

灌浆率对碾压混凝土拱坝初次蓄水时 工作性态影响优化分析

肖荣平¹, 葛卉萍¹, 孙 新¹, 田鹤晖²

(1. 江苏淮阴水利建设有限公司, 江苏 淮安 223000; 2. 江苏淮源工程建设监理有限公司, 江苏 淮安 223000)

摘要:以某碾压混凝土拱坝为例,采用 Fortran 编制的有限元计算程序,对该碾压混凝土拱坝在施工以及初次蓄水过程中的温度场和应力场进行了仿真计算。研究了诱导缝及横缝按未灌浆、50% 灌浆率和 100% 灌浆率处理后初次蓄水对拱坝工作性态影响,进行了对比分析,并拟定了最优优化设计方案,评价其防裂效果。最后给出了相关结论和建议,可为类似工程提供一定的参考价值。

关键词:灌浆率; 碾压混凝土拱坝; 优化设计; 温度场; 应力场; 防裂

中图分类号:TV315 文献标识码:B 文章编号:1007-7839(2020)02-0067-06

Optimization analysis on the effect of grouting rate on the working behavior of RCC arch dam during initial storage

XIAO Rongping¹, GE Huiben¹, SUN Xin¹, TIAN Hehui²

(1. Jiangsu Huaiyin Hydraulic Engineering Construction Co., Ltd., Huai'an 223000, Jiangsu;

2. Jiangsu Huaiyuan Construction Supervision Co., Ltd., Huai'an 223000, Jiangsu)

Abstract: Taking a RCC arch dam as an example, the temperature field and stress field of the RCC arch dam during construction and initial water storage were simulated and calculated by using the finite element calculation program compiled by FORTRAN. The effect of initial water storage on the working behavior of arch dam was studied after the induced joint and transverse joint were treated with no grouting, 50% grouting rate and 100% grouting rate. A comparative analysis was made and an optimal design scheme was drawn up to evaluate its crack prevention effect. Finally, some conclusions and suggestions were given, which could provide some reference value for similar projects.

Key words: grouting rate; roller compacted concrete (RCC) arch dam; optimization design; temperature field; stress field; crack prevention

优化设计是 20 世纪 60 年代初发展起来的一门新兴学科,实践证明,工程结构优化设计能缩短设计周期,提高设计质量和水平,较之原设计方案,优化设计方案一般可以降低工程造价 5% ~ 30%^[1]。

由于碾压混凝土重力坝的体积较大、坝体上升速度快且永久性横缝较少,使得施工过程中散热不充分,同样会在坝体内产生不可控的温度裂缝。为降低裂缝的危害,目前普遍采用的方法是在坝体中

设置诱导缝。国外关于诱导缝的研究相对较少,主要为在工程中应用的介绍^[2],而关于诱导缝理论分析的报道还未见到。国内对于碾压混凝土诱导缝的研究相对开展的较多,这其中包括对诱导缝模型试验方面的研究^[3-4],诱导缝断裂模型理论方面的研究^[5-6],及诱导缝数值计算方面的研究^[7-8]等。

本文以某碾压混凝土拱坝为例,采用 Fortran 编制的有限元计算程序,对该碾压混凝土拱坝在施工

收稿日期:2019-07-31

作者简介:肖荣平(1962—),男,工程师,主要从事水利水电工程施工管理工作。

以及初次蓄水过程中的温度场和应力场进行了仿真计算。研究了诱导缝及横缝按未灌浆、50% 灌浆率和 100% 灌浆率处理后初次蓄水对拱坝工作性态影响,进行了对比分析,并拟定了最优化设计方案,评价其防裂效果。最后给出了相关结论和建议,可为类似工程提供一定的参考价值。

1 计算基本原理与方法

1.1 非稳定温度场基本理论

由热传导理论,考虑三维非稳定温度场求解问题在计算域 R 内任何一点处须满足热传导连续方程,可表示为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (1)$$

式中: T 为混凝土温度, $^{\circ}\text{C}$; a 为导温系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; θ 为绝热温升, $^{\circ}\text{C}$; τ 为龄期, d ; t 为时间, d 。

