

# 模拟高拱坝施工期横缝工作性态的 接触 - 接缝复合单元

周 伟<sup>1</sup>, 常晓林<sup>1</sup>, 解凌飞<sup>1</sup>, 许文涛<sup>2</sup>, 解 敏<sup>2</sup>, 向 弘<sup>2</sup>

(1. 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;

2. 中国水电顾问集团 昆明勘测设计研究院, 云南 昆明 650051)

**摘要:** 考虑施工期高拱坝横缝的真实工作性态以及影响横缝开合度的各种因素, 提出一种新的非线性接触 - 接缝复合单元, 该单元可以模拟横缝在灌浆过程中的变形和受力状态上的转化规律, 并导出横缝灌浆时刻复合单元的具体转化格式, 详细介绍接触 - 接缝复合单元的数值实施步骤, 编制数值程序。小湾高拱坝横缝开合度的数值仿真模拟计算结果表明了该复合单元的可行性和实用性。

**关键词:** 水利工程; 高拱坝; 横缝; 接触单元; 接缝单元; 接触 - 接缝复合单元

**中图分类号:** TV 31

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2006)增 2 - 3809 - 07

## CONTACT-JOINT MULTIPLE ELEMENT TO SIMULATE TRANSVERSE JOINT OF HIGH ARCH DAM DURING CONSTRUCTION

ZHOU Wei<sup>1</sup>, CHANG Xiaolin<sup>1</sup>, XIE Lingfei<sup>1</sup>, XU Wentao<sup>2</sup>, XIE Min<sup>2</sup>, XIANG Hong<sup>2</sup>

(1. *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;* 2. *Kunming Hydroelectric Investigation, Design and Research Institute, CHECC, Kunming, Yunnan 650051, China*)

**Abstract:** A new contact-joint multiple element is presented to simulate transverse joints of high arch dam, which may simulate the transforming process of deformation and stress state of transverse joints during joint grouting construction. The mechanical character of transverse joint of arch dam can be simulated by a kind of contact element with function of separating and closing before grouting, and the one by joint element with certain thickness. During the real construction, the grouting will change the structure shape of transverse joint, but mechanical state will complete arch dam after grouting. So the transforming process of deformation and stress state of transverse joints need to be simulated truly, and the new contact-joint multiple element presented in this paper can solve this problem. The detailed transforming method and equation are derived for contact-joint multiple element. Numerical implementation process is described and finite element procedure of contact-joint multiple element is developed. The simulation results of developing process of transverse joints of Xiaowan high arch dam show that the transverse joints will be shrank to be above 0.5 mm for concrete temperature decreases resulted from water cooling of dam before grouting, except that the gaps of a few grouting zones are less than 0.5 mm which can't meet the requirement of common grouting. But the gap of those grouting zones may be larger than 0.5 mm by means of concrete supercooling about 2 °C - 3 °C. In summary, the variety and transforming process of transverse joint of arch dam simulated by the contact-joint multiple element may reflect real constructing process, and the computing values of gap are also reasonable. The new contact-joint multiple element used in the analysis of high arch dam

**收稿日期:** 2005 - 10 - 18; **修回日期:** 2005 - 12 - 21

**作者简介:** 周 伟(1975 - ), 男, 博士, 1998 年毕业于武汉水利电力大学水电学院水工结构工程专业, 现任讲师, 主要从事水工高坝结构设计理论及数值仿真方面的教学与研究工作。E-mail: zw\_mxx@163.com

transverse joint gap is feasible and practicable.

**Key words:** hydraulic engineering; high arch dam; transverse joints; contact element; joint element; contact-joint multiple element

