

基于FLAC^{3D}预应力锚拉桩作用机制和加固效果研究

陈新泽

(西北电力设计院, 西安 710032)

摘要: 运用数值模型试验方法, 对预应力锚索抗滑桩治理后滑坡的加固效果进行分析和探讨。试验表明, FLAC^{3D}数值模拟模型试验方法直观, 且可以量化地评估加固前后滑坡和预应力锚索抗滑桩的变形特征, 受力情况和计算滑坡体稳定性系数。加固后滑体的水平和垂直位移显著减小, 滑体压力转移至桩体, 稳定性系数大幅度提高。该方法适用于预应力锚索抗滑桩应用于滑坡的加固效果评价和加固机制分析。

关键词: FLAC^{3D}数值模拟; 预应力锚索抗滑桩; 加固效果; 作用机理

中图分类号: TU 753

文献标识码: A

Interaction mechanism and reinforcement effects of prestressed anchorage piles based on FLAC 3D

CHEN Xin-ze

(Northwest Electric Power Design Institute, Xi'an 710032, China)

Abstract: Reinforcement effects of prestressed anchorage piles applied to landslide are analyzed and discussed by numerical simulation model test method. The results show that: The force and load-deformation characteristics of landslide treated by prestressed anchorage pile can be investigated intuitively and quantitatively, and the safety factor can be calculated with this method. The vertical and plane deformations of landslide are decreased obviously, the landslide force is diverted to anti-landslide pile, and the safety factor was improved observably. This method is available to evaluate the reinforcement effect and interaction mechanism of pre-stressed anchorage piles applied to landslide.

Key words: FLAC^{3D} numerical simulation; prestressed anchorage pile; reinforcement effect; interaction mechanism

1 引言

目前国内外对抗滑工程抗滑效果的研究日趋重视, 研究内容、方法、技术不断创新和发展^[1-2]。该方面的研究内容已从传统地仅考虑单个抗滑结构自身的稳定性, 发展到考虑整体抗滑工程与岩土体的协同作用对其抗滑效果的影响^[3-4]。除研究抗滑工程材料、结构、施工工艺对其抗滑效果的影响外, 对岩土体性质、岩土体与抗滑结构之间的相互作用对抗滑效果的影响也进行了探讨。目前抗滑桩计算理论还不成熟, 桩与桩间土体的成拱理论也有待进一步完善, 理论上还没有提出有效地对预应力锚索抗滑桩加固效果的评价方法^[5]。预应力锚索抗滑桩应用于滑坡后滑体的稳定性评价和加固效果研究是

岩土工程研究者所面临的挑战。

预应力锚拉抗滑桩应用于滑坡防治工程的加固效果是一个值得深入研究的问题。本文结合三峡库区巴东县白水沟次级滑坡, 运用FLAC^{3D}数值模拟技术, 基于强度折减法^[6-8]计算加固后滑坡的稳定性系数, 并对滑体加固前后的变形特征和预应力锚拉抗滑桩的受力, 变形特征、加固效果, 作用机制进行评价和分析, 提出较为可行的预应力锚索抗滑桩加固效果评价方法, 以期能对滑坡地质灾害的治理设计、效果评价工作提供参考。

2 治理后滑坡加固效果分析

2.1 工程实例

本文选取白水沟滑坡合理范围的地质模型, 选

取最典型剖面,采用FLAC^{3D}建立天然工况下对应的二维数值模拟模型,如图1所示。

为了直观地对比分析滑体加固前后的滑体变形特征,本文选用二维模型进行滑体加固前后的变形特征及支护结构体的受力,变形特征分析。

2.2 滑体位移分析

滑坡加固前后位移模拟结果如图2~4所示。由图可知,加固前模型在自重应力下达到平衡后,滑体位移等值区可分为4个区:前缘浅层位移为0.150~0.200 m,中部与前部潜在滑动带位移为0.200~0.250 m,后部滑体位移为0.250~0.300 m,后缘出现拉张裂隙,位移为0.320 m,滑带位移为0.100~0.150 m。加固后,位移等值区演变为7个区,从滑坡后缘至前缘逐级减小为:0.140~0.160、0.120~0.140,0.100~0.120,0.080~0.100,0.060~0.080 m和0.040~0.060 m。滑坡后缘拉张裂隙部位位移最大,为0.160~0.170 m。潜在滑动带位移与上部滑体位移一致,滑坡前缘贯通部分由抗滑桩截断。