1.2 应力场求解的基本理论

温度和自生体积变形产生过程中,混凝土存在应力松弛和应变增大等现象,混凝土在复杂应力状态下的应变增量为:

$$\{\Delta \varepsilon_n\} = \{\Delta \varepsilon_n^e\} + \{\Delta \varepsilon_n^c\} + \{\Delta \varepsilon_n^T\} + \{\Delta \varepsilon_n^s\} + \{\varepsilon_n^0\} \quad (2)$$

式中: $\{\Delta \varepsilon_n^e\}$ 为弹性应变增量; $\{\Delta \varepsilon_n^c\}$ 为徐变应变增量; $\{\Delta \varepsilon_n^T\}$ 为温度应变增量; $\{\Delta \varepsilon_n^s\}$ 为干缩应变增量; $\{\varepsilon_n^0\}$ 为自生体积变形增量。

1.3 诱导缝灌浆原理

碾压混凝土坝诱导缝通常在张开以后要进行灌浆处理,以确保拱坝连成整体,保证整体受力。为了保证灌浆的实施和质量,通常在灌浆前一段时间对混凝土进行冷却,以使获得一定的缝的张开度,加上其它外荷载的作用,接触面单元的相对节点会发生一定的相对位移。灌浆后,缝内被浆液充满,缝面间隙被填充,并获得一定的粘结强度。

2 计算模型和参数

2.1 工程概况

某水电站水库正常蓄水位 1 420 m,总库容 2.71 亿 m^3 。拱坝坝顶高程 1 425.5 m,最大坝高 142.0 m,坝顶宽 10.00 m,坝底厚 36~40 m,宽高比 0.260。根据本工程大坝结构布置情况,坝上共设置 2 条横缝 + 7 条诱导缝。每条诱导缝以各层拱圈中心轴线距拱坝中心线的距离控制,均为径向布置。

2.2 计算模型

按照设计资料建立拱坝—地基有限元模型,划

分网格时,共形成节点 486 000 个,单元 448 000 个,其中坝体单元 273 000 个,基础单元 169 200 个,缝单元 13 600 个。

2.3 主要热力学参数

根据设计提供资料并参考《大体积混凝土温度应力与温度控制(第二版)》,结合类似工程,拟定基岩和混凝土的热力学计算参数如表 1 所示。

2.4 气温资料

为了便于计算,根据坝址区气温资料,将多年月平均气温拟合成一条余弦曲线:

$$T_a = 16.2 + 9.1 \times \cos \left[\frac{\pi}{6} (\tau - 6.0) \right] \quad (3)$$

式中: T_a 为气温, $^{\circ}\text{C}$; τ 为时间,月份。

2.5 库水温资料

根据朱伯芳院士提出的库水温经验公式,并结合该拱坝坝址区多年水温资料,库水温拟合参数见表 2。

3 计算结果与分析

3.1 未灌浆时次蓄水坝体应力分析

选取水位首次蓄到 1 420.00 m 高程典型蓄水时刻,限于篇幅,本文仅绘制上游面应力云图,具体见图 1;其中,左侧为拱向应力云图,右侧为第一主应力云图。

在蓄水初期,上游面拱向存在少部分受拉区域,当水位首次蓄到 1 420.00 m 高程以后,除建基面附近区域外,上游坝面拱向均受压,压应力基本在 0.3~5.5 MPa,应力大小由周边向中部逐渐增大,最大压应力出现在表孔下部 1 390.00 m 高程,约为 8.7 MPa;随后坝面拱向应力随外界温度作近似周期变化。第一主应力方面,在蓄水初期,坝面存在部分受拉区,第一主应力基本在 2.0 MPa 以内,随着水位上升,受拉区逐步减小,当水位首次蓄到 1 420.00 m 高程时,除周边和表孔下部、底孔上部部分区域外,坝面均受压。

