



抗滑桩上承压力分散型锚杆挡土墙 受力及影响因素分析

张思峰¹, 张新宇¹, 齐 辉², 商淑杰³

(1. 山东建筑大学, 济南 250101; 2. 齐鲁交通发展集团有限公司, 济南 250101;

3. 山东华鉴工程检测有限公司, 济南 250101)

摘 要: 通过建立新型联合支挡结构的有限差分数值分析模型, 在分析其受力及变形规律的基础上, 探讨了填土密实程度、地基土黏聚力、弹性模量、锚定板数量等因素对抗滑桩上承压力分散型锚杆挡墙受力及变形的影响规律。研究结果表明: 填土密实程度对联合支挡结构受力和水平位移影响较大; 地基土黏聚力越大支护结构位移越小; 弹性模量对薄壁挡墙的位移和受力影响较小; 增加锚定板数量有利于提高加固效果。

关键词: 抗滑桩; 压力分散型锚杆; 薄壁挡土墙; 结构受力; 数值模拟; 填土密实程度; 地基土黏聚力; 锚定板数量

中图分类号: U417.1

文献标志码: A

文章编号: 1003-8825(2021)02-0039-06

0 引言

随着我国山区公路建设规模日益增大, 经过高陡横坡地段道路将不可避免地要修建高填方路基或半填半挖路基^[1], 若路基支护方式不合理, 可能会造成路基垮塌、巨大经济损失或人员伤亡, 故对高陡填方路基支护方式研究有重要意义。在高填方路基坡脚设置抗滑桩、上部填方路基采用压力分散型锚杆+薄壁式挡墙, 是一种针对性强且经济有效的联合加固方式。该结构中的抗滑桩可防止沿坡脚的深层滑动产生, 其上方压力分散型锚杆可保证锚定板前方岩土体处于压应力状态, 能充分发挥填方路基岩土体自身承载能力, 其与薄壁式挡土墙组合结构在保证填方路基稳定性同时, 最大限度节省了用地。同时, 为保证挡墙及抗滑桩受力合理, 将钢筋混凝土薄壁式挡墙与抗滑桩通过连接钢筋进行刚性连接, 以保证该联合支挡结构在受力合理基础上, 又具有抗变形能力强、节省空间、自身重量轻、施工方便、工程造价低等优点。故该新型支挡结构对

类似高陡填方路基工程具有良好推广应用价值。

作为新型支挡结构, 现未见到对该结构受力及变形性能研究报道。但对抗滑桩受力及变形性能研究报道较多, 主要集中在对桩土相互作用机理试验或数值模拟研究上^[2-3]。对该种联合支挡结构中压力分散型锚杆+薄壁式挡墙研究文献也基本未见, 少有文献对单独压力分散型锚杆作用机制开展研究^[4-6]。本文采用数值模拟法, 分析该种联合支挡结构在滑坡推力作用下受力及变形规律, 并开展相关设计参数对支挡结构受力及变形影响规律研究, 对该种新型支挡结构设计及施工提供理论指导, 促进该种新型联合支挡结构在实际工程中推广应用。

1 抗滑桩上承压力分散型锚杆挡土墙模型建立

1.1 数值模型建立

运用 FLAC3D 有限差分软件建立数值分析模型, 模型及边坡滑动位移云图, 见图 1。边坡部分分为地基土和路基填土两部分, 模型沿路线横向宽 40 m, 沿路线纵向长 6 m, 模型前侧地基土深 15 m, 后侧地基土 25 m, 填土高 10 m, 坡面倾角 51.34° (坡比 1:0.8)。对上述模型仅设置挡墙并进行路基填土后, 坡体位移无法收敛, 存在明显沿坡脚深层滑动及路基填土侧滑等现象, 原加固措施无法支挡原自然坡体深层滑动, 故需对其采取更加

收稿日期: 2020-05-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108252); 济南市泉城产业领军人才支持计划项目(20190101); 齐鲁交通发展集团有限公司科技计划项目(JHLYDKY3)

