

# 类土质边坡预应力锚索框架梁底反力 现场测试研究

赵晓彦<sup>1,2</sup>, 蒋楚生<sup>1</sup>, 熊自英<sup>2</sup>

(1. 中国中铁二院工程集团有限责任公司 博士后科研工作站, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 结合汕(头)揭(阳)高速公路花岗岩风化类土质高边坡的预应力锚索框架加固工程, 采用梁底埋设土压盒的办法, 现场实测框架梁的梁底反力, 得出梁底反力沿梁长的分布规律。认为在一定锚固预应力作用下, 梁底反力沿梁长呈二次抛物线分布, 而直线及均匀分布。同时, 测试框架梁中纵向主筋所受的轴力表明, 钢筋轴力沿梁长的分布也为二次抛物线分布。梁底反力的非直线分布和非均匀分布, 表明框架梁在张拉及工作过程中发生变形, 而非完全刚性, 因此, 在考虑梁的变形情况下, 以梁的微分方程为基础, 计算纵梁的弯矩。计算结果表明, 纵梁的弯矩沿梁长的分布方程为三次抛物线, 与现场测试的梁底反力沿梁长的二次抛物线分布, 均符合梁的受力与变形特征, 说明测试结果的正确性。

**关键词:** 边坡工程; 类土质边坡; 预应力锚索; 梁底反力; 现场测试

**中图分类号:** P 642.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2008)增 2 - 3680 - 06

## FIELD TEST ON COUNTERFORCES AGAINST TENDON BEAM OF PRESTRESSED CABLE FRAME OF SOIL-LIKE SLOPES

ZHAO Xiaoyan<sup>1, 2</sup>, JIANG Chusheng<sup>1</sup>, XIONG Ziyang<sup>2</sup>

(1. Post-doctor's Scientific Research Work Station, China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** The counterforces applied under beams are tested on the site, which is carried out on a granite eluvium slope reinforced with prestressed cable beams along the expressway from Shantou to Jieyang. The data of the counterforces are obtained from the earth-pressure cells under the bottom of beams. It is put forward that under a definite prestressed force, the distribution discipline of the counterforce along the length of beam is quadratic parabola rather than linear or uniform one. The axial force of the main reinforcement in the beams is also tested at the same time, which leads to the conclusion that the distribution discipline along the length of a beam is also quadratic parabola. The distribution discipline obtained from the test confirms that the distortions of the beams are objective. Considering the distortions of the beams, the bending moment along the vertical beam is calculated based on differential equation of beams. The results indicate that the distribution discipline of bending moment along the length of beam is cubical parabola. Both the cubical parabola distribution of the bending moment and the quadratic parabola distribution of the counterforce are accord with the stress-strain and deformation of the beams.

**Key words:** slope engineering; soil-like slope; prestressed cable; beam bottom counterforce; field test

**收稿日期:** 2007 - 08 - 22; **修回日期:** 2008 - 02 - 25

**基金项目:** 国家自然科学基金(50278081); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金(GZ200702); 西交通大学希望之星项目; 西南交通大学希望之星资助项目

**作者简介:** 赵晓彦(1977 -), 男, 博士, 2005年毕业于西南交通大学地质工程专业, 现为副教授、在站博士后, 主要从事边坡稳定性分析及加固方面的教学与研究工作。E-mail: xyzhao2@swjtu.cn

## 1 引言

近年来, 锚索(杆)广泛应用于路堑边坡加固中, 锚索(杆)及框架锚索(杆)的应用获得了很大发展<sup>[1~6]</sup>。类土质边坡工程性质特殊<sup>[7, 8]</sup>, 适于采用预应力锚索框架进行加固<sup>[9]</sup>, 目前关于预应力锚索的锚固机制研究较多<sup>[10~13]</sup>, 但针对类土质边坡的研究较少, 而且对锚索框架结构中的框架梁的设计计算<sup>[14~17]</sup>, 多是按刚性梁或连续梁方法进行, 即假定梁为刚性, 没有考虑梁与类土质边坡土体的共同变形, 人为地假定梁底地基反力呈直线分布或均匀分布(见图 1, 不考虑梁自重)。实际上, 沿梁长不同位置处, 梁的变形量是不同的, 由此而引的梁底地基反力也不同, 而且实践证明, 其沿梁长的分布并非直线分布或均匀分布, 在框架地梁的设计计算中应考虑这种变化<sup>[18~20]</sup>。在框架梁内力计算过程中, 梁底反力(地基反力)的确定是一个关键, 它直接影响梁的受力状态, 从而对框架内力有着决定性的影响。

