

贝叶斯信息标准在滑坡因子敏感性分析中的应用

李雪平, 唐辉明

(中国地质大学 工程学院, 武汉 430074)

摘 要: 滑坡因子敏感性分析是滑坡预测和治理的重要前提。以巫山县新址西区作为试验区, 运用滑坡影响因素与历史滑坡之间建立的 Logistic 回归模型, 通过贝叶斯信息标准进行模型优劣程度的比较, 以期得出本区滑坡因子的敏感程度。设计了逐个加入影响因子进行非嵌套模型的优劣程度对比的试验方法。试验区滑坡因子敏感程度计算结果排队依次为: 岩性、高程、距有影响构造线距离、坡度、坡向、坡形。试验为区域斜坡稳定性评价提供了一种新的、可靠的方法。

关 键 词: 贝叶斯信息标准; BIC; 滑坡; 因子; 敏感性

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Application of Bayesian information criterion to sensitivity analysis of landslide factor

LI Xue-ping, TANG Hui-ming

(Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: It is important to analyze sensitivity of landslide factor. The west area in new Wushan County was taken as an experimental area. Logistic model was set up for which independent variables are landform, physiognomy, lithological character and geological structure conditions and dependent variable is historical landslide condition. The sensitivity degree is expected according to Bayesian information criterion. The authors design test method which taken in factor one by one and compared with superior degree on not nested model. The results of sensitivity degree are lithological character, height, distance to effected structure line, gradient, slope direction, slope shape. The experiment provides a new and credible method for evaluating slope stability.

Key words: Bayesian information criterion; BIC; landslide; factor; sensitivity

1 引 言

滑坡灾害是山地主要灾害之一, 具有分布广泛, 发生频繁, 成灾快速等特点, 给山区的经济发展造成极大危害。区域滑坡空间预测主要是通过对滑坡产生条件进行分析, 确定出对滑坡作用最有利的因素组合, 根据这些有利的因素组合来预测区域上或某斜坡地段将来产生滑坡的可能性, 圈定可能产生滑坡的影响范围, 预测可能造成的危害。单体滑坡敏感因子分析方法主要通过分析稳定性系数 k 与抗剪参数 c , ϕ 和地震强度 a 的关系, 找出敏感性最强的因素^[1,2]; 或采用灰色关联分析方法^[3]、正交试验设计^[4]等方法进行敏感性因素评价。

Logistic 回归模型是对二分类因变量 (因变量 y 只取两个值) 进行回归分析时经常使用的统计分析方法。与线性回归不同, Logistic 回归是一种非线性

性模型, 普遍采用的参数估计方法是最大似然估计法。可以证明, 在随机样本条件下, Logistic 模型的最大似然估计具有一致性、渐进性和渐进正态性。

由于一个地区历史滑坡的发生用有或无来表示, 所以可以运用区域滑坡影响因素与历史滑坡之间建立的 Logistic 模型, 通过贝叶斯信息标准进行模型优劣程度的比较, 对影响区域滑坡的因素进行对比, 得出区域滑坡敏感因子的结论, 为生产实际服务。

2 基本理论

2.1 似然比 (L.R.)

假如采用极大似然估计法, 并且希望检验数据是否支持某些参数限制条件, 如检验 β 等于 0 的原假设, 一个非常方便的检验方法就是似然比检验^[5,6]。

统计学已经证明, 在大样本时, 如果两个模型

之间有嵌套关系,那么两个模型之间的对数似然值乘以-2的结果(简记为-2LL)之差近似服从 χ^2 分布。这一检验统计量称为似然比(likelihood ratio,简记为) $[7\sim 10]$ 。现用一个例子加以说明。一个模型 M_1 中有自变量 x_k ,另一个模型 M_2 中包含 M_1 中所有其他自变量,但没有自变量 x_k ,则定义 M_2 嵌套于 M_1 。也就是说, M_1 中包含着 M_2 。如果要进行L.R.检验的话,两个模型的-2LL之间的差为

$$L.R. = (-2L\hat{L}_{m_2}) - (-2L\hat{L}_{m_1}) = -2\ln \frac{\hat{L}_{m_2}}{\hat{L}_{m_1}} \quad (1)$$