## 1 引言

随着国家对水电资源开发力度的加大,我国近几年来一大批大型、特大型水电站陆续上马,一批300 m级高拱坝即将开工建设。高拱坝的施工周期都很长(有的长达6~7 a),因此其封拱和蓄水是一个持续时间较长的动态过程,同时施工期坝体的温度场变化和温度应力也是一个动态过程,蓄水过程的变化将影响温度场和应力场的变化,温度场的变化也将影响大坝的应力和变形状态,也即与横缝的工作性态直接相关;反过来,假如施工期横缝的开合度不满足封拱灌浆的要求,就必需采取工程措施,比如对大坝的浇筑过程、封拱过程和蓄水过程进行适当调整,以满足灌浆要求,这样大坝的浇筑过程、封拱过程和蓄水过程的变化又将影响大坝施工期的温度场。因此,高拱坝施工期的横缝工作性态十分复杂,不仅与大坝本身的体形、材料、荷载有关,还与封拱和蓄水过程、温度场变化过程有关。横缝封拱灌浆后,相邻的坝段被连结在一起共同受力,但灌浆后的横缝部位仍然是一薄弱部位,在后期水压力、温度应力以及地震荷载作用下,横缝将有再次被拉开的可能。总之,施工期高拱坝横缝在灌浆前工作在一种传压、传剪不抗拉的面-面接触状态,灌浆后由“缝”变成“薄层水泥石”,且在横缝法向表现为弱拉性质。

对施工期高拱坝的横缝工作性态的真实模拟意义重大,这是因为如果拱坝封拱前的横缝开合度模拟计算或者预测不准确,对临灌浆前的横缝开合度是否满足灌浆要求以及横缝灌浆后是否又被拉开而需要进行二次重复灌浆的判断将会出现偏差,再加上拱坝横缝本身的宽度很小(0.1 mm的量级),数值仿真中任何一种简化模拟方法带来的计算误差都有可能掩盖横缝真实的变形状态。用简化计算方法(不考虑横缝的真实工作性态)对施工期的横缝开合度进行仿真模拟将失去其研究意义。

目前,我国在高拱坝的温度仿真计算方面取得了丰富的研究成果<sup>[1~5]</sup>,在降低仿真模型规模方面都起到了很好的作用。侯朝胜等<sup>[6]</sup>在混凝土拱坝横缝开度三维仿真计算研究方面做了一些有益的探

索,采用全过程仿真黏弹性空间有限单元法对混凝土拱坝横缝开度进行计算研究,得出了横缝开度随时间变化的规律,但是在计算时没有考虑坝体和坝基的非线性特性,且采用非线性接缝单元模拟横缝的张拉和压闭作用的方法有待进一步改进。韩晓凤和张仲卿<sup>[7]</sup>在考虑混凝土材料非线性和横缝接触非线性的基础上对沙牌拱坝诱导缝进行结构分析,研究了横缝下游宽度变化对拱坝工作性态的影响。李建新等<sup>[8]</sup>利用商业有限元软件MSC中的接触单元分析了拱坝在静水压力作用下横缝中存在的各种间隙对坝体结构受力的影响。朱伯芳<sup>[9]</sup>采用有限厚度带键槽三维实体接缝单元,分析了接缝的初始间隙和接缝附近的应力和接触状况,得出了灌浆以后仅仅由于浆体收缩而产生的初始间隙很小的结论。徐艳杰等<sup>[10]</sup>采用Fenves接触单元模型对小湾拱坝在地震作用下的横缝非线性特性进行了深入细致的研究,采用实际横缝间距和最多达到25条的横缝模拟条数对小湾拱坝进行非线性地震分析,提出要得到符合实际的横缝张开度,必须在拱坝关键部位以真实间距模拟横缝,并保证一定的模拟条数。此外,一些学者<sup>[11~14]</sup>先后提出了基于增强拉格朗日算法的各种罚函数算法,并将其应用于线弹性有限元分析中模拟有间隙的接触问题,算例结果表明,该算法具有数值计算稳定、收敛快的特点。笔者<sup>[15~17]</sup>在线弹性有限元分析的基础上将增强拉格朗日算法扩展到材料非线性和几何非线性接触问题中,开发出能模拟有间隙的接触问题非线性接触单元,并将此应用于丹江口二期加高的分析中,计算结果表明,非线性接触单元可以很好地模拟温度作用下接触缝的张拉和压闭作用。

本文将在已有研究成果的基础上,综合考虑横缝在施工期的真实工作性态以及影响横缝开合度的各种因素,包括施工期温度场和应力场的复合效应、封拱过程、蓄水过程、大坝混凝土和地基的非线性特征,综合非线性接触单元模拟横缝的张拉、压闭作用和三维非线性有厚度薄层单元模拟封拱灌浆过程的特性,提出一种可以模拟高拱坝施工期横缝灌浆过程真实工作性态的接触-接缝复合单元,并详细介绍其单元特性和具体的数值实施步骤,最后编制数值程序装入现有的有限元程序,对一个具体的