综合上述分析可知,加固前滑动面以上滑体呈整体位移趋势,说明滑体沿滑动带发生了较小的整体位移,加固后滑动面以上滑体的位移等值区域由加固前4个变成7个,从滑坡后缘至前缘的位移逐级减小,同时位移较加固前显著减小,说明锚索抗滑桩阻止了滑坡的整体滑动,起到了坡面的整体加固效果。

如图3所示,模拟达到平衡后滑体发生整体变形,X方向位移呈现2个位移等值区,其最大值出现在滑坡后部大面积区域和滑坡前缘潜在滑动带部位,为0.200~0.230 m,前部为0.180~0.200 m,地表位移较小,为0.150~0.180 m。加固后,X方向位移沿滑坡后缘至前缘,因距锚索抗滑桩由远及近,其加固作用逐步减弱,呈4个位移等值区:0.100~0.103,0.080~0.100,0.060~0.080,0.040~0.060 m,X方向位移值逐级减小。

由图4对比可知,加固前后滑体Y方向位移等值区分区大体一致。加固后的Y方向位移由于预应力锚索抗滑桩的加固作用,其位移量比加固前坡面的位移相比明显降低,对应最大等值区由加固前0.050~0.200 m减小为0.040~0.120 m。同时,加固前后滑体前缘较大区域内Y方向位移与下部基岩位移基本一致,说明滑体处于基本稳定状态,其中加固前滑体潜在剪出口位置出现向上位移,最大值为0.077 m,这是由于潜在滑动面前缘在后部滑体的推力作用下向上隆起,形成反翘现象。加固后锚索抗滑桩区域相对加固前出现较大竖向位移,主要

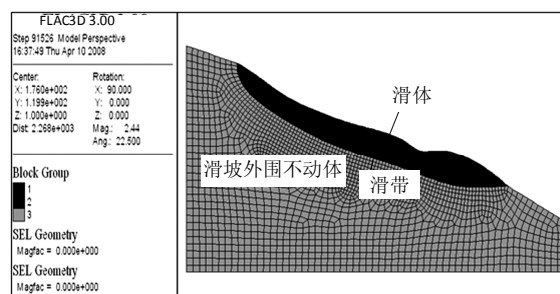
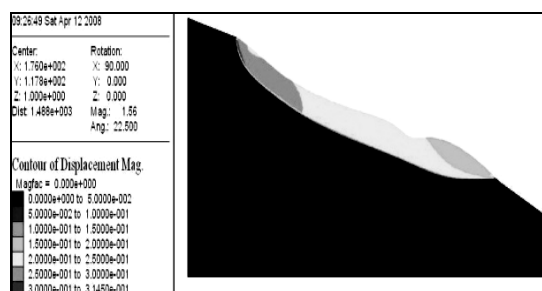
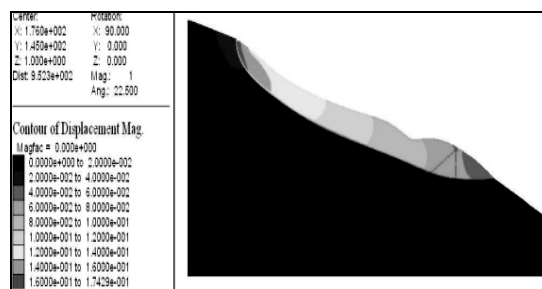


图1 预应力锚索桩加固后滑坡二维数值模拟网格模型
Fig.1 Numerical simulation model of mesh subdivision after reinforced by pre-stressed anchorage pile



