

文章编号: 1674—8247(2023)03—0048—07

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2023. 03. 010

基于横向位移控制的斜坡桥梁桩基加固方案分析

田月峰

(鲁南高速铁路有限公司, 济南 250101)

摘要:以某斜坡桥梁桩基为工程原型,建立了桥梁桩基-斜坡三维有限元计算模型,分析了既有状态和加固状态下因降雨导致的桥梁桩基和斜坡的附加变形;采用强度折减法计算了各工况下的斜坡稳定安全系数。研究表明,各项加固措施可有效减小因降雨导致的桥梁桩基和斜坡的附加变形,提高天然状态和降雨状态条件下的斜坡稳定安全系数。

关键词:斜坡桥梁桩基;横向位移;稳定性;降雨;加固方案

中图分类号: U443. 15 **文献标识码:** A

Analysis on Reinforcement Schemes for Bridge Pile Foundation in Slope Area Based on Lateral Displacement Control

TIAN Yuefeng

(Lunan High Speed Railway Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: By taking a bridge pile foundation in slope area as the engineering prototype, the author established a bridge pile foundation-slope 3D finite element calculation model, analyzed the additional deformation of bridge pile foundation and slope caused by rainfall in existing state and in reinforced state, and then calculated the slope stability safety factor in each working condition by the strength reduction method. The results show that all reinforcement measures can effectively reduce the additional deformation of bridge pile foundation and slope caused by rainfall, and improve the slope stability safety factor in natural state and in raining state.

Key words: bridge pile foundation in slope area; lateral displacement; stability; rainfall; reinforcement scheme

随着我国铁路基础设施建设的发展,大量的铁路线路将不可避免地穿越山区。地质条件复杂的山区通常需在自然斜坡上设置桥梁桩基,因斜坡地形偏压和坡体岩土复杂性,斜坡上的桥梁桩基可能会发生变形甚至失稳破坏。位于我国南方山区的部分铁路线路,除边坡本身地形地貌和地质条件带来的潜在风险外,湿润气候导致的丰沛降水会加剧边坡变形和失稳的潜在风险,因此需对边坡进行适当加固,保障线路运营安全。

边坡加固常见的技术手段有清方减载^[1]、反压回填^[2]、抗滑桩加固^[3-4]、锚杆(索)加固^[5-6]等,众多学者对上述加固措施进行了深入调查和研究。颜敬等^[7]以反压弹簧和坑底超载的方式模拟反压效应,基于竖向弹性地基梁理论提出了支护结构前反压土简化分析方法;任翔等^[8]通过几何缩尺比例为1:1的抗滑桩物理模型试验,结合数值模拟计算,对桩前被动土拱的形成演化过程进行了探究;王发玲等^[9]考虑边坡岩体与锚杆的相互作用,运用弹性力学和结构力学对全

收稿日期:2023-03-21

作者简介:田月峰(1972-),男,高级工程师。

引文格式:田月峰. 基于横向位移控制的斜坡桥梁桩基加固方案分析[J]. 高速铁路技术,2023,14(3):48-54.

TIAN Yuefeng. Analysis on Reinforcement Schemes for Bridge Pile Foundation in Slope Area Based on Lateral Displacement Control [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(3):48-54.

长黏结型锚杆加固顺层边坡的机制进行研究,提出锚杆加固顺层边坡的力学模型。上述研究多集中于单独探讨某项加固措施的机理和效果,对加固措施综合作用下的效果研究较少,更未见考虑降雨入渗软化等附加条件下加固措施对桥梁桩基变形及加固效果的研究。

基于此,本文以某山区斜坡桥梁桩基工程为原型,通过 ABAQUS 软件建立了桥梁桩基-斜坡三维有限元计算模型,分析了既有状态和加固状态下因降雨导致的桥梁桩基和斜坡的附加变形;采用强度折减法计算了既有状态和加固状态下的斜坡稳定安全系数;研究了降雨作用对2种工况下的斜坡稳定性的影响。相关研究成果可为本工程提供技术支持。

1 工程概况

1.1 地形地貌

某铁路桥桥址区为低山丘陵地貌,地形左低右高,地面高程 327~440 m,最大高差约 110 m,斜坡自然坡度为 20°~35°。桥梁的 14 号和 15 号墩右侧坡面发育小冲沟,桥墩附近斜坡上植被发育。斜坡土层和全风化层厚度较大,线路附近未见基岩露头。