3.2 100% 灌浆时初次蓄水坝体应力分析

如图 2 所示,整体来看,灌浆后坝体上游面应力分布及变化规律与未灌浆时基本一致,由于坝体整体性增加,上游面受力条件得到一定改善。当水位首次蓄到 1 420.00 m 高程以后,除坝踵局部区域外,上游坝面拱向均受压,压应力基本在 0.2~5.0 MPa,较未灌浆有所减小;随后坝面拱向应力随温度作近似周期变化。主应力的分布规律与未灌浆时一致。

表 1 混凝土和地基热力学参数

类别	导热系数 λ / ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{℃}^{-1}$)	比热 c / ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{℃}^{-1}$)	绝热终值 θ_0 / ℃	线胀系数 α / ($10^{-6} \cdot \text{℃}^{-1}$)	密度 ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹模终值 E_0 / GPa	泊松比 μ
基岩	6.90	0.79	—	7.48	2900	12.0	0.279
迎水面混凝土 C30	7.14	0.93	32	7.24	2740	38.0	0.167
坝体内部混凝土 C25	7.56	0.94	25	7.25	2520	36.0	0.167

表 2 库水温拟合参数表

τ_0	ω	T_s	T_b	α	β	A_0	d	f	γ	H	g	c
7	0.55	18.71	9.9	0.03	0.02	8.5	2.21	1.30	0.09	137.00	0.00	9.97

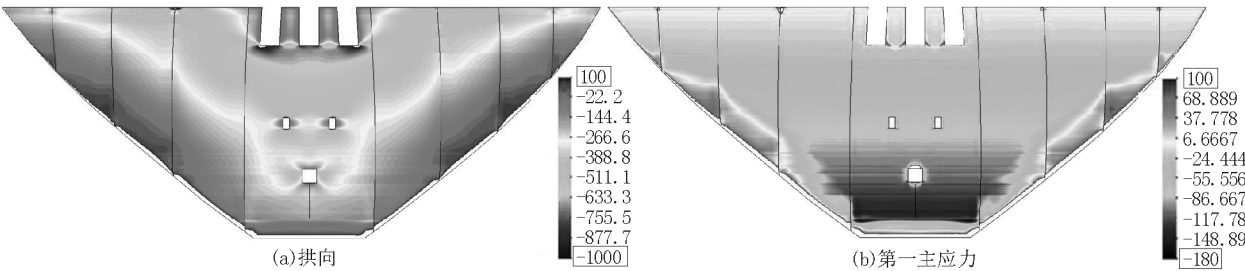


图 1 未灌浆时水位首次蓄到 1 420.00 m 时坝面应力云图(单位:0.01 MPa)

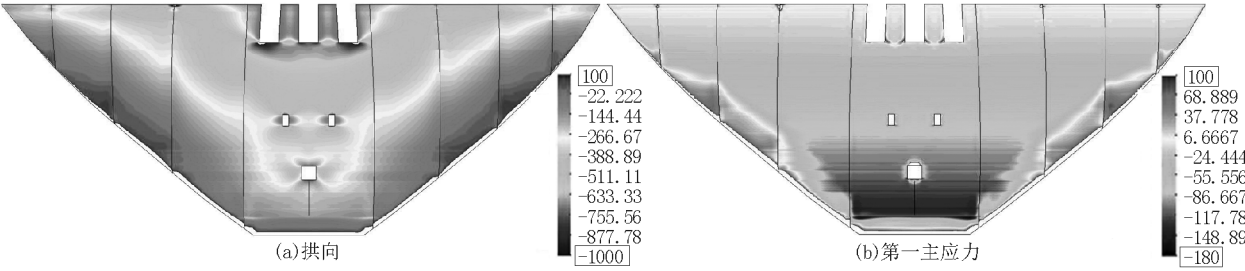


图 2 100% 灌浆时水位首次蓄到 1 420.00 m 时坝面应力云图(单位:0.01 MPa)

3.3 50% 灌浆时初次蓄水坝体应力分析

如图 3 所示,整体来看,考虑 50% 灌浆率时坝体上游面应力分布及变化规律与 100% 灌浆率时基本相同,由于坝体整体性增加,上游面受力条件得到一定改善,坝踵及坝趾受力改善。

