

# 长江三峡工程库区宝塔坪滑坡前缘塌岸预测及防护

王建锋<sup>1</sup>, 吴梦喜<sup>1</sup>, 李智毅<sup>2</sup>, 苏爱军<sup>3</sup>, 崔政权<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 力学研究所工程科学研究部, 北京 100080; 2. 中国地质大学 工程技术学院, 北京 100083; 3. 长江水利委员会 综合勘测局, 湖北 武汉 430010)

摘要: 以长江三峡工程库区奉节宝塔坪滑坡为例, 介绍滑坡前缘塌岸预测及防护工程设计方法, 重点是石笼垫护坡设计。宝塔坪库岸段潜在的塌岸部位是滑坡前缘地带, 该处阶地发育, 仅第四系松散堆积物厚度即达 50 m 以上。水库塌岸预测首先在滑坡前缘工程地质分带的基础上进行, 对不同的分带用卡丘金法分别预测塌岸宽度, 并对预测要点给予详细的说明。其次, 分析了塌岸对滑坡稳定性的影响。这些工作揭示了滑坡体前缘防护的必要性。最后针对三峡水库运行特点及宝塔坪滑坡工程地质条件, 确定滑坡前缘护坡工程方案, 即自 145 ~ 177 m 高程范围采用石笼垫和石笼挡土墙 2 类结构型式, 并给出具体的设计方法。

关键词: 长江三峡工程库区; 水库塌岸; 石笼垫护坡

文章编号: 1003-8035 (2003) 01-0001-08

中图分类号: P642.22; TV861

文献标识码: A

## 1 前言

宝塔坪滑坡位于长江北岸的长江支流梅溪河口东部, 上距奉节县老县城 1.6 km, 由形成年代和规模不同的 5 处滑坡组成, 后缘高程 350 m, 前缘高程 110 ~ 160 m, 分布在南北长 600 ~ 700 m、东西宽 800 ~ 1000 m 的地段内, 总面积 0.449 km<sup>2</sup>, 总体积约 1275 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> (图 1)。

宝塔坪小区原规划为奉节县新县城城址, 已建有大量房屋, 后因宝塔坪滑坡体的发现而放弃。该滑坡防治工程的主要目的是保护滑坡体前缘的沿江大道、待建的遗址公园、水运码头等建筑设施以及滑坡体上居民小区内规划的 0.6 万人的生命安全; 治理工程还须起到小区库岸防护、美化环境的作用。

经过地质勘察、防治工程可行性研究及初步设计等阶段工作后, 得出的结论是: 水库蓄水前后滑体均稳定, 滑体前缘具有库岸再造条件, 滑坡防治工程应以护坡为主, 推荐方案是: 排水 + 石笼垫护坡 + 监测网。

本文首先进行滑坡前缘塌岸预测评价, 在此基础上进行防塌岸工程设计。

## 2 塌岸预测评价

由稳定性分析已经得知, 诸滑体整体以及主要的局部边坡均属稳定。然而, 这种评价并没有考虑有较长时间效应的滑坡前缘受波浪 (包括风浪<sup>[1~4]</sup>、

船行波<sup>[5,6]</sup>), 以及库水位变动影响所产生的塌岸作用。因此, 还必须回答滑坡前缘是否会产生塌岸以及多大规模的边岸再造将引起原滑坡体复活。

### 2.1 塌岸预测的理论与实践问题

水库塌岸预测理论最早来源于前苏联<sup>[1,8]</sup>, 近年来, 有关水库塌岸预测问题研究仍在进行<sup>[9]</sup>, 因冻融引起的水库塌岸预测也在探索中<sup>[10]</sup>。

水库塌岸预测主要内容包括: 定量估计水库建成蓄水后塌岸范围, 某一库岸地段塌岸宽度和速度, 某一期限内和最终的塌岸宽度以及形成最终塌岸宽度所需的年限, 以便为库岸防护设计提供依据。

预测水库塌岸或水库边岸再造规模的方法可分为: 类比法、动力法、统计法和试验法, 它们多属于经验性或半经验性的。由于自然条件的复杂多变性, 迄今为止所有的预测方法仍然基于经验, 还没有严格的物理方程能够解决此类问题, 因此总的来

收稿日期: 2001-06-10; 修回日期: 2002-11-08

基金项目: 重庆市移民局“三峡库区滑坡防治工程”支持项目; 中国科学院知识创新工程重要方向支持项目; 长江水利委员会综合勘测局“三峡库区滑坡治理工程”支持项目

作者简介: 王建锋 (1964—), 男, 1997 年毕业于中国地质大学 (武汉) 工程地质专业, 获工学博士学位。曾从事岩石力学、工程地质科研、教学工作, 现主要从事地学与力学结合方面的研究工作, 1989 年以来在国内外共发表 30 多篇学术论文。

