



南方地区某山地高挡土墙工程防护与自然防护 联合加固作用下稳定性影响研究

蒋定良¹, 易文², 于鹏²

(1. 湖南师范大学基建处, 湖南长沙 410006; 2. 中南林业科技大学 土木工程学院, 湖南长沙 410004)

摘要:为研究南方山区在多雨气候条件下高边坡的稳定性影响和设计施工优化措施, 依托褶皱丘陵过渡河滩范围内高挡土墙边坡加固改造项目, 通过对典型剖面的边坡支护结构设计、变形量的有限元分析、工程现场监测比较, 研究支护结构、既有多层民居以及土体变形的时程规律, 探讨结构变形的相关规律特征, 揭示工程防护与自然防护联合作用机制。研究表明: 对于锚杆和格构梁加固的挡土墙, 锚杆将承担大部分的土压力, 且可以直接在既有挡墙上进行锚杆加固。同时, 在南方多雨条件下, 采用自然防护和工程防护可以有效提升土体的整体稳定性和安全冗余, 而对于坡脚矮挡土墙, 也需要结合岩土分层确定墙体高度, 避免因降雨造成整体失稳。本文研究成果可为类似工程的建设 and 处置提供一定的借鉴与参考。

关键词: 山区高边坡; 降水影响; 生态防护; 稳定性; 模拟分析; 南方地区

中图分类号: U213.1⁺58

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)02-0001-07

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.02.014

Research on stability influence of a high retaining wall in a mountainous area in southern China under combined reinforcement of engineering protection and natural protection

JIANG Dingliang¹, YI Wen², YU Peng²

(1. Infrastructure Department, Hunan Normal University, Changsha 410006, Hunan, China; 2. School of Civil engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: In order to study the stability influence of high slopes in rainy climate conditions in southern mountainous areas and the optimization measures for design and construction, relying on the high retaining wall slope reinforcement and reconstruction project within the transition river beach of folded hills, through finite element analysis on the design of slope support structure of typical sections and deformation, and comparison of engineering site monitoring, the time course of deformation of support structure, existing multi-story residential buildings and soil is studied, the relevant regular characteristics of structural deformation are explored, and the joint action mechanism of engineering protection and natural protection is revealed. The results show that, for retaining walls reinforced with anchors and lattice beams, the anchors will bear most of the earth pressure and anchor reinforcement can be carried out directly on the existing retaining walls. At the same time, under the rainy conditions in the south, the use of natural protection and engineering protection can effectively improve the overall stability and safety redundancy of the soil. For the low retaining wall at the foot of the slope, the height needs to be determined in combination with the rock and soil stratification to avoid overall instability caused by rainfall. The results can provide a certain reference for the construction and disposal of similar projects.

收稿日期: 2024-05-21

基金项目: 湖南省交通科技计划资助项目(202212)

作者简介: 蒋定良(1993—), 男, 工程师, 从事建筑工程、市政公用工程的设计及施工技术研究工作。

通信作者: 易文(1968—), 女, 教授, 博士, 博士生导师, 从事市政工程技术研究工作。

Key words: high slopes in mountainous areas; precipitation impact; ecological protection; stability; simulation analysis; southern region

我国南方尤其以长江中游地区的山区以丘陵地貌为主,整体高差较大,与此同时,因南方地区多雨,非常容易因雨水冲刷造成山区挡土墙及边坡的失稳,进而造成地基沉降、整体性垮塌等,不但对人民群众的正常生活造成影响,也会对生命和财产造成损失。通过挡土墙支挡山体和土体的位移,可以保证其稳定。对挡土墙的稳定分析主要包括抗滑移稳定性分析、抗倾覆稳定性分析及挡土墙地基及填土的整体稳定性分析等^[1]。

对有关山区挡土墙及边坡的稳定性分析,国内外学者做了大量富有成效的工作。张涛等^[2]从微观角度,以土骨架为研究对象,将渗透力以外荷载作用于土骨架上,采用强度折减法,对坡面水位下降过程中的边坡稳定问题进行研究,主要讨论不同因素对非饱和土质边坡安全稳定的影响。王健林等^[3]结合工程实例,采用不平衡推力法和数理统计,运用地下水饱水面积比和地下水排泄系统理论,着重研究降雨条件下山区重力式高挡土墙的稳定性的。

