

小湾高拱坝坝基浅层松弛区超载屈服研究

吴数伟 张建海 张雪晶

(四川大学水利水电学院 四川 成都 610065)

摘要 通过对小湾高拱坝坝基浅层松弛区的弹塑性分析,采用数值计算方法,揭示超载过程中坝基屈服发展规律,并采用坝基整体超载安全系数等方法评价大坝局部安全性、整体安全性以及两者之间的关系。通过分析认为小湾坝基浅层松弛区发生屈服尚属于局部问题,坝基整体超载安全度仍可达 3~3.5。

关键词 坝基 浅层松弛层 坝基屈服 大坝超载 整体稳定性 高拱坝 小湾水电站

中图分类号 :TU441⁺.6 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2008)04-0020-03

Overloading and yielding study of loosened shallow foundation at Xiaowan Arch Dam // WU Shu-wei, ZHANG Jian-hai, ZHANG Xue-jing (College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract : The development of a yielding area in the loosened shallow foundation at Xiaowan Arch Dam is discussed using an elasto-plastic model. The hydro-pressure overloading method is applied to the evaluation of integral stability of the entire structure and the stability of the dam foundation. The analysis of failure of the dam foundation shows that the local stability storage factor of the foundation is small but the integral stability factor of the entire structure could reach 3-3.5. Hence, the occurrence of a yielding area in the loosened shallow foundation of the dam is a limited, local problem.

Key words : dam foundation; loosened shallow area; yielding of dam foundation; overload; integral stability; high arch dam; Xiaowan hydropower station

关于高拱坝在超载时的坝肩破坏机理,工程上已经有了大量研究成果,并且多采用坝肩在发生破坏时的超载倍数作为大坝整体的安全储备,但对于大坝坝基浅层松弛区破裂屈服问题却研究较少。

小湾水电站坝址区地应力值较高,尤其是在河谷下部高程存在明显地应力集中现象,坝基开挖后,浅表层岩体普遍存在开挖卸荷、松弛现象。建基面浅表层的岩体松弛后,在一定范围内降低了基岩变形模量,影响了其完整性和均质性,从而会改变拱坝的应力、变形分布,带来不利后果。根据小湾水电站拱坝坝基工程处理措施研究的中期成果显示,河床坝基以下 2 m 范围内的坝基面抗剪安全系数较低,是整个坝基的薄弱部位。因而本次弹塑性超载计算重点研究了坝基浅层部位的屈服发展情况,全面分析了坝基岩体卸荷、松弛带来的影响。

为便于叙述,本次研究“坝基”特指拱坝建基面以下 20 m 深度范围内的开挖卸荷松弛影响岩体。

1 坝基岩体稳定分析方法

关于大坝浅层的破坏机理,任青文等^[1]、钱向东

等^[2]通过对拱坝沿建基面破坏机理的研究,认为建基面材料的摩擦系数、岸坡角、拱圈中心角对拱坝沿建基面的稳定性影响最大,其次是拱坝的高度和拱圈的位置,河谷宽度的影响最小。对于平均岸坡角在 45°以上、拱圈中心角在 40°以上的拱坝,当建基面材料的摩擦系数不小于 1 时,一般不可能发生沿建基面的失稳破坏。上述结论给出了在分析坝基浅层时应考虑的因素,但未对局部破坏对整体稳定性的影响程度作评价,实际上由于拱坝是高度超静定的复杂结构,很难仅采用纯理论的方法研究其稳定性。

采用超载方法预测坝基可能的破坏形式及局部破坏给整体带来的影响,并且综合多种方法(如工程类比法等)确定拱坝安全性是条可行之路。笔者采用数值计算方法,通过对小湾拱坝浅层松弛面的弹塑性分析,揭示了其屈服发展规律,研究了大坝坝基局部安全性、大坝整体稳定性以及两者之间的关系。

在坝基岩体稳定性分析评价中,常常采用的稳定安全系数评价方法有:点强度储备安全系数法、面强度储备安全系数法、坝基整体超载安全系数法、坝基综合安全系数法。本次分析采用了上述计算方法

