

金龙山 II 区滑坡体的随机场有限元分析

12
57-62

严春风 文海家 朱可善
(重庆建筑大学岩土工程研究所 400045)

P6402.22
TU452

摘要 通过对金龙山 II 区滑坡体进行了随机场有限元分析,得到了基于岩体 Hoek - Brown 经验强度准则随机概率模型、Mohr - Coulomb 抗剪强度准则概率模型和 Drucker - Prager 准则概率模型的滑坡体的可靠度分布规律;在此基础上对二滩水电站金龙山 II 区巨厚层滑坡体稳定性作了评价。

关键词 节理岩体;随机场有限元;强度准则;概率模型;可靠度
中图分类号 TU457

滑坡体

1 金龙山 II 区滑坡体工程地质概况

金龙山位于四川省攀枝花市二滩水电站库首左岸,属横断山脉中段,海拔 1 000 ~ 2 700 m,面积约 1.3 (km)²。坡体南缘为雅砻江(区内由北西向南东流过),东西两侧分别为金龙沟和阿布郎当沟深切,坡体呈三面临空状态,区内属顺向坡,坡向 210°,坡度 22° ~ 30°,地层呈单斜,倾向南,倾角 35°,边坡蠕滑方向为 210° ~ 220°。滑坡体距水电站坝轴线 570 m,距上游围堰 250 m,至左岸导流洞入口 80 m。金龙山滑坡稳定性直接攸关二滩水电站的建设和建成后的运营。多年来,在二滩水电开发公司等单位的长期观测下,探明控制滑坡发育的滑动优势面是沿下二叠统阳新组灰岩顶底面或上二叠统峨眉山组玄武岩的似层面发育的层间错动面与中缓倾角裂隙。滑坡全区分为 I II III 三个区。其中 II 区是一个巨厚层滑坡体(体积约 2 000 m³)。目前处于滑坡形成的初期阶段,随着蓄水位的提高,造成其坡脚内部水文工程地质条件和岩土体物理力学性质的改变,促使 II 区滑坡体加剧滑动,使其稳定性降低,这对水电站的安全运营有着极大的潜在威胁。至此,对该滑坡区进行有关稳定性研究有着十分重要的现实意义。

II 区巨厚层滑坡体处于南北向阿不郎当背斜南倾伏东翼,区内的岩层为:厚约 20 m 的梁山粘土岩、厚约 30 m 的阳新灰岩以及厚度为 200 m 峨眉玄武岩。滑坡体主要发育的坡体结构面有五组,其中又以倾向 70° ~ 190°,倾角为 35°左右的结构面和另一中缓倾角裂隙组(倾向与坡体一致,倾角约 10° ~ 20°)为主。

II 区是一个巨厚层滑坡体,由于岩层层面倾向和斜坡坡面倾向基本一致,岩层滑动是沿岩层倾角与斜坡倾角坡度大致相等的薄 - 中厚层破碎夹层,在重力作用下的滑动,因此它属于顺层节理岩体自然边坡滑动。滑坡体示意图如图 1 所示。II 区巨厚层滑坡体的主滑段与抗滑段的长度之比大于 10 比 1,坡面的平均坡度为 30° ~ 45°,滑坡前后缘高度差 200 m,滑坡坡脚的水平层状粘土层和软岩上无坚硬岩层,坡脚靠近雅砻江河谷下切又形成坡度很大的近似临空面,这对于滑坡体的稳定极为不利。且滑坡体方量 2 000 万 m³,在一定的诱发因素作用下其滑动破坏具有突发性和破坏性。按以往经验,这种滑坡一般均经历蠕滑 - 滑动 - 剧滑三个阶段。目前该蠕滑体还处于发育初期的蠕滑阶段。

