

文章编号: 1005-0523(2026)02-0055-10



降雨条件下高放坡悬臂支护基坑变形和稳定性分析

张海行¹, 董聪慧², 喻鲲鹏¹, 程闯², 徐鑫洋^{3,4}, 陈顺满^{3,4}

(1. 中铁隧道局集团三处有限公司, 广东 深圳 518051; 2. 中铁南方投资集团有限公司, 广东 深圳 518052; 3. 华东交通大学江西省防灾减灾及应急管理重点实验室, 江西 南昌 330013; 4. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 为研究降雨条件下高放坡基坑开挖时其悬臂围护结构的服役性能。以深圳市五和城际枢纽车站高放坡下沉广场基坑为研究对象, 基于现场实测, 分析连续强降雨条件下高放坡基坑悬臂围护地连墙的墙顶位移演化规律; 重点考察ZQ-8高风险监测断面, 计算出坑外降雨饱和区土体深度, 使用强度折减法对坑外表层饱和土体及坑底土做软化处理; 并采用数值模拟分析, 研究坑外软化、坑内软化及锚索加固对地连墙内力和变形的影响规律。结果表明: 在坑内外土体均软化情况下, 地连墙最大弯矩达到1 600 kN·m, 接近极限设计弯矩, 围护结构最大水平位移达到76.0 mm; 针对连续降雨条件下发生大变形的高放坡悬臂支护基坑, 可采用预应力锚索进行应急处置, 而采用堆载反压的效果有限。该研究成果可为现场进行安全施工提供理论支撑, 也可为其他类似工程提供一定的参考。

关键词: 降雨; 高放坡悬臂支护基坑; 强度折减法; 预应力锚索

中图分类号: TU447

文献标志码: A

本文引用格式: 张海行, 董聪慧, 喻鲲鹏, 等. 降雨条件下高放坡悬臂支护基坑变形和稳定性分析[J]. 华东交通大学学报, 2026, 43(2): 55-64.

Deformation and Stability Analysis of Cantilever-Supported Foundation Pit with High Slopes Under Rainfall Conditions

Zhang Haihang¹, Dong Conghui², Yu Kunpeng¹, Cheng Chuang², Xu Xinyang^{3,4}, Chen Shunman^{3,4}

(1. China Railway Tunnel Group Third Division Co., Ltd., Shenzhen 518051, China; 2. China Railway South Investment Group Co., Ltd., Shenzhen 518052, China; 3. Jiangxi Key Laboratory of Disaster Prevention mitigation and Emergency Management, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 4. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The objective of this study is to examine the service performance of a cantilevered enclosure during the excavation of a high slope pit under rainfall conditions. The high slope sinking plaza pit of Shenzhen Wuhe Intercity Hub Station is taken as the research object. Based on the field measurements, an analysis is conducted of the evolution of the wall top displacement of the cantilevered enclosure diaphragm wall of the high slope pit under the condition of continuous heavy rainfall. This study focuses on the ZQ-8 hazardous monitoring section. The depth of the soil body in the saturated area outside the pit was calculated, and the saturated soil and soil at the bottom of the pit outside the pit were softened using the strength reduction method. A numerical simulation

收稿日期: 2024-10-30

基金项目: 江西省国家级高层次人才创新创业项目(2022S001); 江西省防灾减灾及应急管理重点实验室项目(2021BCD42011); 江西省自然科学基金面上项目(20232BAB204092)

analysis was conducted to study the softening of soil outside the pit. A simulation analysis was employed to investigate the impact of soil softening both within and outside the pit, as well as the reinforcement of anchor cables, on the internal force and deformation of the ground connecting wall. The results demonstrate that: In the event of soil softening within and around the pit, the maximum bending moment of the ground-connected wall reaches 1 600 kN·m, which is in close proximity to the ultimate design bending moment. Additionally, the maximum horizontal displacement of the enclosure reaches 76.0 mm; In the case of significant deformation of a cantilever-supported foundation pit with high slopes under continuous rainfall conditions, the use of prestressed anchor cables for emergency treatment is recommended, while backfill counterpressure has limited efficacy. The research findings can provide theoretical support for safe construction in the field and can also serve as a reference for other similar projects.

Key words: rainfall; cantilever-supported foundation pit with high slopes; strength reduction method; prestressed anchor cables

Citation format: ZHANG H H , DONG C H , YU K P, et al. Deformation and stability analysis of cantilever-supported foundation pit with high slopes under rainfall conditions[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2026, 43(2): 55-64.

顶部低放坡的基坑,通常不考虑顶部放坡本身的变形与稳定,而是将其简化为地面超载,依据相关基坑支护理论和规范即可得到较好解决^[1]。然而,对于顶部高放坡基坑,尤其是经济适用的悬臂支护基坑,顶部边坡的稳定性与变形可能影响下部支护结构的内力和变形。此外,在降雨等环境条件下,易导致边坡和悬臂支护结构变形过大,甚至失稳破坏^[2]。例如,2024年3月开工的深圳市五和城际枢纽车站高放坡下沉广场基坑,其坑顶放坡高度与基坑开挖深度相当。在连续强降雨条件下,基坑发生了过量变形,坑顶混凝土路面出现较大裂缝,危及基坑安全。

降雨不仅增加边坡土体自重,还会提高土体含水率^[3]、降低土体抗剪强度^[4]、减小入渗深度内非饱和土体的基质吸力^[5],从而引起边坡和基坑的附加变形,影响基坑的稳定性与安全^[6]。石振明等^[7]对Green-Ampt入渗模型进行了优化,开发出了一种适用于多层非饱和土壤边坡在降雨条件下入渗的计算方法。徐全等^[8]结合了饱和与非饱和渗透分析及强度折减法,探讨了饱和渗透系数及降雨强度对边坡安全系数及滑面位置的影响。高润德等^[9]基于非饱和土理论,通过极限平衡理论和有限元方法,研究了雨水入渗对边坡稳定性的影响。任东兴等^[10]利用ABAQUS软件模拟了降雨入渗对土体强度参