中的两种,即基于 D-P 外接圆准则的点强度储备安全系数法和坝基整体超载安全系数法。

1.1 点强度储备安全系数法

按低抗拉弹塑性模型分析,坝基岩体材料开裂条件用宏观强度描述:

σ_{ii} > R_i (i = 1 2 3) (1)

式中:R_i为岩体强度;σ_{ii}为应力张量的主应力,分析中可能呈单向、双向及三向开裂情况,由程序自行校核并进行刚度修正。

岩体是否进入塑性状态,按D-P外接圆准则判别:

F = αI₁ + √J₂ - k (2)

式中:F为屈服函数;I₁和J₂分别为应力张量的第一不变量和应力偏张量的第二不变量;α,k分别为与岩体材料摩擦系数tanφ和黏聚力c有关的常数,按D-P外接圆准则由下式计算:

α = 2sinφ / (√3(3 - sinφ))
k = 6Ccosφ / (√3(3 - sinφ)) (3)

混凝土是否进入塑性状态,也按式(2)判别。

由此定义D-P准则对应点强度储备安全系数为

K_{cl} = (k - αI₁) / √J₂ (4)

1.2 坝基整体超载安全系数法

超载法计算的基本方法是假定岩体强度参数不变,通过逐级超载上游水载,分析坝基变形破坏演变发展过程与超载倍数的关系,寻求坝基整体稳定时相应的超载倍数K_p,即作为坝基整体稳定超载安全系数[3-4]。

2 计算结果及分析

2.1 坝基浅层材料参数

小湾大坝建基面岩体以Ⅱ类岩体为主,在坝基的高程及坝基下游侧坝址部位的局部地段分布有Ⅲ_a类岩体、Ⅲ_{b1}类岩体、Ⅲ_{b2}类岩体和Ⅳ_a类岩体。此外,在建基面上面出露有Ⅲ级断层F₁₁、蚀变带(E₄₊₅,E₁,E₉等)及较多的Ⅳ级结构面,它们多属Ⅳ_b类岩体,对拱坝变形稳定和应力扩散有较大不利影响。

因975 m高程以下坝基岩性主要为黑云花岗片麻岩,微风化,开挖后卸荷松弛现象明显,岩体中缓倾角裂隙明显张开且有贯通趋势,浅表部尤为明显,因此975 m高程以下坝基岩体参数应单独考虑。从中国水电工程顾问集团公司昆明勘测设计研究院前期揭示的坝基地质情况看,开挖后卸荷松弛岩体主

要在坝基以下大约20 m范围内,且其岩石物理力学参数随埋深逐渐变化。地质勘探结果将坝基浅层岩体分为3个带,即建基面以下岩体按0~2 m,2~6 m,6~20 m分带考虑,在数值计算中也严格按照地质成果模拟,见表1。

表1 975 m高程以下坝基浅层岩石物理力学参数

拱坝建基面 以下岩石	中 值			
	泊松比 μ	弹性模量 E ₀ /GPa	摩擦系数	黏聚力 c/MPa
0~2 m 范围岩石	0.29	9	0.80	0.30
2~6 m 范围岩石	0.28	12	0.98	0.78
6~20 m 范围岩石	0.28	15	1.19	1.29

注 20 m以下按Ⅱ类岩体考虑。

2.2 坝体超载位移分析

通过弹塑性有限元方法得到了拱坝位移、应力及坝基浅层面安全系数等成果。本文重点分析坝体位移及坝基屈服情况。表2给出了小湾拱坝坝顶及坝底特征点随超载的位移变化情况。从表2可以看出,随着超载倍数的增大,坝顶及坝底向下游位移坝体变位增加迅速。坝顶在2倍水载时顺河向最大位移为-388.0 mm,比1倍水载时增加231.9 mm,3倍水载时顺河向最大位移为-638.4 mm,比2倍水载时增加250.4 mm。坝顶在2倍水载时开始向上位移,而坝底向下的竖向位移也在逐渐减少。这是因为在非线形超载计算中,坝体混凝土及坝基岩体逐步屈服软化的结果。

