

Slope Stability Analysis of Prestressed Anchor Cable Based on the Theory of Limit Equilibrium Method and Finite Element Strength Reduction Method

Mingrui Yang¹, Baoqiang Yang², Liqiu Ma³

¹Guizhou Electric Power Design and Research Institute, Guiyang Guizhou

²School of Highway Engineering, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

³Guizhou Electricity Engineering Construction Supervise Company, Guiyang Guizhou

Email: 138172886@qq.com, 396277731@qq.com, lqmo_912@163.com

Received: Aug. 26th, 2017; accepted: Sep. 9th, 2017; published: Sep. 14th, 2017

Abstract

The paper uses the Slope of 220 kv Variable Pressure Transmission Iron Tower from Huiwen to Yu'an in Guiyang as an engineering example. It calculates and analyses the high slope stability after reinforcement by prestressed anchor cable based on the theory of limit equilibrium method and finite element strength reduction method. It discusses the influence of prestressed anchor cable on stability and displacement. The calculation results are compared with the collected monitoring data and the conclusions are drawn. The safety factors and sliding surfaces by limit equilibrium method and finite element strength reduction method are almost the same. The monitoring data are consistent with the calculation results, and the slope is stable after reinforcement by prestressed anchor cable. Thus, the result can be used as a reference for engineering design.

Keywords

Prestressed Anchor Cable, Slope Reinforcement, Limiting Equilibrium Method, Strength Reduction Method, Stability

基于极限平衡理论和有限元强度折减法的 预应力锚索加固边坡稳定性分析研究

杨明瑞¹, 杨宝强², 马立秋³

¹贵州电力设计研究院, 贵州 贵阳

²长安大学公路学院, 陕西 西安

文章引用: 杨明瑞, 杨宝强, 马立秋. 基于极限平衡理论和有限元强度折减法的预应力锚索加固边坡稳定性分析研究[J]. 土木工程, 2017, 6(5): 515-524. DOI: 10.12677/hjce.2017.65062

³贵州电力工程建设监理公司, 贵州 贵阳
Email: 138172886@qq.com, 396277731@qq.com, lqmo_912@163.com

收稿日期: 2017年8月26日; 录用日期: 2017年9月9日; 发布日期: 2017年9月14日

摘要

本文以贵阳会文变至渔安变220千伏线路铁塔边坡为依托工程, 采用极限平衡法和有限元强度折减法对高边坡在预应力锚索加固前后的稳定性进行计算分析, 探讨了施加预应力锚索后对边坡位移及稳定性的影响, 通过模型计算结果与监测资料的对比得出结论: 极限平衡理论与有限元强度折减法得到的安全系数和滑动面基本一致。监测资料与计算结果相吻合, 预应力锚索加固后该边坡处于稳定状态, 本文研究成果可为类似工程设计提供参考。

关键词

预应力锚索, 边坡加固, 极限平衡法, 强度折减法, 稳定性

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

随着我国基础建设领域的高速发展, 为满足生产生活需求, 在建设过程中需应对各类工程建筑以及边坡形式。边坡的加固和处理过程对结构的安全性产生直接影响, 应得到足够的重视[1]。预应力锚索加固时, 首先对滑动面或软弱地层进行钻孔, 其次经由钻孔进行锚索穿入, 将锚索一段固定在坚硬岩层中后, 对端锚头施加预应力, 以此对不稳定地层进行加固, 以期达到减轻加固体自重、节省材料、施作高效、经济可靠的加固效果。

很多学者对边坡预应力锚索加固技术进行了相关研究, 梁明学(2003)和郑颖人(2005)分别通过数值模拟法和有限元分析法分析预应力锚索加固技术对边坡稳定性及位移的影响, 邓东平(2013)和秦玉春(2014)分别通过极限平衡法和强度折减法分析不同工况条件下的边坡的稳定性, 彭燃(2010)、彭燃(2011)和王会云(2013)比较分析了极限平衡法和强度折减法在边坡预应力锚索加固理论中的应用[2] [3] [4]。上述研究成果部分仅通过数值模拟、理论分析, 对预应力锚索加固效果进行计算评价、理论分析。本文采用极限平衡理论及有限元强度折减法, 对预应力锚索加固前后边坡稳定性进行分析, 对比了加固前后的安全系数和滑动面, 以及总位移量, 同时给出了边坡工程加固后的监测资料, 验证了计算结果的可靠性和适用性。

