

切割式横缝碾压混凝土重力坝抗震安全性研究

黄宜胜¹, 常晓林², 李建林¹

(1. 三峡大学 土木水电学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 由于切割式横缝的联接作用, 切割式横缝碾压混凝土重力坝近似为一个整体结构。当遭遇强震作用时, 随着切割式横缝的开裂程度不同, 碾压混凝土重力坝的抗震安全性也就有所不同。针对切割式横缝的结构特点, 在有限元法动力分析中, 利用“生死”单元来模拟切割式横缝的联接单元和切割单元, 且以整个横缝联接单元弹性模量的不同折减来模拟切割式横缝的不同开裂程度, 并应用到金安桥水电站左岸坝段群的抗震安全性分析中。分析结果表明: 金安桥水电站左岸坝段群在设防烈度为 IX 度的地震作用下, 切割式横缝的开裂对左岸坝单个坝段和坝段群的抗震安全性影响不大, 且大坝是安全的。这说明了金安桥水电站碾压混凝土重力坝结构设计合理, 能够抵御设防地震。

关 键 词: 水工结构; 抗震安全性; 切割式横缝; 碾压混凝土重力坝; 金安桥水电站

中图分类号: TU 458

文献标识码: A

Aseismic safety research on RCC gravity dam with incised transverse joint

HUANG Yi-sheng¹, CHANG Xiao-lin², LI Jian-lin¹

(1. College of Civil & Hydropower Engineering, China Three Gorges Univ., Yichang 443002, China;

2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan Univ., Wuhan 430072, China)

Abstract: RCC gravity dam with incised transverse joint is a whole structure approximately due to joint effect of incised transverse joint. When RCC gravity dam encounters strong earthquake, aseismic safety of dam is mutative with different cracked degrees. During aseismic analysis by using FEM, considering structure characteristic of tru-cut transverse joint, joined mesh and incised mesh of incised transverse joint can be simulated by living mesh and killed mesh; and cracked degree can be equaled to discount elasticity moduli of the whole joined mesh of incised transverse joint. In the end, the aseismic safety of left bank dam monoliths of Jinanqiao Hydropower Station using above methods are analyzed. The results indicate while left bank dam monoliths of Jinaoqiao Hydropower Station encounters M9 earthquake, cracking of incised transverse joint has little influence on aseismic safety of individual dam monolith and dam monolith, and dam is safe. This indicates Jinanqiao Hydropower Station RCC gravity dam can withstand the design earthquake with the reasonable design.

Key words: hydraulic structure; aseismic safety; incision transverse slot; RCC gravity dam; Jinanqiao Hydropower Station

1 引 言

碾压混凝土重力坝横缝通常采用切缝机切割、设置诱导孔或预置隔缝板等方法形成。对于切割形成的横缝,并不是在横缝设计位置把坝体完全切通,而是按照一定的切割方式切割横缝设计处大坝横剖面的部分区域,使之达到设计的横缝成缝面积率,余下区域待混凝土在各种作用下自形开裂^[1]。因此,对于切割式横缝碾压混凝土重力坝,从某种程度上

来讲,大坝近似为一个整体。但是,在大坝的整个建设与运行期中,切割式横缝都有可能开裂。当大坝遭遇强震作用时,如果切割式横缝完全开裂,大坝就有可能以单个坝段的方式失稳,但如果切割式横缝只是部分开裂,那么大坝就可能以坝段群的方式失稳。换句话说,切割式横缝开裂程度不同,大坝的抗震安全性就可能有所不同。因此在分析切割式横缝碾压混凝土重力坝的抗震安全性时,非常有必要对大坝坝段群从切割式横缝没有开裂到完全开

裂整个过程的抗震安全性进行研究。

正在建设中的金安桥水电站位于云南省丽江地区境内的金沙江中游河段。电站大坝为碾压混凝土重力坝，水库正常蓄水位为 1 418 m，坝顶高程为 1 424 m，最大坝高为 160 m，坝顶长度为 640 m。大坝采用切缝机切割的方法形成横缝，在竖直方向上每碾压 30 cm 切缝深度为 20 cm，在上下游方向上切缝不完全切穿，切缝范围内连通率为 75%，横缝成缝面积率为 50%，相当于整个横缝面有 50%

