

水工环条件下场区岩土工程勘察与稳定性评价

罗绪程

西藏承安工程勘测有限公司 湖南 岳阳 850000

【摘要】：水工环地质耦合作用是诱发场区滑坡、地基沉降、岩溶塌陷等地质灾害的核心诱因，传统岩土工程勘察多割裂水文、工程、环境地质要素开展独立分析，难以精准判别水-岩土协同作用下的场区失稳风险。本文以长江沿岸沿江开发工程场区为研究对象，综合采用钻探、原位测试、水理化取样试验开展精细化岩土勘察，系统梳理场区地下水渗流、岩土体结构、地表人类工程活动三类水工环要素的相互作用机制；通过试验获取土层强度、渗透、压缩等力学参数，构建多因素耦合稳定性计算模型完成场区分区评价。结果表明，场区浅层粉质黏土受地下水长期浸泡后抗剪强度衰减 22%，临江边坡稳定安全系数仅 1.03，存在浅层滑移隐患。本文提出针对性勘察优化流程与边坡防控措施，可为沿江同类场区岩土勘察、地质灾害稳定性评估提供标准化技术思路。

【关键词】：水工环地质；岩土工程勘察；边坡稳定性

DOI:10.12417/2811-0536.26.09.057

引言

随着长江经济带建设快速推进，沿江工业场地、市政配套工程大量建设，水工环地质耦合作用对场地地基、边坡稳定性的制约愈发显著。地下水渗流软化土体、地表径流冲刷坡体、工程开挖堆载扰动地层应力，多因素叠加易引发滑坡、不均匀沉降等地质灾害，因此水工环一体化勘察与稳定性评价是当前岩土工程领域的重点研究方向^[1]。

当前国内岩土勘察体系存在明显短板：一是多侧重岩土指标检测，忽视地下水丰枯周期波动对土体强度的弱化影响，试验参数与实际工况偏差较大^[2]；二是边坡稳定性评价多采用单一极限平衡法，未考虑水工环多因素修正，评价结果偏保守乐观^[3]；三是水工环资料独立罗列、缺乏耦合分析，难以支撑场地设计与灾害防控。现有规范未形成适配临江软土场区的成套勘察技术标准。

基于以上问题，本文以长江南岸综合堆场工程为依托，开展水工环一体化勘察，通过现场测试与室内试验量化水作用下岩土性能劣化规律，结合多因素耦合方法完成场区稳定性分区评价。研究完善了临江软土地勘技术体系，可有效规避地质灾害风险，为长江沿岸同类工程勘察设计与灾害防控提供理论与工程参考。

1 场区水工环地质基础条件

本次研究场区地处长江南岸一级阶地地带，总占地面积约 0.42km²，规划建设货物综合堆场、配套市政道路及轻型仓储建筑，场地东侧紧邻长江岸线，形成人工开挖边坡，边坡整体高度 4.5~8.2m，区域地下水与长江地表水直接水力连通，水、岩土、人类工程

活动耦合作用强烈，整体水工环地质条件复杂。现场先期开展 1:1000 大比例尺水工环地质测绘，完整梳理区域地层、地下水、环境扰动基础特征。

1.1 工程地质条件

场区整体地形平缓，地势由西向东缓慢向长江江岸倾斜，区域无活动性断裂构造，地层受长江沉积作用控制，自上而下沉积层序稳定，依次为杂填土、粉质黏土、淤泥质黏土、粉砂、中风化泥岩。表层杂填土为后期场地整平堆填形成，填料混杂建筑垃圾与粉质黏土，均匀性极差，压缩性高，不可直接作为建筑持力层；淤泥质黏土全场连续分布，饱和状态呈流塑、软塑状态，孔隙比大、渗透性能中等，是场地主要软弱控制地层；下部粉砂层为场区主要含水层，层厚稳定，与长江水体直接贯通；底部中风化泥岩完整性较好，岩体强度高，为稳定基岩持力层。各地层分布厚度随地形起伏存在小幅变化，东侧临江区域软土厚度显著大于场地西侧。

1.2 水文地质条件

场区地下水分为上层滞水与孔隙承压水两类。上层滞水赋存于表层填土、浅层粉质黏土孔隙中，补给来源为大气降雨入渗，水位受季节降雨影响波动明显；孔隙承压水赋存于粉砂层内，直接与长江水体连通，丰水期江水抬升同步带动场内承压水位上涨，年内水位最大涨幅可达 3.2m。地下水水样室内理化检测结果显示水体呈弱酸性，硫酸根离子含量超标，长期持续浸泡会缓慢溶蚀土体颗粒间胶结物质，大幅降低黏性土黏聚力与内摩擦角指标^[4]。长江汛期高水位阶段，地下水向边坡表层土体反向渗流，会进一步加剧坡体软化。