作者简介: 张思峰(1976-), 男, 山东济宁人。教授, 博士, 主要从事路基工程方面的科研工作。E-mail: sddxzsf@163.com。

综合性加固方案,即在坡脚设置抗滑桩,路基填土 部分采用压力分散型锚杆+挡墙联合加固形式。

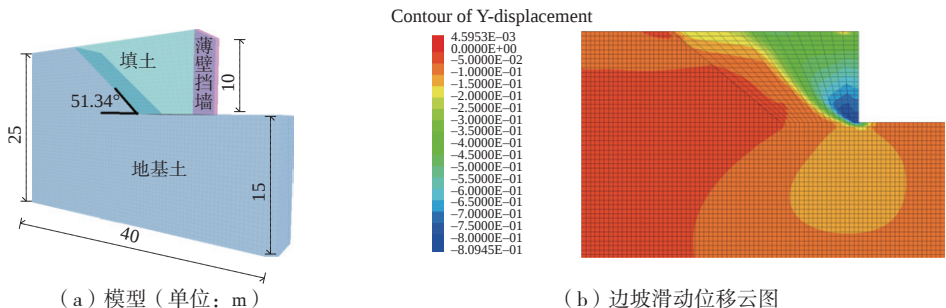


图 1 模型及边坡滑动位移云图

最终的联合加固模型,抗滑桩上承压力(分散)型锚杆挡土墙模型,见图 2。联合加固设计参数为:在坡脚设置抗滑桩,桩长 12.5 m,桩宽取两个半桩,每个半桩为 0.9 m,桩间距 4.2 m;薄壁挡墙高 10.0 m,挡墙厚度 1.5 m;2 根压力分散型锚杆沿竖直方向布设于墙体中线,其中,上锚杆距墙底 7.5 m,下锚杆距墙底 2.5 m。边界条件为地基土的四个侧面均为法向约束,地基土底部位移为全约束,其余为临空面。

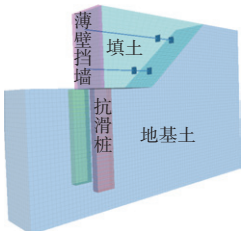


图 2 抗滑桩上承压力(分散)型锚杆挡土墙模型

1.2 模型参数

模型中,地基土、路基填土均采用 Mohr-Coulomb 模型,抗滑桩、薄壁式挡墙采用弹性模型,挡墙底部与抗滑桩、锚杆与锚定板之间均为刚性连接,其中锚定板采用 shell 单元。在地基土与桩体、地基土与路基填土、路基填土与薄壁挡墙之间设置接触面,取相邻土层摩擦系数的 0.8 倍作为接触面的摩擦系数。土层及结构物理力学参数,见表 1。

表 1 土层及结构物理力学参数

名称	弹性模量/ MPa	泊松比 μ	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
地基土	50	0.30	20.0	25	36
填土	30	0.30	18.4	20	30
桩体	3×10^4	0.17	25.5		
薄壁挡墙	3×10^4	0.17	25.5		