是连通的。该坝左岸坡坝段坝基岩层倾向河床，坝基开挖成台阶状，坝基表面岩体大部分为碎裂和块裂绿泥石化岩体，且抗震设防烈度高达 IX 度，这些因素对左岸坡坝段的抗震安全性非常不利。由于大坝横缝设计为切割式横缝，故拟通过有限元法动力分析来研究左岸坡坝段群从切割式横缝没有开裂到完全开裂整个过程的抗震安全性。经与设计单位商定，确定对由④~⑥这三个坝段组成的左岸坡坝段群进行抗震安全性研究。

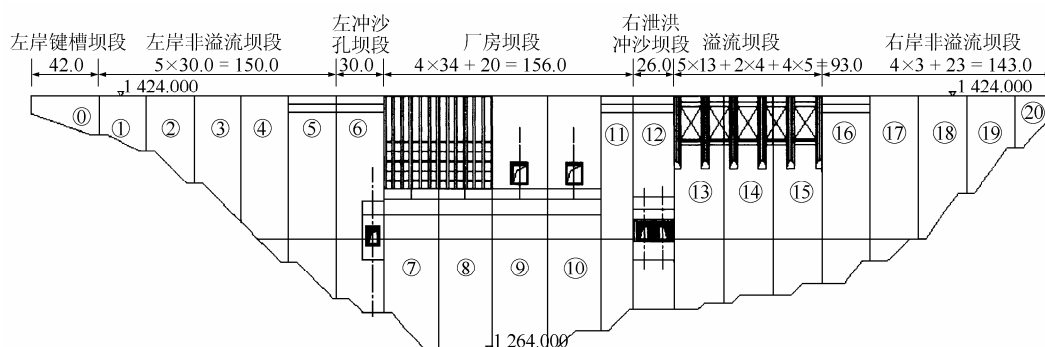


图 1 金安桥水电站碾压混凝土重力坝上游立视图 (单位:m)

Fig.1 Upriver elevation of Jinanqiao hydropower station RCC gravity dam(unit: m)

2 切割式横缝等效模拟

由于有限元法动力分析的复杂性以及三维有限元模型的复杂性，有限元网格不可能严格地按照设计切割方式模拟横缝，计算时采用的方法是先根据设计方案计算出每个横缝的成缝面积，并划出全部横缝单元，然后利用单元的“生死”功能，对部分横缝单元进行“杀死”处理，以模拟横缝切割区域，而“未杀死”单元则用来模拟横缝联接区域，并使“杀死”单元总面积和设计成缝面积大致相等，如图 2 所示。

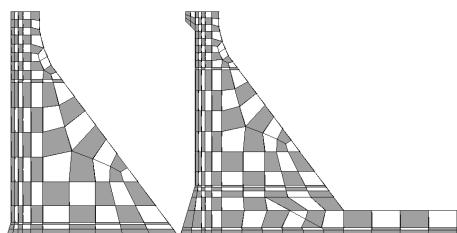


图 2 切割式横缝单元模拟图 (白色为“杀死”单元，灰色为“未杀死”单元)

Fig.2 Meshes of incised transverse joint (white meshes have been killed, but gray meshes have not been killed)

另外，由于事先无法预知哪些横缝联接单元（即“未杀死”单元）已经开裂，这时进行有限元法动力分析也比较困难。计算时采用的方法是视部分

横缝联接单元的开裂是对整个横缝联接单元弹性模量的降低，对整个横缝联接单元弹性模量进行多次折减并进行有限元法动力分析，以此考察金安桥水电站左岸坡坝段群从切割式横缝没有开裂到完全开裂整个过程的抗震安全性。

3 抗震计算方法

3.1 计算假定^[2,3]

(1) 假定坝体是线弹性材料，不同部位材料有不同的弹性常数。

(2) 假定地基存在一条人工选取的地震输入边界，计算中地震运动沿此边界均匀输入。

(3) 假定地基为弹性无质量体，地基单元只考虑弹性，不考虑质量，以消除地震波的传播效应。

(4) 假定库水为不可压缩流体，则库水对坝的动力作用相当于附加质量，附加质量采用 Westergaard 公式计算。

3.2 计算方法

在地震时，设地面加速度为 a ，结构位移为 δ ，则运动方程可写为^[4]

$$[M+M_a]\{\ddot{\delta}\}+[C]\{\dot{\delta}\}+[K]\{\delta\}=-[M+M_a]\{a\} \quad (1)$$

