

柬埔寨55号公路边坡稳定分析及加固技术研究

卢贝思^{1*}, 宋飞^{1#}, 晋洋涛¹, 吴亚超²

¹长安大学公路学院, 陕西 西安

²中交第三公路工程局有限公司河北雄安设计咨询分公司, 河北 保定

Email: rupesh.pradhan@chd.edu.cn, #songf1980@163.com

收稿日期: 2021年5月1日; 录用日期: 2021年5月15日; 发布日期: 2021年5月27日

摘要

本文以柬埔寨55号公路边坡为依托工程, 使用有限元强度折减法和极限平衡法对边坡进行不同方案下稳定分析。用ABAQUS软件建模分析了不同嵌入深度的锚杆、不同深度的抗滑桩、不同抗滑桩的加固位置对边坡加固的影响。研究表明, 随着锚杆锚固深度的增加, 边坡的安全系数随之增加。抗滑桩在边坡下层能起到更好的加固作用, 抗滑桩的锚固深度到达一定值后边坡安全系数趋于稳定。本文的研究结果可为类似工程提供参考。

关键词

极限平衡法, 有限元强度折减法, 锚索加固, 抗滑桩加固, 稳定分析

Stability Analysis and Reinforcement Technology Study of a Highway Slope in Cambodia

Pradhan Rupesh¹, Fei Song^{1*}, Yangtao Jin¹, Yachao Wu²

¹School of Highway Engineering, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

²The Third Engineering Co. Ltd of CCCC Third Highway Engineering Bureau, Baoding Hebei

Email: rupesh.pradhan@chd.edu.cn, #songf1980@163.com

Received: May 1st, 2021; accepted: May 15th, 2021; published: May 27th, 2021

Abstract

In this paper, the slope of the Cambodian highway is used as a supporting project, and the finite

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 卢贝思, 宋飞, 晋洋涛, 吴亚超. 柬埔寨55号公路边坡稳定分析及加固技术研究[J]. 土木工程, 2021, 10(5): 419-427. DOI: 10.12677/hjce.2021.105048

element strength reduction method and the limit equilibrium method are used to analyze the stability of the slope under different schemes. Using ABAQUS software to model and analyze the influence of different embedded depth anchor rods, different depth anti-slide piles, and different anti-slide pile reinforcement positions on slope reinforcement. The research results show that as the anchoring depth of the anchor rod increases, the safety factor of the slope increases accordingly. The anti-slide pile can play a better role in strengthening the lower layer of the slope. After the anchoring depth of the anti-slide pile reaches a certain value, the slope safety factor tends to stabilize. The results of this paper can provide a reference for similar projects.

Keywords

Limit Equilibrium Method, Strength Reduction Method, Anchor Cable Reinforcement, Anti-Slide Pile Reinforcement, Stability Analysis

Copyright © 2021 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

边坡稳定分析和加固处理一直是岩土工程领域内的热点，边坡稳定性的分析方法有很多，目前边坡稳定分析中常用的方法是极限平衡法和抗剪强度折减法。自从瑞典学者彼德森提出极限平衡法之后，很多学者在极限平衡法分析边坡稳定上展开了更深入的研究[1]。周资斌[2]和苏利军[3]用极限平衡法对实际工程做了扩展性分析。卢坤林[4]等将离散后的条柱间作用力等效为滑面上的正应力，由平衡条件提出了一种适应空间形态的三维极限平衡法。邓东平[5]等在三维模型中，根据采用极限平衡方程的数目不同，提出了三维边坡极限平衡严格法、准严格法和非严格法。白桃[6]等比较了四种不同算法下的安全系数，提出只有同时采用安全系数和破坏概率两个指标对边坡安全评价才会更加有效。还有一些学者通过有限元软件分析了抗滑桩的桩长、桩径和抗滑桩的加固位置对边坡的临界滑动面和安全系数的影响[7] [8] [9]。

以上学者仅通过理论分析或者数值模拟的方法对边坡的稳定性分析进行了研究，本文采用极限平衡理论和有限元强度折减理论研究了柬埔寨 55 号公路边坡采取不同方案下的加固效果，对分析了锚索加固和抗滑桩加固下的锚固深度加固位置的影响。