2. 工程概况

本文以贵州省贵阳会文变至渔安变 220 千伏线路铁塔边坡为依托工程计算分析了边坡稳定性, 该工程铁塔腿部基础位于边坡上, 场地斜坡向东南倾斜, 地形北西向高, 南东向低。上半段边坡坡度 50° , 坡高 $9\sim 11\text{ m}$, 采用 4×2 的格构式无粘结拉力型预应力锚索支护, 锚索长 $11.5\sim 12.5\text{ m}$, 下半段边坡坡度 73° , 高 $13\sim 15\text{ m}$, 采用 2×2 的格构式无粘结拉力型预应力锚索支护, 锚索长 8.5 m , 边坡现状如图 1 所

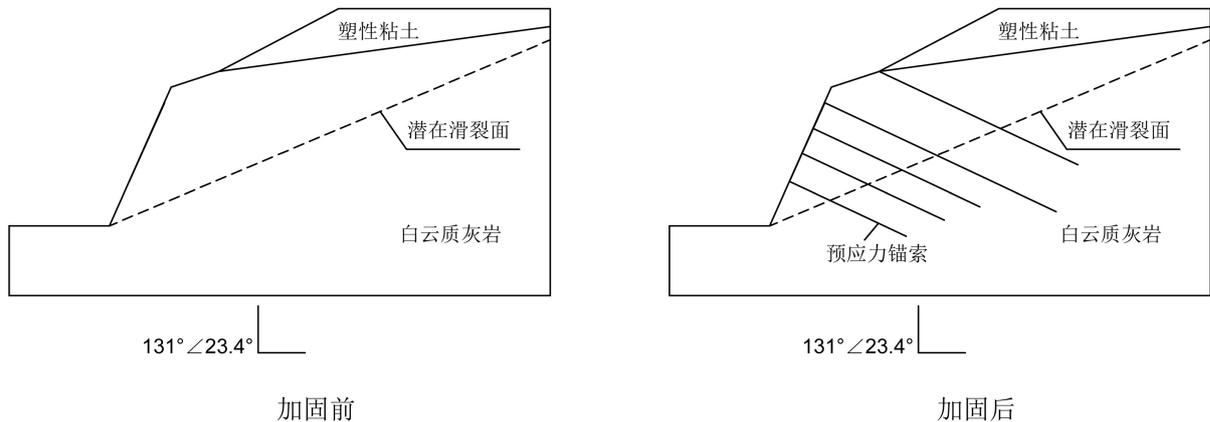


Figure 1. Schematic diagram of slopes before and after reinforcement

图 1. 加固前后边坡示意图

示, 边坡地层自上而下依次为: 1) 塑性粘土, 含强风化白云质灰岩颗粒, 平均厚度 1 m; 2) 白云质灰岩, 含少量粉砂, 不均匀且存在一外倾潜在滑动面。边坡坡面倾向为 $120^{\circ}\sim 140^{\circ}$, 岩层层面产状为 $131^{\circ}\angle 23^{\circ}$, 该边坡为顺向坡, 边坡可能的破坏模式为岩土交界面的折线形滑动、沿坡脚外倾结构面的顺层滑动或坡顶覆土层的圆弧滑动。

3. 边坡稳定分析研究

取边坡中一剖面为例进行分析计算, 适当简化模型, 边坡加固前后状态如图 1 所示, 加固前分别采用极限平衡理论通用条分法、有限元强度折减法分析计算该边坡稳定性、安全系数, 加固后采用有限元强度折减法计算该边坡的安全系数并与加固前对比分析。

3.1. 边坡稳定分析研究

3.1.1. 极限平衡理论

极限平衡理论首先在岩土体中假定一破坏面, 取破坏面内土体为脱离体进行计算, 得到当脱离体达到静力平衡状态时所需的岩土体的抗力或抗剪强度, 与破坏面实际所能提供的岩土体的抗力或抗剪强度作比值, 以求得稳定性安全系数的方法。剖面安全系数 K 可由式(1)求得, 计算时材料参数如下所示。

$$K = \frac{T}{Q} \quad (1)$$

式中 T 为作用于岩土体中潜在破坏面上块体沿破坏面的抗剪力;

Q 为该块体沿破坏面的剪切力。

极限平衡法的应用有两种, 一种是严格条分法, 另一种是非严格条分法。两种方法在应用中的不同点是: 严格条分法同时满足力矩平衡和力平衡条件, 而非严格条分法只满足两者其一。非严格条分法的主要采用标准圆弧计算法, 有简化 Bishop 法、瑞典法等方法。根据工程项目调查结果显示现实中的土坡少有圆弧形, 因此非严格条分法在应用时往往存在瓶颈, 而严格条分法则能较好的满足实际工程情况, 进而通过计算得到较为合理的安全因子, 严格条分法主要有通用条分法、通用 Janbu 法、Morgenstern-Price 法[5] [6] [7] [8] [9]。