1.3 环境地质条件

场地周边及内部存在多类人工工程扰动：北侧存在前期基坑开挖遗留坑体，开挖深度 6m；规划堆场区域后期存在大面积堆载，设计最大堆载高度 6m；东侧人工切坡未设置完善截排水系统，汛期雨水直接冲刷坡脚。场地原生植被破坏严重，地表裸露土体面积大，降雨冲刷易引发表层水土流失。区域地震设防烈度 6 度，地震动峰值加速度 0.05g，地震荷载诱发土体液化风险较低，但软土在地下水、外部堆载耦合作用下，极易产生不均匀沉降与浅层圆弧滑移病害。

2 场区岩土工程勘察方案与试验成果

2.1 勘察点位布置

结合场地水工环分区特征，采用网格加密、重点区域强化的布孔原则开展勘察工作。全场共布设 26 个工程钻探孔、12 个静力触探原位测试孔、6 组地下水长期自动监测井，钻孔沿东侧临江边坡、中部规划堆载区、地下水主径流带加密布设，兼顾不同地层、不同水文分区均匀覆盖。所有钻探孔终孔深度穿透软土层，深入中风化泥岩不少于 3m，钻探过程同步采集原状土样、地下水水样；原位测试同步开展十字板剪切、旁压试验，补充获取原位土体强度参数；地下水监测井持续监测完整丰、枯水周期，记录水位、水温动态变化。整套勘察流程严格遵循《岩土工程勘察规范》GB 50021-2018 相关要求，实现水文、工程、环境地质数据同步采集。

2.2 岩土体物理力学试验结果

现场采集原状土样密封送检，开展固结快剪、常水头渗透、单向压缩等标准化室内土工试验，同步完成地下水腐蚀性检测，汇总整理场区各地层岩土体物理力学参数统计表，见表 1。

表 1 场区各地层岩土体物理力学参数统计表

地层名称	天然含水率/%	渗透系数(cm/s)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ /°	压缩模量 Es/MPa
杂填土	34.6	6.2×10^{-4}	8.3	9.2	3.6
粉质黏土	38.2	3.1×10^{-5}	16.7	11.5	5.8
淤泥质黏土	49.5	8.7×10^{-5}	7.1	6.3	2.4
粉砂	27.3	1.4×10^{-3}	4.2	24.6	11.3
中风化泥岩	12.1	1.2×10^{-7}	46.2	28.1	36.7

由表 1 数据能够直观看出，淤泥质黏土天然含水率全场最高，黏聚力、压缩模量数值最低，土体工程性能最差。对比干燥、饱和两组平行试样试验数据可知，地下水长期饱和浸泡后，淤泥质黏土黏聚力衰减幅度可达 22%，是控制场区边坡、地基整体稳定性的核心薄弱地层^[5]。地下水腐蚀检测结果表明水体对混凝土结构存在弱腐蚀性，基础设计阶段需配套防腐构造措施。粉砂层渗透系数大，汛期渗流作用显著，易在分界面形成渗流软化带。

3 水工环耦合作用下场区稳定性计算与分区评价

3.1 稳定性计算方法

本次边坡稳定性计算选用瑞典条分刚体极限平衡法，区别于传统单一工况计算模式，叠加地下水渗流渗透力、地表堆载附加应力、降雨入渗软化三类水工环修正系数，分别设置枯水期低水位、丰水期高水位两种典型工况开展计算。依据《建筑边坡工程技术规范》GB 50330-2013，场区永久性边坡安全系数临界控制值为 1.20，计算安全系数小于 1.20 划定为高失稳风险区；1.20~1.35 区间为中等沉降风险区；大于 1.35 判定为稳定安全区域。计算过程中将地下水渗流力等效为条块体积力，同步引入饱和和土体强度折减系数，还原真实水-土耦合受力状态。

3.2 分区稳定性评价结果

(1)高风险失稳区：场地东侧临江人工开挖边坡，丰水期地下水位抬升，淤泥质黏土层完全饱和和软化，土体抗剪强度大幅折减，边坡整体计算安全系数仅 $1.03 < \text{规范临界值 } 1.20$ ，极易发生浅层圆弧滑移。一旦发生滑坡，将直接威胁后方仓储建筑与沿江道路运营安全，为场地重点治理区段。

(2)低风险沉降区：场地中部规划大面积堆载区域，下部淤泥质软土厚度普遍大于 8m，地下水长期渗流会持续压缩土体孔隙，在后期堆载附加应力作用下易产生大范围不均匀沉降，计算安全系数 1.24，满足边坡稳定要求，但地基变形无法满足仓储建筑使用标准，需开展专项软土地基处理。