2. 工程地质概况

本文分析的边坡位于柬埔寨 55 号公路 K145 + 660~K145 + 880 路段路基左侧，该段山体的自然坡度约 43°，斜坡表层有大量的白垩纪强风化砂质泥岩少部分有块状砂岩。根据地质勘察报告，边坡顶部约 1.7 m 为坡积粉质黏土和全风化砂质泥岩，其下为强风化砂质泥岩，再向下为强风化砂岩，最下面为中风化砂质泥岩，以泥质结构为主，岩层结构面逆坡体方向倾斜，倾角约 10°，无外倾结构面，该边坡为类土质边坡。边坡开挖深度 60.5 m，坡体中下部为中风化砂质泥岩，坡体节理裂隙发育，容易产生由于坡脚应力不足的坡脚压碎变形破坏。边坡原设计为 6 级，最大挖深为 60 m，坡率为 1:0.5、1:0.75、1:1、1:1.25、1:1.25、1:1.5，每级边坡高度为 10 m，边坡间设置 2 m 宽平台。

3. 边坡稳定分析

对于一复杂的边坡分析中，一般情况下会取该边坡的剖面对其简化分析，常用的分析方法有极限平

衡法和有限元强度折减法, 本文将会采用这两种方法计算边坡的安全系数, 分析边坡的稳定性。

3.1. 边坡稳定分析原理

3.1.1. 极限平衡理论

极限平衡理论首先在边坡土体中假设一破坏面, 破坏面内的土体作为一脱离体计算, 当脱离体达到静力平衡状态时脱离体所需要的抗力或者抗剪强度, 与破坏面实际所能提供的抗力或者抗剪强度的比值, 为边坡或者岩体的稳定安全系数。

极限平衡法可分为严格条分法和非严格条分法, 非严格条分法满足力平衡或者力矩平衡, 而且在计算时主要采用标准圆弧计算, 但是在实际的滑坡中很少有圆弧形, 所以非严格条分法在应用时有一定的不足。严格条分法不仅满足力平衡而且满足力矩平衡, 而且在应用时严格条分法可以对任意的滑动形状进行求解。进过半个世纪的发展, 不少学者提出了自己的方法, 比如 Morgenstern 和 Price (1965)提出了 Morgenstern-Price 法[10], Chough (1986)提出了一种边坡稳定分析的通用的条分法(GLE) [11] [12], 这些方法为边坡稳定安全系数的求解提供了丰富的理论。

3.1.2. 有限元强度折减理论

强度折减法的基本原理是将土体抗剪强度指标 c 、 φ 用强度折减系数 F_r 进行折减, 分别得到 c_m 、 φ_r , c_m 、 φ_r 由公式(1)和(2)求得, 当边坡土体达到临界破坏状态时所对应的强度折减系数 F_r 即为对应条件下的护坡最小稳定安全系数。

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

$$\varphi_m = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \varphi}{F_r} \right) \quad (1)$$

强度折减系数定义为: 在外荷载保持不变的情况下, 边坡坡体所能发挥的最大抗剪切强度与外荷载在边坡内所产生的实际剪应力之比。当假定边坡内所有坡体抗剪强度的发挥程度相同时, 这种抗剪强度折减系数定义为边坡的整体稳定系数。

3.2. 安全系数和临界滑动面计算分析

本文使用通用条分法和有限元强度折减法进行计算安全系数和临界滑动面, 根据地质勘察报告提供的数据, 计算参数选用表 1。计算结果参看表 2, 计算边坡滑动面参看图 1。

Table 1. Calculation parameter table

表 1. 计算参数表

地层代号	饱和重度(kN/m ³)	粘聚力(kPa)	内摩擦角(°)
1-1	22.5	20	20
1-2	23.0	80	20
1-3	25.5	170	22
2-1	23.5	100	22
2-2	23.8	230	25