2 数值计算结果分析

2.1 薄壁挡墙位移和应力变化规律分析

薄壁式挡墙在填土荷载作用下的位移及剪应力云图,见图 3、图 4。薄壁挡墙 1-1'及 2-2'截面剪应力沿墙身分布曲线,见图 5、图 6。

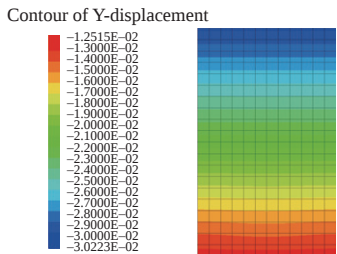


图 3 薄壁挡墙位移云图

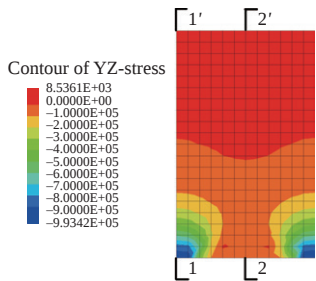


图 4 薄壁挡墙剪应力云图

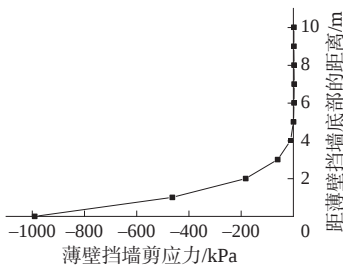


图 5 薄壁挡墙 1-1'截面剪应力分布曲线

由图 3~图 6 可以看出:由于挡墙底部与抗滑桩采用刚性连接方式,抗滑桩的侧向位移限制作用则使得挡墙位移出现从下往上逐渐增大的趋势,而挡墙剪应力在与抗滑桩刚性连接处出现了明显的应力集中现象,相比 2-2'截面,1-1'截面剪应力增大 16 倍多。分析原因认为,一是由于此处挡墙与抗

滑桩截面面积差异较大,二是由于挡墙底部的位移限制作用全部由 1-1'截面刚性连接承担,因此造成了在该连接处局部位置的明显应力集中现象。设计中应对该位置加大钢筋配筋率并适当增大下部挡墙厚度,可做成上窄下宽的挡墙横断面形式。

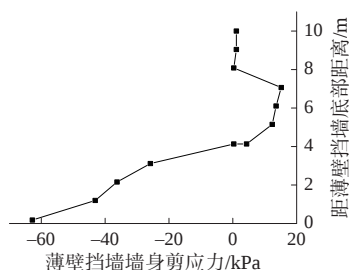


图6 薄壁挡墙 2-2'截面剪应力分布曲线

2.2 抗滑桩位移和剪应力变化规律分析

沿抗滑桩桩身高度的剪应力变化曲线,见图7。

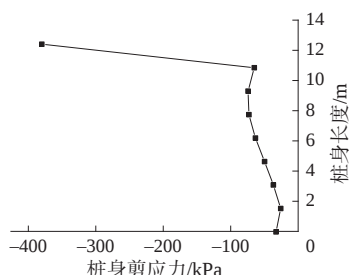


图7 桩身剪应力变化曲线

由图7可以看出:剪应力沿桩长方向出现逐渐增大的趋势,且桩身受挡墙及滑坡荷载水平推力作用,在接近桩顶位置剪应力出现最大值。因此,设计中应通过提高配筋率或在桩顶加设预应力锚索等方式,改善其受力性能。

桩身位移变化曲线,见图8。从桩底至桩顶位移逐渐增大,这是因为随着地基土深度增加,地基土本身的滑动越小,嵌挤效果则越好。另外,曲线还呈现出从桩顶至桩底位移变化率逐渐增大的趋势,桩底处变形增加量最大,也说明对于悬臂式抗滑桩来说,其底部最好插入稳定岩层中一定深度。

