

两种抗滑结构的优化设计

李国鹏

(中铁第五勘察设计院,北京 102600)

摘要:对滑坡整治提出抗滑桩、预应力锚索抗滑桩的治理方案,数值模拟计算了滑坡加固,在分析加固效果和抗滑结构受力情况的基础上,对抗滑桩和预应力锚索抗滑桩提出结构优化建议,优化研究的结果可为抗滑综合优化研究提供计算依据。

关键词:FLAC^{3D}; 滑坡; 优化; 抗滑桩; 预应力锚索抗滑桩

中图分类号:U213.13 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-0373(2011)04-0060-05

0 引言

一滑坡为第四系松散堆积层滑坡,下盘岩石为下古生界碧口群粉砂质绢云千枚岩与粉砂质板岩互层,夹变砂岩、变砾岩,强风化层厚度不大。滑坡位于Ⅷ度地震区,坡顶是由松散岩土体组成,若滑动失稳将直接危及滑坡坡脚处省道的安全运营,因此须对滑坡稳定进行必要的研究,以提出相应的处理措施来保证滑坡的安全性。

FLAC^{3D}数值模拟模型试验方法直观,且可以量化评估加固前后滑坡和抗滑结构的变形特征、受力情况等。

通过 FLAC^{3D}计算得知(图 1),滑坡加固前的稳定系数 $FoS = 1.05$,位移最大值、剪切应变增量最大值分别为 0.45 m 和 0.015 2,滑坡堆积层位移由浅至深逐渐递减,滑床位移极小,忽略不计;剪切应变增量相对高值区(0.008 ~ 0.015 2)出现在滑坡前部和中部滑动带位置,集中于滑体潜在剪出口位置,说明滑带的破坏是从滑带的前部逐渐向上部发展的。目前剪应变增量带尚未贯通。

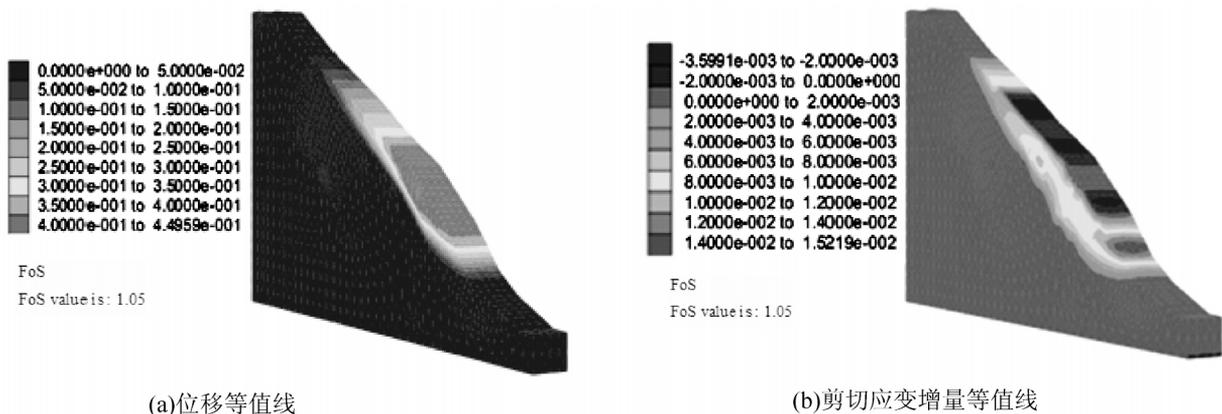


图 1 滑坡加固前的计算结果

抗滑结构阻滑效应产生的根本原因在于锚固力和抗滑结构的抗滑作用下滑体内应力的重新分布,可有效控制坡体变形和破坏。现利用 FLAC^{3D}有限差分数值计算软件,模拟两种抗滑结构(抗滑桩和预应力锚索抗滑桩)的护坡效果。