工程实例进行数值仿真模拟计算, 以验证该复合单元的可行性和实用性。

## 2 接触 - 接缝复合单元

### 2.1 接触摩擦算法

高拱坝灌浆前横缝的工作性态是一个典型的面 - 面接触问题。由于接触问题本质上是非线性的, 在求解之前不知道接触区域, 并且接触面之间的状态(分离、黏合和滑动)是未知的, 它随荷载、材料、边界条件以及其他因素的变化而变化。当接触面之间接触后, 需要计算摩擦力, 而摩擦问题也是非线性的。由于接触问题是一种高度的非线性问题, 需要较大的计算资源, 因此, 必须建立一种高效的、数值稳定的接触算法。

目前接触问题的求解方法主要还是采用数值方法。一般是利用变分原理, 用有限元或边界元进行离散, 然后构造合适的迭代格式进行迭代或者数学规划方法求解。数学规划中罚函数法是一种广泛使用的方法, 然而其致命弱点是计算结果对惩罚系数太敏感, 对复杂的接触问题容易导致收敛困难。由于有摩擦接触问题可以表示成一个标准的凸二次规划模型<sup>[11~14]</sup>, 而对于凸二次规划问题目前已经有比较成熟的算法, 所以本文在此基础上采用一种基于扩展拉格朗日方法的序列二次规划法(SQP)求解形如凸二次规划问题的非线性接触问题。

非线性接触问题与常规的弹塑性有限元问题一样, 其定解条件包括有限元平衡方程、边界条件、材料本构模型、摩擦模型以及接触约束条件等。其中接触条件包括 3 种状态, 即分离、黏合和滑动, 对于黏合和滑动状态接触面的位移必须满足非穿透条件<sup>[17]</sup>:

$$Nu - g \leq 0 \quad (1)$$

式中:  $u$  为变位,  $N$  为接触面法线方向,  $g$  为初始接触间隙。

由弹塑性接触分析的最小位能原理: 在所有满足求解区域内的应力 - 应变关系和位移边界条件的可能增量位移场中, 其真实解使弹塑性系统的总位能取最小值。弹塑性系统的总位能可表示为

$$\begin{aligned} \Pi = \Pi(\varepsilon_{ij}, u_i, \lambda) = \\ \int_V \left( \frac{1}{2} D_{ijkl} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl} - \bar{f}_i u_i \right) dV - \int_S \bar{T}_i u_i dS - \lambda^T C \{u\} \quad (2) \end{aligned}$$

式中:  $\bar{f}_i$  为体积力,  $\bar{T}_i$  为边界上的面力,  $C$  为约束

矩阵,  $\lambda$  为拉格朗日乘子向量。

将式(2)用矩阵的方式表示为

$$\Pi(u, \lambda) = \frac{1}{2} u^T K u - u^T F - \lambda^T C u \quad (3)$$

式中:  $K$  为刚度矩阵,  $F$  为节点荷载向量。

由变分原理:

$$\delta \Pi(u, \lambda) = 0 \quad (4)$$

可得

$$K u = F \quad (5)$$

$$C u = 0 \quad (6)$$

式(5), (6)分别为由最小位能原理及变分原理得到的非线性接触分析的有限元求解方程和接触边界条件, 通过它们就可以采用迭代法获得问题的解。

由于迭代法的计算效率较低, 因此本文采用效率高而且收敛较快的基于 SQP 二次规划法建立非线性接触分析问题的数学模型。假设  $u^*$ ,  $\lambda^*$  为式(4)的真实解, 则基于式(3)的弹塑性接触分析的最小位能原理可以表示为

$$\Pi(u, \lambda) = \frac{1}{2} u^T K u - u^T F + \lambda^T C u \geq \Pi(u^*, \lambda^*) \quad (7)$$

那么式(7)通过有限元离散可以得到一个等价的二次规划问题<sup>[13]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} \min \quad & \frac{1}{2} u^T K u - u^T F - \lambda^T C u \\ \text{s.t.} \quad & C u = 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

由于优化问题存在一个解的唯一性问题, 在保证有限元模型边界条件正确和模型参数合适的条件下, 上述等价的摩擦接触二次规划问题可以收敛至一个稳定的唯一解<sup>[18]</sup>。