Table 2. Comparison table of safety factor calculation
表 2. 安全系数计算对比表

计算方法	GLE 法圆弧滑动面	GLE 法折线滑动面	强度折减法
安全系数	1.301	1.297	1.236

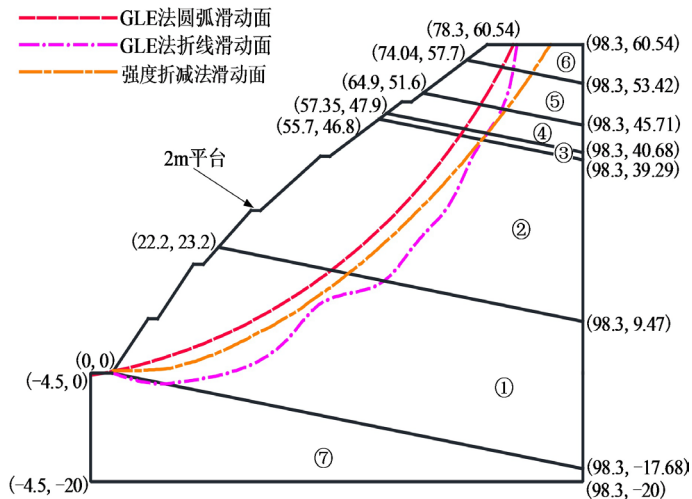


Figure 1. Comparison diagram of sliding surface between GLE method and strength reduction method for 2 m platform slope
图 1. 2 m 平台边坡 GLE 法和强度折减法的滑动面对比示意图

通过表 2 安全系数计算结果对比可知,有限元强度折减法计算出的结果要比 GLE 法中圆弧滑动面和折线滑动面都要小,探究其原因可能是在模型计算中网格划分时不够合理。而在 GLE 法中不同滑动面的计算结果对比可以看出,折线滑动面计算出的结果要比圆弧滑动面计算的要小,其主要原因在于折线滑动面能够搜索到更过的滑动面,而且搜索到的滑动面更接近滑坡真实滑动面。在图 1 中可以看到 GLE 强度折减法的滑动面要比另外两种方法的滑动面都要大。

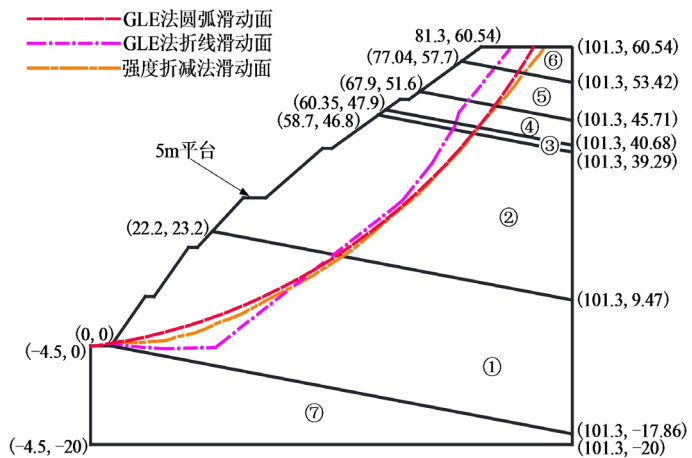


Figure 2. Comparison diagram of sliding surface between GLE method and strength reduction method for 5 m platform slope
图 2. 5 m 平台边坡 GLE 法和强度折减法的滑动面对比示意图

三种方法计算出的安全系数相差不大,但是使用强度折减法计算出的安全系数小于 1.25,这不满足《公路路基设计规范》中相关要求,而且用极限平衡法算出的安全系数也仅仅大于 1.25,因此这样的边

坡既没有足够的安全储备,也不满足规范要求。所以需要重新优化设计。

结合项目的实际特点,公路中存在大量填方路段,若增加开挖边坡上部土方,这样不仅能够减少上部荷载,而且能够减少工程造价。因此将第三级边坡与第四级边坡之间的平台调整为 5 m,再次进行安全系数计算和稳定分析。计算结果见表 3,分析滑动面见图 2。

