

文章编号: 1000-7598 (2010) 05-1633-06

高边坡变形非线性时变统计模型研究

谈小龙^{1,2}, 徐卫亚^{1,2}, 梁桂兰¹, 孟永东³, 张金龙¹

(1. 河海大学 岩土工程科学研究所, 南京 210098; 2. 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098;
3. 三峡大学 土木水电学院, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 基于高边坡长期变形监测资料, 深入分析了边坡变形的影响因素, 建立边坡非线性时变统计监控模型, 并将模型应用于锦屏一级水电站边坡工程。通过典型测点长期监测资料的分析, 确定时效和降雨是影响边坡变形的 2 个主要因素, 并给出了各自的表述形式, 在 Matlab 平台上, 采用非线性回归方法得到边坡非线性时变统计模型的参数。在此基础上, 根据边坡变形拟合残差时序, 采用 ARMA 模型方法进行拟合和预测, 对边坡非线性时变模型的拟合和预测进行修正。结果表明, 模型能较好地描述高边坡的变形特征, 并且具有很好的拟合和预测精度。

关 键 词: 高边坡位移; 非线性; 时变统计模型; ARMA 模型

中图分类号: TU 471

文献标识码: A

Research on nonlinear time series evolution statistic model of high slope displacements

TAN Xiao-long^{1,2}, XU Wei-ya^{1,2}, LIANG Gui-lan¹, MENG Yong-dong³, ZHANG Jin-long¹

(1. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. School of Civil and Hydroelectric Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang Hubei, 443002, China)

Abstract: Based on long term displacement monitoring data of high rock slope, the factors of slope displacement are presented firstly. Then the monitoring model for high rock slope, called nonlinear time series evolution statistic monitoring model is established. It is also applied to the high slope project of Jinping Hydropower Station. Time-effect and rainfall are assumed as two main factors of high slope displacement; and their formulas are also presented through the analysis of long term monitoring data. The parameters of the monitoring model are obtained by the nonlinear regression technique on the platform of Matlab. Meanwhile the monitoring model is improved by using ARMA method to fit and predict the residual of regression of slope displacement. The result shows that the monitoring model can characterize the behavior of high slope displacement and has a reliable fitting and predicting precision.

Key words: high slope displacement; nonlinearity; time series evolution statistic model; ARMA model

1 引 言

边坡是内外动力因素共同作用的一个复杂系统, 变形必然也是内外因素共同作用的外在表现。变形监测是确保边坡工程安全的重要手段, 根据变形监测数据, 在研究边坡变形主要影响因子的基础上, 建立边坡变形统计模型, 对边坡变形进行预测^[1-3], 从而判断边坡的变形趋势和安全状态。

变形建模就是建立边坡变形的原因量和响应量之间的函数关系, 即利用变形监测信息, 确定边坡变形的的主要影响因子, 建立反映边坡变形规律的

函数关系, 进而预测边坡变形演化趋势, 并可根据计算值与实测值之间的对比分析来对边坡状态作出安全评价。

2 高边坡变形影响因素初步分析

2.1 时效特性

高边坡开挖引起的变形可分为两种基本性质^[4-5]: 一种是浅表改造变形, 另一种是时效变形。高边坡变形失稳主要表现为随时间持续发展的时效变形过程, 当累积到一定程度时边坡将进入加速变形阶段^[6-7], 进而发生破坏或滑坡, 因此变形的时效特

收稿日期: 2008-12-30

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 50539110); 国家科技支撑计划 (No. 2008BAB29B01); 国家科技支撑计划 (No. 2006BAB04A02) 资助课题。

第一作者简介: 谈小龙, 男, 1976 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事边坡工程安全监测研究。E-mail: tanxiaolong@hhu.edu.cn

性研究是岩石高边坡变形稳定与控制的基础^[8-14], 有效的方法是基于大量的室内试验和现场观测资料, 观察变形与控制因素(时间、应力、稳定等)之间的函数关系, 建立边坡变形的经验或半经验统计模型, 并预测失稳破坏是否会发生。这种方法从直观变形破坏现象出发分析其规律, 在边坡工程中运用较为普遍, 也积累了比较多的成功经验, 其中代表性的有 Saito, Voight 等学者的研究成果^[15-16]。按照函数形式岩石经验蠕变公式大体可归纳为 3 种类型:

幂数型, 其表达式为

$$y(t) = c_1 t^{c_2} \quad (1)$$

对数型, 其表达式为

$$y(t) = c_0 + c_1 \ln t \quad (2)$$

指数型, 其表达式为

$$y(t) = c_0 (1 - e^{-f(t)}) \quad (3)$$

国外在研究边坡破坏及滑坡时常用的是 Voight 等人根据大量试验总结出的研究成果^[17]:

$$\dot{y}(t) = [c_0(\alpha - 1)(t_f - t) + \dot{y}(t_f)^{1-\alpha}]^{1/(1-\alpha)} \quad (4)$$

式中: t_f 为破坏时间; $\dot{y}(t)$ 为位移速率; $\dot{y}(t_f)$ 为破坏时的位移速率; c_0 、 α 为常数。

式(1)~(3)是描述边坡时效变形的基本函数形式, 需要根据需要进行选择, 其中式(2)在岩质边坡的安全监控中应用较多。式(4)则能较好地描述边坡加速破坏。

由于实际边坡的环境与试验室有较大区别, 由试验结果推导的流变模型往往不能直接用于实际工程, 但可根据室内流变试验成果拟定边坡时效因子的函数形式。在试验研究基础之上, 通过工程变形长期的观测资料, 建立边坡变形时变统计模型, 对于边坡变形的实时分析、预测等都有着重要的意义。若缺少室内流变试验成果, 则可参照上述公式建立边坡变形统计模型, 然后进行比较, 选择相关系数较高的函数形式。

2.2 降雨因素

外界环境(如降雨、施工扰动等)对边坡变形都会产生直接的影响, 降雨则是边坡变形的主要因素之一, 往往也是边坡失稳的触发因素。岩质边坡中的软弱夹层, 有雨水渗入就会恶化其性状, 使之抗剪强度降低, 从而引起边坡变形和破坏。但降雨对边坡变形的影响非常复杂, 不同的降雨频率、历时、强度、累计量对边坡变形的影响也不尽相同。精确地刻画降雨对边坡变形的影响目前还是很难做

到的, 本文在边坡变形时变统计模型中降雨因子采用有效降雨量进行描述。

3 锦屏一级水电站左岸高边坡变形非线性时变统计模型

3.1 工程情况

锦屏一级水电站位于四川省盐源县、木里县交界的雅砻江干流, 枢纽区为典型的深切 V 型峡谷, 相对高差 1 500~1 700 m。左岸为千米以上的高陡边坡, 基岩裸露, 坡度为 55°~70°。边坡规模大, 工程条件复杂, 岩体卸荷强烈, 并发育有断层、层间挤压带、深部裂缝, 场地地质条件复杂。拱坝左岸开挖边坡高度达到 500 m 级。左岸拱坝开挖边坡、左岸导流洞出口开挖边坡都存在变形拉裂岩体, 工程边坡的安全稳定性问题十分突出。因此, 在左岸坝肩、导流洞出水口等边坡上除布置了大量的内观监测仪器, 在重点区域也布置了大量外观监测点。

通过对锦屏一级水电站左岸边坡变形性状和外观监测数据初步分析可知, 边坡岩体的变形主要以时效变形为主, 同时, 还与降雨量等环境因素有关。在降雨时以及后一段时间, 变形有明显增大的趋势。时效变形是影响开挖完成后的边坡岩体变形的最主要组成部分, 其次是降雨对边坡的影响。

3.2 影响因素及其基本形式确定

3.2.1 时效因子

图 1 为在岩石全自动流变伺服仪上得到的锦屏一级水电站左岸边坡典型岩体(大理岩)的三轴流变全程曲线。由图可见, 岩石三轴流变曲线可分为 3 个阶段: 初始流变阶段 OA, 在该阶段里岩石流变速率很快衰减为某一不为 0 的恒定值; 稳态流变阶段 AB, 在该阶段内岩石流变速率基本保持不变, 对应的流变速率称为稳态流变速率; 加速流变阶段 BC, 该阶段内岩石流变速率迅速增大, 直至破裂。