表2 坝顶及坝底特征点位移发展情况

水载超载 倍数/ 倍	位移/mm			
	坝顶拱冠 顺河向	坝顶拱冠 竖向	坝底拱冠 顺河向	坝底拱冠 竖向
1	-156.1	-32.5	-16.4	-21.4
2	-388.0	7.0	-36.0	-19.2
3	-638.4	92.3	-51.5	-14.3
3.5	-767.6	166.7	-57.4	-11.9

注 顺河向位移以向上游为正,竖向位移向上为正。

2.3 坝基浅层点屈服安全度分析

图1给出了在超载过程中坝基浅层坝址特征点屈服安全度(特征点包括坝址左右拱端附近及拱冠

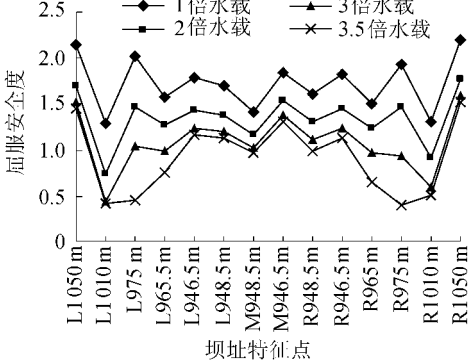


图1 坝址特征点屈服安全度超载

坝址,如 M948.5 m 表示拱冠坝址位置, L1010 m 表示坝址左拱端位置)。在 1 倍水载时,拱冠处距坝踵 20 m 帷幕线附近 D-P 屈服安全度较高(不计扬压力),分别为 1.83 和 1.40。但 2 倍水载时帷幕线附近点屈服安全度就迅速下降到 0。从图 1 可以看出,965~1010 m 高程坝址在 3 倍水载时屈服安全度也降至 1.0 以下,1010 m 高程以上坝址在 3.5 倍水载时仍然有 1~1.5 左右的安全度。

2.4 坝基浅层屈服发展情况

鉴于点屈服安全度可能只代表个别岩体或岩块的承载能力,数值计算中不排除个别点会有奇异现象,因此绘出拱冠剖面及坝基浅层面上的屈服图以分析整个坝基面上的屈服发展规律。

a. 表 3 统计了坝踵局部随着超载倍数增加时屈服深度变化的情况,图 2 显示的是拱冠梁纵剖面坝踵局部在超载时的塑性区发展形态。

表 3 坝踵局部屈服深度统计

水载超载 倍数/倍	屈服深度/m		
	河床向 坝基纵深	坝踵向 帷幕方向	坝踵向 河床上游
1	23.6	19.7	40.7
2	42.3	46.1	41.1
3	74.3	54.8	53.6
3.5	74.4	62.5	54.9

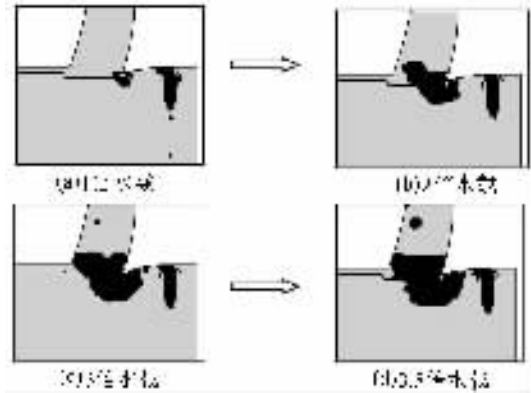


图 2 拱冠剖面 D-P 屈服破坏发展情况

根据屈服深度统计,可以看出在 1 倍水载(正常荷载)时屈服深度已经接近帷幕线。随着超载倍数的增大,屈服区向坝基深处发展。

从图 2 的拱冠剖面屈服发展模式也可以看出以下规律:在 1 倍水载时,由于坝踵部位拉应力较小,D-P 屈服区局限于诱导缝以下及坝踵岩体。在 2 倍水载时,D-P 屈服区向坝体内部延伸,屈服区接近坝体下游面;建基面中心线约 60% 已处于塑性状态。在 3 倍水载时,D-P 屈服区连通至坝体下游面,另外坝体下游面亦有屈服区生成;建基面中心线约 70% 已处于塑性状态。这是因为超载后屈服区的岩体失去承载能力,并将应力转移至附近岩体,导致屈服区