1.2 地层岩性

桥区地表上覆第四系全新统坡残积(Q_4^{dl+el})粉质黏土、细角砾土,上更新统冲洪积(Q_3^{al+pl})粉质黏土、粗角砾土、卵石土;下伏石炭系下统灵地组(C_{1L})石英砂岩、千枚岩、灰岩。各地层岩性分述如下:

粉质黏土(Q_4^{dl+el})分布于斜坡坡面,厚 1~5 m;细角砾土(Q_4^{dl+el})分布于斜坡坡面,厚 1~3 m;粉质黏土(Q_3^{al+pl})分布于斜坡坡面和沟槽上部,厚 3~10 m;粉质黏土(Q_3^{al+pl})分布于沟槽表层,厚 1~3 m;卵石土(Q_3^{al+pl})分布于沟槽上部,厚 2~7 m;粗角砾土(Q_3^{al+pl})分布于斜坡坡面和沟槽上部,厚 2~10 m;灰岩(C_{1L}),属 V 级次坚石,本层在桥址区不连续分布,成层性差,主要分布于 10 号~14 号桥墩。千枚岩、石英砂岩(C_{1L}),全风化带(W_4)多呈土柱状夹角砾,厚 10~30 m;强风化带(W_3)岩芯多呈角砾状、碎块状,厚 3~8 m;弱风化带(W_2)岩芯多呈短柱状及柱状。

其中,14 号墩表层为上更新统粗角砾土,厚 16 m,基岩为石炭系下统灵地组灰岩,岩溶强烈发育,发育串珠状溶洞,溶洞部分充填,断面上灰岩总厚 6~15 m。灰岩以下为强风化、弱风化千枚岩、石英砂岩;15 号墩表层为粉质黏土,厚 2.7 m,其下为石炭系下统灵地组全风化千枚岩、石英砂岩,厚 32 m;强风化千枚岩、石

英砂岩,厚 5.2 m。其下为弱风化千枚岩、石英砂岩。

1.3 桥梁基础

铁路桥桥梁中心里程 DK 351+097,梁跨样式为 2×24+12×32+2×24 m 单线简支 T 梁,桥墩采用圆端型桥墩,桥梁全长 502.84 m。

桥梁 13 号墩墩高 21 m,采用 5φ1.25 m 柱桩基础,桩长 33 m;14 号墩墩高 9 m,采用 5φ1.0 m 摩擦桩基础,桩长 42.5 m;15 号墩墩高 4.6 m,采用 4φ1.0 m 摩擦桩基础,桩长 35 m;16 号桥台高 5 m,采用 5φ1.0 m 摩擦桩基础,桩长 28 m。本文以桥梁的 14 号墩为例进行研究。

1.4 加固方案

线路工务段对桥梁 CPⅢ 进行复测,发现 14 号墩所在的(距离桥墩中心 2.7 m)CPⅢ纵横向位移分别为 39 mm 和 46 mm。经过排查,发现 15 号墩右侧排水沟出现 3 处裂缝,裂缝宽度 1~5 cm。对右侧山体开展搜山排查,发现山体中部高度约 25 m 处出现约 5 cm 宽、4 m 长的裂缝。

根据地质调绘和钻探揭示,DK 351+260~+350 段右侧斜坡整体稳定,在 DK 351+270~DK 351+335 左侧 20 m~右侧 40 m 推测可能存在 1 个蠕滑体。蠕滑体长约 52 m,宽度约 78 m,厚度 10~14 m,体积约 4 万 m³。蠕滑体物质成分主要为上更新统(Q_3^{al+pl})粗角砾土和灵地组(C_{1L})全风化千枚岩、石英砂岩,蠕滑体地下水较丰富,水位埋深 6~15 m。

针对上述问题,提出桥梁桩基加固方案和斜坡加固方案。以 14 号墩为例,桥梁桩基加固方案要求对既有承台进行扩建,扩建后新建承台的尺寸为 14.2 m×11.0 m×3.5 m,采用 8 根 φ1.5 m 钻孔灌注桩对既有桥墩基础进行加固,新建桩长 18~31 m。斜坡加固方案主要包含清方减载、反压回填、锚杆加固和抗滑桩加固 4 种加固措施。

建立斜坡桥梁桩基计算模型分既有状态和加固状态。为方便建模计算,将工程原型的岩土层简化为土体和基岩 2 部分。既有状态和加固状态 2 种计算工况分别按如图 1(a)和图 1(b)所示计算截面进行建模计算。为研究降雨作用对桥梁桩基和斜坡变形的影响及对斜坡安全稳定性的影响,在既有状态和加固状态中又分别考虑了天然状态和降雨状态两种计算条件,共计 4 种计算工况。

