

土质边坡加固中预应力锚索框架内力分布的试验研究

朱宝龙¹, 杨明², 胡厚田¹, 陈强¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. University of Illinois at Chicago, Chicago 60607 美国)

摘要: 利用现场试验方法, 研究了土质边坡加固中预应力锚索框架的内力分布规律, 以指导锚索框架工程的设计; 得出了同一等级锚固力作用下框架的内力分布规律与不同等级锚固力作用下框架的内力变化特征, 以及锚索力在框架纵横梁之间的分配特点; 同时验证了锚索框架内力的 Winkler 弹性地基梁计算模式。

关键词: 岩土力学; 预应力锚索框架; 内力; 现场试验; 土质边坡

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)04-0697-06

TESTING STUDY ON INTERNAL FORCES FOR PRESTRESSED ANCHOR CABLE FRAME IN REINFORCED SOIL SLOPE

ZHU Bao-long¹, YANG Ming², HU Hou-tian¹, CHEN Qiang¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. University of Illinois at Chicago, Chicago 60607, USA)

Abstract: Based on the field test, the distribution law of internal forces of prestressed anchor cable frame used in soil slope is studied. The law of internal forces under the same grade of anchor forces, the change of internal forces under the various grades of anchor forces, and the distribution of anchor forces in horizontal beams and vertical beams of frame, are proposed. The results show that the maximum positive moment appears at anchoring spot, and the minimum negative moment appears at the middle of the beam. In addition, due to the increase of anchor forces, the moment is linearly increasing. The calculation of internal forces for prestressed anchor cable frame is validated.

Key words: rock and soil mechanics; prestressed anchor cable frame; internal force; field test; soil slope

1 引言

近年来, 预应力锚索框架(地基梁)技术^[1]开始大量用于加固路堑土质边坡中, 它是通过钢筋混凝土框架将锚索巨大的锚固力传递给坡体, 改变坡体应力状态, 调用坡体自稳能力的一种主动加固方法。它安全稳定、轻巧美观, 综合造价及社会经济效益

明显优于传统的重型支挡结构。目前, 预应力锚索的锚固机理的研究成果较多^[2-7], 但预应力锚索框架(地梁)作为一种新型的支挡结构形式, 其使用大多是基于经验, 对其作用机理还缺乏研究。现有内力计算方法主要有倒梁法^[8]、矩阵法^[9], 或者按一般建筑地基方法^[10-13]计算, 进而又发展以 Winkler 弹性地基梁^[14, 15]方法来计算其内力。但这些计算方法的合理性及锚索框架在施加预应力以后, 内力的情

收稿日期: 2003-09-02; 修回日期: 2003-11-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50278081)

作者简介: 朱宝龙(1976-), 男, 1998年毕业于原西安矿业学院水文地质与工程地质专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土体稳定性分析与加固方面的研究工作。E-mail: zhuble@yeah.net。

况变化及其竖肋与横梁(如图 1)中的内力分配等问题,均需通过现场试验加以验证。本文即是通过现场测试的方法研究了花岗岩残积土边坡加固中预应力锚索框架内力的分布状况。

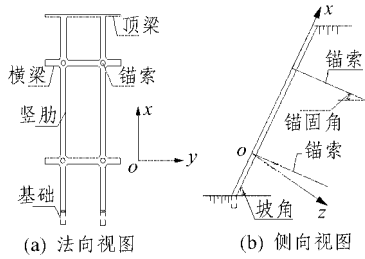


图 1 锚索框架

Fig.1 Anchor cable frame

2 试验设计

2.1 试验方法

试验的基本思路是,通过在框架(地基梁)内部钢筋和外表混凝土上粘贴常温电阻应变片测试相应部位的应变,然后反算框架(地梁)的内力。试验分 4 次进行,即以工作框架测试剪力分布情况;以破坏框架及 2 根地基梁来测试弯矩分布,应变片布置如图 2 所示。由于加载设备数量有限,因此采用逐个锚孔分级循环加载,自锁式锚具在加载完成后立即锁定该级荷载,每加载完一个循环测读一次数据。YJ-26 型静态电阻应变仪以半桥方式连接,再串联 5 台 P10R-18 型预调平衡箱来连接应变片,最后测读数据。测出的数据为相应部位的应变值,需换算

