

强震区高拱坝抗震措施比较

王品江,王进廷,周元德,金 峰,徐艳杰

(清华大学水利水电工程系,北京 100084)

摘要:在拱坝横缝中,设置跨横缝钢筋和阻尼器,可以在一定程度上控制高拱坝在强震作用下的横缝开度,增强拱坝整体性。以国内某高拱坝为例,基于在大型商业有限元分析软件 ABAQUS 平台上二次开发的拱坝有限元模型,结合已有的计算成果,系统比较了设置跨横缝钢筋和阻尼器的抗震效果,提出了两种措施组合的方案,可供工程应用参考。

关键词:高拱坝;抗震;跨横缝钢筋;阻尼器

中图分类号:TV642.4;P315.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7647(2006)04-0015-03

Comparative analysis of aseismic measures for high arch dams in meizoseismal area//WANG Pin-jiang, WANG Jin-ting, ZHOU Yuan-de, JIN Feng, XU Yan-jie / *Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: Laying out joint-crossing reinforced bars and dampers in transverse joints can effectively control the openings of the transverse joints under strong earthquakes and intensify the integrity of arch dams. With a high arch dam in China taken as an example, a comparative analysis was performed of the aseismic effect of joint-crossing reinforced bars and dampers by use of the finite element model for arch dams further developed based on large commercial software ABAQUS and the obtained result from calculation. Finally, a scheme combining the two measures was proposed, providing some references for practical projects.

Key words: high arch dam; aseismic; joint-crossing reinforced bar; damper

众多的研究表明,高拱坝的横缝在强烈地震作用下下很容易被拉开,特别是对于地震烈度高,河谷比较宽的高拱坝,横缝张开的可能性更大。横缝张开可能导致缝间止水的破坏和拱向拉应力的释放及拱梁应力的重新分配,造成梁向应力变大,产生水平向裂缝。因此对于强震区的高拱坝,可以采用抗震措施控制横缝的张开度,增强拱坝在地震作用下的整体性。

前苏联的 Inguri 拱坝曾经使用过跨横缝钢筋作为抗震措施,国内对此已经有过学者进行研究^[1-2]。在高拱坝横缝间设置阻尼器是近年才提出的设想,研究相对较少^[3-4],和跨横缝钢筋相比,设置阻尼器有以下优点:首先黏滞型阻尼器的力直接与横缝两侧混凝土的相对速度相关,和钢筋受力与应变相关的作用机理不同,在静力作用时不产生附加应力,也不会在强烈地震中产生屈服,影响震后的横缝状态;其次,跨横缝钢筋的铺设工作量较大,对工期影响较大,而如果把阻尼器安装在大坝顶部,只需要在指定的布设位置预留安装坑,安装结束后覆以盖板保护,甚至可以在正常蓄水发电后进行施工,对大坝施工

工期没有干扰。

本文基于 ABAQUS 有限元软件,选取国内某高拱坝作为工程背景,在能够达到控制横缝开度的前提下,对以上两种措施以及可能的组合方案进行了初步研究,得到了一些有价值的结论。

1 分析模型

本文采用的是 ABAQUS 软件,其有限元动力分析的一般内容可以参见相关文献,不再赘述。以下主要介绍本文涉及的特殊模型。

1.1 横缝动接触模型

根据已有的经验,横缝初始抗拉强度对坝体非线性反应影响很小,可以忽略^[5],因此,本文模拟拱坝横缝的力学行为时,忽略横缝的初始抗拉强度,基于 ABAQUS 的接触模型,定义横缝接触关系如下:

沿接触缝面法向的相互作用力定义满足:

$$p = 0 \tag{1}$$
$$p = \frac{P_0}{e - 1} h_c (e^{h_c} - 1) \quad (h > -c) \tag{2}$$

式中: c 为初始接触间距; p 为接触点对的接触压

力; h 为两个接触面在该点处的相对位移(以嵌入为正); $h_c = \frac{h}{c} + 1$ 。初始接触间距 c 和特征接触力 p_0 如图 1 所示, 当 $h = 0$ 时, $p = p_0$ 。可以看出, 当两侧接触面处于张开状态时, 接触压力为零, 而随着缝面之间靠近并相互挤压, 则接触压力呈指数函数关系增大。通过合理选取 c 和 p_0 值, 可实现两侧缝面之间的张开与闭合力学行为光滑平顺过渡, 同时控制接触面间的可能嵌入深度为可接受的微量, 从而保证高拱坝横缝非线性动力计算在满足精度要求的同时, 提高收敛效率。本文的计算模型中, c 和 p_0 取值分别为 0.005 mm 和 50 MPa 。

