

膨胀土地区边坡拟框锚结构工作特性的现场试验

李雄威^{1,2}, 孔令伟², 郭爱国²

(1. 常州工学院 土木建筑工程学院, 江苏 常州 213002; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室 武汉 430071)

摘要:以广西膨胀土为研究对象,考虑气象因素的影响,模拟单锚和框锚结构,进行了现场试验测试。膨胀土与结构物共同作用的结果表明,大气剧烈影响深度范围内土体的胀缩性会对锚杆的工作状态产生较大影响,实际工程中可以考虑对大气剧烈影响深度范围内的锚杆设置自由段。在雨季,框架梁可通过锚杆对梁的约束限制土体膨胀变形,维持土体干密度,进而阻止土体强度的衰减,以达到防止边坡发生浅层破坏的目的。膨胀土吸湿膨胀时,由于框锚结构是半刚性的体系,随着变形协调的过程,框锚结构会释放部分膨胀力,这使梁底土体反力维持在一个定值左右,同时,土体反力呈现中间大两边小的分布形式。现场试验测试结果可对框锚防护系统的设计起到优化的作用。

关键词:膨胀土; 边坡; 大气影响; 框锚系统; 共同作用

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Field test on simulating frame anchor system in expansive soil slope

LI Xiong-wei^{1,2}, KONG Ling-wei², GUO Ai-guo²

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Changzhou Institute of Technology, Changzhou, Jiangsu 213002, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Considering the effect of atmosphere, field test on simulating single anchor and frame anchor is carried out in Guangxi. The test results are as follows. Firstly, the swelling-shrinkage characteristics of expansive soil influences the working state of anchor deeply; so a free part of anchor should be set up in the drastic atmosphere influencing depth. Secondly, in rainy season, the anchoring action to frame beam restricts the swelling deformation and keeps the dry soil density in a certain range, which can prevent the strength weakening tendency of expansive soil and the shallow damage of the slope. Finally, because the frame anchor system is semi-rigid structure, the swelling stress may be released partly with the compatible deformation process when the soil is wetting and swelling, which keeps the soil additional stress under the beam to a constant value and show a distribution form of a big one in the center and a smaller one on each side. The results of field test can optimize the design of frame anchor system.

Key words: expansive soil; slope; atmosphere influence; frame anchor system; interaction

1 引言

膨胀土边坡一经开挖,表层土体就要受大气营力的反复作用,使土体含水率发生频繁变化,造成土体往复的胀缩变形,破坏了土体的原始结构,使表层土体疏松、强度急剧降低^[1-2]。但是,这种胀缩变形也受各种边界条件,如地温、降雨量、渗透性、土的初始状态等的限制,使它的影响深度受到限制。长期研究表明,地表以下 1.2 m 范围内受风化

最为明显,为强活动层。正因为是这种情形,膨胀土边坡往往很容易发生浅层破坏^[3]。在理论研究和实践的基础上,很多膨胀土边坡的防护都采用了锚杆框架的结构形式^[4],事实证明效果较好,但对于其防护机制的研究工作却进行较少,缺乏优化设计的依据,所以有必要进行相应地研究。

锚杆框架护坡既是一种新型的边坡防护加固措施,又是锚杆技术的扩大应用,除与锚杆技术具有共同的理论问题外,还涉及膨胀土的特殊性质,存在着框锚结构和膨胀土的共同作用问题。膨胀土

边坡的防护设计和施工过程中,单一锚杆的工作特性和框锚结构系统中框架梁-锚杆-土体共同作用的过程决定了框锚结构护坡的机制,通过现场试验对其工作机制展开研究显得尤其必要。

2 场地条件与试验方案

2.1 试验场地概况

试验场地位于广西南宁市郊外。该地区属于亚

热带季风气候区,阳光充足,气候温和,雨量充沛,干湿季节分明。现场设置小型气象站,对降雨量进行实时监测,试验期间降雨量时程曲线如图 1 所示。由图可以看出,试验场地干湿季节分明,4~9 月为雨季,10~3 月为旱季。试验区的土层剖面见表 1,该场地地面以下含有弱~强膨胀性的红褐色黏土和灰白色黏土,泥岩是不透水层。土体物理力学性质指标见表 1。

表 1 现场试验场地土层剖面及土体物理力学性质指标
Table 1 The section of strata and physico-mechanical indices of soils