(3)稳定安全区：场地西侧近边界区域，中风化泥岩埋深较浅，上部软土厚度不足 2m，岩土体天然强度高，地下水渗流影响微弱，两种水位工况下安全系数均大于 1.35，无滑坡、大幅沉降风险，可直接作为建筑基础建设场地。

综合水工环耦合计算结果可证明，地下水季节性动态变化是控制场区整体稳定的第一主导因素，仅开展干燥状态土体力学指标勘察，完全无法预判汛期失

稳风险,必须同步开展水文、工程、环境地质一体化耦合分析,才能完成精准地质风险评价^[6]。

4 基于水工环条件的场区勘察优化与防控对策

4.1 岩土勘察技术优化措施

针对传统勘察割裂水工环要素、参数失真的行业短板,本文提出三项成套优化勘察技术。第一,延长地下水监测周期,完整覆盖全年丰、枯水期,逐月记录水位、水体化学指标变化,量化水位周期性波动对黏性土强度的劣化规律,避免仅单次取水检测带来的数据片面性;第二,钻探勘察全过程同步开展地表水径流、地表植被、工程扰动类型的环境地质专项调查,采集地形、堆载、切坡尺寸等量化数据,搭建水工环多要素联动数据库,为稳定性计算提供完整修正参数;第三,增加饱和状态原状土平行试验组数,统一采用现场原位饱和试样开展剪切试验,消除标准养护干燥试样带来的强度参数正偏差,提升评价计算精准度。在此基础上引入 BIM 数字化建模,将地层、地下水位、工程扰动范围三维可视化,直观识别水工环高耦合风险带。

4.2 场区地质灾害综合防控措施

结合场区三类稳定性分区结果,分边坡、软土地基、地下水管控三个维度配套差异化治理方案。其一,东侧临江高风险边坡:坡顶、坡脚同步修建混凝土截排水沟槽,阻断大气降雨与江水反向渗流通道,主体支护采用微型桩+土工格栅复合支护体系,分层加固浅层软土,抑制圆弧滑移;其二,中部软土堆载沉降

区:采用淤泥换填结合塑料排水板预压固结工艺,提前排出软土孔隙水,减小后期堆载引发的压缩变形;其三,全场布设自动化地下水监测井,远程实时传输水位数据,设置水位预警阈值,汛期地下水位超限及时启动应急排水措施,从源头弱化水环境带来的土体劣化作用。同时规定工程施工期开展动态跟踪勘察,每季度复测土体强度与地下水位,动态调整支护、地基处理方案。

5 结论

本文以长江沿岸临江软土场区为研究对象,开展水工环一体化岩土勘察,结合现场测试与室内试验量化地下水对岩土力学性能的劣化规律,通过多因素耦合极限平衡法完成场区稳定性分区评价,明确地下水渗流、厚层软土、人工扰动为场区失稳的核心诱因,构建了适配沿江软土地场的勘察与稳定性评价技术体系。

(1)场区淤泥质黏土受地下水饱和浸泡后强度大幅衰减,丰水期临江边坡安全系数不满足规范要求,存在浅层滑坡隐患,水工环耦合分析是精准识别场地地质风险的核心手段。

(2)传统单一勘察模式忽略地下水动态与工程扰动的叠加作用,力学参数存在偏差,水工环一体化勘察方案可有效提升稳定性评价结果的可靠性。

(3)依据场区稳定分区实施差异化支护、排水、软基处理措施,可有效削弱水工环不利影响,为沿江同类软土地场勘察设计与灾害治理提供标准化参考。

参考文献:

- [1] 殷跃平,李辉,张加桂.水工环一体化地质勘察技术体系构建与工程应用[J].工程地质学报,2021,29(02):312-320.
- [2] 黄润秋,李果,裴向军.地下水动态作用下软土边坡强度劣化机理研究[J].岩土工程学报,2022,44(05):891-899.
- [3] 刘新荣,傅晏,王军保.考虑人类工程扰动的边坡稳定性修正计算方法[J].岩石力学与工程学报,2023,42(S1):2841-2848.
- [4] 唐辉明,胡斌,章广成.长江沿岸软土地场水-土相互作用试验研究[J].岩土力学,2022,43(08):2197-2206.
- [5] 陈卫忠,于洪丹,杨建平.饱和黏性土渗流作用下抗剪强度衰减规律试验[J].岩土工程学报,2024,46(03):521-528.
- [6] 王清,陈慧娥,张静.水工环多因素耦合下场地地质风险分区评价方法[J].吉林大学学报(地球科学版),2024,54(04):1162-1170.