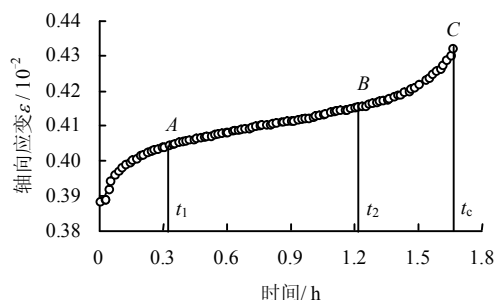


图 1 典型岩石的流变全程曲线

Fig 1 Rheological behavior curve of typical rock sample

对于 OA 和 AB 的流变, 可以采用对数型的岩石经验流变公式去拟合, 即式(2)。对于加速流变

阶段 BC, 采用幂数型的岩石经验流变公式, 即式 (1) 来描述岩石加速流变阶段, 充分反映岩石加速流变特性。

事实上, 在式 (1) 中, 当 $C_2 = 1$ 时, 应变与时间为线性关系; 当 $C_2 \neq 1$ 时, 此时应变与时间的关系为非线性; $C_2 < 1$ 时随着时间的增长, 应变速率逐渐减小, 而 $C_2 > 1$ 时随着时间的增长, 应变速率逐渐增大。参数 C_2 的变化, 能够充分地反映岩石的加速流变特性。

根据室内流变试验结果和研究分析, 拟定边坡变形的时效因子的描述为

$$y_{\varepsilon}(t) = c_0 + c_1 \ln t + c_2 t^{c_3} \quad (5)$$

式中: $y_{\varepsilon}(t)$ 边坡时效变形, t 为自初始监测开始的累计天数, c_0 、 c_1 、 c_2 、 c_3 即时效因子系数, c_0 对应于初始流变阶段的变形值; $c_1 \ln t$ 对应于稳态流变阶段的变形值; $c_2 t^{c_3}$ 则对应于加速流变阶段的变形值。

3.2.2 降雨因子和形式

鉴于降雨对边坡变形的影响复杂, 本文采用有效降雨量来进行处理, 具体做法是选取观测之日前一个月日内降雨量, 并与观测之日间隔天数乘以 0.8 进行折减并累计求和, 作为降雨因子 P 的值。

$$P = \sum_{i=0}^{T-1} 0.8^i R_i \quad (6)$$

$$y_p(t) = c_4 \sum_{i=0}^{T-1} 0.8^i R_i \quad (7)$$

式中: T 为观测当月的天数; R_i 为距离观测第 i 天的降雨量。

3.2.3 边坡变形非线性时变统计模型

考虑时效和降雨作为主要影响因素, 得到高边坡变形监测资料的统计模型为

$$\hat{y} = y_{\varepsilon}(t) + y_p(t) = c_0 + c_1 \ln t + c_2 t^{c_3} + c_4 P \quad (8)$$

式中: c_0 、 c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 为常数; $\hat{y}$ 为拟合值; t 为自初始监测开始的累计天数。

3.3 边坡变形非线性统计模型参数确定

选取锦屏一级水电站左岸边坡一个典型外观测点 (累计值最大、变形速率最大的一个变形点 TP12-1) 位移观测数据 (2005 年 12 月~2008 年 2 月, 见表 1) 建立模型, 并作出分析。

根据表 1 中提供的数据在 matlab 平台上拟合计算分析, 获取模型参数 c_0 、 c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 分别为 0.567 32、0.609 98、0.000 2、1.273 7、0.002 653 1, 得到相应的拟合值及残差, 见表 2。