### 2.2 基于扩展拉格朗日算法的接触单元

图 1 给出了横缝接触单元模型的示意图。图中左右 2 个拱坝坝块 A 和 B 分别是横缝两侧的六面体等参实体单元。在 2 个实体单元的接触界面 1234 和 5678 上布置接触点对, 使实体单元边界与接触边界相重合, 并将位于接触界面上的节点 1~8 作为接触点对组成接触单元。

根据弹塑性接触分析的最小位能原理导出的二次规划问题列式(见式(8)), 接触单元的两侧接触点对在局部坐标系中的相对位移和接触应力分别为

$$\{\Delta \delta\}^e = \{\Delta u_1, \Delta v_1, \Delta w_1, \dots, \Delta u_4, \Delta v_4, \Delta w_4\}^T \quad (9)$$

$$\{\Delta \sigma\}^e = \{\Delta \sigma_1, \Delta \tau_1, \dots, \Delta \sigma_4, \Delta \tau_4\}^T \quad (10)$$

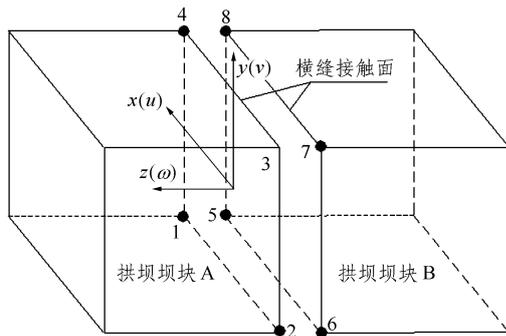


图1 横缝接触单元模型示意图

Fig.1 Transverse joint contact element model

式中： $\Delta u, \Delta v, \Delta w$  分别为局部坐标系中 3 个方向的相对位移分量； $\{\Delta\sigma\}^e, \{\Delta\tau\}^e$  分别为接触节点的法向正应力和切向摩擦应力。

横缝接触单元相对应于 3 种实际工作的接触状态，即分离、黏合和滑动，在上述基于扩展 Lagrange 乘法子求解横缝间的接触问题时按以下方式考虑：

(1) 分离状态

假设接触对 15 和 48 处于分离状态，当接触面法向应力大于 0(因为灌浆前横缝间不存在抗拉强度)时，接触面自然张开，此时接触单元的接触对的相对位移和接触应力分别为

$$\{\Delta\delta\}^e = \{\Delta u_1, \Delta v_1, \Delta w_1, \dots, \Delta u_4, \Delta v_4, \Delta w_4\}^T \quad (11)$$

$$\{\Delta\sigma\}^e = \{0, 0, \dots, 0, 0\}^T \quad (12)$$

(2) 黏合状态

假设接触对 15 和 48 处于黏合状态，当法向应力小于 0(接触面间的应力为压应力)时，接触面处于黏合状态(见图 1)，此时接触单元的接触对的相对位移和接触应力分别为

$$\{\Delta\delta\}^e = \{\Delta u_1, \Delta v_1, 0, \dots, \Delta u_4, \Delta v_4, 0\}^T \quad (13)$$

$$\{\Delta\sigma\}^e = \{\Delta\sigma_1, \Delta\tau_1, \dots, \Delta\sigma_4, \Delta\tau_4\}^T \quad (14)$$

黏合状态的接触应力可以由接触分析的系统最小位能原理求解整体平衡方程而获得。其中，接触面切向剪应力小于莫尔 - 库仑准则所规定的允许剪应力，允许剪应力为

$$\tau^n = \sigma_n f_n \quad (15)$$

式中： $\tau^n$  为接触面上的剪应力， $f_n$  为静摩擦因数。

(3) 滑动状态

假设接触对 15 和 48 处于滑动状态，当法向应力小于 0(接触面间的应力为压应力)时，且根据计算的接触面切向剪应力大于莫尔 - 库仑准则所规定的允许剪应力，接触面处于滑动状态。此时接触单元的接触对的相对位移和接触应力分别为

$$\{\Delta\sigma\}^e = \{\Delta u_1, \Delta v_1, 0, \dots, \Delta u_4, \Delta v_4, 0\}^T \quad (16)$$

$$\{\Delta\sigma\}^e = \{\Delta\sigma_1, 0, \dots, \Delta\sigma_4, 0\}^T \quad (17)$$

