

巴东新城典型库岸深部稳定性分析

柴 波¹, 殷坤龙², 简文星², 代云霞²

(1. 中国地质大学 环境学院, 武汉 430074; 2. 中国地质大学 工程学院, 武汉 430074)

摘 要: 为了分析巴东新城库岸斜坡蓄水后的深部稳定特征, 首先, 选择巴东新城扇形斜坡中轴线的白土坡库岸作为典型库岸, 以深 300 余米深部监测钻孔岩芯资料为依据, 根据软弱带分布、岩体完整性及岩性特征对深部岩体结构分带; 然后, 基于各带内岩体的地质强度参数 *GSI*, 应用 Hoek-Brown 准则估算岩体强度参数; 最后, 采用 FLAC 数值模拟方法分析了库岸斜坡蓄水后的稳定性特征。结果表明: 随着水位的上升斜坡稳定性有下降趋势, 但下降值并不明显, 白土坡库岸斜坡处于整体稳定状态; 当强度折减值至极限状态时, 剪应变增量值集中区位于 6~10 层软弱带集中分布的岩层内, 受地震作用时剪应变增量集中区向斜坡深部发展, 斜坡潜在滑动面顺层发育; 斜坡失稳的前提是前缘向斜反倾段完全塑性贯通。

关 键 词: 巴东; 岩体强度估算; 深部稳定性

中图分类号: TV 223

文献标识码: A

Deep stability analysis of typical reservoir bank in Badong county

CHAI Bo¹, YIN Kun-long², JIAN Wen-xing², DAI Yun-xia²

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to analyze the deep stability characteristic of bank slopes in new Badong county after reservoir storage, firstly, the Baitu slope which is on the medial axis of sector of Badong new county is selected as a typical slope, based on the monitoring data of drilling which is more than 300 meters deep the zonation of deep rock structure is done according to the distribution of weakness zone, rock and integrality, lithologic characteristics. Then, based on the geological strength index *GSI*, the Hoek-Brown rule is used to estimate the rock strength parameter. Finally, the FLAC numerical simulation is applied to analyze the stability characteristic of the bank slope after reservoir storage. It is concluded that the stability appears to decrease with the rising of water level, but it is not obvious, Baitu slope is in integral stable status. When the strength reduces to limit state, the shear strain increment zones locate in the sixth to tenth weakness zone, when the earthquake effect is considered, the shear strain increment zones expand to the deep part of slope, the potential sliding surface develops consequently to layers. The precondition of failure is the plasticity transfixion of anti-dip part in the front of slope.

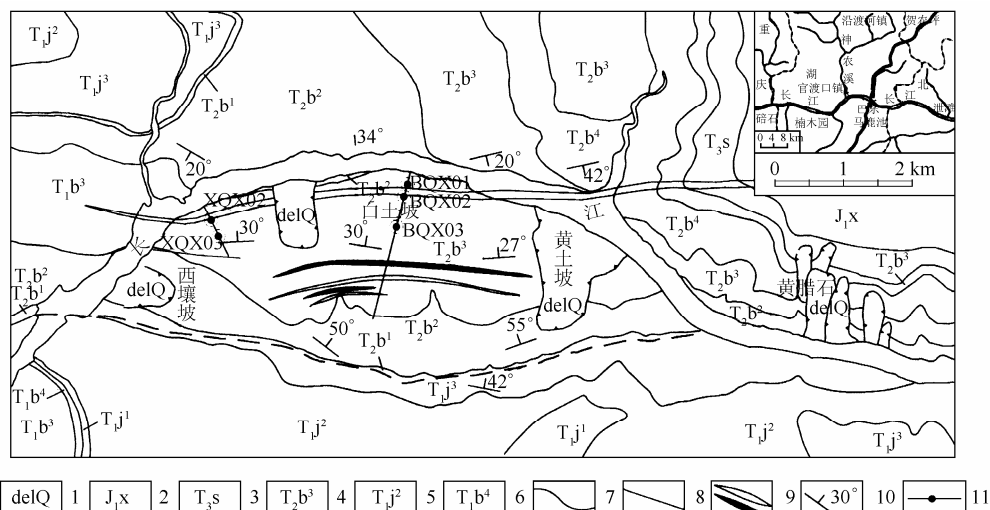
Key words: Badong; estimation of rock strength; deep stability