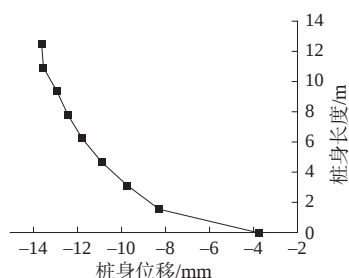


图8 桩身位移变化曲线

由上述分析可知:相比于大体积混凝土的抗滑

桩来说,薄壁挡墙所受剪应力及墙身位移均明显大于抗滑桩,故本文主要从薄壁挡墙角度研究各因素的影响规律。

3 影响因素分析

3.1 填土密实程度的影响

填土密度分别为 1 470, 1 840, 1 990 kg/m³ 时,挡墙 1-1'截面和抗滑桩的受力及水平位移变化曲线,见图9~图12。

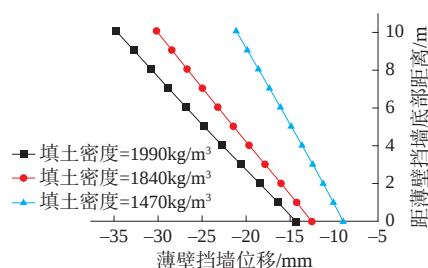


图9 薄壁挡墙 1-1'截面位移变化曲线

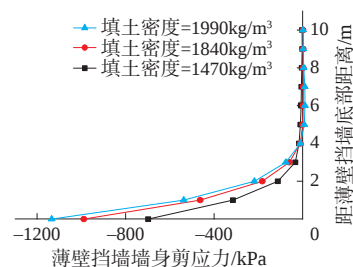


图10 薄壁挡墙 1-1'截面剪应力变化曲线

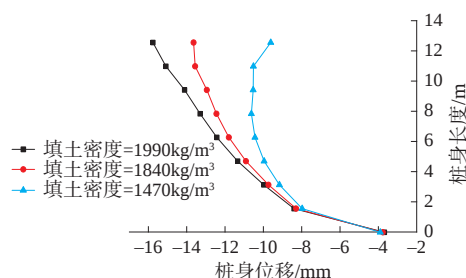


图11 随填土密度变化抗滑桩位移变化曲线

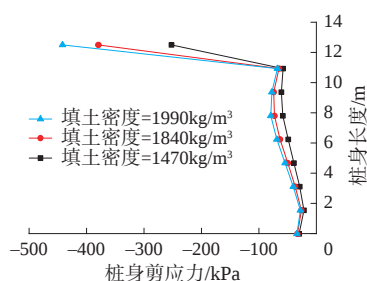


图12 随填土密度变化抗滑桩剪应力变化曲线

由图9~图12可看出:随填土密实程度减小,即主动土压力减小,无论是薄壁挡墙 1-1'截面还是

抗滑桩,其水平位移和截面剪应力均逐渐减小。填土密度从 1990 kg/m^3 减小到 1470 kg/m^3 时,抗滑桩的桩顶水平位移减小了 29.40%,最大剪应力减小了 38.46%。另外,随填土密实程度减小,薄壁挡墙的墙底位移也逐渐减小,在滑坡体推力及挡墙的联合作用下,桩身最大水平位移所处位置逐渐从桩顶向桩中部偏移。

以上数值模拟结果表明,填土密实程度对联合支挡结构受力和水平位移影响较大。实际工程中可通过增加锚杆或锚定板数量的方法来减小挡墙位移,同时通过提高挡墙和抗滑桩的连接刚度,以实现联合支挡结构受力及水平位移的减小,必要时可通过在抗滑桩顶部设置预应力锚索的方式以使抗滑桩受力更为合理。

3.2 地基土黏聚力的影响

为分析地基土土性对该联合支挡结构受力、位移等性能的影响,取地基土内摩擦角为 36° ,分别取地基土黏聚力为 10, 20, 25, 30, 60, 80 kPa。其中,黏聚力为 10 kPa 时模型未能达到平衡状态,表明地基土黏聚力太低时无法实现该联合支挡结构的工程应用。其他黏聚力下薄壁挡墙和抗滑桩的位移及剪应力变化曲线,见图 13~图 16。

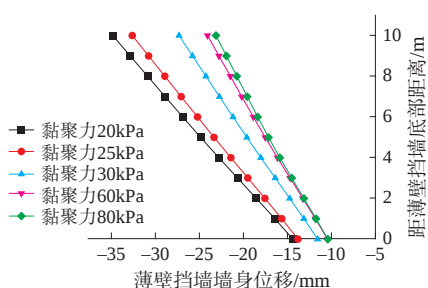


图 13 随地基土黏聚力变化薄壁挡墙位移变化曲线

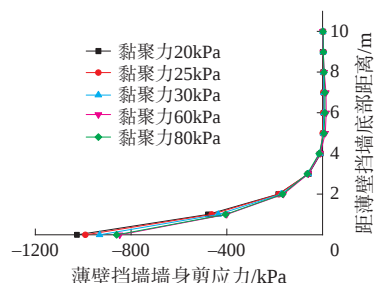


图 14 随地基土黏聚力变化薄壁挡墙剪应力变化曲线

观察薄壁挡墙和抗滑桩位移变化曲线可知:当地基土黏聚力从 20 kPa 增加到 60 kPa 时,薄壁挡墙顶部最大位移减小了 8.6 mm,且墙底和桩顶最大剪应力分别减小了 17.45% 和 20.87%,但继续提升地基土黏聚力至 80 kPa 时,上述最大位移和

