

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.030

考虑库岸稳定的库区水位升降控制方案

郭健, 许模, 赵勇

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要: 在西南地区的大型水电项目中, 库区内一些难于治理的大型滑坡堆积体, 常会因库水调度而复活, 因此需要对库区水位升降的幅度进行控制。以黑水河库区内已复活的某堆积体滑坡为实例, 利用滑坡 DM01 监测点垂向位移变化实测数据, 详细地分析了初期蓄水期间滑坡的动态变化规律和特征, 并拟定了库区水位升降控制方案。为了论证该控制方案的可行性, 提取了库水位等控制滑坡变形的主要影响因素, 利用逐步回归法建立了堆积体滑坡位移的回归预测模型, 对控制方案下的滑坡变形趋势值进行了预测, 结果表明拟定的控制方案能有效避免滑体再次产生复活。

关键词: 库岸稳定; 库水调度; 逐步回归; 滑坡堆积体

中图分类号: P642.22; TV 861 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0138-05

Control Scheme of Reservoir Water Level Fluctuation in Consideration of Bank Stability

GUO Jian, XU Mo, ZHAO Yong

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: During the operation of hydroelectric projects in southwestern China, several large scale landslide deposits, which are difficult to treat with, often reactivate due to reservoir a regulation. Controlling the range of water level fluctuation of the reservoir is the key point for the regular operation of hydroelectric project. In this paper, the control scheme of water level fluctuation in the Heishui River reservoir was proposed based on a reactivated landslide in the reservoir. First, the displacement variations of the landslide during the impoundment were analyzed using the monitored vertical displacement data at DM01 monitoring point of the landslide. Secondly, the main controlling factors for the landslide deformation were concluded. Finally, a prediction model for the displacement of landslide was developed using the stepwise regression method, which was used to predict the deformation of the landslide under the control scheme. The results showed that the control scheme can prevent the reactivation of the landslide.

Key words: bank stability; reservoir regulation; stepwise regression; reservoir landslide

1 研究背景

堆积体滑坡是指除黄土、黏土以外发育在第四系松散堆积层中的滑坡, 岩性主要为残坡积、洪冲积、崩积等形成的砂砾石、含砾石或碎石土^[1]。作为我国西南地区滑坡地质灾害中具有代表性的一种灾害类型, 这类滑坡多发生在山前和河谷两岸, 具有数量多、分布广、危害严重等特点。在库区, 尤其在近坝地区, 如果有难于治理的、可能复活的大型堆积体滑坡, 需要在库水调节运行方案的基础上, 进一步采取科学的库区水位升降控制方案, 以避免古滑坡体再次产生下滑而造成不可挽回的损失^[2]。刘新喜等^[3]根据三峡水库水位调

控方案和库区滑坡地下水作用的力学模式, 利用有限元模拟研究表明库水位下降速度是影响滑坡稳定性的主要因素, 为库区 175 m 水位滑坡防治提供了科学依据。王秀丽, 李恒凯^[4]从滑坡变形监测数据着手, 将监测数据分离成趋势值和随机值, 建立了滑坡变形的回归神经网络预测模型, 并用该模型对滑坡变形的趋势值进行了预测。

本文将黑水河库区为实例, 针对库区内已复活的一个块碎石土堆积体滑坡, 在详细分析初期蓄水期间堆积体滑坡的动态变化规律和特征的基础上, 设计出库区水位升降控制方案, 并利用回归预测模型对人工库水调节影响下的滑坡变形趋势值进行预测分析, 以便从理论上论证该控制方案的可行

收稿日期: 2013-09-29 修回日期: 2014-03-31 网络出版时间: 2014-05-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.030.html>

基金项目: 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金资助项目“高拱坝坝肩岩体抗滑稳定性工程地质研究”(SKLGP2012K032)

作者简介: 郭健(1984), 男, 四川人, 博士, 主要从事地质工程、岩土工程等领域的研究。E-mail: jerry.guo@hotmail.com

通讯作者: 许模(1963), 男, 重庆人, 教授, 从事环境工程地质、工程水文地质、水资源开发与保护研究。E-mail: xm@cdut.edu.cn

行性。

2 研究区基本概况

2.1 库区概况

毛尔盖水电站位于四川省阿坝州黑水河中游红岩乡至俄石坝河段,水电站坝址西距黑水县城约 26 km。电站采用高坝引水式开发,拟定坝型为碎石土心墙堆石坝,坝高 147 m,经左岸长约 16 km 的隧洞引水至下游地面厂房发电,利用水头 260 m,电站设计装机容量为 420 MW。