本文采用通用条分法[6]对边坡实例进行稳定性分析, 将条间力合力的大小、方向设为未知参数, 其次指定不同的条间力倾角函数, 从而可便捷的对各种严格条分法进行模拟, 可以使一个力矩平衡条件和两个力平衡条件同时得到满足, 设置好土条并取为隔离体, 再把假定滑动面上的土体进行垂直分条, 分为 n

个土条,将条间力合力的大小、方向设为未知参数,进而在极限平衡状态下迭代求解得出土体的安全系数。

3.1.2. 有限元强度折减理论

本文采用岩土工程有限元软件 Plaxis 中的强度折减法计算剖面的安全系数,此方法通过将土体强度参数、粘聚力及接触面强度不断折减至结构破坏,板和锚杆等结构对象的强度不会受到折减,剖面安全系数因子 SF 可由式(2)求得,计算时材料参数如下所示。

$$SF = \sum Msf = \frac{\tan \varphi_1}{\tan \varphi_2} = \frac{c_1}{c_2} \quad (2)$$

式中 $\sum Msf$ 为模型破坏时的总乘子;

φ_1 为材料输入的内摩擦角, φ_2 为分析里材料采用的折减内摩擦角;

c_1 为材料输入的粘聚力, c_2 为分析里材料采用的粘聚力。

采用 Plaxis 软件选用 15 节点三角形单元,分析计算边坡加固前后的安全系数、滑坡体位移。通过对实际边坡进行简化,依据土层材料特性进行模型分层,其次采用点对点锚杆、土工格栅单元模拟预应力锚索,采用板单元模拟混凝土格构,最后在土层与土层间、土层与锚杆间设置接触面单元[10]。模型中取锚杆单元为弹塑性材料,其轴向刚度为 $2.5 \times 105 \text{ kN/m}$,水平间距为 4 m,预应力为 200 kN/m;格构混凝土(板单元)的容重为 8.3 kN/m^3 ,轴向刚度为 $1.2 \times 107 \text{ kN/m}$,抗弯刚度为 $1.2 \times 105 \text{ kN/m}^3$,等效厚度为 0.346 m,泊松比为 0.15;注浆体(土工格栅)为弹性材料,其轴向刚度为 $1 \times 105 \text{ kN/m}$;模型及界面物理力学特性见表 1 所示。

3.2. 计算结果分析

加固前,通过极限平衡法计算得到的安全系数为 0.7666,通过强度折减法计算得到的安全系数为 0.6652,滑动面如图 2 所示,土层均沿潜在滑裂面滑动。两种方法计算得到的安全系数相差 0.1014,该误差在容许范围内。通过对上述两种方法进行比较发现,Plaxis 在分析边坡全局稳定性具有很强的适用性,能够便捷的模拟各类加筋结构在边坡支护过程中的力学状态,可以反映边坡滑动的实际状态,强度折减法相较极限平衡法而言,不用事先对滑动面的位置及滑动形式进行假定,可便捷的对出土体的位置、破坏区域进行计算。

由求得的安全系数可知,在天然工况下,边坡不稳定,达不到工程要求(规范规定正常运用条件下边坡稳定安全系数不得小于 1.2) [11],若有水入侵潜在滑裂面,使得潜在滑裂面含水率增大,内摩擦角减小,粘聚力减小,强度降低,边坡将会处于更加危险的状态,因此决定选用预应力锚索加固措施。

通过使用强度折减法,对加固前后的边坡模型进行计算,所得安全系数见表 2。计算得到的加固前的安全系数为 0.6652,边坡沿潜在滑裂面滑动,最大位移为 1.28 米,滑动位置在坡顶靠近潜在滑裂面一侧;采用预应力锚索进行边坡支护后,可见边坡沿潜在滑裂面滑动的同时滑楔体明显向边坡后方推移,滑体体积约为边坡加固前滑楔体的 1.5 倍,坡面最大位移减小至 0.095 米,其位置在坡顶顶角处,安全系数为 1.2635,结构安全性得到提高,加固前后边坡滑动面如图 3 和图 4 所示。

Table 1. Physical and mechanical properties of soils and interfaces

表 1. 岩土及界面物理力学特性

岩土类别	容重($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	内摩擦角($^\circ$)	粘聚力(kPa)
塑形粘土	18	0.3	7	30
白云质灰岩	27	0.25	20	200
潜在滑动面	27	0.25	12	20

Table 2. Factors of safety of slopes before and after reinforcement
表 2. 加固前后边坡安全系数

