

桩板墙支挡高填方路堤的结构特性与参数优化分析

王长胜¹, 刘泽², 杨雄¹, 杨冬冬¹, 郭志广²

¹浙江交工国际工程有限公司, 浙江 杭州

²湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2023年3月5日; 录用日期: 2023年3月24日; 发布日期: 2023年3月31日

摘要

本文结合郑西高速FK1 + 300~FK1 + 338段路基的实际条件建立了数值分析模型, 研究了桩板墙在高填方路基中应用的可行性, 并讨论了设桩参数的影响。结果表明, 该路段采用桩板墙进行支挡时, 路基具有良好的结构特性和足够的安全系数, 设计方案下抗滑桩呈弹性桩, 其悬臂段存在负弯矩区; 随抗滑桩锚固段长度增加, 路堤变形减小、安全系数增大, 但存在最大有效锚固长度; 在工程常用截面尺寸下, 路堤的安全系数基本相同。

关键词

桩板墙, 高填方路, 结构特性, 数值分析

Structural Characteristics and Parameter Optimization Analysis of Pile-Sheet Wall Retaining High Fill Embankment

Changsheng Wang¹, Ze Liu², Xiong Yang¹, Dongdong Yang¹, Zhiguang Guo²

¹Zhejiang Jiaotong International Engineering Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

²School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: Mar. 5th, 2023; accepted: Mar. 24th, 2023; published: Mar. 31st, 2023

Abstract

In this paper, based on the actual conditions of the section FK1 + 300~FK1 + 338 subgrade of

文章引用: 王长胜, 刘泽, 杨雄, 杨冬冬, 郭志广. 桩板墙支挡高填方路堤的结构特性与参数优化分析[J]. 土木工程, 2023, 12(3): 415-424. DOI: 10.12677/hjce.2023.123046

Zhengzhou-Xi'an Expressway, a numerical analysis model is established to study the feasibility of the application of pile-sheet wall in high fill subgrade, and the influence of pile setting parameters is discussed. The results show that the subgrade has good structural characteristics and sufficient safety factors when the pile-sheet wall is used for retaining in this section. The anti-slide pile is elastic under the design scheme, and there is a negative bending moment zone in its cantilever section; the embankment deformation decreases and the safety factor increases with the increase of the length of the anti-slide pile anchorage section, but there is a maximum effective anchorage length. Under the common section size of the project, the safety coefficient of the embankment is basically the same.

Keywords

Pile-Sheet Wall, High Fill Road, Structural Characteristics, Numerical Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

受地形起伏变化大的影响,山区公路建设时存在大量的深挖高填路段,路基和边坡的稳定性控制是工程建设的关键之一。目前,高填方路堤大多采用 1:1.5、1:1.75、1:2 的坡率进行放坡处理。这种方式不仅土方用量大,而且土地占用面积大,当用地受限时,就需要配合各种支挡技术进行支挡收坡。

桩板墙是将抗滑桩和挡土板相结合的一种支挡技术,不仅可以提供很大的支挡力,而且布置灵活,在滑坡防治工程中得到广泛应用,近年来也开始在高填方路基工程中得到应用。许多学者也对桩板墙开展了一些研究。如,谢淼[1]通过大型地震台试验测试了桩板墙支挡下边坡的抗震性能,结果表明,桩板墙能有效减弱边坡的震动效应,是一种抗震性能优秀的支挡技术。谌建霖[2]进一步通过振动台试验研究了工程水泥基复合材料(ECC)桩板墙和普通钢筋混凝土(RC)桩板墙的结构特性,并认为 ECC 桩板墙的抗震性能优于 RC 桩板墙。严琼[3]结合云南红河州建水至元阳高速公路深挖路堑边坡的实际条件对桩板墙的设计方案进行了优化研究。李兴媛[4]还通过现场试验测试了降雨入渗条件下桩板墙支挡膨胀土边坡时的土压力分布规律。屈俊童[5]通过数值分析研究了斜插板式桩板墙后的土拱效应和斜插板的影响。陈豫川[6]在理论分析的基础上,建立了桩板墙支挡下基坑的稳定性分析上限法。

郑西高速公路尧栾段位于崇山峻岭中,沿线地形变化,沟壑纵横,许多路段地形陡、填高大,为减少土地占用并保证路基的稳定性,本文拟结合这一工程实际,进一步探讨桩板墙在高填方路基中应用的可行性与合理的设置参数,为依托工程的建设提供参考。

2. 分析模型

郑西高速 FK1 + 300~FK1 + 338 段位于“U”型沟谷区,地势左低右高,为典型的陡坡路基。边坡岩土以全-强-中风化花岗岩为主,岩石风化强烈,受构造影响岩石节理裂隙发育。若采用放坡方案填筑路基,该路段左侧的占地范围将非常大,且路基位于斜面上,易出现整体滑移失稳。若采用衡重式挡土墙进行支挡收坡,支挡高度大,墙后土压力大,造成墙体所需尺寸大,地基承载力很难满足要求。反复讨论后,技术人员提出了采用桩板墙进行支挡的方案,初定方案如图 1 所示:在沟谷区设置 5 根截面尺寸为 1.5 × 2.0 m 的抗滑桩,桩间距为 6 m,桩的悬臂段采用预制混凝土挡土板进行支挡。