II 区巨厚层滑坡体的蠕滑带是由后段往前段发展,即先沿梁山粘土岩顶部发育,并转入斜切阳

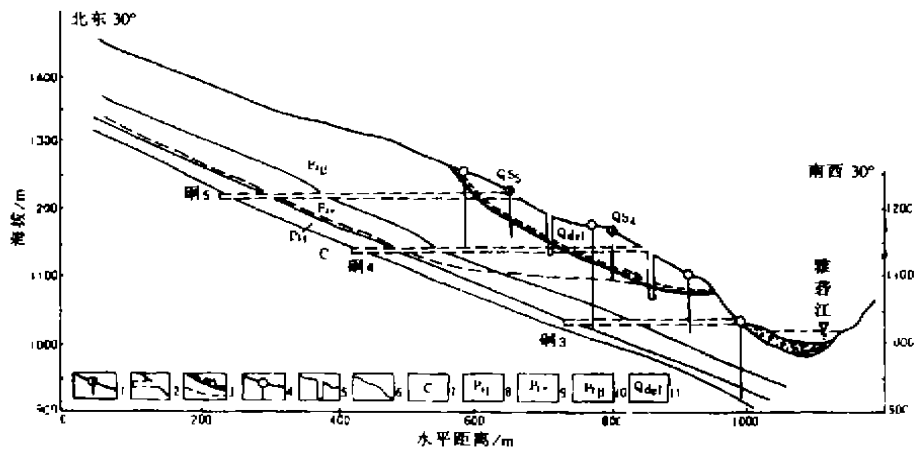


图 1 金龙山 II 区巨厚层蠕滑体 B-B' 剖面

1 钻孔倾斜观测点; 2 平硐变形观测点; 3 油库古滑坡滑面 II 区蠕滑面; 4 钻孔; 5 竖井; 6 地层界线;
7 石炭系灰岩; 8 下二叠统梁山组粘土岩; 9 下二叠统阳新组灰岩; 10 上二叠统峨眉山组玄武岩; 11 第四系滑坡堆积层

图 1 II 区巨厚层滑坡体的随机场网格划分示意图

新灰岩,循峨眉玄武岩底部绿泥石铁质粘土岩中的滑动破裂带,后穿入峨眉玄武岩内。这标志着 II 区巨厚层滑坡体已逐渐进入切层为主的扩容段,即其蠕滑带由主滑段转入抗滑段。此外,由探槽揭示,II 区巨厚层滑坡体的剪切出口在高程 1080 m 左右。

由于滑坡体的稳定性与滑坡岩体性质的空间相关特性有着十分密切的关系,并且,滑坡岩体存在本质上十分复杂的各种不确定性,为了能有有效的解决这些问题,本文拟采用随机场有限元法对金龙山 II 区滑坡体进行有关稳定性分析。

2 弹塑性随机场有限元的计算格式

和定值有限元方法相比,随机场有限元不但要计算位移和应力的定值,而且要计算它们的协方差,其最大特点是需要形成 $N+1$ 个总刚度矩阵(N 为随机变量个数)并解相应次数的方程组。在弹塑性计算过程中,反复调整刚度矩阵并非明智之举。从这个角度看,增量初应力法是对随机有限元比较有效的方法。

由随机有限元原理,位移的均值可由下式求得:

$$E[d] = d^0 + \bar{d}'' \quad (1)$$

式中:

$$\bar{d}'' = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^q \sum_{l=1}^q d_{kl}'' \text{Cov}(b_k, b_l) \quad (2)$$

位移的协方差为:

$$\text{Cov}(d^i, d^j) = \sum_{k=1}^q \sum_{l=1}^q (d_{ik}^i d_{jl}^j \text{Cov}(b_k, b_l)) \quad (3)$$