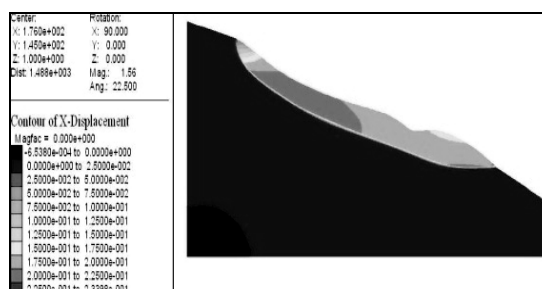
(a) 加固前



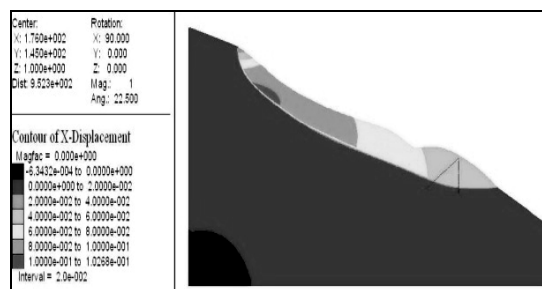
(b) 加固后

图2 滑体位移等值线图

Fig.2 Contour of displacement of landslide



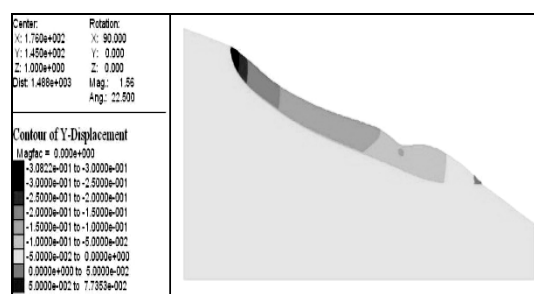
(a) 加固前



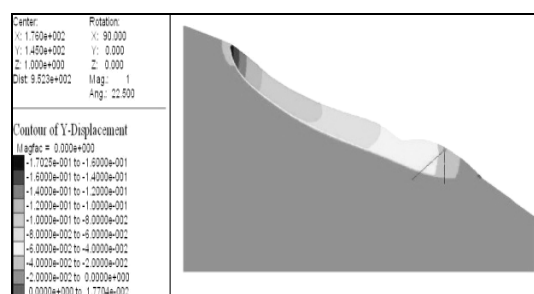
(b) 加固后

图3 滑体X位移等值线图

Fig.3 Contour of X-displacement of landslide



(a) 加固前



(b) 加固后

图4 滑体Y位移等值线图

Fig.4 Contour of Y-displacement of landslide

由于锚索的预应力作用于岩土体形成，说明了预应力锚索抗滑桩起到了加固滑体、阻止大变形和滑动作用而产生的效果。

2.3 剪切应变增量分布

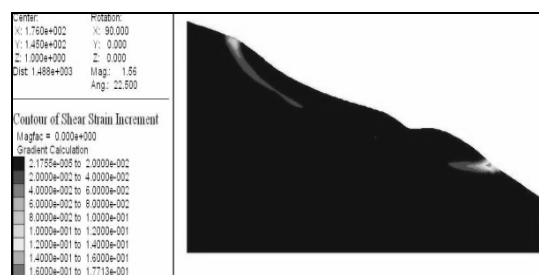
图5为滑坡加固前后的剪切应变增量云图，根据剪切应变增量大小可以判断滑体的(潜在)滑动面(带)剪应变增量较大(绝对值)的部位，为其(潜在)滑动面(带)，变形破坏也多沿此处发生。剪应变增量较小或基本没有发生变化的部位，一般不会有潜在滑动面的产生，因此，这些部位也不会发生较大的变形或破坏。加固前的剪切应变增量较大值(0.020~0.040 m)出现在滑坡前部和后部滑动带位置，中部尚未贯通，最大值集中于滑体潜在剪出口和滑坡后缘拉张裂隙位置，剪切应变增量为0.060~0.177 m，由此可以判定，滑体处于稳定状态。加固后原潜在滑动带位置的剪切应变增量急剧减小为0.005~0.010 m，并于预应力锚索加固部位被截断，剪切应变增量减小为 10^{-5} 量级，滑体潜在剪出口位置和滑坡后缘拉张裂隙位置剪切变量较大值变为0.020~0.056 m，由此说明加固效果明显。