成应力值。

2.2 试验场地及设备

试验场地均属于花岗岩残积土边坡,呈褐黄、灰白、褐灰等不同颜色,土体饱水性能良好。为了能提供足够的锚固力,锚索采用 $\phi 15.24$ 低松弛预应力高强度钢绞线,每孔 7 根锚索,锚索全长 20 m,锚固段劈裂灌浆 10 m。

试验加载设备采用 YCJ150 型千斤顶和 ZB4-500 型电动油泵;锚具为 OVM 自锁式锚具,即在每一次加载完成后自动锁定该级荷载。数据采集设备为国产 YJ-26 型静态电阻应变仪、P10R-18 型预调平衡箱和美国产 GK403 数据采集仪。

2.3 试件制备

考虑到实际工作中框架(地基梁)的顶梁和基础对锚固力的传递影响不大,为方便起见,本次试验构件不设顶梁和基础。根据试验要求,测试对象为 1 片工作框架(原设计框架)、1 片破坏框架和 2 根地梁,后三者较工作构件减小了截面积和配筋量。在构件浇筑之前,预先在钢筋上相应位置粘贴应变片。具体试验参数见表 1。

3 试验现象及结果

最先测试 1# 框架,该框架是按倒梁法设计的工作框架,配筋偏于保守,设计荷载为 600 kN,为避免各种原因造成的锚固力损失,超张拉 50 kN。在加载过程中,框架基本保持弹性工作,混凝土并没产生开裂,这使得通过实测主筋、箍筋和混凝土的应变换算框架截面弯矩的设想没有实现。

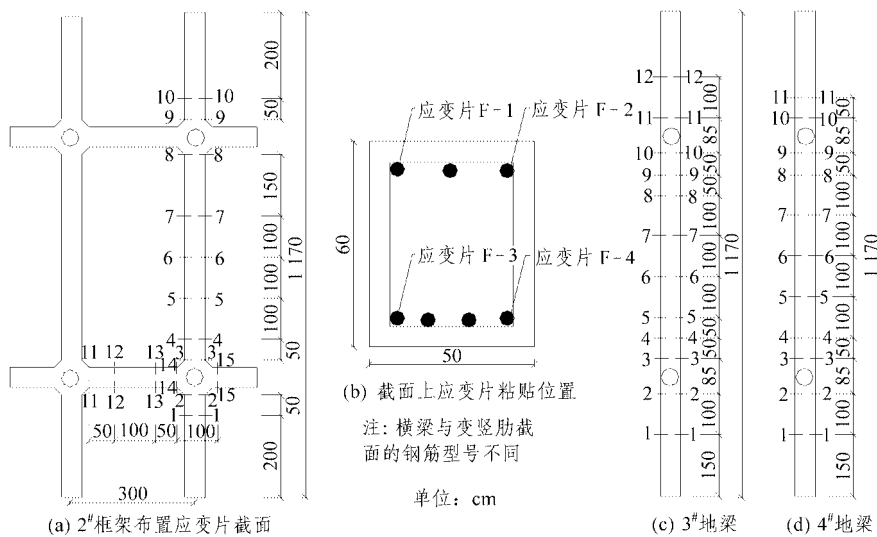


图 2 试件应变片布置示意图

Fig.2 Layout of strain gauge

表 1 试验相关参数

Table 1 Relevant parameters of test

编号	试件类型	边坡坡角 $\alpha / (^\circ)$	锚固角 $\beta / (^\circ)$	试件规格			锚索间距/m	
				截面尺寸/m×m	竖肋长度/m	横梁长度/m	竖向	横向
1 [#]	框架	40	20	0.5×0.6	16.0	6.0	8.0	3.0
2 [#]	框架	35	30	0.4×0.5	11.7	6.0	5.85	3.0
3 [#]	地梁	35	30	0.4×0.5	11.7	—	5.85	—
4 [#]	地梁	35	30	0.4×0.5	11.7	—	5.85	—

对于 2[#]框架，较 1[#]框架减小了截面面积及配筋量。当加载接近 800 kN 时，坡体内部传出清脆的拉断声，站在坡上的人能感觉到震动，紧接着油泵无法加压，锚索被拉出，试验无法继续进行，前面的声音被判断为浆体破坏声。但在此前的加载过程中，钢筋应变基本保持线性增长，无异常迹象。