土层 顺序	厚度 /m	岩性描述	密度 /(g/cm ³)	含水率 /%	液限 /%	塑性 指数	黏粒含量 <5μm	自由 膨胀率 /%	收缩 系数	缩限 /%	50 kPa 膨胀率 /%	饱和渗 透系数 /(10 ⁻⁹ m/s)
1	0.6~0.9	黏土,红褐色,可塑,裂隙发育,弱膨胀性	1.97	25.2	45.6	23.2	40	55	0.16	15.8	-0.44	5.87
2	0.6~1.4	黏土,灰白色,可塑,裂隙发育,中强膨胀性	1.89	32.8	77.8	48.7	64	98	0.30	19.5	-0.62	1.27
3	0.5~0.8	黏土,棕黄色,硬塑状	1.97	26.6	49.0	26.9	46	70	0.56	16.1	-1.48	
4	2.2~2.8	泥岩,青灰色,强风化	2.13	19.6	34.4	18.1	24					

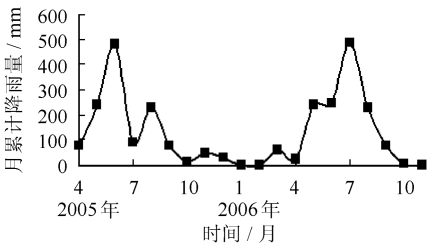


图 1 降雨量变化
Fig.1 The variation of rainfall

2.2 试验方案

现场试验,在雨季之前完成框锚结构施工和测试系统安装,雨季中对框锚系统进行测试。试验中主要研究膨胀土经历长期蒸发、干旱作用后,雨季中在雨水长期渗透作用下,框锚结构与土体的共同作用特性,具体试验方案如下:

①膨胀土与模拟单锚结构作用特性试验

试验中模拟单锚结构锚杆几何尺寸和土层分布如图 2 所示,地表坡度平缓。应变片埋设深度分别为0.1、0.3、0.5、1.0、1.5 m和 2 m,利用应力-应变关系测试锚杆轴力,混凝土浇筑时加入早强剂和膨胀剂。在距锚杆边0.15、0.85 m的地表布设百分表1、2记录地表竖向变形(百分表固定端设在锚杆端部,利用全站仪测试锚杆端部位移,修正地表竖向变形量)。地表设置TDR探头测试土体体积含水率,定期采用土钻法测试 2 m 深度的土体重力含水率。

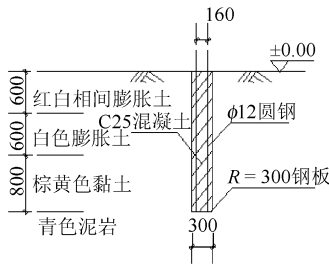


图 2 锚杆几何尺寸以及土层分布(单位: mm)
Fig.2 Geometric dimensions of anchor and strata (unit: mm)

②膨胀土与模拟框锚结构作用特性试验

试验中模拟锚杆结构尺寸见图 3,土层分布见图 4。地表坡度为16°,应变片埋设深度分别为0、0.2、0.4、0.6、1.1、1.6、2.1、2.6、3.0 m(轴力测试原理同单锚)。导线由PVC管从混凝土中引出;混凝土浇注时加入早强剂和膨胀剂。在框架梁底部设土压力盒测试土体竖向附加应力。定期采用土钻法测试1.5 m深度范围的土体重力含水率。

3 试验结果与分析

3.1 膨胀土与单锚结构作用特性

(1) 大气影响下锚杆侧面土体变形

表层土体体积含水率与降雨量关系如图 5 所示。在地表利用百分表设置的 2 个竖向位移观测点,百分表1距桩边 0.15 m,百分表 2 距桩边0.85 m,地表竖向位移变化对比如图 6 所示。

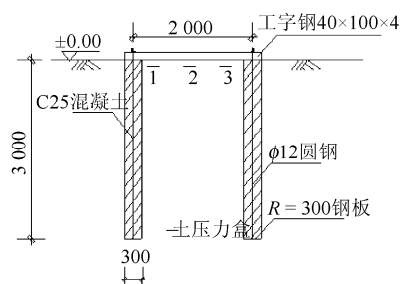


图3 框锚结构几何尺寸(单位:mm)

Fig.3 Geometric dimensions of frame anchor(unit: mm)