数弱化的过程,分析暴雨条件下边坡的应力变形特征及其稳定性。此外,由于降雨入渗会导致非饱和土基边坡发生变形,从而导致基坑周围地表产生不均匀沉降,彭立新^[11]从降雨入渗的角度对地铁基坑边坡变形进行研究。刘畅等^[12]依据天津市基坑展开实测,通过Plaxis 2D有限元分析软件,探究了降雨对软土基坑支护结构变形的影响机制。侯福金等^[13]采用数值模拟技术,分析了在不同降雨入渗时间条件下支护结构的受力和变形特性的变化。综上所述,当前研究降雨对岩土工程影响主要依赖理论分析和数值模拟两种方法,旨在探讨降雨对黄土、残积土或坡积土等非饱和土边坡稳定性的影响以及降雨与入渗深度之间的关系。然而,关于降雨对高放坡悬臂支护基坑影响的研究相对较少。

本文以深圳市五和城际枢纽车站高放坡下沉广场悬臂支护基坑为工程背景,首先,基于现场实测数据,分析连续强降雨条件下地连墙墙体的侧向变形演化规律;进而,重点考察先期施工的ZQ-8高风险监测断面,计算坑外降雨饱和区土体深度,采用强度折减法对基坑内外土体进行软化处理,并利用Plaxis 2D有限元软件,模拟分析降雨对高放坡基坑支护结构内力和变形的影响;最后,研究预应力锚索和堆载反压(回填土)等加固措施对地连墙内力和变形发展的控制效果,为现场施工提供理论依

据和技术指导。

1 降雨条件下高放坡悬臂支护基坑变形与稳定性分析

1.1 基坑支护变形与稳定性分析方法

基坑施工过程中,降雨的影响不容忽视,尤其在软土地层。强降雨作用下,雨水从地表持续入渗,在浅层土体中形成饱和区,导致软土重度增加、孔隙水压力急剧上升,进而显著降低土体抗剪强度,加剧围护结构变形,降低地连墙安全性。本文结合带边坡基坑在降雨条件下的施工实际,采用强度折减法计算降雨对围护结构的影响,其表达式如下

$$\tau' = \frac{\tau}{F_s} = \frac{c + \sigma \tan \varphi}{F_s} = \frac{c}{F_s} + \sigma \frac{\tan \varphi}{F_s} = c' + \sigma \tan \varphi' \quad (1)$$

其中,

$$\sigma = \sigma' + u_w \quad (2)$$

$$\begin{cases} c' = \frac{c}{F_s} \\ \varphi' = \arctan\left(\frac{\tan \varphi}{F_s}\right) \end{cases} \quad (3)$$

式中: σ 、 σ' 分别为破坏面上的法向应力及法向有效应力,MPa; τ 、 τ' 分别为任一平面的抗剪强度及有效剪应力,MPa; c 、 c' 为土体实际和达到极限状态时的内聚力,kPa; φ 、 φ' 为土体实际和达到极限状态时的摩擦角,(°); F_s 为折减系数。

典型软土遇水后强度下降易软化,而以砾质黏性土、风化花岗岩为代表的花岗岩残积土一般具有高孔隙比、高强度、中低压缩性,尤其是具有遇水软化崩解的特点^[14],本文将折减的岩土力学参数赋值于对应的暂态饱和区,运用强度折减法研究降雨土体软化条件下高放坡基坑悬臂支护变形及其稳定性。

1.2 土体降雨入渗深度理论计算

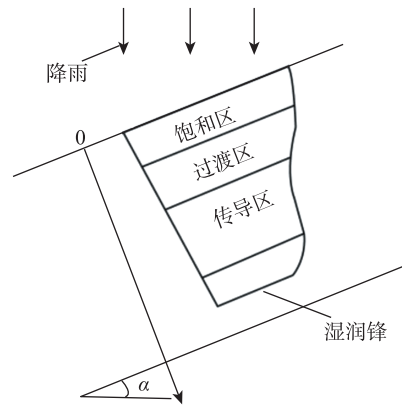
分析软土高放坡悬臂支护基坑在降雨条件下的渗流场变化时,由于雨水入渗深度较浅,饱和区与非饱和区相互连通,可将其视为饱和-非饱和渗流问题。达西定律常用于研究土体入渗规律,通过引入土-水势为因变量建立统一的控制方程,使得饱和-非饱和渗流满足达西定律的非恒定渗流规律,根据Richards方程^[15],非饱和非稳定渗流的二维控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x(h_m) \frac{\partial h_m}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z(h_m) \frac{\partial h_m}{\partial z} \right] = C(h_m) \frac{\partial h_m}{\partial t} \quad (4)$$

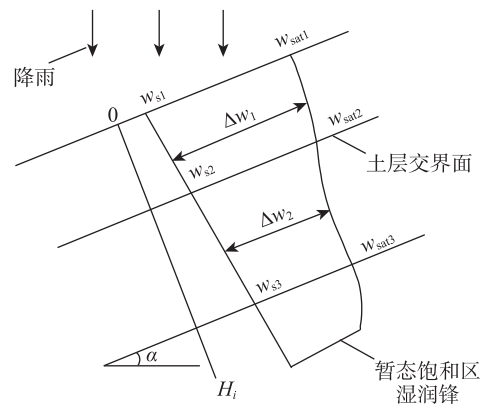
式中: h_m 为基质吸力水头; k_x 和 k_z 为水平与竖直方向的渗透系数; C 为土水特征函数曲线斜率; x 、 z 分别为水平、竖直方向; t 为降雨时间,d。