3.4 未灌浆时初次蓄水横缝及诱导缝开合状态分析

坝体在 2016 年 1 月份底开始下闸蓄水后,考虑

自重 + 温度荷载 + 水荷载作用下,水位首次蓄至 1 330.00 m、1 420.00 m 高程和水库蓄至设计水位第一个冬季(2017 年 1 月)及第二夏季(2017 年 7 月)等不同蓄水时刻各诱导缝及横缝的开合状态分布云图见图 4~5,图中蓝色为张开,其他颜色为闭合。整体来看,坝体左右岸诱导缝及横缝的开合状态呈对称分布;并且随着水位上升,在水压作用下

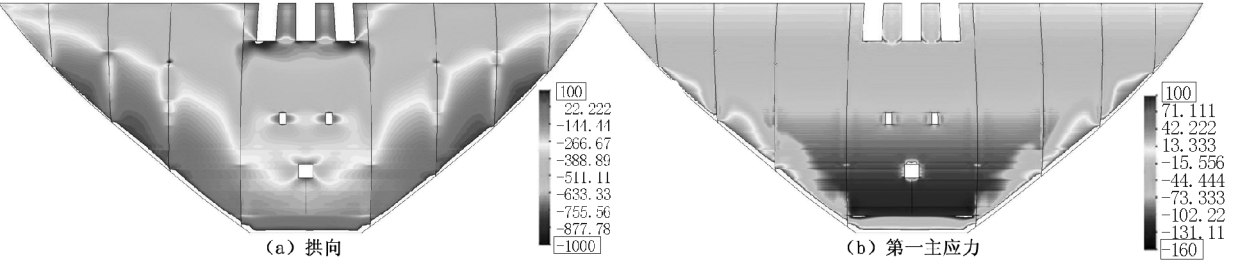


图 3 50% 灌浆时水位首次蓄到 1 420.00 m 时坝面应力云图(单位:0.01 MPa)