收稿日期:2011-09-07

作者简介:李国鹏 男 1982 年出生 助理工程师

1 普通抗滑桩加固方案

1.1 抗滑桩布设

抗滑桩的桩型参数与布设参数之间是相互制约、相互影响的,在保证滑坡体局部稳定与整体稳定的前提下,综合考虑滑坡区工程地质条件、地面起伏、(潜在)滑面和剩余下滑力的变化,将滑体划分为 13 条条块,见图 2。考虑到埋入式抗滑桩可以利用桩前岩土体的抗力有效改善桩体受力,提高抗滑效率,因此选用埋入式抗滑桩^[1]。对桩布设在滑坡体的第 9 条块和第 10 条块时做桩位比选,布设的桩参数相同,截面尺寸 3.0 m×3.5 m,桩间距 6 m(中对中),桩长 35 m,锚固深度 12 m,桩身混凝土采用 C30 普通混凝土,表 1 为桩位布设优化表。两个位置设桩具有如下特点:①由图 2(b)各条块剩余下滑推力分布图可知,桩位由下至上推力差值逐渐减小;②在图 2(a)滑坡条块划分图中,桩位于第 9 条块时滑坡体厚度为 24 m,位于第 10 条块时 22 m,滑坡体厚度相差不大;③由表 1 分析,桩位于第 9 条块时弯矩、剪力值小于桩位于第 10 条块时,而桩身内力的大小也直接影响着灾害治理成本的多少,因此桩位于第 9 条块处工程量较桩位于上部与下部时工程量小,造价亦小。④从变形改善情况来看,桩位于第 9 条块时的坡体最大变形明显小于桩位于第 10 条块时。综上所述,桩位于第 9 条块时要优于桩位于第 10 条块,因此将桩布设在滑坡体的第 9 条块。

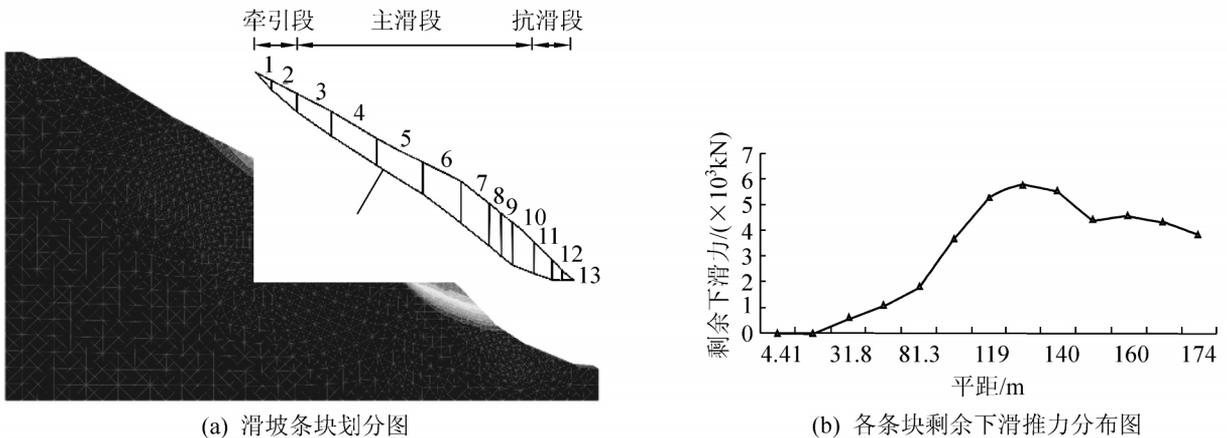


图 2 滑坡各条块的剩余下滑力

表 1 抗滑桩桩位布设优化表

桩位	坡体最大变形/mm	桩身最大剪力 F_Y /kN	桩身最大弯矩 M_Z / (kN·m)
第 9 条块	0.31	37.32	206.30
第 10 条块	1.09	146.30	798.80