目前,在一般边坡稳定性分析中,高挡土墙的抗倾覆及抗滑移稳定性分析的研究已经取得了一定的成果,但是对于南方山区多雨条件下挡土墙自然和工程防护设计对墙上建筑及其填土的整体稳定性分析还有待进一步研究。本文以湖南省长沙市某既有民用建筑周边高挡土墙加固改造工程为例,通过计算分析山区地质条件下高挡土墙地基及坡顶建筑填土的整体稳定性,提出经济可行的治理方法,以期今后类似的滑坡治理工程提供参考。

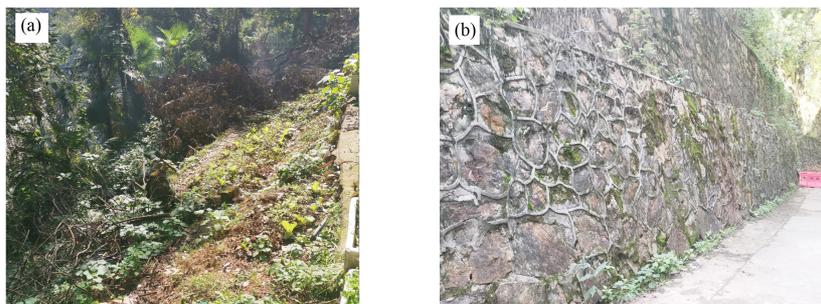
1 工程概况

拟建项目系湖南省长沙市某老旧小区改造配套设施项目(边坡支护工程),位于长沙市岳麓区湖南师范大学二里半校区内校医院北侧。加固改造工程涉及的边坡共分为东西两段。西侧(A-B段)现状边坡为自然放坡,坡高最大达到14 m,长度约为57 m,边坡顶部为既有自然山体,坡顶局部有污水及雨水管,距离坡顶边缘约为3~10 m,埋置深度约为1 m。边坡坡脚存在既有砖混结构1~4层楼房,坡脚距离房屋1.1~7.4 m;东侧(C-I段)边坡为使用已超过30 a的多级既有重力式毛石挡土墙,挡土墙高约为1.3~7.0 m,长度约为61 m,现状边坡毛石挡土墙多处出现砌筑砂浆开裂等现象。边坡顶部为民房,房屋为两层,距离C-I段边坡坡顶约为3.5~15.0 m。同时,设计挡墙坡顶存在修建至今超过50 a的多栋民房,房屋基础为条形浅基础,经现场调查,房屋墙面未出现竖向及斜向裂缝;坡顶局部有污水及雨水管,距离坡顶边缘约为3~10 m,埋置深度约为1 m。为保证该段边坡及坡顶、坡脚房屋的安全,需对该段边坡进行整体加固改造。

2 工程地质条件

2.1 地形地貌概述

勘察场地在大地构造位置处于华南断块区,属长江中下游断块凹陷西南部的幕阜山隆地区。以湘江为界,西岸属褶皱丘陵岭,东侧为内陆湖相沉积的白垩纪地层。区内构造形迹不甚发育,岩



(a) A-B段; (b) B-I段

图1 边坡现状示意

层层面稳定、产状平缓,岩体整体性较好。拟建场地原始地貌为丘陵,场地地形起伏较大,勘察期间测得拟建场地各钻孔孔口高程介于60.300~83.850 m,孔口最大相对高差达23.55 m。场地内植被以大型乔木和灌木为主。

2.2 地层地质构成

根据现场地质勘查所布钻孔ZK01~ZK028钻探揭露,场地内埋藏的地层主要由第四系杂填土①(Q_4^m)、粉质黏土②(Q_4^d),白垩系泥质粉砂岩③(K)组成,其野外特征自上而下分叙如下。

(1) 杂填土①(Q_4^m):褐色、杂色,松散,稍湿,主要成分为黏性土、建筑垃圾、混凝土块及少量有机质等,硬质物质量分数约为20%~35%,已基本完成自重固结。局部顶部为混凝土地面。该层在场地内均有揭露,揭露层厚度为1.50~5.80 m,平均厚度为3.96 m,层顶高程为60.30~83.85 m。