最大剪应力均变化不大。另外,与填土密实程度影响规律一致,随地基土黏聚力增加,抗滑桩最大位移向桩身中部转移,且薄壁挡墙剪应力逐渐减小,而抗滑桩 8~11 m 范围内剪应力逐渐增大,这表明随地基土黏聚力增大,既增强了联合支挡结构稳定性,也促使联合支挡结构所分担外荷载重新分配,抗滑桩承担的滑坡推力增加,而挡墙受力逐渐减小,也使得最大桩身位移从桩顶向桩身中部转移。

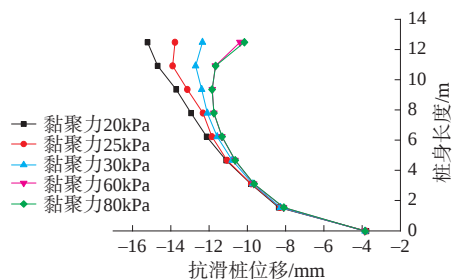


图 15 随地基土黏聚力变化抗滑桩位移变化曲线

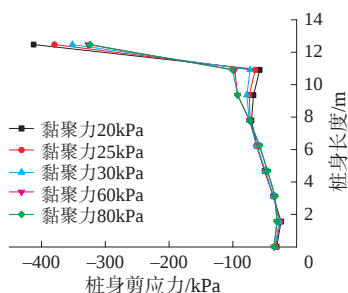


图 16 随地基土黏聚力变化抗滑桩剪应力变化曲线

以上分析表明:当地基土黏聚力不足时,联合支挡结构无法实现自身稳定,但地基土还存在一个使支护体系受力和位移均达到“临界”黏聚力,当地基土黏聚力达到“临界”值时,继续增大黏聚力并不能有效减小支护结构位移。因此,对工程实践来说,合理确定实际工程中地基土的“临界”黏聚力,即选择合适的抗滑桩使用地质条件,既能节省造价,又能确保路基工程的安全运营。

3.3 薄壁挡墙弹性模量的影响

分析薄壁挡墙模量对墙体受力及位移性能影响,分别取薄壁挡墙弹性模量为 25.5, 28.0, 30.0, 35.5, 38.0, 200.0 GPa。分析结果,见图 17、图 18。

由图 17、图 18 可知:增大弹性模量,薄壁挡墙的位移减小,但墙顶最大位移减小有限,对实际工程意义不大;当弹性模量为 25.5~38.0 GPa 时,1-1'截面薄壁挡墙最大剪应力略有增加;对于弹性模量为 200.0 GPa 钢材类薄壁挡墙来说,其墙顶位移最小,但墙底与抗滑桩的连接部位剪应力比 38.0 GPa 弹性模量时增大 31%。因此,在保证墙

体不发生破坏的前提下, 薄壁挡墙采用 C30 强度以内混凝土进行浇筑完全满足要求, 也更有利于结构安全。

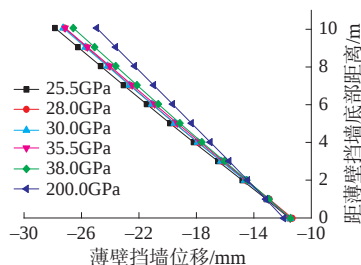


图 17 随弹性模量变化薄壁挡墙位移变化曲线

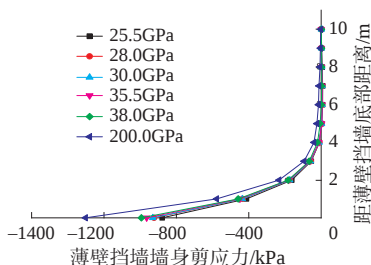


图 18 随弹性模量变化薄壁挡墙剪应力变化曲线

3.4 锚定板数量的影响

锚定板数量增长对提高挡土墙及联合支挡结构稳定性作用明显。为分析压力（分散）型锚杆锚定板数量对挡墙受力及位移性能影响, 以 2-2' 截面为研究对象, 分别设计三种工况（图 4）：工况①设置两根压力型锚杆, 即锚定板数量均为 1 个；工况②设置两根压力分散型锚杆, 锚定板数量均为 2 个（图 2）；工况③上层为压力型锚杆, 下层为压力分散型锚杆, 见图 19。分析得到 2-2' 截面挡墙位移及剪应力变化曲线, 见图 20、图 21。