式中 $L\hat{L}_{m_1}$ 为原模型 M_1 的最大似然函数的对数; $L\hat{L}_{m_2}$ 为省略模型 M_2 的最大似然函数的对数。

两者之间的差乘以-2近似服从于 χ^2 分布,其自由度等于省略自变量的数目。

2.2 贝叶斯信息标准(BIC)

对于非嵌套模型,L.R.检验不再适用。有关信息测度指标如AIC,SC,BIC,BIC'等可以用来比较非嵌套模型。贝叶斯信息标准(Bayesian information criterion,记为BIC) $[10]$ 是使用得越来越多的信息指标。BIC有两种不同的类型。一种BIC指标用来比较所设模型与饱和模型;另一种是用来比较所设模型与零假设模型(即只包含常数项的模型)。本文采用了第2种BIC模型。其统计公式为

$$BIC' = -G_s + d \cdot f'_s \ln n \quad (2)$$

式中 $d \cdot f'_s$ 为自变量数目; G_s 为-2乘以所设模型与零假设模型之间的最大似然比之差的函数,即

$$G_s = -2L\hat{L}_0 - (-2L\hat{L}_s) = 2L\hat{L}_s - 2L\hat{L}_0 \quad (3)$$

式中 $L\hat{L}_s$ 为所设模型的对数似然比; $L\hat{L}_0$ 为零模型的对数似然比。

对于零模型而言, G_0 和 $d \cdot f'_s$ 的值为0,所以 BIC'_0 的值也为0。因此, $BIC'_s > 0$ 表示所设模型比零假设模型要差;而 $BIC'_s < 0$ 表示所设模型比零假设模型要好。在其他条件相同时,具有最小BIC或BIC'值的模型最好。好多少则取决于不同模型之间BIC或BIC'值差异幅度。Raftery $[10]$ 在Jeffreys $[8]$ 研究的基础上,提出了根据BIC或BIC'值差别来判断一个模型比另一个模型优越程度的标准,如表1所示。因为BIC或BIC'绝对值更大的负值其模型更好,如果 $(BIC_1 - BIC_2) > 0$,说明第2个模型更好。

表1 根据BIC或BIC'指标差异绝对值确定模型优越程度
Table 1 Superiority degree of model according to difference of BIC & BIC'

差异绝对值	优越程度	差异绝对值	优越程度
0~2	弱	6~10	强
2~6	肯定强	>10	非常强

3 试验设计

选取影响滑坡发生的 k 种因素为自变量 x ,即 x 取值范围为1,2,..., k 。将试验区历史滑坡发生情况作为因变量 y ,发生滑坡地段 y 设为1,未发生滑坡地段 y 设为0。建立 y 对 x 的Logistic回归模型,计算模型对数似然比,计算贝叶斯信息标准BIC',比较大小,得到区域滑坡因子敏感情况。基本步骤如下:

(1) 计算截距模型 M_0 的对数似然比 $L\hat{L}_0$ 。

(2) 在截距模型 M_0 的基础上,加入一个自变量 x_i ($i=1, 2, \dots, k$),生成模型 M_{1i} ,计算对数似然比 $L\hat{L}_{1i}$, BIC'_{1i} 。

(3) BIC'_{1i} 排序,其顺序可以看出各自变量作用的大小。选取使 BIC'_{1i} 最大的自变量(假设为 x_j)加入到模型中,得到模型 M_1 。

(4) 在 M_1 的基础上,加入除 x_j 外的 $(k-1)$ 个自变量中的一个,生成模型 M_{2i} ,计算对数似然比 $L\hat{L}_{2i}$, BIC'_{2i} 。