1 引 言

巴东新城是三峡库区迁建移民新区, 属三峡库区地质灾害高易发区, 发育有黄土坡滑坡、赵树岭滑坡、童家坪滑坡等多处大型古滑坡。官渡口向斜是巴东县新城及近邻区的主要构造格架, 城区总体为顺向斜坡; 近 EW 向的巴东断裂是区内规模最大的断层, 断裂上盘临江段岸坡呈现出外凸的扇形, 与临近区域地貌极不协调, 似发生过整体滑移 (图 1); 城区斜坡岩性软弱相间、顺层发育的滑错

带或软弱带十分普遍, 加之向斜构造的影响, 剖面上表现为由多处软弱带勾画的勺形或圈椅形态, 与瓦依昂型滑坡具有十分相似的岩体结构。

邓清禄^[1]在对巴东新城进行详细地质调查的基础上, 提出斜坡内复杂的构造节理、劈理以及顺层滑脱带是引起斜坡复杂变形的关键; 刘传正^[2]提出了巴东复杂斜坡系统“重力成因论”的观点, 认为斜坡是在官渡口向斜南翼 (单斜山) 的地质背景下, 持续经受长江快速侵蚀下切外力作用, 河谷岸坡快速临空导致其自身重力产生强烈的侧向卸荷与滑



1—滑坡堆积；2—侏罗系香溪组；3—三叠系上统沙镇溪组；4—三叠系中统巴东组；5—巴东组下统嘉陵江组；6—巴东组下统大冶组；7—地质界线；8—断层；9—褶皱，实线为背斜，空心为向斜；10—地层产状；11—监测剖面

图1 巴东新城地质概况图

Fig.1 Geological chart of the new Badong county

移等浅表生地质改造作用过程而形成的。由于缺乏深部岩体结构资料，对于巴东新城复杂斜坡的成因认识仍不统一，也不能很好地解释巴东新城库岸是否存在整体滑动的可能性。本文以扇形斜坡中轴线（白土坡库岸）深 300 余米监测剖面的钻孔岩芯资料为依据（图 1），在岩体强度分带估算的基础上，采用数值模拟方法预测了水库运营期间库岸深部的稳定特征。

2 白土坡库岸岩体分带及强度估算

基于软弱带分布、岩体完整性及岩性特征建立巴东新城白土坡库岸深部岩体强度分带，具体分带结果见图 2，采用经验强度参数估算法确定岩体强度。

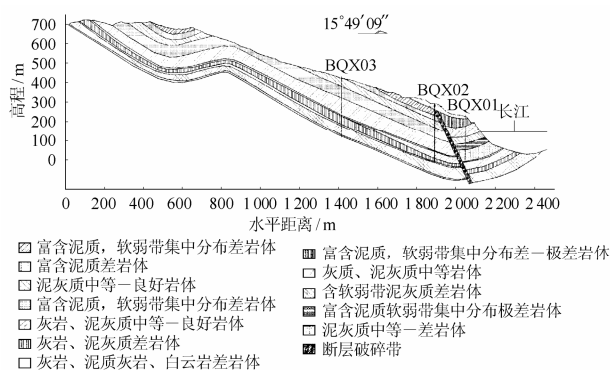


图2 白土坡库岸岩体强度分带

Fig.2 Zonation of rock strength of Baitu slope

Hoek-Brown 准则和 Mohr-Coulomb 准则是最常用的岩体破坏准则，在最大、最小主应力 σ_1 、 σ_3 共同作用下，Mohr-Coulomb 准则表示为

$$\sigma_1 = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3 \quad (1)$$

式中： c 和 ϕ 分别为岩体的黏聚力和摩擦角。

Hoek-Brown 准则表示为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c (m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s)^a \quad (2)$$

式中： σ_c 为完整岩块的单轴抗压强度； m_b 、 s 、 a 均为岩体的物性常数。

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad (3)$$

$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right) \quad (4)$$

$$a = 0.5 + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (5)$$

式中： D 为岩体受开挖等工程活动的扰动程度，由于深部岩体未受工程扰动，因此，取 $D = 0$ 。应用 Hoek-Brown 准则估计岩体强度必须获得 3 个参数，其一是完整岩块的单轴抗压强度 σ_c ，其二是完整岩体的 Hoek-Brown 常数 m_i ，最后是岩体的地质强度参数 GSI 。 GSI 应根据岩体所处的地质环境、岩体结构特征和表面特征来确定。Hoek 和 Brown 建议选择 $0 < \sigma_3 < 0.25\sigma_c$ 内的 8 个等间距值计算 σ_1 ，并用直线拟合 Mohr-Coulomb 准则强度参数 c 和 ϕ 值，在选择时应该综合考虑岩体在埋深范围内的围压条件。