2 数值计算模型的建立

2.1 模型概况

数值计算模型如图 2 所示。三维计算模型的左

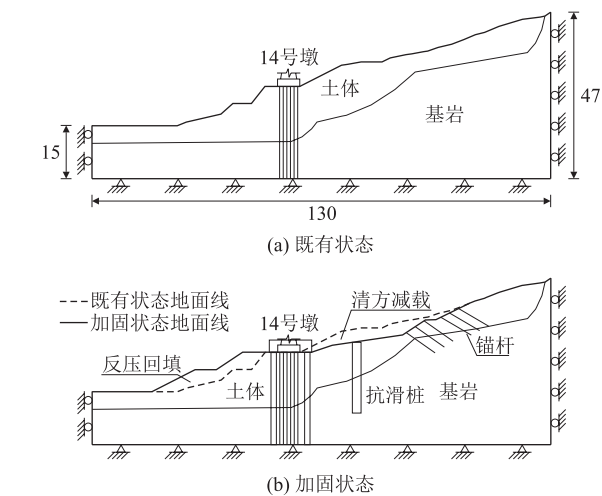


图1 数值建模依据的截面图(m)

边界高 15 m,右边界高 47 m,底部边界长 130 m,模型宽 24 m。土体部分的网格尺寸为 1.0 m;基岩靠近土体部分的网格尺寸为 1.0 m,远离土体部分的网格尺寸为 5.0 m;桥梁桩基、抗滑桩和锚杆的网格尺寸均为 1.0 m。既有状态模型单元总数为 53 760 个,加固状态模型单元总数为个 56 494 个。

如图 2(b) 所示,清方减载和反压回填加固措施分别通过在模型相应位置减小及增加斜坡几何尺寸来实现。桥梁桩基、锚杆和抗滑桩均采用 ABAQUS 软件相互作用模块下的嵌入约束(embedded region)嵌入到斜坡岩土层中^[10]。模型的前、后、左、右边界约束各边界面法向方向的位移;底部边界约束边界面法向和 2 个切向的位移。

2.2 材料参数的选取

土体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型,基岩采用线弹性本构模型,岩土体使用实体单元(C3D8 单元)建模。桥梁桩基承台采用线弹性本构模型,通过板单元(S4 单元)建立。桥墩、基桩和抗滑桩均采用线弹性本构模型,通过梁单元(B31 单元)建立。锚杆采用线弹性本构模型,通过杆单元(T3D2 单元)建立。

分析降雨对桥梁桩基和斜坡变形及斜坡稳定性影响时,考虑最不利情况即基岩以上土体被持续强降雨渗透,通过采用饱和状态下的土体重度和抗剪强度来模拟降雨引发的桥梁桩基、斜坡变形和斜坡稳定性降低^[11]。根据地勘资料,斜坡土体的土粒比重 $G_s = 2.69$,含水率 $\omega = 19\%$;天然状态下斜坡土体重度 $\gamma = 19\text{ kN/m}^3$,抗剪强度 $c = 13.44\text{ kPa}$ 、 $\phi = 12.06^\circ$;饱和状态下重度 $\gamma = 20\text{ kN/m}^3$,抗剪强度 $c = 12.00\text{ kPa}$ 、 $\phi = 10.80^\circ$ 。模型材料的物理力学

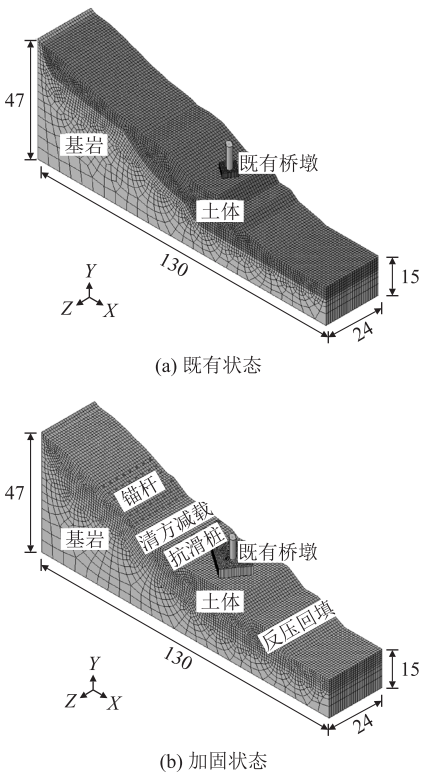


图2 数值计算模型概况(m)