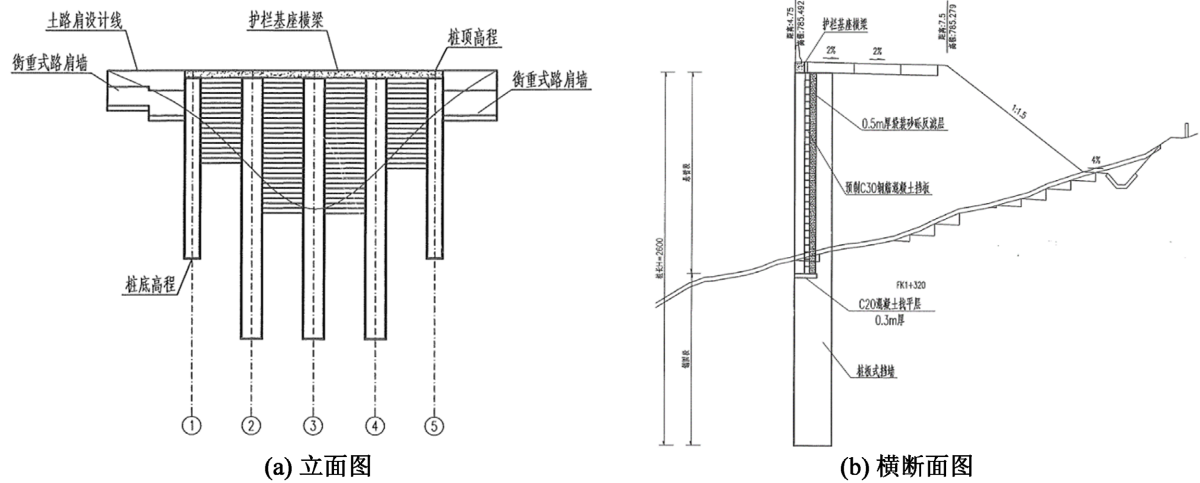


Figure 1. Preliminary design scheme
图 1. 初步设计方案

为了验证这一方案的可行性，取初步设计方案(图 1(a)中的) 3#桩及其影响范围为研究对象，建立如图 2 所示的有限元分析模型。模型总长 72 m、高 42 m、宽 6 m，由斜坡地基、路基、路面和桩板墙等部分组成，其中抗滑桩总长 26 m (其悬臂段长度 $H_1 = 12.5$ m)，截面尺寸为 1.5×2.0 m；抗滑桩采用梁单元模拟，挡土板采用二维板单元模拟，其余均采用三维实体单元模拟。各部分的力学参数见表 1。建模时，模型底部约束其竖向和水平位移，沿线路纵向约束其 Y 方向位移，路基横断面方向约束其 X 方向位移，模型顶面及坡面为自由边界；模型建立后在路面施加 20 kPa 的车辆附加荷载。

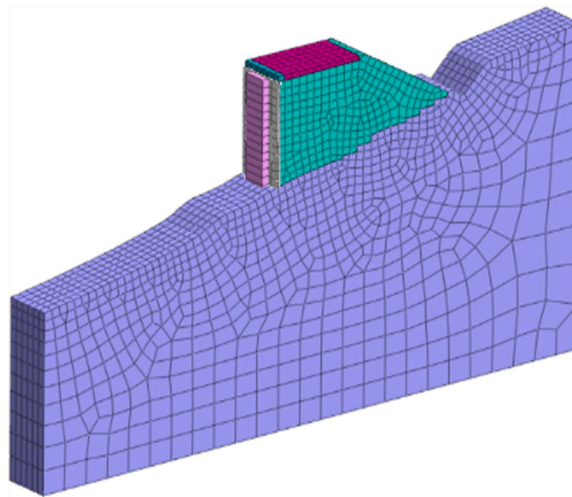


Figure 2. Numerical analysis model
图 2. 数值分析模型

Table 1. Calculation parameters of pile-sheet wall model
表 1. 桩板墙模型计算参数

岩土名称	重度/(kN/m ³)	粘聚力 c /(kPa)	内摩擦角 φ /(kPa)	弹性模量/(kPa)	泊松比/ μ
路基	20	25	35	128,000	0.3
全风化花岗岩	21	20	25	400,000	0.23

Continued

强风化花岗岩	22	25	30	650,000	0.22
中风化花岗岩	26	100	35	2,800,000	0.2
抗滑桩	25	-	-	32,000,000	0.2
挡土板	25	-	-	30,000,000	0.2