(5) 同第3步,以此类推。

结束条件是模型中的某一变量的相伴概率Sig值大于设计者所设定的显著性水平 α 。

4 工程实例

4.1 试验区地质环境特征

本文以三峡库区巫山县新城址区为试验区。巫山县位于四川盆地东缘巫山山脉腹地,北依大巴山。县城地处三峡水库库段中部。水库蓄水后,回水位为175.4 m。除北门坡部分居民区外,绝大部分被淹没。新址包括旧城以北的高台地、大宁河两岸低山缓斜坡地区、长江南岸南陵、老鹰背地区,主体在城址西区。故本文重点讨论新址西区。

新址地处淮阳山字型构造西翼反射弧一大巴山弧形构造、川东褶皱带及川鄂湘黔隆起褶皱带三大构造的结合部位,地质构造体系复杂,褶皱、断裂发育。基岩以三叠系滨海相碳酸盐岩为主,其次为陆相砂泥质岩类。主要包括:三叠系下统嘉陵江组第4段(T_{1j}^4)浅灰色中厚层灰岩、白云岩、泥质白云岩。三叠系中统巴东组第1段(T_2b^1)灰、深灰色泥质灰岩、白云质灰岩;第2段(T_2b^2)紫红色泥岩夹粉砂质泥岩、粉砂岩;第3段(T_2b^3)灰白色白云质灰岩、泥质白云岩、深灰色中厚层灰岩。新址西区的代表性滑坡有:秀峰寺滑坡、四道桥—邓家屋场滑坡 $[11]$ 。

4.2 滑坡影响因子选取及分类

斜坡稳定性一方面受岩性组合、岩层产状、坡

度、坡高等内在因素的影响, 另一方面还受降雨、人类活动等外部因素的影响。试验区缺乏降雨量大小与滑坡发生之间的关系数据, 故该因素未纳入影响因子范畴。由于主要考虑影响区域滑坡的敏感因子, 侧重于评估影响区域斜坡稳定性的宏观特征, 故单个滑坡体的几何因子和物理力学因子未纳入影响因子范畴, 只是将试验区划分为滑坡发生单元和滑坡不发生单元, 这也是单体滑坡预测与区域滑坡预测的区别所在。试验区出露基岩包括 T_{ij}^4 , T_2b^1 , T_2b^2 , T_2b^3 。岩石强度以 T_{ij}^4 灰岩最高, 属于坚硬岩类; T_2b^1 和 T_2b^3 灰岩、泥质灰岩强度中等, 属于半坚硬岩类; T_2b^2 泥岩强度较低, 属于半坚硬或软弱岩类。由于 T_2b^1 占试验区的 17.17 %, T_2b^3 约占试验区的 44.85 %, 若将两者考虑为同一工程岩组, 占试验区的 2/3, 可能影响回归分析的精度, 故没有归为同一类。地质构造因素考虑为距最近有影响构造线距离, 具体计算如下: 首先将试验区 4 级以上每一条构造线作单因子 Logistic 回归, 根据相关系数 R 的大小取舍构造线。本文构造线取舍的 R 限值为 0.1, 所得结果作为有影响构造线保存。计算距最近有影响构造线距离的算法为: 寻找每一格网单元离得最近的有影响构造线距离。根据对有影响的构造线距离的单因子 Logistic 回归系数聚类, 划分为: $L \leq 61$ m, L 取值范围 61~122 m; L 取值范围 122~183 m; $L > 183$ m, 具体因子的选取和分类如表 2。

表 2 影响因子及分类

Table 2 Influential factors and category

滑坡因子	分类
坡度/(°)	≤ 10 , 10~15, 15~20, 20~25, 25~30, 30~35, 35~40, >40
高程/m	≤ 150 , 150~200, 200~250, 250~300, 300~350, 350~400, 400~450, 450~500, >500
坡向/(°)	315~45, 45~90, 90~135, 135~180, 180~225, 225~270, 270~315
岩性	T_{ij}^4 , T_2b^1 , T_2b^2 , T_2b^3
坡形	顺向坡 1 ($\beta < \alpha$), 顺向坡 2 ($\beta > \alpha$), 逆向坡, 切向坡
距最近构造线距离/m	≤ 61 , 61~122, 122~183, >183