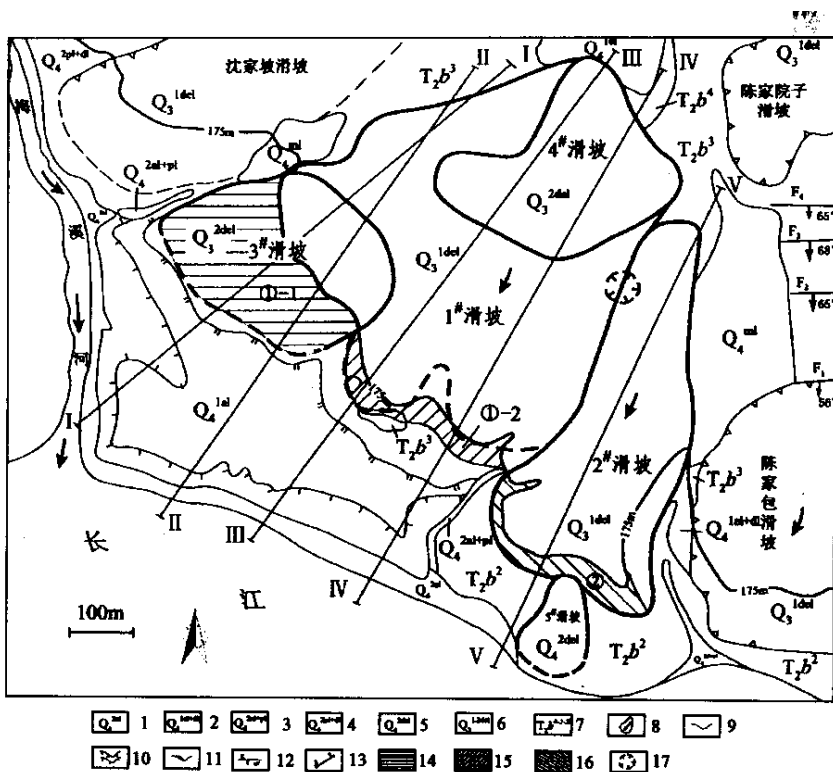


图1 宝塔坪滑坡工程地质图

Fig. 1 Engineering geological map of Baotaping landslide

1-全新统冲积物；2-全新统残坡积物；3-全新统冲洪积物；4-全新统洪坡积物；5-全新统滑坡堆积物；6-上更新统滑坡堆积物；7-三叠系中统巴东组第四、三、二段；8-滑坡边界(推测)；9-地质界线；10-I、II级阶地；11-水库175m水位线；12-断层；13-勘测剖面线；14-塌岸带①-1；15-塌岸带①-2；16-塌岸带①-3；17-塌陷坑

说这方面的研究进展不大。

类比法的实质是类比已知条件相似的水库岸边剖面，绘制待预测边岸的塌岸剖面；动力法的预测依据是塌岸量与波能和岩石抗冲刷强度之间的“关系方程”：

$$Q = E \cdot k_p \cdot t^b \quad (1)$$

式中， $Q$  为库岸单宽内被冲刷的岩土体体积 ( $m^3/m$ )； $E$  为波浪作用于单宽库岸的动能 ( $t \cdot m$ )； $k_p$  为岩土体的抗冲刷系数 ( $m^3/t$ )； $t$  为水库运营年限； $b$  为经验常数，取决于滨岸浅滩中堆积部分宽度，变幅为 0.45~0.95。

该法有一定的物理依据，但“关系方程”的建立同时也需要一定量的观测样本。在海洋工程科学领域，借助于造波机已经通过室内试验及某些海岸工程的实地观测，建立了相应的动力法预测方程，供地域性海岸工程加固设计使用。

统计法主要是依据已建成水库的观测资料，用数理统计方法建立边岸再造的规模、速度与各种自然因素的统计关系，借以预测设计水库的边岸再造过程。由于实际问题的复杂性，属于经验方法的类比法得到了广泛的应用。

工程实践证明较为有效的具体预测方法包括：E. Γ. 卡丘金法、Γ. C. 佐洛塔廖夫法及平衡剖面法3种。其中E. Γ. 卡丘金法使用最广。其基本原理和计算方法简介如下。

卡丘金于1949年提出的库岸最终塌岸预测宽度计算公式为，

$$S = N \left[ \frac{(A + h_p + h_B)}{\tan \alpha} + \frac{(h_s - h_B)}{\tan \beta} \right] - \frac{(A + h_p)}{\tan \gamma} \quad (2)$$