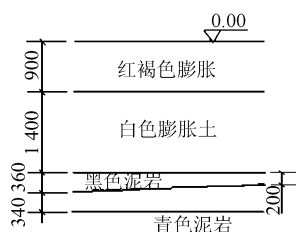


图4 土层分布(单位: mm)

Fig.4 Distribution of soil strata(unit: mm)

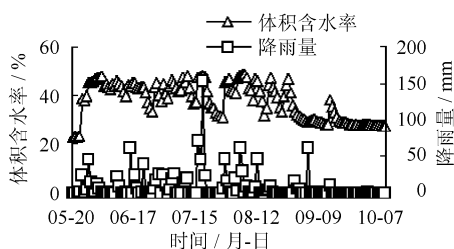


图5 雨季里表层土体体积含水率与降雨量对比

Fig.5 Comparison between volumetric water content and rainfall in rainy season

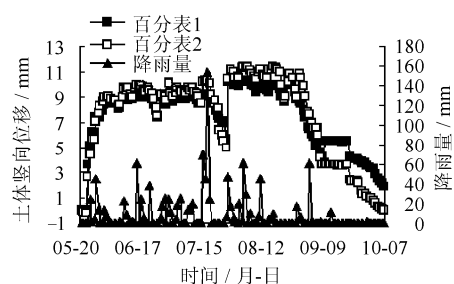


图6 土体竖向位移与降雨量关系的时程曲线

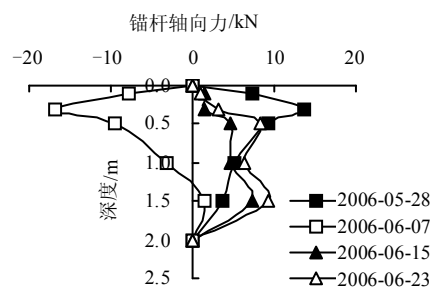
Fig.6 Time-history curves of soil vertical displacements and rainfalls

由图5可见,表层土体初始体积含水率基本为23%左右,当雨季的来临后,随着降雨的发生,表层土体体积含水率迅速增加,随着降雨量的增减而增加和减小,在较长时间没有降雨发生的时期,表层土体体积含水率会持续下降。但在雨季的大多数时间内,表层土体的体积含水率基本维持在45%~50%,接近饱和。降雨后,地表含水率的增加,直

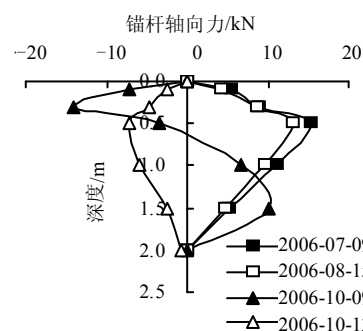
接造成地表土体隆起,随着降雨的持续地表土体隆起量逐渐增加,并趋于稳定值,说明降雨入渗的深度是有限的。气候持续干旱时期,地面沉降逐渐增加。对比百分表1、2的监测结果可以看出,百分表2处土体隆起的峰值大于百分表1,沉降的极值小于百分表1,说明锚杆的存在对侧面土体的竖向隆起和沉降均有阻碍的作用。

(2) 大气影响下锚杆应力分布

锚杆应力测试以2006年5月22日为初始状态进行测试。部分测试数据整理如图7、8以及表2所示。锚杆安装养护完成后,在降雨的时间(2006年的5月28日,6月15日,6月23日,7月9日和8月15日)锚杆沿长度方向均呈现受拉状态,此期间土体竖向变形量基本维持在较大的数值,说明土体处于吸湿膨胀状态。而2006年7月和10月间土体由前期降雨入渗转为持续蒸发状态,锚杆上部转为受压状态,而下部仍为受拉状态。10月13日由于进入旱季,土体持续蒸发,土体含水率持续降低,锚杆沿深度方向呈现受压状态。



(a)



(b)

图7 锚杆轴向力分布(受拉为正)

Fig.7 Distribution of anchor axial force (tension is positive value)

对单锚结构锚杆拉应力分析看出,锚杆季节性受荷分为3种情况:①持续降雨,锚杆受拉。②干湿交替,部分受拉部分受压。③持续干旱,锚杆受压。E.A.索洛昌^[5]依据膨胀土土体浸湿过程中桩侧

