

# 丰乐拱坝加厚新老混凝土结合处理效果评价

赵 静<sup>1</sup>, 刘进宝<sup>1</sup>, 郭士杰<sup>2</sup>

(1. 浙江同济科技职业学院, 浙江 杭州 311231; 2. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014)

**摘要**: 目前拱坝贴厚加固处理大多采用经验方法, 为解决拱坝贴厚加固工程的安全性和经济性问题, 采用 ANSYS 有限元计算程序对丰乐拱坝加厚新老混凝土结合处理措施进行非线性有限元分析。选取新老混凝土结合处理的锚杆设置参数(锚杆直径、间距、锚杆埋入老混凝土的深度)及参数水平作为变量, 以正交试验设计的思想来安排有限元试验方案, 并选取新老混凝土结合面的开裂度作为评价指标。计算结果表明, 加厚处理时新老混凝土用锚杆联结可以有效地减小结合面的开裂度, 并给出了经济有效的锚杆设置方案。

**关键词**: 新老混凝土结合; 贴厚加固; 锚杆设置; 正交试验; 丰乐拱坝

**中图分类号**: TU755      **文献标识码**: A      **文章编号**: 1006-7647(2012)02-0062-03

**Effect evaluation of coalesce treatment technique of new and old concrete thickening in Fengle Arch Dam**//ZHAO Jing<sup>1</sup>, LIU Jin-bao<sup>1</sup>, GUO Shi-jie<sup>2</sup> (1. Zhejiang Tongji Vocational College of Science and Technology, Hangzhou 311231, China; 2. East China Investigation and Design Institute, CHECC, Hangzhou 310014, China)

**Abstract**: According to the present situation that the thickening technique of reinforcement treatment of arch dam always use experience, considering the safety and economy of the thickening technique of reinforcement treatment of arch dam, nonlinear FEM analysis is employed by ANSYS software. Parameters of the anchor in the connection of new and old concrete (anchor diameter, anchor space and embedded depth) and the parameters level are used as variables. FEM test scheme is arranged by orthogonal design and the crack width of the connection of new and old concrete is used as evaluation index. The results show that the crack width of the connection decreased effectively when anchor is used between the new and old concrete, and a economical and effective set up scheme of anchor is proposed.

**Key words**: new and old concrete attaches; thickening technique of reinforcement; set up scheme of anchor; orthogonal experiment; Fengle Arch Dam

在拱坝建设向更高更薄方向发展的同时,许多老拱坝尤其是薄拱坝已到了必须补强加固的阶段,尤其是我国 20 世纪六七十年代修筑的拱坝,受限于当时的勘测、设计、施工条件,存在的问题尤其突出。当一般的加固措施不能有效地解决混凝土拱坝存在的安全隐患时,对拱坝进行贴厚加固处理已成为很多薄拱坝不得不采取的措施,采取该措施可以提高拱坝的整体承载能力并阻止裂缝的进一步发展,彻底解决渗漏问题。在薄拱坝贴厚加固工程中,新老混凝土之间的结合状态成为混凝土拱坝加固的关键<sup>[1-3]</sup>。

## 1 工程概况及加固措施

丰乐拱坝为变圆心变半径的等厚度拱混凝土双曲拱坝,坝顶高程为 211.0 m,建基面高程为 157.0 m,最大坝高为 54.0 m,坝顶厚 2.5 m,坝底厚 12.5 m,厚