式中: b^i, b^j 为位移 d 的 i 个和第 j 个的自由度,

$\text{Cov}(b_i, b_j)$ 为在第 i 个和第 j 个的单元岩体参数 b 之间的协方差。

$$d_{ik}^i = \left(\frac{\partial d^i}{\partial b_k} \right)_i \quad (4)$$

应力的均值为:

$$E(\sigma) = D^0 e^0 + \left\{ \sum_{i=1}^q \sum_{k=1}^n \left[D'_{ik} B(d_i)^{m_i} + \frac{1}{2} D''_{ik} B(d^0)^{m_i} \right] \text{Cov}(b_k, b_i) \right\} \quad (5)$$

应力的协方差为:

$$\begin{aligned} \text{Cov}(\sigma^{m_i}, \sigma^{m_j}) = & \left\{ \sum_{k=1}^q \sum_{l=1}^q [(\bar{D}^{m_i}) B(d_k^{m_i})] (\bar{D}^{m_j}) B(d_l^{m_j})^T \right. \\ & + (\bar{D}_{kk}^{m_i} B^{m_i} d^{m_i}) (\bar{D}_{ll}^{m_j} B^{m_j} d^{m_j})^T + (\bar{D}^{m_i}) B^{m_i} d^{m_i} (\bar{D}^{m_j}) B^{m_j} d^{m_j})^T \\ & \left. (\bar{D}_{kk}^{m_i} B^{m_i} d^{m_i}) (\bar{D}^{m_j}) B^{m_j} d^{m_j})^T \right\} \text{Cov}(b_k, b_l) \end{aligned} \quad (6)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} \bar{D}^{(m)} &= (D^{(m)})^0 \\ \bar{D}_{kk}^{(m)} &= \left(\frac{\partial D}{\partial b_k} \right)_{b_k}^{(m)} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其计算步骤为:

(1) 在第 i 级荷载下第 j 次迭代按弹性分析求解单元的应力增量 $\{\Delta\sigma_i\}$ 、应变的增量 $\{\Delta e_i\}$ 以及各应力增量间协方差 $\text{Cov}\{\Delta\sigma_k, \Delta\sigma_l\}$ 和应变增量间的协方差 $\text{Cov}\{\Delta e_k, \Delta e_l\}$;

(2) 将这些单元的应力、应变的增量以及各应力增量间和应变增量间的协方差和第 $i-1$ 级荷载下的应力、应变及它们的协方差一一相加, 得到各单元当前荷载下的应力、应变及协方差值; 即:

$$\text{Cov}\{\sigma_k, \sigma_l\} = \text{Cov}\{\sigma_k, \sigma_l\}_{i-1} + \text{Cov}\{\Delta\sigma_k, \Delta\sigma_l\} \quad (8)$$

$$\text{Cov}\{e_k, e_l\} = \text{Cov}\{e_k, e_l\}_{i-1} + \text{Cov}\{\Delta e_k, \Delta e_l\} \quad (9)$$

$$\{\sigma_i\} = \{\sigma_{i-1}\} + \{\Delta\sigma_i\} \quad (10)$$

$$\{e_i\} = \{e_{i-1}\} + \{\Delta e_i\} \quad (11)$$

(3) 和定值弹塑性有限元依据屈服函数是否大于零来判断单元破坏与否的作法不同的是, 随机场有限元是根据基于各应力值和及它们间的方差的单元可靠度或失效概率来判断单元破坏与否。也即:

$$P(F \geq 0) \geq P' \quad \text{或} \quad \beta(F \geq 0) \leq \beta' \quad (12)$$

式中 p', β' 分别为给定的目标失效概率和目标可靠度值。

(4) 修正屈服状态的单元的应力增量, 并计算超余应力及各超余应力间协方差, 其具体作法是将第二步算得的各单元当前荷载下的应力减去超余应力值; 当前荷载下的协方差值加上超余应力间的协方差; 即:

$$\text{Cov}\{\sigma_k, \sigma_l\} = \text{Cov}\{\sigma_k, \sigma_l\}_{i-1} + \text{Cov}\{\Delta\sigma_k, \Delta\sigma_l\} + \text{Cov}\{\sigma_k^*, \sigma_l^*} \quad (13)$$

$$\{\sigma_i\} = \{\sigma_{i-1}\} + \{\Delta\sigma_i\} - \{\sigma_i^*} \quad (14)$$