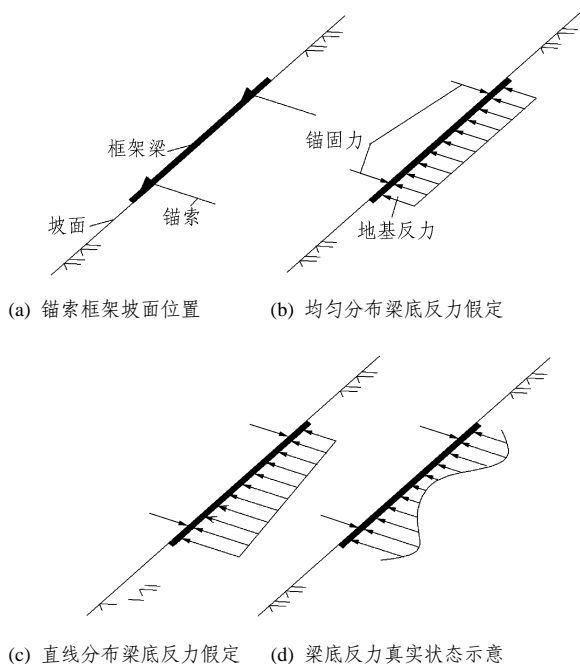


图 1 框架梁受力示意图

Fig.1 Force diagrams of beams

本文以此为出发点, 结合汕(头)揭(阳)高速公路 K53+760~K54+022 花岗岩风化形成的类土质高边坡预应力锚索框架加固工程, 对梁底反力的分布规律进行研究, 为框架梁的内力计算提供参考。

## 2 边坡工程概况

测试边坡地处剥蚀丘陵地带, 所在山坡自然坡度约为  $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 。刷方后, 边坡长 262 m, 坡高 84 m, 共分 9 级, 如图 2 所示。

第三级及第六级边坡采用预应力锚索框架加固, 锚固角为  $20^{\circ}$ 。一榀框架由 3 根横梁和 4 根纵梁构成, 纵梁及横梁间距均为 4 m, 纵、横梁交叉点处设锚索, 锚孔孔径 130 mm, 锚固段长 9 m, 设计吨位为 37 t, 梁横截面高度为 0.5 m、宽度为 0.4 m。施工时, 自设计坡面向坡体内预挖梁槽、槽底整平并安装好土压盒后, 将绑扎好的钢筋笼放入槽内后, 进行混凝土现浇, 施工完成后, 梁与边坡面平齐(见图 3)。

测试选择在第三级边坡上进行, 开挖后, 坡面为全风化花岗岩, 肉红色~黄白色, 厚 2~12 m。岩石剧烈风化呈粉质黏土状, 组织结构基本破坏, 但尚可辨认, 多呈中密状, 节理裂隙较发育, 具有较强的透水性, 夹较多直径不一的花岗岩风化硬核。

## 3 测试方法

通过在框架梁与坡面的接触面埋设土压力盒来进行梁底反力的测试。以监测框架梁所受反力的大小及其分布情况, 土压力盒量程为 0.1 MPa。分别埋设在一榀框架的一根纵梁和横梁下, 要求紧贴梁埋设, 受力面向下, 受力面下用细砂找平, 使压力盒与下部土体均匀接触, 以免土中小石块损伤土压力盒(如图 3 所示)。土压盒的布置如图 4(a)所示。框架梁内力测试采用在梁中钢筋上绑扎钢筋计的方式进行。选取一榀框架中的一根纵梁和横梁进行, 纵梁上的钢筋计绑扎在靠山侧钢筋中的中间两根钢筋上, 横梁上的钢筋计绑扎在靠山侧自上而下第三根钢筋上(每根纵梁及横梁中均配有 4 根主筋)。钢筋计的埋设位置如图 4(b)所示。