2.4 塑性区分布

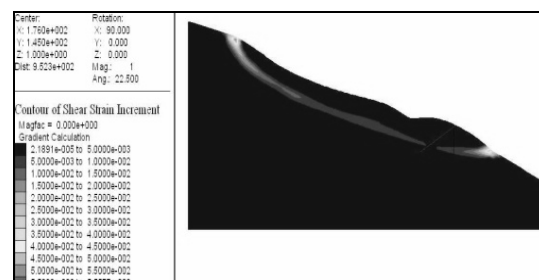
塑性区分布面积的大小以及贯通情况可以判断滑坡的稳定性。塑性区分布面积越大，说明滑体处于塑性屈服的区域越大。塑性区的贯通情况说明滑体滑动破坏面的分布情况和发展趋势。塑性区一旦贯通，整个滑动面就基本形成，滑动破坏将

沿贯通面发生。

由模拟结果塑性区分布图6显示，支护前整个滑坡张拉破坏塑性区主要位于滑坡后缘部位，滑体与基岩接触面及滑坡前缘局部出现剪切破坏塑性区，但滑坡前缘和滑坡中部接触面塑性区没有贯通。由于整个塑性区并没有完全贯通，滑体大部分土体处于弹性状态，说明整个滑体在此工况下是稳定的。支护后整个滑坡塑性区主要分布在抗滑桩以上的滑体与基岩接触面，且滑体中，后部大面积范围内未出现张拉，剪切破坏塑性区，说明滑体得到抗滑加固的效果。



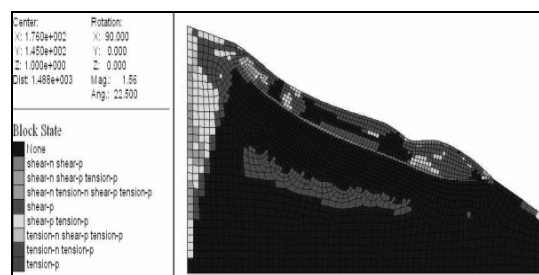
(a) 加固前



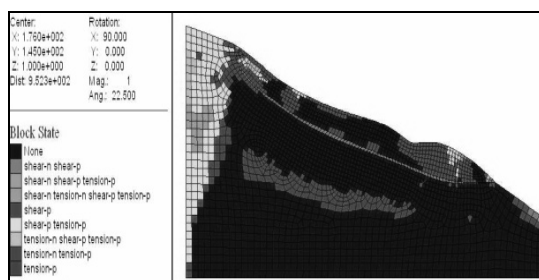
(b) 加固后

图5 滑体剪切应变增量等值线图

Fig.5 Contour of shear strain increment of landslide



(a) 加固前



(b) 加固后

图6 塑性区等值线图

Fig.6 Contour of plastic zone of landslide

2.5 滑体应力分布

锚索抗滑桩锚固阻滑效应产生的根本原因在于锚固力和桩体的抗滑作用下滑体内应力的重新分布。图 7、8 为锚索抗滑桩作用前后滑体主应力的变化情况。加固前的应力为天然应力，其值越往深处越大，除坡面附近外，主应力方向基本为水平和竖直方向。在预应力锚索抗滑桩的作用下，使得滑体内主应力分布发生变化。最大主应力中心向滑坡后部偏移，应力方向调整为与锚固力作用方向基本一致，主动应力向滑坡后部扩散，此即为预应力