图1为降雨入渗过程中典型分区和含水率分布剖面图,在强降雨时,雨水从表层土渗入,随着时间的推移,表层土以下一定深度土体从非饱和入渗达到饱和入渗,根据胡庆国等^[16]提出的多层结构土质边坡降雨入渗模型,土体内部部分成4个区域,从坡体表面自上而下依次为:饱和区,过渡区,传导区,湿润区。

当降雨强度小于最上层土体渗透系数时,该土层中的雨水入渗由降雨强度所控制,其余土层的雨水入渗速率由自身渗透系数控制。各土层的入渗



(a) 降雨入渗土体分区



(b) 降雨入渗土体含水率分布

图1 降雨入渗土体典型分区和含水率分布剖面图
Fig. 1 Typical water content distribution and zonal profiles during rainfall infiltration

时间及入渗深度^[2]可表示为

$$t_i = \frac{w_{\text{sat}i} - w_{\text{sl}}}{q \cos \alpha} \cdot h_1 + \frac{\lambda_i \sum_{j=2}^i (w_{\text{sat}j} - w_{\text{sl}}) h_j}{k_i \cos \alpha} \quad (5)$$

$$H_i = \frac{q \cos \alpha}{w_{\text{sat}1} - w_{\text{sl}}} \cdot t_1 + \sum_{j=2}^i \frac{k_j \cos \alpha}{\lambda_j (w_{\text{sat}j} - w_{\text{sl}})} \cdot \left(t - \sum_{l=1}^{j-1} t_l \right) \quad (6)$$

式中: t_i 为土层 $i-1$ 与土层 i 夹层处出现暂态饱和区时间, d ; H_i 为土层 i 的入渗深度, m ; k_i 为土层 i 的渗透系数; $\lambda_i = k_1/k_i$, 即第 1 层土体与第 i 层土体渗透系数之比; $w_{\text{sat}i}$ 为土层 i 的饱和含水率; w_{sl} 为土层 i 的初始含水率; q 为降雨强度, mm/d ; α 为坡角, $(^\circ)$; t 为总降雨时间, d 。

当降雨强度大于最上层土体渗透系数时, 则有

$$t_i = \frac{\lambda_i \sum_{j=1}^i (w_{\text{sat}j} - w_{\text{sl}}) h_j}{k_i \cos \alpha} \quad (7)$$

$$H_i = \sum_{j=1}^i \frac{k_j \cos \alpha}{\lambda_j (w_{\text{sat}j} - w_{\text{sl}})} \cdot \left(t - \sum_{l=1}^{j-1} t_l \right) \quad (8)$$

2 工程概况

广东深圳市五和站为深圳至大亚湾(深大)城际铁路的枢纽站, 车站全长 965.0 m、宽 61.5 m、最大挖深 52.7 m, 属超深超大城际枢纽车站基坑。车站主体结构被既有 10 号线五和站自然分隔成东西两个区域: 西区主体结构位于布龙路正下方, 主体结构采用盖挖法施工, 下穿既有地铁 10 号线五和站采用暗挖法施工。车站基坑平面布置如图 2 所示。

由于车站位于繁华的布龙路与五和路交汇区域, 交通疏解复杂。经过多次论证, 最终采用一次性交通疏解的基坑开挖方案。疏解道路需通过下沉广场段, 采用在顶板上修筑挡墙的支持方案。在修筑挡墙前, 该区域采用高放坡结合悬臂支护的基坑开挖支护方案。



图 2 深圳市五和城际枢纽站平面图

Fig. 2 Plan of Shenzhen Wuhe intercity hub station

2.1 下沉广场高放坡悬臂支护基坑

作为交通疏导先行段, 下沉广场采用高放坡悬臂支护基坑开挖, 最先开挖断面位于 ZQ-8, 如图 3 所示。基坑顶部放坡高度约 6.5 m, 坡度为 1:1, 采用长度 6.0 m 的土钉和厚度 10 cm 的 C20 混凝土喷射混凝土支护; 坡脚设置排水沟, 马道宽度 3.5 m; 基坑至顶板开挖深度 7.0 m, 采用厚度为 1.2 m 的 C40 钢筋混凝土地连墙作为围护结构。