应用 GSI 估计岩体的变形模量 E_m 为

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2} \right) \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} 10^{(GSI-10)/40} \quad (6)$$

Sonmez^[3]和 Cai^[4]建议采用结构面体密度或结构面平均间距描述岩体完整程度，并结合结构面条件确定 GSI 值。基于深部岩芯资料，根据结构面间距经验分布，统计各带内长度大于 x_0 的有效固体岩

芯长度，占总岩芯长度的比率为 b ，柱长均值为 a ，
求解结构面线密度。

(1) 正态分布概率函数：

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

(2) 负指数分布概率函数：

$$f(x) = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{1}{\lambda}x} \quad (8)$$

$$E(P(x > x_0)) = \int_{x_0}^{+\infty} xf(x)dx = ab \quad (9)$$

对于正态分布，令 $t = x_0 - \mu$ ：

$$E(P(x > x_0)) = \int_{x_0}^{+\infty} x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx =$$

$$-\frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} te^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \Big|_{x_0-\mu}^{+\infty} + \mu \int_{x_0-\mu}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt =$$

$$\frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_0-\mu)^2}{2\sigma^2}} + \mu b = ab \quad (10)$$

对于负指数分布：

$$E(P(x > x_0)) = \int_{x_0}^{+\infty} \frac{x}{\lambda} e^{-\frac{1}{\lambda}x} dx = -xe^{-\frac{x}{\lambda}} \Big|_{x_0}^{+\infty} +$$

$$\int_{x_0}^{+\infty} e^{-\frac{x}{\lambda}} dx = x_0 e^{-\frac{x_0}{\lambda}} + \lambda b = ab \quad (11)$$

根据式(10)、式(11)，通过试算可以获得正态分布均值 μ 和负指数分布均值 λ ，均值即为结构面平均间距，正态分布中方差未知，也可以将试算结果代入大于 x_0 岩芯的概率 b 中求得。计算得到岩芯结构面平均间距后，可以估计带内结构面平均体密度。将结构面体密度和钻孔结构面性质描述(表1)代入 GSI 计算表得到带内 GSI 值，通过式(1)~(6)估算岩体强度，并将岩体强度分为4级，具体见表1。