3. 计算结果与分析

3.1. 桩板墙支挡下路堤的结构特性

图 3 为桩板墙支挡时路堤的水平位移云图。从图中可以看到，路堤的最大水平位移为 7.8 mm，出现于左侧路肩处，主要是由于路堤填料致使抗滑桩悬臂段产生向外偏转而产生。进一步采用强度折减法对模型进行稳定性计算。当折减系数达到 2.65 时，路基达到极限状态。图 4 为极限状态下路基的等效塑性应变云图。可见，采用桩板墙支挡路基时，潜在滑动面表现出由右侧路肩通过抗滑桩底部向桩前延伸的趋势，但由于抗滑桩锚固段的阻碍作用，并未出现贯通的迹象，出现较大塑性变形的区域主要集中在路面及靠近抗滑桩悬臂段，最大塑性应变值为 15.9%。可见，该路堤采用桩板墙方案时，路基的安全系数为 2.65，不仅可以满足《公路路基设计规范》(JTG D30-2015)的要求，而且具有较高的安全储备。

图 5 为抗滑桩的桩身位移云图。可见，在路面车辆荷载和路基填料重力所形成的土压力作用下，桩体位移由上至下呈逐渐减小的分布规律，悬臂段顶部的位移达到最大，最大值为 7.6 mm；而锚固段由于嵌固在岩土中，显示出较好的嵌固状态，位移量很小，最大位移仅为 0.15 mm。