参数如表 1 所示。

表1 材料物理力学参数表

材料名称		弹性模量 /MPa	泊松比	重度/ (kN·m ⁻³)	黏聚力 /kPa	内摩擦 角/(°)
土层	天然状态	30	0.3	19	13.44	12.06
	降雨状态	30	0.33	20	12	10.8
基岩		1 × 10 ⁴	0.2	23	—	—
桥墩		3.25 × 10 ⁴	0.2	25	—	—
承台		3.25 × 10 ⁴	0.2	25	—	—
基桩		3.25 × 10 ⁴	0.2	25	—	—
抗滑桩		3.25 × 10 ⁴	0.2	25	—	—
锚杆		2.06 × 10 ⁵	0.3	78.5	—	—

3 桥梁桩基变形及斜坡稳定性

3.1 强度折减法的基本原理

采用强度折减法计算边坡稳定安全系数,如式(1)和式(2)所示。

$$c_m = \frac{c}{F_r}$$
(1)

$$\phi_m = \arctan\left(\frac{\tan\phi}{F_r}\right)$$
(2)

式中: C_m ——折减后的黏聚力;

ϕ_m ——折减后的内摩擦角;

F_r ——强度折减系数。

计算开始时先使用 $F_r = 0.5$ 时计算得出的抗剪强

度指标进行地应力平衡,随后进行强度折减, F_r 由0.5逐渐增长为4.0,土体的抗剪强度参数随 F_r 的增大而逐步折减。计算依据上式循环计算,达到临界破坏状态时的强度折减系数即为边坡稳定安全系数 F_s 。

3.2 既有状态桥梁桩基变形及斜坡稳定性

(1) 桥梁桩基变形

在墩顶和墩底分别布置位移监测点监测桥墩横向(X轴向)位移,如图3(a)所示。分别计算天然状态和降雨状态条件下桥墩横向位移,通过二者差值得出因降雨作用导致的桥墩附加横向位移变化曲线如图3(b)所示。

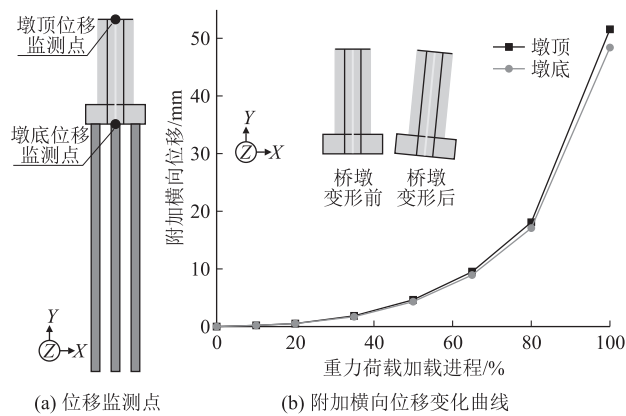


图3 既有状态桥墩附加横向位移变化曲线图

由图3可知,既有状态条件下,降雨作用导致桥梁桩基产生了较大的附加横向位移,墩顶附加横向位移为52 mm。实测CPⅢ纵向位移为39 mm,横向位移为46 mm,实测纵、横向位移向模型X轴向的投影矢量和为60 mm,计算值与实测值较为接近,证实了数值建模计算的有效性。

既有状态下,墩顶附加横向位移计算值为52 mm,较墩底附加横向位移计算值49 mm,增大了3 mm,说明桥墩产生了一定角度的转动,如图3(b)所示。根据墩顶、底附加横向位移差值和桥墩高度的几何关系可知桥墩转角为0.016°。

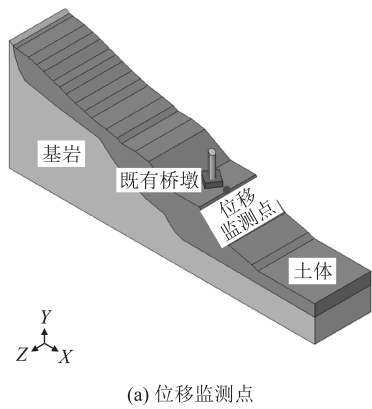
(2) 斜坡变形

在斜坡上布置位移监测点分析斜坡横向(X轴向)位移,如图4(a)所示。绘制因降雨导致的斜坡附加横向位移变化曲线如图4(b)所示。

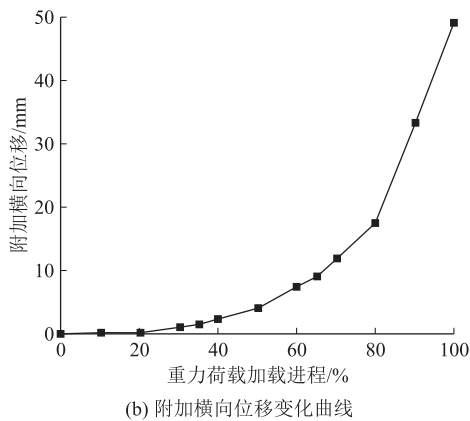
由图4可知,降雨作用导致既有状态条件下的斜坡产生了较大的附加横向位移,斜坡位移监测点的附加横向位移为49 mm。