4.3 计算结果

在选取上述因子的基础上, 将整个区域按 10 m $\times$ 10 m 划分为 14 450 个格网单元。其中已发生滑坡地段的单元数为 1 705 个, 占全试验区面积的 11.8 %。在 MAPGIS 地理信息系统的支持下, 将地形数据、岩性数据、对斜坡稳定有影响的构造线等数据输入形成相应的文件。在 MAPGIS 二次开发库的支持下, 在 Visual C++ 6.0 环境下进行二次开发, 生成了基于 Logistic 回归模型的斜坡稳定性评价系统。

在该系统支持下得到了以下结果。

(1) 截距模型 M_0 : $\beta_0 = -2.011\ 6$, $LL_0 = -5\ 244.008\ 7$

(2) 在截距模型基础上加入一个自变量, 得到模型 M_{li} , 计算结果如表 3、表 4。

表 3 $BIC_{li'}$ 结果Table 3 The results of $BIC_{li'}$

滑坡因子	G_s	Df'	$BIC_{li'}$	$BIC_{li'}$ 排序
坡度/(°)	153.229 6	7	-86.180 5	2
高程/m	758.351 2	8	-681.723 6	5
岩性	873.932 4	3	-845.197 1	6
坡形	37.592 2	3	-8.856 9	1
坡向/(°)	248.604	6	-191.133 3	3
构造/m	365.904 8	3	-337.169 5	4

表 4 M_{li} 模型各分类参数Table 4 Parameters of model M_{li}

滑坡因子(x_i)	分类变量	β	$\exp(\beta)$	df	Sig
坡度 ($i=1$)	$\leq 10^0$			7	0.001 1
	10~15 ⁰	0.310 4	1.364 0	1	0.017 1
	15~20 ⁰	0.591 0	1.805 8	1	0.007 5
	20~25 ⁰	0.588 3	1.800 1	1	0.006 9
	25~30 ⁰	0.765 0	2.149 0	1	0.005 4
	30~35 ⁰	0.641 7	1.899 7	1	0.008 8
	35~40 ⁰	0.386 3	1.471 5	1	0.020 7
	>40 ⁰	0.278 3	1.320 9	1	0.024 8
	截距	-2.660 4			
高程 ($i=2$)	≤ 150 m			8	0.001 2
	150~200 m	-0.046 5	0.954 6	1	0.105 1
	200~250 m	-0.129 6	0.878 4	1	0.037 4
	250~300 m	-0.056 3	0.945 3	1	0.082 4
	300~350 m	-0.289 7	0.784 9	1	0.017 5
	350~400 m	-0.950 0	0.386 7	1	0.004 8
	400~450 m	-1.045 4	0.351 6	1	0.005 4
	450~500 m	-1.056 2	0.347 8	1	0.005 7
	>500 m	-0.625 5	0.535 0	1	0.010 3
岩性 ($i=3$)	截距	-1.662 1			
	T_{ij}^4			3	0.007 8
	T_2b^1	1.534 9	4.640 9	1	0.002 8
	T_2b^2	0.236 3	1.266 6	1	0.015 3
	T_2b^3	0.558 1	1.747 3	1	0.005 9
	截距	-2.705 0			
坡形 $i=4$	组顺向坡 1			3	0.001 1
	顺向坡 2	0.765 3	2.149 6	1	0.008 4
	逆向坡	0.288 2	1.334 0	1	0.023 1
	切向坡	0.467 8	1.596 5	1	0.011 7
	截距	-2.588 4			
	315~45°			6	0.047 9
	45~90°	0.247 4	1.280 9	1	0.023 8
	90~135°	0.745 2	2.106 9	1	0.005 0
	135~180°	0.757 7	2.133 4	1	0.004 7
坡向 ($i=5$)	180~225°	0.571 5	1.770 9	1	0.008 9
	225~270°	0.174 0	1.190 1	1	0.040 8
	270~315°	0.010 9	1.011 0	1	0.601 2
	截距	-2.718 3			
距最近构造线 距离 ($i=6$)	>183 m			3	0.004 4
	≤ 61 m	0.713 6	2.041 3	1	0.005 2
	61~122 m	0.611 6	1.843 4	1	0.006 6
	122~183 m	0.312 5	1.366 8	1	0.014 1
	截距	-2.718 3			