表1 白土坡深部岩体强度分带及参数估计表

Table 1 Zonation of rock strengths and estimation of parameters of Baitu slope

分带号	软弱带	岩性特征	σ_c / MPa	有效 固体 岩芯 率/%	有效 固体 岩芯 均值 /cm	平均 块径 /cm	J_v /条·m ⁻³	结构面性质			GSI 指标	变形 模量 /GPa	黏聚力 /MPa	摩擦角 /(°)	强度 等级
								粗糙度	蚀变性	填充物					
1	集中分布5层软弱带，物质以含碎石粉质黏土为主	灰黄-浅绿色钙质泥岩、泥灰岩夹泥质白云岩，总体富含泥质	5~20.6	53.2	21.8	11.5	4.9	粗糙起伏/5	部分溶蚀、铁锰质浸染/2	泥质充填为主/1	43	1.494~3.033	0.267~1.102	27	1
2	无	黄绿-灰黄色钙质泥岩夹泥质灰岩，富含泥质	15.5~35.5	53.4	23.9	13	4.4	裂面粗糙、部分平直/4	部分溶蚀、铁锰质浸染/3	泥质充填为主/3	51	4.17~6.311	0.948~1.865	29	2
3	无	深灰色夹灰绿色泥灰岩、灰岩为主	45.2~65.5	88.7	33.7	33.7	1.7	粗糙起伏/5	铁锰质浸染/5	泥质、钙质充填或无充填/4	70	21.26~25.593	4.315~6.21	38	4
4	集中分布有5层软弱带，物质以含碎石粉质黏土或破碎带	深灰色、灰黄色钙质泥岩夹泥质灰岩，富含泥质	15.5~30.5	61.2	34.7	19.6	2.9	裂面粗糙、部分平直/4	部分溶蚀、铁锰质浸染/3	泥质充填为主，局部间擦痕/1	53	4.679~6.564	0.98~2.245	30	2
5	无	深灰、灰白夹灰黄色灰岩、泥灰岩为主，局部岩性段发育溶蚀	50.5~80.5	87.4	44.75	44.8	0.7	粗糙为主，部分较平直/4	普遍发育溶蚀现象，铁锰质浸染/3	钙质充填为主，部分泥质充填或无/4	68	20.028~25.287	4.609~7.346	38	4
6	顶部和底部各发育一层软弱破碎带	深灰、灰绿色灰岩、含泥质灰岩为主	40.5~65.5	66.7	22.7	17.4	1.8	粗糙-较平直/4	溶蚀发育，铁锰质浸染/3	钙质充填为主/5	62	12.698~16.148	3.145~5.086	34	3
7	顶部和底部各发育一层软弱破碎带	灰岩、泥灰岩为主，下部泥质含量高于上部，底部为钙质泥岩	20.5~40.5	54.8	16.5	10.9	5.2	粗糙起伏/5	铁锰质浸染/5	泥质充填为主/3	56	6.395~8.989	1.435~2.835	32	2
8	集中分布有5层软弱带，物质以含碎石粉质黏土或软岩破碎带	岩性同分带1，总体富含泥质	5~20.6	27.5	20.5	7.2	7.9	粗糙起伏/5	溶蚀发育、铁锰质浸染/2	泥质充填为主/1	42	1.411~2.864	0.263~1.083	27	1
9	无	岩性同分带2、3	35.2~55.5	74.7	39.5	30.5	1.3	粗糙起伏/5	部分溶蚀、铁锰质浸染/4	泥质、钙质充填或无充填/4	69	17.712~22.24	3.131~4.936	36	4
10	顶部和中部分布2段破碎带	岩性同分带4上部，以泥灰岩为主，间夹灰岩	25.5~35.5	49.1	29.5	14.5	2.7	粗糙起伏/5	部分溶蚀、铁锰质浸染/4	泥质充填为主/2	56	7.133~8.416	1.785~2.485	32	2
11	集中分布4层软弱带	岩性同分带4下部，富含泥质	15.5~25.5	23.3	20.8	7.1	8.0	粗糙-平直/3	铁锰质浸染/4	泥质充填为主/2	45	2.952~3.797	0.857~1.410	28	1
12	底部与软弱带接触	岩性同分带5，以泥灰岩为主	50.5~80.5	66.7	45.0	26.5	1.5	粗糙，部分较平直/4	发育溶蚀现象，铁锰质浸染/4	钙质充填为主，部分泥质或无充填/4	64	15.909~20.086	4.288~6.835	36	4

注： J_v 为统计体密度。

3 库岸斜坡深部稳定性数值分析

采用 FLAC 模拟白土坡库岸在水库运营中的稳定特征, 根据 1: 2 000 测绘地形主剖面及前述岩体强度分带图建立数值计算模型。模拟水库蓄水过程中只考虑水位面以下巴东组第 3 段 (T_2b^3) 岩体为饱和状态, 将巴东组第 2 段 (T_2b^2) 视为隔水介质。计算网格如图 3, 图中 t2b2 代表巴东组第 2 段岩性, t2b31~t2b34 分别对应于表 1 中的各强度等级 1~4。fl 为断层, soil 为表层松散堆积土。

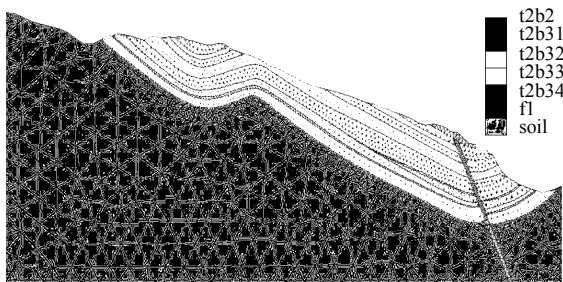


图 3 白土坡二维计算剖面网格单元图

Fig.3 The grid element of two dimension calculation of Baitu slope

3.1 库岸斜坡变形特征分析

数值模拟总位移结果见图 4~7, 在不同水位条件下位移最大值均出现在前缘陡坡段岩体结构变化部位, 随着水位的上升位移值增加, 从位移矢量看位移以向坡外方向为主, 并伴随有一定的下沉。在官渡口向斜的核部及北翼, 145 m 库水位下 T_2b^3 底部, 位移方向发生偏转, 以向下的沉降变形为主, 库水位升至 175 m 时由于斜坡下滑力增加, 位移略向坡外偏转。

