

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.04.005

基于 MSC.Marc 的高拱坝蓄水期变形分析

李子阳^{1 2}, 谷艳昌^{1 2}, 张磊^{1 2}

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要 :针对高拱坝复杂的结构布置及施工工艺, 基于大型有限元分析软件 MSC.Marc, 在建立的包含坝体分缝的三维有限元非线性分析模型中, 对坝体横缝采用 Contact 单元、诱导缝采用 Gap 单元分别进行模拟, 并通过杀死、激活技术及子程序的应用, 实现坝体浇筑、接缝灌浆及蓄水过程较为真实的模拟计算。工程实例分析获得了坝体施工蓄水期变形规律及不同分缝的开合度变化情况, 指出考虑接触和施工蓄水模拟后, 高水位时坝体最大径、切向位移均出现在距坝顶约 1/3 拱高处。

关键词 :MSC.Marc 软件; 高拱坝; Contact 单元; Gap 单元; 蓄水模拟; 大坝变形分析

中图分类号 :TV642.4 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2008)04-0015-05

MSC.Marc-based deformation analysis of high arch dam in water storage period/LI Zi-yang^{1 2}, GU Yan-chang^{1 2}, ZHANG lei^{1 2} (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. National Engineering Research Center of Water Resource Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : A 3-D nonlinear finite element model of a high arch dam with complex construction technology and structure is established based on MSC.Marc software analysis. In this model, the dam transverse joints and induced joints are simulated as Contact elements and Gap elements, respectively. Then, by utilization of killing, activating element technology and application of a Marc subroutine, the accurate simulation of deformation during the dam pouring, joint grouting and water storage periods is realized. Through a case study, the deformation law in the water storage period and the opening-closing degree change of different joints are obtained. It is pointed out that the largest radial and tangential displacement occur at a location 1/3 of the dam height from the dam crest.

Key words : MSC.Marc software; high arch dam; Contact element; Gap element; simulation in water storage period; deformation analysis of dam

随着拱坝修建高度的不断增加及其地质条件日益复杂, 许多技术指标已超过了现有的规范标准, 而分期施工分期蓄水技术应用的日益普及, 使拱坝的变形监控安全分析必须贯穿整个施工蓄水期, 以有助于掌握大坝整个蓄水期的运行状态。但高拱坝坝体结构设计一般都比较复杂, 不仅各坝段间布置有横缝, 而且在坝踵处还常设有为改善坝踵应力分布的结构诱导缝。各类接缝的非线性特征不同, 所采用的方法也不尽相同, 如文献[1]采用非线性接缝单元模拟横缝的工作状态, 文献[2]采用无厚度节理单元模拟结构诱导缝等, 这些解法各有特色, 也得到了一些有益的结论。但横缝和结构诱导缝共同作用, 使接触非线性较为复杂, 而且施工蓄水期外力荷载

变化频繁。如何实现对坝体不同性态接缝以及施工蓄水全过程较为真实的模拟, 是实现拱坝结构的非整体性分析和把握蓄水期大坝变形的关键, 也是后期研究蓄水期大坝变形监控指标的前提和基础。

本文基于大型有限元分析软件 MSC.Marc(以下简称 Marc)在包含坝体分缝的三维非线性整体精细模型中, 分别采用 Contact 单元与 Gap 单元技术对横缝和诱导缝进行模拟, 并通过杀死、激活技术以及各种子程序的综合应用, 实现了坝体浇筑、接缝灌浆及蓄水全过程的模拟计算。以在建某 300 m 级高拱坝为例, 通过接触非线性和施工蓄水过程的模拟计算, 获得了蓄水期坝体变形规律及不同分缝的开合度变化情况, 为后期大坝变形监控指标拟定奠定了基础。

基金项目 :国家科技支撑计划(2006BAC14B03); 国家自然科学基金(50579010); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2002CB412707); 国家自然科学基金重点基金(50539010)

