

西南某水电站工程边坡软岩时效变形特性研究

郑海君¹, 张品萃¹, 曹运江^{1,2}, 付小敏¹, 谭文俊³

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室, 成都 610059;
2. 湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 3. 四川准达岩土工程公司, 成都 610072)

摘 要:以研究西南某大型水电站大坝在蓄水后的长期稳定性为背景, 以室内饱水直剪流变试验为手段, 系统地研究了坝区内高边坡软岩的流变特性。通过对所有流变曲线的分析, 获得了长期强度参数, 并建立了各种类型软岩和软弱结构面的时效本构方程, 得出该区软岩在饱水状态下, 长期强度参数较瞬时变形降低了约 60%。结论表明该区软岩的时效变形很明显, 这个特性是坝区多个开挖边坡可能沿软岩蠕滑拉裂破坏的潜在因素, 表明其存在对边坡及未来的稳定性起主要的控制作用。

关键词:软岩; 流变试验; 时效本构方程; 边坡稳定性

中图分类号: P642.4; TV742

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2007)03-0192-03

Study on Time-Dependent Deformation of Soft Rock of the Engineering Slope in a Hydroelectric Station in Southwest of China

ZHENG Hai-jun¹, ZHANG Pin-cui¹, CAO Yun-jiang^{1,2}, FU Xiao-min¹, TAN Wen-jun³

(1. National Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment

Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. School of Civil Engineering of Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Chengdu Hydroelectric Investigation & Design Institute of SPC, State Power Company, Chengdu 610072, China)

Abstract: To study long-time stability of dam of a southwestern hydropower station after sluicing, the rheology properties of soft rock are researched by laboratory long-term direct shear in the saturated situation, the time-dependent deformation characteristics studying on the high slope soft rock and the weak structural plane have been done systematically. Through the analysis of all of the curves, the long-time strength parameters were acquired, and the time-dependent constitutive equation of each type of soft rocks and weak structural planes was established, the long-time cohesive force of the weak structural plane decreased about 60% in contrast with that of saturated quick shear test. The results indicate that time-dependent deformation of soft rock is also obvious and would be the potential factor to make the excavated slope creep-ripredly destructed along the soft rock and to play a mainly controlling role to the long-term stability.

Key words: soft rock; rheological test; time-dependent constitutive equation; slope stability

1 引 言

西南某水电站在坝区的相应部位开挖形成多个高陡边坡, 边坡岩体卸荷强烈、质量相对较差。区内软岩分布较广, 软硬岩比例约为 1:7, 软岩的发育特征、空间展布形态直接关系到边坡整体稳定性和支护措施方案设计。大量的现场量测和室内试验都表明, 软岩的时效变形特性是非常显著的, 特别是软岩泡水以后, 所以如何准确的描述软岩的时间效应, 对于工程运行期的安全是非常关键的。

流变是一个时间效应的问题, 而实际工程中软岩的蠕变是个长时间的过程, 这个过程可以长达几十年至几百年。整个实验时间与软岩的蠕变过程相比只是极小的部分, 但又不得不将短时间的蠕变试验的结果外推到长时间的实际蠕变

过程中去, 因此, 在软岩的蠕变试验中, 考虑了流变试验的时间尺度效应和变形尺度效应, 在分级加载时, 时间尺度效应对何时加下一级荷载的标准起着关键性的作用。

为分析大坝修建后的长期稳定性问题, 考虑到软岩的力学性质, 采用新型岩石直接剪切流变试验仪, 即应力控制式直剪仪进行直剪流变试验研究, 分析软岩的流变特性, 在此基础上确定了该区发育软岩的长期强度参数及流变本构方程, 为全面分析大坝的长期稳定性提供了依据。

2 实验方案与实施

本次试验在野外均匀布置 4 个不同层位的采样点, 进行直剪流变试验研究。试件尺寸: 剪切面积 30 cm × 30 cm, 剪切带厚度为 1.2 cm。试验过程中试样需处于长期饱水状

* 收稿日期: 2006-06-16

基金项目: 地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室开放基金资助(项目编号: GZ2005-07)

作者简介: 郑海君(1979-), 女, 硕士, 2005年毕业于成都理工大学岩土工程专业, 主要从事岩石力学试验与土工试验研究与教学方面的工作。

态,可通过饱水盒来实现。试验采用分级加载法,其特点是:把单级加载法中一次性施加的载荷改为分时间段逐次施加,减少了单级加载法在一次性施加载荷量确定上的盲目性,其结果更接近于软岩的真实长期强度,更具有科学性。