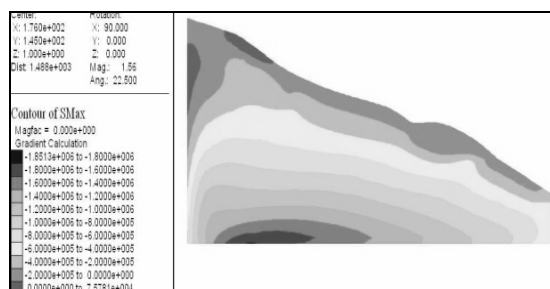
锚索主动加固行为的体现。由最大主应力集中区分布情况可以看出，抗滑桩嵌固段，锚索锚固端附近出现应力集中区，说明抗滑桩与锚索起到了抗滑，支挡加固作用。

2.6 滑坡稳定性系数

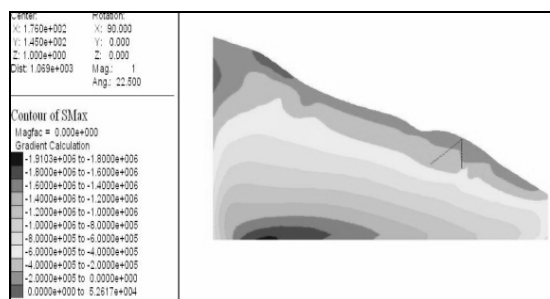
稳定性系数是一个直观被广大科研技术人员所采用的滑坡稳定情况的判断参数。在《三峡库区巴东县谭家坪滑坡治理工程施工图设计报告》中采用的刚体极限平衡法和本文采用 FLAC3D 强度折减法计算的稳定性系数计算结果如表 1 列：

表 1 加固前、后稳定性系数统计表
Table 1 Statistics of safety factor of landslide stability before and after reinforced

名称	工况	稳定性系数		
		加固前(刚体极限平衡法)	加固前(FLAC ^{3D} 强度折减法)	加固后(FLAC ^{3D} 强度折减法)
白水沟滑坡	天然状态	1.230	1.245	1.558



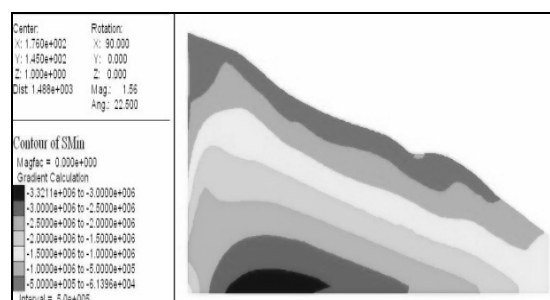
(a) 加固前



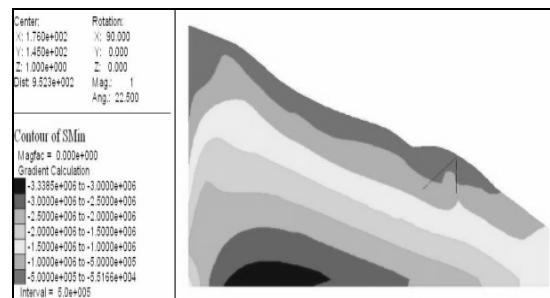
(b) 加固后

图 7 最大主应力集中区等值线图

Fig.7 Contour of Max main stress of landslide



(a) 加固前



(b) 加固后

图 8 最小主应力集中区等值线图

Fig.8 Contour of Min main stress of landslide

对比可知，FLAC3D 强度折减法比极限平衡法计算的滑坡稳定性系数略大 0.015，相对差值仅为 1.220 %。其原因为：①刚体极限平衡法假定滑移体为刚体，作用在滑移面上的力系只计法向力和剪力，而未考虑弯矩的作用；②计算中使用六面体实体单元模拟滑带，计算公式中使用的主滑方向无论是在平面上还是在剖面上都无法保证与滑带单元最可能方向一致。由表可知，加固后滑坡体稳定性系数提高了 0.313，表明加固效果显著。正是由于采用预应力锚索抗滑桩加固后，不仅提供了直接平衡力、限制了岩土体变形，更加强了岩土体结构、提高了岩土体强度以及参与调整应力状态，使得岩土体稳定性得到大幅度提高，表明整个加固支护是成功的。