高比为 0.23,坝顶弧长为 216.15 m,坝顶弦长为 168.2 m,弧高比为 4.0,弦高比为 3.1。大坝于 1973 年 1 月开始混凝土浇筑,1976 年 6 月完成大坝混凝土施工,1978 年 3 月大坝横缝重复灌浆结束。1978 年 5 月 7 日至 8 月 26 日,大坝左岸下游 2 号坝块 195.0 m 高程至 6 号坝块 165.0 m 高程发现裂缝,裂缝基本上平行于岸坡方向,总长度达 80 m 左右,缝宽达 1.0 mm;右岸 12 号坝块 175.0 m 高程至 14 号坝块 176.0 m 高程的裂缝沿 175.0 m 高程水平建筑缝延伸 29.35 m。1979 年初用环氧树脂封堵裂缝,当年 10 月发现裂缝继续张开并向两端延伸。由于大坝裂缝未能及时修补,1979 年水库蓄水至 1986 年 9 月,大坝裂缝已发展到 20 条,总长度达 260.8 m。在裂缝和施工横缝相交处,坝面潮湿、渗水,高水位时局部裂缝有喷射水雾现象。1986 年冬季用改性

环氧树脂进行灌浆,共灌了 19 条裂缝,灌入改性环氧树脂浆液 331.2L,灌后缝面不再渗漏。1986 年至 1994 年,左岸坝后裂缝宽度有增大的趋势,但没有发现新的裂缝,已灌浆的裂缝也没有被拉开。1996 年以后,下游坝面陆续发现新的裂缝,下游坝面漏水点增多,至 2001 年底共发现 40 多处漏水点,并伴有白色析出物,部分裂缝和横缝交叉处漏水,且渗水缝段较长,出现了新的裂缝。2001 年检查发现,6 号、8 号、10 号、11 号坝块共出现 6 条水平裂缝或斜裂缝,总长度为 28.1m,2 次用超声波对裂缝进行检测发现,裂缝最大深度分别为 2.3m 和 2.14m,缝宽不大于 1.0mm。从几次裂缝检测结果看,该拱坝下游面裂缝均为表面裂缝。

针对该双曲拱坝裂缝的最新修复措施为坝后喷射钢纤维混凝土材料加固。为保证工程质量,采用两端带钩的剪切型钢纤维,根据不同加固部位对强度要求的不同,分别采用不同规格的钢纤维,坝顶至坝底厚度从 0.5m 变化至 1.0m。在大坝下游和大坝上游 183.0m 以上的外表层喷涂 5cm 厚的聚氨酯泡沫塑料(PUF),将该保温材料喷射至建筑物表面 5s 左右即发泡膨胀形成聚氨酯发泡保温层,该材料热导率仅为混凝土热导率的 1.3%,良好的保温材料将明显地降低坝体内的温度应力<sup>[4-5]</sup>。

## 2 计算方法和计算模型

### 2.1 计算方法

拱坝应力的计算方法有很多,目前主要采用拱梁分载法和有限元方法。拱坝加固工程中新老混凝土的结合处理除了结合面的凿毛处理外,主要措施就是设置锚杆,以加强新老混凝土之间的联合受力。若采用拱梁分载法等材料力学方法则锚杆的受力及其作用无法显现出来,故采用有限元方法,利用 ANSYS 有限元计算软件进行计算分析。若用 ANSYS 模拟三维坝体,由于设置的锚杆较多,无法有效模拟,故采用纯拱法的计算思想,用 ANSYS 模拟二维拱圈进行计算分析<sup>[6-7]</sup>。

### 2.2 计算模型

采用纯拱法的计算思想需分拱圈分别进行计算分析,以 178.0m 高程拱圈为例进行分析,不考虑基础及坝肩的作用,假定基础及坝肩无变形,即认为拱圈为固端拱。由于坝体为混凝土材料,故为弹塑性问题,由于未知新老混凝土结合面的结合状态,故为接触问题,因此新老混凝土的结合效果验算应为非线性问题。坝体新老混凝土均采用 William-Warnke 本构模型,网格剖分采用 Palne42 四边形等参单元。新老混凝土结合面为面-面接触,二维平面模型接触

单元为线单元。目标单元采用 TARGE169,接触单元采用 CONTA171。锚杆采用双线性随动强化模型,锚杆不仅承受拉力而且承受剪力,故锚杆单元采用二维梁单元 BEAM3。假定锚杆两端与混凝土的变形同步,即锚杆两端与新老混凝土分别共用节点。