进一步增大。在 3.5 倍水载时,D-P 屈服区连通至坝体下游面,坝体下游面屈服区进一步扩大,建基面中心线几乎全部处于塑性状态。

b. 图 3~6 显示了坝基浅层面(范围为 948.5~1050 m 高程坝基加坝后斜出角为 10°的划出面)在超载时的屈服发展规律(图中黑色区域表示屈服区)。从图 3 中可以看出在 1 倍水载时,D-P 屈服区局限于上游坝踵一带,一般未到达帷幕线。但在左岸 960 m 高程附近,受地形地质条件影响,屈服区超过帷幕线。在 2 倍水载时,D-P 塑性区向下游延伸,屈服区越过帷幕线。坝基部分约 60% 已处于塑性状态,坝基后的岸坡部分在左右岸 990~1010 m 高程之间有新的屈服区生成。在 3 倍水载时,D-P 屈服区进一步向下游延伸,屈服区向岸坡贯通。在 3.5 倍水载时,D-P 屈服区进一步向下游延伸,屈服区高度贯通,可以认为坝基浅层失去抵抗能力。

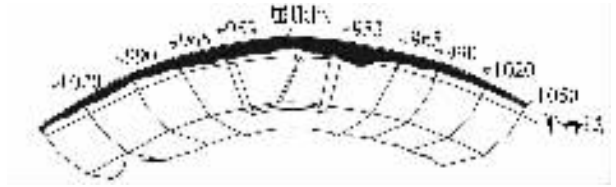


图 3 坝基浅层屈服破坏(1 倍水载)



图 4 坝基浅层屈服破坏(2 倍水载)



图 5 坝基浅层屈服破坏(3 倍水载)



图 6 坝基浅层屈服破坏(3.5 倍水载)

从以上坝基浅层岩体的屈服发展情况可以看出,虽然河床以下坝基段首先出现塑性屈服,但一直到 3.5 倍水载时仍只有部分屈服区,未与下游坝后抗体贯穿,坝基高高程段安全度较高。分析认为采用弹塑性方法后,由于考虑了混凝土(下转第 64 页)

度等性能判断灌浆效果。波速高的区域地层密实 , 密度大 , 弹性模量值也大 , 波速低的区域地层松散 , 密度小 , 弹性模量值也小。灌浆前后的 CT 测试结果见表 3。因此可以得出以下结论 :

- a. 灌浆后 , 回填砂卵石层地基弹性波速、弹性模量明显提高。
- b. 弹性波在被测物体中传播的低速区域波速提高 30% 以上 , 高速区域波速提高 10% 以上。
- c. 导流墙回填砂卵石层 , 弹性波在被测物体中传播的波速平均提高 25% 左右 , 弹性模量大都在 $1.0 \times 10^3 \sim 3.0 \times 10^3$ MPa 之间。

经过固结灌浆处理后 , 回填地基一体性得到增强 , 灌浆效果明显。

表 3 灌浆前后 CT 测检对比

区域	剖面	弹性波速平均值(m·s ⁻¹)
导流墙背水面	N1 ,N2(灌前)	1 150
	N3(灌后)	1 430
导流墙迎水面	S1 ,S2(灌前)	1 275
	S3 ,S4 ,S5(灌后)	1 613.3
左库门	Z1(灌前)	1 320
	Z2 ,Z3 ,Z4(灌后)	1 613

5 结 语

对于砂卵石固结灌浆 , 具体的灌浆方法已较成

(上接第 22 页)