表 1 TP12-1 位移观测数据

Table 1 Observed data of displacements of TP12-1

监测时间 / 年-月	时间 间隔 / d	有效 降雨量 / mm	位移 / mm	监测时间 / 年-月	时间 间隔 / d	有效 降雨量 / mm	位移 / mm
2005-12	1	0.6	0.3	2006-11	336	14.1	15.3
2006-01	31	1.3	3.7	2006-12	365	0.6	14.9
2006-02	62	0.6	7.4	2007-01	396	0.6	18.2
2006-03	90	1.9	2.9	2007-02	427	1.3	22.4
2006-04	121	20.5	9.0	2007-03	455	1.9	23.5
2006-05	151	65.3	3.9	2007-04	486	18.6	25.7
2006-06	182	75.5	7.4	2007-05	516	67.8	29.2
2006-07	212	147.2	9.0	2007-06	547	130.6	30.6
2006-08	243	156.2	12.8	2007-07	577	143.4	31.0
2006-09	274	115.2	11.3	2007-08	608	151.0	33.8
2006-10	305	48.6	13.4				

表 2 边坡变形非线性时变统计模型拟合值

Table 2 Fitting values of nonlinear statistic time series evolution model

监测时间 / 年-月	位移 / mm		残差 / mm	监测时间 / 年-月	位移 / mm		残差 / mm
	实测值	拟合值			实测值	拟合值	
2005-12	0.3	0.5	-0.2	2006-11	15.3	15.2	0.1
2006-01	3.7	3.7	0.0	2006-12	14.9	16.9	-2.0
2006-02	7.4	4.6	2.8	2007-01	18.2	18.8	-0.6
2006-03	2.9	5.4	-2.5	2007-02	22.4	20.8	1.6
2006-04	9.0	6.2	2.8	2007-03	23.5	22.8	0.7
2006-05	3.9	7.2	-3.3	2007-04	25.7	25.0	0.7
2006-06	7.4	8.2	-0.8	2007-05	29.2	27.3	1.9
2006-07	9.0	9.3	-0.3	2007-06	30.6	29.8	0.8
2006-08	12.8	10.6	2.2	2007-07	31.0	32.3	-1.3
2006-09	11.3	12.1	-0.8	2007-08	33.8	35.0	-1.2
2006-10	13.4	13.6	-0.2				

从计算得到的模型参数可以看出, 时效变形是边坡变形的主要影响因素, 而降雨对边坡变形的影响相对较小。在时效变形各参数 (c_0 、 c_1 、 c_2 、 c_3) 对变形贡献最大的是初始阶段和稳态阶段的变形, 加速阶段变形则很小, 说明边坡变形目前处于稳态变形阶段。非线性统计模型拟合精度在 0.9 以上, 模型能较好地反映边坡时效变形。

3.4 残差序列的 ARMA 模型

考虑了边坡时效变形和降雨因素的影响, 但实际上边坡变形影响因素多而复杂, 有些影响因素难以用确定的表达式去描述。研究这些非确定性的影响因素将有助于提高边坡变形经验公式的拟合和预测精度。

由时间序列理论, 可将非平稳时序分解为确定项和随机项两部分。确定项用与时间有关的确定性函数 (如多项式、指数或对数函数等) 拟合。随机项则表示平稳的随机成分, 可用 ARMA 模型加以拟合, 将两者预测的结果叠加则可提高预测精度。

边坡变形监测数据也是一个时间序列,可采取上述思路进行研究,即用边坡变形时变统计模型描述确定项部分,对随机项,建立模型拟合残差的 ARMA 模型。在对边坡变形作预测时,可将确定项(非线性时变统计模型)的预测值和随机项(残差 ARMA 模型)的预测值进行叠加,得到更好的预测结果和较高的预测精度。

3.4.1 ARMA (n, m) 模型

时序 $\{V_t\}$ 可拟合成线性随机差分方程:

$$V_t - \phi_1 V_{t-1} - \phi_2 V_{t-2} - \cdots - \phi_p V_{t-p} = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \cdots - \theta_q a_{t-q} \quad (9)$$

式中: $\phi_i (i=1, 2, \cdots, p)$ 为自回归参数; $\theta_i (i=1, 2, \cdots, q)$ 为滑动平均参数; a_t 为残差。