由表 3 得出模型优越程度顺序: 岩性因子模型>高程因子模型>距最近有影响构造线距离因子模型>坡向因子模型>坡度因子模型>坡形因子模型。岩性因子模型的 BIC'_{li} 与其他因子模型的 BIC'_{li} 相差很大, 说明该模型比其他模型优越。即岩土体的类型和工程地质性质是试验区滑坡最敏感因素, 各分类的 Sig 值均大于笔者所设定的 $\alpha=0.05$, 即可以以 95 % 以上的概率断言岩性因子对本区滑坡产生了显著影响。高程因素位居第 2, 其中 150~200 m 的 Sig 为 0.105 1 未通过显著性检验。再次为距最近有影响构造线距离, 4 种分类均通过显著性检验。坡向、坡度和坡形属不太显著的敏感因素。

由岩石的物理力学性质及 $\exp \beta$ 可知: 在其他因素相同情况下, 在 T_2b^1 、 T_2b^3 、 T_2b^2 岩性中发生滑坡的可能性分别是 T_{ij}^4 的 4.640 9 倍、1.747 3 倍、1.266 6 倍。高程因素位居第 2, 说明试验区的历史滑坡发生与本地侵蚀基准面有很大关系。从 $\exp \beta$ 可知: 在其他因素相同情况下, 300 m 高程内是滑坡发生的敏感区。据此推测: 三峡水库蓄水后, 随着侵蚀基准面的提高, 本区滑坡的发生敏感高程将提高 70~80 m。从距最近构造线距离因素中可知: 离对滑坡发生有影响的构造线越近, 其发生滑坡的可能性就越大。构造因素位居第 3, 说明三峡库区滑坡发生与构造格局的分布相关性较强。

(3) 选取 BIC'_{li} 最大的岩性因子作为模型 M_1 , 在 M_1 的基础上分别加入坡度、高程、坡形、坡向、距最近有影响构造线距离等因子生成 M_{2i} 模型, 计算结果如表 5 (由于篇幅所限, 只给出了 BIC'_{2i} 结果, 各分类详细结果见文献[12])。

表 5 BIC'_{2i} 结果
Table 5 The results of BIC'_{2i}

滑坡影响因子	G_s	Df'	BIC'_{2i}	BIC'_{2i} 排序
岩性+坡度	990.158 4	7	-923.109 3	2
岩性+高程	1 606.064	8	-1 529.436 4	5
岩性+坡形	912.464	3	-883.728 7	1
岩性+坡向	1 012.464	6	-954.993 3	3
岩性+构造	1 200.684	3	-1 171.948 7	4

由表 5 得出模型优越程度顺序: 岩性+高程因子模型>岩性+距有影响的构造线距离因子模型>岩性+坡向因子模型>岩性+坡度因子模型>岩性+坡形因子模型。说明在岩性因子模型 M_1 基础上增加一个影响因子时, 增加高程因子对解释滑坡发生的可能性贡献最大; 距最近有影响构造线距离因子次之; 坡向、坡度和坡形因子贡献较小。