式中： $S$  为最终塌岸宽度； $N$  为与土的类型有关的系数； $A$  为水位变化幅度； $h_p$  为波浪影响深度； $h_B$

为浪爬高度;  $h_s$  为正常高水位以上岸坡的高度;  $\alpha$  为水库水位变动和波浪影响所及范围内, 形成均一的磨蚀浅滩坡角;  $\beta$  为水上岸坡的稳定坡角;  $\gamma$  为原岸坡坡角。

图 2 给出了适合于长江三峡工程库区塌岸预测的卡丘金方法图解。该式的实质是依据实测的洪、枯水变幅带各类岩性岸坡长期稳定坡角, 根据几何关系用图解法求解库岸最终塌岸预测宽度, 其精度

取决于计算参数的选定。类似卡丘金法的计算公式很多, 但它们本质上是相同的。考虑到计算参数较多选自经验值, 因此在实际预测时必须对类似水动力条件和类似岩土体条件下的已有岸坡塌岸进行观测, 以获得相应的较为可靠的计算参数。有时, 参考水库蓄水前洪、枯水变幅带岸坡形态数据, 也具有较好的预测效果。

表 1 塌岸预测

Tab. 1 Forecasting results of reservoir bank destruction

位置	计算参数							预测塌岸宽度 (m)	
	$N$	$A$ (m)	$h_p$ (m)	$h_B$ (m)	$h_s$ (m)	$\alpha$ ( $^\circ$ )	$\beta$ ( $^\circ$ )		$\gamma$ ( $^\circ$ )
3# 滑坡前缘	0.6	30	1.40	0.50	10	6	60	12	97
1# 滑坡前缘	0.6	30	1.40	0.50	13	7	60	18	102

卡丘金法适用于自然岸坡较陡, 且由松软均质土体 (如黄土、砂土、砂质粘土及粘土等) 组成的库岸 (如大型水库的中、上游地带岸坡) 塌岸预测。目前, 在我国中小型水库塌岸预测中, 多采用这种方法。

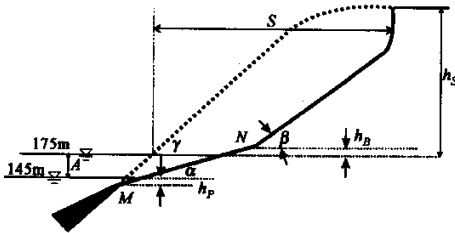


图 2 卡丘金方法预测塌岸图解

Fig. 2 Forecasting method for reservoir bank destruction by E. Г. Качугин (1949)

## 2.2 塌岸预测区的工程地质条件

滑坡前缘主要由 I、II 级阶地松散冲积物组成, 水库建成后在风浪、船行波及库水位周期性的涨落下有产生塌岸的工程地质条件 (图 1)。

宝塔坪诸滑坡前缘无论是地形地貌还是地层岩性方面, 岸坡不同部位都有着极为明显的差异。这些差异决定了不同岸段具有不同的塌岸规模、速度等预测, 进而决定了护坡方案的确定。

整个宝塔坪滑坡前缘岸坡可以明显地分为 2 个带: 即 1#、3# 滑坡前缘的①带和 2# 滑坡前缘的②带。①带又可以分为 2 个亚带①-1、①-2, 此 2 个亚带皆具备塌岸的工程地质条件, 需要对 145~177 m 的变动带范围进行塌岸预测评价; 而②带主要由块

状碎石土及似层状块裂岩组成, 不具备塌岸的工程地质条件, 但仍需要结合港口复建对 145~177 m 的库水位变动范围进行护坡处理。

## 2.3 塌岸预测评价

将 3# 滑坡的 I-I' 勘测断面、1# 滑坡 IV-IV' 勘测断面 (均为主断面) 前缘部分的上述各参数代入卡丘金塌岸宽度预测公式 (2), 分别估算得到的最终塌岸宽度为 97 m 和 102 m (表 1)。可以看出, 二者没有明显的量级差别。

表 1 的计算说明如下:

(1)  $A$  值取三峡水库正常高水位与正常低水位高程差, 即  $175 \text{ m} - 145 \text{ m} = 30 \text{ m}$ ;

(2)  $h_B$  值是先根据 B. P. 安德烈扬诺夫经验公式 (1950) 计算波高  $h$ :  $h = 0.0208 \cdot W^{5/4} \cdot L^{1/3}$ , 式中  $W$  为风速 (m/s), 考虑塌岸一般发生在高风速条件下, 故不能采用平均风速, 按勘察报告提供的数据取最大风速  $16 \text{ m/s}$ ;  $L$  为吹程 (km), 按水库正常蓄水位  $175 \text{ m}$  考虑, 宝塔坪滑坡处水库宽约  $2.0 \text{ km}$  (即  $L$  值); 按上式求得  $h = 0.84 \text{ m}$ 。随后, 再按  $h$  值的  $0.6$  倍求得  $h_B$ 。