(5) 计算超余应力引起的附加荷载并按节点将它迭加到荷载体系中去。

$$\{\Delta P_i\} = \int_{\Omega} [B]^T \{\sigma_i^*} dv \quad (15)$$

$$\{P_i\} = \{P_{i-1}\} + \{\Delta P_i\} \quad (16)$$

(6) 重复 1-5 步计算, 当所有单元收敛至精度时, 施加下一级荷载, 直至所有荷载计算完成为止。

3 II 区滑坡体随机场有限元计算参数取值及网格划分

3.1 物理力学参数概率特征的取值

根据《四川省雅砻江二滩水电站初步设计-岩石力学试验研究报告》(水利电力部成都勘测设计院, 1985.7) 所确定的参数, 随机场有限元计算所需参数值如下表 1 所示:

表 1 二滩金龙山 II 区巨厚层滑坡体岩体参数概率特征取值表

	中风化玄武岩(6#)	断后破裂带(11#)	微风化-新鲜玄武岩5#)	参数模型
弹性模量(MPa)	1.500(300)	300(100)	10.000(1.000)	正态分布
泊松比	0.25(0.022)	0.26(0.022)	0.23(0.022)	正态分布
凝聚力C(MPa)	1.2(0.2)	1(0.3)	2.0(0.1)	对数正态
内摩擦角 ϕ (°)	0.84(0.13)	0.51(0.33)	1.2(0.11)	对数正态
单轴抗压强度(MPa)	112(21)	53(15.3)	197.3(19.7)	对数正态
H-B经验准则参数m	0.808(0.2)*	0.531(0.22)*	1.12(0.11)*	正态分布
H-B经验准则参数s	0.003 2(0.000 32)*	0.000 81(0.000 21)	0.004 2(0.000 22)*	正态分布

注: 1 表中 * 为根据人剪试验参数反求 Hoek-Brown 经验强度准则参数 m, s 值;

2 表中括号中的数值为各个参数的标准差。

3.2 岩体物理力学和强度参数相关距离及相关系数的确定

由于滑坡体的节理岩体经受长期的风化作用,距地表 30~40 m 以内深度的 II 区巨厚层滑坡体岩体为纵横交错的风化的裂隙所切割后,多数裂隙为泥沙所充填,其物理力学性质的空间变异性很大,相关距离很小。根据节理和裂隙切割岩体的实际工程情况,考虑随机场单元划分尺寸,对强风化和中风化的滑坡岩体和破裂滑动带取岩体物理力学性质相关距离为 5 m,在滑动面以下的微风化~新鲜的基岩,取岩体物理力学性质的相关距离为 50 m,本文在随机场有限元计算时,取抗剪强度参数 C 、 ϕ 之间的互相关系数为 -0.6。

3.3 II 区巨厚层滑坡体的随机场网格划分

基于二滩水电站金龙山 II 区巨厚层滑坡体的地质特征及滑坡特征,为了分别便于进行对处于 II 区巨厚层滑坡体不同部位的节理岩体的物理力学性质的随机场模拟,整个滑坡体被划分三个网格区域参照图 1:

- (1) A 区:滑坡体部分网格(用于模拟节理岩体物理力学性质相关距离为 5 m 区域);
- (2) B 区:滑动带部分网格(用于模拟节理岩体物理力学性质相关距离为 5 m 区域);
- (3) C 区:基岩部分网格(用于模拟节理岩体物理力学性质相关距离为 15 m 区域);