(4) 选取岩性+高程因子模型作为模型 M_2 , 在

此基础上分别加入: 坡度、坡形、坡向、距最近有影响构造线距离等影响因子生成 M_{3i} 模型, 计算结果如表 6。

表 6 BIC'_{3i} 结果
Table 6 The results of BIC'_{3i}

滑坡影响因子	G_s	df'	BIC'_{3i}	BIC'_{3i} 排序
岩性+高程+坡度	1 705.040 6	3	-1 676.305 0	3
岩性+高程+坡形	1 634.306 6	3	-1 614.571 3	2
岩性+高程+坡向	1 667.852	6	-1 610.381 3	1
岩性+高程+构造	1 920.459 4	3	-1 891.724 1	4

由表 6 得出模型优越程度顺序: 岩性+高程+距有影响的构造线距离因子模型>岩性+高程+坡度模型>岩性+高程+坡向因子模型>岩性+高程+坡形因子模型, 说明在 M_2 基础上增加一个影响因子时, 增加距有影响的构造线距离因子对解释滑坡发生的可能性贡献最大。坡向、坡度、坡形因子贡献相对较小。

(5) 选取岩性+高程+距有影响的构造线距离因子作为模型 M_3 , 在此基础上分别加入坡度、坡形、坡向因素生成 M_{4i} 模型, 计算结果如表 7。

表 7 BIC'_{4i} 结果
Table 7 The results of BIC'_{4i}

滑坡影响因子	G_s	df'	BIC'_{4i}	BIC'_{4i} 排序
岩性+高程+构造+坡度	2 006.883 8	3	-1 978.148 5	3
岩性+高程+构造+坡形	1 959.251	3	-1 930.515 7	2
岩性+高程+构造+坡向	1 982.918	6	-1 925.447 3	1

(6) 选取岩性+高程+距有影响的构造线距离+坡度因子作为模型 M_4 , 在此基础上分别加入: 坡形、坡向因素生成 M_{5i} 模型, 计算结果如表 8。

表 8 BIC'_{5i} 结果
Table 8 The results of BIC'_{5i}

滑坡因子	G_s	df'	BIC'_{5i}
岩性+高程+构造+坡度+坡形	1 925.649 4	3	-1 896.914 5
岩性+高程+构造+坡度+坡向	2 058.604 8	6	-2 001.134 1

(7) 加入所有元素计算结果: $G_s=2 099.062 8$, $df'=3$, $BIC'_6=-2 070.327 5$ 。 BIC'_6 与 BIC'_{5i} 之差大于 10, 说明在 5 个影响因子的基础上, 加入坡形因子对区域滑坡的预测模型有非常强的优越程度。

5 结 论

通过对试验区的模型计算可得到本区斜坡稳定性影响因素依次为: 组成斜坡的岩石力学性质、斜坡高程 (与当时侵蚀基准面相关)、与当地有影响构造线距离远近、斜坡坡度、斜坡方向、斜坡坡向与

基岩产状的关系。计算结果与工程实践的认识^[11]相符。以上几个因素联合作用的影响显著,模型的预测能力: 滑坡发生样本的判对率为 72.08 %, 滑坡不发生样本的判对率为 81.44 %。通过以上分析可得出如下结论:

(1) 贝叶斯信息指标能够较好地对区域滑坡敏感因子进行定量评价。

(2) 试验区的研究程度是贝叶斯信息指标评价精度的保证。

(3) 滑坡各影响因子之间存在相互关系, 当其相关性不高时, 不会影响结论的准确性。但当相关程度较高时, 可能会得出错误的结论。故在因素选择时, 最好分两步走。第 1 步选取尽可能多的因子, 对各因子进行相关程度分析, 对相关性较高的因素只入选主要因素; 第 2 步将保留下来的因素进行 Logistic 回归, 比较 *BIC* 值, 得出结论, 可保证结论的正确性。