当式(9)能够正确地揭示时序的结构和规律时,则 $\{a_t\}$ 为白噪声,成为具有 p 阶自回归部分、 q 阶滑动平均部分的 ARMA(p, q) 模型。

令残差时序 $\{X_t\}$ (随机项) 为边坡监测所得实测时序 $\{Y_t\}$ 与边坡时变统计模型拟合值 $\{\hat{Y}_t\}$ (确定项) 之差,即

$$X_t = Y_t - \hat{Y}_t, \quad (t=l+1, l+2, \cdots, l+n) \quad (10)$$

3.4.2 模型识别与模型定阶

模型识别是建模的关键。以相关分析为基础来识别模型与确定模型阶数。先计算残差样本的自协方差函数 R_k 、自相关函数 ρ_k 和偏相关函数,并残差自相关函数和偏自相关函数图,如 ρ_k 拖尾、 ϕ_{kt} 截尾,识别为 AR(p) 模型; ϕ_{kt} 拖尾、 ρ_k 截尾,识别为 MA(q) 模型; ρ_k 、 ϕ_{kt} 均拖尾,识别为 ARMA(p, q) 模型。

3.4.3 模型确定与残差预测

根据估计参数和模型阶数,可确定残差时序 $\{X_t\}$ 的 ARMA(p, q) 模型:

$$X_t - \phi_1 X_{t-1} - \phi_2 X_{t-2} - \cdots - \phi_p X_{t-p} = \theta_0 + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \cdots - \theta_q a_{t-q} \quad (11)$$

则根据已知的残差时序的 n 个残差值,得到 m 步预测值(非平稳时序的随机项)为

$$\hat{X}_n(m) = \theta_0 + \phi_1 \hat{X}_{n+m-1} - \phi_2 \hat{X}_{n+m-2} - \cdots - \phi_p \hat{X}_{n+m-p} - \theta_1 \hat{a}_{n+m-1} - \theta_2 \hat{a}_{n+m-2} - \cdots - \theta_q \hat{a}_{n+m-q} \quad (12)$$

3.4.4 考虑残差的边坡变形时变统计模型

边坡监测变形时序 $\{S_t\}$ 的预测由由边坡非线性时变统计模型 $\{Y_t\}$ 的预测值与残差时序 $\{X_t\}$ 的预测值叠加。

$$S_t = \hat{Y}_t + \hat{X}_t, \quad t=l+n+1, l+n+2, \cdots, l+n+m \quad (13)$$

由表 2 可得,残差时序为 $\{-0.6 \ 3.9 \ -0.5 \ -1.8 \ -3.1 \ -1.4 \ 0.2 \ -0.6 \ 2.2 \ 0.6 \ 2.8 \ 1.0 \ -1.6 \ -0.8 \ 1.2 \ -0.6 \ -0.8\}$, 残差平稳性的检验是平稳的。

计算 $\hat{R}_k$, $\hat{\rho}_k$ 和 ϕ_{kk} , 并绘制成图 2, 识别残差序列为 AR(n) 模型, $n=14$ 。

分别采用边坡变形非线性时变统计模型和残差 ARMA 模型对未来 6 个时刻的边坡变形值进行预测,结果见表 3。由表 3 可以看出,考虑时效和降雨因素的非线性统计模型的预测值相对误差都在 3% 以内,表明考虑时效和降雨因素的非线性统计模型考虑时效和降雨为主要因素的合理性和较好的预测性能。

采用 ARMA 模型对残差序列进行建模,并与考虑时效和降雨因素的非线性统计模型预测结果进行叠加,则能得到更高的预测精度。从分析结果看,考虑残差的考虑时效和降雨因素的非线性统计模型在边坡变形短期预测中保持了更高的预测精度,并对较长时间的预测效果也较好。非线性统计模型预测的相对误差绝对值的平均值为 2.2%,考虑残差的非线性统计模型预测仅为 1.3%。