Table 3. Comparison table of safety factor calculation
表 3. 安全系数计算对比表

计算方法	GLE 法圆弧滑动面	GLE 法折线滑动面	强度折减法
安全系数	1.374	1.361	1.301

由表 3 可知,当选用 5 m 宽平台时,极限平衡法与强度折减法算得的边坡稳定安全系数,均大于 1.25,满足《公路路基设计规范》中的要求。

4. 边坡防护设计分析

边坡防护方案多种多样,在设计防护方案类型时,首先要保证边坡的稳定性,其次还要考虑经济、美观、适用等因素,按照边坡的水文、地质、岩质等情况,选择适当的防护方案。通常主要的防护方案是锚杆(锚索)加固、桩板墙及抗滑桩加固、锚喷加固等,再配合骨架防护、挡土墙、植被防护等,达到加固边坡,避免失稳破坏。

本文将选择锚杆加固和抗滑桩加固方案进行分析。

4.1. 锚杆加固边坡稳定性分析

锚杆加固边坡稳定性分析使用 ABAQUS 软件进行有限元强度折减法分析计算,锚杆采用非预应力锚杆,采用杆单元为 T2D2,外径 25 mm,抗拉强度为 80 KN,锚杆逆坡体方向倾斜,倾角约 20°,锚固于二、三、四级边坡,锚杆与土的接触方式选择锚杆嵌入土中。

分别将锚杆嵌入素土边坡临界滑动面以下不同深度,对比分析锚固段不同深度对于边坡加固效果的影响。通过 ABAQUS 软件分析计算得到锚固深度为 2 m 时的边坡位移云图(图 3)和其他不同锚固深度时的不利滑动面(图 4),以及不同锚固深度下的安全系数(图 5)。

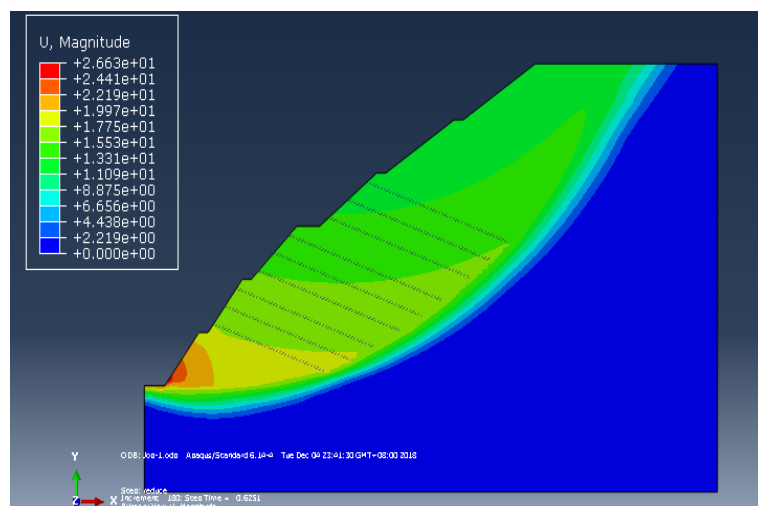


Figure 3. Displacement nephogram of finite element isoline for 2 m anchored slope stability

图 3. 2 m 锚固边坡稳定性有限元等值线位移云图

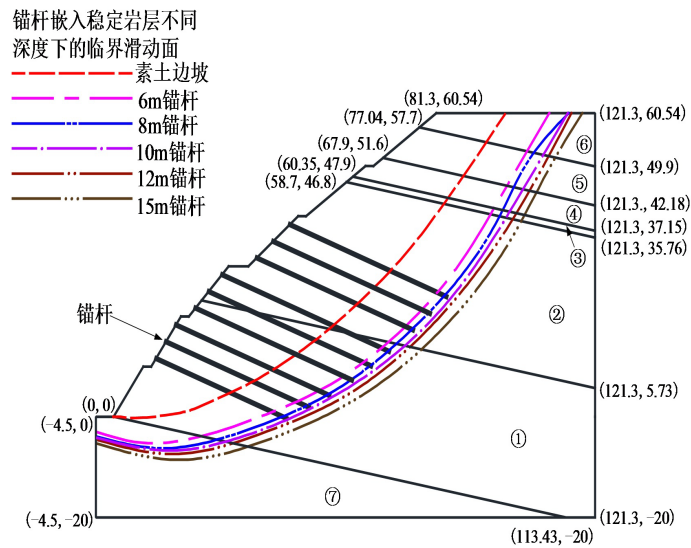


Figure 4. Schematic diagram of the most unfavorable sliding surface of slope reinforced with different anchorage depths