(3)  $h_p$  值是采用 H. E. 康德拉捷也夫公式求得,  $h_p = 0.64 \cdot arsh(8.1h)$ ;

(4)  $N$  值是是与岩土体成分、岸坡形状及水文条件尤其是波浪有关的经验系数, 通常是小于 1 的正小数, 它表示磨蚀浅滩部分占整个浅滩 (包括磨蚀或侵蚀浅滩与堆积浅滩两部分) 的百分比。它对最终塌岸宽度的预测起重要作用。 $N$  值的经验数据是: 砂: 0.5; 亚粘土: 0.6; 冰碛粘土: 0.8; 粘土: 1。

(5)  $\alpha$  为库水位变动和波浪影响所及范围内, 形成均一磨蚀浅滩的坡角, 它对最终塌岸宽度的预测也有重要影响。主要根据河谷边岸平水位处河滨浅滩坡角实测值确定, 或根据不同土体的有关波浪浪高与河滨浅滩坡角之间关系的统计曲线查得。

(6)  $\beta$  是磨蚀浅滩最高点  $M$  以上形成的新的斜坡坡角, 相当于岸坡天然稳定斜坡坡角。

(7)  $\gamma$  和  $h_s$  为实测值。

由于自然地理地质条件多种多样,其相互配合的情况也极其复杂,影响塌岸的因素较多,所以已有的预测公式和计算参数的推荐值多带有经验性和地区性。因此,上述的塌岸宽度预测结果是粗略的。准确的塌岸预测应建立在塌岸影响因素如水位波动特征、风浪、岸流和淤积,以及具体的水位波动带岸坡剖面监测的基础上。例如,可以沿 3# 滑坡前缘的 I-I' 勘测断面进行定期的水准测量;同时,要注意研究波浪的作用特点,滨岸浅滩的形成以及水上塌岸过程。只有逐步积累有关边岸再造进程资料,才有可能较准确预测边岸再造速度和规模,以及塌岸对滑坡体稳定的影响。

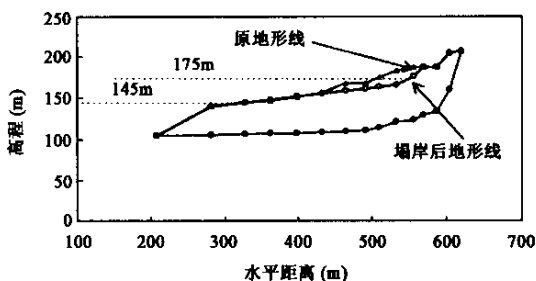


图3 塌岸前后 3# 滑坡剖面对比

Fig. 3 Comparison of profile shapes before and after bank destruction for 3# landslide

## 2.4 塌岸对滑坡稳定性的影响

图3是不考虑卡丘金经验系数  $N$  值时的最终塌岸剖面与原始滑坡前缘岸坡剖面的对比。表2是塌岸前后 3# 滑坡稳定性对比计算结果,可以看出塌岸发生后 3# 滑坡体的整体稳定性将增加 10% 左右。它表明塌岸后削减了滑坡后缘的盖重,使滑坡稳定性略有增加。但这种增加不意味着可以不予考虑塌岸对场地的稳定性影响,因为塌岸的长期作用后果通常难以预料。

表2 塌岸前后 3# 滑坡稳定性对比

Tab. 2 Comparison of landslide stability of 3# landslide before and after bank destruction

工况(库水位)	稳定性系数 $F_s$		$F_s$ 增加率 (%)
	塌岸前	塌岸后	
145 m	1.486	1.631	9
175 m	1.266	1.439	13
175 ~ 145 m	1.206	1.371	13

## 3 石笼护坡设计

图4是护坡工程平面布置图,其布置原则是:填挖方基本平衡,顺坡护坡,变坡处自然转换,坡比小于 1:5 地段不予护坡,护坡高程范围为 145 ~ 177 m,护坡下界设置脚墙,护坡体中部设置马道,在各个塌岸分带设置纵向检修台阶,某些地段护坡体下部设置与地表排水系统相匹配的排水暗渠,局部地段根据地形特点设置石笼挡土墙。图5是代表性的护坡工程剖面图。下面主要说明石笼垫和石笼挡土墙工程设计的要点。

### 3.1 石笼垫护坡

石笼垫护坡可以用作永久性构筑物,用以防护库水波浪对岸坡的冲蚀。石笼垫由高镀锌箱笼内填置块、碎石组成。石笼的主要结构物是石笼网箱,形状采用长方体。它的优点是:块石滤层配合土工布透排水良好,可消除护坡结构物背面的水压力差;柔性结构,贴地性佳,消波防冲效果好;整体性好,箱笼互相连接构成一体,能够有效抵抗波浪作用,保护岸坡岩土体;耐久性好,高镀锌网箱抗腐蚀性好;机编成型片状网,生产迅速,运输储存便利;不需要规则的、较大的石料,可以就地取材;组合容易,施工方便,经济实用。