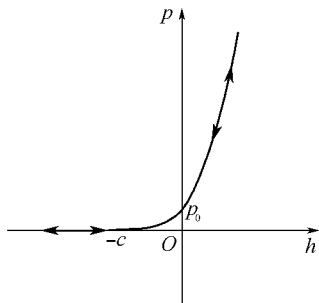


图 1 接触压力与嵌入关系模型

1.2 阻尼器模型

黏滞阻尼器阻尼力的力学模型为

$$F = \text{sign}(v) C |v|^\zeta \quad (3)$$

式中: F 为阻尼力; v 为阻尼器两端的相对速度, $\text{sign}(v)$ 表示 v 的速度方向, 阻尼器两端相对靠近时取正; C 为黏滞阻尼系数; ζ 为黏滞流体的流动系数。

阻尼器的两端分别固定在横缝两侧坝体混凝土单元面的结点上, 如图 2 所示, 本文计算采用法国的坚利特 (Jareet) 阻尼器^[6], 其黏滞阻尼系数 $C = 8.50 \text{ MN} \cdot \text{s}^{0.08} / \text{m}^{0.08}$, 流动系数 $\zeta = 0.08$ 。

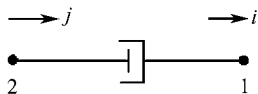


图 2 阻尼器结构示意图

1.3 钢筋模型

本文采用弥散式钢筋模型^[7], 取横缝上一个加筋的单元接触面, 当钢筋没有屈服时, 缝面单元上钢筋的总刚度为

$$K_{\text{ns}} = \frac{E_s A_0}{l} \quad (4)$$

式中: l 表示缝面两侧钢筋总的自由段长度; E_s 为钢筋的弹性模量; A_0 为单元接触面上的钢筋截面面积总和; K_{ns} 是缝面单元上钢筋等效弥散刚度。当钢筋进入塑性屈服阶段时, 采用理想弹塑性模型, 如图 3 所示。根据已有的研究成果^[8], 取钢筋直径 $D = 40 \text{ mm}$, 钢筋最小间距为 $10D$, 横缝两侧的钢筋自由段

长度共取 8 m (每侧为 4 m)。钢筋弹性模量为 210 GPa , 屈服强度为 310 MPa , 地震中动弹性模量取为 273 GPa 。

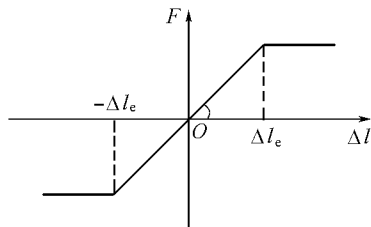


图 3 缝面钢筋力与开度关系示意图

钢筋布置位置如图 4 所示, 阴影处表示配筋区, 从厚度方向看, 坝体有限元网格分为 3 层, 在每条横缝上游侧和下游侧的单元配置钢筋, 在中部坝体混凝土单元上不布置钢筋, 配筋高度为 35 m 。上、下游配筋面积均为 234.4 m^2 。

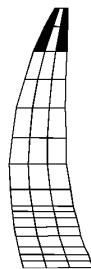


图 4 横缝配筋示意图

2 算例

某拱坝高 210 m , 顶拱弧长 609.8 m , 坝体最大厚度 55 m 。坝体混凝土弹性模量 24 GPa , 泊松比 0.17 , 密度 2.4 t/m^3 。计算模型中, 共模拟了 25 条横缝, 中缝设置在拱冠处, 左右两侧各有 12 条横缝, 从右岸至左岸依次编号为 1 ~ 25。基础静弹性模量为 12.36 GPa , 泊松比为 0.245 , 在所有的分析中动弹性模量均取为静弹性模量的 1.3 倍。质量采用无质量地基模型模拟。阻尼比取 0.05 。