对 3[#]地基梁，随着荷载的逐级增加，从应变的增长情况可以看出，接近梁的中间部位受负弯矩的影响越来越明显。当加载到 800 kN 时，6[#]、7[#]截面的面筋应变接近屈服值，当继续加载到 900 kN 时，已呈塑性变形状态，实际上 900 kN 之前地梁已破坏。

4[#]地基梁情况类似 3[#]地基梁，只是加载到 800 kN 时从应变上观察 6[#]截面上面筋就已呈现塑性状态，可以认为 800 kN 之前地梁已破坏。再继续往上加载时，出现拉断声，判断为预应力钢绞线或节点处加强钢筋被锚垫板割断发出的声音。

试验中通过应变片得到了在各级锚索力作用下的各截面的应变值。图 3 所示为 3[#]地梁 2[#]、6[#]截面在各级加载作用下的应变值，需换算成应力值与弯矩值。

(2) 试验数据的换算

假定钢筋应力-应变关系服从理想弹性材料应

力-应变关系，混凝土为非均匀受压应力-应变关系。据文[16]，可将测出的钢筋和混凝土的应变值换算成应力值。由于构件采用双筋设计，有 $x < 2a'_s$ (其中， x 为极限状态法设计中等效矩形的受压区高度， a'_s 为受压区边缘到钢筋中心的距离)，按等效矩形应力分布图计算，可用下式求截面弯矩值：

$$M = \sigma_s A_s (h_0 - a'_s) \tag{1}$$

式中： σ_s 为钢筋的应力， A_s 为受拉钢筋截面积， h_0 为受拉钢筋中心到受压区边缘的距离。换算结果见表 2~4。

4 试验结果分析

4.1 同一级锚固力作用下框架的内力分布规律

无论从理论上分析还是在实际工作中，框架都不会发生剪切破坏，因此只讨论框架的弯矩分布情况。图 4 为在 500 kN 锚索力作用下 2[#]框架的弯矩分布。从表 2~4 及图 4 可以看出，在锚索作用点位置附近存在着最大正弯矩，在相邻锚索作用点的中间位置有最大负弯矩产生。在试验加载范围内，最大正弯矩在数值上是最大负弯矩绝对值的 1.6~2.0 倍。梁的其他部位的弯矩值介于最大正弯矩与最大

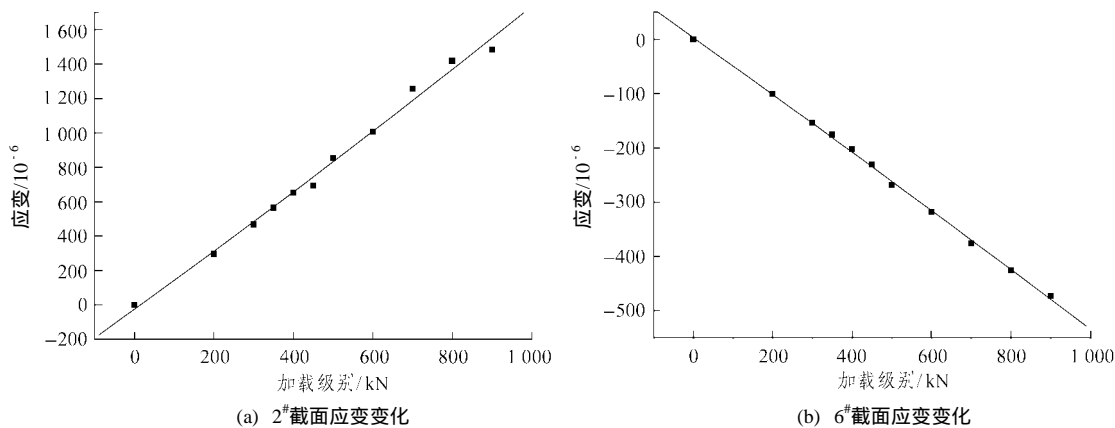


图 3 3[#]地梁截面应变变化曲线

Fig.3 Curves of strain on 3[#] frame

表 2 换算后的 2[#]框架截面弯矩

Table 2 Section moment of beam No.2 after conversion

kN · m

加载级 别/kN	截面编号														
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]	9 [#]	10 [#]	11 [#]	12 [#]	13 [#]	14 [#]	15 [#]
300	23.88	41.20	39.25	14.33	- 17.69	- 27.43	- 19.27	35.22	44.77	26.11	24.16	16.04	14.23	28.27	24.31
500	38.35	72.37	65.36	23.73	- 29.51	- 45.63	- 31.37	58.35	74.46	43.57	40.30	28.75	25.40	45.84	40.59
800	61.68	110.3	104.50	38.05	- 48.21	- 73.13	- 41.47	97.59	119.2	69.54	61.60	39.54	43.26	70.48	64.99