(2) 粉质黏土②(Q_4^d):褐黄色,可~硬塑,主要由黏性土组成,含少量砾石,韧性中等,干强度中等。该层在场地内除ZK9、ZK10、ZK12、ZK13外均有揭露,揭露层厚度为1.10~13.10 m,平均厚度为6.44 m,层顶高程为56.60~79.95 m。

(3) 中风化泥质粉砂岩③(K):褐红色,泥质结构,中厚层状构造,主要由泥质和粉砂质成份胶结而成,呈中风化状,岩芯多呈柱状,少量短柱状,节理裂隙较发育,岩石质量指标RQD约为50~70,属极软岩,岩体基本质量等级为V级。场地中本次勘察深度内除ZK9、ZK10、ZK12、ZK13外均揭露,未揭穿,揭露层厚度为1.10~5.40 m,平均厚度为2.97 m,层顶高程为50.00~69.05 m。中风化泥质粉砂岩(K)产状实地地表植被茂盛,未发现露头,仅踏勘场地周边发现一处露头,测得其产状为 $142^\circ \angle 28^\circ$;两段边坡类型均为土质坡,岩层产状对边坡影响较小。

2.3 地质构造

建设场地范围内无断层通过,地层稳定,岩性单一。根据《中国地震动峰值加速度区划图》,工程区地震动峰值加速度为 $0.05g$ 。拟建场地平均覆盖层厚度为10.40 m,覆盖层等效剪切波波速值为191.48 m/s,覆盖土层类型为中软土,建筑场地类别为II类,为可进行工程的一般场地。场地

抗震设防烈度为6度,无液化土层,无液化和软土震陷可能。

2.4 水文地质条件

建设场地及周边无地表水系。根据地下水的物理性质和埋藏条件,在勘察期间钻探深度范围内,地下水主要表征为基岩裂隙水。未形成连续稳定的水位面,勘察期间未发现水位。地下水的主要补给来源为大气降水、地表水,水体依靠侧向径流及蒸发排泄。建设地点位于南方地区,夏季典型气候高温多雨,汛期短时强降雨有一定程度的水土流失情况。

3 边坡支护结构介绍和难点分析

3.1 设计条件及方案概述

边坡支护工程共分为东西两段,平面分段示意图如图2所示,自西向东分别划分为A至I共计7段,于A-B段设置典型剖面a-a、b-b。表1为设计各项参数取值,其中H为边坡/基坑高度,m。参照表1,分别以支护典型剖面论述既有坡侧对既有建筑的影响及支护相关力学分析。其中,西侧(A-B段)采用坡率为1.00:1.25结合坡脚拟设置护坡矮脚墙+10 cm喷射混凝土封水+格构梁+锚杆,坡面同步绿化方案;东侧(C-I段,即既有毛石挡土墙段)采用锚杆+混凝土面板进行改造,混凝土面板厚度为30 cm,混凝土板采用双层双向C12@150 mm整板配筋,锚杆钢筋处横向、竖向各加配3根C16螺纹筋。既有毛石挡墙顶坡面采用坡率为1.00:1.25结合10 cm喷射混凝土封水+格构梁+锚杆+绿化护坡处理进行支护。

3.2 项目难点分析

(1) 坡顶存在既有多层民用居住建筑。该建筑因建设年代较早,建设标准低,且基本沿边坡顶范围内均有分布。在施工过程中需要做好支护措施,确保不因土体扰动对既有房屋沉降裂缝造成损害。

(2) A-B段护坡最大高度超过14 m,但根据现场地勘表明,整体土质已基本达到自然沉降和稳定。设计方案考虑在坡脚设置矮挡土墙,且拟设置挡墙位置距离坡脚既有建筑较近,需保证在强降雨条件下既有建筑安全和原始土体稳定。