参 考 文 献

- [1] 张年学, 盛祝平, 孙广忠, 等. 长江三峡工程库区顺层岸坡研究[M]. 北京: 地震出版社, 1993. 145—152.
- [2] 石豫川, 冯文凯, 刘汉超, 等. 特大多期复合型滑坡稳定性评价及因素敏感性分析[J]. 岩土力学, 2004, 6(25): 975—980.
SHI Yu-chuan, FENG Wen-kai, LIU Han-chao, et al. Stability evaluation for giant and multiple landslide and sensitive analysis of factors[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 6(25): 975—980.
- [3] 汪洋, 殷坤龙, 安关峰. 滑坡敏感因子的关联分析[J]. 岩土力学, 2004, 1(25): 91—93.
WANG Yang, YIN Kun-long, AN Guan-feng. Grey correlation analysis of sensitive factors of landslide[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 1(25): 91—93.
- [4] 倪恒, 刘佑荣, 龙治国. 正交设计在滑坡敏感性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 989—992.
NI Heng, LIU You-rong, LONG Zhi-guo. Application of orthogonal design to sensitivity analysis of landslide[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(7): 989—992.
- [5] 王济川, 郭志刚. Logistic 回归模型——方法与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001. 67—70.
- [6] Robert S, Pindyck, Daniel L Rubinfeld. 计量经济模型与经济预测(第4版)[M]. 钱小军译. 北京: 机械工业出版社, 2003. 165—182.
- [7] Aldrich John, Forrest D Nelson. Linear Probability, Logit, and Probit Models[M]. Newbury Park: Sage Publications, 1984.
- [8] Jeffreys H. Theory of Probability (2nd ed.)[M]. New York: Oxford University Press, 1961.
- [9] Long J Scott. Regression Models for Categorical and Limited Dependent Variables[M]. [s.l.]: Thousand Oaks Sage Publication, 1997.
- [10] Raftery A E. Bayesian model selection in social research in P V Marsden (ed.)[J]. **Sociological Methodology**, 1996, 25: 111—163.
- [11] 王智济, 殷坤龙, 伍法权, 等. 长江三峡水利枢纽库区巫山县城镇迁建新址工程地质论证报告(详细勘察阶段)[R]. 武汉: 中国地质大学工程学院, 1995.
- [12] 李雪平. 基于 GIS 的斜坡稳定性 LOGISTIC 回归模型研究[博士学位论文 D]. 武汉: 中国地质大学研究生院, 2005.
人民长江, 2003, 34(6): 17—19.
XIAO Hua-wen, CHEN Chuan-hui. Preliminary analysis on creep nature of faced rockfill dam of Shuibuya hydroproject[J]. **Yangtze River**, 2003, 34(6): 17—19.
- [8] 程展林, 丁红顺. 堆石料蠕变特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 473—476.
CHENG Zhan-lin, DING Hong-shun. Creep test for rockfill[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(4): 473—476.
- [9] 周伟. 高混凝土面板堆石坝流变本构模型理论及其应用 [博士学位论文 D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [10] 张丙印, 师瑞锋. 流变变形对高面板堆石坝面板脱空的影响分析[J]. 岩土力学, 2004, 8(25): 1 179—1 184.
ZHANG Bing-yin, SHI Rui-feng. Influence of creeping on separation between concrete slab and cushion layer in high concrete face rockfill dam[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 8(25): 1 179—1 184.
- [4] 沈珠江, 赵魁芝. 堆石坝流变变形的反馈分析[J]. 水利学报, 1998, 6(6): 1—6.
SHEN Zhu-jiang, ZHAO Kui-zhi. Back analysis of CFRD creep [J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1998, 6(6): 1—6.
- [5] 王勇, 殷宗泽. 一个用于面板坝流变分析的堆石流变模型[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 227—230.
WANG Yong, YIN Zong-ze. A rheology model of rockfill used in the rheology analysis of concrete face rockfill dam[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(3): 227—230.
- [6] 郭兴文, 王德信, 蔡新, 等. 混凝土面板堆石坝流变分析[J]. 水利学报, 1999, 11(11): 42—46.
GUO Xing-wen, WANG De-xin, CAI Xin, et al. Rheological analysis of concrete faced rockfill dam[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1999, 11(11): 42—46.
- [7] 肖化文, 陈传慧. 水布垭面板堆石坝流变初步分析[J].

上接第 1392 页