枢纽区构造应力非常低,绝大部分都已释放完,在直剪流变试验中,设置正应力荷载等级,主要考虑上覆岩体的自重应力。水平荷载加载值设定方法:根据快剪试验结果,预先选取 c 、 φ 值,待预设正应力后,根据公式: $\tau = \sigma \tan \varphi + c$ 求得最大剪应力 τ_{\max} 。剪应力的加载一般分 7 级,每级剪应力的施加仍采用应力控制法,其大小为正应力的 5%~10%。施加下一级水平荷载的标准:根据试样在某级荷载作用下的

变形速率及变形量来确定下一级荷载。每级荷载的加压时间根据软岩的蠕变增量和蠕变速率确定,当在某级荷载作用下的蠕变增量为零或蠕变速率为常数,就施加下一级荷载,直到试样破坏。

3 长期强度指标确定

试验资料整理采用陈宗基先生提出的方法,流变过程用剪应变 γ 与时间 t 曲线表示,然后应用叠加原理从试验获取的 $\gamma-t$ 关系曲线,求得在各级荷载下相同受剪历时的剪应变叠加曲线(图 1),由这组叠加曲线绘制各种时间剪应力 τ 与剪应变 γ 等时线簇(图 2)。

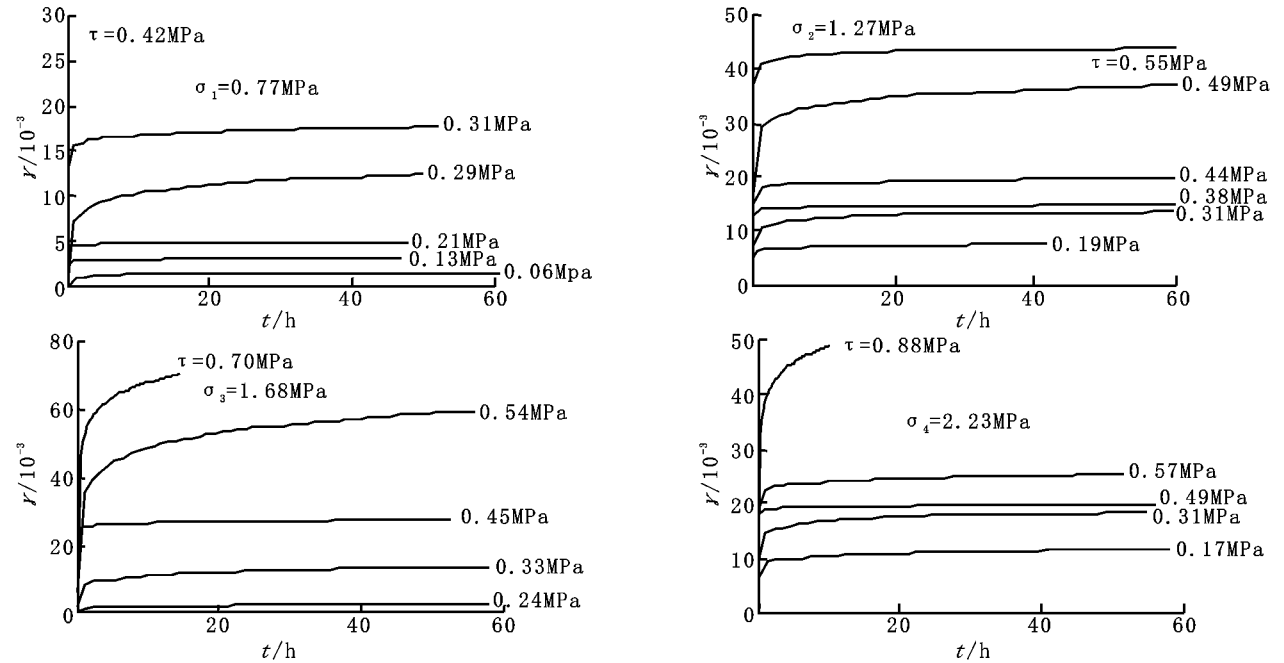