毛尔盖水库由黑水河主库及毛尔盖河、小黑水河两个支库组成,属于高山峡谷型水库,两岸谷坡陡峻,仅局部库尾段地形平缓,水库正常蓄水位 2 133 m,坝前壅水高 142 m,库容 5.35 亿 m^3 ,死水位 2 063 m,调节库容为 4.44 亿 m^3 ,属高坝、大型水库。

2.2 滑坡概况

滑坡位于主库区黑水河右岸,近垂直于河流流向发育。滑坡区原始地形西高东低,平均坡度 $35^\circ \sim 50^\circ$,起伏不大。地面高程 2 033~2 830 m,最大相对高差近 800 m,河谷狭窄,两岸地形陡峭。滑坡体平均厚度 35~65 m,体积约 1 341 万 m^3 ,表面有覆盖层,两侧则以完整的基岩为主。东侧突出的基岩山脊 2 150 m 高程处开挖的平台上有乡镇。滑坡区地形地貌特征见图 1。

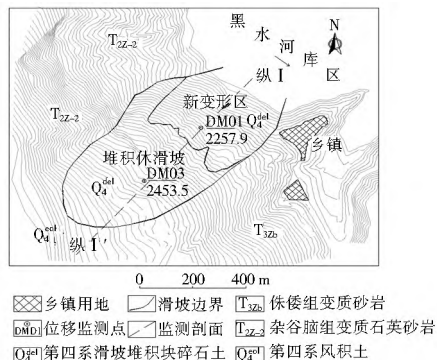


图 1 滑坡及监测点布置平面图

Fig. 1 Location of the landslide and monitoring points

滑坡属于东昆仑海西褶皱系的川西地槽区,受区域性强烈构造作用,区内岩层变形强烈。滑坡区地层岩性较为单一,覆盖层主要有第四系风积黄土、残坡积土、崩坡积碎石土、滑坡堆积块碎石土和冲洪积卵石土;基岩则为三叠系上统侏罗组变质砂岩夹碳质砂质千枚岩,以及三叠系中统杂谷脑组的变质石英砂岩。

2011 年 3 月 20 日毛尔盖大坝开始正式下闸蓄水,当年 11 月下旬,水库蓄水位高程达到 2 103 m 后,滑坡出现下滑错动,并在前缘形成新的变形区,严重威胁到下游集镇的安全。现场工程部随即停止蓄水使库水位保持稳定,并在滑坡体稳定后逐步降低库水位,同时对滑坡进行了变形监测。

根据现场调查以及资料分析,古滑坡形成于软硬岩相间又陡倾坡内的基岩岩层内,是典型的倾倒弯曲型滑坡。而古滑坡的复活表现为古滑坡体前缘堆积体解体并形成新的次级滑坡,新变形体以缓慢滑动为主要破坏形式,在缓滑下错了 20 m 左右逐渐达到新的平衡并转化为蠕滑变形(图 2)。

可见古滑坡在水库开始蓄水后并未整体复活,而产生复活的前缘堆积体也并未形成高速长距离滑动。根据对滑坡的稳定性验算,得出古滑坡整体稳定性较好,但前缘的新变形区则处于欠稳定状态,一旦库水位变化过度则前缘次级滑体很可能失稳造成灾害。因滑坡堆积体方量巨大且结构松散,不宜采用滑坡加固的工程治理手段,建议控制库区水位升降幅度防止滑坡再次复活。

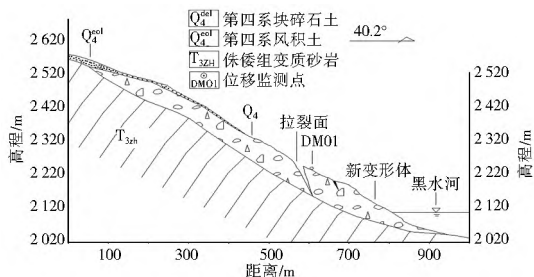


图 2 滑坡监测纵 I-I' 剖面

Fig. 2 Monitoring section I-I' of the landslide

2.3 监测方法与数据采集

2011 年 12 月建立监测基准网和监测点后,在当月 3 日至 6 日对基准网进行了两期独立的观测,在两期监测数据的平差和较差均满足要求的情况下,取平均值作为基准网的初始成果。12 月 9 日起按极坐标法对滑坡上各地表监测点进行监测,并在滑坡体区建立 BE01、BE02、BE03、BE04 共四个点组成该边坡监测的基准网和 21 个监测点。