(3) 斜坡稳定性

既有状态条件下斜坡处于极限状态时的滑动面形态如图5所示。



(a) 位移监测点



(b) 附加横向位移变化曲线

图4 既有状态斜坡附加横向位移变化曲线图



图5 既有状态斜坡滑动面形态图

由图5可知,既有状态斜坡失稳破坏时,滑动面贯穿了整个桥梁桩基,滑坡体几乎为整个斜坡上的土体。滑坡体对桥梁桩基的影响较大,桥梁桩基产生了较大的横向位移。

提取斜坡位移监测点的横向位移随强度折减系数变化曲线如图6所示。

由图6可知,天然状态和降雨状态下的斜坡稳定安全系数分别为1.18和1.02,降雨导致既有状态下的斜坡稳定安全系数降低,加剧了斜坡失稳的风险。

3.3 加固状态桥梁桩基变形及斜坡稳定性

(1) 桥梁桩基变形

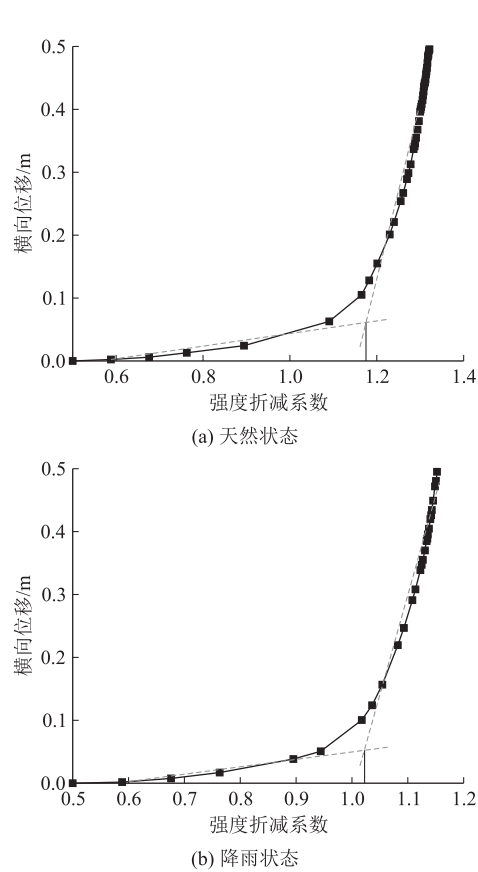


图 6 斜坡位移监测点横向位移随强度折减系数变化曲线图

在桥墩顶和桥墩底分别布置位移监测点分析桥墩横向(X 轴向)位移,如图 7(a)所示。绘制计算过程中因降雨作用导致的桥墩附加横向位移变化曲线如图 7(b)所示。

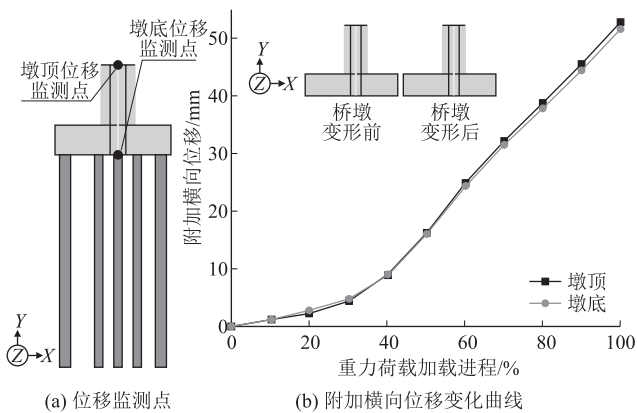


图 7 加固状态桥墩附加横向位移变化曲线图

由图 7 可知,加固状态条件下,因降雨作用导致的墩顶、底附加横向位移为 1 mm;相较于既有状态下墩顶、底 52 mm 和 49 mm 的附加横向位移,各项加固措施有效降低了降雨条件下的桥梁附加横向

