑结构稳定性分析

(1) 多技术融合探测体系构成。空天地一体化感知层。卫星遥感（空）。通过InSAR技术监测地表沉降与区域形变，识别潜在地质灾害风险（如断层活化）。无人机巡查（天）。搭载高清摄像头与激光雷达，扫描建筑表观病害（裂缝、倾斜）并构建三维模型，精度达毫米级。地面传感网络（地）。部署MEMS位移传感器、应变计、裂缝监测仪等，实时采集结构微变形与应力变化数据。智能勘探与验证层。地质透明化技术。融合无线电坑透勘探、地质雷达动态扫描与井下智能钻探，精准识别地下断层、岩溶空洞等隐患（如煤矿区应用案

例）。计算机视觉识别。基于AI算法自动分析无人机影像，实现裂缝宽度、剥落面积的智能量化评估。数据融合中枢。建立地质数据云平台，集成多源异构数据（物探结果、传感数据、地质模型），通过能量CT成像与频散分析生成风险热力图。

(2) 动态稳定性评估。传统方法升级。将实时传感数据输入有限元模型，修正静力平衡方程参数，优化承载力验算精度。灾害链模拟。结合地下水位监测数据与岩体结构模型，预测暴雨诱发滑坡-结构倒塌的链式反应路径。智能决策支持。三级预警机制依据变形阈值触发黄/橙/红警报（如倾斜 $> 0.15^\circ$ 启动疏散），自动推送至管理终端。加固方案优化。基于岩体分类（完整/碎裂岩体）与缺陷定位，针对性设计注浆加固区域与抗滑桩深度。

(3) 实践效益与挑战。显著优势。效率提升：无人机+AI替代人工巡检，复杂建筑群普查周期缩短60%以上；成本优化：锂电池供电传感器续航达5年，降低长期监测运维成本；精度保障：空天地数据融合使形变监测误差控制在 $\pm 1\text{mm}$ 内。现存挑战。多源数据对齐：地质雷达、InSAR、传感器数据的时空分辨率差异需更优融合算法；隐蔽缺陷探测：墙体内部空洞、钢筋锈蚀等仍需结合穿透雷达与声波CT技术深化研究。

5 多种方法结合提高建筑结构稳定性分析准确性

(1) 全域感知与数据融合。空地协同探测。无人机搭载激光雷达扫描建筑表观缺陷（裂缝精度达 0.1mm ）与三维形变，结合InSAR卫星监测区域地表沉降趋势。地面部署MEMS传感器网络实时采集应力、倾斜数据，通过物联网平台实现毫秒级响应。隐蔽缺陷智能识别。地质雷达与声波CT联合探测墙体内部空洞、钢筋锈蚀，AI算法自动标注风险区域（如碳纤维加固前的缺陷定位）。

(2) 多尺度数值模拟升级。多物理场耦合仿真。在FEA模型中集成地质力学参数（岩体结构分类）、材料时变性能（混凝土碳化模型）、环境荷载（风振谱与地震波）。对高层建筑进行刚重比验算（规范要求 $\geq 10\%$ ）并修正位移放大系数。极限状态动态验算。基于实时监测数据更新模型边界条件，动态验算暴雨/地震场景下的深层滑动安全系数与差异沉降量。

(3) 智能决策与预警优化。风险分级预警。建立三级响应机制：倾斜 $> 0.1^\circ$ 触发黄色预警， $> 0.15^\circ$ 启动橙色应急加固， $> 0.2^\circ$ 执行人员疏散。加固方案精准设计。基于岩体分类（完整/碎裂岩体）与缺陷定位，差异化采用注浆（破碎带）或抗滑桩（深层滑动）；碳纤维加固技术提升梁柱承载力40%以上，同步植入传感器构建长效监

测网络。技术融合效益：空地协同探测使形变监测误差 $\leq \pm 1\text{mm}$ ；实时数据驱动模型将灾害预警时效提升72小时；智能加固体系延长建筑寿命20年以上。