本次试验边坡(第三级边坡)预应力锚索于 2006 年 9 月 12 日张拉锁定, 单孔锁定吨位为 37 t。土压力盒及钢筋计自次日开始读数, 到 2007 年 3 月 27 日, 共读数 19 次。

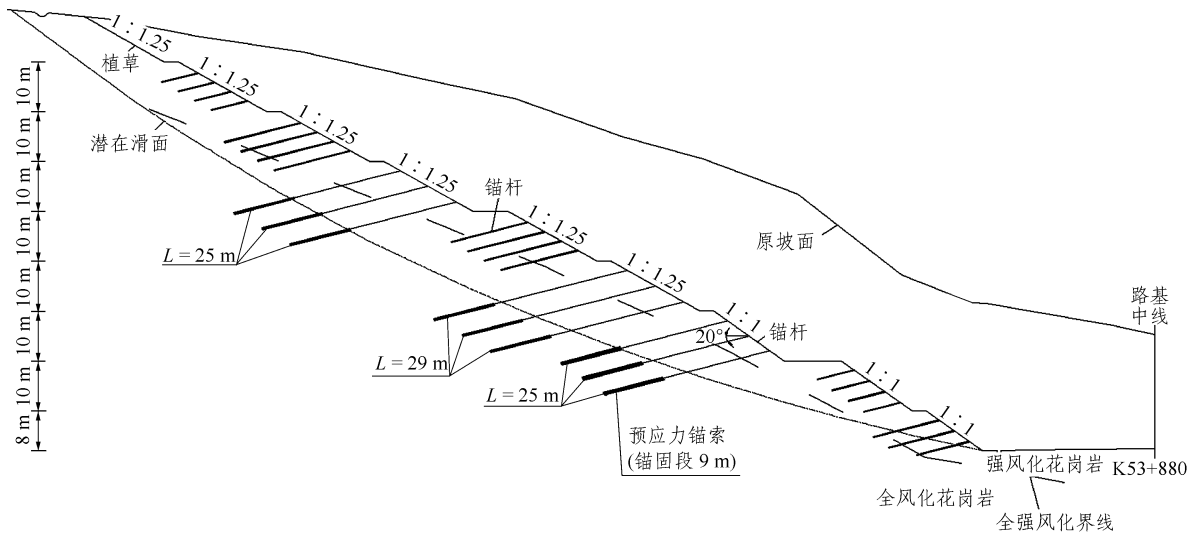


图2 边坡概况及加固设计图  
Fig.2 General situation of slope and reinforcement design

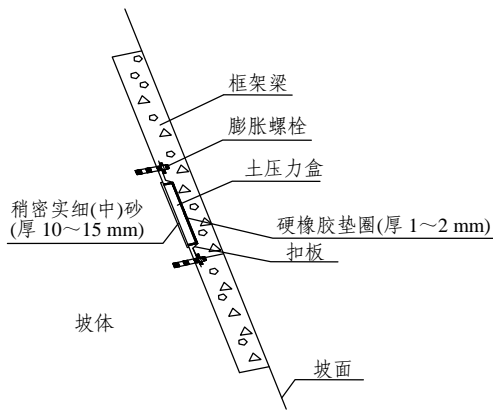
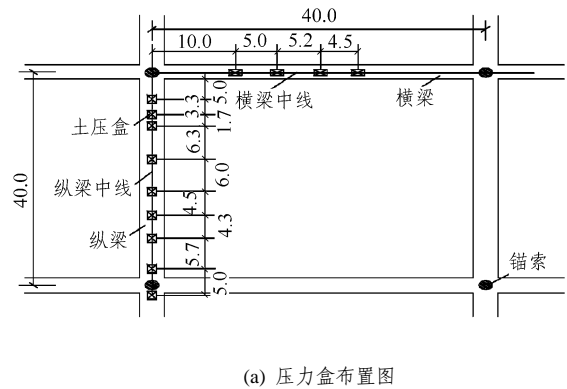
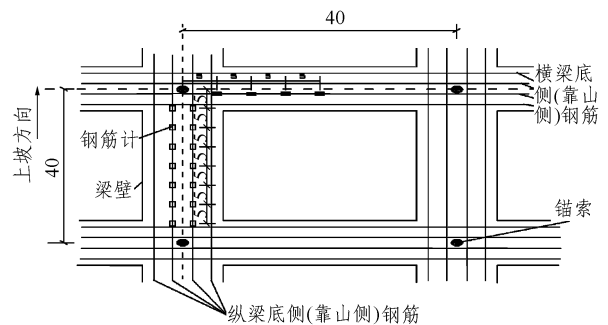