表 3 换算后的 3[#]地梁截面弯矩

Table 3 Section moment of beam No.3 after conversion

kN · m

加载级别/kN	截面编号											
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]	9 [#]	10 [#]	11 [#]	12 [#]
200	14.30	44.17	41.63	15.52	- 4.87	- 20.13	- 25.43	- 4.80	16.71	38.50	47.50	14.75
300	22.10	69.69	63.21	21.94	- 7.45	- 29.65	- 38.54	- 6.30	24.77	58.35	75.35	21.80
350	24.84	84.28	73.76	27.16	- 8.52	- 38.47	- 46.13	- 8.02	24.25	75.61	87.31	27.30
400	28.77	97.49	83.32	27.46	- 9.47	- 48.28	- 55.44	- 10.10	32.08	86.27	93.20	29.62
450	33.42	103.70	97.12	34.92	- 10.96	- 57.09	- 63.11	- 10.88	36.56	91.54	106.58	32.89
500	35.56	120.80	105.80	38.80	- 12.18	- 67.90	- 69.27	- 11.46	39.69	101.71	123.23	33.45
600	43.43	150.27	127.16	46.57	- 14.61	- 84.31	- 81.37	- 15.11	43.28	129.33	147.26	44.26
700	51.25	187.58	142.62	54.32	- 17.05	- 94.98	- 90.11	- 17.62	56.26	155.05	169.47	52.34
800	58.55	211.60	169.49	62.08	- 19.48	- 107.59	- 105.60	- 18.19	65.21	180.86	191.20	57.60
900	63.84	221.37	192.24	69.84	- 21.92	- 111.00	- 111.00	- 22.28	72.08	187.31	217.24	64.40

表 4 换算后的 4[#]地梁截面弯矩

Table 4 Section moment of beam No.4 after conversion

kN · m

加载级别 /kN	截面编号										
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]	9 [#]	10 [#]	11 [#]
300	21.64	73.12	64.02	22.09	- 29.01	- 44.20	- 31.05	24.32	60.29	72.84	42.53
500	35.96	123.56	101.77	36.71	- 48.24	- 74.67	- 45.41	39.54	107.89	119.83	71.03
700	50.29	161.61	149.52	51.18	- 67.69	- 104.47	- 64.47	54.47	143.56	173.55	99.53
800	57.60	185.79	163.25	64.32	- 77.29	- 119.08	- 76.50	61.18	170.86	194.44	113.71

负弯矩之间。并且，弯矩值随梁的长度的不同而有较大变化，梁越长，变形对弯矩的影响越大，即越易出现负弯矩。实测弯矩分布与 Winkler 弹性地基梁法^[14]算出的结果基本一致，但实测值要小于理论值，这是由于弹性地基梁法没有考虑实际工作状态中梁底与坡面间的巨大摩擦力作用^[17]，该摩擦力可能减小框架的弯矩；循环加载过程中拆卸千斤顶时油泵油压的释放可能会引起锚索力的损失以及岩土的基础反力系数选取的差异性，也会导致弯矩的减小。

4.2 不同等级锚固力作用下框架内力的变化规律

拟合出的 3[#]地梁 2[#]，6[#]截面的弯矩变化曲线如图 5 所示，2[#]截面的曲线呈上凹型，受负弯矩作用的 6[#]截面的曲线呈上凸型。从表 2~4 及图 5 可以看出，随着锚索力的逐渐增大，弯矩值也相应增大，且弯矩的增长幅度越来越大，在最大正弯矩与最大负弯矩处表现尤为明显。同时，弯矩的增大幅度也与相邻两级加载之间增加值的大小有关，增加值越大，弯矩的增幅越大；反之，则越小。由于加载级别在 300~500 kN 之间的各级间增加值为 50 kN，较加载级别增加值为 100 kN 的弯矩增幅要小，所以在图 5 中表现出此处数据点较为密集；由此，图 5