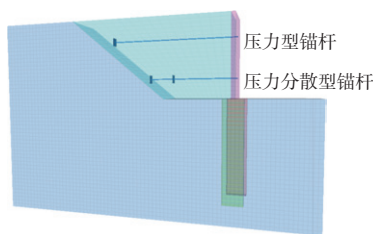


图 19 上层压力型锚杆下层压力分散型锚杆

对比工况①, ②, ③可以看出: 增加锚定板数量, 挡墙位移明显减小, 工况②与工况①相比, 薄壁挡墙顶部最大位移减小了 15.8%, 约 4.3 mm, 但最大负向剪应力和正向剪应力均有所增加。这说明增加锚定板数量后, 锚杆所承担的荷载更大, 因此对薄壁挡墙相应位置强度要求也越高, 设计中薄壁挡墙配筋应结合锚定板数量及锚杆张拉力合理确

定。而对比工况②和工况③的薄壁挡墙位移和应力曲线发现, 减少上层锚杆的一个锚定板后, 薄壁挡墙的位移和应力略有增加, 但相比于工况①来说变化不明显。

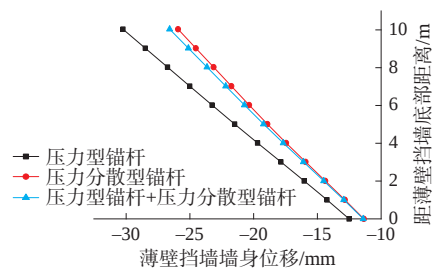


图 20 随锚定板数量变化薄壁挡墙位移变化曲线

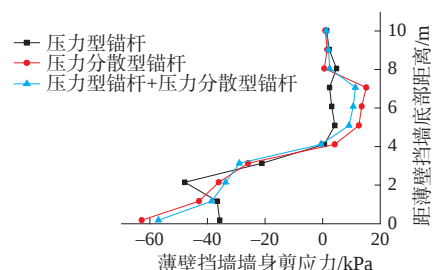


图 21 随锚定板数量变化薄壁挡墙剪应力变化曲线

实际工程中, 应寻求增加压力分散型锚杆锚定板数量, 以保证填土路基稳定性与相应地增加薄壁式挡墙配筋率以提高其抗拉强度之间的平衡, 并力求由抗滑桩承担更多的滑坡推力。当上部支护结构位移不能满足薄壁式挡墙水平变位要求时, 可通过优先增加下层锚杆锚定板数量的方法来减小其位移量, 该方法既行之有效又能减少造价。

在保证压力型锚杆长期使用性能, 避免由锚杆施工不当而造成其失效是进行上述理论分析的基础。施工中应注意: 当分层填筑路基高度超过锚定板上边缘设计高度 20 cm 时, 采用反开挖形式制作满足设计尺寸要求的锚杆及锚定板路基基槽; 锚定板采用现场绑扎钢筋及浇筑混凝土方式, 并在其前方沟槽内浇筑水泥砂浆, 以提高锚定板前方土体抗压强度; 浇筑完成并养护至达到其设计强度 80% 后, 方可进行下一层路基土分层填筑。

4 结语

本文在分析抗滑桩上承压力分散型锚杆挡墙受力及变形规律的基础上, 探讨了填土密实程度、地基土黏聚力、薄壁挡墙弹性模量、锚定板数量等因素对其受力及变形的影响规律。

(1) 该联合支挡结构中薄壁挡墙与抗滑桩的刚性连接部位为应力集中区, 设计中应加大配筋率

并适当增大挡墙厚度。

(2) 填土密实程度对联合支挡结构受力和水平位移影响较大。实际工程中可通过增加锚杆或锚定板数量的方法来减小挡墙位移,必要时可通过在抗滑桩顶部设置预应力锚索的方式以使联合支挡结构受力更为合理。