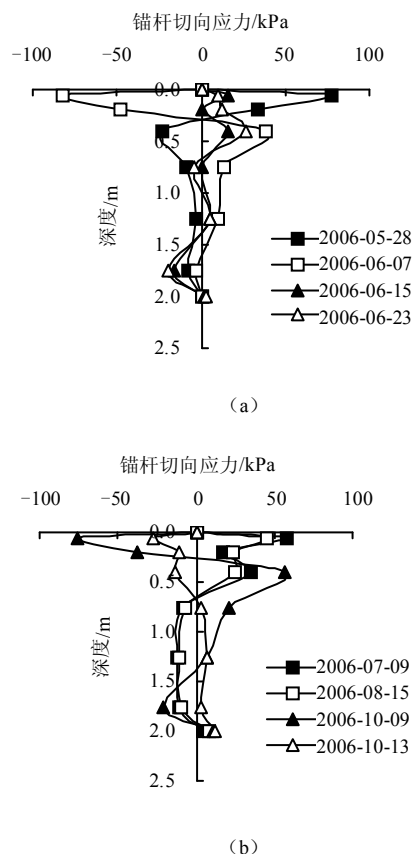


图8 锚杆切向力分布(向上为正)

Fig.8 Distribution of anchor tangential force(upwards force is positive value)

表2 锚杆受荷特性

Table 2 The force characteristic of anchor

日期 /年-月-日	锚杆侧面土体 相对变形量/mm	锚杆侧面法 向应力/kPa	中性点 位置/m	有无 降雨
2006-05-28	7.41	33.79	0.32	有
2006-06-07	8.22	25.56	0.31	无
2006-06-15	9.04	43.20	1.38	有
2006-06-23	8.48	39.23	1.37	有
2006-07-09	9.01	44.41	0.68	有
2006-08-15	9.58	23.86	0.67	有
2006-10-09	1.88	-9.50	0.28	无
2006-10-13	0.65	-9.81	0.69	无

面形成的2个方向不同的切向力,而将切向力作用区分为“主动区”和“被动区”。如图7所示锚杆切向应力,正值为“主动区”,负值为“被动区”。“被动区”表示为锚杆在土中的锚固段,锚固段越长越有利于锚杆的稳定。干湿季节,锚杆“主动区”和“被动区”的分布有所不同,在持续降雨过程中,锚杆“主动区”在上“被动区”在下,并且中性点在雨季有逐渐下移的趋势,说明长期的降雨入渗过程锚杆有上拔的趋势,“主动区”逐渐变大,不利于锚杆的稳定;在持续蒸发过程中,锚杆“被动区”在上,“主动区”在下,说明降雨后持续的蒸发过程锚杆有下压的运动趋

势,有利于锚杆的稳定。同时可以看出,本场地大气剧烈影响深度(大气日影响深度)50 cm范围内^[6],锚杆的力学特性变化较大。中性点位置最大可以达到1.38 m,略小于本场地大气影响深度^[6]。

3.2 膨胀土与框锚结构系统作用特性

(1) 大气影响下框架梁底部土体竖向附加应力分布

不同土压力盒测点的土体附加应力时程变化见图9。经过整理大气影响下框架梁底部土体平均反力的分布见图10。由图可见,框架梁底部土体的平均附加应力,是中间大两边小,中心部位土体反力基本为两边的2倍左右,而两边的土体反力基本一致。梁底反力的这种特殊分布形式与土体膨胀特性密切相关。前文单锚试验分析中,锚杆的存在会约束锚杆周围土体竖向变形,这种作用的结果导致了梁下土体反力的特殊的分布形式。

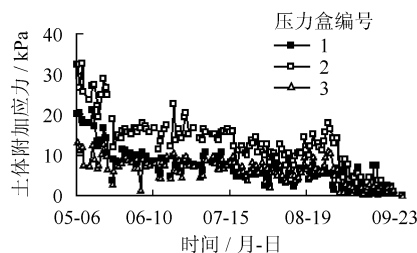


图9 土体附加应力时程变化

Fig.9 History curves of soil additional stress

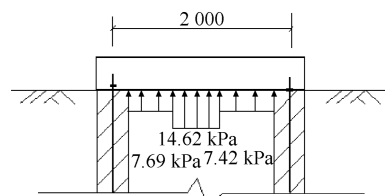


图10 框架梁底部土体平均附加应力的分布(单位: mm)

Fig.10 Distribution of soil additional stress under frame beam(unit: mm)