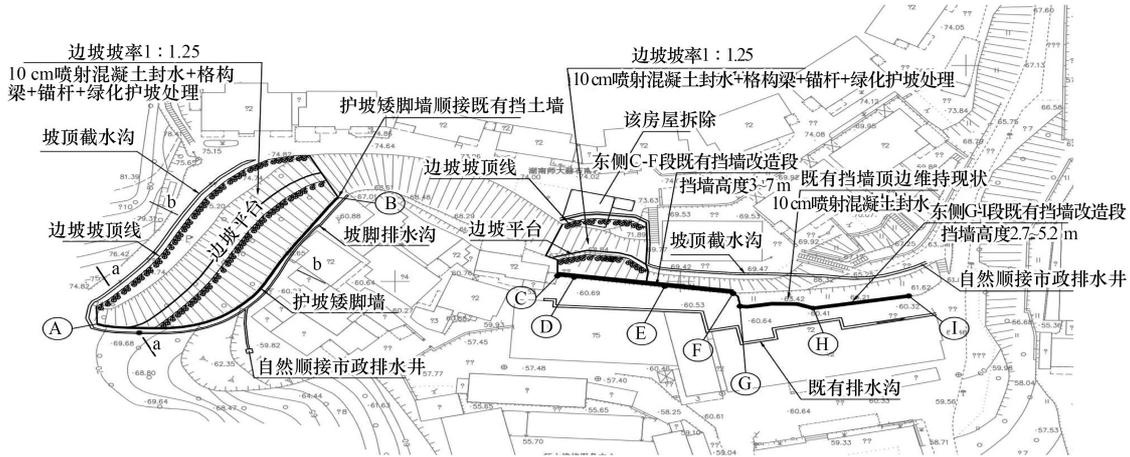


图 2 边坡支护分段示意平面

表 1 设计各项参数取值

土层类别	天然容重/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	承载力特征值/ kPa	压缩模量/ MPa	抗剪强度 (固结快剪)		锚杆的 极限黏 结强度 标准值 (二次注 浆)/kPa	地基土 水平抗 力系数 的比例 系数/ ($\text{MN}\cdot\text{m}^{-4}$)	渗透 系数/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	基底 摩擦 系数	基坑坡度允许值	
				凝聚 力/ kPa	内摩 擦角/ ($^{\circ}$)					$H < 5 \text{ m}$	$5 \text{ m} \leq H < 10 \text{ m}$
杂填土①	18.5	—	—	12	13	30	1.8	6.0×10^{-3}	—	1.00:1.75	1.00:2.00
粉质黏土②	19.5	180	5	30	17	60	6.0	2.0×10^{-6}	0.20	1.00:1.25	1.00:1.50
中风化泥质 粉砂岩③	23.5	1 000	35	140	45	300	35.0	—	0.45	1.00:0.50	1.00:0.75
中风化泥 质粉砂岩 结构面	—	—	—	100	30	—	—	—	—	—	—

(3) D - E 段采用锚杆 + 混凝土板加固改造, 因项目预算有限, 需在保证安全和力学验算合理的前提下设置锚杆数量。

(4) 建设项目位于南方多雨地区, 且整体地形属于山区, 高差较大。需确保加固后护坡表面的水土保持, 不因短时强降雨条件造成生态防护的失效。

4 边坡支护结构设计计算

4.1 典型剖面土力学计算

项目的典型剖面选取位于 A - B 段护坡的 b - b 剖面。该剖面实测高差为 14.0 m, 是项目高差最大

的地方, 坡顶设计截水沟, 于坡脚设置矮挡土墙。设计为两级边坡, 均采用边坡坡率为 1.00:1.25 结合 10 cm 喷射混凝土封水 + 格构梁 + 锚杆 + 绿化护坡处理进行支护。采用理正岩土软件计算, 通过对现状土体、挡土墙地基及墙后填土划分为不同的区域, 应用整体圆弧法对其进行稳定性分析; 坡脚矮挡土墙及锚杆设置后, 再对其进行土力学分析。计算结果如表 2 所示。

由表 2 可知: 采用支护设计方案可确保高边坡的稳定性。同时, 该段边坡设计中, 生态防护方案为表面种植本地常见的多花木兰。相关研究表明, 随着时间的推移, 该种植物深根最长

表 2 支护前后土力学系数比较

工程状态	滑动半径/m	滑动安全系数	土体抗滑力与下滑力比较/kN
支护前	19.243	1.032	—
支护后	28.826	1.386	整体抗滑力 2 739.114 大于整体下滑力 1 975.559

达 60 cm, 起到边坡锚固和土体“加筋”作用, 深根上的斜生根、水平根是加筋作用的主力军, 共同与工程防护维系边坡的稳定^[4]。

4.2 典型边坡剖面结构设计计算

4.2.1 A-B 段挡墙 b-b 剖面

采用格构梁+锚杆支护, 典型剖面高度为 14 m。设置 7 排锚杆, 水平间距为 250 mm, 除靠近坡脚两排锚杆长度为 18 m 外, 余下 5 排均设计为 15 m, 锚杆型号均为 HRB400 \varnothing 25 mm。采用整体圆弧法进行计算, 各排锚杆力学计算结果如表 3 所示。

