

白鹤滩拱坝整体安全度的非线性分析

梅明荣¹, 徐建强², 任青文¹

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要 根据白鹤滩拱坝及其坝肩岩体的特点, 建立能够反映坝体混凝土和坝基岩体相互作用的有限元模型, 应用 MARC 软件对拱坝-地基系统的应力应变进行了非线性分析, 研究了白鹤滩拱坝的整体安全度、主要结构面的屈服情况和坝肩岩体的稳定性。采用强度储备法、水头超载法、水密度超载法计算的白鹤滩拱坝的整体安全度分别为 3.0~3.5, 1.5~1.6 和 2.0~2.3。计算结果表明, 坝基内的结构面有屈服现象出现, 左岸结构面 sh5、右岸结构面 C3 的稳定性应引起重视, 白鹤滩拱坝的整体安全度基本满足设计要求。

关键词 稳定性分析; 整体安全度; 坝肩稳定; 非线性有限元; 白鹤滩拱坝

中图分类号: TV642.4

文献标识码: A

文章编号: 1006-764X(2006)05-0041-04

Nonlinear analysis of overall safety factor for Baihetan arch dam//MEI Ming-rong¹, XU Jian-qiang², REN Qing-wen¹
(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. East China Investigation and Design Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Based on the geo-mechanical characteristics of the Baihetan arch dam, an FEM model is established for reflecting the interaction between the concrete of dam body and rock mass of dam foundation. By use of the software MARC, nonlinear analysis of stress-strain for the arch dam-foundation system is performed for studying the integral safety factor of the arch dam, the yield zone on main structural surfaces and the stability of arch dam abutment. The calculated results of the overall safety factors of the arch dam by the strength reserve method, the water-level overcharge method, and the water specific gravity overcharge method are 3.0~3.5, 1.5~1.6, and 2.0~2.3, respectively. It is also shown that some faults and weak layers occur on the structural surface of the dam foundation, and that the stability of the structural surface on left bank sh5 and the one on right bank C3 should be highly concerned. As a result, the overall safety factor of the arch dam can meet the design requirement.

Key words: stability analysis; overall safety factor; stability of dam abutment; nonlinear finite element; Baihetan arch dam

白鹤滩水电站位于金沙江下游的四川宁南县和云南巧家县境内, 上接乌东德, 下邻溪洛渡, 是一座以发电为主, 兼有防洪、拦沙、改善下游航运条件等综合利用效益的大型水电站, 也是国家西电东送骨干电源点之一。大坝采用抛物线混凝土双曲拱坝, 坝顶高程 827.00 m, 坝底高程 550.00 m, 最大坝高 277.00 m, 为 I 级建筑物。白鹤滩坝址两岸山体雄厚, 地形基本对称, 临江坡左岸坡缓, 右岸坡陡。坝址区岩体呈单斜构造, 岩层缓倾上游及右岸, 顺层挤压破碎带和节理发育, 并受 NW 向及 NE 向节理切割。勘线坝址的断裂构造较发育, NW 向断层、挤压破碎带、节理等是形成 NW 向陡壁、张裂缝的基本因素, NE 向的断层 F17 斜切金沙江, 两岸形成冲沟, 缓倾角的层间(内)错动带构成缓坡或陡壁表面的裂缝。

本文研究白鹤滩拱坝在复杂地质条件 and 设计荷

载作用下的位移和应力状态, 研究拱坝-地基系统的整体稳定性, 给出拱坝的整体安全度以及左右坝肩岩体失稳的可能模式及相应的稳定安全系数。

1 力学模型及分析方法

1.1 岩石与混凝土本构关系

通过有限元法, 建立白鹤滩拱坝整体系统的力学模型。混凝土坝体、岩体和岩体结构面均应用非线性本构关系。坝体混凝土采用 Buyukozturk-Concrete 准则^[1], 岩体结构面采用 Mohr-Coulomb 准则, 坝基岩体采用 Drucker-Prager 准则。岩石与混凝土在复杂加载条件下的渐进破坏实验结果表明, 材料在应力空间中的初始屈服面和破坏面具有相同的形状^[2], 位于屈服面和破坏面之间的为塑性区, 超出破坏面的为各向异性体或为毫无刚度的破碎体。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50379005); 国家电力公司科技资助项目(SPKJ006-18)