接触面的切向滑动摩擦应力为常量，可按动摩擦公式进行计算：

$$\tau^s = \sigma_n f_s \quad (18)$$

式中： $f_s$  为动摩擦因数。

接触面张开时所不能承担的应力和接触面发生滑动时超过抗剪强度的那部分将通过增量迭代转移并重新分配给周围单元。

2.3 横缝三维有厚度接缝单元

横缝灌浆后变成了坝块间的一个接缝，下面简要推导一下有厚度接缝单元的单元刚度矩阵。

对图 1 中的横缝进行灌浆后就变成了如图 2 所示的有限厚度接缝单元，该单元为三维实体 8 个节点的接缝单元<sup>[9]</sup>，单元的厚度为  $t$ ，节点的组成顺序与横缝接触单元完全一致。

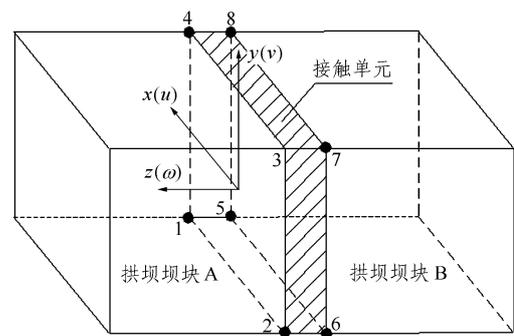


图2 有限厚度接缝单元

Fig.2 3D thin joint element

单元局部坐标系下  $z$  轴与缝面正交，坐标  $x, y$  轴在缝面内。单元内各节点位移分量为

$$\{\delta\}^e = \{u_1, v_1, w_1, u_2, v_2, w_2, \dots, u_8, v_8, w_8\}^T \quad (19)$$

接缝单元法向两侧节点的位移差可根据接缝单元内 8 个节点的位移分量  $\{\delta\}^e$ ，利用单元的形函数  $[N]$  进行内插：

$$\{\Delta\delta\} = \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \\ \Delta w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_i - u_j \\ v_i - v_j \\ w_i - w_j \end{Bmatrix} = [N]\{\delta\}^e \quad (i=1\sim 4, j=5\sim 8) \quad (20)$$

单元内任一点应变为

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \gamma_{zx} \\ \gamma_{zy} \\ \sigma_z \end{Bmatrix} = \frac{1}{t} \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \\ \Delta w \end{Bmatrix} = [B]\{\delta\}^e \quad (21)$$

$$[B] = \frac{1}{t}[N] \quad (22)$$

单元内任一点应力为

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \tau_{zx} \\ \tau_{zy} \\ \sigma_z \end{Bmatrix} = [D]\{\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}\} = \frac{1}{t}[D] \left\{ \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \\ \Delta w \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \Delta u_0 \\ \Delta v_0 \\ \Delta w_0 \end{Bmatrix} \right\} \quad (23)$$

式中： $\Delta u_0, \Delta v_0, \Delta w_0$  为局部坐标系中 3 个方向的初始位移差。

弹性矩阵为

$$[D] = \begin{bmatrix} G_x & 0 & 0 \\ 0 & G_y & 0 \\ 0 & 0 & E_z \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中： $G_x, G_y$  分别为接缝单元缝面沿  $x, y$  方向的切向模量； $E_z$  为法线方向的弹性模量。

单元弹性刚度矩阵为

$$[k]^e = \frac{1}{S} \iint [N]^T [D] [N] dx dy \quad (25)$$

如果接缝单元在局部坐标系中沿法向  $z$  轴方向开裂，开裂后局部坐标系应力分量  $\sigma_z = 0$  或  $\sigma_z = -p$ 。因此，局部坐标系中混凝土开裂矩阵  $[D_c]$  可表示为

$$[D_c] = \begin{bmatrix} G_x & 0 & 0 \\ 0 & G_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

接缝单元混凝土开裂浆产生释放应力  $\{\sigma_r\}$ ，在有缝隙水压力情况下局部坐标系中释放应力的表达式为

$$\{\sigma_r\} = \begin{Bmatrix} \tau_{zx} \\ \tau_{zy} \\ \sigma_z - p \end{Bmatrix}$$