图 4. 不同锚固深度加固边坡最不利滑动面示意图

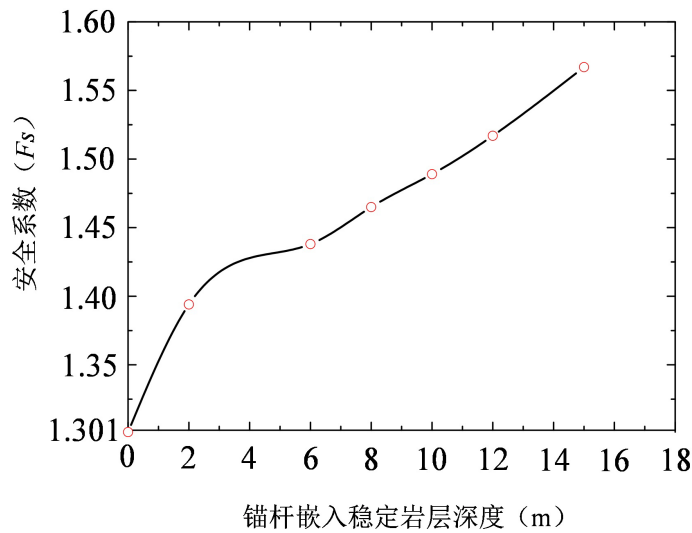


Figure 5. Diagram of variation of safety factor with anchorage depth

图 5. 安全系数随锚固深度变化示意图

由图 3 可以看出, 随着锚杆嵌入深度的增加, 边坡最不利滑动面也随着向坡面逆向偏移。安全系数也随之增大, 边坡的稳定性逐渐增大。在图 4 中可以看出, 在锚杆嵌入稳定岩层 0~4 m 的深度内, 安全系数增加的速率是最快的。在 4~16 m 内的增速放缓。考虑整体节约经济的角度, 选取锚杆长度时, 可选取嵌入稳定岩层内 4~8 m 内的锚杆比较合适。

4.2. 抗滑桩加固边坡稳定性分析

使用 ABAQUS 软件分析不同深度下的抗滑桩的稳定性, 抗滑桩视为理想弹性体, 桩土间采用接触相互作用, 接触方式选取硬接触, 桩径为 0.8 m, 摩擦系数为 0.3, 采用 CPE4 单元。设置位置在坡高二分之一处, 分不同的锚固深度, 计算并提取各锚固深度模型的最不利滑动面与安全系数, 计算结果如下。

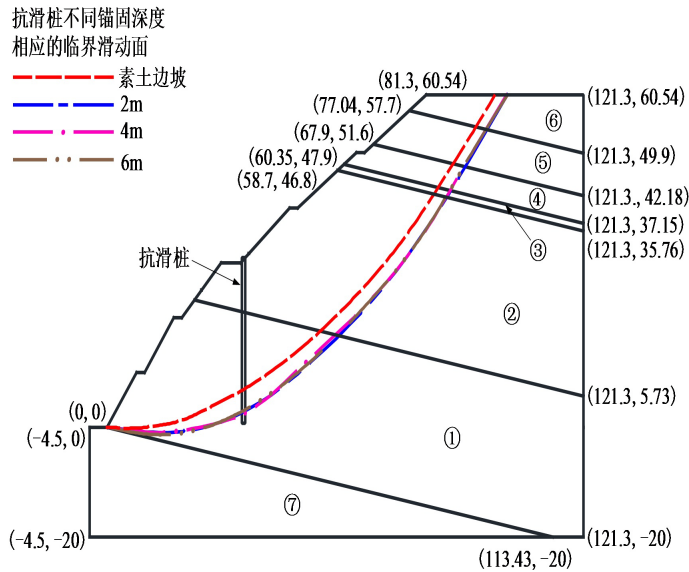


Figure 6. Schematic diagram of slope sliding surface strengthened by anti-slide pile with different anchorage depth
图 6. 抗滑桩不同锚固深度加固边坡滑动面示