式中： $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别代表坝-地基系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵； $[M_a]$ 为库水附加质量矩

阵。坝体自振特性分析采用子空间迭代法, 动力分析采用振型分解反应谱法。考虑三向地震的同时作用, 计算中提取前 10 阶振型, 各振型之间采用 SRSS 方法进行组合, 即取各阶振型地震作用效应平方总和的方根作为总地震作用效应。地震作用下总作用效应为地震作用效应与静力作用效应按最不利原则组合而成^[5]。

3.3 抗震强度和稳定性校核

《水工建筑物抗震设计规范 (DL5073-2000)》(本文以下简称“现行抗震规范”) 规定, 各类水工建筑物的抗震强度和稳定应满足承载能力极限状态设计式:

$$\gamma_0 \phi S(\gamma_G G_k, \gamma_Q Q_k, \gamma_E E_k, a_k) \leq R(f_k / r_m, a_k) / \gamma_d \quad (2)$$

当校核水工建筑物的稳定性时, 令 $K = R(*) / \gamma_d \phi S(*)$, 则 K 可视为现行抗震规范下的动抗滑稳定安全系数, $K \geq 1$, 即满足规范要求(上式中各符号含义及取值详见现行抗震规范)^[6-8]。

4 地震基本资料

依据现行抗震规范规定, 金安桥水电站坝址区为 I 类场地, 特征周期 $T_g = 0.20$ s, 设计反应谱最大值的代表值 $\beta_{\max} = 2.0$ 。地震设计烈度按 IX 度取值, 水平向设计地震加速度代表值 $a_h = 0.4$ g, 竖向设计地震加速度的代表值 a_v 取为水平向设计地震加速度代表值 a_h 的 2/3。混凝土动态强度和动态弹性模量的标准值较其静态标准值提高 30%, 混凝土动态抗拉强度的标准值为动态抗压强度标准值的 10%, 基岩动态变形模量也较其静态提高 30%, 动态抗剪断指标取静态值。

5 计算模型

金安桥水电站左岸坡坝段群的计算模型由④~⑥坝段组成(见图 3、图 4)。模型详细模拟了坝体的材料分区。坝基部分主要模拟了玄武岩、软弱岩层及两种绿泥石化岩层。坝基计算范围为: 基础深度最低为 1.5 倍坝高(这里的坝高为⑥坝段的最大坝高), 即 204 m; 自坝轴线向上游取 1.5 倍坝高; 自⑥坝段基本体形的最低坝趾处向下游取 1.5 倍坝高。模型网格采用 8 节点六面体单元为主, 局部部位采用五面体单元过渡。由于切割式横缝很薄, 因此采用薄层单元来模拟横缝。模型整体单元为 10 039 个, 节点为 11 759 个, 其中坝体单元为 2 670 个, 节点为 3 436 个。另有 312 个上游坝面附加质量单元, 附加质量单元采用质量元来模拟。为偏安

全计, 对于坝体左右面不施加约束, 当作自由面处理; 对于坝基上下游面、左右面和底面, 施加垂直向约束。

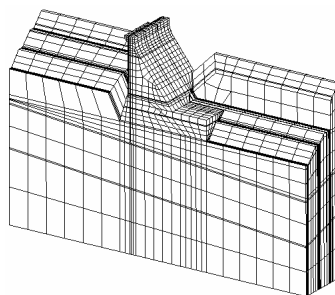


图 3 左岸坡坝段群-地基整体网格图

Fig.3 Meshes of left bank dam group-foundation

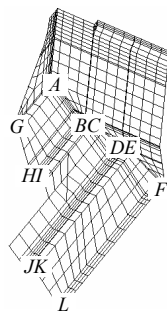


图 4 左岸坡坝段群网格图

Fig.4 Meshes of left bank dam group

6 计算结果分析

计算过程中横缝联接单元弹性模量按 E (横缝没有开裂)、 $0.8E$ 、 $0.6E$ 、 $0.4E$ 、 $0.2E$ 和 $0.0E$ (横缝完全开裂) 依次折减, 每折减一次就对模型进行一次有限元法动力分析, 以此考察金安桥水电站左岸坡坝段群从切割式横缝没有开裂到完全开裂整个过程的抗震安全性。另外, 地震作用下的应力由静应力和动应力按最不利原则组合而成。