分析中考虑的荷载包括: 坝体自重(按分缝自重考虑); 上游库水静水压力(采用上游库水深 195 m 的低水位进行计算); 上游库水动水压力(按附加质量考虑); 地震荷载(采用设计院提供的规范谱三向加速度时程), 100 年超越概率 2% , 峰值加速度标定值 $0.5422g$ 。

在多种工况计算中, 本文选择了比较有代表性的 5 种工况进行比较分析。工况 1: 无任何加固措施; 工况 2: 横缝上游面顶部设置 5 台阻尼器; 工况 3: 仅在第 3 和第 24 条横缝上游面顶部设置 5 台阻尼器; 工况 4: 顶部 35 m 范围内按最大配筋率 (0.785%) 配筋; 工况 5: 第 1 ~ 22 条横缝配筋率 0.39% , 第 23 ~ 25 条横缝配筋率 0.585% , 第 24 条横缝上游面顶部设置 6 台阻尼器。

3 计算结果分析

3.1 设置阻尼器对拱坝动力影响分析

如图 5 所示,无加固措施时(工况 1)开度包络线在第 3 条横缝和第 24 条横缝上出现峰值,其开度峰值分别为 12.83 mm 和 21.49 mm,在每条横缝的上游设置 5 个阻尼器以后(工况 2),多数的横缝最大开度都有减小的趋势,其中第 3 条横缝和第 24 条横缝的开度分别从 12.83 mm 和 21.49 mm 减小到 11.73 mm 和 18.60 mm,说明阻尼器对横缝开度有一定的限制作用。如果仅在开度包络峰值出现的第 3 和第 24 条横缝设置 5 台阻尼器(工况 3),可以看到在中部绝大多数横缝开度与工况 1 相同,第 3 和第 24 条横缝的最大开度分别降至 9.55 mm 和 16.47 mm,其降幅比每条横缝均设置 5 个阻尼器要大。由此可见,设置阻尼器后的局部效应很明显,设置阻尼器的横缝最大开度减小,而相邻横缝最大开度则有一定程度的提高,其中第 25 条横缝更是升高到了 17.82 mm,成为新的峰值,但仍旧小于工况 2 的峰值 18.60 mm。对比工况 2 和工况 3,工况 3 所用材料仅为工况 2 的 2/25,在控制开度包络上却优于工况 2。但是,由于地震的随机性,出现最大开度横缝的位置有可能变化,因此,如何选择设置阻尼器的位置还需要进一步研究。

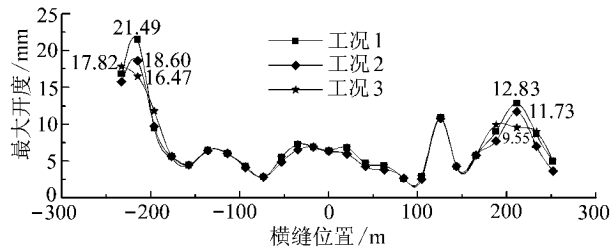


图 5 设置阻尼器拱坝开度包络比较

对比工况 1、工况 2 以及工况 3 中第 24 条横缝的开度时程(见图 6),可以看出,在设置了阻尼器以后,拱坝横缝张开与闭合的非线性响应与时步的变化规律没有改变,只是该横缝的开度时程在每一个峰值都有所降低,工况 3 的效果尤为明显。

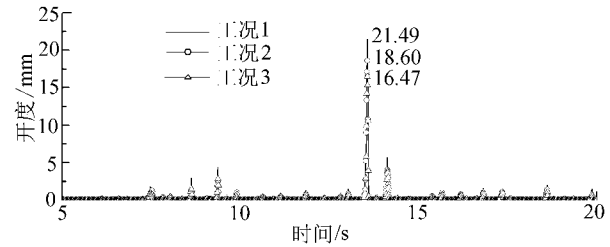


图 6 工况 1~3 中第 24 条横缝开度时程比较

3.2 跨横缝钢筋和阻尼器联合作用计算结果分析

根据以往的研究成果^[8],跨横缝钢筋的间距为 10 倍钢筋直径,本文初步拟定的配筋方案采用

Ø40@400,计算得到最大配筋率为 0.785%。在每条横缝上布置插筋,取自由段长度为 8 m,锚固长度为 2 m,则单根跨缝钢筋为 12 m,计算结果如图 7 中工况 4 所示,可以看到在最大配筋率情况下,绝大多数横缝的最大开度都降到了 10 mm 以下,而仅有少量横缝最大开度略大于 10 mm。可见在每条横缝进行配筋加固有明显作用。该方案的插筋总用量约为 8 000 t。