地表位移监测时,将全部基准点和监测点统构成一个观测网,利用全站仪进行多个时段的人工观测,后期将观测数据解算成为监测点的坐标以便分析各点位移。监测周期为每 2 天 1 次,运用多期监测信息可绘制监测点的累积位移-时间关系图、位移矢量图以及变形速率曲线图等,以反映滑坡总体变形趋势。

从 2011 年 11 月下旬到次年 2 月初,库水位一直被控制在 2 095~2 100 m 高程,期间滑坡的位移累积量相对稳定。自 2 月 15 日起,为了检验滑坡对库水位下降的变形响应,项目部开始对库区有限制的持续放水,并实时监控滑坡体的变形过程。监测信息反映出前缘的新变形区变形加剧,而古滑坡后部堆积体的变形不明显。监测剖面纵 I-I' 上的 DM01 监测点(位于新变形区)高程位移随库水位变化情况见图 3,可见在 3 月上旬库水位经历了一次骤降,DM01 的垂向位移也随之增加,而在 4 月中旬后的水位上升期,DM01 的垂向位移持续增大,且变形速率有所增加。

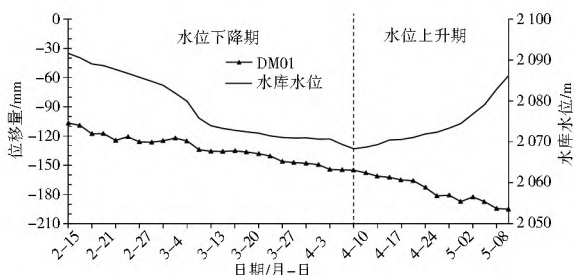


图 3 滑坡垂向位移监测曲线

Fig. 3 Monitored vertical displacement curve of the landslide

3 库区水位升降控制方案设计

通过上文可知,库水位的升降是导致滑坡失稳的重要因素,因此要防止滑坡再次复活则需控制库区水位升降的幅度。库水调节的控制目标是保证古滑坡前缘的新变形体不会再次产生大变形。

根据 DM01 监测点高程位移变化实测数据和滑坡体对库水位变化的变形响应规律,可以确定,库区每日的水位变

幅不得大于 1.0 m/d; 在高库水位条件下(水位高程大于 2 083 m),水位下降速度不得超过 0.5 m/d(高水位时滑坡体对水位下降的响应显著),特别是在 2 103 m 和 2 083 m 两个水位节点,应维持水位稳定 5 d 以上使坡体地下水恢复稳定,以防止产生更大的孔隙水压力;滑坡复活体在水位高于 2 113 m 时,对水位上升的响应敏感,在此期间水位上升速度不得超过 0.5 m/d,并且在 2 093 m 和 2 113 m 两个水位节点,应维持水位稳定 5 d 以上。综上,对电站汛前和汛期中的水位升降控制提出了库水调节方案,见表 1。

表 1 库区水位升降控制方案

Table 1 Control scheme of reservoir water level fluctuation

汛前水库水位下降控制		汛期水库水位上升控制	
水位高程	要求	水位高程	要求
高于 2 103 m	不超过 0.5 m/d	2 063~ 2 093 m	不超过 1.0 m/d
降至 2 103 m	维持该水位不少于 5 d	升至 2 093 m	维持该水位不少于 5 d
2 103~ 2 083 m	不超过 0.5 m/d	2 093~ 2 113 m	不超过 1.0 m/d
降至 2 083 m	维持该水位不少于 5 d	升至 2 113 m	维持该水位不少于 5 d
2 083~ 2 063 m	不超过 1.0 m/d	2 113~ 2 133 m	不超过 0.5 m/d

4 模型预测与分析

4.1 模型建立与预测

回归分析方法是在大量实验观测数据的基础上,找出这些变量之间的内部规律性,从而定量建立一个变量和另外多个变量之间的统计关系的数学表达式。选取滑坡监测点 DM01 高程位移变化实测数据,以及入库流量、出库流量、水位变量、降雨量、时效因子共 5 种影响滑坡变形的变量因子,在 SPSS 平台建立了滑坡变形的回归预测模型。滑坡高程位移变化量见表 2,其中方程 Y_1 对应库水位下降期,而方程 Y_2 对应库水位上升期。