图3 土压盒埋设方法示意图  
Fig.3 Sketch of the laying of earth-pressure cells



(a) 压力盒布置图



(b) 钢筋计布置图

图4 现场测试中土压盒及钢筋计布置图(单位: cm)  
Fig.4 Locations of the earth-pressure cells and rebar stress meters in the site testing(unit: cm)

## 4 测试结果分析

### 4.1 梁底反力测试结果

实测结果表明, 每次读数所反映的梁底反力沿梁长的分布形式相同, 见表1。图5, 6为根据表1中的数据作出的梁底反力沿梁长的分布图, 图中没有数据标志的粗实线为2007年1月26日所测数据的拟合曲线, 同时在图中给出其拟合方程。

### 4.2 框架梁钢筋轴力测试结果

图7, 8为依据实测数据(为上述两根纵筋所测数据的平均值)绘出的钢筋轴力沿梁长的分布曲线, 图中无数据标志的粗实线为2007年1月26日所测数据的拟合曲线。

### 4.3 结果分析

(1) 梁底反力分布情况符合 Winkler 假定  
将边坡坡体视为弹性地基, 则梁底反力(坡面反力) $p$ 与框架垂直于坡面的位移 $z$ 成正比, 即

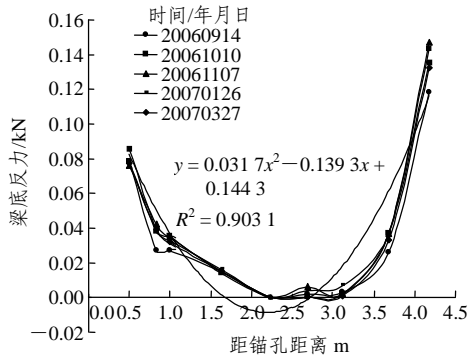


图 5 纵梁梁底反力沿梁长的分布

Fig.5 Distribution of the vertical beam bottom counterforces along the beam length

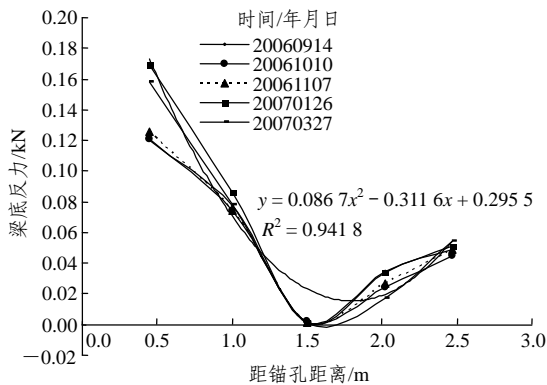


图 6 横梁梁底反力沿梁长的分布

Fig.6 Distribution of the horizontal beam bottom counterforces along the beam length

表 1 梁底反力实测数据

Table 1 Measured data of beam bottom counterforces kN

名称	距锚孔距离/m	梁底反力				
		20060914	20061010	20061107	20070126	20070327
纵梁	0.50	0.078	0.078	0.076	0.086	0.077
	0.83	0.027	0.038	0.042	0.039	0.039
	1.00	0.027	0.035	0.035	0.033	0.032
	1.63	0.015	0.014	0.015	0.016	0.015
	2.23	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	2.68	0.002	0.000	0.006	0.004	0.000
	3.11	0.003	0.002	0.002	0.007	0.001
	3.68	0.026	0.037	0.037	0.037	0.033
	4.18	0.118	0.143	0.147	0.135	0.132
横梁	0.45	0.120	0.121	0.126	0.169	0.158
	1.00	0.077	0.074	0.074	0.086	0.078
	1.50	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001
	2.02	0.035	0.024	0.027	0.034	0.017
	2.47	0.049	0.045	0.049	0.051	0.054