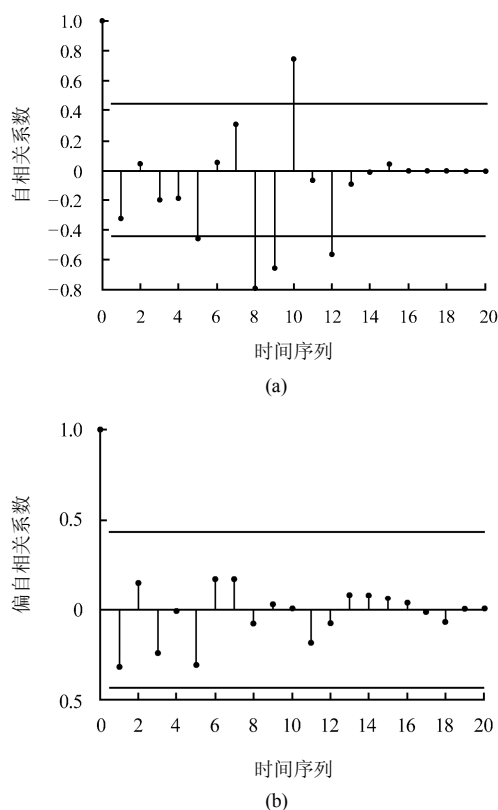


图 2 残差自相关函数和偏自相关函数图
Fig.2 Auto correlation and partial correlation coefficient of residual

表3 考虑残差的非线性统计模型预测结果

Table 3 Comparative analysis of prediction results between multi-factors nonlinear statistics model and multi-factors nonlinear statistics model with residual-fitting

监测 时间 / 年-月	位移 实测值 / mm	非线性拟合			残差 预测值 / mm	非线性拟合 (ARMA 残差修正)		
		预测值 / mm	绝对 误差 / mm	相对 误差 / %		预测值 / mm	绝对 误差 / mm	相对 误差 / %
2007-09	37.8	37.5	0.3	0.9	0.4	37.9	-0.1	0.3
2007-10	39.3	40.3	-1.0	2.6	-0.9	39.4	-0.1	0.3
2007-11	43.0	43.4	-0.4	0.8	-0.3	43.1	-0.1	0.2
2007-12	46.9	46.3	0.6	1.3	0.4	46.7	0.2	0.4
2008-01	49.0	49.6	-0.6	1.2	-0.4	49.2	-0.2	0.4
2008-02	51.5	53.0	-1.5	2.9	0.1	52.9	-1.4	2.7

4 结 论

(1) 通过分析岩石高边坡变形影响因素,并结合锦屏一级水电高边坡工程,依据室内典型岩石的流变试验成果,对边坡变形的时效因子形式进行确定,对降雨因素则采用有效降雨量来进行描述,从而建立考虑时效和降雨影响的边坡变形时变统计模型。

(2) 结合锦屏一级水电高边坡工程典型测点的变形监测数据来,建立了边坡变形非线性时变统计模型,在 Matlab 平台上确定模型的各项参数。拟合结果显示,此模型能较好地描述边坡变形随时间变化的特性。

(3) 对边坡变形非线性时变统计模型的拟合残差建立 ARMA 模型,采用 ARMA 模型对残差时序进行预测。将残差预测值和边坡非线性统计模型预测值进行叠加,得到考虑 ARMA 残差修正的预测值。边坡变形非线性统计模型的预测精度能达到工程的要求,但考虑 ARMA 残差修正的边坡变形统计模型则能得到更高精度的预测结果。