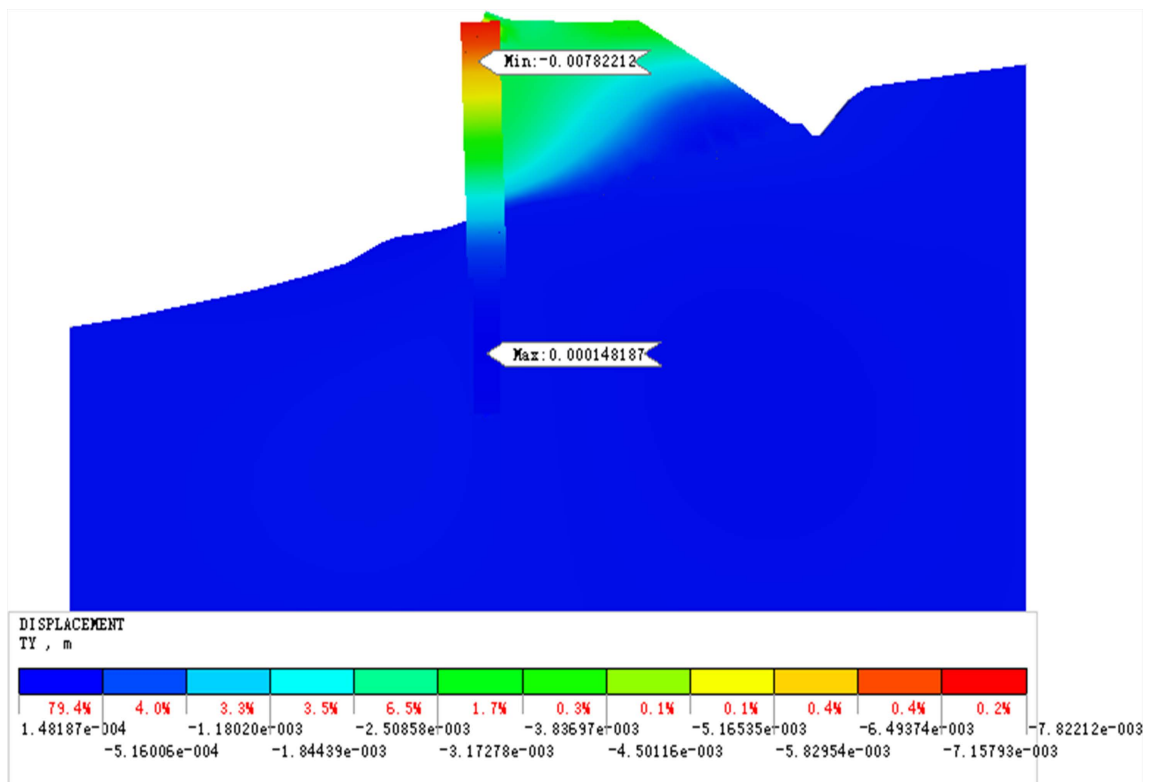


Figure 3. Horizontal displacement nephogram of subgrade

图 3. 路基的水平位移云图

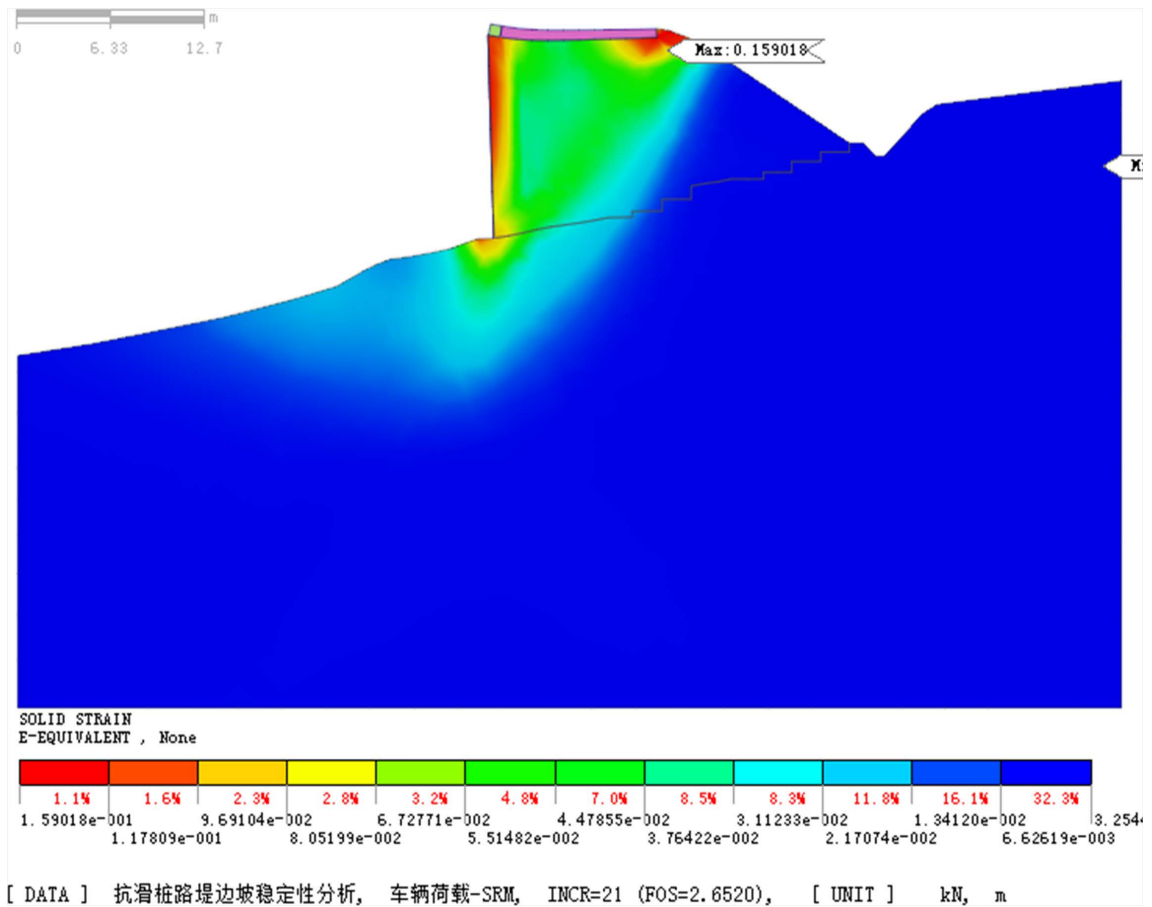


Figure 4. Equivalent plastic strain nephogram of subgrade under limit state
图 4. 极限状态下路基的等效塑性应变云图

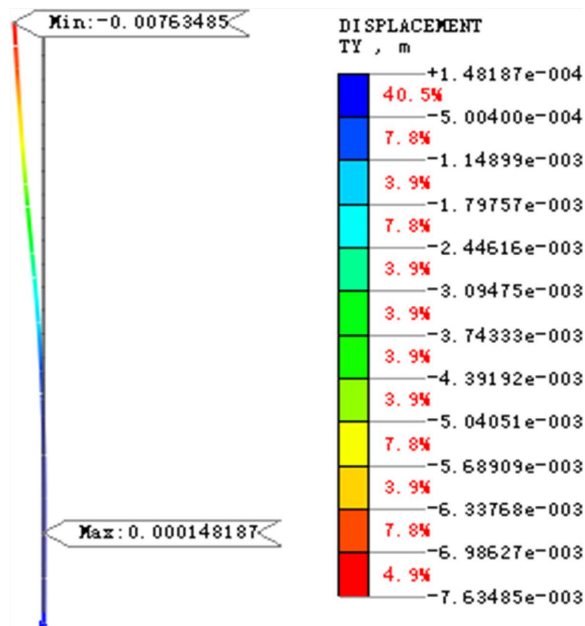


Figure 5. Displacement nephogram of anti-slide pile
图 5. 抗滑桩的桩身位移云图

图 6 为抗滑桩的桩身弯矩图。桩身弯矩最大值出现在锚固段、距地表以下约 2 m 处，为正弯矩，弯矩值为 3.7 MN·m，使抗滑桩锚固段的背离路堤侧受压、靠近路堤侧受拉，抗滑桩整体表现为向外倾倒的趋势。从最大弯矩处开始并向下，随着锚固深度增加，弯矩值逐渐减小并趋于零，表明边坡地基嵌固作用显著。在距抗滑桩桩顶约 5 m 的位置取得负弯矩的最大值，最大值为 -1.6 MN·m，主要是由于桩顶部设置有混凝土连系梁而导致抗滑桩悬臂段存在弱简支梁效应所造成；这一负弯矩表明在路堤土体的压力下，抗滑桩悬臂段在靠近路堤一侧受压，对应的临空侧受拉，这与锚固段的受力是不同的，是抗滑桩配筋设计时应充分注意的问题。