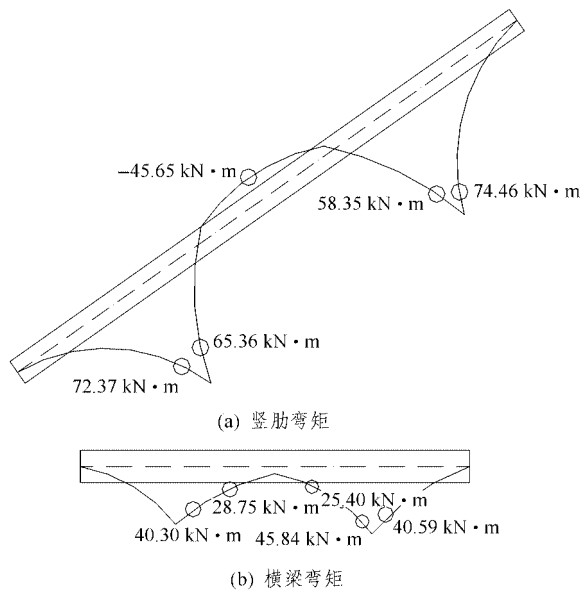


图 4 2#框架实测弯矩分布图

Fig.4 Moment diagram of frame No.2 by field test

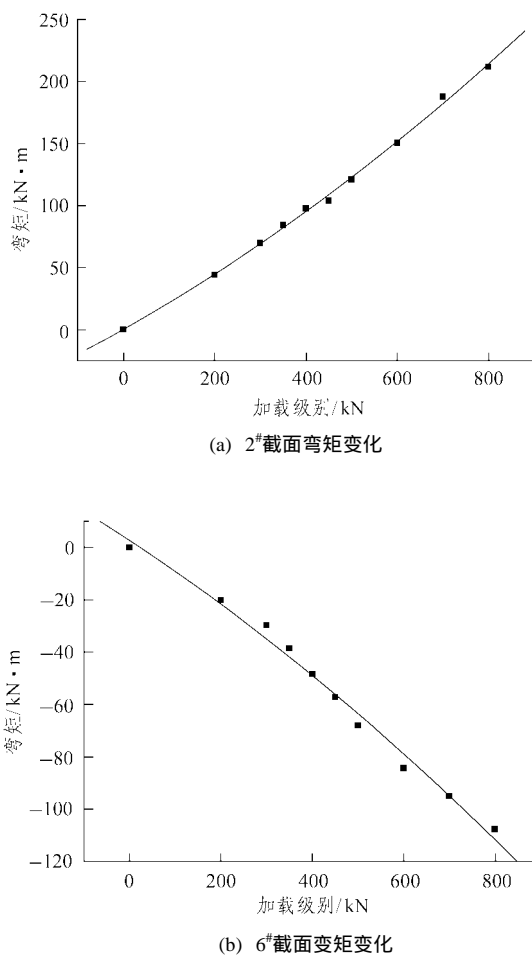


图 5 3#地梁截面弯矩变化曲线

Fig.5 Curves of strain on frame No.3

中拟合曲线可明显分成 0 ~ 300 kN, 300 ~ 500 kN, 500 ~ 900 kN 三个增幅段, 3 个增幅段增幅则依次增

大。地基梁内力随锚索力增大而增大的特点说明了岩土的基础反力系数在实际工作状态中并非一固定常数, 而是随着荷载的增加发生变化的, 此为与 Winkler 计算模式中取固定反力系数的差别所在。

4.3 锚索力沿纵横梁间的分配特点

锚索力在纵梁(竖肋)上分配的较大, 在横梁上分配小; 表现在梁的弯矩上, 竖肋上弯矩值近于横梁上弯矩值的 2 倍, 且随锚索力的增大, 基本维持此比例关系(表 2 ~ 4)。实测数据与文[14]的 Winkler 模式的计算结果对比可以得到, Winkler 计算出的竖肋弯矩值相对于横梁弯矩值相差幅度要大。这说明 Winkler 计算模式尽管能在一定程度上反映出框架纵、横梁的受力状态, 但与实际情况还存在一定的差距, 这是由于用 Winkler 模型进行锚索力分配时没有考虑节点上转角的变形协调等诸多因素的影响。但从结果可看出纵、横梁弯矩的理论计算值均大于实测值, 这也说明用 Winkler 模式进行框架锚索力的分配是偏于安全的。