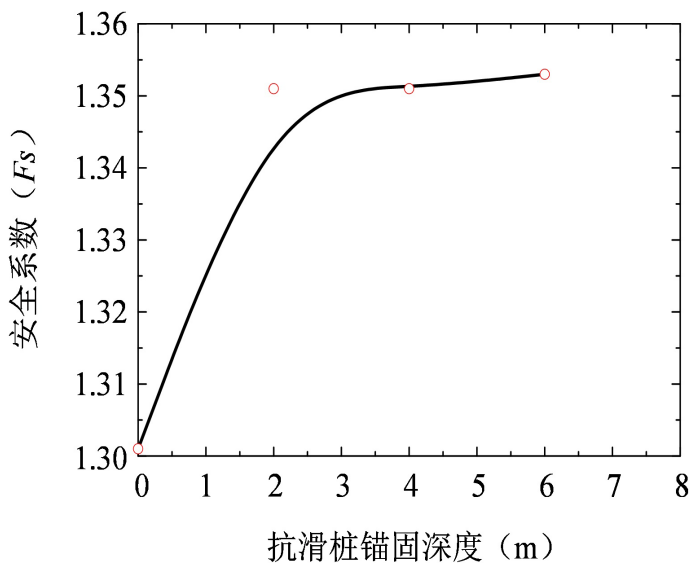


Figure 7. Comparison of safety factors of reinforced slopes with different anchorage depths
图 7. 抗滑桩不同锚固深度加固边坡滑动面示

在图 6~7 中对比可以看出,随着锚固深度的增加,抗滑桩边坡的最不利滑动面会向边坡逆方向移动,但滑动面比较接近。在 0~3 m 内,安全系数会随着抗滑桩的锚固深度而增加巨大,在 3~6 m 内,安全系数增加比较缓慢。由此可以看出,抗滑桩的锚固深度在 2~4 m 内比较合适。

抗滑桩的深度对边坡的加固效果并不是唯一影响,需要考虑抗滑桩在不同坡高处对加固效果的影响。在锚固深度选择 4 m 的情况下,研究在不同坡高设置抗滑桩对边坡加固效果的影响。在坡高 $\frac{1}{3}H$ 、 $\frac{1}{2}H$ 、 $\frac{2}{3}H$ 位置处设置抗滑桩,计算安全系数和边坡临界滑动面如图 8 和图 9 所示。

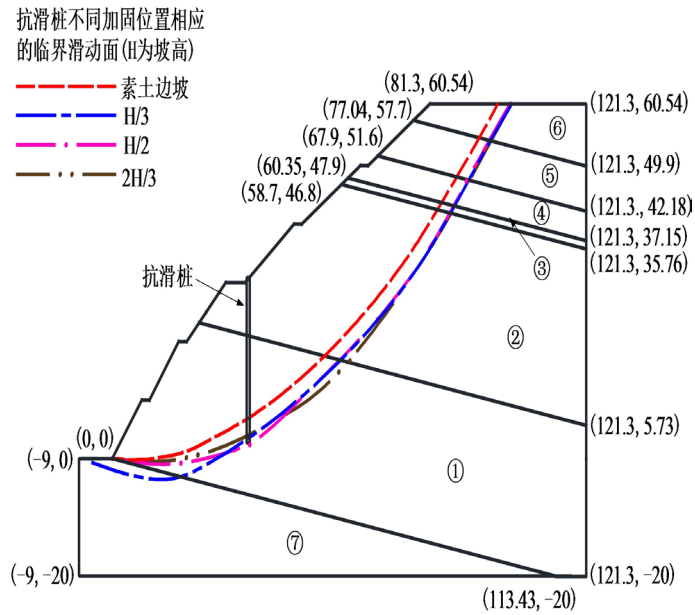


Figure 8. Schematic diagram of critical sliding surface of slope at different reinforcement positions of anti-slide pile
图 8. 抗滑桩不同加固位置的边坡临界滑动面示意图