3 锚索抗滑桩二维数值模拟分析

3.1 锚索抗滑桩位移分析

抗滑桩主要是横向受力桩，变形也主要是水平方向上的，因此，本文分析桩体的变形主要分析桩的水平位移变化。普通抗滑桩的水平位移一般是桩顶的位移沿滑体滑动方向，而桩嵌固段铰支时（基岩强度不高或嵌固段较短）桩端则有数值不大的反向位移。

抗滑桩位移的模拟结果如图 9 所示，当桩顶的预应力施加过大时，桩的位移分布则会出现与普通抗滑桩相反的结果，即桩顶的位移沿滑动反

方向,而锚固段端头出现正位移,说明抗滑桩施加预应力后,桩顶在预应力作用下发生向滑体滑动反方向的位移,桩锚的协调变形有助于锚索预应力的施加,同时可以对下部滑体起到主动支挡加固的目的。

3.2 锚索抗滑桩内力分析

预应力锚拉桩为埋入式,桩顶低于地面 1.500 m,且桩后有土体分布。利用 FLAC^{3D} 强度折减法求解支护结构内力^[9],模拟结果如图 10~14 所示。由图 10 可知,埋入式预应力锚索抗滑桩的弯矩分布呈中间大两端小的趋势。分析其原因主要是预应力锚索施加后,改变了桩体的受力模型,使桩的受力由一端固定变成一端固定,另一端铰支型。抗滑桩在滑体推力的作用下,中间部位出现最大弯矩,为 $2.626 \times 10^4 \text{ k} \cdot \text{N} \cdot \text{m}$,略大于设计值,因此应加强对应段纵向筋的配筋。

剪力分布见图 11,剪力最大值($2.626 \times 10^4 \text{ kN}$)出现在嵌固段中间部位和桩顶至剪力为 0 处的中间位置。与抗滑桩的传统理论方法分析结果一致^[1-2]。由图 9~14 综合分析可知,抗滑桩加固滑坡体的实质就是施加主动的抗滑力:①桩本身的刚度提供的抗滑力直接阻止了滑体的滑动;②桩的表面摩阻力,将岩体滑动面以上部分的岩体自重传至滑动面以下,从而减少了滑动力;③使岩土体的结构得到加强,提高岩土体的承载能力;④在岩土体内产生附加应力场,使不利的应力状态得到调整和改善,从而提高岩土体稳定的可靠度。

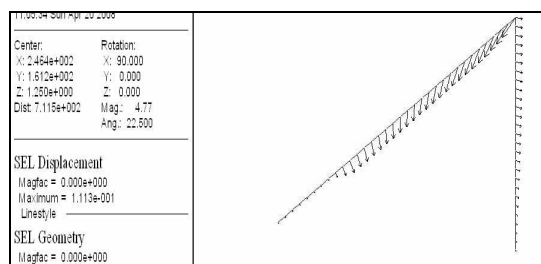


图 9 预应力锚索抗滑桩桩身及锚索位移分布图
Fig.9 Displacement distribution of pre-stressed anchorage pile