1.2 抗滑桩桩长比较

文献[2]指出沉埋桩设在合适的位置上采用较短的桩就可使边坡达到设计要求的安全系数,桩身内力也较全长桩降低,表明沉埋抗滑桩具有良好的应用前景。但沉埋桩滑动面以上直接承受滑坡推力的非锚固长度与设桩位置的滑体厚度有关,非锚固长度过短,滑体有可能越顶而出,非锚固长度过长,导致桩身弯矩很大,受力条件恶化,甚至会造成桩的位移太大,导致整个工程的失败。将桩的锚固段设在滑坡的稳定层中,其长度为 15 m,抗滑桩的桩长分别取为 25 m、27 m、29 m、31 m、33 m、35 m(桩顶延伸至坡顶,简称为全长桩)。文献[3]指出桩径和桩位的变化对抗滑桩性能影响不大,因而保持截面尺寸及间距不变,即单因素条件下抗滑桩优化研究方法。抗滑桩采用 FLAC^{3D}的桩结构单元,桩底端节点的连接包括端点承载效果^[4]。为了量化比较不同情况的各项指标,下面特征值的比较均以其极值进行说明。由表 2 不同桩长情况下滑坡加固后的分析比较表可见,总体上说,随着桩长(非锚固深度)的增长,滑坡的最大位移和最大剪应变增量随着桩长的增加而减小。但桩长达到 35 m 时,滑坡的最大位移和最大剪应变增量并没有减小,反而变大,这说明增加桩长并不能增加滑坡的稳定性。抗滑桩的桩身所受最大剪力、最大正弯矩随桩长增加相应增大,全长桩时最大;当桩长从 27 m 变化到 29 m 时,各项指标的增减幅度最大。通过

以上分析 在抗滑桩的桩长最优值选择在 29 ~ 31 m 时 滑坡体加固后和桩身所受内力的各项指标最优。

表 2 不同桩长时滑坡加固后的比较表

桩长 / m	滑坡体		抗滑桩桩身内力	
	最大位移 / 10^{-4} m	最大剪应变增量 / 10^{-5}	最大剪力 / kN	最大正弯矩 / (kN · m)
25	3.45	1.58	30.2	2.7
27	3.33	1.54	32.1	38.5
29	3.16	1.50	34.2	81.7
31	3.10	1.48	35.0	111.9
33	3.08	1.48	36.4	140.2
35	3.13	1.49	37.2	161.4

由此可见在满足治理要求的前提下 通过缩短非锚固长度 沉埋桩可以使滑坡达到足够的稳定程度 同时有效地改善了抗滑桩的内力分布 从而优化了抗滑桩的结构设计 节省大量的钢筋和混凝土 避免造成浪费。由于上述分析是基于桩间距和桩截面尺寸等设计参数不变的情况下开展的优化研究 因此其结论只适用于针对抗滑桩桩长的单因素优化分析。但抗滑桩桩长的单因素优化研究是抗滑桩综合研究的基础 其优化研究的结果可为抗滑桩综合优化研究提供计算依据。

2 预应力锚索抗滑桩加固方案

预应力锚索抗滑桩利用嵌入到稳定岩层中的桩体 配以锚固在周边岩层的锚索 在预应力的作用下 将不稳定的坡体部分与稳定山体组成整体 确保边坡稳定。它将普通抗滑桩从被动抗滑结构改变成一种主动抗滑结构 减小了抗滑桩的内力和变形 使抗滑桩的结构受力更加合理。同时减小了桩的截面尺寸和锚固段长度 减少了工程量 降低了工程造价 从而在治理边坡、滑坡中得到了广泛应用^[5]。

2.1 预应力锚索抗滑桩布设

设置的锚索桩与布设抗滑桩方案位于同一位置 锚索桩的截面尺寸为 2.4 m × 3.0 m 桩长 35 m。桩头设 1 排锚索 锚索采用 6 束 15.2 mm 的钢绞线制作 设计拉力取 600 kN 锚索长度为 35 m 自由段长 25 m 锚固段长 10 m 锚固角为 25° 锚索的锚固点位于桩顶 锚索钻孔采用 M30 水泥砂浆灌注 锚索采用 FLAC^{3D} 的锚索结构单元 桩采用桩结构单元 桩底端节点的连接包括端点承载效果。结构单元之间以及结构单元与岩土体之间的相互作用通过刚性联接完成。