地表至地连墙底部土层分布为: 素填土、砾质黏性土、全风化花岗岩、土状强风化花岗岩和微风化花岗岩。

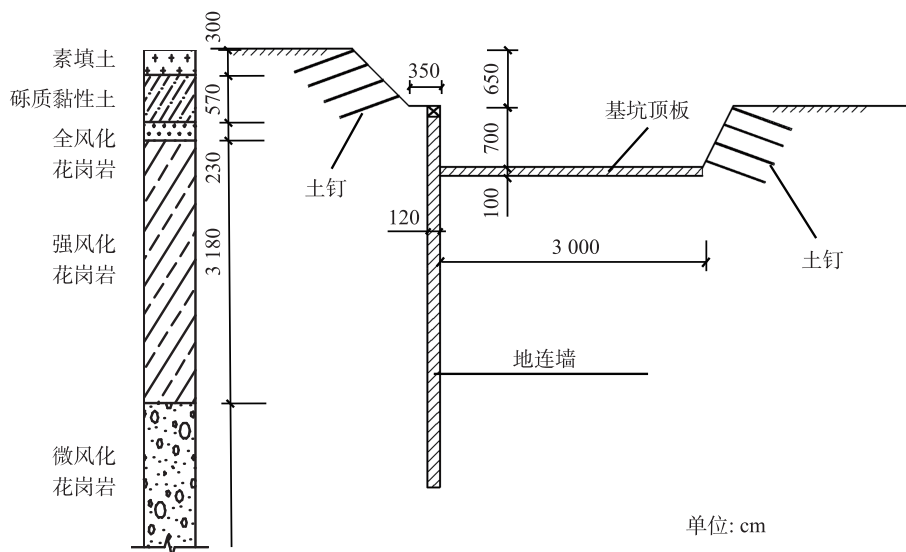


图 3 基坑 ZQ-8 剖面示意图

Fig. 3 Schematic of pit ZQ-8 profile

2.2 支护结构变形随降雨发展过程

根据深圳市五和站(深圳至大亚湾城际铁路枢纽站)现场施工情况,下沉广场基坑ZQ-8断面于2024年3月8日开始开挖,3月20日挖至设计标高并开始施工顶板垫层,此后约1个月内无其他施工。在2024年3月8日至4月22日期间,该区域经历多次降雨。表1列出了现场降雨量及墙顶水平位移监测值,其中3月21日至23日降雨强度最大,3d累计降雨量达189.7 mm。

图4为3月8日至4月22日降雨量及地连墙顶、

边坡沉降日增位移统计情况,图5为地连墙水平位移实测值。由图可知,地连墙顶水平位移日增量与边坡沉降日增量的发展与降雨量密切相关。3月8日至3月20日处于基坑开挖阶段,地连墙顶水平位移与边坡沉降变化较快,这是由于基坑开挖卸荷后,受扰动土体需经历应力重分布、蠕变和固结过程才能达到稳定,期间位移持续发展。

其中,3月8日至3月12日受连续降雨影响,支护结构水平位移日增量超过2.00 mm/d;该高放坡基坑在3月21日至23日遭遇强降雨。结合降雨量

表1 降雨量与墙顶水平位移监测值

Tab.1 Monitoring values of rainfall and horizontal displacement of the top of the wall

日期	日降雨量/mm	墙顶水平位移累计值/mm	墙顶水平位移日增量/mm	边坡沉降累计值/mm	边坡沉降日增量/mm	施工进度情况
3月8日	24.5	6.60	0	-19.16	0	场坪清理
3月10日	30.3	6.75	0.95	-20.43	-0.77	土方开挖
3月19日	8.3	27.65	3.50	-21.83	-0.29	土方开挖
3月21日	44.2	34.36	3.24	-22.19	-0.19	挖至坑底,施工顶板垫层
3月22日	107.7	39.54	5.18	-22.60	-0.41	挖至坑底,施工顶板垫层
3月23日	37.8	48.12	8.58	-23.69	-1.09	顶板支模
4月6日	20.5	51.90	0.32	-23.43	-0.05	顶板钢筋网绑扎
4月8日	30.4	52.95	0.34	-23.54	-0.08	顶板浇筑
4月18日	37.0	56.78	0.43	-25.05	-0.72	顶板养护
4月19日	35.1	57.69	0.91	-26.03	-0.98	顶板养护
4月20日	60.7	58.96	1.27	-27.10	-1.07	顶板养护
4月21日	25.1	62.00	3.04	-28.28	-1.18	顶板养护

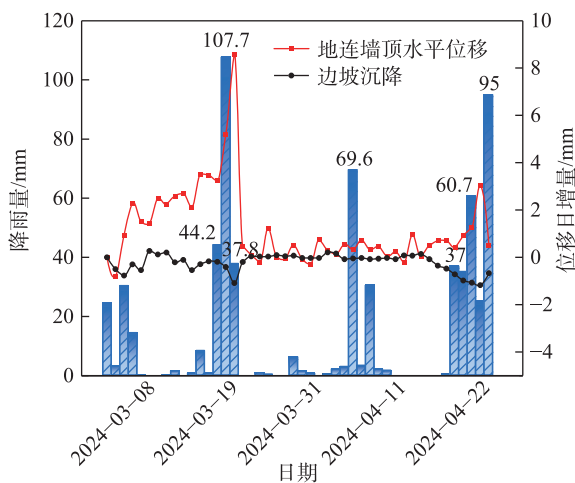


图4 3月8日至4月22日降雨量及地连墙顶、边坡沉降日增位移统计

Fig. 4 Statistics of rainfall and daily incremental displacement of diaphragm wall top and slope settlement from March 8 to April 22

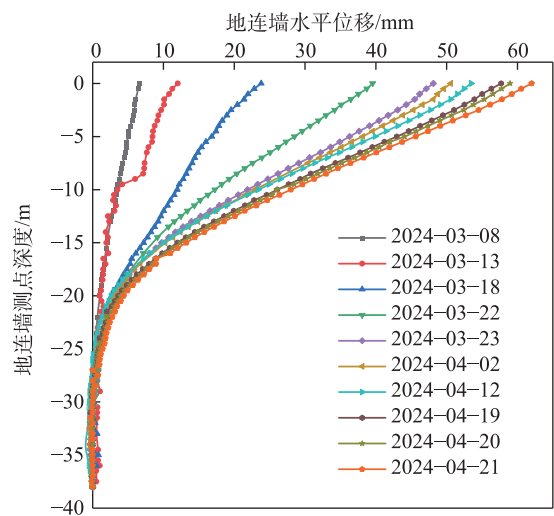


图5 3月8日至4月22日地连墙水平位移实测值

Fig. 5 Measured horizontal displacements of diaphragm wall from March 8 to April 22