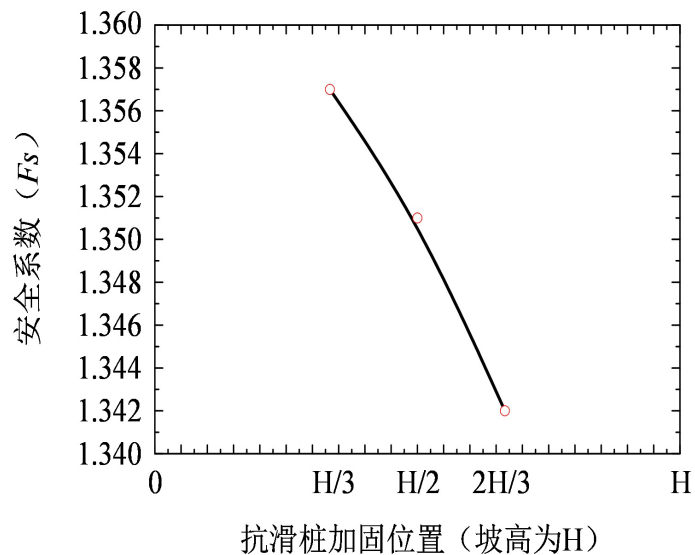


Figure 9. Comparison of slope safety factors at different reinforcement positions of anti-slide piles
图 9. 抗滑桩不同加固位置的边坡安全系数对比图

观测抗滑桩在不同位置处的边坡稳定分析计算可知，随着抗滑桩加固位置的提高，安全系数随之降低，但三种加固位置处的边坡临界滑动面几乎是重合的。这表明在 $\frac{1}{3}H$ 处用抗滑桩加固的效果是最优的。

5. 结论

本文以柬埔寨 55 号公路边坡为依托工程，使用有限元强度折减法 and 极限平衡法对边坡进行了稳定性分析和计算。计算结果表明：

- 1) 安全系数会随着锚杆嵌入深度的增大而增加, 而且在嵌入深度 4 m 前增加速率比较快, 4 m 之后增加缓慢。
- 2) 加固后的临界滑动面会随着嵌入深度的增加而逆向坡面扩展。
- 3) 若采用抗滑桩, 在抗滑桩锚固深度为 0~3 m 内, 安全系数会随着抗滑桩的锚固深度急剧增加, 在锚固深度达到 3 m 后安全系数增速放缓。
- 4) 抗滑桩的加固位置不同, 同样也会引起加固效果的变化, 抗滑桩加固的位置越低, 承受上部荷载越多, 安全系数就大加固效果越好。

基金项目

陕西省自然科学基金基础研究计划, 2019JM-100。

参考文献

- [1] 刘立平, 姜德义, 郑硕才, 等. 边坡稳定性分析方法的最新进展[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2010, 23(3): 115-118.
- [2] 周资斌. 基于极限平衡法和有限元法的边坡稳定分析研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 河海大学, 2004.
- [3] 苏利军. 基于极限平衡法和有限元法的土质边坡稳定分析研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西华大学, 2012.
- [4] 卢坤林, 朱大勇, 甘文宁, 等. 一种边坡稳定性分析的三维极限平衡法及应用[J]. 岩土工程学报, 2013(12): 130-136.
- [5] 邓东平, 李亮. 基于滑动面应力假设下的三维边坡稳定性极限平衡法研究[J]. 岩土力学, 2017(1): 189-196.
- [6] 白桃, 黄晓明, 李昶. 考虑土体参数空间变异性的边坡稳定性研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013(12): 154-159.
- [7] 代凌辉, 张胤, 李建. 抗滑桩在加固边坡稳定性中的应用及影响分析[J]. 水利水电技术, 2016(12), 52-55, 65.
- [8] 王聪聪, 李江腾, 廖峻, 郝瑞卿, 刘博. 抗滑桩加固边坡稳定性分析及其优化[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2015(46): 237.
- [9] 年廷凯, 栾茂田, 杨庆, 等. 基于强度折减弹塑性有限元法的抗滑桩加固边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2007(S1), 558-562.
- [10] Zhu, D., Lee, C., Qian, Q., et al. (2001) A New Procedure for Computing the Factor of Safety Using the Morgenstern-Price Method. *Canadian Geotechnical Journal*, **38**, 882-888. <https://doi.org/10.1139/t01-002>
- [11] 张鲁渝. 一个用于边坡稳定分析的通用条分法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(3): 136-141.
- [12] 陈祖煜. 土坡稳定分析通用条分法及其改进[J]. 岩土工程学报, 1983(4): 11.