位移。

加固状态条件下,墩顶、底附加横向位移差值仅为 0.025 mm,说明加固后的桥墩几乎没有发生转动,如图 7(b)所示。各项加固措施不仅降低了桥梁桩基的附加横向位移,还抑制了桥墩转动。

(2) 斜坡变形

在斜坡上布置位移监测点监测斜坡横向(X 轴向)位移,如图 8(a)所示。绘制计算过程中因降雨作用导致的斜坡附加横向位移变化曲线如图 8(b)所示。

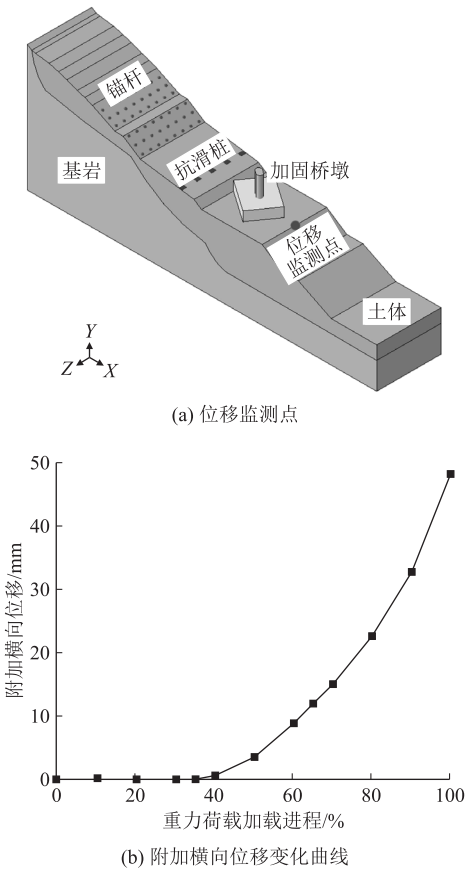


图 8 加固状态斜坡附加横向位移变化曲线图

由图 8 可知,加固状态条件下,因降雨作用导致的斜坡附加横向位移约 5 mm,相较于既有状态斜坡位移监测点 49 mm 的附加横向位移,各项加固措施有效降低了降雨作用导致的斜坡附加横向位移。

(3) 斜坡稳定性

加固状态条件下斜坡处于极限状态时的滑动面形态如图 9 所示。

由图 9 可知,加固状态边坡发生失稳破坏时,滑动面位于整个斜坡的坡脚处,没有贯穿桥梁桩基,相应的滑坡体为桥梁桩基右侧斜坡土体,滑坡体对桥梁桩基的影响较小,因而使桥梁桩基产生的变形较小。