统计(表1)可知,此期间基坑已开挖至设计坑底但尚未施作底板。此时,支护结构水平位移日增量达到最大值 8.58 mm/d,边坡沉降日增量也超过 1.00 mm/d,地连墙顶累计变形达 39.54 mm,远超现场位移监测预警值。此后约 25 d 内无明显降雨,该时段支护结构位移日增量小于 1.00 mm/d。然而,4月18日至21日再次遭遇连续降雨,支护结构水平位移继续发展,日增量由 0.43 mm/d 增至 3.04 mm/d,边坡沉降日增量也再次超过 1.00 mm/d。这表明降雨在基坑施工过程中会导致围护结构位移显著增大。因此,有必要开展降雨对高放坡悬臂支护基坑变形与稳定性的分析研究。

3 数值模拟分析

3.1 高放坡悬臂支护基坑有限元模型

采用Plaxis 2D软件建立ZQ-8高风险监测断面的平面应变有限元模型(图6),单元类型为15节点三角形单元。模型边界尺寸为250.0 m(长)×86.5 m(高)。基坑开挖深度7.0 m,宽度30.0 m。土体本构采用小应变土体硬化模型(HSS),其屈服准则为莫尔-库仑准则。基坑范围内包含5层土体。地连墙采用板单元模拟,墙土接触面采用界面单元(inter-

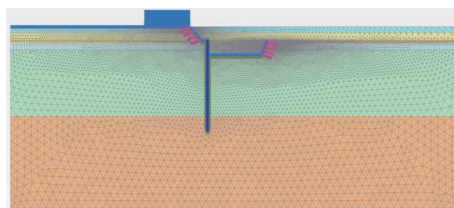


图6 基坑有限元数值计算模型

Fig. 6 Numerical calculation model of pit finite element

face)模拟。坑外初始地下水位位于地表下7.1 m,坑内水位降至坑底以下1.0 m。土体排水类型设为排水,地下水渗流按稳态计算,孔压由水头边界条件控制。网格模型见图6。模型共划分32 248个单元,261 487个节点。

3.2 土体力学参数

本模型采用的土体物理力学参数详见表2。降雨初期,土体含水率较低,雨水大量从地表入渗。随着雨水持续向非饱和区入渗,非饱和土体孔隙被填充,含水率逐渐升高,最终由非饱和状态转变为饱和状态。表层土体饱和软化后,其重度增加,强度降低。基坑施工前已进行降水,坑内土体呈非饱和状态。开挖至设计标高后,暴露的坑底受降雨影响,雨水汇集,导致坑底水位线以上土体发生软化。

表2 土体物理力学参数指标

Tab.2 Indicators of physical and mechanical soil parameters

土层	土层厚度/m	重度/(kN/m ³)	E_{50}^{ref} / (MPa)	E_{oed}^{ref} / (MPa)	E_{ur}^{ref} / (MPa)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角/(°)	渗透系数/(m/d)
素填土	3.0	17.10	2.7	2.7	8.1	12.0	10.0	0.5
砾质黏性土	5.7	17.58	5.0	5.0	15.0	26.0	24.0	0.8
全风化花岗岩	2.3	17.89	10.0	10.0	30.0	28.0	26.5	0.5
强风化花岗岩	31.8	18.74	15.0	15.0	45.0	32.0	28.5	0.5
微风化花岗岩	43.7	26.50	250.0	250.0	1 250.0	2 000.0	40.0	0.3

为研究降雨对基坑围护结构的影响,需对坑内外土体软化效应进行分析。根据刘畅等^[12]的室内试验结果,在雨水入渗深度范围内,饱和度70%的软土达到饱和状态时,其黏聚力降低50%、内摩擦角降低30%、压缩模量降低48%。饱和度84%的土体黏聚力降低15%、内摩擦角降低14%、压缩模量降低38%。根据现场土体参数,素填土、砾质黏性土、全风化花岗岩的初始饱和度约为73.2%,土状强风化花岗岩初始饱和度约为76.0%。基于饱和度70%和84%土体的软化规律,采用线性内插法确定坑内外饱和和软化土体的参数,如表3所示。

3.3 降雨对支护结构变形的影响

3.3.1 坑外土体软化对基坑围护结构影响分析

根据表1降雨数据,3月22日降雨量最大(107.7 mm),小于坑外表层素填土的渗透系数(0.5 m/d)。该素填土饱和含水率为40%,天然含水率约25%~28%。依据式(5)和式(6),按最大日降雨量计算,3.0 m厚素填土层达到饱和和所需时间约为5.5~6.4 d。模型计算时长取24 h,得到坑外表层饱和带深度约为0.5~0.6 m。根据图1的土体分区概念,饱和区下方的过渡区土体含水率也高于天然含水率。因此,对坑外表层软化土体进行等效处

表3 坑内外土体软化后(饱和土体)物理力学参数

Tab.3 Physical-mechanical parameters of soil after softening (saturated soil) inside and outside the pit

土层	土层厚度/ m	重度/ (kN/m ³)	E_{50}^{ref} / (MPa)	E_{oed}^{ref} / (MPa)	E_{ur}^{ref} / (MPa)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角/ (°)	渗透系数/ (m/d)
素填土	3.0	18.5	1.5	1.5	4.5	7.0	7.4	0.5
砾质黏性土	5.7	19.5	2.71	2.71	8.13	15.1	17.7	0.8
全风化花岗岩	2.3	20.3	5.43	5.43	16.29	16.2	19.5	0.5
强风化花岗岩	31.8	20.8	8.44	8.44	25.32	20.8	21.9	0.5