图 1 $\gamma-t$ 关系曲线

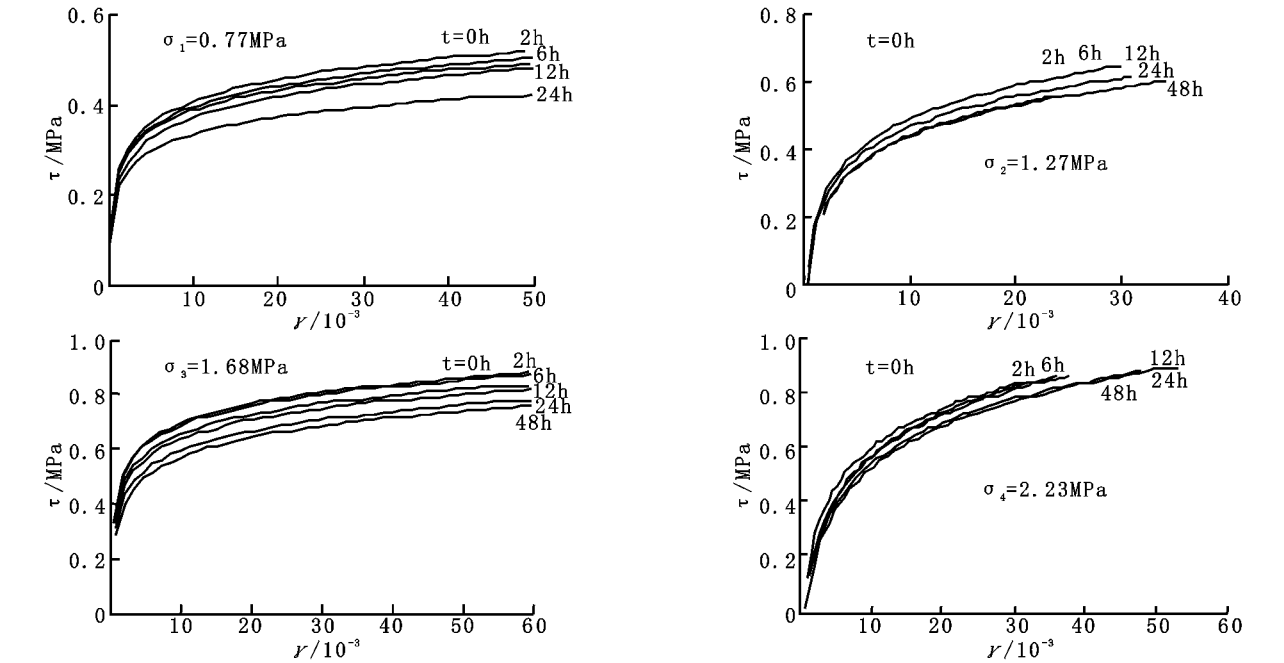


图 2 $\tau-\gamma$ 关系曲线

边坡软岩的长期强度是指软岩在长期的应力场或变形场作用下能保持岩体稳定的最大应力,即在这一应力值时,

材料将发生破坏而并未发生破坏。对流变试验即为由稳定蠕变过渡到非稳定蠕变的极限剪应力,称为第三屈服应力值

(τ_y^3), 即长期强度。从工程应用讲, 根据流变试验确定的长期强度是能够满足边坡稳定性分析评价需要的, 这里采用的长期强度两种确定方法均根据这一理论依据进行。

根据剪应力 τ 与剪应变 γ 等时线簇确定。这是通常采用的方法, 相同受剪历时剪应变叠加原理绘制的剪应力 τ 与剪应变 γ 等时线簇的拐点反映了软岩剪应力随剪应变增加而变化的转折点即临界值, 也就是应力屈服点(τ_y^3)。从等时线簇曲线图 2 中可见, 屈服特征较为明显, 以屈服点处的剪应力作为剪切长期强度, 然后按库仑原理绘制长期强度曲线图 3, 由此得到长期强度指标的内聚力(c_∞)和内摩擦角(φ_∞)。