作者简介: 梅明荣(1960—), 男, 上海人, 副教授, 博士, 从事水工混凝土结构分析及其材料性能研究。E-mail: mmei@hhu.edu.cn

1.2 稳定性分析方法与破坏判据

采用极限平衡分析方法进行稳定性分析是建立在应力应变分析基础上的,得到的位移场和应力场满足全部的基本方程和边界条件,使稳定性分析具有正确的理论基础。可以归纳为两种方法:直接法和间接法^[3]。直接法是在正常荷载、正常参数下计算系统的位移场和应力场,假定某个面是破坏面,由极限平衡公式直接计算整体稳定安全系数。但直接法必须事先给出破坏面,适用于破坏面为平面或圆弧面的简单问题。间接法通过超载或改变抗剪强度的方法使系统结构达到极限平衡状态,再根据系统达到极限平衡状态时的强度改变倍数或荷载改变倍数来确定稳定安全度。间接法的优点是不必事先给出滑移面,可以在分析的过程中自动通过搜索确定,因而能够解决较复杂的工程问题。不足之处是间接法需要可以用来判定极限平衡状态的破坏判据。由于目前还没有统一的、为力学界和工程界共同认可的失稳判据,而根据不同失稳判据得到的稳定安全度数值一般是不同的,这就给稳定安全度的确定带来了困难。

文献^[3]提出两种类型的判据:收敛性判据和突变性判据。所谓收敛性判据是由于极值点失稳是一种弹塑性失稳,失稳时系统的部分或全部已处于塑性状态,变形迅速增加,而承载力下降或保持不变。因而,荷载变形曲线在极值点处具有平行于坐标的切线,在计算上代表了迭代不收敛。所以在进行弹塑性分析的过程中,在排除其他原因之后,确实是由于塑性区发展太大引起的迭代计算不收敛,可以作为系统失稳的判据,这就是收敛性判据。所谓突变性判据是指处于极限平衡状态的系统由一种平衡状态向另一种平衡状态的转变。突变性判据认为任何能够反映系统状态突变的现象都可以作为失稳判据。如:关键部位的相对位移(应变)或位移突然变大;关键部位的位移速率不能趋于零或突然变大;结构的塑性屈服区太大,形成滑移通道;外力所做的功与系统形变势能突变。本文对于白鹤滩大坝-地基系统的复杂整体稳定性,采用基于力学系统稳定性理论基础上的间接法进行分析。

2 计算参数与工况

2.1 材料的物理力学性质

坝体采用 C35 混凝土,其密度 $\rho = 2.4 \text{ t/m}^3$,静弹性模量 $E_c = 21 \text{ GPa}$,泊松比 $\mu = 0.17$,热线胀系数 $\alpha = 1.0 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。坝基岩体分区及相应力学指标如表 1 和表 2 所示。

表 1 坝基岩体力学指标

分区范围 (高程)/m	岩 性	变形模量 E/GPa	泊松比 μ	摩擦系数 f'	黏聚力 c'/MPa
827.00 ~ 780.00 (左岸)	块状玄武岩 (卸荷带)	12.0	0.25	1.10	1.2
780.00 ~ 600.00 (左岸)	微张柱状 玄武岩	14.0	0.22	1.15	1.4
600.00 以下 (左、右岸)	新鲜柱状 玄武岩	20.0	0.20	1.40	1.8
600.00 ~ 700.00 (右岸)	微张柱状 玄武岩	16.0	0.22	1.20	1.5
700.00 ~ 827.00 (右岸)	块状玄武岩	14.0	0.22	1.15	1.4