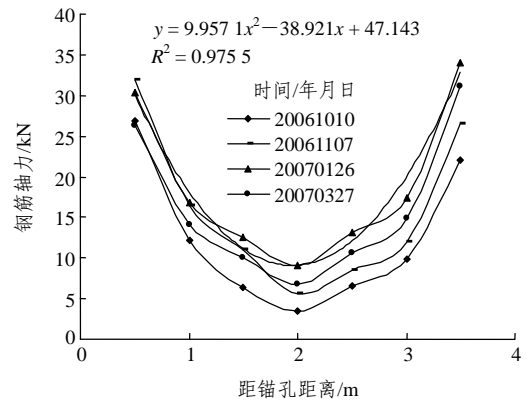


图 7 纵梁钢筋轴力沿梁长的分布

Fig.7 Distribution of the axial forces of the vertical main steel along the beam length

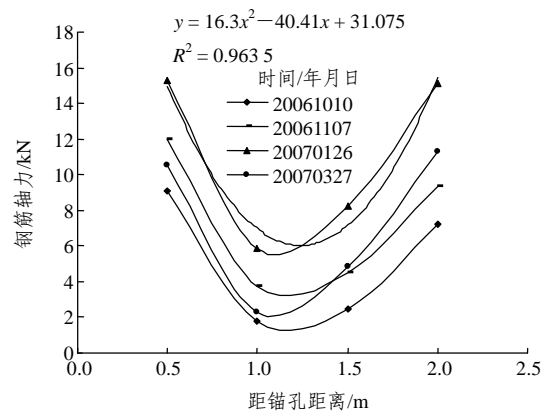


图 8 横梁钢筋轴力沿梁长的分布

Fig.8 Distribution of the axial forces of the horizontal main steel along the beam length

$$p = kz \tag{1}$$

式中： $k$ 为岩土反力系数。应注意的是，该公式计算的反力单位为kPa，而实测的反力单位为kN。

由图 5, 6 可知，纵梁及横梁梁底反力自锚孔部位向中间逐渐减小，这是因为锚孔部位梁受预应力作用，必然向坡里产生位移，而越远离锚孔部位，这种位移就会越小。这正符合 Winkler 关于弹性地基梁梁底反力(坡面反力)的假定。

(2) 梁底反力沿梁长呈二次抛物线分布

图 5, 6 中给出了 2007 年 1 月 26 日所测梁底反力数据的拟合曲线，由图可知，拟合曲线为二次抛物线，拟合曲线与真实数据间的离差平方和均在 0.9 以上。图 7, 8 中给出了梁中钢筋轴力的拟合曲线，同样也为二次抛物线，若取梁为研究对象，则其上只有梁底反力为分布外力(预应力为集中外力)，钢筋轴力的分布形式也强有力地说明了梁底反力为二次抛物线分布的合理性。

上述结果表明，框架梁并非刚性的，要产生弯曲变形，以此为基础，由材料力学理论可知，梁变形的微分方程为

$$EI \frac{d^4 z_x}{dx^4} + Bkz_x = q(x) \quad (2)$$

式中： $q(x)$ 为作用于梁上的主动分布外力， $E$ 为梁的弹性模量， $I$ 为梁的横截面惯性矩， $z_x$ 为梁垂直坡面的位移， $B$ 为梁宽。显然，本次试验中， $q(x)=0$ ，于是式(2)变为

$$EI \frac{d^4 z_x}{dx^4} + Bkz_x = 0 \quad (3)$$

求解式(3)<sup>[9, 19]</sup>并利用表2数据，可得梁的理论计算弯矩。图9中给出了纵梁理论计算弯矩、实测弯矩的拟合曲线和拟合方程，由图可知，弯矩为沿梁长的三次抛物线分布。如上所述，实测出的梁底反力为沿梁长的二次抛物线分布，由集中力(本次实测中测出的是各点的集中力)与弯矩的关系可知，弯矩分布方程理应比集中力分布方程高一次，所以，实测的梁底反力分布曲线是符合实际的，分析得出的分布规律也较为正确。