由表 3 可知: 因 b-b 剖面为两级边坡, 筋带号 1~3 排与 4~7 排相互独立, 但各排锚固抗拔力及材料抗拔力的合力均可有效抵御土体滑动力。同时, 从理论计算值可以看出, 各排锚固抗拔力与坡顶距离基本符合线性关系。据此分别进行数值拟合, 图 3 为两级边坡锚固抗拔力与高度的关系。

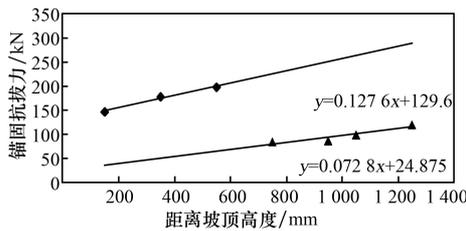


图 3 b-b 剖面锚固抗拔力与坡顶高度关系

由图 3 可知: 第一级边坡位于坡顶位置, 理论

上有不低于 129.6 kN 的锚固抗拔力; 第二级边坡位于该级坡顶处, 理论上不低于 68.555 kN 的锚固抗拔力。而设计锚杆最低受拉承载力为 130 kN。可见, 即使是处于材料承载力和边坡高度最不利条件下, 仅靠相关锚杆工程防护部分的理论计算结果即可保持土体稳定性。同时, 坡脚设置矮脚重力式挡土墙, 可以进一步提升稳定性^[5]。故, 整体稳定性可靠且具有较大的安全冗余。

4.2.2 D-E 段挡墙

该段为既有挡土墙的改造, 高度为 5~7 m。改造方案采用直接从既有挡墙墙面穿锚杆+混凝土面板, 混凝土面板厚度为 30 cm, 混凝土板采用双层双向 \varnothing 12 mm@150 mm 整板配筋, 锚杆钢筋处横向、竖向各加配 3 根 \varnothing 16 mm 螺纹钢。锚杆采用 \varnothing 28 mm 螺纹钢, 锚杆长度为 20~25 m, 锚杆纵横间距为 2.0 m。设计以最不利高度 7 m 作为计算条件, 根据类似工程和研究成果可知, 对于改造后的挡墙, 最常出现的破坏形式是土体整体失稳造成的混凝土面板的剪切破坏^[6]。据此, 应根据板上最大荷载的数值差异, 将挡土板分为 5 种类型, 分别对挡土板进行内力配筋计算, 计算结果如表 4 所示。

由表 4 可知: 混凝土抗剪承载力远大于所有

表 3 b-b 段典型剖面锚杆力学计算

筋带号 (自坡脚起)	锚固抗拔 力/kN	距离坡顶 高度/mm	材料抗拉 力/kN	计算采 用值	有效锚固 长度/m	滑面角 度/(°)	切向抗 力/kN	法向抗 力/kN
1	197.920	550	100	抗拉力	7.000	36.099	32.320	23.567
2	178.009	350	100	抗拉力	6.296	44.889	28.339	28.230
3	146.876	150	100	抗拉力	5.195	52.487	24.357	31.729
4	84.804	750	50	抗拉力	2.999	61.634	9.502	17.599
5	86.773	950	50	抗拉力	3.069	67.941	7.511	18.536
6	98.938	1050	50	抗拉力	3.499	73.976	5.521	19.223
7	120.233	1250	50	抗拉力	4.252	79.834	3.530	19.686

表 4 D-E 段挡土板配筋力学计算

板类型号	板类型	计算长度/m	板上最大荷载/(kN·m ⁻¹)	剪力设计值/kN	混凝土抗剪承载力/kN
1	连续板	10	0	0	265.265
2	连续板	10	23.587	26.114	265.265
3	连续板	10	61.712	68.324	265.265
4	连续板	10	73.150	80.987	265.265
5	连续板	10	70.632	78.199	265.265

板所受的剪力值。这是由于在该段既有挡墙对挡土板的配筋计算中,计算模型和假定条件为板后土压力全部来源于土体,而实际上,板后土压力有相当一部分由既有挡土墙承担。据此,从经济性的角度考虑,在不拆除原有重力式挡墙的前提下,直接在既有挡墙表面进行锚杆和格构梁处理,并不会造成边坡的破坏。