表 2 主要断层和层间错动带力学指标

编号	产状	宽度/m	变形模量 E/GPa	摩擦 系数 f'	黏聚力 c'/MPa
F14	N45° ~ 65°W, SW $\angle$ NE $\angle$ 85° ~ 90°	0.5 ~ 1.4	0.12	0.32	0.040
F16	N55° ~ 80°W, NE $\angle$ SW $\angle$ 80° ~ 90°	0.3 ~ 1.5	0.18	0.40	0.080
F17	N25° ~ 45°E, NW $\angle$ 65° ~ 80°	0.2 ~ 0.5	0.09	0.20	0.004
F18	N30° ~ 40°W, SW $\angle$ 70° ~ 90°	0.1 ~ 0.5	1.20	0.50	0.120
C3	N35° ~ 50°E, SE $\angle$ 15° ~ 25°	0.3 ~ 0.5	0.90	0.45	0.120
C4	N35° ~ 50°E, SE $\angle$ 15° ~ 25°	0.2 ~ 0.3	1.20	0.50	0.120
C5	N35° ~ 50°E, SE $\angle$ 15° ~ 25°	0.2 ~ 0.3	0.90	0.45	0.120
sh5	N40°E, SE $\angle$ 15° ~ 20°	0.15 ~ 0.35	0.25	0.42	0.080
sh7	N30° ~ 50°E, SE $\angle$ 15° ~ 25°	0.1 ~ 0.25	0.25	0.42	0.040
sh18	N40°E, SE $\angle$ 22°	0.1 ~ 0.4	0.25	0.42	0.080

2.2 荷载与工况组合

上下游水位等主要荷载与工况组合见表 3。考虑到地应力测点稀少,地基浅层的构造应力不大,对拱坝变形和稳定性研究的影响很小,地应力场采用自重应力场。

表 3 主要荷载与工况组合

荷载与工 况组合	上游水位/m	下游水位/m	淤沙高度/m	温度应力
组合 1	820.00	600.00	710.00	设计温降
组合 2	820.00	600.00	710.00	设计温升
组合 3	760.00	600.00	710.00	设计温升

注 泥沙密度为 500 kg/m^3 ,内摩擦角为 0° 。

2.3 映射变换法网格剖分

白鹤滩拱坝的左右岸分布有多条陡倾角和缓倾角的断层或层间层内错动带,根据勘探数据,陡倾角断层的倾角几乎为 90° ,而缓倾角的断层或层间错动带几乎互相平行,而且倾角较小,在 40° 左右。按常规网格剖分方法:平切若干典型高程进行网格剖分,然

后再将上下层连接 这样做虽然能很好地模拟陡倾角断层,但对于倾角较小的缓倾角断层或层间错动带的模拟却有很大的困难,因为上下平切图中不一定都能切出缓倾角的断层或层间错动带。映射变换思路是解决复杂岩体结构网格划分的有效方法。鉴于此,采用映射变换的思路,沿着层面缓倾角的方向对岩体地基进行切分,计算出这些平面的方程以及各面上控制点的坐标,然后将上下面连接。由于坝体的剖分是按等高平切进行,而坝体与地基连接处的控制点必须在同一高程,通过映射变换可将层状岩体网格转换成整体坐标网格,从而较好地模拟了白鹤滩复杂的地质构造与地形。采用著名的非线性软件 MARC^[4]进行分析,网格示意图见图 1,坐标原点在坝中心线的海平面上,以 x 轴正方向指向右岸, y 轴正方向指向下游, z 轴正方向铅直向上。