以表 2 中前 26 组数据作为建模样本,用后 5 组数据进行检验。首先进行逐步线性回归,得到逐步回归方程:

$$Y_1 = -0.823 - 0.004X_1 + 0.596X_3 - 0.037X_4 - 0.386X_5 \quad (1)$$

$$Y_2 = -0.594 + 0.008X_2 - 0.204X_3 - 0.032X_4 - 0.578X_5 \quad (2)$$

由于显著性不高,式(1)、式(2)中分别剔除了出库流量 X_2 与入库流量 X_1 。式(1)中最显著的因子是水位变量 X_3 ,说明水位降低对 DM01 点的变形影响很大;式(2)中 DM01 点的变形与水位上升也存在相关性,相对式(1)中滑坡变形与水位变化的敏感性小。利用回归方程对后期的垂向位移变量进行预测,将预测结果与观测值进行比较,得出的预测误差不超过 9%。

4.2 预测结果与讨论

利用逐步回归模型,对人工控制库区水位升降幅度条件下的滑坡变形进行预测,结果见表 3。

由表 3 可见,在人工控制库区水位升降幅度的作用下,滑坡的变形总体较小:水位由 2 133 m 降至 2 063 m 期间,DM01 点的累计垂向位移在 4 个月内共为 -58.4 mm,平均变形速率为 0.5 mm/d,说明库水位调节方案有效地控制了 DM01 点所在的新变形体的变形;在水位上升的两个多月内,DM01 点累计垂向位移仅 -27.0 mm,变形速率也仅 0.4 mm/d,说明水位的速率的控制要求同样能够达到防止滑坡出现大变形的目的。

表 3 库水调节方案下 DM01 点垂向位移预测值

Table 3 Predicted vertical displacement at DM01 monitoring point under the control scheme

阶段	水位高程 /m	历时 /d	水位变量 /($m \cdot d^{-1}$)	累计垂向位移/mm	变形速率 /($mm \cdot d^{-1}$)
水位下降	2 133~ 2 103	60	0.5	-30.6	0.51
	2 103~ 2 083	40	0.5	-18.4	0.46
	2 083~ 2 063	20	1.0	-9.4	0.47
水位上升	2 063~ 2 093	30	1.0	-11.4	0.38
	2 093~ 2 113	20	1.0	-8.2	0.41
	2 113~ 2 133	20	0.5	-7.4	0.37

5 结语

为了控制库区大型古堆积体滑坡的复活,需要采取科学的库区水位升降控制方案。本文以黑水河库区内的一个块碎石土堆积体滑坡为例,利用滑坡变形区监测点实测数据,选择了库水位、降雨等控制滑坡变形的的主要影响因素,建立了滑坡变形的线性回归预测模型。从该模型对预测的滑坡变形趋势来看,通过人工控制库区水位升降幅度,可以有效防止古滑坡体再次产生大变形。

但是,滑坡变形的因素影响和机理较为复杂,本文研究方法虽然把握住了滑坡变形的趋势,但未能体现其随机性,因此将这一方法用于滑坡治理的生产实践时,还须结合实际情况,进行充分的理论分析,并进一步完善。

参考文献(References):

- [1] 刘传正. 三峡库区的地质灾害[J]. 岩土工程界, 2003, 6(6): 23-24. (LIU Chuazheng. Geological Disasters in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Geotechnical Engineering World, 2003, 6(6): 23-24. (in Chinese))
- [2] 张俅元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994. (ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG LanSheng. The Principle of Engineering Geological Analysis [M]. Beijing: Geology Press, 1994. (in Chinese))