石笼网为高镀锌钢丝线机编成双绞、六边形网片制成,线材为高镀锌树脂密著铁丝,具有高度防腐性能。其理论寿命为 100 a。网孔外接圆直径为 8 ~ 12 cm,钢丝直径可选用  $\varphi = 3 \sim 4$  mm。网箱尺寸可以根据岸坡地形地质条件进行调整。石笼内的填料块碎石必须抗风化、不易碎裂、不易溶解且坚硬,块径应超过网孔的 1.5 ~ 2 倍,在块体不露出网孔的条件下,填石愈小愈好,块体愈小,受力愈均匀,柔性更大。装笼要塞严,靠近网孔的外层应选用较大尺寸的石块仔细码砌。

石笼垫的厚度是根据波浪击坡时石笼垫不致破坏确定的。波浪传播到斜坡面时发生变形与反射,部分水体沿坡上爬,部分水体透过石笼渗入坡内。当波浪沿坡下落时,坡体内水体向外渗出,形成水流对石笼的推力,石笼可因推力过大失重而脱出,或受到过大的沿坡面水流冲击而滑动。石笼垫护坡结构的整体性接近于混凝土板,但由于其透水性好,受力条件优于混凝土板。因此自保守角度其厚度可参照混凝土护面板厚度公式确定,

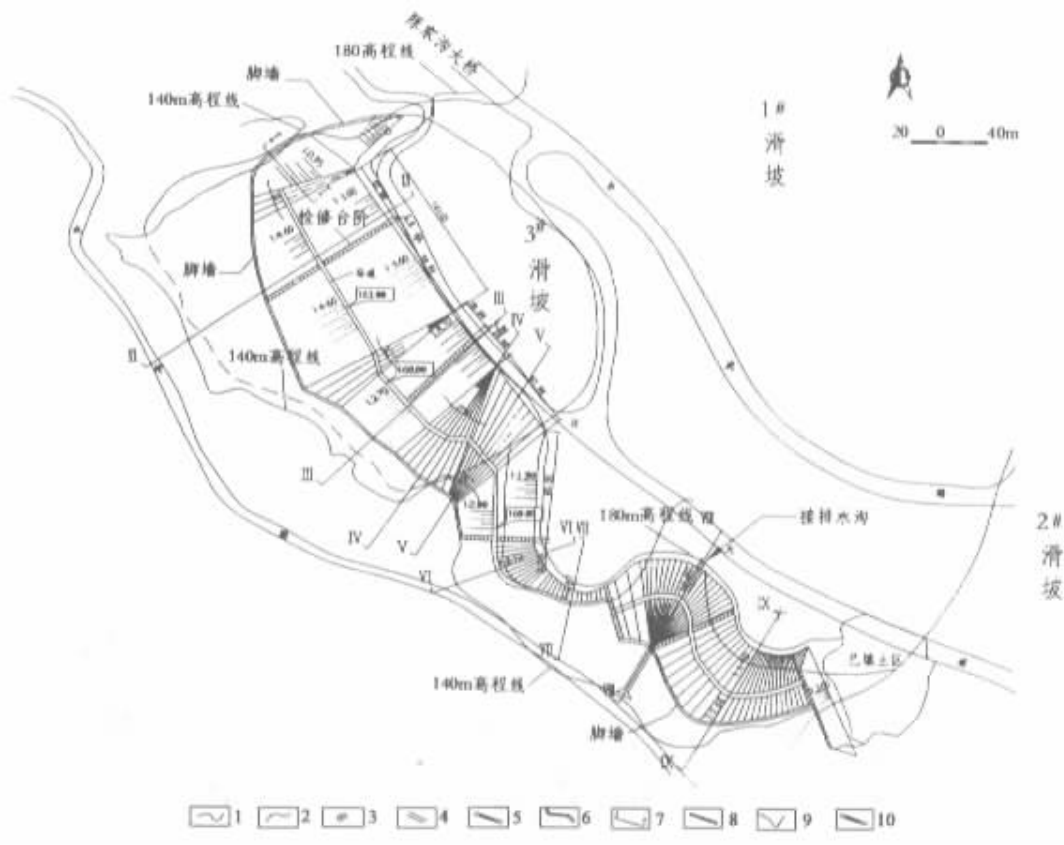


图 4 护坡设计平面布置图

Fig. 4 Layout of slope protection engineering for Baotaping landslide

1-滑坡边界; 2-推测滑坡边界; 3-检修台阶; 4-脚墙; 5-排水暗渠; 6-马道; 7-剖面号;  
8-石笼挡墙; 9-140 m 或 180 m 高程线; 10-排水明渠