作者简介 :李子阳(1983—)男, 安徽亳州人, 博士研究生, 从事大坝安全监测研究。E-mail: ziyang8210@163.com

1 接触模拟

有限元模拟间隙的接触特性一般有 2 种方式：一种通过接触面模拟(面面接触)；另一种通过接触面上的对应节点对模拟(点点接触)。对照横缝和诱导缝的不同性态，横缝张开会产生两坝段之间的相对滑移，接触属于面面接触，而诱导缝受拉为一边张开型，上下两部分的接触属于点点接触。由此，在 Marc 中分别采用不同的模拟方式，对横缝采用 Contact 单元模拟(图 1)，对诱导缝采用 Gap 单元模拟(图 2)。虽然实际应用中，横缝也可借助 Gap 单元模拟，但其不能很好地反映接缝滑移的几何非线性特征，而且如果坝段分缝较多，模拟需要太多的 Gap 单元，将导致计算量巨大，甚至无法收敛。

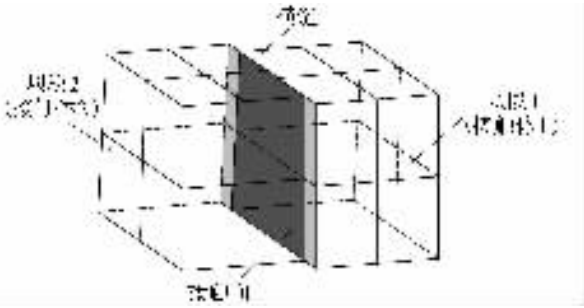


图 1 Contact 单元模拟横缝

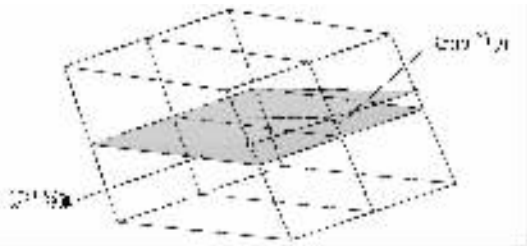


图 2 Gap 单元模拟诱导缝

1.1 横缝模拟

双节点单元可以模拟不同走向、深度及宽度的裂缝且应用较为方便，因此可先借助双节点单元将横缝两边的单元进行分离。考虑坝体接缝灌浆后由于水泥浆体的收缩而产生的接缝间隙很小，而且拱坝承受荷载中水压荷载所占比例较大，在其作用下横缝基本呈闭合状态，从而形成整体由拱梁共同分担荷载的状况^[3]。故横缝间隙的存在对坝体应力分布规律影响不大，在计算横缝对坝体性态的影响时，忽略初始间隙，并将初始间隙设为 0。

横缝两端坝体在外力作用下会呈现不同的开裂和闭合状态。双节点单元很好地解决了对横缝的几何形态模拟，而且对于横缝接触面受到向两侧拉伸作用时的张开状态，可以通过节点对脱开模拟，其脱开距离即表示横缝开度。但缝两端单元在受压状态下的嵌入与接触摩擦问题还需要采取相应的接触算

法加以解决。

原则上，产生接触的 2 个物体必须满足无穿透的约束条件，而在数值计算过程中，要精确描述节点恰好在一个接触断面上是非常困难的。因此，实际应用中常采用接触容限法来解决这个问题。接触容限就是认为接触节点与接触段发生接触而事先给定的最大距离，如果某一节点的空间位置位于接触容限之内，就可认为与接触段发生接触。对于实体单元，接触容限一般可取最小单元长度的 1/20。此外，用接触容限还可以探测出穿透的发生^[4]。