表2 框架梁弯矩理论计算相关参数

Table 2 Calculation parameters of bending-moments of the beams

边坡坡角 $\alpha(^{\circ})$	锚固角 $\theta(^{\circ})$	混凝土弹性模量 $E/\text{MPa}$	土体反力系数 $K/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$	梁惯性矩 $I/\text{m}^4$	预应力 $T/\text{kN}$
45	20	$3 \times 10^4$	20	0.004 2	370

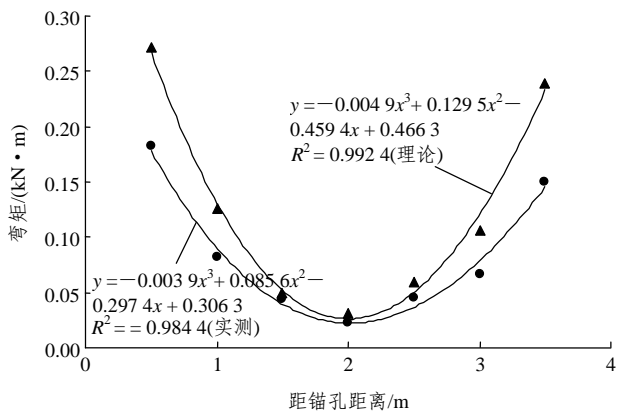


图9 纵梁计算及实测弯矩

Fig.9 Calculated and measured bending-moments of vertical beam

## 5 结论

(1) 通过对实测数据分析，认为梁底反力沿梁

长的分布为二次抛物线分布，而并非直线分布或均匀分布，为框架梁内力计算的进一步研究打下基础。

(2) 梁弯矩沿梁长的分布为三次抛物线分布。

本文以梁的变形为基础，计算纵梁的弯矩，并和实测弯矩进行比较，二者结果较为一致，均反映出梁弯矩沿梁长的分布为三次抛物线分布。从而验证了梁底反力沿梁长分布为二次分布的结论的正确性。

## 参考文献(References):

[1] 邹金锋, 李亮, 杨小礼, 等. 基于非线性 Mohr-Coulomb 强度准则下锚索极限抗拔力研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 107 - 111.(ZOU Jinfeng, LI Liang, YANG Xiaoli, et al. Study on the ultimate pullout force of prestressed cable based on nonlinear Mohr-Coulomb failure criterion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 107 - 111.(in Chinese))

[2] 蒋楚生, 周德培, 周应华. 预应力地梁锚索改善边坡受力状态的理论分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 974 - 976.(JIANG Chusheng, ZHOU Depei, ZHOU Yinghua. Theoretical analysis of stress state improvement in a slope with the prestressed cable-anchor beam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 974 - 976.(in Chinese))

[3] 吕庆. 边坡工程灾害防治技术研究[博士学位论文][D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 117 - 137.(LU Qing. Study on prevention and treatment technology of slope engineering disasters[Ph. D. Thesis][D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006: 117 - 137.(in Chinese))

[4] 朱晗迺, 孙红月, 汪会帮, 等. 边坡加固锚索预应力变化规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2 756 - 2 760.(ZHU Hanyu, SUN Hongyue, WANG Huibang, et al. Analysis of prestress state of cable applied to rock slope reinforcement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2 756 - 2 760.(in Chinese))

[5] 李林, 李锁平. 朱矿东山头滑坡体锚固优化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1 375 - 1 377.(LI Lin, LI Suoping. Study on optimal bolting of east hill landslide in Zhujiabao mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1 375 - 1 377.(in Chinese))

[6] 余桂红. 高速公路边坡防治锚索与地梁施工技术[J]. 西部探矿工程, 2001, (4): 128 - 219.(YU Guihong. Construction technique of the anchor-cable and foundation beams for the control of slopes in highways[J]. West-China Exploration Engineering, 2001, (4): 128 -