边坡状态	加固前	加固后
安全系数	0.6652	1.2635

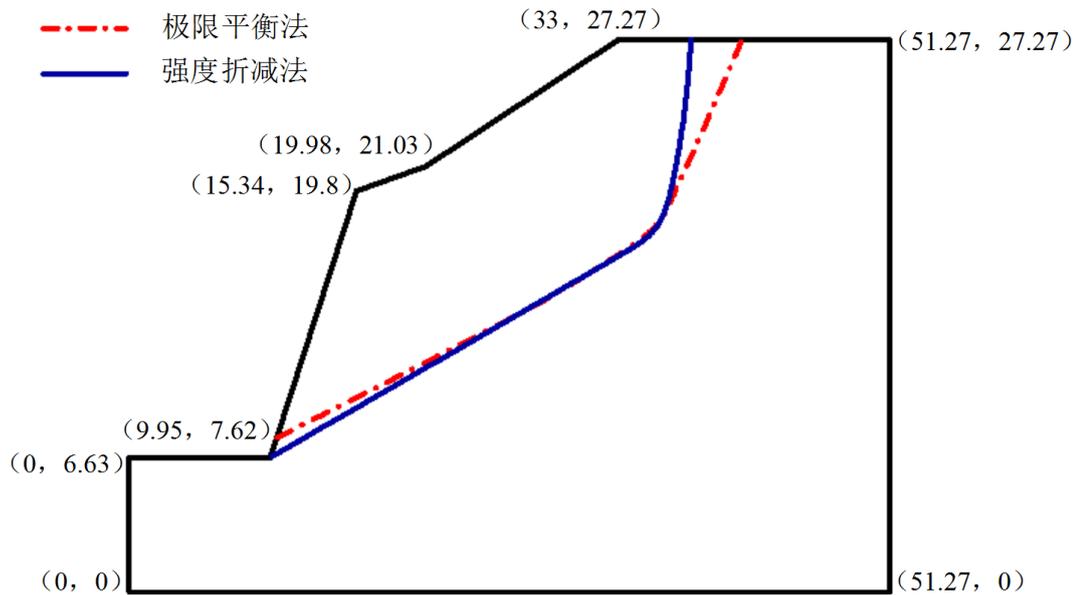


Figure 2. Critical failure surfaces of slopes before reinforcement
图 2. 加固前边坡滑动面

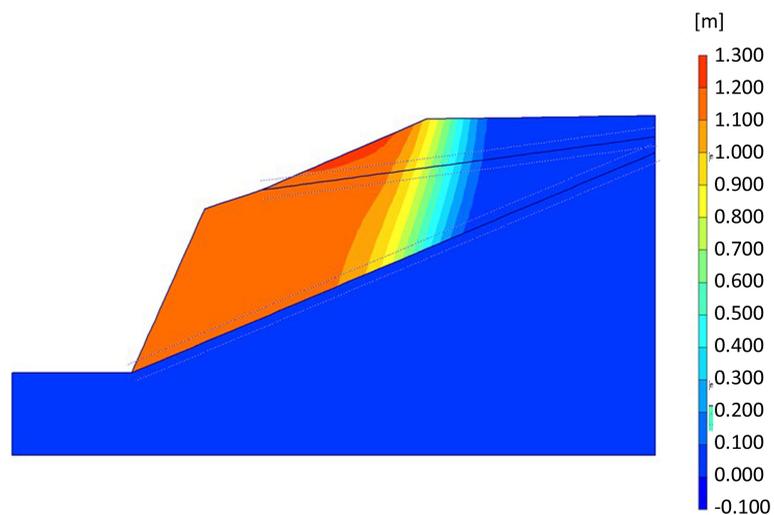


Figure 3. Failure surface contour of slopes before reinforcement
图 3. 加固前滑动面云图

锚索发挥的锚固力 N_i 可根据潜在滑裂面分解为垂直于滑裂面方向的法向分力 $N_i \sin \alpha \tan \beta$ 和平行于滑裂面方向的切向分力 $N_i \cos \alpha$ ，锚固力的发挥减小了边坡的下滑力(矩)的同时增大了边坡的抗滑力(矩)，锚索由下至上分别为 1~5 号锚杆，锚索受到的拉力如表 3 所示。

采用预应力锚索进行加固后，锚索通过钻孔，穿过潜在的滑裂面，再通过注浆体锚固在稳定土层中，

使得上下两层白云质灰岩及潜在滑裂面形成有效的联结，提高了边坡的整体性，同时混凝土格构的施作对坡面形成了有力的防护，坡面位移对比图如图 5 所示，由图 5 可得，边坡经预应力锚索加固后，滑动面向坡体后方推移 13 米，坡面滑动的最大位移也由 1.28 米减小至 0.095 米。边坡由未加固的不稳定状态经加固后达到稳定状态。