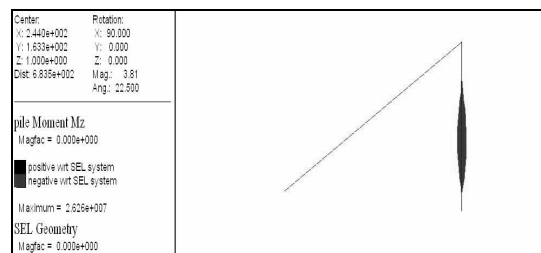


图 10 抗滑桩弯矩分布图
Fig.10 Moment distribution of anti-sliding pile

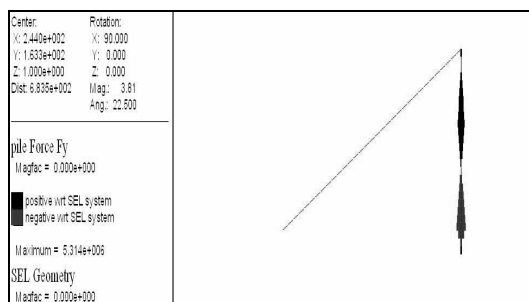


图 11 抗滑桩剪力分布图
Fig.11 Shear force distribution of anti-sliding pile

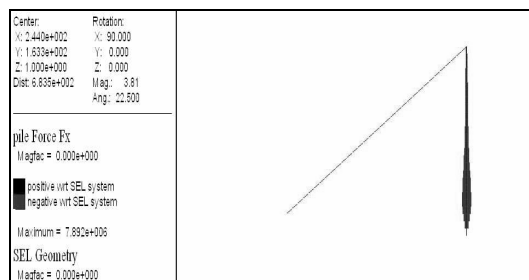


图 12 抗滑桩轴力分布图
Fig.12 Axis force distribution of anti-sliding pile

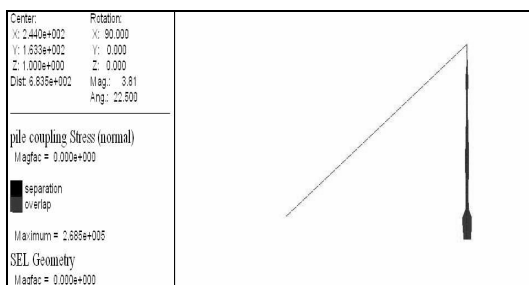


图 13 抗滑桩法向耦合应力分布图
Fig.13 Vertical coupling force distribution of anti-sliding pile

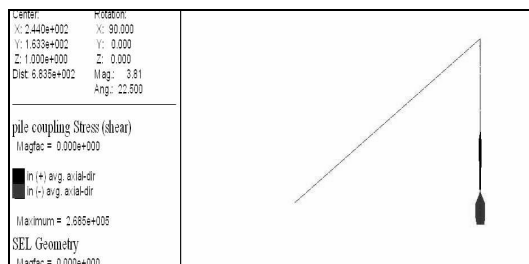


图 14 抗滑桩剪切耦合应力分布图
Fig.14 Shear coupling force distribution of anti-sliding pile

3.3 锚索锚固段内力分布特征

在现阶段的一些规范和设计工作中,假定锚固段剪应力按均匀分布,采用平均强度进行设计。由图 15、16 分别为锚固段轴力分布图和轴向应力分布图可知,位于主滑线上的抗滑桩锚固段轴力呈指数形式分布,而且衰减很快,分布在整个锚固段范围内。锚索锚固段剪应力并非均匀分布,主要集中在锚固段的两端,根据已有工程的资料分析可