提取斜坡位移监测点的横向位移随强度折减系

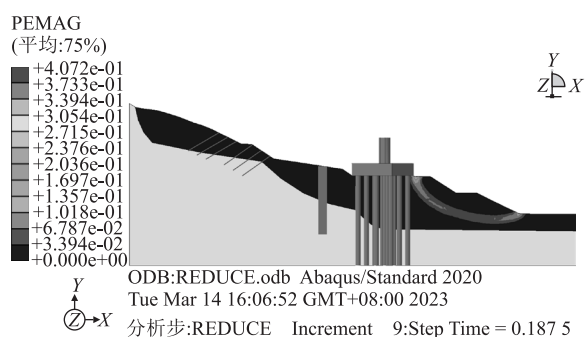


图9 加固状态斜坡滑动面形态图

数变化曲线如图10所示。

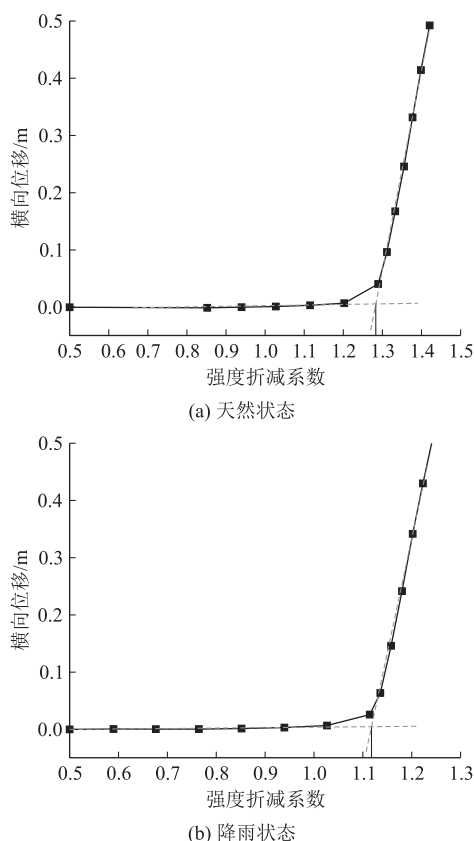


图10 斜坡位移监测点横向位移随强度折减系数变化曲线图

由图10可知,加固后天然状态和降雨状态条件下的斜坡地基稳定安全系数分别为1.28和1.12,斜坡稳定安全系数均得到了提高。

4 结论

本文建立了桥梁桩基-斜坡三维有限元计算模型,计算了既有状态和加固后因降雨作用导致的桥梁桩基及斜坡的附加横向位移;采用强度折减法计算了2种工况下的斜坡稳定安全系数,研究了降雨作用对斜坡稳定安全系数的影响。得出的主要结论如下:

(1)斜坡地基在持续强降雨下的稳定性降低、水平变形增大,导致桥梁桩基产生较大附加位移。为保障线路安全,对桥梁桩基采取了扩大承台及增加基桩数量加固方式,同时对斜坡进行清方减载、反压回填、锚杆和抗滑桩加固措施,增强了斜坡地基的稳定性和桥梁桩基的抗变形能力。

(2)雨水入渗引起斜坡土体重度增加和抗剪强度降低,是导致桥梁桩基随斜坡土体产生了较大附加横向位移的关键因素。土体重度 and 抗剪强度由天然状态变为饱和后,既有斜坡地基稳定安全系数由1.18降为1.02,横向位移增加约49 mm,桥墩平均增加约51 mm,转角约0.016°,墩顶位移存在放大效应,且与病害实测值较为吻合。

(3)经加固后的斜坡地基桥梁桩基稳定安全系数在天然状态为1.28、持续降雨下约1.12,较加固前相应增加了0.1;降雨引起的斜坡地基和桥墩横向位移分别为5 mm和1 mm,较加固前分别减小了90%和98%,表明加固后的斜坡地基桥梁桩基具有足够的稳定性和较强的抗变形能力。

参考文献

- [1] 吴坤,舒中文,程谦恭,等. 凯羊高速公路RK9滑坡形成机制及治理措施[J]. 铁道建筑, 2017, 57(5): 109-112.
WU Kun, SHU Zhongwen, CHENG Qiangong, et al. Formation Mechanism and Treatment Measures for RK9 Landslide on Kaili-Yang Jia Expressway [J]. Railway Engineering, 2017, 57(5): 109-112.
- [2] 王浩,王晓东,泮俊. 超高路堑边坡治理工程案例研究II: 治理对策及其过程控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1152-1161.
WANG Hao, WANG Xiaodong, PAN Jun. Case Study on Super-high Cutting Slope Treatment Project II: Treatment Countermeasures and Process Control [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5): 1152-1161.
- [3] 陈建峰,陈思贤,杜长城,等. 抗滑桩-锚索框架组合结构受力机制研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(5): 7-12.
CHEN Jianfeng, CHEN Sixian, DU Changcheng, et al. Research on the Mechanical Mechanism of Composite Structure of Anti-slide Pile and Anchor Cable Frame Beam [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(5): 7-12.
- [4] 敖贵勇,张玉芳,赵尚毅,等. 埋入式抗滑桩承担的滑坡推力分析[J]. 工程力学, 2020, 37(S01): 187-192.
AO Guiyong, ZHANG Yufang, ZHAO Shangyi, et al. Analysis of Landslide Thrust Acting on Embedded Anti-slide Pile [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(S01): 187-192.
- [5] 李国维,赫新荣,吴建涛,等. 泥质砂岩边坡加固锚杆黏结疲劳特征原位试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(9): 1729-

1738.
LI Guowei, HE Xinrong, WU Jiantao, et al. In-situ Test of Bond Fatigue Characteristics of Anchor Rod Reinforced by Argillaceous Sand Soft Rock Slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(9): 1729 – 1738.

[6] 蒋明镜, 江华利, 廖优斌, 等. 顺层岩质边坡锚杆加固机理离散元分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(S1): 144 – 149.
JIANG Mingjing, JIANG Huali, LIAO Youbin, et al. DEM Analysis on Bolt Reinforcement Mechanism of Bedding Rock Slope [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(S1): 144 – 149.

[7] 颜敬, 方晓敏. 支护结构前反压土计算方法回顾及一种新的简化分析方法[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 167 – 174.
YAN Jing, FANG Xiaomin. Review of Calculation Methods of Earth Berm before Retaining Structure and a New Simplified Analytical Method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 167 – 174.