释放应力引起的等效节点荷载将重新分布到附近的单元中去，等效节点力的表达式为

$$\{\Delta P_r\} = \int [B]^T \{\sigma_r\} dV \quad (27)$$

### 2.4 接触 - 接缝复合单元格式

考虑到高拱坝的实际施工浇筑过程，在坝体有限元网格划分时，对于封拱灌浆前拱坝的横缝采用前述的接触单元模拟，在相邻坝段单元的一侧定义接触面单元，在另一侧定义目标单元，组成接触对单元，接触对的分离、黏合或滑动状态通过接触面上的相对位移和应力(包括法向应力和切向应力)状态来判断，采用基于增强拉格朗日乘子法的二次规划法逐步迭代求解接触单元的实际接触状态。

灌浆后采用有厚度接缝单元来模拟坝体的横缝，在横缝灌浆结束时刻，接缝单元被激活，接触单元同时将被“杀死”，相邻坝段被连结在一起共同受力，接触单元和接缝单元是处于同一物理位置且具有不同模拟能力的两种单元类型，在描述横缝的工作性态方面具有时间上的连贯性以及受力状态上的继承性，即在横缝灌浆时刻，接缝单元必须继承接触单元的受力状态，并将其带入后续的整体拱坝的工作状态中，而接触单元在灌浆时刻各个节点的实际位置(指变形后的节点坐标)被转换成灌浆后新生成接缝单元的节点坐标。本文称这种特殊的单元形式为接触 - 接缝复合单元，在灌浆时刻复合单元具体的转化格式如下面所述：

接触单元各节点的初始坐标(局部坐标系)为

$$\{S\}^e = \{x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots, x_8, y_8, z_8\}^T$$

灌浆时刻接触单元各节点的变位为

$$\{\delta\}^e = \{u_1, v_1, w_1, u_2, v_2, w_2, \dots, u_8, v_8, w_8\}^T$$

灌浆后接缝单元的初始坐标(局部坐标系)为

$$\{S\}^e = \{x_1 + u_1, y_1 + v_1, z_1 + w_1, \dots, x_8 + u_8, y_8 + v_8, z_8 + w_8\}^T \quad (28)$$

灌浆后接缝单元各节点的变位为 0。灌浆时刻接触单元各节点的初应力(由接触单元传递过来)为

$$\{\sigma_i^0\} = \{0, 0, \sigma_z^0, 0, \tau_{yz}^0, \tau_{zx}^0\}^T \quad (i=1, 8) \quad (29)$$

### 3 工程应用实例

本文采用三维非线性接触-接缝复合单元,同时考虑施工期大坝混凝土的温变效应和材料的力学参数随龄期发展的特性,真实模拟在建的小湾高拱坝横缝开合度的全过程变化情况。

小湾高拱坝是目前世界上在建的最高拱坝,坝高292 m,最大底宽73 m。坝体共设42条横缝,自底向上分为27个灌区,坝体混凝土开始浇筑时间为2005年9月1日,2011年8月底接缝灌浆结束,年底最后一台机组投产发电,工程竣工。图3为小湾高拱坝坝体三维有限元网格。

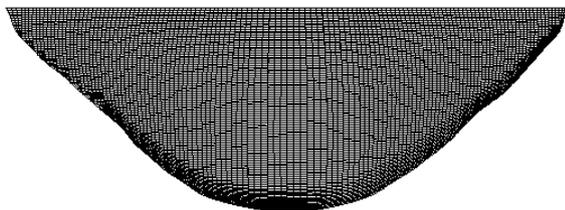


图3 小湾高拱坝坝体三维有限元网格

Fig.3 3D finite element mesh of Xiaowan high arch dam

图4~6分别给出了20#横缝部分灌区上游面、中心和下游面开合度历时曲线。

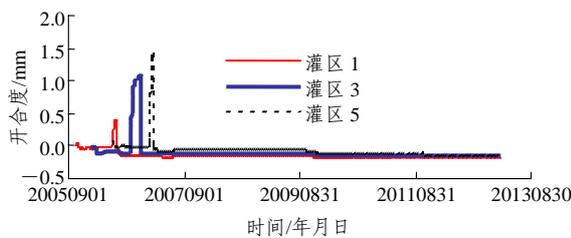


图4 20#横缝部分灌区上游面开合度历时曲线

Fig.4 Curves of upstream surface aperture of #20 transverse joint in partly grouting region with time