知,无论是水泥浆还是水泥砂浆作为锚固材料的预应力锚索,剪应力的分布都具有指数分布的特点^[3-4]。由此说明,增加内锚固段长度并非增加锚固力的最佳途径。

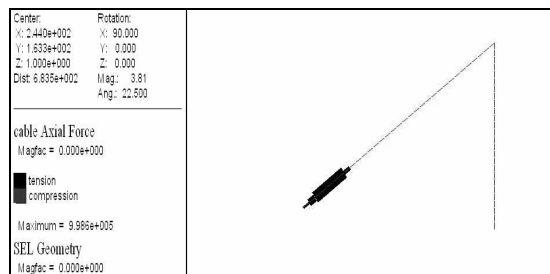


图 15 加固后锚索轴力分布图

Fig.15 Axis force distribution of cable after reinforced

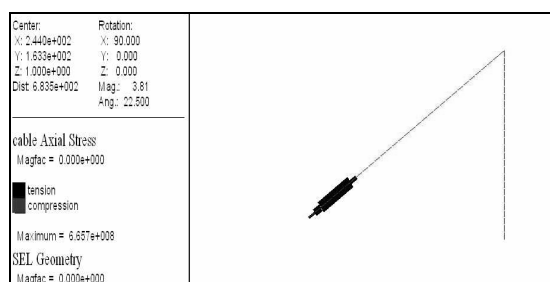


图 16 加固后锚索轴向应力分布图

Fig.16 Axis stress distribution of cable after reinforced

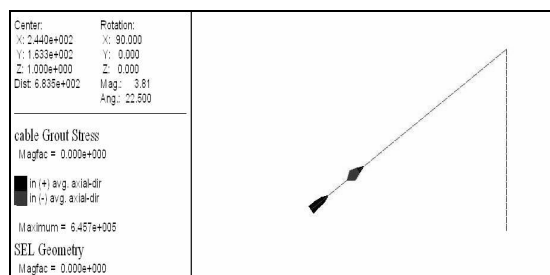


图 17 加固后锚索注浆应力分布图

Fig.17 Grouting stress distribution of cable after reinforced

综合上述,预应力锚索的加固作用体现在以下几方面:①锚索本身的抗剪能力阻止滑体的下滑;②锚索预应力沿滑面的切向分量,与下滑力方向相反;③预应力的施加改变了桩身的受拉方向,由悬臂桩的外侧受压改变为外侧受拉。且由于预应力在桩身有一轴向分力,且使其受压,因此预应力的施加对桩身的受力是有利的。④预应力锚索改变了桩的力学模型,使桩由悬臂变成(弹性)简支,或一端弹性支承另一端固定的结构,这使得桩身在相同的滑坡推力作用下,桩身的最大弯矩减小,使桩截面尺寸减小、桩的埋置深度变浅。

预应力锚索抗滑桩是一种多因素的综合作用^[10],其作用机制较为复杂,有待于进一步地研究。

4 结 论

(1)白水沟滑坡体加固后,稳定性系数得到显著提高、地表位移减小、塑性区变小、潜在滑动带被锚索、桩体截断,说明预应力锚索抗滑桩起到了加固滑体、阻止大变形和滑动产生的明显效果。说明预应力抗滑桩设计合理。

(2)FLAC^{3D}数值模拟模型试验方法可以直观且量化地评估加固前后滑坡和预应力锚索抗滑桩的变形特征、受力情况,适用于预应力锚索抗滑桩应用于滑坡的加固效果评价和加固机制分析。

(3)利用二维FLAC^{3D}强度折减法计算的滑坡稳定性系数略高于传统极限平衡法,主要变形范围与极限平衡法搜索的最危险滑动面范围非常接近。

参 考 文 献

- [1] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析——原理方法程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 533—560.
- [2] HASSIOTIS S, CHAMEAU J L, GUNARATNE M. Design method for stabilization of slope with piles[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123(4): 314—323.
- [3] 张发明, 刘宁, 赵维炳. 岩质边坡预应力锚固的力学行为及群锚效应[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 29(6): 107—108.
- [4] 顾金才, 沈俊, 陈安敏. 锚索预应力在岩体内引起的应变状态模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(增): 917—921.
- [5] 周维垣. 岩体力学数值计算方法的现状与展望[J]. *岩石力学与工程学报*, 1993, 12(1): 84—88.
- [6] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(19): 3381—3388.
- [7] 邓建辉, 张嘉翔, 闵弘, 等. 基于强度折剪概念的滑坡稳定性三维分析方法(II)[J]. *岩土力学*, 2006, 25(6): 871—875.
- [8] 韦立德, 杨春和, 高长胜. 基于三维强度折减有限元的抗滑桩优化探讨[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(11): 1350—1352.
- [9] 郑颖人, 赵尚毅. 用强度折减有限元求边坡支挡结构的内力[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(20): 3552—3558.
- [10] 张友良, 冯夏庭, 范建海, 等. 抗滑桩与滑坡体相互作用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(6): 839—842.