不同时刻梁下土体附加应力与地表土体重力含水率关系如图11所示。梁底土体竖向附加应力由土与结构物的共同作用而产生,这一过程包括土体的吸湿膨胀、脱湿收缩和框锚结构体系对土体的竖向约束。结合图8和图10可见,经过干旱季节后,雨季开始阶段的降雨入渗使土体的附加应力迅速提高,但随着雨季的持续,土体附加应力有所降低,并在大部分时间里基本维持在15 kPa,随着季节由雨季逐渐进入旱季,土体的附加应力逐渐降低,并趋于0,说明梁底土体附加应力与季节性的降雨和干旱过程息息相关,雨水入渗使得土体膨胀,造成土体附加应力的提高,蒸发过程中土体含水率降

低, 土体收缩又造成土体附加应力的降低。在降雨季节里, 土体附加应力由高值逐渐降低, 大部分时间里基本维持在定值左右, 这是因为框锚结构是一种半柔性的结构体系, 随着变形协调的过程, 它既会约束土体膨胀, 又会在土体膨胀过程中呈现松弛状态, 因此, 土体的附加应力在雨季中经常保持在一个稳定的值左右, 这种应力释放的变化状态与文献[7]的室内试验成果相吻合。

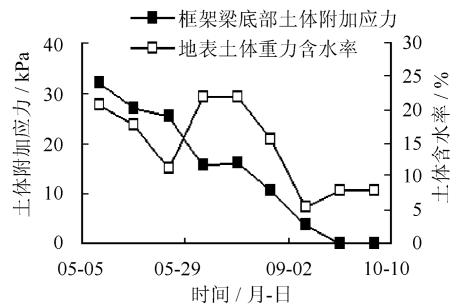


图 11 梁下土体平均附加应力与地表土体重力含水率关系
Fig.11 Relationships between soil average additional stress under frame beam and soil gravity water content

(2) 大气影响下框锚结构锚杆应力分布

框锚结构系统应力测试以2006年5月18日为初始状态进行测试。部分测试数据整理如图12、13所示, 相关气象资料见表3。

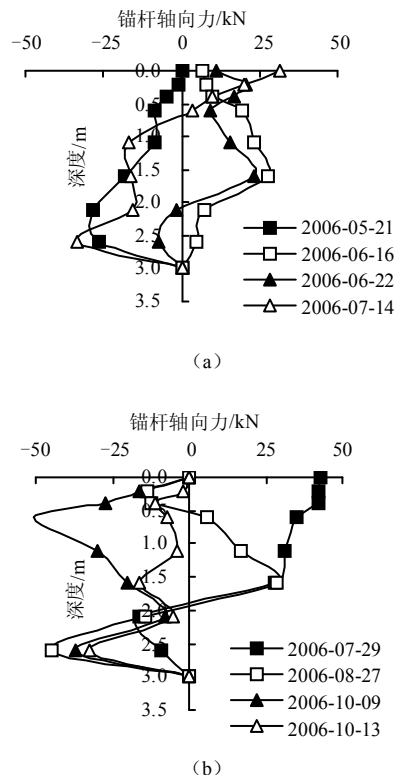


图 12 锚杆轴向力分布 (受拉为正)
Fig.12 Distribution of anchor axial forces (tension is positive value)

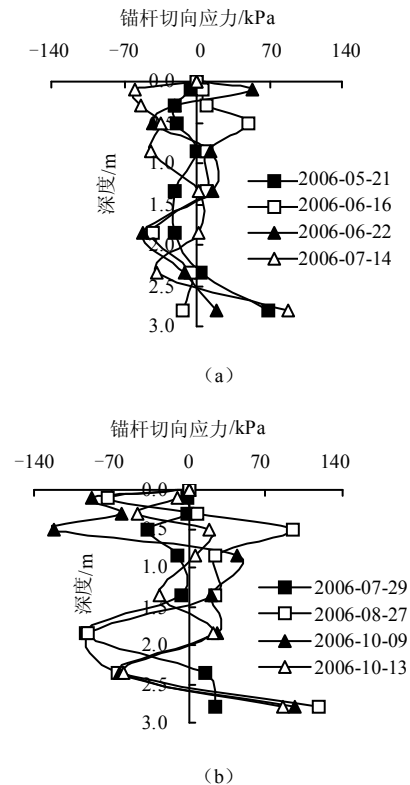


图 13 锚杆切向力分布 (向上为正)
Fig.13 Distribution of anchor tangential forces (upwards force is positive value)