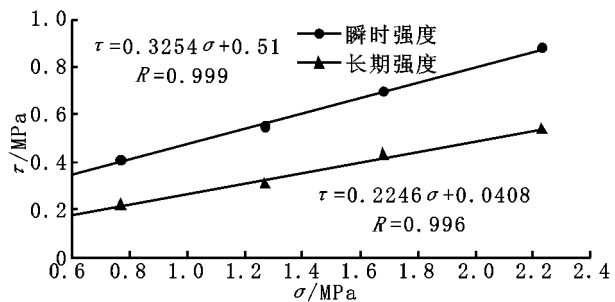


图 3 强度曲线

稳定性分析的推荐值采用以下两种方法; 一是两种确定方法成果的综合平均值, 二是以这两种方法确定值范围作为长期强度的波动范围。根据同样的数据处理方法得长期强度值见表 1。长期强度参数 c 值在 57~ 160 kPa 之间, φ 值在 12~ 18° 之间, 与饱水快剪强度参数 c 值 110~ 226 kPa、 φ 值 18~ 27° 对比降低约 60%。同时测得试验后剪切面试样含水率, 与试验前相比, 增加幅度为 78% ~ 87% 不等, 说明试样在剪切过程中基本达到饱水的目的。

表 1 长期强度与快剪强度参数对比表

编号 (层位代号)	试验 状态	抗剪强度			
		峰值		屈服	
		c /kPa 快剪/瞬时	φ° 快剪/瞬时	c /kPa 快剪/长期	φ° 快剪/长期
2# (L ₉)	饱水	158.0/151.0	26.0/ 18.0	120/ 56	21.5/12.1
6# (L ₁₀)		127.7/113.9	25.2/ 17.3	102/ 61	21.4/11.6
3# (L ₁₁)		- / 324	34.1/ 29.4	226/ 165	27.3/18.2
5# (L ₁₂)		- / 210.0	- / 23.0	180/ 88	40.0/13.0

4 软岩剪切流变参数确定

流变力学模型的确定, 理论上常用的方法是建立描述某种岩石流变特征的物理模型, 即本构模型的微分形式, 然后用初始条件和极限条件确定其中的系数, 但数学上只有极为特殊的情况才能求解。实际研究工作中, 是先根据岩石流变曲线形态确定岩石的力学模型, 然后用拟合法确定有关系数, 拟合假设了参数之间是相互独立的。由上面工程枢纽区软岩剪切流变特征曲线可知, 用 Burgers 流变模型(图 4), 来描述其流变特征较为合适。

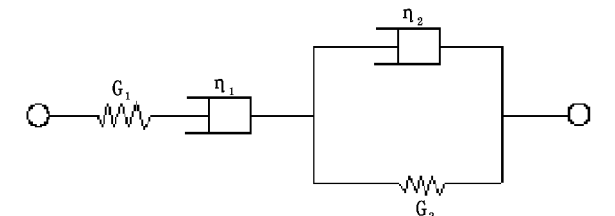


图 4 Burgers 流变力学模型

流变本构方程如式 1 所示:

$$\gamma(t)=\frac{\tau_0}{G_1}+\frac{\tau_0}{\eta_1}t+\frac{\tau_0}{G_2}(1-e^{\frac{-c_2}{\eta_2}t})$$

(1)

式中: γ ——剪应变; τ ——剪应力; G ——剪切模量; η ——黏滞系数; t ——时间。

表 2 各级正应力下的剪切流变参数

编号	正应力 / MPa	G_1 / MPa			G_2 / MPa		
		Ag_1	Bg_1	R	Ag_2	Bg_2	R
RL6#	0.48	- 74.4	51.4	0.94	- 320.6	159.6	0.98
	1.48	- 60.3	59.3	0.81	- 76.9	72.2	0.95
	1.82	- 70.7	107.6	0.98	- 81.6	74.3	0.99
	1.91	- 316.0	262.2	0.90	- 238.0	292.0	0.92
	2.28	- 224.3	199.5	0.97	- 33.6	37.9	0.98
编号	正应力 MPa	$\eta_1/(10^7\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1})$			$\eta_2/(10^6\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1})$		
		$A\eta_1$	$B\eta_1$	R	$A\eta_2$	$B\eta_2$	R
RL6#	0.48	- 9.7*	3.4	0.99	- 10.6	7.3	0.94
	1.48	- 1.4	0.9	0.98	- 2.8	2.2	0.87
	1.82	- 0.8	0.6	0.99	- 2.2	2.3	0.85
	1.91	- 4.0	3.3	0.98	- 14.2	15.7	0.89
	2.28	- 1.5	1.1	0.96	- 1.2	1.3	0.98