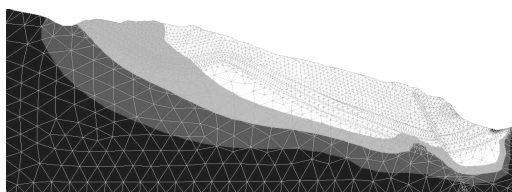


图 4 145 m 库水位下合位移等值线图

Fig.4 Contours of displacement under 145 m reservoir water level

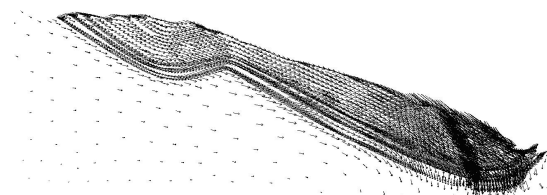


图 5 145 m 库水位下位移矢量图

Fig.5 Vectorgraph of displacement under 145 m reservoir water level

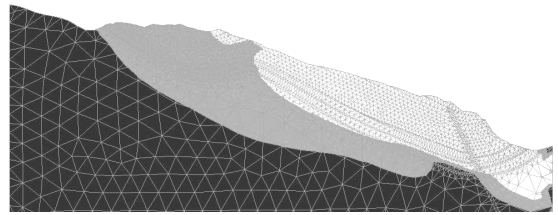


图 6 175 m 库水位下合位移等值线图

Fig.6 Contours of displacement under 175 m reservoir water level

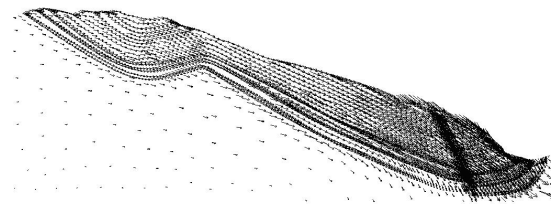


图 7 175 m 库水位下位移矢量图

Fig.7 Vectorgraph of displacement under 175 m reservoir water level

3.2 库岸斜坡稳定状态

岩土体失稳 (特别是滑动失稳), 多沿剪应变最大的部位发生, 通过 FLAC 的剪应变增量 (Shear Strain Increment) 寻找坡体内的最薄弱部位。145 m 水位剪应变增量主要集中在底部软弱带发育部位 (图 8), 对应于第 12 层软弱带 (自上而下共发育 13 层软弱带), 剪切塑性区主要集中在坡脚一定范围内 (图 9); 库水位升值 175 m 后, 剪应变增量范围不仅在原有的层位有所扩展 (图 10), 而且在第 11 层软弱带内以及坡面处软弱带集中的部位也出现了应变集中区, 塑性区的范围逐渐向坡内扩展 (图 11), 说明随着水位抬升, 坡体向不稳定方向发展。由 175 m 库水位系统不平衡力演化曲线 (图 12) 可以看出, 随着迭代的不断进行, 系统的不平衡力逐渐降低, 最终趋于平衡状态, 表明库岸斜坡整体失稳的可能性不大。

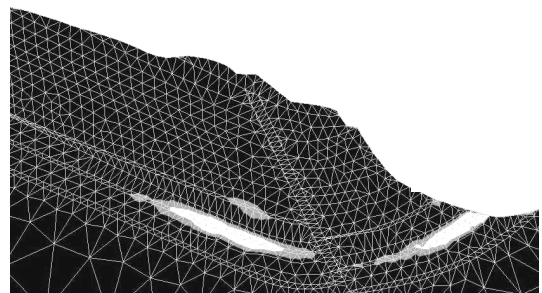


图 8 145 m 库水位下剪切应变增量

Fig.8 Shear strain increment diagram under condition of 145 m reservoir water level