4. 边坡检测资料

经上述对比分析后发现边坡工程采用预应力锚索加固法进行加固，可有效的提高边坡的安全性，此方法经工程应用过程中持续进行了长期边坡位移和沉降的健康监测，结合工程的预应力锚索支护形式，

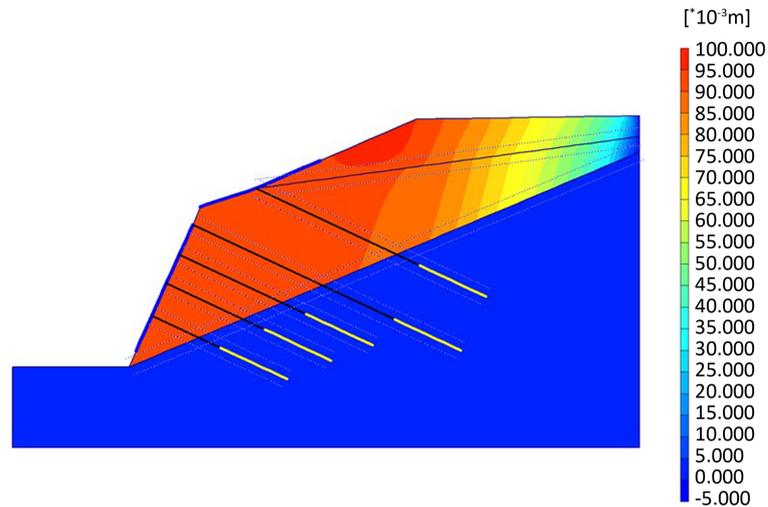


Figure 4. Failure surface contour of slopes after reinforcement
图 4. 加固后滑动面云图

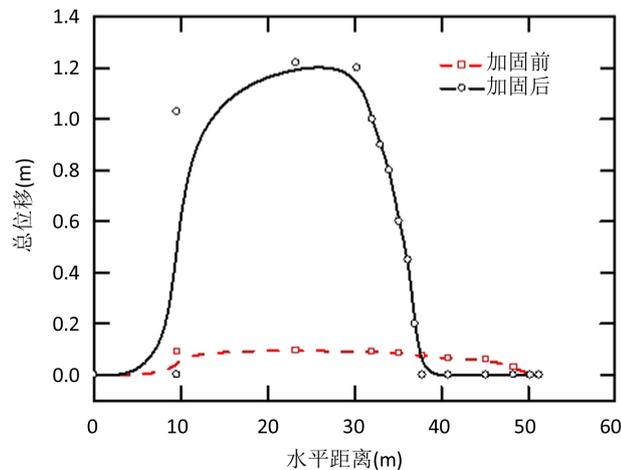


Figure 5. Displacements of slope surfaces before and after reinforcement
图 5. 加固前后坡面位移对比图