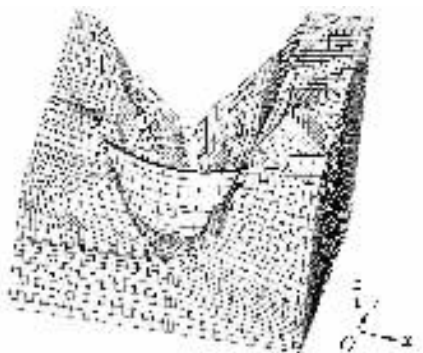


图 1 白鹤滩拱坝-岩体系统有限元网格

3 计算成果与分析

3.1 白鹤滩拱坝整体安全度

本文采用两种方法确定拱坝-地基系统的整体安全度:强度储备法和超载法。强度储备法是将起控制作用的结构面材料强度降低为原来的 $1/K_1$ (K_1 为强度储备安全度)后,计算坝体及地基的应力场和位移场,考察坝体和建基面上某些关键点的相对位移、应力、整体应变能等情况。限于篇幅,以工况 1 为例,计算白鹤滩拱坝的整体安全度。图 2 为坝顶最大位移与 K_1 的关系曲线。其中当 $K_1 < 2.5$ 时,岩块与结构面的相对刚度比值有所调整,坝顶最大位移略有下降但幅度很小。图 3 显示了拱坝-地基系

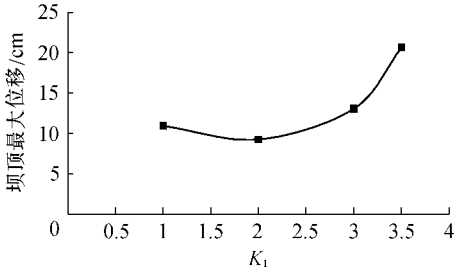


图 2 坝顶最大位移与 K_1 的关系

统整体应变能与 K_1 的关系。由图 2 和图 3 可知,当 $K_1 > 3$ 时,关键点的位移和系统整体应变能发生突变,且计算不收敛。因此白鹤滩拱坝整体的强度储备安全度 K_1 在 3.2~3.5 之间。

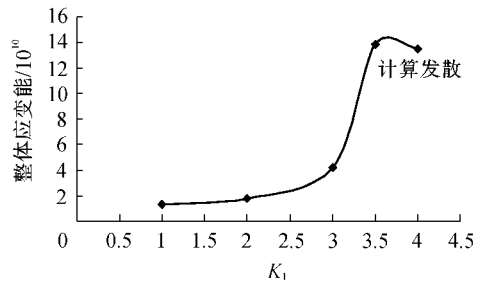


图 3 拱坝-地基系统应变能与 K_1 的关系

水位超载法采用抬高上游水位的方法分析拱坝-地基系统的整体安全度。即以抬高水位时的水压值与正常水位的水压值之比 K_{2p} 来考察坝体和建基面上一些关键点的相对位移及整体应变能。以工况 1 为例,当 $K_{2p} < 1.5$ 时,坝顶位移和应变能曲线基本上保持线性关系,变化率也很小。但是当 $K_{2p} > 1.5$ 时,曲线变化出现拐点,变化率急剧增大,当水头增量 $\Delta H = 60$ m (相应的 $K_{2p} = 1.5$) 时,坝顶位移超过近 0.5 m,此时整个坝体已失去了正常的使用功能,由此可以判断白鹤滩拱坝水头超载安全度约为 1.5~1.6,计算结果如图 4 和图 5 所示。为了与水头超载法的结果比较,笔者还应用水密度超载法计算超载安全值 K_{2w} 。水密度超载法通过提高水密度的倍数从而得到拱坝的超载安全度,分别计算了 $K_{2w} = 1.5, 1.8, 2$ 等的超载安全度。结果表明, $K_{2w} = 2.3$ 时计算发散。强度储备法、水头超载法和