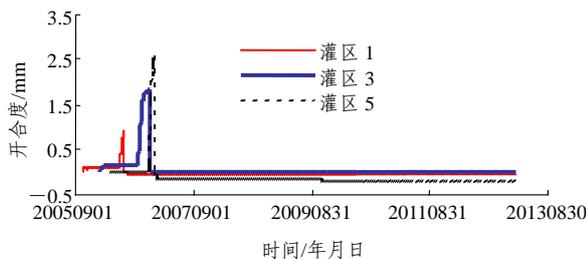


图5 20#横缝部分灌区中心开合度历时曲线

Fig.5 Curves of center aperture of #20 transverse joint in partly grouting region with time

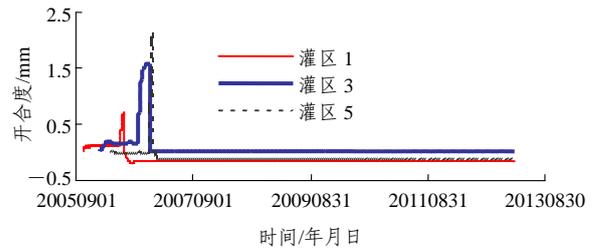


图6 20#横缝部分灌区下游面开合度历时曲线

Fig.6 Curves of downstream surface aperture of #20 transverse joint in partly grouting region with time

浇筑开始时横缝的初始缝宽为0,由图4~6中可看出缝面是闭合的。二期冷却后坝体降温收缩使横缝张开,温降对横缝的影响分为两个部分:第一部分温降用于抵消早期混凝土温升过程中的压应力;第二部分温降在压应力被抵消后使横缝逐渐张开,在二期冷却结束时坝体温度接近最低值,横缝开合度达到最大值。横缝灌浆后,坝体在水泥残余水化热作用下温度有所回升,同时水库蓄水也使拱圈向产生压应力,因此横缝灌浆后一直处于受压状态。另外,二期通水冷却结束时,坝中心的温降大于坝表面的温降,因此坝中心的开合度较上下游面开合度大。大部分区域横缝开度值为0.50~2.78 mm,满足灌浆的要求。

从计算结果来看,采用三维非线性接触-接缝复合单元比较真实地揭示了高拱坝施工期横缝开合度的变化规律,仿真结果对指导实际的施工灌浆过程具有重要意义。因此,采用本文提出的三维非线性接触-接缝复合单元模拟高拱坝横缝施工期的工作态是可行的。

### 4 结语

(1) 在已有研究成果基础上,考虑横缝在施工期的真实工作态以及影响横缝开合度的各种因素,在高拱坝横缝灌浆以前,采用基于扩展拉格朗日算法的接触单元模拟横缝间的接触状态,以真实反映灌浆前横缝的只传压、传剪而不抗拉的工作态,灌浆后采用有厚度接缝单元来模拟坝体的横缝。

(2) 对于横缝灌浆封拱的施工过程,本文提出了一种新的非线性接触-接缝复合单元,该单元可以模拟横缝在灌浆过程中的变形和受力状态上的转化规律,即在横缝灌浆后新产生的接缝单元必须继承接触单元的变形和受力状态,并将其带入后续整

体拱坝的工作状态中, 并导出了在灌浆时刻复合单元的具体转化格式。

(3) 详细介绍了接触 - 接缝复合单元的数值实施步骤, 编制了复合单元的数值程序并装入现有的 ANSYS 有限元软件, 对小湾拱坝的横缝开合度过程进行了数值仿真模拟计算, 计算结果证明了该复合单元的可行性和实用性。