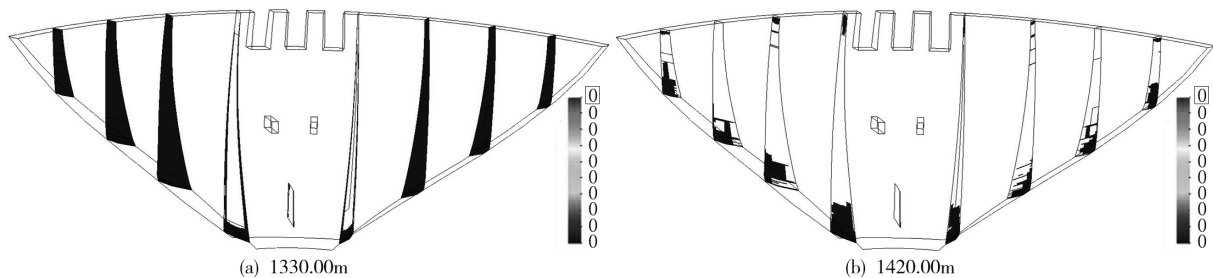


图4 水位首次蓄到 1 330.00 m、1 420.00 mm 时各缝面的开合状态分布图

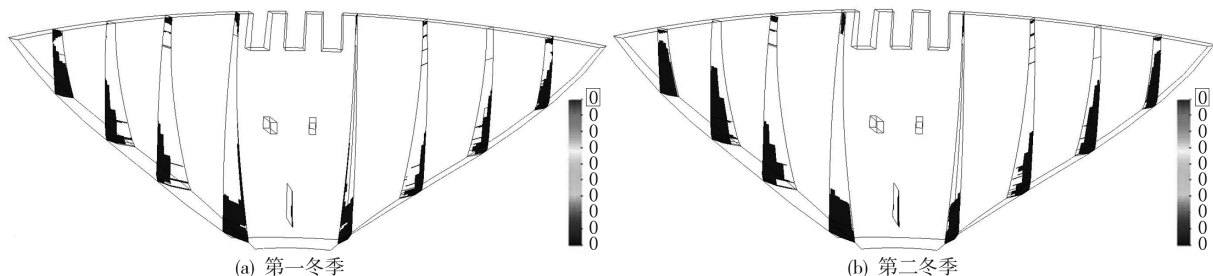


图5 未灌浆的水库蓄至设计水位第一个冬季(2017 年 1 月)、第二个夏季(2017 年 7 月)时各缝面的开合状态分布图

拱向开始受压,诱导缝及横缝张开部分逐渐闭合。

例如,当水位首次蓄水至 1 420.00 m 高程时, L2#和 R2 诱导缝 1 350.00 m 高程以下区域基本张开,其他区域均处于闭合状态,张开比例约为 20% 左右;靠近左右坝肩的 L3#和 R3#诱导缝 1 390.00 m 高程以下区域基本处于张开状态,其他区域处于闭合,张开比例约占 45% 左右。

随后,各诱导缝及横缝的开合状态随着温度作近似周期变化,左右岸横缝以外的 4 条诱导缝张开区域变化比较明显,而靠近表孔附近以及位于拱冠梁剖面的 3 条诱导缝张开区域变化很小。

3.5 100% 灌浆时初次蓄水横缝及诱导缝开合状态分析

不同蓄水时刻各诱导缝及横缝的开合状态分布云图见图 6~7,图中蓝色为张开,其他颜色为闭合。整体来看,坝体左右岸诱导缝及横缝的开合状态呈对称分布;在诱导缝及横缝进行封拱灌浆以后,随后蓄水过程中,2 条横缝以及靠近左岸的 L3#诱导缝基本闭合,剩余的 6 条诱导缝均有不同程度地张开。当水位首次蓄到 1 420.00 m 高程时,L2#和 R2#诱导缝 1 390.00 m 高程以下缝面中部区域

张开,张开比例约为 20%;靠近右坝肩的 R3#诱导缝有少量区域张开。

受封拱灌浆影响坝体整体性加强,在以后水位周期变化下各诱导缝及横缝的开合状态基本随温度作近似周期变化,但张开区域变化不大。

3.6 50% 灌浆时初次蓄水横缝及诱导缝开合状态分析

不同蓄水时刻各诱导缝及横缝的开合状态分布云图见图 8~9,图中蓝色为张开,其他颜色为闭合。整体来看,坝体左右岸诱导缝及横缝的开合状态呈对称分布;封拱灌浆以后,蓄水过程中各诱导缝及横缝均有不同程度的张开,张开区域的分布规律与未灌浆时基本相同,受灌浆影响张开区域面积明显小于未灌浆。