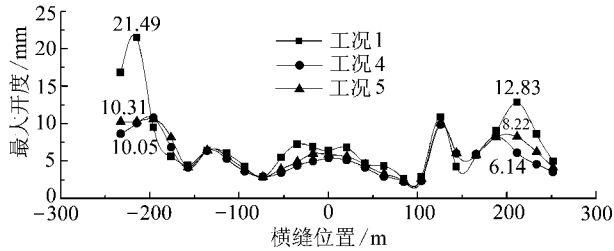


图 7 跨横缝钢筋和阻尼器联合作用拱坝开度包络比较

为减少钢筋用量,在减小配筋率的同时,局部峰值部位设置阻尼器可能是一个较优的方案。在进行多次比较计算后得到的一个较优组合方案为工况 5 组合方案。工况 5 的计算结果与工况 4 相近,而且第 23~25 条横缝的最大开度值非常接近。工况 5 的插筋总用量约为 4 200 t,比工况 4 减少了约 3 800 t,只是坝顶增加了 6 台阻尼器。

工况 1、4、5 中第 24 条横缝的开度时程比较如图 8 所示,表现出了和图 6 相似的规律,说明设置跨横缝钢筋对拱坝横缝张开与闭合的非线性响应变化规律仍旧没有改变,只是开度峰值有所降低,并且将 13.5 s 附近的最大峰值降低到 10 mm 左右。

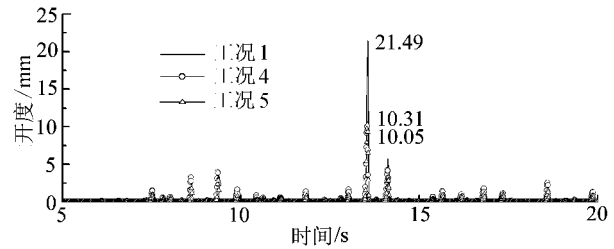


图 8 工况 1、4、5 中第 24 条横缝开度时程比较

4 结 论

a. 阻尼器对控制横缝开度的作用影响范围通常为阻尼器所在的横缝以及两侧相邻的横缝。因此,在每条横缝上设置阻尼器并非最好的选择,应当选择在开度较大的横缝上配置。但由于地震的随机性,确定开度较大的横缝有相当大的困难。

b. 采用横缝配筋,可以显著降低横缝开度。

c. 采用阻尼器与跨横缝钢筋的组合方案可能是一个较优的方案,可以充分发挥两者的作用,值得进一步深入研究。

(下转第 20 页)

2.3.3 抗冲磨性能

磨损冲击破坏是水工建筑物常见的病害之一，尤其是当水流流速较高，水流中挟带砂石等磨损介质时，这种破坏更为严重。以混凝土抗冲磨强度为指标，对水工特细砂混凝土抗冲磨性能进行试验研究。试验结果表明：在混凝土强度等级相同的情况下，水工特细砂混凝土 28 d 龄期的抗冲磨强度为 $1.05 \text{ h}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$ ，中砂混凝土 28 d 龄期的抗冲磨强度为 $0.62 \text{ h}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$ 。在混凝土中粗骨料的抗冲磨强度远比砂浆抗冲磨强度高，而水工特细砂混凝土采用低砂率，使得其粗骨料在混凝土中所占比例较大，因此其抗冲磨性能要优于中砂混凝土。

2.4 水工特细砂混凝土的热学性能

混凝土的温度应力来源于混凝土受约束时的热变化而导致的体积变化。在大体积混凝土中，水泥因水化而发热，热量从表面散发，所以在混凝土中产生温度梯度，由此温度梯度导致的应力足以使大体积混凝土内部产生贯通性裂缝。水工特细砂混凝土的绝热温升过程线见图 3。由试验结果可以看出：由于水工特细砂混凝土粉煤灰掺量较高，使得其混凝土绝热温升值较低，这对水工混凝土大坝的温控十分有利。