6.1 应力分析

计算结果表明, 在静力荷载作用下, 无论横缝联接单元弹性模量折减到何种程度, 金安桥水电站左岸坡坝段群坝体应力沿坝高分布都比较均匀, 如图 5 所示。但是坝踵和坝趾处由于受角缘效应影响, 出现了不同程度的应力集中, 坝踵处产生了较大拉应力, 而坝趾处则产生了较大的压应力, 且坝踵和坝趾处的应力随横缝联接单元弹性模量的折减变化不大。在地震作用下, 无论横缝联接单元弹性模量折减到何种程度, 左岸坡坝段群坝体应力沿坝高也是分布比较均匀, 这表明大坝具有良好的动力反应特性, 如图 6 所示。同样, 坝踵和坝趾处由于受角缘效应影响, 也出现了较高水平的应力集中, 且坝

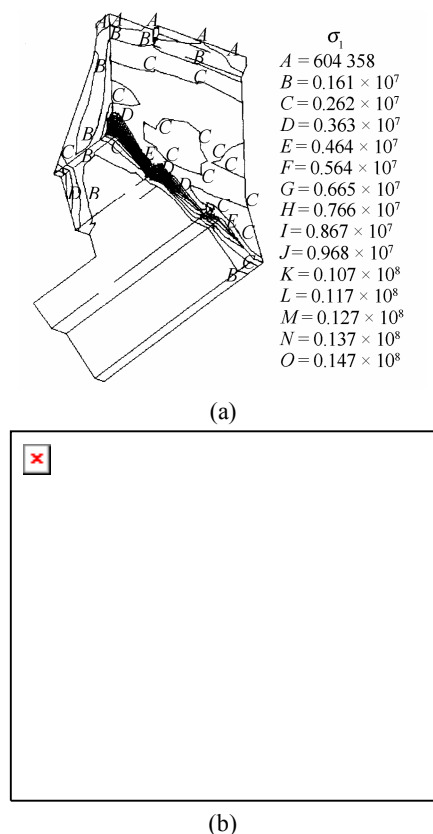


图 5 切割式横缝没有开裂时左岸坡坝段群在静力作用下的主应力 (单位: Pa)

Fig.5 Principal stress of left bank dam group under static when incised transverse joint is not cracked(unit: Pa)

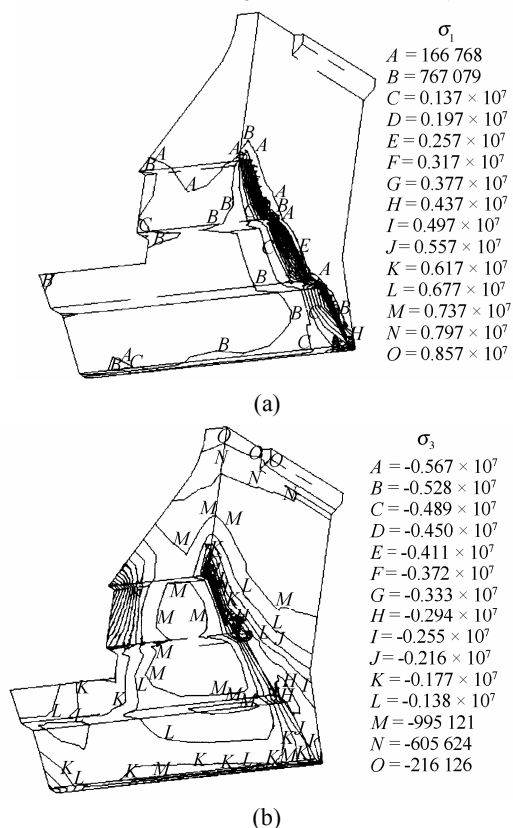


图 6 切割式横缝没有开裂时左岸坡坝段群在地震作用下的主应力 (单位: Pa)