### 参考文献(References):

- [1] 朱伯芳. 多层混凝土结构仿真应力分析的并层算法[J]. 水力发电学报, 1994, 13(3): 11 - 20.(Zhu Bofang. Mixed-layer method for analysis of stresses by simulating the construction process of multilayered high concrete structures[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1994, 13(3): 11 - 20.(in Chinese))
- [2] 朱伯芳, 许 平. 混凝土坝仿真计算的并层算法和分区异步长算法[J]. 水力发电, 1996, (1): 38 - 45.(Zhu Bofang, Xu Ping. Zone-merged algorithm and zoned different-step-length algorithm in the concrete simulation calculation[J]. Water Power, 1996, (1): 38 - 45.(in Chinese))
- [3] 朱伯芳. 不稳定温度场数值分析的时间域分区异步长解法[J]. 水利学报, 1995, (8): 21 - 29.(Zhu Bofang. A method using different time increments in different regions for solving unsteady temperature field by numerical method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, (8): 21 - 29.(in Chinese))
- [4] 王建江. RCCD 温度应力分析的非均质单元方法[J]. 力学与实践, 1995, (3): 33 - 36.(Wang Jianjiang. Non-isotropic element method of RCCD thermal stress analysis[J]. Mechanics in Engineering, 1995, (3): 33 - 36.(in Chinese))
- [5] 朱伯芳, 许 平. 混凝土高坝全过程仿真分析[J]. 水利水电技术, 2002, (12): 11 - 14.(Zhu Bofang, Xu Ping. Simulation analysis of the whole process for concrete high dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2002, (12): 11 - 14.(in Chinese))
- [6] 侯朝胜, 赵代深, 李梅杉. 混凝土拱坝横缝开度三维仿真计算研究[J]. 水利水电技术, 2000, (8): 41 - 43.(Hou Chaosheng, Zhao Daishen, Li Meishan. Three-dimensional emulation computation study of transverse joint aperture of concrete arch dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2000, (8): 41 - 43.(in Chinese))
- [7] 韩晓凤, 张仲卿. 高碾压混凝土拱坝横缝开度对拱坝安全的影响[J]. 红水河, 2002, (1): 16 - 18.(Han Xiaofeng, Zhang Zhongqing. Effect of transverse joints aperture on high RCC arch dam safety[J]. Hongshui River, 2002, (1): 16 - 18.(in Chinese))
- [8] 李建新, 王光纶, 金 峰. 横缝结合质量对拱坝结构受力的影响[J]. 水力发电, 2001, (10): 45 - 50.(Li Jianxin, Wang Guanglun, Jin Feng. Study on the effect of the binding quality of transverse joints on the structure of arch dam[J]. Water Power, 2001, (10): 45 - 50.(in Chinese))
- [9] 朱伯芳. 有限厚度带键槽接缝单元及接缝对混凝土坝应力的影响[J]. 水利学报, 2001, (2): 1 - 7.(Zhu Bofang. Joint element with keys and the influence of, joint on stresses in concrete dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, (2): 1 - 7.(in Chinese))
- [10] 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.(Xu Yanjie, Zhang Chuhan, Wang Guanglun, et al. Nonlinear seismic response analysis of arch dam with contraction joints[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, (4): 68 - 74.(in Chinese))
- [11] Peric D, Owen D R J. Computational model for 3D contact problems with friction based on the penalty method[J]. International Journal for Numerical Method in Engineering, 1992, 35: 1 289 - 1 309.
- [12] Cescotto S, Charilier R. Frictional contact finite elements based on mixed variational principles[J]. International Journal for Numerical Method in Engineering, 1992, 35: 1 681 - 1 701.
- [13] Simo J C, Laursen T A. An augmented lagrangian treatment of contact problems involving friction[J]. Computers and Structures, 1992, 42(1): 97 - 116.
- [14] Laursen T A, Simo J C. Algorithmic symmetrization of coulomb frictional problems using augmented Lagrangians[J]. Computers Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1993, 108(1/2): 133 - 146.
- [15] Zhou W, Chang X L, Lu S Y. Safety stability research of Danjiangkou gravity dam heightened on post-period[J]. Process in Safety Science and Technology(Part A), 2002, 3: 299 - 304
- [16] Chang X L, Zhou W. A contact model on basis of the augmented lagrange method and engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(9): 1 568 - 1 572.
- [17] 周 伟, 常晓林, 黎满林, 等. 丹江口重力坝二期加高非线性有限元接触分析[J]. 水电能源科学, 2003, (3): 55 - 58.(Zhou Wei, Chang Xiaolin, Li Manlin, et al. A nonlinear finite element contact research on Danjiangkou gravity dam heightened during post-period[J]. Water Resources and Power, 2003, (3): 55 - 58.(in Chinese))
- [18] 周 伟. 高混凝土面板堆石坝流变本构模型理论及其应用[博士学位论文][D]. 武汉: 武汉大学, 2004.(Zhou Wei. Theory and application of creep constitutive model on high concrete face rockfill dam[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.(in Chinese))