接触摩擦的数值模拟通常采用库仑摩擦模型：

$$\tau \leq -\mu s_n \times t \tag{1}$$

式中： s_n 为接触节点法向应力； τ 为切向(摩擦)应力； μ 为摩擦系数； t 为相对位移方向上的切向单位矢量。

一般情况下，当法向力给定后，接触体不可能一直处于黏着或滑移状态，而是在这 2 种情况之间呈阶梯函数状变化。如果在数值计算中引入这种不连续性，往往会导致数值困难^[5]。Marc 中提供了 2 种修正的库仑摩擦准则供用户选择，一种是基于接触体相对速度的反正切(Arctangent)库仑摩擦准则，另一种是基于接触体相对位移的双线型(Bilinear)库仑摩擦准则。而大坝受力作用下坝段间相对速度的概念不明显，经试算对比，本文采用修正的双线型库仑摩擦准则。双线性模型是基于接触体之间相对位移的分段线性表示，类似于一个弹性-理想塑性模型。这种模式的基本控制参数是滑动门槛，即相对位移量小于该值时为黏着状态，大于或等于该值后即为滑移状态。滑动门槛的大小决定了数学模型与实际呈阶梯变化的摩擦力的接近程度。若值太大，会导致有效摩擦力数值的降低，但迭代相对容易收敛，而值太小，虽能较好地模拟静摩擦与滑动摩擦之间的突变，但求解收敛性较差。滑动门槛的取值与特征单元长度相比应当足够小，一般可取特征单元长度的 1% 左右。

1.2 诱导缝模拟

Gap 单元的载荷-位移关系可由接触面的法向分量和切向分量来描述^[6]。在法线方向，若两接触面保持接触，则法向力 F_n 为负值，Gap 单元犹如一个线性弹簧；若接触被破坏而使两节点分离，则 F_n 为 0。切线方向，当 $F_n < 0$ 且切向力 $F_s \leq \mu |F_n|$ (μ 为接触面间摩擦系数)时，接触面保持接触且无滑动，此时单元切线方向也犹如一个线性弹簧；当 $F_n < 0$ 且 $F_s > \mu |F_n|$ 时，则在接触面间将产生滑动。

在 Marc 中通过 1 对节点对来定义 1 个 Gap 单

元,有3种不同的设置,包括定向 Gap 单元、定间距 Gap 单元及 Gapu 子程序。其中定向 Gap 单元反应物理量直观,使用较为方便,对此作一简单介绍。

三维定向 Gap 单元(图3)在 Marc 中作为一个四节点单元存在。1号和4号节点通过位移适应其余结构。2号节点为 Gap 节点,传递压力 F_n ,有1个自由度,即节点方向 n (亦即 Gap 闭合方向):

$$n = \frac{x_4 - x_1}{|x_4 - x_1|} \quad (2)$$

式中 x_1, x_4 分别为1号和4号节点坐标向量。

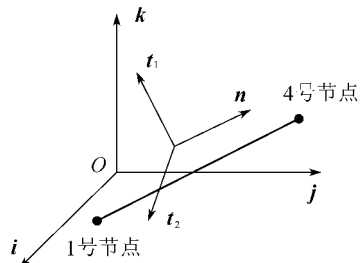


图3 三维定向 Gap 单元

3号节点是摩擦节点,自由度个数与摩擦力相同,有2个自由度,第1摩擦力方向 t_1 和第2摩擦力方向 t_2 分别定义为

$$t_1 = \begin{cases} i \times n & i \neq n \\ -j & i = n \end{cases} \quad (3)$$

$$t_2 = n \times t_1 \quad (4)$$

式中 i 为三维 x 方向向量 j 为三维 y 方向向量。

Gap 单元当 $(u_1 - u_4) \cdot n = u_c$ 时闭合,其中 u_1, u_4 分别为1号和4号节点位移向量, u_c 为闭合间距,用来定义发生接触分离时1号和4号节点在 n 方向上相对位移的最大值。 u_c 的选取至关重要,因接触应力对它最为敏感,其大小直接影响到缝周围应力状态和计算时的迭代收敛情况。经笔者多次试算,认为诱导缝 Gap 单元闭合容差定为 0.001 m 左右较为合适。Gap 单元中其他参数(如摩擦系数、轴向刚度、切向刚度等)的意义及设定可参考文献[7]。