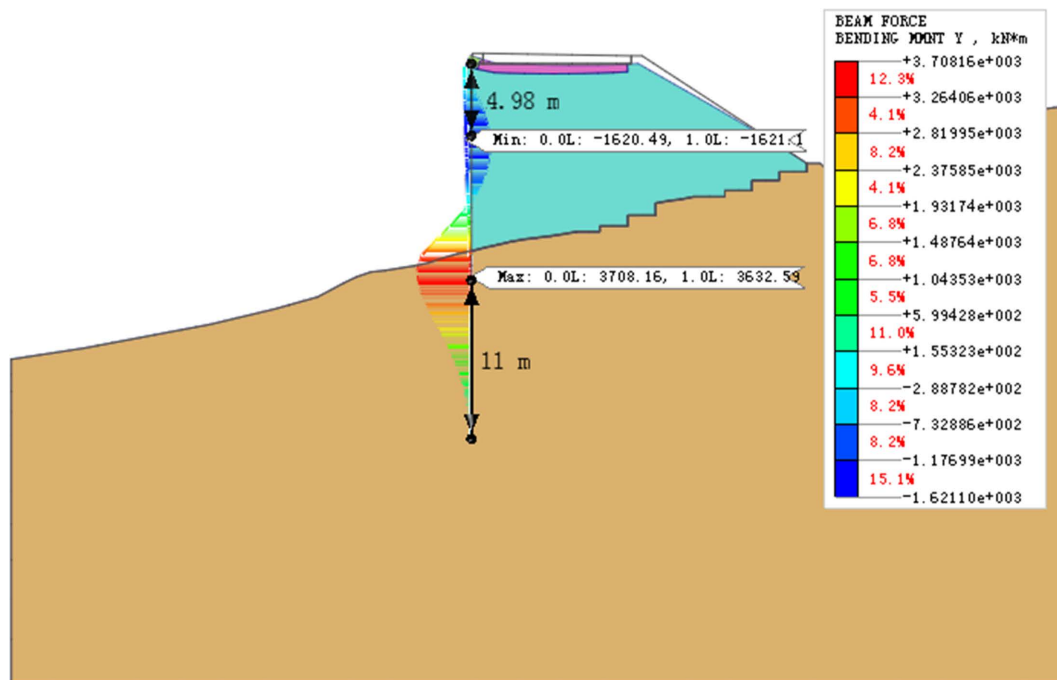


Figure 6. Bending moment diagram of anti-slide pile shaft

图 6. 抗滑桩桩身弯矩图

3.2. 抗滑桩设计参数的影响分析

1) 桩长

保持抗滑桩截面、桩间距不变，研究桩长对路基稳定系数和桩体位移的影响。工程经验表明，抗滑桩的锚固段一般可为总长的 1/4~1/2。由于受路面标高影响，路基填方高度已确定，即桩的悬臂段长度已固定不能变化，影响桩长的因素主要是锚固段，故选取锚固段长度依次为 6 m、8 m、10 m、12 m、14 m、16 m，对应的抗滑桩总长为 19.3 m、21.3 m、23.3 m、25.3 m、27.3 m、29.3 m，重新建模后进行分析。

图 7 给出了不同锚固长度时抗滑桩的水平位移云图。分析可知，在路堤和车辆荷载作用下抗滑桩向外倾斜变形，不同桩长下的最大负水平位移均出现在桩顶，但当桩长较短时(如锚固段长度为 6 m、8 m 和 10 m)时，最大正水平位移出现在桩端位置，桩体呈整体倾斜式变形，表现出刚性桩的特征；随着锚固段长度的增加，桩体的最大正水平位移取得的位置逐渐上移，逐渐表现出弹性桩的特征。将抗滑桩桩顶和桩底水平位移随桩长的变化绘制于图 8。分析可知，桩体桩顶的最大负水平位移随着桩长增加而快速减小，但当桩的锚固段长度达到 12 m 后，桩顶的水平位移值保持在 6.5 mm 不变，此时锚固段的位移也表现出类似规律。图 9 给出了路基安全系数随锚固段长度的变化趋势。可见，随锚固段长度的增加路基