表2 DM01点垂向位移变化量

Table 2 Variation of vertical displacement at DM01 monitoring point

日期 /月-日	垂向位移变量/mm		入库流量 X_1 / 10^5 m^3	出库流量 X_2 / 10^5 m^3	水位变量 X_3 /m	降雨量 X_4 /mm	时效因子 X_5 /d
	DM01(Y)	分段					
2-15	0		217.35	57.24	0	0.5	0
2-17	-2.40		211.08	81.70	-1.12	0	2
2-19	-8.55		203.06	80.99	-1.5	0	2
2-21	0.14		200.82	57.86	-0.43	1.5	2
2-23	-6.95		196.04	65.36	-0.92	1.5	2
2-25	3.76		191.20	65.50	-0.93	1	2
2-27	-5.27		186.05	66.68	-0.99	0.5	2
2-29	-0.37		181.08	67.19	-0.97	0.5	2
3-2	1.46		176.28	64.28	-1	1	2
3-4	2.75		167.21	92.40	-1.89	1	2
3-6	-2.95		157.64	93.8	-2	2	2
3-10	-8.89		139.52	81.69	-4.12	1.5	4
3-13	-1.67	方程 Y_1	131.84	88.35	-1.84	0.5	3
3-15	-0.21		129.12	48.40	-0.68	1	2
3-17	0.69		127.28	53.57	-0.46	0.5	2
3-20	-1.26		125.8	42.33	-0.37	0.5	3
3-22	-1.73		124.48	47.17	-0.33	1	2
3-24	-2.39		121.84	51.82	-0.66	0.5	2
3-27	-5.55		120.32	39.03	-0.38	4	3
3-29	-1.12		119.72	39.17	-0.15	4.5	2
3-31	-0.76		119.96	41.74	0.06	3	2
4-3	-1.35		118.68	40.08	-0.32	4.5	3
4-5	-4.90		118.8	51.44	0.03	1	2
4-7	-0.38		117.64	51.15	-1.29	2	2
4-10	-0.41		109.95	74.54	-1.09	3	3
4-12	-2.71		111.32	24.25	0.38	3	2
4-14	-3.42		109.98	71.18	0.63	1	2
4-17	-1.20		117.8	5.31	1.12	2	3
4-19	-2.68		118.32	62.84	0.13	1	2
4-21	-0.74		120.28	53.88	0.49	2	2
4-24	-6.81		119.68	62.74	0.85	2	3
4-26	-8.82	方程 Y_2	125.48	33.58	0.45	3.5	2
4-28	0.75		129.4	57.59	0.98	2	2
5-2	-6.52		133.96	39.92	1.14	3	3
5-4	4.69		143.92	44.62	2.31	3	2
5-6	-4.92		154.12	48.37	2.32	1	2
5-8	-6.89		171.72	64.15	3.74	2	2
5-10	-0.77		188.08	89.04	3.31	1.5	2

- [3] 刘新喜,夏元友. 库水位骤降时的滑坡稳定性评价方法研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1427-1436. (LIU Xir xi, XIA Yuan you. Research on Method of Landslide Stability Valuation During Sudden Draw down of Reservoir Level[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1428-1431. (in Chinese))
- [4] 王秀丽,李恒凯. 滑坡变形的回归-神经网络预测模型研究[J]. 人民黄河, 2012, 34(7): 90-92. (WANG Xir li, LI Heng kai. Research on Prediction Model of Regression Neural Network for Landslide Deformation

- [J]. Yellow River, 2012, 34(7): 90-92. (in Chinese))
- [5] 马平,冯永,钱海涛,等. 滑坡预报研究综述[J]. 人民黄河, 2011, 33(9): 80-82. (MA Ping, FENG Yong, QIAN Hai tao, et al. Analysis of Landslide Prediction [J]. Yellow River, 2011, 33(9): 80-82. (in Chinese))
- [6] 王震宇,孟陆波. 滑坡预报的多元回归分析方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(3): 21-23. (WANG Zhen yu, MENG Lu bo. The Multivariate Regression Analysis Method for Landslide Prediction[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14