### 2.3 分析方法

由于新老混凝土之间的作用力无法计算得出,故如何设置锚杆成为问题的关键,本文采用正交试验设计方法进行分析。按照正交设计的实施步骤,正交有限元试验步骤<sup>8</sup>如下:

步骤 1 选择试验指标、因素及水平。首先针对试验欲解决的主要问题确定试验指标,再根据实践经验和有关专业知识分析找出对指标有影响的一切可能因素。试验因素在试验中所处的状态、条件的变化可能会引起试验指标的变化,因素变化的各种状态和条件称为因素的水平。本研究的主要目的是分析锚杆设置参数的不同对新老混凝土结合效果的影响,故以新老混凝土结合面的开裂度作为评价锚杆设置参数的定量考察指标。锚杆设置参数即为因素,锚杆埋入老混凝土的深度  $l$  作为试验因素  $A$ ,锚杆间距  $s$  作为试验因素  $B$ ,锚杆直径  $d$  作为试验因素  $C$ 。选取的各正交试验因素及其水平见表 1。

表 1 正交试验因素及水平

水平	$l/m$	$s/m$	$d/mm$
1	1.0	1	25
2	0.8	2	20
3	0.5	3	16

步骤 2 选择合适的正交表。正交表的选择一般是根据因素和水平的多少及试验工作量的大小而定。根据问题特点,采用 3 因素 3 水平的正交表进行方案设计,共进行 9 次试验,即分别进行 9 组有限元模拟分析。

步骤 3 排表头,写出试验方案表。选定正交表后,将各因素按顺序排入正交表的各列上。排好表头后,再将表中各列数字,代表各因素的 3 个水平序号依次换成该因素的实际水平值,便可得到试验方案表。根据试验方案进行试验,并将测定结果填入表中。试验方案见表 2。

步骤 4 分析试验结果。分析方法有两种:一是直观分析法,二是方差分析法。本文采用直观分析法。在试验结果的基础上,通过直观分析法可达到 4 个目的:①分析各因素与考察指标的关系,即当各因素水平变化时,考察指标如何变化;②分析各因素影响程度的主次顺序,即确定各因素中的主要与次要因素;③确定最优方案;④为进一步试验指出方向。

步骤 5 根据分析结果,确定最优方案。

## 2.4 计算荷载及工况

由于该拱坝加固在新混凝土下游面喷涂保温材料,所以外界温度对坝体温度应力的影响不大,主要是在拱坝贴厚施工过程中,新混凝土水化热产生温度应力会造成新老混凝土的开裂,以至于影响新老混凝土的联合受力,影响加固效果。因此,只研究加固施工过程中新混凝土由于水化热产生的温度应力对结合面的影响。计算工况为:施工期水库正常运行,上游水位为正常水位。加厚新混凝土采用分层分段喷射施工,待新混凝土水化进行到一定阶段后进行封拱接缝处理。此时假定新混凝土的温度高于老混凝土及空气温度 $10^{\circ}\text{C}$ ,即应将新混凝土施以 $-10^{\circ}\text{C}$ 的温降。首先计算在不设锚杆的情况下新老混凝土结合面的开裂度,计算结果为 $3.452\text{mm}$ ,这样的开裂在以后的运行过程中肯定会继续扩展,影响新老混凝土的联合受力,导致加固达不到效果,需设置锚杆以加强新老混凝土的结合。

## 3 计算结果分析

计算结果见表2。将试验数据组合起来进行比较,例如在表2方案1~3的3个试验中,锚杆埋入深度均为 $1.0\text{m}$ ,即均为水平1(记作 $A_1$ ),将这3个试验开裂度的平均值记为 $A'_1$ 。此时, $A_1$ 条件下的3个试验中,其余各因素取遍所有的水平,而且各水平出现的次数是相同的,故 $A'_1$ 可以认为是 $A_1$ 对试验结果的影响。同理可以计算出其他各因素各水平对试验结果的影响,并对此进行比较,各因素对评价指标的影响如表3所示(表中 $i=1,2,3$ )。