Fig.6 Principal stress of left bank dam group under seismic when incised transverse joint is not cracked(unit: Pa)

踵和坝趾处的应力随横缝联接单元弹性模量的折减变化也不大。

6.2 抗震强度校核

从应力分布情况可知,无论是在静力作用下还是在地震作用下,金安桥水电站左岸坡坝段群的坝体应力沿坝高分布都比较均匀,而坝踵与坝趾处则都有应力集中现象,因此抗震强度校核只需校核坝踵与坝趾处强度就可以了。坝踵处校核抗拉强度,坝趾处校核抗压强度。表 1 和表 2 分别表示切割式横缝没有开裂时左岸坡坝段群坝踵和坝趾处抗震强度校核情况,表中“√”表示满足式 (2),“×”表示不满足式 (2)。

由表 1、表 2 可知,在切割式横缝没有开裂的情况下,左岸坡坝段群坝踵处的拉应力超过了现行抗震规范的极限承载能力要求,而坝趾处的压应力则满足极限承载能力要求。应该指出,在有限元法分析中,坝踵、坝趾处的应力集中问题非常复杂,应力集中的数值和区域受该部位的单元种类、单元形态、网格疏密程度以及坝体与坝基的刚度和计算方法等多种因素的综合影响。另外,岩体中存在的微细裂隙和混凝土本身具备的塑性性质可对坝踵坝趾处的应力集中起到一定的缓解作用,那么坝踵、坝趾处的实际应力应小于计算值,且由于坝踵处拉应力区范围很小,小于坝底宽的 7%,因此可以认为坝踵坝趾处的应力集中不致于影响到大坝的抗震安全。对于横缝单元部分开裂和完全开裂的情况,坝踵坝趾处抗震强度校核结果与横缝没有开裂时的抗震强度校核结果相似。以上分析结果表明,无论切割式横缝开裂到什么程度,金安桥水电站左岸坡坝段群的拉压应力不会影响到大坝的抗震安全。

6.3 抗震稳定性校核

对于坝基为台阶式的碾压混凝土重力坝岸坡坝段来说,当遭遇强震作用时,虽然大坝有横河向的滑动趋势,但是由于左右坝段的抵抗,大坝不可能产生横河向的滑动,只可能沿着顺河向滑动。表 3 中 $K(X)$ 表示左岸坡坝段群在横缝联接单元弹性模量为 X 时单个坝段或坝段群沿顺河向的动抗滑稳定安全系数,亦即抗震稳定性校核。从表 3 可知,无论切割式横缝开裂到什么程度,左岸坡坝段群和单个坝段的抗震稳定性均满足现行抗震规范的极限承载能力要求,且横缝的开裂程度对单个坝段和坝段群的抗震稳定性影响不大。因此,金安桥水电站左岸坡单个坝段和坝段群在设防烈度为 IX 度的地震作用下是稳定的。

表1 切割式横缝没有开裂时左岸坡坝段群坝踵抗震强度校核（单位：MPa）

Table 1 Aseismic intensity checkout for dam heel of left bank dam group when incised transverse joint is not cracked (unit: MPa)

部位	混凝土强度等级	静态应力	动态应力	静动态应力叠加 $S(*)$	$R(*)$	$\gamma_0 \phi S(*)$	$R(*)/\gamma_d$	校核结果
④坝段上坝踵 (A)	C20	0.17	15.2	15.37	1.24	14.37	1.77	×
④坝段下坝踵 (B)	C20	2.36	7.32	9.68	1.24	9.05	1.77	×
⑤坝段上坝踵 (C)	C20	3.54	9.09	12.63	1.24	11.81	1.77	×
⑤坝段下坝踵 (D)	C20	1.95	4.36	6.31	1.24	5.90	1.77	×
⑥坝段上坝踵 (E)	C20	2.90	5.47	8.37	1.24	7.83	1.77	×
⑥坝段下坝踵 (F)	C20	5.71	3.17	8.88	1.24	8.30	1.77	×