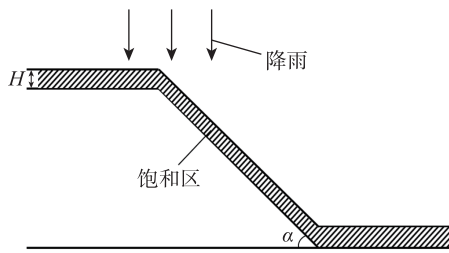


图7 坑外表层土软化示意图

Fig. 7 Schematic of softening of topsoil outside the pit

理,取饱和影响深度为1.0 m进行计算分析。

将坑外软化土体参数代入模型计算,得到基坑围护结构的水平位移及弯矩分布,如图8所示。

受坑外表层土体重度增加和强度软化的影响,地连墙外侧水土压力增大。由图8可知,地连墙顶水平位移由未软化工况的61.4 mm增至74.1 mm,增幅20.7%;最大弯矩出现在坑底以下7.0 m处,由未软化工况的1 230 kN·m增至软化后的1 520 kN·m,增幅23.6%。

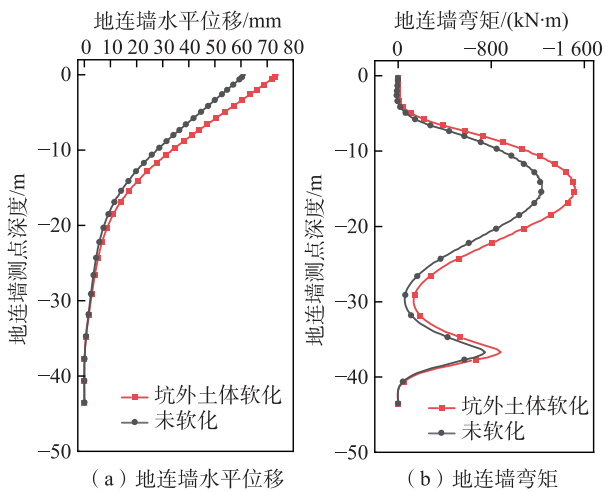


图8 坑外表层土软化前后地连墙水平位移及弯矩
Fig. 8 Horizontal displacement and bending moment of diaphragm wall before and after softening of topsoil outside the pit

3.3.2 坑内土体软化对基坑围护结构影响分析

基坑开挖前,坑内水位已降至坑底以下1.0 m。暴露的坑底持续受降雨影响。雨水从坑底表层土持续入渗,导致坑内水位上升至坑底标高。强降雨时,坑内积水进一步导致土状强风化岩重度增加。因此,需对坑底表层1.0 m深度范围内的土体进行软化处理。

受坑外表层土体重度增加和强度软化的影响,地连墙支撑作用减弱,墙顶向坑内位移增大。由图9可知,地连墙墙顶水平位移由未软化工况的61.4 mm增至68.4 mm,增幅11.4%。地连墙最大弯矩发生在坑底下一倍开挖深度。由未软化的1 230 kN·m增至降雨后的1 470 kN·m,增大了19.5%。坑外土体软化对地连墙水平位移的影响较坑内土体软化更大。由此可见,坑外土体软化导致墙外侧水土压力增加的程度,大于坑内土体软化导致支撑减弱的程度,两者引起的地连墙水平位移及弯矩响应存在差异。

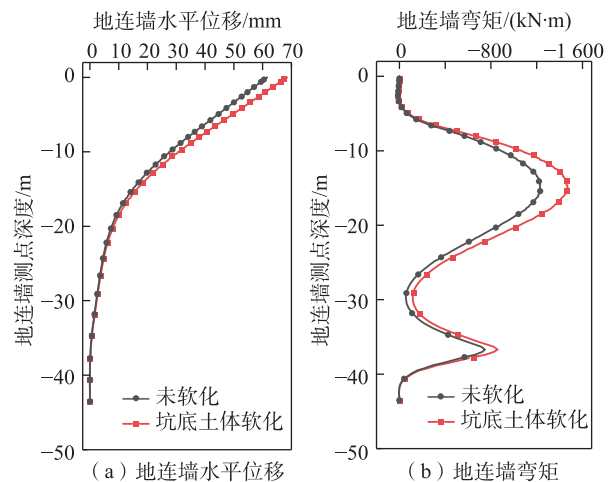


图9 坑内底层土软化前后地连墙水平位移及弯矩
Fig. 9 Horizontal displacement and bending moment of diaphragm wall before and after softening of the subsoil in the pit

4 降雨条件下高放坡基坑围护结构加固稳定性研究

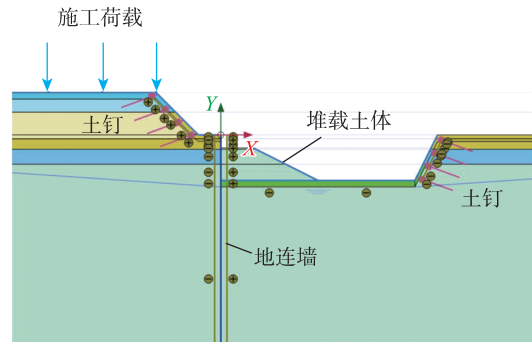
地连墙是基坑工程的主要围护结构。在不同土质基坑施工中,地连墙可能发生倾斜和挠曲。仅依靠现场监测的水平位移无法全面反映其内部受力状态。实际工程中,常出现地连墙水平位移超预警值但基坑未破坏、结构仍处于安全状态的情况。因此,将地连墙弯矩作为基坑施工过程的安全评价指标,对确保围护结构稳定性与安全性至关重要。针对本工程ZQ-8危险断面,采用启明星基坑工程分析软件,依据《上海市基坑工程技术规范》(DG/TJ08-61—2018)进行地连墙设计计算。地连墙厚1.2 m,配筋为 $\phi 20@320$ HRB400钢筋。在安全系数1.25条件下,其极限弯矩设计值为1 737 kN·m。基于此极限弯矩,研究降雨条件下围护结构加固措施的效果。