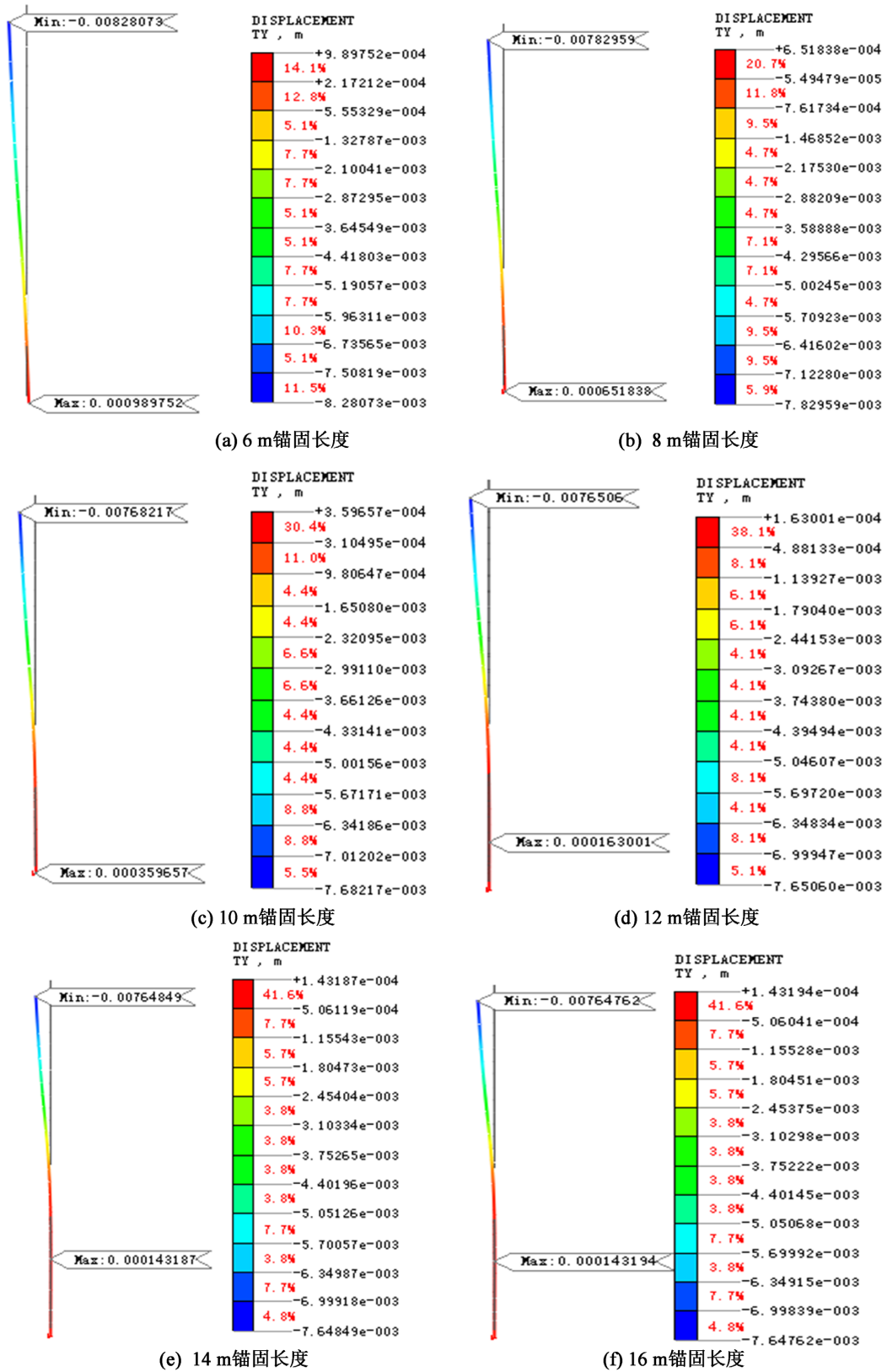


Figure 7. Displacement nephogram of anti-slide pile with different anchorage lengths
图 7. 不同锚固长度时抗滑桩的位移云图

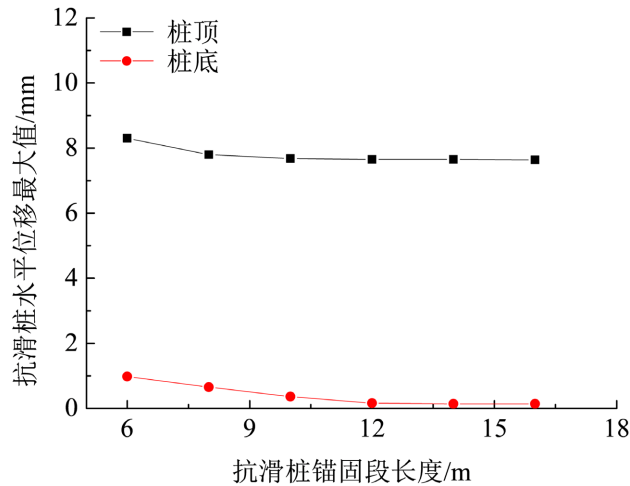


Figure 8. Variation of horizontal displacement of anti-slide pile with length of anchorage section
图 8. 抗滑桩水平位移随锚固段长度的变化

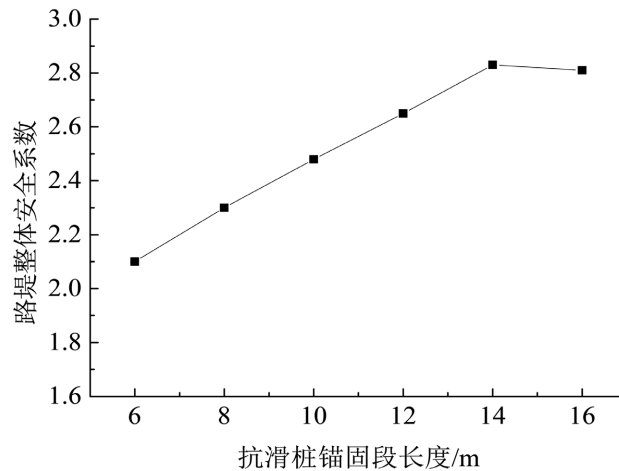


Figure 9. Variation of embankment safety coefficient with length of anchorage section
图 9. 路堤安全系数随锚固段长度的变化