表2 各试验方案计算结果

方案	$l/\text{m}$	$s/\text{mm}$	$d/\text{mm}$	结合面最大开裂度/ $\text{mm}$
1	1.0	1	25	0.330
2	1.0	2	20	0.690
3	1.0	3	16	1.159
4	0.8	1	20	0.396
5	0.8	2	16	0.857
6	0.8	3	25	0.660
7	0.5	1	16	0.474
8	0.5	2	25	0.436
9	0.5	3	20	0.721

表3 各因素对评价指标的影响

水平	开裂度/ $\text{mm}$		
	$A'_i$	$B'_i$	$C'_i$
1	0.726	0.400	0.475
2	0.638	0.661	0.602
3	0.544	0.847	0.830

根据表3中 $A'_i, B'_i, C'_i$ 的最小值可以选取 $A_3B_1C_1$ 为以新老混凝土结合面开裂度为评价指标

的最优参数方案,该方案锚杆埋入老混凝土的深度为 $0.5\text{m}$ ,锚杆间距为 $1\text{m}$ ,锚杆直径为 $25\text{mm}$ 。该方案并未包括在本文9个试验方案中,这也证明正交试验设计所得到的结果是全面的。再从极差来看, $A, B, C$ 三因素的极差分别为 $0.182, 0.447, 0.335$ ,可见锚杆设置间距对计算结果的影响最大,锚杆直径对计算结果的影响相对较小,而锚杆埋入老混凝土的深度对计算结果的影响最小。即锚杆设置间距是影响新老混凝土结合面开裂度的主要因素,锚杆直径和锚杆埋入老混凝土的深度是次要因素。

通过建立有限元非线性模型对正交试验分析的最优方案进行验证,计算得出结合面的开裂度为 $0.260\text{mm}$ ,均小于正交试验各方案的开裂度(表2),表明本文的分析是正确的。

## 4 结论

a. 薄拱坝贴厚加固工程中,在新老混凝土的结合面设置锚杆可以有效地减小开裂。锚杆设置间距对新老混凝土的开裂影响较大,为满足工程经济性要求,在满足工程安全的条件下可以适当选择直径较小的锚杆,并降低锚杆埋入老混凝土的深度。

b. 各种组合下结合面传递剪力、压力较小,新老混凝土结合面基本上都不是闭合状态,也就是说开裂总是存在的。为了达到更好的加固效果,应控制加厚新混凝土封拱接缝的温度。

c. 采用纯拱法计算思想,不能模拟拱坝真实的受力状态,计算出的应力过大,坝踵处拉应力超限,同时各拱圈相互之间无制约,计算出的开裂度和实际有所出入,尤其是上部拱圈。

## 参考文献:

- [1]黎眉展.国内外拱坝建设与发展(上)[J].贵州水力发电, 2003, 17(1):1-5.
- [2]黎眉展.国内外拱坝建设与发展(下)[J].贵州水力发电, 2003, 17(2):1-5.
- [3]朱伯芳.中国拱坝建设的成就[J].水力发电, 1999(10): 38-41.
- [4]马福恒,刘成栋.丰乐拱坝的裂缝产生机理及其修复研究[J].水利学报, 2007, 38(增刊1):123-127.
- [5]张燎军,翟利军,贾德斌,等.丰乐双曲拱坝加固方案三维有限元仿真分析[J].大坝与安全, 2003(2):32-35.
- [6]邹超英,苏志敏,曾海军,等.拱坝有限元分析网格剖分方案研究[J].南水北调与水利科技, 2001, 9(1):47-49.
- [7]曹文贵,彭波,李红芳.砂浆锚杆的有限元模拟方法探讨[J].中南公路工程, 2005, 30(4):31-35.
- [8]王剑波,何朋立,陈新胜,等.隧道锚喷参数优选正交有限元强度折减分析[J].青岛理工大学学报, 2007, 28(2):1-5.

(收稿日期 2011-07-26 编辑 骆超)