2 施工蓄水过程模拟

拱坝施工多采用分期施工分期蓄水技术方案,蓄水过程伴随着坝体浇筑与灌浆以及温控过程,因此施工蓄水过程模拟非常复杂。基于 Marc,拟通过如下方法实现对上述过程的模拟:

a. 坝体浇筑。借助 Deactivation 功能实现,即先把坝体单元整体设为 Inactive Element,再依据施工蓄水规划设定增量步,坝体单元按浇筑顺序分别由“死”的状态依次被激活,并施加坝体自重;诱导缝 Gap 单元在坝体浇筑到相应高度后激活,横缝双节

点单元和接触体依据浇筑高程依次激活。

b. 灌浆。通过 Ufric 子程序模拟。横缝灌浆前接触体摩擦系数设为 0,灌浆后给定 1 个合适的摩擦系数(该摩擦系数综合反映接缝的灌浆质量,可先凭经验给一初始值,再将计算结果与实测位移值进行对比调整)以限制两坝段间的错动,并设置接触分离应力为 1 MPa(即灌浆后横缝处拉应力大于或等于 1 MPa 时两接触体分离)。灌浆后摩擦系数的选取不能太小,否则坝段间错动较大,坝体也会产生较大位移,而太大的摩擦系数将会耗费更多机时,使计算难以收敛。经笔者试算,摩擦系数大于 10 后对位移的影响已很小,故在无实测资料进行对比的情况下,可取灌浆后摩擦系数为 10 以得到较好的位移计算结果。

c. 温控。借助 Forcdt 子程序添加各增量步时坝体关键部位的实测温度值,按各增量步间间隔时间进行热传导后形成瞬态温度场再减去封拱温度作为该步计算时的变温场。

d. 蓄水。借助 Forcem 子程序添加各增量步所需水荷载,以实现蓄水过程的模拟。

通过以上步骤,可以实现拱坝施工蓄水期全过程仿真模拟,并得出不同阶段坝体的位移分布。

3 某高拱坝蓄水期变形规律分析

3.1 有限元计算模型

在建某混凝土双曲拱坝,最大坝高接近 300 m,具有坝高、地质条件复杂、高边坡和大跨度等特点,而且拱坝坝段较多(43个),坝体不仅布置有大量横缝,坝踵还布置有结构诱导缝,坝体结构较为复杂。

为对大坝施工蓄水期变形形态进行分析,建立大坝整体三维有限元模型,见图4。模型范围:上游取 1.5 倍坝高,下游取 2 倍坝高,坝基深 1 倍坝高。采用六面体八节点等参单元,部分区域考虑地形地质影响,采用五面体六节点等参单元。在剖分网格和布置节点时,考虑 F_5, F_7, F_{10} 和 F_{11} 等主要断层以及蚀变带和横缝的位置等,各断层采用薄层单元,为细致描述横缝性态以及复杂的地质状况,共剖分单元 123 678 个,节点 137 876 个,其中坝体单元 10 818 个,