6 复杂地质条件对建筑结构稳定性的挑战

(1) 主要地质风险挑战。岩体结构失稳风险。断裂带活化：地下断层受荷载扰动易引发岩体滑移，导致地基不均匀沉降（如朝天门项目基岩倾角差异显著）；破碎岩体渗透：二元结构地层（软土+砂层）中地下水渗流加剧地基潜蚀，降低抗剪强度（汉口基坑渗透系数超 10^{-4}cm/s ）。特殊地形放大效应。高差地形：山地建筑场地高差 $> 50\text{米}$ 时，边坡滑移力矩增大，诱发桩基侧向位移（重庆朝天门项目案例）；喀斯特地貌：岩溶空洞导致桩基嵌岩深度不足（需 $> 60\text{米}$ ），引发建筑倾斜（朝天门项目采用超深嵌岩桩）。灾害链式反应。暴雨渗透→地下水位上升→软弱夹层软化→滑坡推力传导→建筑基础剪切破坏（缅甸地震案例显示链式灾害扩大损失）。

(2) 差异化地基处理技术。软土地基：预压排水+注浆加固，提升承载力至 150kPa 以上（沿海项目经验）；岩溶区桩基：超长嵌岩桩（深度 $> 60\text{米}$ ）+桩端后压浆技术，保障端阻力 $> 8000\text{kN}$ ；断层带加固：抗滑桩+预应力锚索，抑制构造活化位移（缅甸震后重建方案）。动态监控与预警。部署MEMS传感器网络，实时预警沉降超限（ $> 10\text{mm}$ ）或倾斜异常（ $> 0.1^\circ$ ）；建立三级响应机制：结合地质模型预测灾害链，提前72小时启动应急方案。

(3) 核心工程实践要点。岩体分类施策。完整岩体：优选浅基础，充分利用天然承载力；碎裂岩体：注浆填充裂隙+网格锚杆加固（如拱坝坝肩处理）；软硬互层：桩基穿越软弱层，锚固于稳定基岩。材料性能适配。高流动性微膨胀注浆料（水灰比 $0.8\sim 1.0$ ）填充岩溶空洞，减少收缩裂缝；碳纤维加固技术提升梁柱抗震韧性，承载力增幅 $> 40\%$ 。

7 复杂地质条件下建筑结构稳定性分析未来挑战与机遇

(1) 核心挑战。地质参数不确定性与建模瓶颈。断层活化应力、岩溶空洞分布等隐蔽地质参数难以精确量化，导致数值模型误差放大（如拱坝坝肩超载试验显示安全系数偏差 $> 15\%$ ）；非均质土层中地下水渗流路径复杂（如PFAS污染物迁移路径预测偏差超 30% ），削弱灾害链式反应预判能力。极端环境耦合灾害风险。高山峡谷区“暴雨-地震-滑坡”多灾种耦合效应（如地震中紫坪铺大坝经历高烈度地震验证），传统单因素分析范式失效；冻土区地基热扰动引发差异沉降，超高层建筑刚重比验算面临新变量干扰。绿色低碳与成本矛盾。超深嵌岩桩（ $> 60\text{m}$ ）施工能耗达常规桩基3倍，与碳中和目标冲突；环保注浆材料强度不足（ $< 150\text{kPa}$ ），碎裂岩体加固效果受限。

(2) 韧性结构创新。智能支护体系：基于BIM+GIS的数字孪生平台动态优化抗滑桩深度（如隧道工程减载 30% ）；碳纤维加固技术提升梁柱抗震韧性，承载力增幅 $> 40\%$ 且碳排放降低 50% 。自适应地基处理：岩溶区采用桩端后压浆技术，端阻力突破 8000kN ；软土地基预压排水+微膨胀注浆，承载力提升至 200kPa 。

(3) 政策与标准升级。中国强制推行“地质风险数据库共享机制”，促进行业数据互联互通；全球绿色建筑标准纳入地质灾害防治条款，驱动低碳加固技术研发。

总之，在复杂地质条件下，深基坑支护结构稳定性施工技术的研究不仅是对工程安全的保障，更是技术创新与实践的结晶。通过深入探索与不断优化取得显著成果，有效提升了施工效率与质量。

参考文献

- [1]王天敏,明挖隧道深基坑支护施工及结构稳定性探析.2023.
- [2]李雪晓,复杂地质条件下建筑结构稳定性研究.2023.