4 滑坡体稳定性可靠度分析

图 2 和图 3(左)分别是应用 Mohr-Coulomb 抗剪强度准则概率模型和 Drucker-Prager 准则概率模型对二滩水电站金龙山 II 区巨厚层滑坡体进行分析得到的可靠度等值线图;图 3(右)是应用岩体 Hoek-Brown 经验强度准则随机概率模型对滑坡体进行分析得到的可靠度等值线图。由三个等值线图可以看出在滑坡体内应用三个强度准则的概率模型所计算的可靠度指标的分布总体特征是相似的,这些随机特征包括 a. 在坡顶拉剪应力区有一个范围不大的可靠度指标相对最低的区域(D-P 准则和 M-C 准则约为 2.0, H-B 准则为 1.0 左右); b. 沿滑坡体下面的滑动带范围内,可靠度指标是整个研究分析区域内较低的(D-P 准则约为 2.5, H-B 准则和 M-C 准则均为 2.0 左右); c. 在滑坡体坡坡趾的剪出口附近,可靠度指标也较低(D-P 准则约为 3.5, H-B 准则和 M-C 准则均为 3.0 左右),说明此处较容易发生破坏。

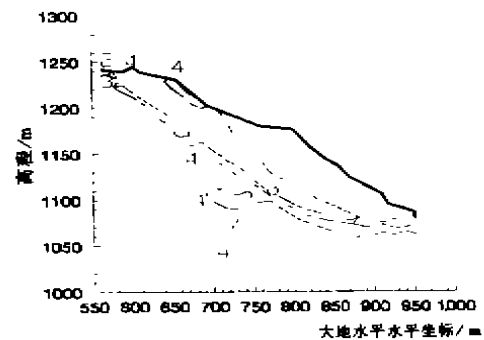


图 2 金龙山滑坡体 D-P 准则可靠度等值线图

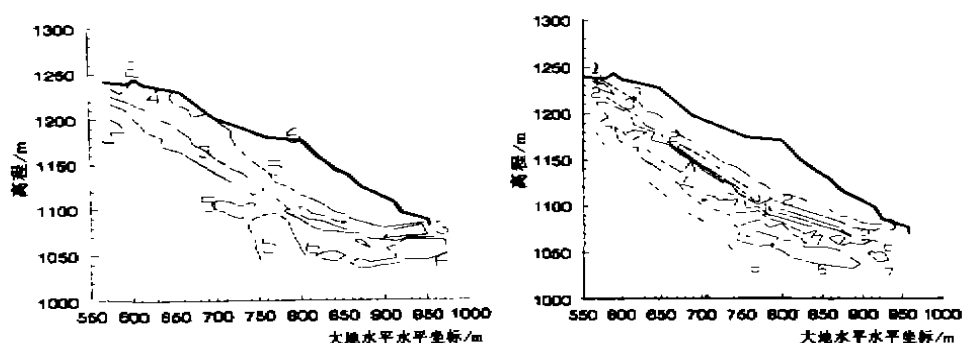


图 3 金龙山滑坡体 M-C 准则(左)H-B 准则(右)可靠度等值线图

二滩金龙山节理岩体边坡稳定可靠度分析成果表明, 不论应用三个破坏准则中的任何一个进行分析, 由可靠度指标的分布规律可以明显看出, 滑坡体的可靠度指标的分布大致可分为以下几个区域:

(1) 可靠度最低区域位于滑动面上, 局部可靠度指标不超过 2.0, 这一区域一般失效概率最大。

(2) 处于坡顶处岩体的可靠度仅次于滑动带, 该处的可靠度一般在 2.5~3.5 区间。

(3) 处于坡趾部位的可靠度指标略比坡顶处高一些, 可以预见, 该处的破坏比滑动面和坡顶处出现的要晚一些。

(4) 滑坡体内部的可靠度指标一般在 4.0~5.0 之间, 因说该处的可靠度指标相对较高, 说明滑坡体内部出现局部坏动的可能性不大。

(5) 基岩的可靠度指标最高, 该处岩体破坏的可能性较小。

此外, 由利用三个强度准则求出的二滩水电站金龙山 II 区巨厚层滑坡体可靠度等值线图可以看出, 对于相同位置的参考点来说, 应用 Drucker-Prager 强度准则概率模型求出的可靠度指标明显比应用 Mohr-Coulomb 强度准则概率模型和 Hoek-Brown 经验强度准则概率模型所求得可靠度指标值都要大。它们排列的顺序为:

$$\beta_{D-P} \geq \beta_{M-C} \geq \beta_{H-B} \quad (17)$$

5 成果分析及建议

通过上面应用随机场有限元对二滩水电站金龙山 II 区巨厚层滑坡体稳定性可靠度分析, 可以得出以下结论:

1) 二滩水电站金龙山 II 区巨厚层滑坡体在自重的作用下, 其坡顶出现拉剪应力集中现象, 该部位的水平位移均值及方差明显增大; 无论应用三个强度准则概率模型中的任何一个分析, 可靠度指标都急剧降低, 若按《水工结构工程可靠度统一标准》规定的工程结构的目标可靠度衡量, 其可靠度值不但明显低于一级水工结构目标可靠度值 4.2, 而且低于三级水工结构目标可靠度值 3.2。

2) II 区巨厚层滑坡体在自重的作用下, 坡趾出现压剪应力集中现象, 该部位的水平位移均值及方差虽然不大, 但应用三个强度准则概率模型分析, 可靠度指标都相当低。若按《水工结构工程可靠度统一标准》规定的工程结构的目标可靠度衡量, 其可靠度值和坡顶处一样, 不但明显低于一级水工结构目标可靠度值 4.2, 而且低于三级水工结构目标可靠度值 3.2。

3) 若考虑蓄水 1200 m 高程, 二滩水电站金龙山 II 区巨厚层滑坡体近乎一半地段均泡在水位之下, 由于水的物理力学作用, 将使 I 区巨厚层滑坡体的可靠度更低, 其失稳的概率更大。一旦金龙

山 II 区巨厚层滑坡体失稳,不但对二滩水电站大坝造成一定威胁,而且可能引起金龙山岩层的整体滑动甚至失稳,因此应对金龙山滑坡体进行全面的风险分析。

由以上分析,可以看出由于二滩水库蓄水以后,滑坡体坡脚处于库水浸泡,必然导致岩体强度降低,这样更不利于滑坡体的稳定,因此应对二滩水电站金龙山 II 区巨厚层滑坡体给予充分的重视,在积极建立观测站进行深入细致观测的同时,应对滑坡体的治理进行深入的研究。

参 考 文 献

- 1 严春风. 岩质边坡可靠度分析方法及其二滩金龙山滑坡分析中的应用:[博士学位论文]. 重庆:重庆建筑大学, 1999. 1
- 2 Kiyosho Ishii, Makoto Suzuki, Stochastic Finite Element Method For Slope Stability Analysis, Structure Safety, No. 4, 1987
- 3 陈 虬, 李 贤, 戴志敏. 等参局部平均随机的随机有限元分析. 西南交通大学报, 1991, (3)
- 4 水利部成都勘测设计研究院. 二滩水电站金龙山谷坡变形观测总结报告(1985-1993), 1992. 6
- 5 水利部成都勘测设计研究院. 二滩水电站金龙山谷坡变形观测总结报告, 1996. 6

The SFEM Analysis on the Jinlongshan Slope of the Ertan Project

Yan Chunfeng Wen Haijia Zhu Keshan

(Chongqing Jianzhu University, Chongqing 400045)

Abstract The stability of Jinlongshan rock slope in the Ertan Project is analyzed by means of the SFEM and probability models of strength criterion. The conclusions of analysis are similar to the measured results. The differences among the results of probabilistic Mohr - Coulumb criterion, probabilistic Drucker - Prager criterion, probabilistic Hoek - Brown Criterion are discussed in the thesis.

Key Words joint rockmass; stochastic field finite element method(SFEM); strength criterion; probabilistic failure model; reliability