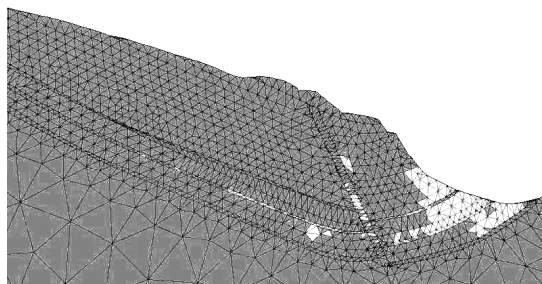


图 9 145 m 库水位下塑性区分布图

Fig.9 Distribution of plastic zone under 145 m reservoir water level

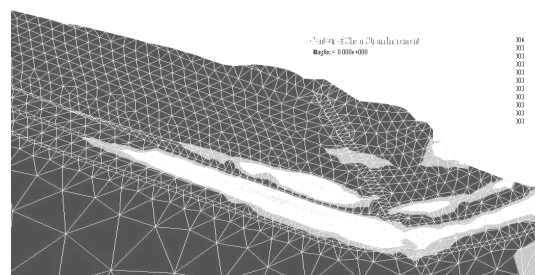


图 10 175 m 库水位下斜坡剪切应变增量

Fig.10 Shear strain increment under condition of 175 m reservoir water level

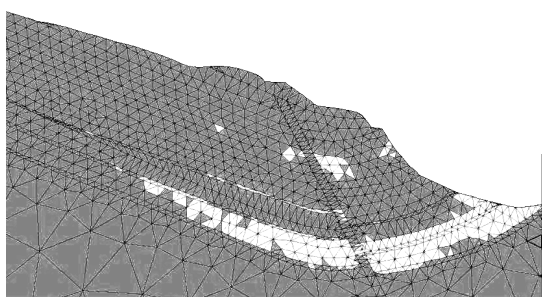


图 11 175 m 库水位下塑性区分布图

Fig.11 Distribution of plastic zone under 175 m reservoir water level

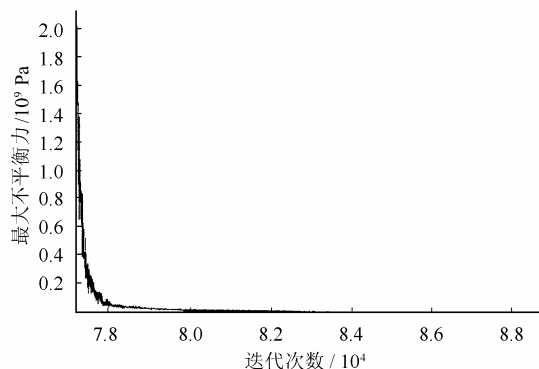


图 12 175 m 库水位下最大不平衡力演化曲线

Fig.12 Evolution curve of imbalance force under 175 m reservoir water level

以上模拟分析表明，白土坡库岸斜坡蓄水后总体处于稳定状态。随着水位的上升，岸坡变形有所

加剧，最大位移集中在前缘陡坡段的岩体结构变化部位。岩体强度在地下水的作用下有所下降，特别是岩体结构破碎的软弱带，水位抬升后剪应变沿着软弱带明显向斜坡深部扩展，前缘塑性区的范围也逐渐扩展。

3.3 库岸斜坡深部稳定性系数

采用 FLAC 所提供的强度折减法计算白土坡库岸深部岩体结构控制下的稳定性，将稳定性系数 K 看作斜坡的安全储备值，当安全储备值大于安全系数（取 1.15）时斜坡稳定。计算了 6 种工况下库岸斜坡的稳定性，具体见表 2。

表 2 不同工况下白土坡库岸斜坡深部稳定性系数

Table 2 Factors of deep stability under different conditions of Baitu slope

工况	145 m	175 m	145~175 m	175 m 降至 145 m	145 m 库水位 +6 级地震	175 m 库水位 +6 级地震
稳定性系数 K	1.53	1.51	1.53	1.50	1.36	1.35

计算结果表明：

(1) 随着水位的上升斜坡稳定性有下降趋势，但下降值并不明显，主要受库岸斜坡规模的影响，30 m 的水位变动对长 2 000 余 m、厚度 300 余 m 的斜坡作用较微弱。在年内的库水位变动稳定性系数由 145 m 的 1.53 降至 175 m 的 1.51；当库水位回落至 145 m 时最低稳定性系数为 1.50。地震对岸坡稳定性的影响较大，在 145 m 库水位考虑 VI 度地震时