安全系数增大,但当锚固段长度达到 14 m 后,这一规律不再保持,安全系数不再增大;同时该图也表明,当锚固段长度达到 6 m 后,该方案即有足够的安全系数,可满足规范要求。

2) 截面尺寸

保持桩长和桩间距不变,将桩截面尺寸依次调整为 1.5 m × 2.0 m、2.0 m × 2.5 m、2.5 m × 3.0 m、3.0 m × 3.5 m 再进行计算。图 10 为不同桩截面尺寸时抗滑桩桩体的水平位移云图。可见,当桩截面尺寸偏小时(如,1.5 m × 2.0 m),桩体具有弹性桩的特性,桩底部分水平位移为零,桩体上部在路堤荷载下向外倾斜;随着桩截面尺寸增加,桩体呈现整体向外倾斜的特征,表现为刚性桩。图 11 给出了抗滑桩桩顶和桩底水平位移随桩截面尺寸变化的发展曲线。可见,随着桩截面尺寸增加,桩顶水平位移量逐渐减小,使桩截面尺寸逐渐变大,桩体变得更加刚性,桩底水平位移也逐渐偏大。图 12 给出了路堤安全系数随桩截面尺寸的变化趋势,可见,桩截面尺寸的变化对路基稳定性的影响很小。

4. 研究结论

本文结合郑西高速公路 FK1 + 300~FK1 + 338 路段的实际条件建立数值分析模型,研究了桩板墙在

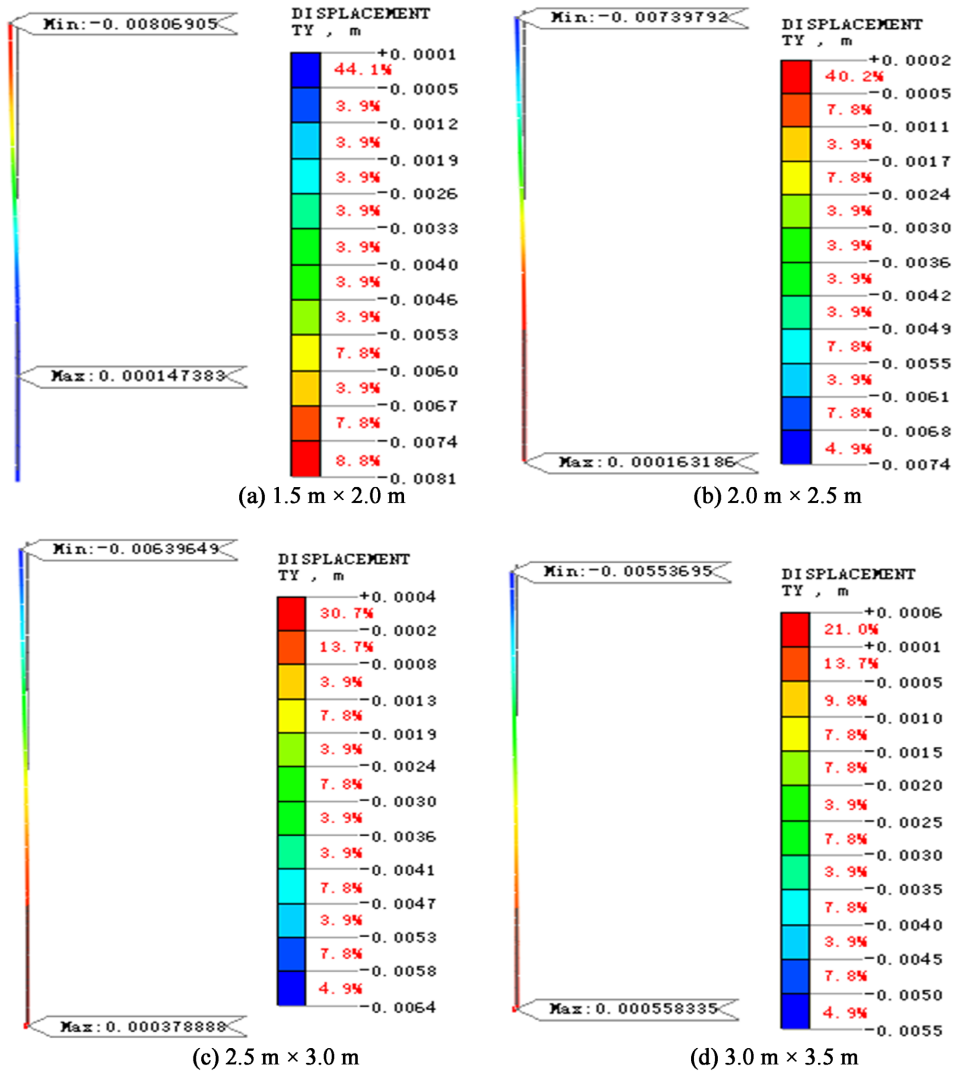


Figure 10. Displacement nephogram of anti-slide pile with different section sizes
图 10. 不同截面尺寸时抗滑桩的位移云图