图 5 II-II 剖面护坡工程设计图

Fig. 5 Design of slope protection engineering for II-II section using rock filled mattresses

$$t = \eta H \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_b - \gamma} \frac{L}{Bm}} \quad (3)$$

式中,  $t$  为护面板厚度;  $\eta$  是经验系数, 一般取 0.075;  $H$  为波高;  $\gamma$  为水重度;  $\gamma_b$  为护面板重度;  $L$  为波长;  $B$  为护面板宽度;  $m$  为坡比。这里, 取  $H=0.5$ ,  $L=30$ ,  $m=1.5$ , 得出  $t=0.26$  m, 因此设计石笼垫厚度采用 30 cm。

石笼垫的厚度还可根据试验结果确定。一般地, 其抗滑所需厚度数据为<sup>[11]</sup>

$$t_1 = \frac{h}{2.8(1-n)(G-1)m} \quad (4)$$

式中,  $t_1$  为抗滑所需石笼垫厚度;  $h$  为波高;  $P$  为波高;  $n$  为块石空隙率;  $G$  为块石比重。抗悬浮所需要的厚度  $t_2$  为

$$t_2 = \frac{h}{\sqrt[3]{(1-n)(G-1)m}} \quad (5)$$

式中,  $t_2$  为石笼垫悬浮厚度。

被防护地段的地面应进行削坡和回填压实, 压实度大于 90%。场地整修后边坡上铺一层 20 cm 厚的粗砂垫层, 垫层之上再铺一层土工反滤布。土工布应满足抗拉、抗冲刺等强度要求。其网眼应满足透水性好、不易堵塞的要求。各块土工布之间的搭接宽度不小于 1 m。土工布之上铺设石笼垫, 石笼垫长边方向应顺坡向, 笼间应用粗铅丝捆扎, 主筋要牢固连接。护坡高程 174.5 ~ 177 m 范围, 采用石笼垫植生绿化。石笼垫护坡的脚墙采用 75# 浆砌石,

开挖深度大于 1 m。脚墙顶部与石笼垫顶部齐平。脚墙拐弯处用圆弧段连接。

### 3.2 石笼挡土墙

对于 1# 滑坡东侧前缘陡坡岸地段来说,则需要用石笼挡土墙代替石笼垫护坡。石笼挡土墙适合于各类地基和复杂地形条件。近年出现的高拉力树脂密著钢丝石笼网,更解决了防锈问题。因此,对于具有潜在变形、塌岸的高陡水库岸坡而言,具有柔性、贴地性的石笼挡土墙是较为理想的护坡技术。另外,机器编制,生产迅速,储存运输便利,组合容易都是其具有优势的特点。

高拉力树脂密著钢丝石笼网为机编成型,网目尺寸一致,网股三转缠绕组合,并有特殊树脂密著于高拉力钢丝外表。其理论寿命为 100 a。网孔直径

一般为 10 cm, 钢丝需镀锌, 其抗拉强度 > 60000 kN/cm<sup>2</sup>, 主体钢丝外径为 2.6 mm, 主丝树脂厚度 0.6 mm, 边框线外径为 3.2 mm, 边线树脂厚度 0.6 mm。

石笼挡土墙稳定性验算包括抗倾倒、抗滑动、抗剪断 3 方面。对于抗倾倒来说, 假定土体内摩擦角为  $\varphi$ , 墙后填土坡度为  $\beta$ , 填土重度为  $\gamma$ , 石笼挡土墙总重量为  $W$ , 则主动土压力为 (图 6 (a))

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma K_a H^2 \quad (6)$$

式中, 主动土压力系数  $K_a$  为

$$K_a = \cos\beta \frac{\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi}}{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi}} \quad (7)$$

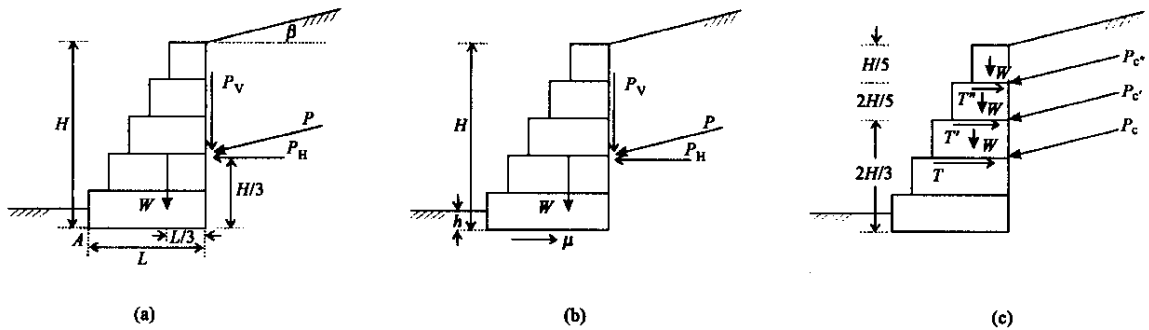


图 6 石笼挡土墙结构型式和受力分析

Fig. 6 Geometry modes and acted forces of retaining wall consisted of rock filled mattresses