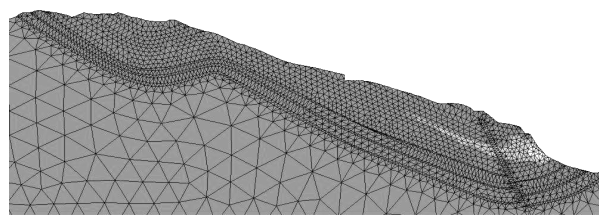


图 13 175 m 水位极限状态下剪应变增量图

Fig.13 Shear strain increment diagram of limit state under 175 m reservoir water level

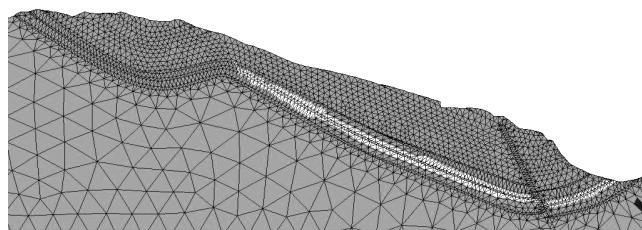


图 14 175 m 库水位+6 级地震极限状态下剪切塑性区

Fig.14 Shear plastic zone of limit state under 175 m reservoir water level and MS6 earthquake

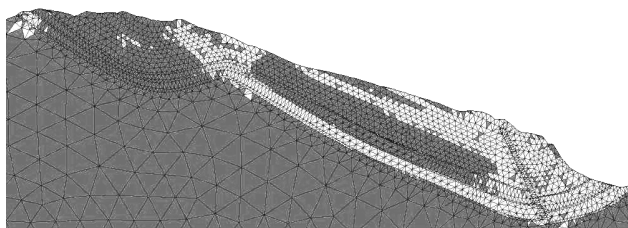


图 15 175 m 库水位极限状态下塑性区分布图
Fig.15 Distribution of plastic zone of limit state under
175 m reservoir water level

其稳定性系数下降至 1.36, 而 175 m 库水位作用 VI 度地震时, 稳定性系数为 1.35。总体上白土坡库岸斜坡处于整体稳定状态。

(2) 当强度折减值至极限状态时, 仅受库水作用下剪应变增量值集中区位于 6~10 层软弱带集中分布的岩层内, 受地震作用时剪应变增值集中区向斜坡深部发展, 位于第 12 层软弱带内, 说明斜坡潜在滑动面是顺层发育的, 位于斜坡内的软弱带。

(3) 从塑性区贯通的范围看, 当折减至极限不稳定状态时斜坡前缘岩体已全部处于剪塑性状态, 如果把官渡口向斜核部的缓倾段和反倾段作为整个斜坡的抗滑段, 那么斜坡失稳的前提是抗滑段完全塑性贯通。

4 结 论

(1) 本文以 300 余 m 钻孔岩芯资料为依据, 建立了深部岩体强度分带, 并通过 Hoek-Brown 准则估算了各带的强度参数。

(2) 应用 FLAC 数值模拟方法预测了蓄水后白土坡库岸的深部稳定性特征, 随着水位的上升斜坡稳定性有下降趋势, 但整体处于稳定状态, 顺层发育的深部软弱带是斜坡稳定性的薄弱环节。

受现场条件制约, 缺乏深部原位试验资料, 经验估计的强度参数与实际可能存在一定的偏差, 模拟成果还有待通过今后的监测数据进一步验证。

参 考 文 献

- [1] 邓清禄. 斜坡变形构造——巴东新县城斜坡剖析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2000.
- [2] 刘传正, 刘艳辉, 连建发. 长江三峡巴东复杂斜坡系统成因研究[J]. 地质论评, 2006, 52(4): 510—521.
- [3] HARUN SONMEZ, CANDAN GOKCEOGLU, RESAT ULUSAY. An application of fuzzy sets to the geological strength index (GSI) system used in rock engineering[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2003, (16): 251—269.
- [4] CAI M, KAISERA P K, UNOB H, et al. Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2004, (41): 3—19.
- [5] 柴波. 巴东新城区库岸斜坡岩体结构系统研究[博士学位论文 D]. 武汉: 中国地质大学, 2008.