4.3 降雨条件下对边坡稳定性的数值分析

根据降雨对边坡稳定性的影响,主要对工程完工后坡体表面及深度位移布点进行模拟^[7]。据此,采用岩土有限元软件 Plaxis 对 b-b 剖面范围内的边坡稳定性进行分析,计算模型如图 4 所示,尺寸为 14 m×57 m(高×长)。

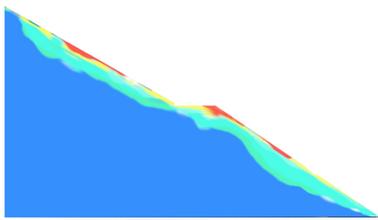
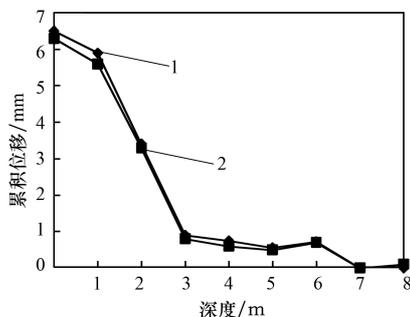


图 4 坡体变形云图

根据理论分析结果,在短期降雨条件下,两级边坡均有可能出现部分位置失稳的情况。数值模拟中,在位移影响最明显处,即既有房屋基脚位置(S_1 号)设置 8 个位移跟踪点。强降雨条件下计算得出的理论值与短期强降雨期间的实际监测值如图 5 所示,其中监测值为边坡开挖整治过程中经受较大降雨后的取值,即 2024 年 3 月 4 号开始连续 24 h 内的监测累积位移值。由图 5 可知:理论计算值和监测数据拟合程度很高,实际监测值的工况为边坡整治的开挖阶段。这说明降雨条件下边坡开挖期间对土体的扰动是致使坡体产生滑动的主要原因。



1—模拟值; 2—实际值。

图 5 短时降雨后坡体深部位移监测值与计算值对比

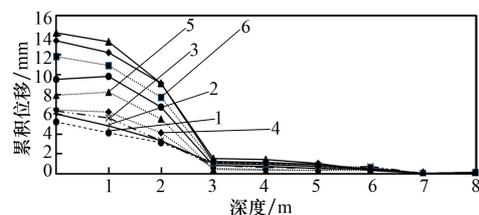
4.4 降雨条件下对边坡稳定性的实测

研究区域属于中亚热带季风性湿润气候,雨水充沛,根据历史气象资料显示,年平均降水量可达 1 200~1 450 mm,降水集中于 4 月—7 月的汛期,约占全年降水量的 68%。参照历史资料,观测期最大雨日设置降水量为 50 mm/d,连续降水时间为 72 h。据此,对改造完成后的最不利位置(b-b 剖面)布设位移和沉降观测点,从 2024 年 2 月 1 日—4 月 30 日止(2024 年汛期起始发生阶段)进行支护效果观测,并对监测点与时程关系进行分析。

根据现场的踏勘结果,对该坡体设置两个深部位移监测点 S_1 和 S_2 ,其中 S_1 孔位于坡顶既有房屋基脚,深度为 8.5 m; S_2 孔位于第一级边坡坡脚,深度为 7.5 m。

4.4.1 S_1 号深部位移监测孔

取 2024 年 2 月 10 日的位移数据作为初值,持续观测至 2024 年 4 月 30 日,水平位移随深度的变化如图 6 所示。由图 6 可知:地面以下 3.0 m 处存在一个累积位移的突变,即滑动面,位于人工填土与粉质黏土交界处,属于深部滑动。经查阅该处房屋建设的历史资料可知,产生滑动的深度基本与当时房屋基础的最深开挖深度一致,所以该处深层滑动基本产生于人工填土。同时,由于多年来该处人工填土已基本完成自然沉降,且本次施工完成后坡面种植有多花木兰,根系可有效固结土壤,实际产生的滑移值相较于理论值偏小,更为安全,可见除理论计算中的工程防护,坡面种植的固土保水的多花木兰也同步起到了有效作用。