利用初始条件与极限条件, 可求取流变参数, 以 6# 样为例, 见表 2 所示, 舍弃异常点(带*号)得流变参数与剪应力有下列关系式(2~ 5)

$$G_1=136-149\tau$$

(2)

$$G_2=159-158\tau$$

(3)

$$\eta_1=1.86-1.93\tau$$

(4)

$$\eta_2=5.78-6.19\tau$$

(5)

从平均的角度看, 随着剪应力的增加, 流变参数降低, 说明当剪应力增大时, 岩石变软, 蠕变速率加大, 塑性增强。若令式中所有流变参数为零(相当于流体), 计算出临界剪应力值为 0.92 MPa、0.996 MPa、0.966 MPa、0.933 MPa。相对误差约为 8%, 其平均值为 0.952 MPa, 将 $\tau_c=0.9\text{MPa}$ 代入式(2~ 5)中, 以此来确定相应的流变参数如式(6~ 9)所示:

$$G_1=1.81\text{MPa}$$

(6)

$$G_2=14.5\text{MPa}$$

(7)

$$\eta_1=1.2\times10^6\text{MPa}\cdot\text{s}$$

(8)

$$\eta_2=2.1\times10^5\text{MPa}\cdot\text{s}$$

(9)

将式(6~ 9)代入式(1), 就得到工程区软弱结构面的剪切流变力学模型为式(10):

$$\gamma(t)=\frac{\tau_0}{1.81}+\frac{\tau_0}{1.23\times10^6}t+\frac{\tau_0}{14.52}(1-e^{-6.95\times10^{-5}t})$$

(10)

式中, τ ——单位为 MPa, t ——单位为 s。

将式(2~ 5)代入式(1), 用 τ 代替 τ_0 , 则可得坝区工程边坡软弱结构面剪切流变本构方程的一般形式为式(11):

$$\gamma(\tau,t)=\frac{\tau}{136.0-149.1\tau}+\frac{\tau\cdot t}{(1.86-1.93\tau)\times10^7}+\frac{\tau}{159.3-158.0\tau}\{1-\exp[-\frac{(159.3-158.0\tau)t}{(5.78-6.19\tau)\times10^6}]\}$$

(11)

式中单位同上。

同理, 根据上述方法, 得出 4 组试验的流变参数见表 3。

表 3 长期强度及流变参数

层位	试验 状态	长期强度指标		流变力学参数			
		c_∞ /kPa	$\varphi_\infty/^\circ$	G_1 /MPa	G_2 /MPa	$\eta_1/(10^7\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1})$	$\eta_2/(10^6\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1})$
L ₉	饱水	56.5	12.1	1.81	14.5	0.12	0.21
L ₁₀		61.3	11.6	1.12	4.58	0.06	0.17
L ₁₂		88.0	13.0	5.10	1.50	0.02	0.09
L ₁₁		165.3	18.2	95.09	26.63	6.12	1.43

5 结 论

软岩的这种特性对坝区开挖边坡的长期稳定性将起重要的控制作用, 特别是对开挖边坡在水库蓄水后的长期运行期间的稳定性会有极大的影响。由表 3 所列结果可知:

(下转第 199 页)

4 结 论

本研究所选取的土壤样品基本上涵盖了该地区的主要土壤类型,因此从研究结果可以看出,典型喀斯特地区发育土壤的 χ 和SIRM值均较母质的值高,其中所包含的磁性矿物,以亚铁磁性矿物为主。在碳酸盐岩为母质的土壤有着亚热带湿热条件下土壤发育的共同特点,土壤中的磁性矿物组成比较一致,基本上是以亚铁磁性矿物为主,同时也存在少量的反铁磁性矿物由于喀斯特地区的土层薄,侵蚀严重的特点,土壤中磁性矿物的颗粒大小,基本上多畴颗粒、稳定单畴颗粒和超顺磁颗粒三种颗粒都含有。

不同的土地利用方式对土壤的磁性特征有着明显的影响,从土壤的磁性指标的分析可以看出,一般情况下,林地和参考文献:

[1] Sweeting, M M. 《喀斯特水文地貌学》序, 载: 谭明. 喀斯特水文地貌学[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1993.
[2] 蔡运龙. 中国西南岩溶石山贫困地区的生态重建[J]. 地球科学进展, 1996, 11(6): 602– 606.
[3] 蔡运龙. 中国西南喀斯特山区的生态重建与农林牧业发展: 研究现状与趋势[J]. 资源科学, 1999, 21(5): 37– 41.
[4] 熊康宁, 等. 喀斯特石漠化的遥感- GIS 典型研究——以贵州省为例[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
[5] Thompson R, Oldfield F. Environmental magnetism[M]. London: Geoge Allen & Unwin, 1986.
[6] 卢升高, 等. 岩成土的磁性测量及其与土壤发育的关系[J]. 浙江大学学报, 1999, 25(6): 603– 607.
[7] 张卫国, 俞立中, 等. 环境磁学研究的简介[J]. 地球物理学进展, 1995, (8): 95– 105.
[8] Oldfield F, Yu L. The influence of particles size variations on the magnetic properties of sediments from the northeastern Irish Sea[J]. Sedimentology, 1994, 41: 1093– 1108.
[9] 董瑞斌, 等. 土壤和沉积物的磁参数及其在环境科学中的应用[J]. 科技通报, 2000, 16(6): 479– 483.
[10] Thompson R. Modelling magnetization data using SIMPLEX[J]. Physics of Earth and Planetary Interiors, 1986, 42, 113– 127.
[11] Thompson R, Bloemendal J, Dearing J A, et al. Environmental applications of magnetic minerals[J]. Science, 1980, 207: 481– 485.
[12] Oldfield F. Environmental magnetism – a personal perspective[J]. Quaternary Science Review, 1991, 10: 73– 85
[13] 卢升高. 中国土壤磁性与环境[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
[14] 朱立军, 傅平秋, 万国江. 贵州碳酸盐岩发育土壤磁学性质及其发生机理[J]. 土壤学报, 1997, 34(2): 212– 220.
[15] 俞劲茨, 卢升高. 土壤磁学[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 1991.
[16] Dearing, J A, B A Maher, F Oldfield. Geomorphological linkages between soils and sediments: the role of magnetic measurements[A]. In: K Richards, et al. (Ed.) Geomorphology and Soils[M]. London: G. Allen & Unwin, 1985. 245– 266.

(上接第 194 页)

(1) 饱水状态下长期直剪流变试验研究, 为软岩长期强度及流变参数的确定提供了有利的依据。试验研究结果表明, 研究区内软岩具有明显的时效变形特性, 在长期饱水状态下强度参数较快剪试验参数降低很多, 长期强度参数 c 值在 57~ 160 kPa 之间, φ 值在 12~ 18° 之间, 与饱水快剪强度参数 c 值 110~ 226 kPa, φ 值 18~ 27° 对比降低了约 60% 。

参考文献:

[1] 孔德坊. 工程岩土学[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
[2] 杨绪波, 黄润秋, 等. 紫坪铺水电站 2# 泄洪洞进水口边坡变形特征及其机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2 035– 2 040.
[3] Vutukuri, V S, Lama, R D, Saluja, S S. Handbook on Mechanical Properties of Rocks[M]. 1974. — , 1978.
[4] 邓荣贵, 张倬元. 锦屏水电站坝区绿片岩结构及力学特性研究[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(1): 93– 97.
[5] 黄润秋, 张倬元, 王士天, 等. 黄河拉西瓦水电站高边坡稳定性的系统工程地质研究[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1991.
[6] 曹树刚, 边金, 等. 软岩蠕变试验与理论模型分析的对比[J]. 重庆大学学报自然科学版, 2002, 25(7): 96– 98.

耕地的磁性矿物中含有较多的细颗粒物, 而撂荒地、草地和灌丛地则相对较少, 其原因可能与林地和耕地的植被及发育环境有很大的关系土壤中细颗粒的磁性物质的含量又与土壤本身的粘粒含量的呈相关关系研究区土壤中反铁磁性矿物的含量较少, 但是不同的土地利用方式下, 又有明显的区别, 其中耕地的反铁磁性物质的含量明显高于其他土壤, 可能与研究区大部分耕地是水稻土, 由于长期处于渍水的还原环境下, 导致亚铁磁性矿物分解形成反铁磁性矿物, 同时由于土壤的耕种翻土, 将底层土壤翻上, 反铁磁性矿物与表层土壤混合的原因。

致谢: 本研究的磁性测量在华东师范大学河口海岸国家重点实验室完成, 作者对于俞立中教授和张卫国副教授的大力支持, 在此特表感谢。