抗拉强度和材料屈服以及诱导缝作用 , 应力有所调整 , 坝踵拉应力减少而坝址压应力增大 , 因而导致坝址压应力较大的 965 ~ 1 010 m 高程坝基浅层首先出现塑性贯通。随着超载倍数增大 , 应力进一步分散 , 稳定性较好的岩体承担了大部分荷载 , 1 050 m 高程以上坝基未出现大范围的屈服现象。

2.5 坝基局部屈服对整体稳定影响分析

由上述分析可知 , 坝基岩体屈服区在 1 倍水载时已经接近帷幕线 , 2 倍水载时屈服区已经超过帷幕线 , 但坝后岩基仍然处于弹性工作阶段 , 坝后基岩会对已经屈服的岩体发展起到抑制作用 , 从整体来看 2 倍水载时大坝不会产生整体滑动 , 且屈服也只发生在坝基一定范围内 , 而 3 倍和 3.5 倍水载时屈服面已经贯通至下游 , 上下游坝基的贯通可能会导致坝基岩体出现一定的滑移路径 , 此时可认为大坝整体有出现严重破坏的可能性。因而从坝基超载屈服角度出发 , 可以认为坝基局部安全度较低 , 需要采取适当的加固措施 , 而大坝整体仍具有 3 ~ 3.5 的安全储备。

熟 , 灌浆的难点主要在成孔与灌浆工艺的控制上。

该工程不用泥浆护壁成孔 , 成孔方法与花管的安装形式为 : 用厚壁套管跟进 , 钢砂钻进 , 尽管效率低一些 , 但成本不高 ; 潜孔锤偏心跟管钻进 , 效率适中 , 但成本高 ; 金刚石 SM 植物胶钻进 , 效率高 , 成本适中。

灌浆工艺包括新式的孔口封闭器 , 花管用砂充填 , 水冲露出试段进行灌浆等 , 有一定创新。

砂卵石层灌浆由于地层差异性太大 , 灌浆控制必须根据地层情况、注浆量与压力的变化、地层是否抬动、地表是否漏浆等随时调整各种参数。

当然 , 此次灌浆还存在不少问题 , 如段长的选择是否短些为好 , 是否选择稳定浆液对灌浆效果会更好些 , 等等。

参考文献 :

[1] 赵勇 , 段玉洁 . 渗入式压力灌浆对卵石地基土层加固机理的初步研究 [J]. 四川地质学报 , 1998 , 18(4) : 285-286.

[2] 石金良 . 砂砾石地基工程地质 [M]. 北京 : 水利电力出版社 , 1991 : 285-286.

(收稿日期 2007-06-20 编辑 : 方宇彤)

3 结 语

- a. 对存在较强浅层卸荷松弛现象的坝基 , 除研究坝肩整体稳定性之外 , 坝基浅层的屈服及稳定性也应是重点考虑的因素之一。
- b. 对小湾坝基超载破坏特性的研究表明 , 坝基的局部安全储备较低 , 但整体安全度较高。说明小湾河床坝基屈服为局部问题 , 小湾高拱坝坝基超载安全度可达 3 ~ 3.5。
- c. 为确保大坝蓄水后拱坝和地基都可靠 , 应采取一定的工程措施提高中下部高程坝基浅表面的安全储备。

参考文献 :

[1] 任青文 , 钱向东 , 赵引 , 等 . 高拱坝沿建基面的破坏和安全度研究 [J]. 水力发电 , 2002(12) : 10-14.

[2] 钱向东 , 赵引 , 任青文 . 建基面强度对拱坝应力、变形的影响 [J]. 河海大学学报 : 自然科学版 , 2001 , 29(3) : 95-98.

[3] 陈在铁 , 任青文 . 数值方法在大坝破坏分析中的应用 [J]. 河海大学学报 : 自然科学版 , 2005 , 33(3) : 296-300.

[4] 张建海 , 范景伟 . 小湾高拱坝坝肩(基) 动力稳定分析 [J]. 云南水力发电 , 1999 , 16(1) : 58-61.

(收稿日期 2007-07-02 编辑 : 方宇彤)