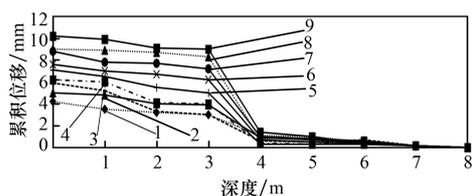
1—2 月 10 日; 2—2 月 20 日; 3—3 月 1 日;
4—3 月 10 日; 5—3 月 20 日; 6—3 月 30 日。

图 6 S_1 号孔水平位移随深度的变化

4.4.2 S_2 号深部位移监测孔

取 2024 年 2 月 10 日的位移数据作为初值,持

续观测至汛期起始阶段(2024年4月30日),水平位移随深度的变化如图7所示。由图7可知:与 S_1 号孔所对应的一级边坡的每一次累积位移观测值相比, S_2 号均有所减小,这表明实际上因放坡而减小了土体的应力,从而使得整体变形也相应减小。同时可以注意到,自第一级坡脚以下4.0 m处同样存在一个累积位移的突变,即滑动面,恰好位于粉质黏土与中风化泥质粉砂岩交界处,属于深部滑动。同时,b-b剖面在距离第一级边坡坡脚4.0 m一致高度处设置有一道矮挡土墙,也可有效抵御该处的深层累积位移。因此,在南方地区高边坡设计施工过程中,除了分段放坡,设置多级边坡以外,还可结合地质勘探结果,按照各层地质条件的不同,在地层变化的高度合理设置坡脚矮挡土墙,可确保在强降雨情况下实际产生的滑移值在安全可控范围内。



1—2月10日; 2—2月20日; 3—3月1日;
4—3月10日; 5—3月20日; 6—3月30日;
7—4月10日; 8—4月20日; 9—4月30日。

图7 S_2 号孔水平位移随深度的变化

5 结论

(1) 对于设置有格构梁+锚杆的护坡加固形式,各排锚固抗拔力与坡顶距离基本符合线性关系。而按照材料承载力和边坡高度最不利条件下,仅依靠设置合理数量的锚杆即可保证土体的稳定性。

(2) 对于既有挡墙加固增设挡土板的配筋计算中,实际上板后土压力有相当一部分由既有挡土墙承担,从而混凝土抗剪承载力设计值通常远大于所有板所受的剪力值。因而实际施工中,可

以从经济性的角度考虑,无需拆除原有重力式挡墙,而直接在既有挡墙表面进行锚杆和格构梁处理,且不会对边坡造成破坏。

(3) 通过理论计算与实际监测值的对照,边坡实际产生的滑移值相较于理论值会偏小,因此具有一定的安全冗余。其原因在于坡面种植的多花木兰的根系可有效固结土壤,保证坡面整体稳定,较单一的工程防护更为合理、耐久。

(4) 对于南方地区,在降雨条件下边坡的开挖对土体扰动的共同作用是致使坡体产生滑动的主要原因。而在降雨条件下,土体的深层累积位移的突变值通常都发生在土层变化的位置,因此在设计和施工过程中,应当按照各层地质条件的不同,合理确定坡脚矮挡土墙高度,以保证在强降雨情况下实际产生的滑移值在安全可控范围内。

参考文献:

- [1] 赵福义. 某山区公路斜路堤挡土墙地基填土稳定性分析及处治方法[J]. 地基处理,2021,3(2):131-136.
- [2] 张涛,张慧,黄文雄. 坡面水位下降对非饱和土质边坡稳定性影响的有限元分析[J]. 重庆大学学报,2020,43(6):12-20.
- [3] 王建林,许建聪,孙钧. 降雨作用下重力式挡土墙整体稳定性分析[J]. 公路,2011,56(11):10-13.
- [4] 刘奥林,易文,陆杨瑞雪. 湖北地区多花木兰根系形态研究[J]. 大众标准化,2020(8):117-119.
- [5] 吴双萍. 山区营运高速公路衡重式挡土墙边坡稳定性分析及其体外扶壁加固结构研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2021.
- [6] 汪洋. 抗滑桩与格构梁支护高边坡的稳定分析[D]. 广州:广东工业大学,2023.
- [7] 肖超,金福喜,刘海鸿,等. 开挖与降雨作用下边坡失稳机理及模拟分析[J]. 工程地质学报,2012,20(1):37-43.