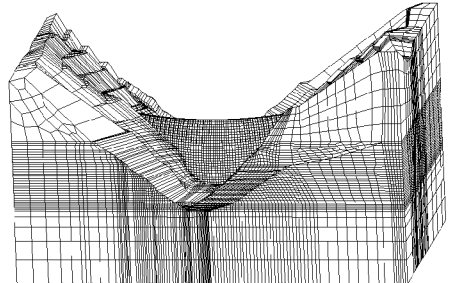


图4 大坝三维有限元模型

节点 18 747 个。所采用的坝体及岩石的主要物理力学参数列于表 1。

表 1 坝体及岩石主要物理力学参数

部 位	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	变形模量/ GPa	泊松比	抗剪断强度参数	
				f'	c'/MPa
坝 体	2400	21.00	0.167	1.80	2.60
I 类岩体	2700	25.00	0.220	1.50	2.20
II 类岩体	2700	22.00	0.260	1.50	2.00
III 类岩体	2600	11.00	0.290	1.05	0.85
IV 类岩体	2550	5.00	0.320	1.00	0.60
F ₅ 断层	1900	3.30	0.350	0.85	0.38
F ₇ 断层	1900	0.20	0.350	0.28	0.03
F ₁₀ 断层	1900	3.00	0.350	0.90	0.38
F ₁₁ 断层	1900	2.00	0.350	0.85	0.35
蚀变带	1900	3.50	0.350	0.70	0.15

基于上述分析,有限元模型中采用双节点单元并设置接触摩擦对坝体布置的 42 条横缝全部进行了模拟,共增加双节点单元 5 678 个,设置接触体 43 个,两接触体之间设置接触形式为 Touching,初始间隙为 0;采用三维定向 Gap 单元模拟诱导缝,按照诱导缝位置共设 Gap 单元 28 个,Gap 单元闭合容差取为 0.001 m。

3.2 计算工况及蓄水过程模拟

根据工程施工规划进度制定了坝体浇筑、接缝灌浆及蓄水模拟计算工况,见表 2,其中坝体浇筑、灌浆过程分 17 个增量步模拟(1~17 步),蓄水过程分 14 个增量步模拟(6~19 步),共计 19 个增量步。

表 2 坝体浇筑、接缝灌浆及蓄水分布模拟结果

序号	浇筑高程/m	封拱高程/m	蓄水高程/m
1	1000	975	
2	1030	1000	
3	1070	1050	
4	1100	1080	
5	1130	1100	
6	1130	1100	1030
12	1180	1160	1160
15	1238	1220	1170
16	1245	1220	1190
17	1245	1245	1210
18	1245	1245	1230
19	1245	1245	1240

注:序号 1~5 未蓄水。

为了计及坝基初始应力场影响,模拟表 1 中坝体施工蓄水过程之前,在模型中通过初始条件施加初始应力场。然后,依据第 2 节分析,在各增量步中设置坝体各单元的“死”、“活”状态,横缝接触摩擦及接触分离应力;在此过程中,依次施加相应坝体自重、库水压力等荷载。因该坝在建,缺少实际的坝体及基础的施工期温度检测资料,故分析中暂时没有考虑温度对位移的影响,主要考虑水压和重力分量。以上为工况 I。

另外,本文在初步分析时还考虑了横缝与诱导

缝均采用 Gap 单元模拟的工况 II(增加 Gap 单元 5 649 个,其余同工况 I)以及横缝与诱导缝均采用 Contact 单元模拟的工况 III(增加双节点单元 28 个,接触体 2 个,其余同工况 I),计算结果表明:工况 II 由于 Gap 单元过多,无论使用位移、应力还是能量收敛准则计算均无法收敛;工况 III 在诱导缝的连接边(内边)存在一点同属两接触体的情况,在 Marc 计算中会发出警告,影响了计算效果,使得诱导缝局部区域位移出现突变以及应力集中现象。所以,工况 I 是模拟复杂分缝布置下的高拱坝蓄水期变形的最佳选择,以下对工况 I 计算结果进行分析。

3.3 计算成果分析

由工况 I 可得出高拱坝蓄水期不同阶段的坝体位移结果,其中典型位置典型水位位移分布如图 5、图 6 所示(图中径向位移以向下游为“+”,切向位移以向右为“+”;1 160 m 和 1 240 m 水位分别对应表 2 中第 12 步与第 19 步,所取位移值为坝体中曲面相应位置计算值)。