- (3): 21-23. (in Chinese))
- [7] 付杰, 牛瑞卿. 三峡库区老蛇窝滑坡变形规律数据挖掘[J]. 人民长江, 2012, 43(23): 6-9. (FU Jie, NIU Ruiqing. Analysis on Data mining of Deformation Laws of Laoshewo Landslide in Three Gorges Reservoir area [J]. Yangtze River, 2012, 43(23): 6-9. (in Chinese))
- [8] 殷坤龙, 汪洋, 唐中华. 降雨对滑坡的作用机理及动态模拟研究[J]. 地质科技情报, 2002, 21(1): 75-78. (YIN Kunlong, WANG Yang, TANG Zhonghua. Mechanism and Dynamic Simulation of Landslide by Precipitation [J]. Geological Science and Technology Information, 2002, 21(1): 75-78. (in Chinese))
- [9] 朱冬林, 任光明, 聂德新, 等. 库水位变化对水库滑坡稳定性影响的预测[J]. 水文地质工程地质, 2002, (3): 6-9. (ZHU Donglin, REN Guangming, NIE Dexin, et al. Effecting and Forecasting of Landslide Stability with the Change of Reservoir Water Level [J]. Hydrological Geology and Engineering Geology, 2002, (3): 6-9. (in Chinese))
- [10] 彭良泉, 王钊. 对边坡稳定性分析中危险水力条件的研究[J]. 人民长江, 2003, 34(5): 39-41. (PENG Liangquan, WANG Zhao. Research on Dangerous Hydrological Condition in Slope Stability Analysis [J]. Yangtze River, 2003, 34(5): 39-41. (in Chinese))
- [11] 时卫民, 郑颖人. 库水位下降情况下滑坡稳定性评价[J]. 工程勘察, 2004, (1): 27-35. (SHI Weimin, ZHENG Yiren. Stability Evaluation of Landslide Under Reservoir Water Level Drawdown Condition [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2004, (1): 27-35. (in Chinese))
- [12] 贾淑霞. 湖北省三峡库区滑坡勘查评价几个问题的商榷[J]. 湖北地质, 2004, 16(4): 44-46. (JIA Shuxia. Some Question in the Assessment and Investigation of the Landslides in the Three Gorges Reservoir [J]. Hubei Geology & Mineral Resources, 2004, 16(4): 44-46. (in Chinese))
- [13] 殷坤龙, 汪洋, 唐中华. 降雨对滑坡的作用机理及动态模拟研究[J]. 地质科技情报, 2002, 21(1): 75-78. (YIN Kunlong, WANG Yang, TANG Zhonghua. Mechanism and Dynamic Simulation of Landslide by Precipitation [J]. Geological Science and Technology Information, 2002, 21(1): 75-78. (in Chinese))

(上接第 84 页)

- [3] 刘斯宏, 汪易森. 土工袋技术及其应用前景[J]. 水利学报, 2007, (增刊): 644-648. (LIU Sihong, WANG Yisen. Reinforcement Mechanism of Soilbags and Its Applications [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, (Supp.): 644-648. (in Chinese))
- [4] 刘斯宏, 白福青, 汪易森. 膨胀土土工袋浸水变形及强度特性试验研究[J]. 南水北调与水利科技. 2009, 7(6): 54-58. (LIU Sihong, BAI Fuqing, WANG Yisen. Experimental Study on Wetting Induced Deformation and Strength Characteristics of Soilbag Filled with Expansive Soil [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology. 2009, 7(6): 54-58. (in Chinese))
- [5] 刘斯宏, 汪易森. 岩土新技术在南水北调工程中的应用研究[J]. 水利水电技术, 2009, 40(8): 61-66. (LIU Sihong, WANG Yisen. Application of New Geotechnologies to South to North Water Diversion Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(8): 61-66. (in Chinese))
- [6] 刘斯宏, 王柳江, 李卓. 土工袋加固软土地基现场荷载试验的数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(1): 78-82. (LIU Sihong, WANG Lirjiang, LI Zhuo. Numerical Simulation of In situ Loading Tests on a Soilbag reinforced Soft Foundation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(1): 78-82. (in Chinese))
- [7] 王元战, 李蔚, 黄长虹. 墙体绕基础转动情况下挡土墙主动土压力分布[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 208-211. (WANG Yuanzhan, LI Wei, HUANG Changhong. Distribution of Active Earth Pressure with Wall Movement of Rotation about Base [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 208-211. (in Chinese))
- [8] 章瑞文, 徐日庆, 郭印. 挡土墙墙后土体应力状态及土压力分布研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(1): 111-115. (ZHANG Ruwen, XU Riqing, GUO Yin. Study on Soil Stress State and Earth Pressure Distribution Behind Retaining Wall [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2008, 42(1): 111-115. (in Chinese))
- [9] MILLIGAN W E. Soil deformations near anchored sheet pile walls [J]. Geotechnique, 1983, 33(1): 41-55.
- [10] 高江平, 俞茂宏, 胡长顺, 等. 加筋土挡墙土压力及土压力系数分布规律研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 582-584. (GAO Jiangping, YU Maohong, HU Changshun. Study on the Distributive Rule of the Earth Pressure and Its Coefficient of the Reinforced earth Wall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(5): 582-584. (in Chinese))