受降雨影响,基坑施工过程中围护结构水平位移发展较快,甚至超预警值。常用的应急处置措施包括预应力锚索加固和堆载反压。计算模型示意图如图10所示。

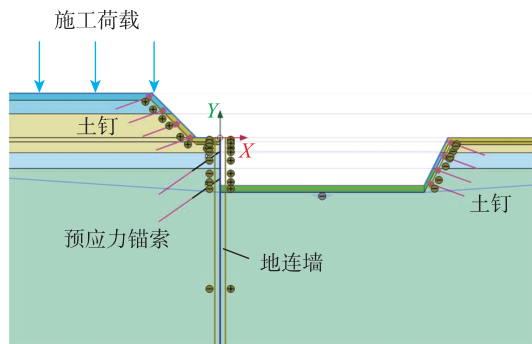
4.1 堆载反压对支护结构内力变形分析

当支护结构变形发展过快时,采用堆载反压法。堆载材料为基坑开挖素填土,靠近地连墙侧堆载高度分别为3、4、5、6 m,另一侧按1:2坡度放坡回填。计算结果如下。

图11为坑内外土体软化条件下,堆载反压加固前后地连墙的水平位移及弯矩分布。在坑内外土体均软化工况下,地连墙最大弯矩达1 600 kN·m,接近其极限设计弯矩(1 737 kN·m),对应最大水平位移达76.0 mm。这表明ZQ-8断面围护结构已接近抗弯承载力极限状态。若不采取应急措施,持续降雨可能导致围护结构位移进一步发展,引发严重后果。堆载反压是控制围护结构大变形的常用应急手段。对ZQ-8断面开挖区堆载反压后,当堆载高度分别为3、4、5、6 m时,最大水平位移分别为76.5、75.0、73.6、71.7 mm,最大弯矩由1 600 kN·m分别变为1 680、1 690、1 650、1 610 kN·m。虽然堆载反压控制了最大水平位移的增长,但与坑内外土体全部软化工况相比,地连墙最大弯矩不降反增,更接近其极限设计弯矩。



(a) 堆载反压法



(b) 预应力锚索施工法

图10 高放坡基坑应急处治加固示意图

Fig. 10 Schematic diagram of emergency treatment of foundation pit with high slopes

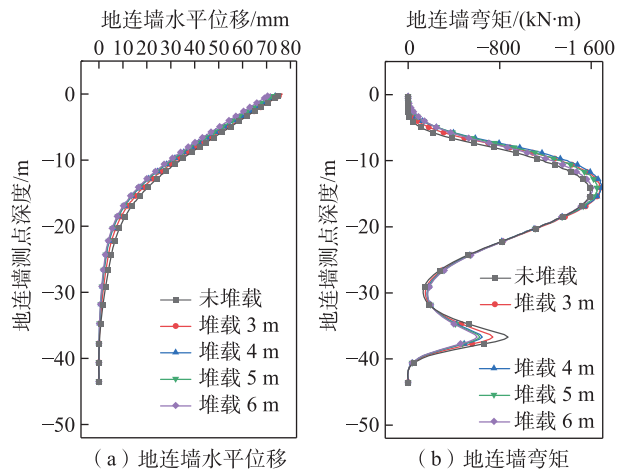


图11 采取堆载反压加固前后地连墙水平位移及弯矩
Fig. 11 Horizontal displacement and bending moment of diaphragm wall before and after reinforcement by stacked counterpressure

4.2 锚索加固对支护结构内力变形影响

预应力锚索加固方案:每根锚索由3束直径为15.2 mm的钢绞线组成,共设置2根,入射角 35° ,钻孔直径150 mm,锚索长11 m(锚固段长6 m)。施加

的预应力锁定值分别为锚索极限拉力的40%、50%、60%、70%。计算结果如图12所示。

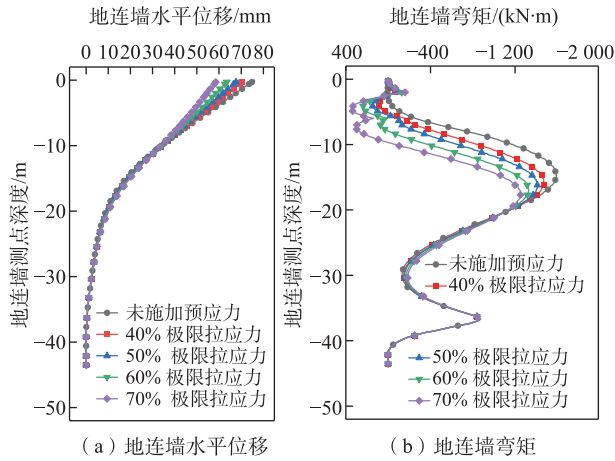


图12 采取预应力锚索加固前后地连墙水平位移及弯矩
Fig. 12 Horizontal displacement and bending moment of diaphragm wall before and after reinforcement by prestressed anchor cables

当围护结构发生大变形时,采用预应力锚索进行后张拉加固可有效控制其发展。当预应力锁定值分别为锚索极限拉力的40%、50%、60%、70%时,最大水平位移分别减小至71.3、68.6、64.3、59.2 mm,最大弯矩由1 600 kN·m降至1 470、1 410、1 328、1 250 kN·m,变形和内力发展得到有效抑制。

综合对比,两种方法均能有效控制降雨条件下围护结构的位移发展。以地连墙最大弯矩为评价指标,预应力锚索加固使其降低21.9%,效果显著优于堆载反压法。因此,在降雨条件下高放坡基坑围护结构发生大变形时,及时采用预应力锚索进行应急处治效果更佳。