Table 3. Tensile forces in the anchors
表 3. 模型锚索拉力

锚索编号	1	2	3	4	5
拉力(kN/m)	278.9	231.1	352.2	446.3	626.3

Table 4. Analysis of monitoring data
表 4. 监测结果分析

监测内容	变化速率(mm/d)	累计变化值(mm)
深层土体	<3	<30
边坡	<3	<20
铁塔	<3	<20
坡顶房屋	<3	<20

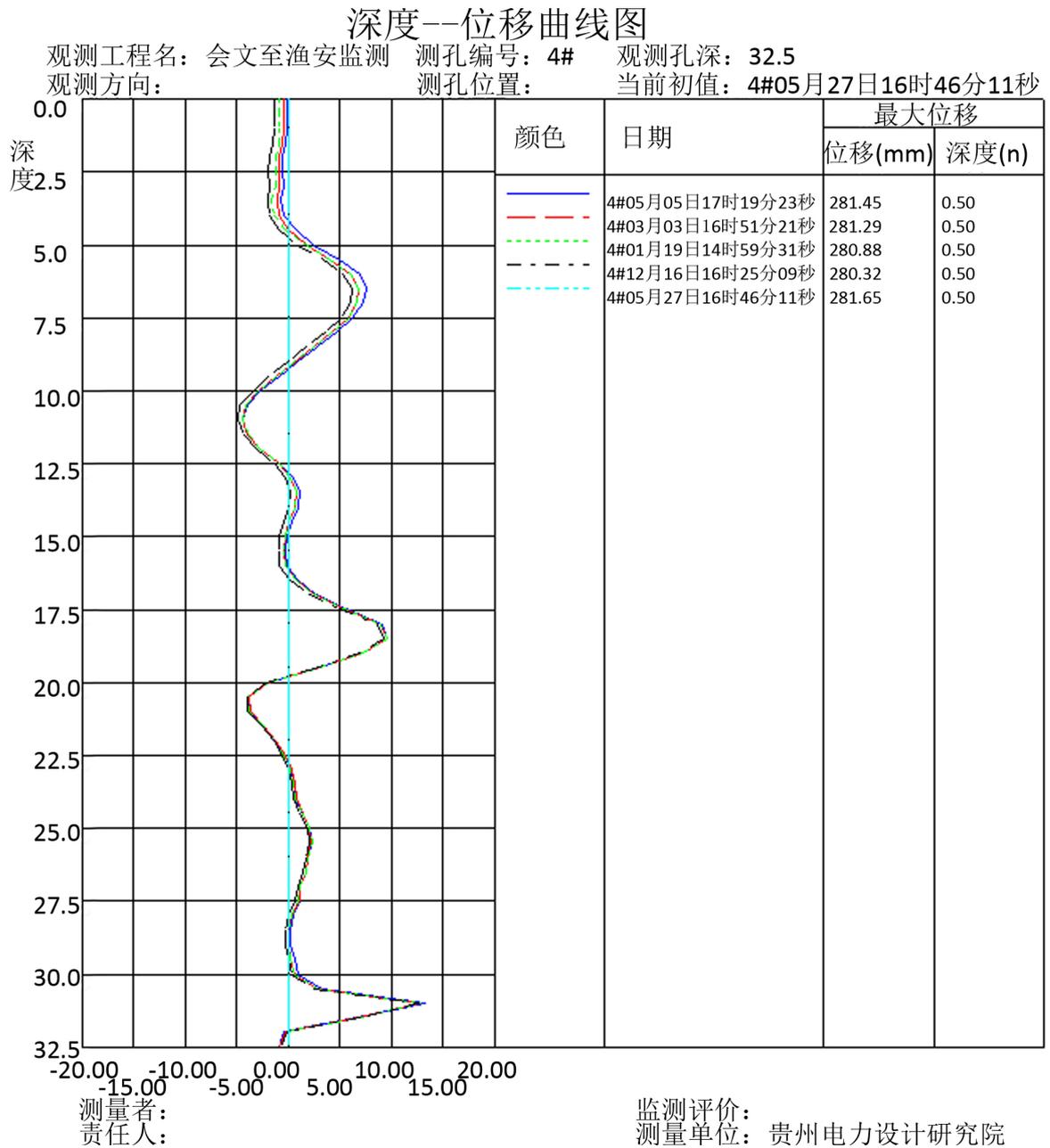


Figure 6. Depth-displacement curve of the monitoring points in the deep soil
图 6. 深层土体监测点深度 - 位移曲线

将传感器与锚索及格构梁安装在一起并埋置于设计位置，达到边坡监测的目地。由于边坡岩体表面与混凝土格构梁具有较好的粘结性能，且二者满足协调变形条件，故认为格构梁的节点位移可反映该处边坡对应坡面位置的位移。边坡监测的主要内容有：深层土体监测、铁塔监测、边坡监测、坡顶房屋监测。同时，混凝土格构梁的变形与受力均处于弹性限度范围内，边坡处于稳定状态，监测结果如下表所示。从表 4 以及图 6~图 9 可以看出，测斜管测出的边坡深层土体水平位移、坡面位移计测得的坡面位移、单点