(3) 当地基土黏聚力不足时,联合支挡结构无法实现自身的稳定,但当地基土的黏聚力达到“临界”黏聚力值时,继续增大地基土黏聚力并不能有效减小支护结构的位移。

(4) 弹性模量对薄壁挡墙的位移和受力影响不大,设计中采用C30强度以内混凝土浇筑挡土墙可满足施工要求,也更有利于结构安全。

(5) 压力(分散)型锚杆锚定板数量越多,结构的承载能力越高、位移越小,但对挡墙相应位置的强度要求也越高。实际工程中,应寻求增加压力分散型锚杆锚定板数量以保证填土路基稳定性,与相应地增加薄壁式挡墙配筋率以提高其抗拉强度之间的平衡。

(6) 优先增加挡墙下部锚杆锚定板数量,既可有效减小墙身位移和应力,又能节省工程造价。

参考文献 (References):

[1] 张思峰,宋修广,李艳梅,等.边坡预应力单锚索耐久性分析及其失效特

性研究[J].公路交通科技,2011,28(9):22-29.

ZHANG S F, SONG X G, LI Y M, et al. Study on durability and failure characteristics of single prestressing cable for slope engineering [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(9): 22-29.

[2] 陈兴吉. 预应力锚索抗滑桩作用机制及参数优化研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2019.

CHEN X J. Study on action mechanism and parameter optimization of prestressed anchor cable anti-slide pile[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2019.

[3] 王国田,罗雪贵. 滑坡-抗滑桩土拱效应三维数值模拟研究[J]. 路基工程, 2018(4): 90-94.

WANG G T, LUO X G. Three-dimensional numerical simulation of soil arching effect between landslide and anti-slide pile [J]. Subgrade Engineering, 2018(4): 90-94.

[4] 郝建斌,门玉明,汪班桥. 分级荷载下压力型土层锚杆承载特性试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(10): 104-109.

HAO J B, MEN Y M, WANG B Q. Experimental investigation into load bearing features of compression-type soil anchors under step-loading [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science), 2016, 44(10): 104-109.

[5] 贾金青,涂兵雄,王海涛,等. 压力分散型预应力锚杆的力学机理研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1320-1325.

JIA J Q, TU B X, WANG H T, et al. Mechanical behaviors of pressure-dispersive prestressed anchor [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1320-1325.

[6] 张炜熠. 压力分散型锚杆与挡土墙联合加固机理及参数优化研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2018.

ZHANG W Y. Study on reinforcement mechanism and parameter optimization of pressure-dispersed anchor retaining wall[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2018.

Analysis on the Stress and Influencing Factors of Supporting Pressure Dispersed Anchor Retaining Wall of Anti-slide Pile

ZHANG Sifeng¹, ZHANG Xinyu¹, QI Hui², SHANG Shujie³

(1. Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China; 2. Qilu Transportation Development Group Co., Ltd., Ji'nan 250101, China; 3. Shandong Huajian Engineering Testing Co., Ltd., Ji'nan 250101, China)

Abstract: Based on the finite-difference numerical analysis model of the new combined retaining structure and the analysis of its stress and deformation law, this paper discusses the influence law of the filling compactness extent, the cohesive force of the foundation soil, the elastic modulus, the number of anchor plates and other factors on the stress and deformation of the supporting pressure dispersed anchor retaining wall of the anti-slide pile. The results show that the compactness extent of filling has a great influence on the force and horizontal displacement of combined retaining structure; the larger the cohesive force of foundation soil is, the smaller the displacement of supporting structure is; the elastic modulus has a little influence on the displacement and stress of thin wall retaining wall; increasing the number of anchor plates is conducive to improving the reinforcement effect.

Key words: anti-slide pile; pressure dispersed anchor; thin retaining wall; structural force; numerical simulation; filling compactness extent; cohesive force of foundation soil; number of anchor plates