- 219.(in Chinese))
- [7] 赵晓彦, 胡厚田, 时延兵. 类土质边坡研究初探[J]. 工程地质学报, 2005, 13(1): 1 - 4.(ZHAO Xiaoyan, HU Houtian, SHI Yanbing. Preliminary study on a soil-like slope[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(1): 1 - 4.(in Chinese))
- [8] 赵晓彦, 胡厚田, 庞烈鑫, 等. 类土质边坡开挖的卸荷作用及卸荷带宽度的确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 25(4): 708 - 712.(ZHAO Xiaoyan, HU Houtian, PANG Liexin, et al. Study on unloading effect and width of unloading zones in excavating of soil-like material slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 708 - 712.(in Chinese))
- [9] 赵晓彦. 类土质边坡特性及其锚固设计理论研究[博士学位论文][D]. 成都: 西南交通大学, 2005.(ZHAO Xiaoyan. Study on characteristic and anchor designing theory of soil-like slope[P. D. Thesis][D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.(in Chinese))
- [10] 丁秀美, 黄润秋, 臧亚君. 预应力锚索框架作用下附加应力的 FLAC<sup>3D</sup> 模拟[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2003, 30(4): 339 - 345.(DING Xiumei, HUANG Runqiu, ZANG Yajun. Three-dimensional simulation with FLAC<sup>3D</sup> on the subsidiary stress induced by frame beam with prestress cable[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science and Technology), 2003, 30(4): 339 - 345.(in Chinese))
- [11] 吕庆, 孙红月, 尚岳全, 等. 预应力锚固作用下破碎岩质边坡表层压缩效应[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(12): 2168 - 2173.(LU Qing, SUN Hongyue, SHANG Yuequan, et al. Surface compress effects of crush rock slope under prestressed cables anchorage forces[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2006, 40(12): 2168 - 2173.(in Chinese))
- [12] WIJK G. A theoretical remark on the stress field round prestressed rock bolts[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1978, 15(6): 289 - 294.
- [13] 刘小丽, 张占民, 邓建辉. 边坡加固中预应力锚索框架地梁的杆系有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 25(7): 1027 - 1031.(LIU Xiaoli, ZHANG Zhanmin, DENG Jianhui. Pole system FEM analysis for frame foundation beam with prestressed anchor-cable used in reinforced slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(7): 1027 - 1031.(in Chinese))
- [14] 赵晓彦, 胡厚田. 岩锚解耦测试及其边坡稳定性计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1658 - 1663.(ZHAO Xiaoyan, HU Houtian. Test of decoupling between rock mass and anchors for slope and its stability calculation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1658 - 1663.(in Chinese))
- [15] YIN J H. Closed-form solution for reinforced timoshenko beam on elastic foundation[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(8): 868 - 874.
- [16] GENDY A S. Effective modeling of beams with shear deformations on elastic foundation[J]. Structural Engineering and Mechanics, 1999, 8(6): 607 - 622.
- [17] 李德芳, 张友良, 陈从新. 边坡加固中预应力锚索地梁内力计算[J]. 岩土力学, 2000, 21(2): 170 - 172.(LI Defang, ZHANG Youliang, CHEN Congxin. Design of prestressed-cable sommer for slope-reinforcing engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(2): 170 - 172.(in Chinese))
- [18] 肖世国, 周德培. 岩石高边坡预应力锚索地梁的一种内力计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 250 - 253.(XIAO Shiguo, ZHOU Depei. Internal force calculation method of prestressed-cable beam-on-foundation for high slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 250 - 253.(in Chinese))
- [19] 杨明, 胡厚田, 卢才金, 等. 路堑土质边坡加固中预应力锚索框架的内力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1383 - 1386.(YANG Ming, HU Houtian, LU Caijin, et al. Calculation of internal forces for prestressed anchor cable frame used in reinforced road cut soil slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1383 - 1386.(in Chinese))
- [20] 朱宝龙, 杨明, 胡厚田, 等. 土质边坡加固中预应力锚索框架内力分布的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 697 - 702.(ZHU Baolong, YANG Ming, HU Houtian, et al. Testing study on internal forces for prestressed anchor cable frame in reinforced soil slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(4): 697 - 702.(in Chinese))