表 3 气象资料
Table 3 Meteorological data

日期/年-月-日	有无降雨	日期/年-月-日	有无降雨
2006-05-21	无	2006-07-29	有
2006-06-16	有	2006-08-27	无
2006-06-22	有	2006-10-09	无
2006-07-14	无	2006-10-13	无

在监测周期内, 5月21日前无降雨, 地表持续蒸发, 而10月9日、10月13日为旱季, 这几天监测的数据结果表明, 锚杆的轴向受力形式表现为受压; 在降雨的时间6月16日、6月22日和7月29日, 锚杆受力表现为上部受拉下部锚固; 而在干湿更替的时期7月14日和8月27日, 锚杆拉、压区间隔分布。对比单个锚杆的受力形式可以看出, 在框锚结构体系中, 框架梁会把梁下土体的竖向膨胀力传递给锚杆, 使锚杆在雨季中还受到上拔力的作用, 使框锚结构中锚杆的切向应力的分布形式复杂于单个锚杆系统, 但可以看出, 大气剧烈影响深度(大气日影响深度)50 cm范围内^[6], 锚杆的力学特性变化较大, 而“主动区”基本上分布在大气影响深度的范围内。

4 结 论

(1) 对于不施加预应力的锚杆, 其锚固力的

大小与土体的胀缩特性有密切的关系。大气剧烈影响深度范围内土体的胀缩过程会严重影响锚杆的工作状态,实际工程中可以考虑对大气剧烈影响深度范围内的锚杆设置自由段。

(2) 在边坡上早期施加锚杆和框架梁后,框架梁可通过锚杆对梁的约束力限制土体的膨胀变形,从而使表层土体的初始干重度在一个相对稳定的范围^[7],进而保证土体的强度,有利于阻止边坡发生浅层破坏。

(3) 由于框锚结构是半刚性的体系,随着变形协调的过程,框锚结构实际受荷过程中会释放部分膨胀力,降低梁底土体反力,从而维持框锚结构的稳定,气候影响下现场实测框锚系统中土体的膨胀力,呈现中间大两边小的形态,且在雨季中长期处于一个稳定值左右,现场测试结果可为工程设计的优化提供参考。

参 考 文 献

- [1] 韩华强,陈生水. 膨胀土的强度和变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 422—424.
HAN Hua-qiang, CHEN Sheng-shui. A study on strength and deformation of expansive soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(3): 422—424.
- [2] 陈生水,郑澄锋,王国利. 膨胀土边坡长期强度变形特性和稳定性研究[J]. 岩土工程学报. 2007, 29(6): 795—799.
CHEN Sheng-shui, ZHENG Cheng-feng, WANG Guo-li. Researches on long-term strength deformation characteristics and stability of expansive soil slopes[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(3): 422—424.
- [3] 孔令伟,陈建斌,郭爱国,等. 大气作用下膨胀土边坡的现场响应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1065—1073.
KONG Ling-wei, CHEN Jian-bin, GUO Ai-guo, et al. Field response tests on expansive soil slopes under atmosphere[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(7): 1065—1073.
- [4] 张永防,王秉勇. 用锚杆框架护坡加固南昆线膨胀土边坡的研究[J]. 铁道工程学报. 2000(3): 92—95.
ZHANG Yong-fang, WANG Bing-yong. Study on strengthening expansive soil side slope in Nan Kun railway by using revetment with anchor bolt frame[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2000(3): 92—95.
- [5] 索洛昌. 膨胀土上建筑物的设计与施工[M]. 徐祖森等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982.
- [6] 李雄威,孔令伟,陈建斌,等. 新开挖膨胀土边坡大气影响深度的现场试验[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2010, 29(1): 99—102.
LI Xiong-wei, KONG Ling-wei, CHENG Jian-bin et al. Field test on atmosphere influence depth on newly excavated expansive soil slope[J]. **Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)**, 2010, 29(1): 99—102.
- [7] 谢云,陈正汉,李刚,等. 南阳膨胀土三向膨胀力规律研究[J]. 后勤工程学院学报, 2006, 22(1): 11—14.
XIE Yun, CHEN Zheng-han, LI Gang, et al. Test research on three-dimensional swelling pressure of Nanyang expansive soil[J]. **Journal of Logistical Engineering University**, 2006, 22(1): 11—14.