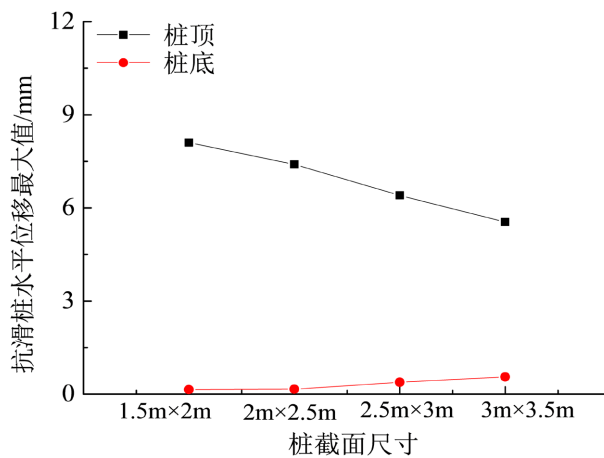


Figure 11. Variation of horizontal displacement of anti-slide pile with pile section size
图 11. 抗滑桩水平位移随桩截面尺寸变化

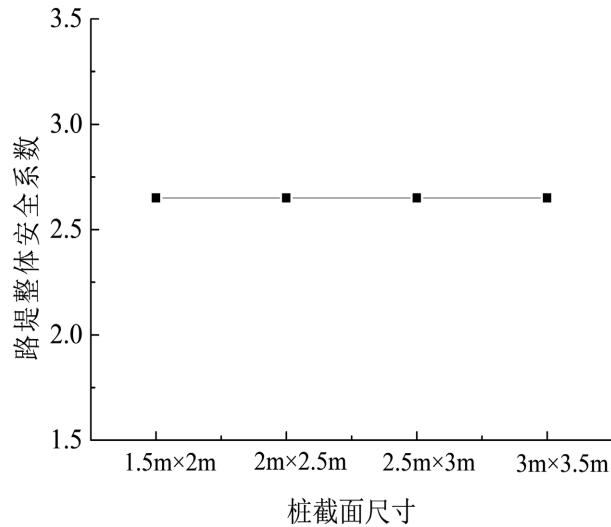


Figure 12. Variation of embankment safety coefficient with pile section size
图 12. 路堤安全系数随桩截面尺寸变化

高填方路基中的应用可行性，并讨论了设桩参数的影响，主要结论有：

1) 郑西高速公路 FK1 + 300~FK1 + 338 路段采用桩板墙进行收坡以减少填方量时，路基具有良好的结构特性，可满足规范要求，并具有较高的安全储备。

2) 受桩顶系梁影响，在路堤土压力作用下，抗滑桩的悬臂段存在负弯矩作用，在抗滑桩配筋设计时，应充分注意这一内力分布特点。

3) 随抗滑桩锚固段长度的增加，路堤的变形减小、安全系数增大，但存在一个最大有效锚固长度，本次计算确定的最大有效锚固长度为 14 m。当桩长超过最大有效锚固长度后，路堤的变形和安全系数不再随锚固段长度的增加而变化。

4) 在工程常用截面尺寸下，路堤的安全系数值基本相同，但随抗滑桩截面尺寸增加，桩顶水平位移量逐渐减小，而桩底水平位移出现增大。

基金项目

浙江省建设科技项目(2021K123、2022K076)、浙江省交通科技项目(2020004)、湖南省自然科学基金项目(2022JJ30257)。

参考文献

- [1] 谢淼, 喻阳, 康承磊, 等. 基于振动台试验的桩板墙加固边坡抗震性能研究[J]. 路基工程, 2022(4): 50-56.
- [2] 谌建霖, 丁选明, 吴琪, 等. ECC 混凝土桩板墙支挡边坡抗震性能振动台模型试验研究[EB/OL]. 土木与环境工程学报(中英文): 1-14. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20230116.1420.005.html>, 2023-01-17.
- [3] 严琼, 曹振生, 王猛, 等. 路堑高边坡桩板墙加固方案设计优化研究[J]. 中外公路, 2022, 42(6): 12-17.
- [4] 李兴瓊, 贾刚龙, 杨果林, 等. 膨胀土路堑边坡桩板墙现场试验研究[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(20): 94-97+103.
- [5] 屈俊童, 胡文斌, 段自侠, 等. 基于土拱效应的斜插桩板墙受力数值模拟分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(4): 628-636.
- [6] 陈豫川. 悬臂式桩板墙稳定性极限分析[J]. 四川建材, 2017, 43(2): 54-55+58.