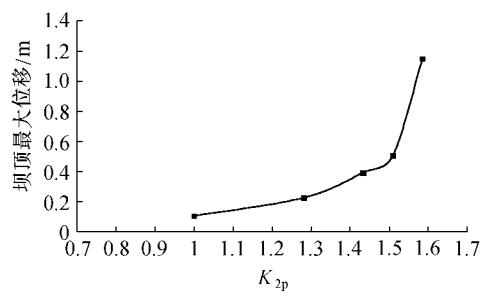


图 4 坝顶最大位移与 K_{2p} 的关系

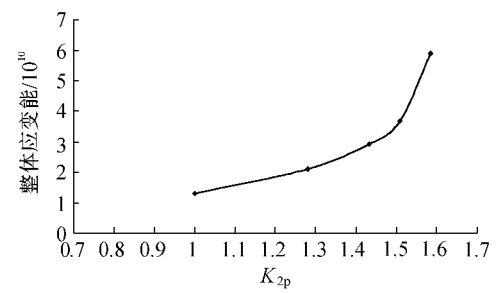


图 5 拱坝-地基系统应变能与 K_{2p} 的关系

载法计算所得白鹤滩拱坝整体安全度分别为 3.0 ~ 3.5 ,1.5 ~ 1.6 和 2.0 ~ 2.3。

作为比较 表 4 列出了国内部分已建和在建拱坝的超载系数 其中溪洛渡和小湾为河海大学土木工程学院工程力学系的计算成果 沙牌和引子渡为四川大学的计算成果。综合上述分析 笔者认为白鹤滩拱坝整体安全度基本满足设计要求。

表 4 国内部分已建和在建拱坝安全度

工程简称	坝高/m	超载系数
溪洛渡	278	4.5
小 湾	292	4.2~4.5
沙 牌	132	3.8
引子渡(加固)	130	3.6

注 小湾超载系数 2.5 ~ 3.5 时位移出现突变 4.5 时建基面屈服区连通。

3.2 岩体主要结构面的屈服破坏状况

仍以工况 1 为例按强度储备法计算 研究坝基岩体主要结构面的屈服情况。图 6 为主要结构面与坝体的相对位置示意图。图 7 和图 8 为主要结构面屈服示意图(限于篇幅 只给出典型结构面)。随着结构面材料强度的降低 屈服区有明显的增加。其中陡倾角断层 F17 当 $K_1 \geq 3$ 时整个屈服区几乎贯通。而对于缓倾角层间、层内错动带 C3 情况略微好一些 但当 $K_1 = 3.5$ 时 也接近贯通。F14 在与拱坝建基面相交处以及与 F17 相交处有屈服现象。而从右岸上游延伸至左岸坝底的 F16 同样也是在与建基面相交处有屈服现象 与右岸的缓倾角结构面

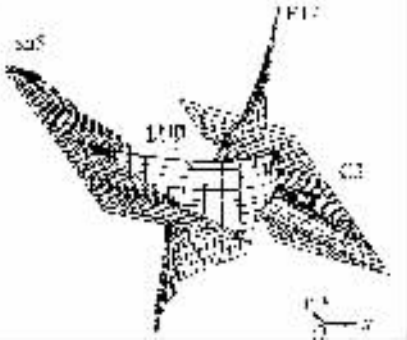


图 6 结构面 F17 ,C3 ,sh5 位置示意图

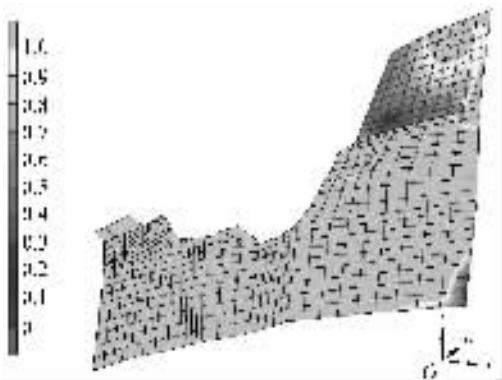


图 7 F17 屈服示意图($K_1 = 3$)