表2 切割式横缝没有开裂时左岸坡坝段群坝趾抗震强度校核（单位：MPa）

Table 2 Aseismic intensity checkout for dam toe of left bank dam group when incised transverse joint is not cracked (unit: MPa)

部位	混凝土强度等级	静态应力	动态应力	静动态应力叠加 $S(*)$	$R(*)$	$\gamma_0 \phi S(*)$	$R(*)/\gamma_d$	校核结果
④坝段上坝趾 (G)	C20	5.86	3.63	9.49	12.40	8.87	9.54	√
④坝段下坝趾 (H)	C20	2.02	1.89	3.91	12.40	3.66	9.54	√
⑤坝段上坝趾 (I)	C20	2.03	1.69	3.72	12.40	3.48	9.54	√
⑤坝段下坝趾 (J)	C20	1.46	1.03	2.49	12.40	2.33	9.54	√
⑥坝段上坝趾 (K)	C20	1.41	1.01	2.42	12.40	2.26	9.54	√
⑥坝段下坝趾 (L)	C20	2.68	1.64	4.32	12.40	4.04	9.54	√

表3 左岸坡坝段群动抗滑稳定安全系数

Table 3 Safety coefficients for aseismic stability of left bank dam group

大坝	$K(E)$	$K(0.8E)$	$K(0.6E)$	$K(0.4E)$	$K(0.2E)$	$K(0.0E)$
④坝段	2.319	2.311	2.301	2.289	2.278	2.234
⑤坝段	1.645	1.658	1.666	1.678	1.690	1.772
⑥坝段	1.447	1.450	1.455	1.465	1.480	1.535
坝段群	1.873	1.859	1.846	1.838	1.815	*

(3) 通过对金安桥水电站左岸坡坝段群在遭遇设防烈度为 IX 度的地震作用下的抗震安全性分析，最终认识到切割式横缝不同开裂程度对金安桥水电站左岸坡坝段群单个坝段和坝段群的抗震安全性影响不大，且大坝在遭遇设防烈度地震时是安全的。这说明了金安桥水电站碾压混凝土重力坝结构设计合理，能够抵御设防地震。

参考文献

- [1] 孙恭尧, 王三一, 冯树荣. 高碾压混凝土重力坝[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 张社荣, 卢向丽. 拱形重力坝地震动力反应分析[J]. 水力发电学报, 2004, 23(2): 65—68.
- [3] 何发祥, 王忠, 刘浩吾. 采用无质量地基模型时动力平衡方程的缩减[J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2000, 32(4): 7—10.
- [4] 朱境清. 结构抗震分析原理[M]. 北京: 地震出版社, 2002.
- [5] 刘国明. 古田溪一级重力坝悬臂梁振型分解反应谱法抗震计算[J]. 水力发电学报, 2004, 23(1): 31—35.
- [6] 刘国明. 古田溪三级平板支墩坝抗滑稳定分析[J]. 水利学报, 2000, (1): 54—59.
- [7] 白卫峰, 陈健云, 钟红. 基于混凝土率相关损伤模型的重力坝地震动超载响应分析[J]. 水利学报, 2006, 37(7): 820—826.
- [8] 黄劲松, 潘燕芳, 闫慧玉. 大朝山碾压混凝土重力坝静动力有限元计算分析[J]. 武汉大学(工学版), 2003, 36(6): 22—26.

7 结 论

(1) 对于切割式横缝碾压混凝土重力坝，从某种程度上讲大坝近似为一个整体。如果切割式横缝完全开裂，大坝就有可能以单个坝段的方式失稳，但如果切割式横缝部分开裂，那么大坝就很有可能以坝段群的方式失稳。因此，在分析切割式横缝碾压混凝土重力坝的抗震安全性时，必须对大坝坝段群从切割式横缝没有开裂到完全开裂整个过程的抗震安全性进行研究。

(2) 有限元法动力分析中可利用“生死”单元来模拟切割式横缝单元的联接单元和切割单元，并以整个横缝联接单元弹性模量的不同折减来模拟切割式横缝的不同开裂程度，以此考察切割式横缝碾压混凝土重力坝从切割式横缝没有开裂到完全开裂整个过程的抗震安全性。