2.2 加固后稳定性分析计算

图 3 为顶部一排锚索的预应力锚索抗滑桩计算结果 由图 3 可知:

(1) 滑体位移减小 位移最大值下降到 $1.2 \times 10^{-4} \sim 1.3 \times 10^{-4}$ m。最大位移区域位于滑坡体后部 位移从滑坡后缘至前缘逐级减小。由于锚索的预应力作用于岩土体 锚索抗滑桩区域附近形成一个明显的锚固影响区 锚固力向附近土体扩散 这是因为桩截面宽度增加 桩间距减小 促进了土拱效应的发挥。

(2) 从剪应变增量上来看 加固后原潜在滑动带位置的剪切应变增量急剧下降到 10^{-6} 量级 原已贯通区域在预应力锚索桩加固部位被截断 滑体原潜在剪出口位置和滑坡后缘拉张裂隙位置剪切变量应变增量下降到 10^{-7} 潜在剪出口消失。

2.3 锚索桩桩身内力分析

图 4 为预应力锚索桩的桩身内力图 由图 4 可知:

(1) 设置一排锚索后桩顶附近最大剪力值达到 448.6 kN 这是由于此时桩上部承受被锚索拉力抵消掉的盈余滑坡推力 即被动土压力 而被动土压力远大于主动土压力 这是桩顶附近最大剪力明显增大的主要原因。桩身上部的剪力数值大说明桩顶施加的预应力 600 kN 偏大 锚索的预应力可做进一步优化。

(2) 预应力的施加使桩体的受力模型由一端固定变成一端固定、另一端绞支型 因此桩顶附近桩身的受拉弯矩急剧增大 桩身上部转化为全部受拉。桩身上部区域受拉弯矩与桩身下部受压弯矩相比弯矩差值很大 同时最明显的变化在于滑动面附近的桩身受压弯矩比单设抗滑桩方案的受压弯矩减小很多。按照“平衡设计理论”的思想 在保证构件结构安全的前提下 可考虑减小锚索预应力 以缩小桩身受拉、受压弯矩峰值之差^[6]。

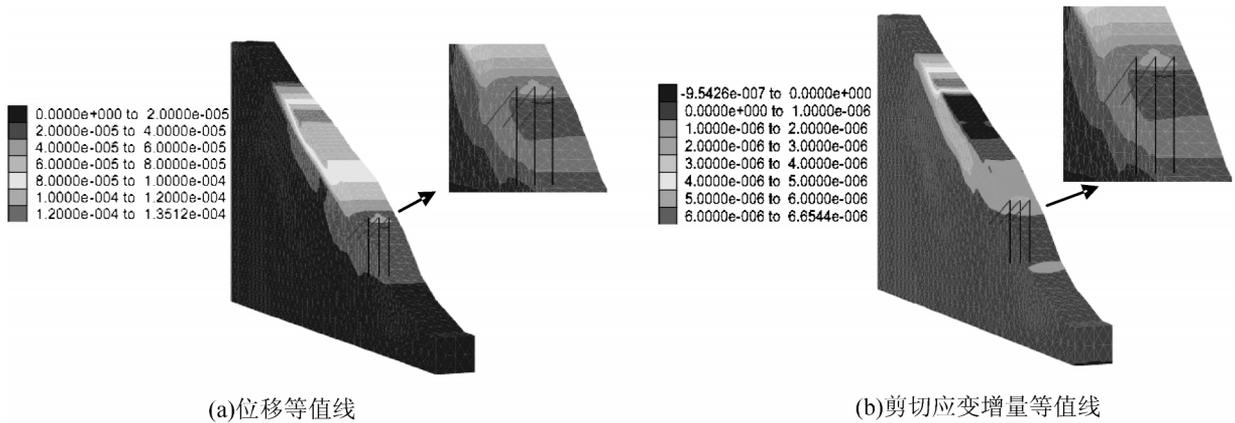


图 3 施加预应力锚索抗滑桩后滑坡计算结果

(3) 由图中的曲线分布以及数值可以看出: 桩身下部所受内力值极其微小; 桩身锚固段与自由端内力相差悬殊, 由于桩身内力变化比较大, 考虑节省材料, 不采用通长配筋, 而采用分段配筋, 在桩身锚固段可以减少配置抗弯、抗剪钢筋。