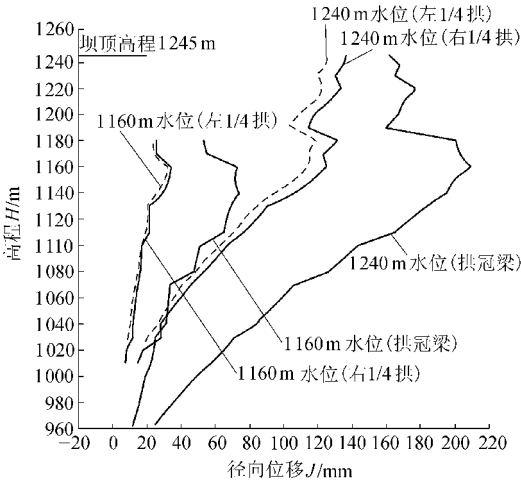


图 5 典型坝段典型水位径向位移沿高程分布

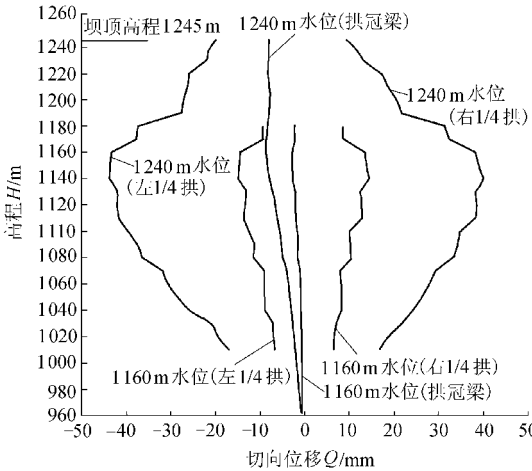


图 6 典型坝段典型水位切向位移沿高程分布

由计算结果可以看出:

a. 坝体位移随水位的升高整体上呈增大趋势,

1160 m 高程以下坝体位移沿高程方向变化较为平缓,1160 m 高程以上坝体位移呈折线型变化。这主要是由于在模拟坝体浇筑过程中,激活较高高程坝体单元时,已激活坝体单元在蓄水压作用下产生部分位移所致。随着分层的加密,位移变化会趋于平缓,但这显然会增加计算量。

b. 各典型水位情况下,已浇筑坝体径向位移以拱冠梁处最大,左右 1/4 拱处位移基本一致。低水位(1160 m 水位)时,位移变化较为平缓,最大位移出现在相应水位高程处(1160 m 高程附近);当到达正常高水位 1240 m 时,坝体位移值随水位升高明显增大,这是由于坝体分层浇筑模拟的原因,拱冠梁最大位移出现在距坝顶约 1/3 拱高的 1160 m 高程附近(整体线性分析时,最大位移往往出现在坝顶),向上位移有所减小。正常高水位时,拱冠梁最大位移为 209.3 mm,拱冠梁顶部最大位移为 161.9 mm;左右 1/4 拱处最大位移分别为 126.1 mm 和 136.8 mm。

c. 各典型水位情况下,已浇筑坝体最大切向位移出现在左右 1/4 拱圈处,左 1/4 拱坝段向左位移,右 1/4 拱坝段向右位移,拱冠梁附近位移较小。低水位时,位移变化较为平缓,且量值较小;正常高水位时位移值明显增大,且以左右 1/4 拱 1140 ~ 1160 m 高程附近(距坝顶约 1/3 拱高)位移最大。正常高水位时,左 1/4 拱向左岸最大位移为 43.7 mm,右 1/4 拱向右岸最大位移为 40.1 mm,而拱冠梁有较小向左岸位移(最大 8.15 mm),主要是由于随水位升高,坝体结构不十分对称(左岸坝体较大)所致。

d. 图 7 给出了位于 22 号、23 号坝段各典型高程横缝及拱冠梁坝踵处诱导缝开合度历时曲线,可以看出:浇筑开始时横缝初始缝宽为 0,缝是闭合的,坝体自重使横缝张开,在横缝灌浆前开合度达到最大值,横缝灌浆后,水库蓄水使拱圈向产生压应力,因此横缝灌浆后基本处于闭合状态。诱导缝在水位到达 1190 m 时(16 增量步)受拉张开并随蓄水高程增加而开度加大,正常蓄水位时开度最大,为 1.5 mm。施工蓄水期大部分区域分缝开度值均在 5 mm 以内,满足工程安全要求。