[8] 任翔, 罗丽娟, 李芳涛, 等. 黄土地区抗滑桩嵌固段桩前被动土拱形成演化过程试验[J]. 中国公路学报, 2022, 35(11): 86 – 96.
REN Xiang, LUO Lijuan, LI Fangtao, et al. Experimental Study on the Evolution of Passive Soil Arch in Front of Antislides Piles in Loess

Area [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(11): 86 – 96.

[9] 王发玲, 刘才华, 龚哲. 顺层岩质边坡锚杆支护机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1465 – 1470.
WANG Faling, LIU Caihua, GONG Zhe. Mechanisms of Bolt Support for Bedding Rock Slopes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1465 – 1470.

[10] 周长东, 李艺敏. 对穿 CFRP 锚杆加固故宫城墙结构的力学性能[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(6): 1484 – 1499.
ZHOU Changdong, LI Yimin. Mechanical Properties of Strengthening the Wall Structure of the Forbidden City with CFRP Bolts [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(6): 1484 – 1499.

[11] 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 Chang, JI Fanfan, ZHENG Gang, et al. Measurement and Mechanism of Influences of Rainfall on Supporting Structures of Foundation Pits in Soft Soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(3): 447 – 456.

(上接第 15 页)

打造国际视野和格局, 加强国际合作, 推动高速铁路技术的国际化和全球化发展。

参考文献:

[1] 王同军. 中国智能高速铁路 2.0 的内涵特征、体系架构与实施路径[J]. 铁路计算机应用, 2022, 31(7): 1 – 9.
WANG Tongjun. Connotation, Architecture and Implementation Path of China Intelligent High-speed Railway 2.0 [J]. Railway Computer Application, 2022, 31(7): 1 – 9.

[2] 邓婕. 高速铁路科技管理标准化的应用与实践[J]. 上海铁道科技, 2017(4): 150 – 151, 146.
DENG Jie. Application and Practice of Standardization of High-speed Railway Science and Technology Management [J]. Shanghai Railway Science & Technology, 2017(4): 150 – 151, 146.

[3] 党的十八大以来铁路科技创新取得显著成就 中国高速铁路、重载铁路、高原高寒铁路技术达到世界领先水平[J]. 铁道学报, 2019, 41(12): 138.
Since the 18th National Congress of the Communist Party of China, Remarkable Achievements Have been Made in Railway Scientific and Technological Innovation. China's High-speed Railway, Heavy-haul Railway and Plateau Alpine Railway Technology Have Reached the World Leading Level [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(12): 138.

[4] 吴应明, 余雄军. 大型建企科技创新体系建设[J]. 施工企业管理, 2021(9): 32 – 36.
WU Yingming, YU Xiongjun. Construction of Scientific and Technological Innovation System of Large-scale Construction

Enterprises [J]. Construction Enterprise Management, 2021(9): 32 – 36.

[5] 时炜. 建筑企业科技创新体系建设实践与思考[J]. 施工企业管理, 2022(9): 29 – 30.
SHI Wei. Practice and Thinking on the Construction of Scientific and Technological Innovation System in Construction Enterprises [J]. Construction Enterprise Management, 2022(9): 29 – 30.

[6] 周黎, 王岐东, 郭树东, 等. 高速铁路基础研究联合基金回顾与展望[J]. 中国科学基金, 2021(S1): 148 – 153.
ZHOU Li, WANG Qidong, GUO Shudong, et al. Review and Prospects of HSR Fundamental Research Joint Fund [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021(S1): 148 – 153.

[7] 余才阳, 朱敏捷. 科技创新体系建设实践[J]. 中国电力企业管理, 2023(8): 48 – 49.
YU Caiyang, ZHU Minjie. Practice of Science and Technology Innovation System Construction [J]. China Power Enterprise Management, 2023(8): 48 – 49.

[8] 张红平, 宗璐, 井国庆, 等. 中国铁路标准技术分析 & 国际化建议[J]. 中国铁路, 2022(4): 69 – 74.
ZHANG Hongping, ZONG Lu, JING Guoqing, et al. Analysis of Superior Technologies of Chinese Railway Standards and Suggestions on Internationalization [J]. Chinese Railways, 2022(4): 69 – 74.

[9] 井国庆, 张红平, 王浩宇, 等. 国际铁路标准发展趋势与建议[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(11): 100 – 105.
JING Guoqing, ZHANG Hongping, WANG Haoyu, et al. Trends and Suggestions to the Development of International Railway Standards [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(11): 100 – 105.