当  $\beta = 0^\circ$  时,  $K_a = \tan^2(45^\circ - \varphi)$ 。主动土压力作用于挡土墙的  $H/3$  处, 可分解为  $P_V$  和  $P_H$  2 个分力,  $P_V = P \sin\varphi$ ,  $P_H = P \cos\varphi$ 。假定  $A$  为力矩中心, 则抗倾倒稳定系数  $F_T$  为,

$$F_T = \frac{M_r}{M_f} = \frac{W(L - L/3) + (P_V \cdot L)}{P_H \cdot (H/3)} \quad (8)$$

对于抗滑动来说, 假定石笼底埋于地面下  $h$  深度, 则产生被动土压力  $P_b$  (图 6 (b))

$$P_b = \frac{1}{2} \gamma K_b H^2 \quad (9)$$

式中,  $K_b$  为被动土压力系数。一般地说,  $K_b = 1/K_a$ 。当然, 石笼平贴地面时将不产生被动土压。

因此, 可求得抗滑动稳定系数  $F_S$  为,

$$F_S = \frac{\mu(W + P_V) + P_b}{P_H} \quad (10)$$

对于抗剪断来说, 需要对各层石笼间接触面进行验算。石笼层间接触面之最大破坏剪力  $P_c$  (图 6 (c))

等于石笼结构自身的抵抗拉力与因垂直主动土压力  $P_V$  和石笼自重  $W$  共同产生的摩擦阻力之和。垂直主动土压力  $P_V$ , 为由所验算的石笼间接触面以上主动土压力  $P$  的分量。因此, 可求得接触面抗剪断稳定系数  $F_{SN}$  为

$$F_{SN} = \frac{\sum S + [(W + P_V) \cdot \mu']}{P_c} \quad (11)$$

式中,  $\sum S$  为该层所有石笼绑扎铁丝之抗拉强度总和;  $\mu'$  为石笼与石笼间的摩擦系数;  $P_V$  为剪断面以上主动土压力的垂直分量;  $P_c$  等于剪断面以上主动土压力  $P$ ;  $W$  为剪断面以上石笼的重量。

一般而言, 当上述 3 个稳定系数均大于 1.5 时, 即认为属安全结构设计。

石笼挡土墙尺寸的确定取决于多种因素。当计算所得稳定系数不满足要求时, 应按表 3 加以修正。除重力式外, 石笼挡土墙必须埋设于土层下以增加

被动土压力,也可铺设碎石或卵石、块石用以增加摩擦。护坡式挡土墙减小坡度可增加墙后土重,从而加大抗滑力矩。

表 3 石笼挡土墙设计标准\*

Tab. 3 Design standard of retaining wall consisted of rock filled mattresses

	悬臂式挡土墙	重力式挡土墙	护坡式挡土墙
倾倒安全系数	> 2.5 绝对安全	> 3.0 绝对安全	> 2.0 绝对安全
	≥ 1.5 O.K	≥ 1.5 O.K	≥ 1.5 O.K
	< 1.5 需加大尺寸	< 1.5 需加大尺寸	< 1.5 需减小坡度
滑动安全系数	> 2.0 绝对安全	> 2.0 绝对安全	> 1.8 绝对安全
	≥ 1.5 O.K	≥ 1.5 O.K	≥ 1.5 O.K
	< 1.5 增加埋设深度或增设 CAB	< 1.5 考虑埋设或加大尺寸	< 1.5 增加埋设深度或减小坡度
剪断安全系数	> 2.0 绝对安全	> 2.0 绝对安全	> 1.5 绝对安全
	≥ 1.5 O.K	≥ 1.5 O.K	≥ 1.2 O.K
	< 1.5 加大尺寸	< 1.5 加大尺寸	< 1.2 加大尺寸或减小坡度

\* 参见:台湾久安实业有限公司,①“高拉力钢丝(树脂密著)石笼”设计参考;②镀锌铁丝套 PVC 箱型石笼。

按照上述步骤对宝塔坪滑坡前缘 3 处位于冲沟上的石笼挡土墙进行设计验算,结果均能满足要求。这 3 处石笼挡土墙的高度均在 10 m 以内。

## 4 结语

长江三峡工程库区滨库城镇众多,岸坡工程地质条件复杂多变,库水动力作用强烈,护岸工程量多面广。因此准确预测可能塌岸的地段与规模,选择适合当地工程技术条件及经济发展水平的护坡方案,已成为当务之急。我国北方地区的水库工程也广泛涉及此类问题。因此,加紧水库塌岸预测及防护工程科学研究十分必要。本文仅是针对即将实施的三峡库区大规模塌岸防护工程,所开展的一个工程案例的初步实践体会,旨在加深理解塌岸的本质及其具体防治方法。