5 结论

本文结合现场实测数据,利用Plaxis 2D有限元软件,采用强度折减法分析了降雨对基坑围护结构变形及内力的影响,并研究了锚索加固措施的效果,为软土地区类似高放坡悬臂支护基坑的设计提供参考。主要结论如下。

1) 现场实测表明,日降雨量是导致基坑围护结构变形及内力增大的主要因素。短期内日降雨量越大,地连墙水平位移日增量越大。强降雨期间,墙顶水平位移日增量超过2.00 mm/d,最大达8.58 mm/d;

降雨对围护结构的影响主要源于坑外表层土饱和软化和坑底土积水软化。采用强度折减法对基坑内外土体进行软化处理,确定饱和影响深度为1 m。

2) 在坑内外土体均软化工况下,地连墙最大弯矩达1 600 kN·m,接近其极限设计弯矩,围护结构最大水平位移达76.0 mm。

3) 预应力锚索加固可使地连墙最大弯矩降低21.9%,效果显著优于堆载反压。针对连续降雨条件下发生大变形的高放坡悬臂支护基坑,推荐采用预应力锚索进行应急处治。

参考文献:

- [1] 彭俊仁, 万琪伟, 丁海滨, 等. 基于强度折减的坑中坑稳定分析方法[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19 (S1): 381-390.
PENG J R, WAN Q W, DING H B, et al. Stability analysis of pit-in-pit based on strength reduction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19 (S1): 381-390.
- [2] 孙子涵, 王述红, 杨天娇, 等. 降雨条件下多层土坡入渗机理与稳定性分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(8): 1201-1208.
SUN Z, WANG S H, YANG T J, et al. Infiltration mechanism and stability analysis of multilayer soil slopes under rainfall conditions[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2020, 41(8): 1201-1208.
- [3] 陈林靖, 孙瑞轩, 罗一鸣. 基于强度折减法的坑中坑整体稳定性数值模拟分析[J]. 城市地质, 2023, 18(3): 67-75.
CHEN L J, SUN R X, LUO Y M. Numerical simulation analysis of overall stability of pit-in-pit based on strength reduction method[J]. Urban Geology, 2023, 18(3): 67-75.
- [4] 唐栋, 李典庆, 周创兵, 等. 考虑前期降雨过程的边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3239-3248.
TANG D, LI D Q, ZHOU C B, et al. Slope stability analysis considering the previous rainfall process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3239-3248.
- [5] 付宏渊, 曾铃, 王桂尧, 等. 降雨入渗条件下软岩边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2359-2365.
FU H Y, ZENG L, WANG G Y, et al. Stability analysis of soft rock slopes under rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2359-2365.
- [6] DAI F C, LEE C F, NGAI Y Y. Landslide risk assessment and management-an overview[J]. Engineering Geology, 2002, 64(1): 65-87.

- [7] 石振明, 沈丹祎, 彭铭, 等. 考虑多层非饱和土降雨入渗的边坡稳定性分析[J]. 水利学报, 2016, 47(8): 977-985.
SHI Z M, SHEN D Y, PENG M, et al. Slope stability analysis considering rainfall infiltration of multilayer unsaturated soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(8): 977-985.
- [8] 徐全, 谭晓慧, 沈梦芬. 降雨入渗条件下土质边坡的稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(S1): 254-259.
XU Q, TAN X H, SHEN M F. Stability analysis of soil slopes under rainfall infiltration[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 254-259.
- [9] 高润德, 彭良泉, 王钊. 雨水入渗作用下非饱和土边坡的稳定性分析[J]. 人民长江, 2001(11): 25-27.
GAO R D, PENG L Q, WANG Z. Stability analysis of unsaturated soil slopes under rainwater infiltration[J]. Yangtze River, 2001(11): 25-27.
- [10] 任东兴, 薛鹏, 叶飞, 等. 降雨入渗条件下黏性土基坑浅层边坡稳定性分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2022, 49(2): 204-212.
REN D X, XUE P, YE F, et al. Stability analysis of shallow slopes in clayey soil pits under rainfall infiltration [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 49(2): 204-212.
- [11] 彭立新. 降雨入渗对地铁基坑边坡变形影响分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
PENG L X. Impact of rainfall infiltration on the deformation of underground pit slopes[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [12] 刘畅, 季凡凡, 郑刚, 等. 降雨对软土基坑支护结构影响实测及机理研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(3): 447-456.
LIU C, JI F F, ZHENG G, et al. Measurement and mechanism of rainfall effect on soft soil foundation support structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(3): 447-456.
- [13] 侯福金, 韩现民, 李术才, 等. 降雨对隧道浅埋段施工力学效应影响研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(S2): 139-148.
HOU F J, HAN X M, LI S C, et al. Study on the influence of rainfall on the mechanical effect of construction of shallow buried section of tunnels[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(S2): 139-148.
- [14] 周宇, 陈东霞, 于佳静, 等. 干湿循环下花岗岩残积土的崩解试验与微观机理研究[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(1): 153-160.
ZHOU Y, CHEN D X, YU J J, et al. Disintegration test and micro-mechanism of granite residual soil under dry and wet cycle[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(1): 153-160.
- [15] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. Physics, 1931, 1(5): 318-333.
- [16] 胡庆国, 袁宁, 刘登生, 等. 多层结构土质边坡降雨入渗过程及稳定性影响分析[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 67-74.
HU Q G, YUAN N, LIU D S, et al. Analysis of Rainfall Infiltration Process and Stability of Soil Slope with Multilayer Structure[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 67-74.



第一作者: 张海行(1989—), 男, 工程师, 研究方向为隧道及地下工程。E-mail: 1254090419@qq.com。



通信作者: 徐鑫洋(1998—), 男, 博士研究生, 研究方向为基坑工程。E-mail: 1426797873@qq.com。

(责任编辑: 李根)