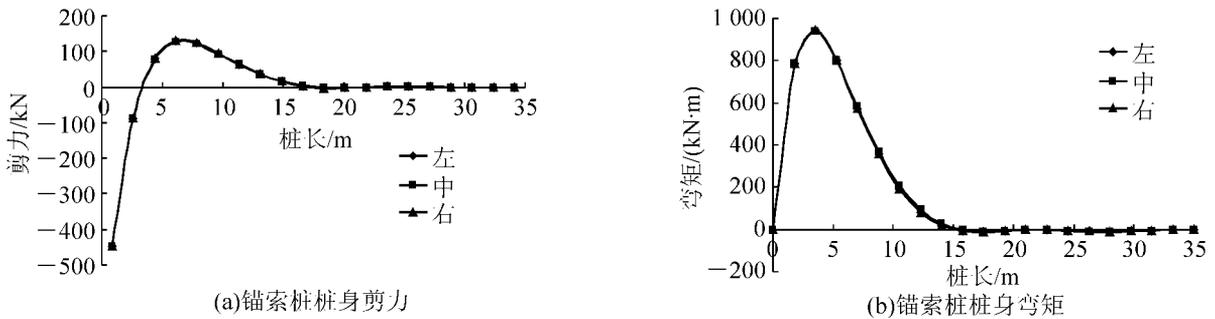


图 4 预应力锚索桩桩身内力图

2.4 锚索内力分布特征

图 5 为锚索内力分布特征图, 由图 5 可以看出:

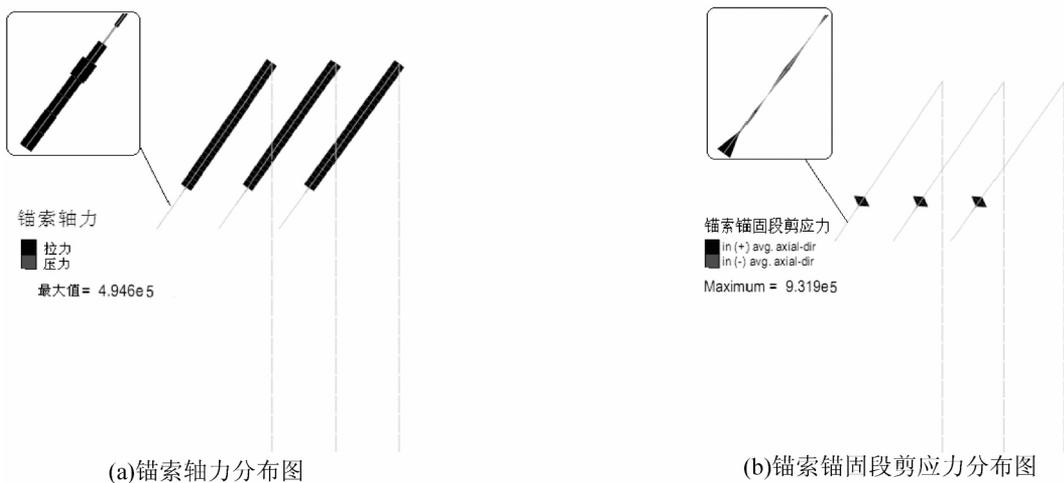


图 5 锚索内力分布特征

(1) 张拉荷载由锚索的自由端传到锚固段, 轴力集中在自由段, 呈现均匀分布, 锚索自由段的轴力相同, 小于预应力 600 kN, 说明施加的锚索预应力有损失。锚索中轴力主要集中在自由段范围内, 一旦进入锚固段衰减很快, 在锚固段呈现随锚固深度逐渐减小的趋势, 靠近深层岩体方向锚固段的轴力都很小。