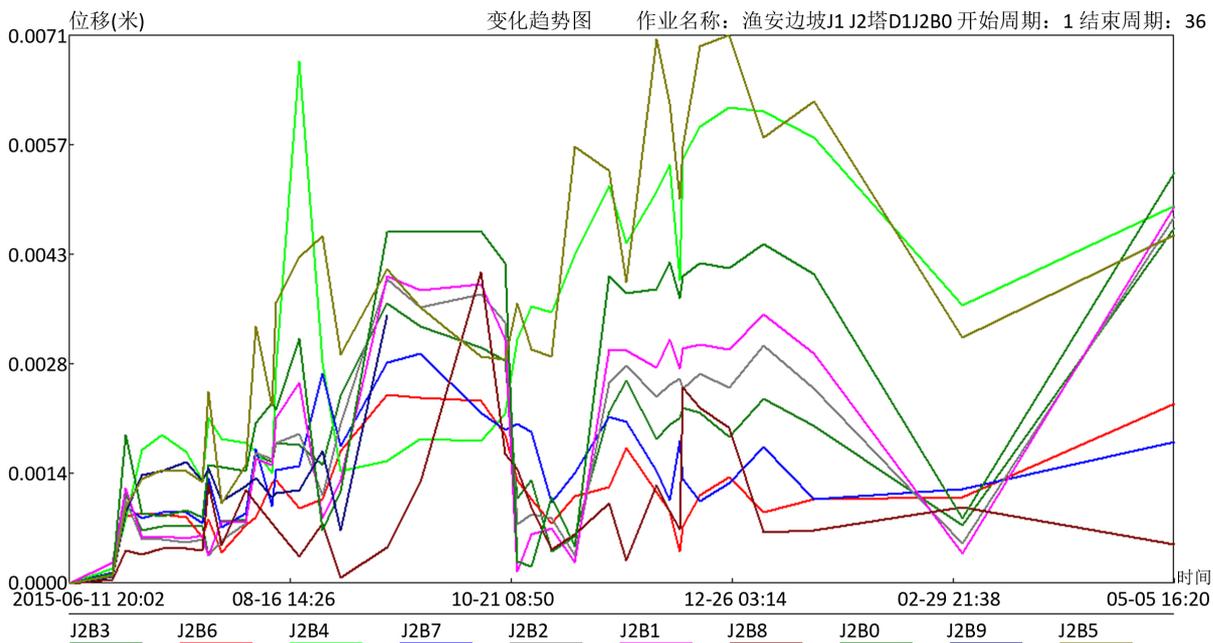


Figure 7. Displacements of the monitoring points on the slope surface
图 7. 坡面监测点位移

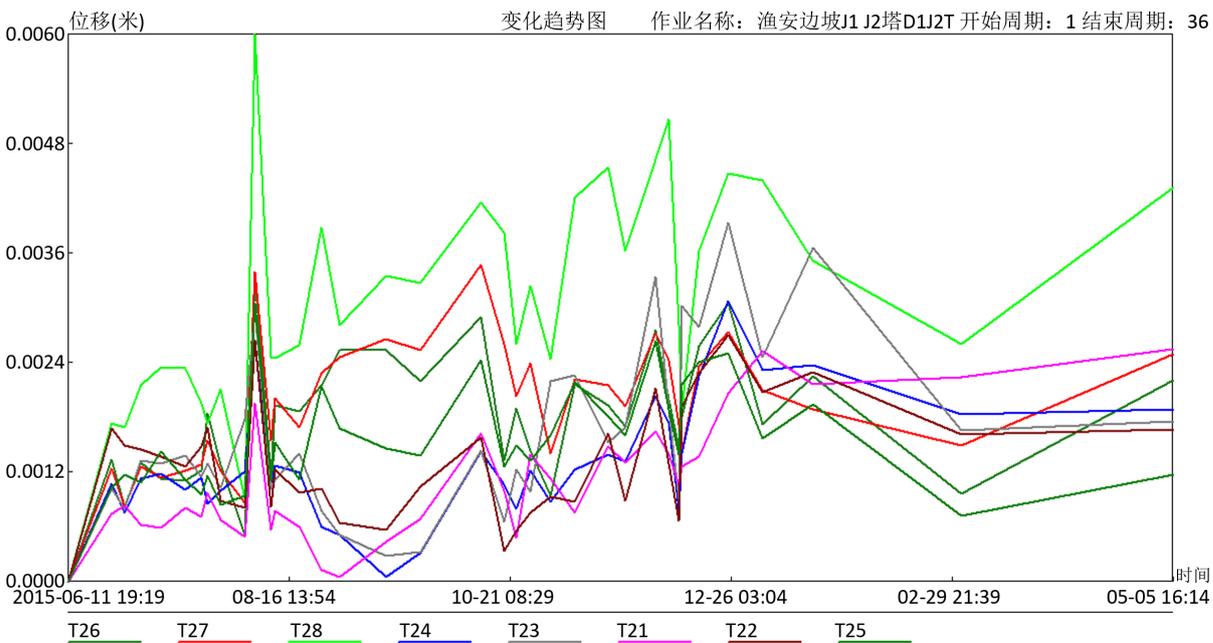


Figure 8. Settlements of monitoring points at the foundation of the towers on the top of the slope
图 8. 坡顶铁塔基础监测点位移