5 结 论

通过锚索框架内力的现场测试, 可以得出如下几点结论:

- (1) 在锚索作用点位置附近存在着最大正弯矩, 在相邻两锚索作用点的中间位置会有最大负弯矩产生。
- (2) 随着锚索力的逐渐增大, 梁的弯矩值基本上成线性增长。
- (3) 当梁的长度达到一定值时, 其中间部位会产生负弯矩, 而且随着梁长度的增加, 负弯矩相应增大, 因此, 需在实际工作中采取双筋设计以确保安全。
- (4) 现场实测与 Winkler 模式计算结果对比分析表明, 采用 Winkler 模式进行框架锚索力的分配是偏于安全的。

参考文献(References):

- 1 杨 明. 路堑类土质边坡锚固技术研究[硕士学位论文][D]. 成都: 西南交通大学, 2002.(Yang Ming. Research on anchor technology of roadcut similar soil slope[M. S. Thesis][D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2002.(in Chinese))
- 2 丁秀丽, 盛 谦, 韩 军等. 预应力锚索锚固机理的数值模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 980 - 988.(Ding Xiuli, Sheng Qian, Han Jun, et al. Numerical simulation testing study

- on reinforcement mechanism of prestressed anchorage cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 980-988. (in Chinese)
- 3 Wijk G. A theoretical remark on the field round prestressed rock bolts[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1978, 6: 289-294.
 - 4 Benmokrane B, Chekired M, Xu H. Monitoring behavior of grouted anchors using vibrating-wire gauges[J]. J. Geotech. Eng., 1995, 121(6): 466-475.
 - 5 顾金才, 明治清, 沈俊等. 预应力锚索内锚固段受力特点现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(增): 788-792. (Gu Jincai, Ming Zhiqing, Shen Jun, et al. Field experimental research on mechanical properties of anchoring section of prestressed anchor cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(Supp.): 788-792. (in Chinese))
 - 6 高大水, 曾勇. 三峡永久船闸高边坡锚索预应力状态监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 653-656. (Gao Dashui, Zeng Yong. Monitoring analysis on prestressed state of anchor cable of high slope of the TGP permanent shiplocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(5): 653-656. (in Chinese))
 - 7 张治强, 张国, 赵赤云等. 边坡预应力锚固结构的实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 1999, 20(5): 536-539. (Zhang Zhiqiang, Zhang Guo, Zhao Chiyun, et al. Experimental study on prestressed anchoring structure of slope[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 1999, 20(5): 536-539. (in Chinese))
 - 8 王全才, 李传株, 赵肃菡. 黄土滑坡锚固技术研究[J]. 铁道工程学报, 1996, 50(2): 206-210. (Wang Quancai, Li Chuanzhu, Zhao Shuchang. Research on anchor technique against landslide of loess mass[J]. Journal of Railway Engineering Society, 1996, 50(2): 206-210. (in Chinese))
 - 9 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))
 - 10 Liu C H. Analysis of a cracked beam-column on an elastic foundation[J]. International Journal of Computer Applications in Technology, 2000, 13(6): 273-279.
 - 11 Gendy A S. Effective modeling of beams with shear deformations on elastic foundation[J]. Structural Engineering and Mechanics, 1999, 8(6): 607-622.
 - 12 Yin Jianhua. Closed-form solution for reinforced Timoshenko beam on elastic foundation [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(8): 868-874.
 - 13 宋天齐, 李延年. 基础梁计算问题的商榷[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 258-259. (Song Tianqi, Li Yannian. A discussion about the computation of foundation beams[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 258-259. (in Chinese))
 - 14 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 roadcut soil slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1383-1386. (in Chinese))
 - 15 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 rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 250-253. (in Chinese))
 - 16 王祖华, 陈眼云. 混凝土与砌体结构(上册)[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1992. 110-125. (Wang Zuhua, Chen Yanyun. Concrete and Masonry Structures(I)[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1992. 110-125. (in Chinese))
 - 17 谈至明. 具有水平摩擦阻力的弹性地基梁上的解[J]. 力学与实践, 1997, 19(3): 33-35. (Tan Zhiming. Solution to beams on elastic foundation with horizontal frictional resistance[J]. Mechanics in Engineering, 1997, 19(3): 33-35. (in Chinese))