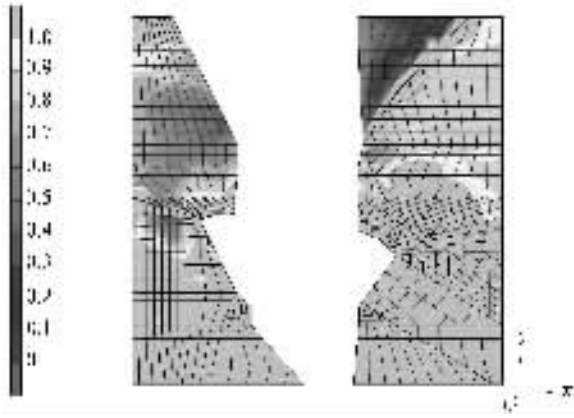


图 8 C3 屈服示意图($K_1 = 3$)

如 C5 ,C4 ,sh18 ,C3 等相交处也有屈服现象 这部分屈服发生在离开坝体的上游区域。断层 F17 在左岸较大的范围内发生屈服。缓倾角结构面 sh5 ,sh7 ,C5 ,C4 ,sh18 ,C3 在与建基面相交处附近形成屈服区。左岸的 sh5 在上游区域有较大的屈服范围 而 C3 右岸的屈服区域要大于左岸。综上可以看出 陡倾角结构面中 F17 屈服最为严重 而缓倾角结构面中 sh5 和 C3 屈服最为严重。

岩体结构面屈服分析比较复杂 由于结构面本身的强度比较低 即使在自重荷载的单独作用下也可能发生屈服。随着时间的推移 已屈服的结构面在荷载的长期作用下又逐渐固结 达到一种临界的弹性平衡状态。故计算结果的屈服破坏区偏大 并不能完全反映实际情况。

3.3 坝肩岩体的稳定性

坝肩岩体的稳定性对拱坝整体安全是十分重要的。白鹤滩拱坝左、右坝肩的顺层层间、层内错动带与拱坝的径向力方向接近平行 可以构成抗力体的底滑面 采用点安全系数分析坝肩岩体沿这些缓倾结构面的稳定性。点安全系数根据两个主要工况 (工况 1 和 2)弹性分析的应力成果给出。

图 9 为工况 1 下 C3 结构面点安全系数 K_f 的等值云图。图中浅灰色表示 $K_f \leq 1.1$ (图 9(a))和 $K_f \leq 1.3$ (图 9(b))的区域 图 9(a)中右岸拱座及下游岸坡处有 $K_f \leq 1.1$ 的区域 图 9(b)中 $K_f \leq 1.3$ 的区域主要



图 9 结构面 C3 点安全系数等值云图

(下转 58 页)

行的仿真试验,得出结论:在被控对象数学模型不够精确、参数发生变化或发生负荷扰动时,高精度模糊控制器的动态特性好、鲁棒性强,综合性能优于其他两种控制器。

参考文献:

[1] 沈祖诒.水轮机调节[M].北京:水利水电出版社,1998.
[2] 田勇,沈祖诒.变论域模糊控制器及其应用研究[J].现代制造工程,2005(4):98-100.
[3] 李洪兴.Fuzzy控制的本质与一类高精度Fuzzy控制器的设计[J].控制理论与应用,1997,14(6):868-872.
[4] WANG Li-xin.Fuzzy systems are universal approximator[C]//IEEE International Conference on Fuzzy Systems, France, Nice, 1992:1163-1170.

(上接第44页)分布在两端拱座、右岸F18断层以及右岸下游岸坡。

由以上成果可以看出:①左岸主要层间错动带滑动的可能性要大一些。②结构面sh5左岸有大范围 $K_f \leq 1.3$ 的区域,因此,该结构面的稳定性应引起重视。③结构面C3在右岸有大范围 $K_f < 1.3$ 的区域,右坝肩下游靠近临空面附近还存在 $K_f < 1.0$ 的区域,表明该区域可能会出现局部性破坏。但从结构面产状来看,右岸为逆向坡,对保持岩体稳定有利。其次,为了保证下游岸坡安全,可以采取表面性保护措施。④结构面sh7上的点安全系数基本上都大于1.3,稳定性较好。