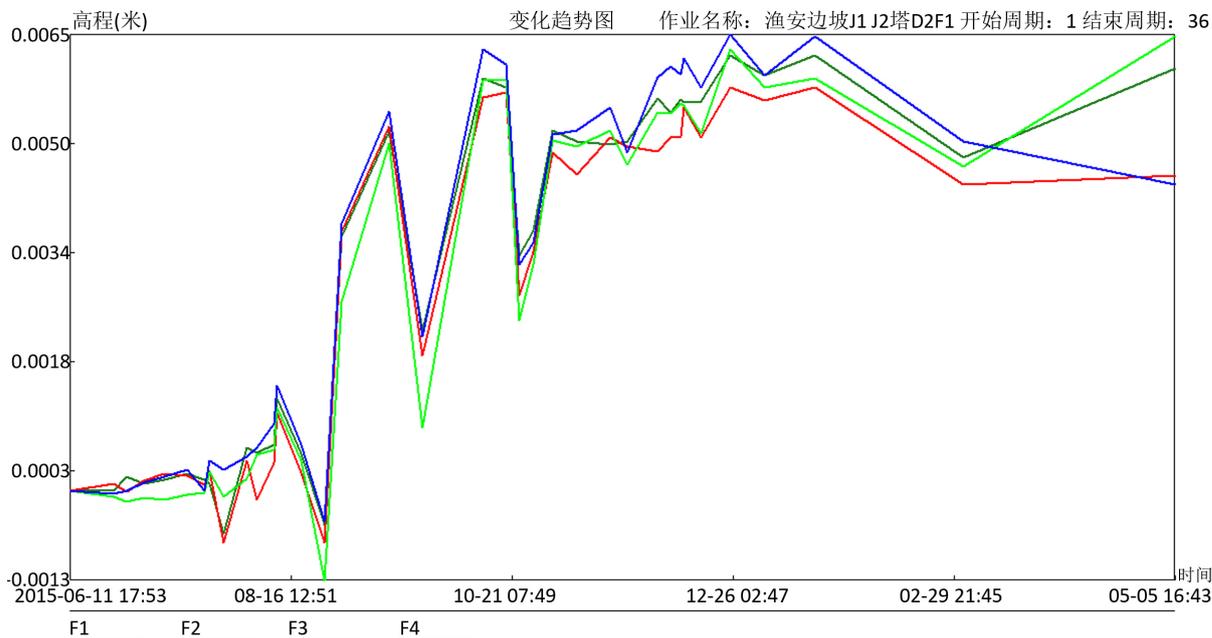


Figure 9. Settlements of monitoring points at the houses on the top of the slope

图 9. 坡顶房屋监测点沉降

沉降计测得的坡顶铁塔基础沉降和房屋沉降均较小, 说明边坡处于稳定状态。

5. 结论

预应力锚索加固技术通过将锚索穿过钻孔, 一端锚固在坚实土层中, 另一端进行预应力张拉, 达到加固边坡的效果, 可高效率、省材料的对不稳定或存在软弱夹层的边坡进行有效的支护。本文以贵阳会文变至渔安变 220 千伏线路铁塔边坡为依托工程, 采用极限平衡法和强度折减法对预应力锚索加固前后的边坡进行了稳定性计算分析, 计算结果表明, 有限元强度折减法和极限平衡理论得到的安全系数和滑动面较接近, 预应力锚索加固技术减小了边坡滑移的位移大小, 此时边坡滑动面向边坡内部移动, 能提高结构的安全性、稳定性, 边坡监测结果证实了预应力锚索的加固效果, 边坡深部土体、坡面、坡顶及坡顶建筑物的位移和沉降均在容许范围内, 表明边坡处于稳定状态。

基金项目

住房与城乡建设部研究开发项目(2015-K2-008)。

参考文献 (References)

- [1] 赵炼恒, 罗强, 李亮, 杨峰. 基于失稳状态耗能最小原理的预应力锚索加固边坡稳定性上限解析[J]. 岩土力学, 2013(2): 426-432.
- [2] 李宁, 张鹏, 于冲. 边坡预应力锚索加固的数值模拟方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(2): 254-261.
- [3] 郑颖人, 赵尚毅. 岩土工程极限分析有限元法及其应用[J]. 土木工程学报, 2005(1): 91-98, 104.
- [4] 邓东平, 李亮, 罗强. 预应力锚索加固土质边坡极限平衡稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2013(1): 53-60.
- [5] 王凯. 加筋边坡变形特性研究及稳定分析模块研发[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2016.
- [6] 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): 496-501.
- [7] 饶猛. 杭州某软弱土基坑工程重建稳定性及变形特性分析研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [8] 林兴超, 汪小刚, 陈文强, 王玉杰, 贾志欣, 赵宇飞, 刘立鹏. 边坡锚固与加固协调作用机制研究[J]. 岩石力学

与工程学报, 2014(S1): 3123-3128.

- [9] 陈国庆, 黄润秋, 石豫川, 许强. 基于动态和整体强度折减法的边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014(2): 243-256.
- [10] 宋飞, 谢永利, 杨晓华, 张鲁渝. 填土面作用荷载时土工格室柔性挡墙破坏模式研究[J]. 岩土工程学报, 2013(S1): 152-155.
- [11] 张发明, 刘汉龙, 赵维炳. 预应力锚索加固岩质边坡的设计实例[J]. 岩土力学, 2000(2): 177-179.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org