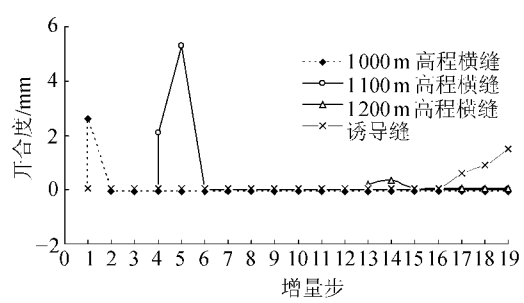


图 7 典型部位横缝及诱导缝开合度历时曲线

e. 由于本文仅考虑水压和重力作用下对坝体位移规律进行模拟分析,而且该坝在建,缺少与实测资料的对比分析,故有限元计算结果仅仅是为大坝的安全分析提供初步参考,进一步分析如拟定施工蓄水期位移安全监控指标等还应结合后续原型监测资料,以稳定、强度和抗裂作为控制条件综合分析。

4 结 语

a. 针对目前许多在建高拱坝结构布置及施工工艺复杂这一情况,本文利用大型有限元分析软件 Marc,采用 Contact 单元和 Gap 单元对坝体不同分缝分别进行模拟,建立了坝体结构变形性态的三维非线性有限元分析模型,并通过杀死、激活技术以及子程序的应用实现了坝体施工蓄水的全过程仿真模拟。实例分析表明采用不同的接触模拟能充分发挥 2 种单元的特点,较好体现了 2 种接缝的不同非线性特征,在施工仿真模拟中取得了较好的位移计算成果,为后期大坝变形监控指标拟定奠定了基础。

b. 分析可知,拱坝施工蓄水过程中,坝体径、切向位移均随水位的升高整体上呈增大趋势。由于坝体分层浇筑模拟的原因,在高水位时,坝体最大径向位移出现在拱冠梁距坝顶约 1/3 拱高处,最大切向位移出现在左右 1/4 拱圈距坝顶约 1/3 拱高处。由于水库蓄水使拱圈向产生压应力,横缝灌浆后基本处于闭合状态,诱导缝在高水位时受拉张开,并随蓄水高程增加而开度加大,施工蓄水期大部分区域分缝开度值均在 5 mm 以内,满足工程安全要求。

c. 本文所建立的接触模型及工程实例分析,对同类高拱坝施工蓄水期变形性态分析研究具有参考价值。

参考文献:

[1] 盛志刚,张楚汉,王光纶,等.横缝引起的非整体性对小湾拱坝温度应力的影响研究[J].水力发电学报,2003(4):23-30.

[2] 李鹏,邹丽春,傅少君,等.小湾拱坝诱导缝模拟计算[J].武汉大学学报:工学版,2005,38(3):27-30,44.

[3] 孙林松,王德信,谢能刚.横缝间隙对拱坝应力状态的影响分析[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(1):76-80.

[4] 陈龙,顾冲时,侯祥东.双节点单元和接触算法分析带缝大坝性态[J].水电能源科学,2004,22(1):56-59.

[5] 陈火红. Marc 有限元实例分析教程[M].北京:机械工业出版社,2003.

[6] 陈达亮,郝志勇. GAP 单元在气门弹簧动态特性有限元分析中的应用[J].拖拉机与农用运输车,2004(2):24-26.

[7] 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):45-48.

(收稿日期 2007-09-29 编辑:方宇彤)