(2) 锚固段剪应力并非均匀分布, 主要集中在锚固段的前 2 m 范围内。

3 结论及建议

(1) 抗滑桩方案是在桩径、桩间距保持不变的基础上,对抗滑桩桩位优化,缩短非锚固长度,以优化设计桩长。通过分析比较抗滑桩与滑坡体相互作用后的代表性指标,选取了经济合理的抗滑桩桩长。

(2) 预应力锚索抗滑桩方案对滑坡的稳定性控制较好,同时桩身锚固段的弯矩、剪力值很小,但如果施加的预应力不当,将使抗滑桩上部承受巨大的被动土压力,而导致桩身内力不合理甚至是危险状态,上部桩身有可能被拉裂而至损,因此对抗滑桩来说应选择合适的预应力,使这种桩锚组合结构与滑坡实现协同工作的最佳状态,以实现工程安全和投资经济的双重目标。

参 考 文 献

- [1]王恭先,徐峻龄,刘光代,等. 滑坡学与滑坡防治技术[M]. 北京:中国铁道出版社,2004.
 [2]雷文杰,郑颖人,冯夏庭. 滑坡加固系统中沉埋桩的有限元极限分析研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,26(1):27-33.
 [3]胡愈,姚爱军. 港口边坡抗滑桩支护功效与优化数值模拟研究[J]. 河南工程学院学报,2009,21(3):1-5.
 [4]彭文斌. FLAC3D 实用教程[M]. 北京:机械工业出版社,2008:184-191.
 [5]杨博铭. 预应力锚索抗滑桩治理公路高陡边坡的理论与应用研究[D]. 长沙:湖南大学建筑与土木工程分院,2005.
 [6]蒋良滩. 松散斜坡体锚桩加固作用机理与工程应用研究[D]. 成都:成都理工大学环境与土木工程学院,2006.

Optimization Design of Two Kinds of Anti-slide Structure

Li Guopeng

(China Railway Fifth Survey and Design Institute Group Co., Ltd, Beijing 102600, China)

Abstract: The treatment schemes against landslides by means of anti-slide piles and prestressed anchorage piles are proposed. Numerical simulation calculation of land reinforcement is carried out for landslides based on the analysis of reinforcement effect and the forces stabilizing the structure. Suggestion is proposed for optimization of the two kinds of anti-slide structure—anti-slide pile and prestressed anchorage pile. The results of optimization study may provide computation basis for comprehensive optimization study on anti-slide.

Key words: FLAC^{3D}; landslide; optimization; anti-slide pile; prestressed anchorage pile

(责任编辑 车轩玉)

(上接第 59 页)

Research on Calculation Theory for Micro Steel Pipe Piles to Reinforce Slope

Zhang Zhengyi

(The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, Tianjin 300251, China)

Abstract: Small-diameter steel tubular pile is widely used in slope engineering in recent years, but there is no perfect computation theory for reinforcing slope with it. Through the analysis of the stress characteristics of the small-diameter steel tubular anti-slide row piles, the new plane rigid frame model considering the pile-soil interaction is presented. Soil between row piles is regarded as a thin compressible layer and is simulated by a series of horizontal rings connecting the row piles. In this study, an analytical approach based on Winkler elastic foundation beam theory for small-diameter steel tubular row piles reinforcement is put forward. With an example of slope reinforcement, the calculating models and method are essentially verified by comparative analysis of the results between field monitoring and method of this study. The key factors influencing row piles reinforcement are analyzed. The result shows that the relationship between the top displacement of pile and pile length is a power function.

Key words: small-diameter steel tubular anti-slide row piles; slope reinforcement; pile-soil interaction; computation theory; site load test

(责任编辑 刘宪福)