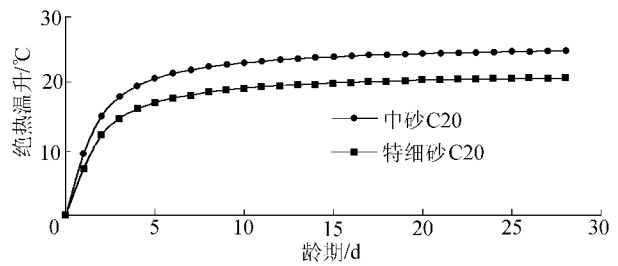


图 3 混凝土的绝热温升过程线

3 结 语

采用低砂率、低用水量、低坍落度、高粉煤灰掺量和掺高效减水剂的方法可以配制满足设计要求的水工特细砂大体积混凝土，对降低工程造价和合理开发利用自然资源均具有一定的经济意义和社会意义。采用上述方法配制的水工特细砂混凝土具有一定的性能特点：①具有收缩变形较小、抗渗及抗冲磨能力较强以及绝热温升较低的优点；②存在着早期强度较低、混凝土弹强比较高、极限拉伸值较低以及抗碳化能力稍逊的不足。因此在水电工程实际中，要充分认识水工特细砂混凝土的性能特点，扬长避短，使采用水工特细砂混凝土浇筑的水工大体积混凝土的性能更加完善。

参考文献：

[1] 冯乃谦. 实用混凝土大全[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 743-749.
[2] 刘云霞, 黄绪通. 特细砂混凝土的性能及其应用[J]. 水电站设计, 1996(3): 97-102.
[3] 谢祥明, 黄绪通. 特细砂水工混凝土配合比设计的“三低一超”法[J]. 混凝土, 2003(8): 55-56.

(收稿日期: 2005-12-16 编辑: 熊水斌)

(上接第 11 页)

[9] 任淑良, 赵克勤. 集对分析在企业能源管理中的应用探讨[J]. 能源工程, 1996(3): 21-23.
[10] 吴福. 高校引进师资的 SPA 评价模型及应用[J]. 哈尔滨学院学报, 2003, 24(10): 9-10.
[11] 龚士良. 地质环境合理开发利用集对论准则[J]. 西部探矿工程, 2003, 90(11): 164-166.
[12] 王国平, 王洪亮. 集对分析用于污水处理厂的综合评价[J]. 江苏环境科技, 2002, 15(6): 16-18.
[13] 冯利华, 张行才, 龚建林. 关于集对分析的水文水资源变化趋势的统计预测[J]. 水文, 2004, 24(2): 11-14.
[14] 王栋, 朱元, 赵克勤. 基于集对分析和模糊集合论的水体营养化评价模型应用研究[J]. 水文, 2004, 24(3): 9-13.
[15] 门宝辉, 梁川, 赵曼京. 评价区域水资源开发利用程度的集对分析法[J]. 南水北调与水利科技, 2003(6): 30-32.

(收稿日期: 2005-09-01 编辑: 熊水斌)

(上接第 17 页)

参考文献：

[1] 陈观福, 徐艳杰, 张楚汉. 强震区高拱坝横缝配筋抗震措施[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2003, 43(2): 266-269.
[2] 陈观福, 张楚汉, 徐艳杰, 等. 拱坝横缝钢筋与混凝土相互作用研究[J]. 工程力学, 2002, 19(3): 16-19.
[3] 迟世春, 林皋. 拱坝的动力控制研究[J]. 世界地震工程, 2002, 18(1): 1-8.
[4] 郭永刚, 涂劲, 陈厚群. 高拱坝伸缩横缝间布设阻尼器对坝体地震反应影响的研究[J]. 世界地震工程, 2003, 19(3): 44-49.
[5] 徐艳杰, 张楚汉, 王光纶, 等. 小湾拱坝模拟实际横缝间距的非线性地震反应分析[J]. 水利学报, 2001(4): 68-74.
[6] 陈厚群, 郭永刚. 小湾拱坝抗震工程措施深化研究[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2002.
[7] 徐艳杰. 横缝配筋的拱坝地震非线性模型与无限地基影响研究[D]. 北京: 清华大学, 1999.
[8] 陈观福. 强震区高拱坝横缝配筋与混凝土相互作用模型研究与应用[D]. 北京: 清华大学, 2002.

(收稿日期: 2005-05-31 编辑: 熊水斌)