参 考 文 献

- [1] 陈德基, 余永志, 马能武, 等. 三峡工程永久船闸高边坡稳定性研究中的几个主要问题[J]. 工程地质学报, 2000, 8(1): 7—15.
CHEN De-ji, YU Yong-zhi, MA Neng-wu, et al. Some main problems on the stability of high permanent ship lock slope for Three Gorges Project[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2000, 8(1): 7—15.
- [2] 节斌. 综合运用非线性回归和时间序列分析研究边坡变形[J]. 测绘科学, 2003, 28(3): 52—55.
JIE Bin. Study on slope deformation with the nonlinear regression and time series analysis[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2003, 28(3): 52—55.
- [3] 张志诚, 夏丽. 船闸高边坡岩体形变多因素时变预测模型研究[J]. 人民长江, 2006, (37): 92—93.
ZHANG Zhi-cheng, XIA Li. Study on time series evolution forecasting model of shiplock high slope deformation[J]. *Yangtze River*, 2006, (37): 92—93.
- [4] 郑东健, 顾冲时, 吴中如. 边坡变形的多因素时变预测模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3180—3184.
ZHENG Dong-jian, GU Chong-shi, WU Zhong-ru. Time series evolution forecasting model of slope deformation based on multiple factors[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(17): 3180—3184.
- [5] 朱红五, 马水山. 三峡工程永久船闸高边坡岩体变形监测及变形特征分析[J]. 长江科学院院报, 1998, 15(6): 21—26.
ZHU Hong-wu, MA Shui-shan, LI Duan-you. Displacement monitoring and deformation characteristic analysis for permanent shiplock high slopes of TGP[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1998, 15(6): 21—26.
- [6] 李建林, 刘杰, 王乐华. 多因素作用下隔河岩电站厂房高边坡变形机理及岩体稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1289—1295.
LI Jian-lin, LIU Jie, WANG Le-hua. Studies on deformation mechanism and rock mass stability of high slopes of Geheyan Power Station under multiple factors[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(9): 1289—1295.
- [7] 张贵科, 徐卫亚, 石安池. 三峡船闸高边坡及中隔墩变形影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(3): 315—320.
ZHANG Gui-ke, XU Wei-ya, SHI An-chi. Analysis of influence factors on deformation of high slope and central pier of TGP permanent shiplock [J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2006, 34(3): 315—320.
- [8] 张斌, 刘高, 聂德新, 等. 高速公路泥岩边坡时效变形破坏机理分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 1988—1993.
ZHANG Bin, LIU Gao, NIE De-xin, et al. Mechanism of time dependent deformation and failure of mudstone slope of express highway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(12): 1988—1993.
- [9] 李术才, 吕爱钟, 傅冰清. 三峡升船机及临时船闸时效变形的分析预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增刊): 2005—2008.
LI Shu-cai, LÜ Ai-zhong, FU Bing-qing. Analysis and prediction study on time dependent deformation of the shiplift and the temporary shiplock in the Three Gorges Project[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(Supp.): 2005—2008.

- [10] 丁秀丽, 付敬, 刘建, 等. 软硬互层边坡岩体的蠕变特性研究及稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3410—3418.
DING Xiu-li, FU Jing, LIU Jian, et al. Study on creep behavior of alternatively distributed soft and hard rock layers and slope stability analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(19): 3410—3418.
- [11] 黄润秋. 岩石高边坡的时效变形分析及其工程地质意义[J]. 工程地质学报, 2000, 8(2): 148—153.
HUANG Run-qiu. Time-dependent deformation of a high rock slope and its engineering geological significance[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2000, 8(2): 148—153.
- [12] 邓华锋, 李建林, 易庆林, 等. 软岩高边坡开挖卸荷变形研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1731—1734, 1740.
DENG Hua-feng, LI Jian-lin, YI Qing-lin, et al. Research on unloading deformation of soft rock high slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(6): 1731—1734, 1740.
- [13] 侯公羽. 岩石蠕变变形的混沌特性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 1909—1914.
HOU Gong-yu. Study of chaotic characteristics of rock creep[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(7): 1909—1914.
- [14] 刘晓, 唐辉明, 刘瑜. 基于集对分析和模糊马尔可夫链的滑坡变形预测新方法研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3399—3405.
LIU Xiao, TANG Hui-ming, LIU Yu. A new model for landslide displacement prediction based on set pair analysis and fuzzy-Markov chain[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(11): 3399—3405.
- [15] SAITO M. Forecasting the time of occurrence of slope failure[C]//Proceedings of 6th International Congress of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Montreal: [s. n.], 1965: 537—541.
- [16] VOIGHT B. A relation to describe rate-dependent material failure[J]. **Science**, 1989, 243: 200—203.
- [17] VOIGHT B. A method for prediction of volcanic eruption[J]. **Nature**, 1988, 332: 125—130.