总的来说,水库塌岸预测及防护是一项综合性的工程科学课题,涉及多个学科,并且自工程立项论证到最后实施,还包含科学的决策问题。在一项大的工程开展之前,进行示范性的专题研究,从具体工程中抽取带有共性的工程科学问题,加以研究,并及时反馈设计,是必须的。迄今为止,水库塌岸预测仍然以经验为主。但笔者认为,积累有足够观测资料时,完全可以获得较为准确的预测结果。针对三峡水库特点,石笼垫和石笼挡土墙是一种理想的护坡技术,值得推广。

致谢 感谢中元基础工程有限公司颜宇森总经理的支持。是该公司组织实施了宝塔坪滑坡防治工程的全部勘察设计工作;感谢宜昌久丰植生工程有限公

司、久丰制网有限公司总经理崔建刚先生对本项研究工作提供的技术资料 and 热情支持。

## 参考文献:

- [ 1 ] 张倬元,王士天. 工程动力地质学 [ M ]. 北京:中国工业出版社,1964,28-68.
- [ 2 ] A B 卡拉乌舍夫. 河流与水库水力学 [ M ]. 北京:水利水电出版社,1958.
- [ 3 ] 水利部. 中华人民共和国行业标准——碾压式土石坝设计规范 (SL260-98) [ S ]. 2002.
- [ 4 ] 国家技术监督局,建设部. 中华人民共和国国家标准——堤防工程设计规范 (GB50286-98) [ S ]. 1998,10.
- [ 5 ] Dipper Martin J Jr. Ship-borne wave height measurements [ J ]. Marine Technology, Soc of Naval Architects & Marine Engineers, 1997, 34 ( 4 ): 267-275.
- [ 6 ] 余广明. 堤坝防浪护坡设计 [ S ]. 北京:水利电力出版社,1987.
- [ 7 ] 李玉成. 波浪对海上建筑物的作用 [ M ]. 北京:海洋出版社,1990.
- [ 8 ] И В 波波夫,等. 电力部译. 水力发电建设工程地质勘察 [ M ]. 北京:电力工业出版社,1956,230-247.
- [ 9 ] Ragozin A L, Burova V N. A method for approximate forecast of reservoir bank destruction [ J ]. Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo, In Russian, 1993:20-26.
- [ 10 ] Kagan A A, Krivonogova N F. Prediction of reshaping of coastline of reservoirs in the zone of frost soils [ J ]. Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo, In Russian, 1991:11-14.
- [ 11 ] Brown C T, Foster D N, and Smith T A D. Design and use

of rock filled mattresses for coastal protection [ A ]. Pro-

ceedings of the International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing countries. 1983 :229 - 242.

## Approximate forecasting methods for reservoir bank destruction and shore protection : case study

WANG Jian-feng<sup>1</sup>, WU Meng-xi<sup>1</sup>, LI Zhi-yi<sup>2</sup>, SU Ai-jun<sup>3</sup>, CUI Zheng-quan<sup>3</sup>

( 1.Division of Engineering Sciences , Institute of Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China ;

2.Faculty of Exploration Technology & Engineering , China University of Geosciences , Beijing 100081 , China ;

3.Bureau of Geotechnique , Changjiang Water Resources Commission , Wuhan 430010 , China )

**Abstract** : Taking Baotaping landslide located at the middle part of the Three Gorges reservoir as an example , the paper has presented in detail the approximate forecasting methods for reservoir bank destruction and design theories for shore protection , with highlighting the design method for rock filled mattresses . Based on engineering geology research , it was predicted that the potential bank destruction was located in the front of the landslide where the thickness of Quaternary deposit reaches to 50m . The bank with potential destruction was further zoned into two parts of strips , the bank destruction widths were respectively predicted using Е Г Качугин method . The influence of bank destruction upon the stability of landslide has been assessed . All research works have shown that bank destruction of the front of the landslide necessitated slope protection . According to the characteristics of water level change in the Three Gorges reservoir , as well as the engineering geological condition of the landslide , the slope protection was limited between an elevation range of 145 ~ 177m and used rock filled mattresses revetment and retaining wall consisted of rock filled mattresses . Finally , the authors have concluded that rock filled mattresses used for the slope protection is the fittest one for protecting the Three Gorges reservoir bank .

**Key words** : the Three Gorges reservoir ; reservoir bank destruction ; rock filled mattresses for slope protection

田 万方数据  
WANFANG DATA