4 结 语

本文通过对白鹤滩大坝系统的应力、变形、屈服的数值分析,得到以下几点认识:①坝基内的结构面有屈服现象。其中陡倾角结构面中以F17屈服最为严重,而缓倾角结构面则是sh5和C3最为严重。②采用强度储备法,得到白鹤滩拱坝强度储备安全度

(上接第54页)的缺水率较其他子系统小。根据对计算结果的分析表明模型的供需分析结果比较合理。

3 结 语

南水北调工程是实现我国水资源优化配置的战略举措。本文在考虑南水北调东线供水条件下,根据大系统分解协调理论建立以区域供水系统缺水率最小为目标的水资源供需分析数学模型,将其运用于济南市水资源供需分析研究中,计算结果表明了模型的合理性和可用性,为多水源联合供水地区的水资源供需分析计算提供了新的参考。

参考文献:

[1] 周祖光.海南省水资源供需分析[J].水利经济,2005,23

[5] BUCKLEY J J. Sugeno type controllers are universal fuzzy controllers[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1993, 53: 299-303.
[6] 李洪兴.模糊控制的插值机理[J].中国科学: E 辑, 1998, 28(3): 259-267.
[7] ZENG Xue-jin, SINGH M G. Approximation theory of fuzzy systems SISO case[J]. IEEE Trans Fuzzy Systems, 1994, 2(2): 162-176.
[8] TIAN Yong, SHEN Zu-yi. Study of contraction-expansion factor on the variable universe adaptive fuzzy controller[C]//YAO Hong-kang, Computational Intelligence and Industrial Applications, 西安:世界图书出版公司, 2004: 390-394.
[9] 高新陵, 周锐, 朱碧田. 寻孔模糊控制器研究与开发[J]. 河海大学学报:自然科学版, 1999, 27(4): 30-34.

(收稿日期: 2005-10-21 编辑: 骆超)

在3.0~3.5之间,采用水位超载法时,得到水头超载安全度为1.5~1.6,而采用水密度超载法时,水密度超载安全度为2.0~2.3,综合的整体安全度是有一定保障的。③结构面sh5左岸有大范围区域点安全系数 $K_f \leq 1.3$,该结构面的稳定性应引起重视。结构面C3在右岸有大范围区域点安全系数 $K_f \leq 1.3$,右坝肩下游靠近临空面附近还存在 $K_f < 1.0$ 的区域,表明该区域可能会出现局部性破坏。但从结构面产状来看,右岸为逆向坡,对保持岩体稳定有利。本文分析所得成果可为设计施工提供有益的参考。

参考文献:

[1] 朱伯芳.有限单元法原理与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2000:314-323.
[2] 山田嘉昭.非线性有限元法基础[M].钱仁耕,乔端,译.北京:清华大学出版社,1988:102-121.
[3] 任青文.岩体平衡分析方法的研究进展[J].岩石力学与工程学报,2001,20(增刊2):1303-1309.
[4] 陈火红. MSC. Marc/Mentat 2003 基础与应用实例[M].北京:科学出版社,2004:158-166.

(收稿日期: 2005-10-13 编辑: 骆超)

(3): 47-49.
[2] 吴伟, 张剑峰. 沈阳市水资源供需分析及可持续利用战略研究[J]. 水资源保护, 2004(3): 40-42.
[3] 陈守真, 余爱珍. 福建省水资源供需分析与对策研究[J]. 福建师范大学学报:自然科学版, 1997, 13(4): 107-112.
[4] 张会言, 王煜, 张新海, 等. 西北地区水资源供需分析和配置方案[J]. 人民黄河, 2002, 24(6): 17-19.
[5] 黄永基, 马滇珍. 区域水资源供需分析方法[M]. 南京: 河海大学出版社, 1990: 43-63.
[6] 朱道立. 大系统优化理论和应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1988.
[7] 冯尚友. 水资源系统工程[M]. 武汉: 湖北省科学技术出版社, 1991: 35-40.

(收稿日期: 2005-11-08 编辑: 骆超)