在以后水位周期变化下各诱导缝及横缝的开合状态基本随温度作近似周期变化,但张开区域变化不大。

3.7 不同灌浆率时拱坝工作性态对比分析

根据以上分析成果,现将不同灌浆条件下坝体工作性态进行对比分析。不同灌浆条件下拱冠梁截面上游面各特征点顺河向位移变化曲线见图 10。

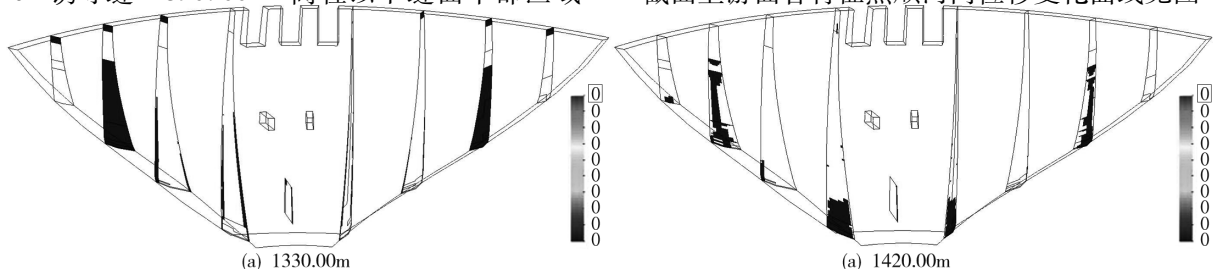


图6 100% 灌浆时水位首次蓄到 1 330.00m、1 420.00m 时各缝面的开合状态分布图

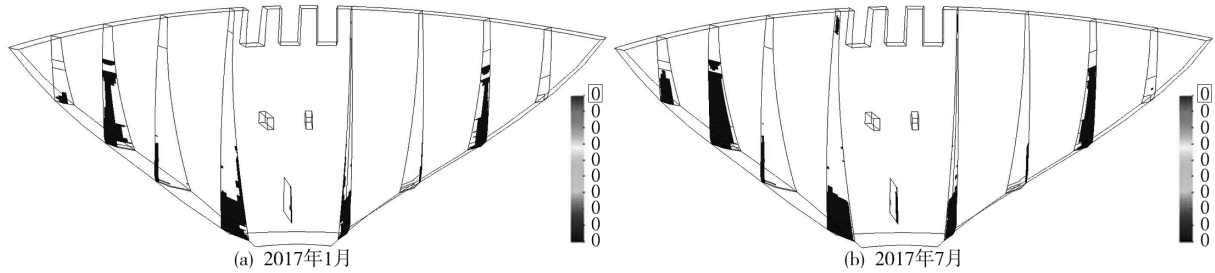


图 7 100% 灌浆时水库蓄至设计水位第一个冬季(2017 年 1 月)、第二个夏季(2017 年 7 月)时各缝面的开合状态分布图

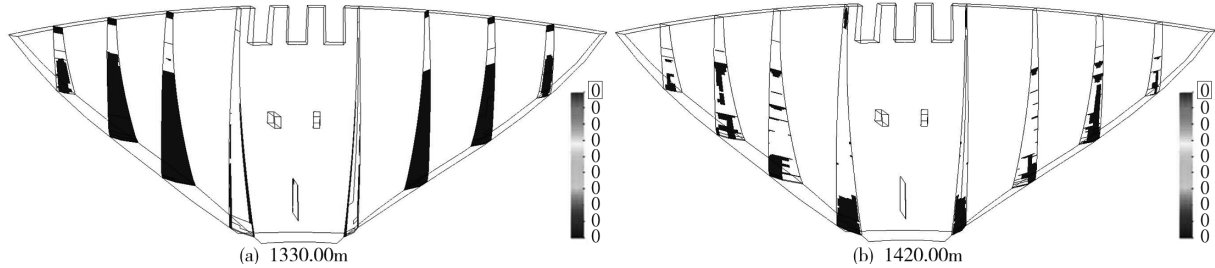


图 8 50% 灌浆时水位首次蓄到 1 330.00 m、1 420.00 m 时各缝面的开合状态分布图

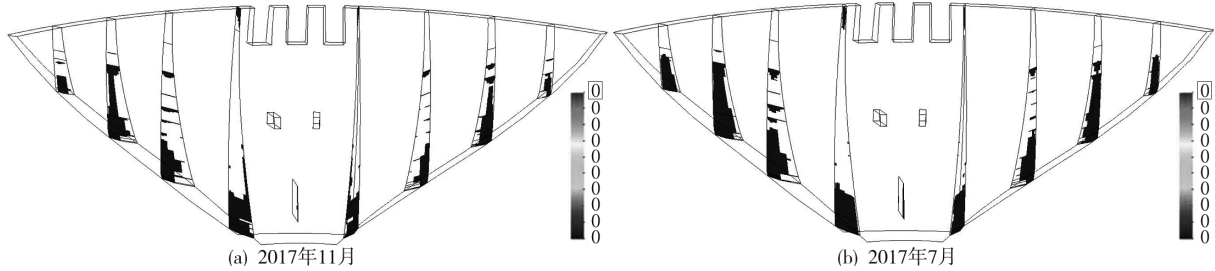


图 9 50% 灌浆时水库蓄至设计水位第一个冬季(2017 年 1 月)、第二个夏季(2017 年 7 月)时各缝面的开合状态分布图

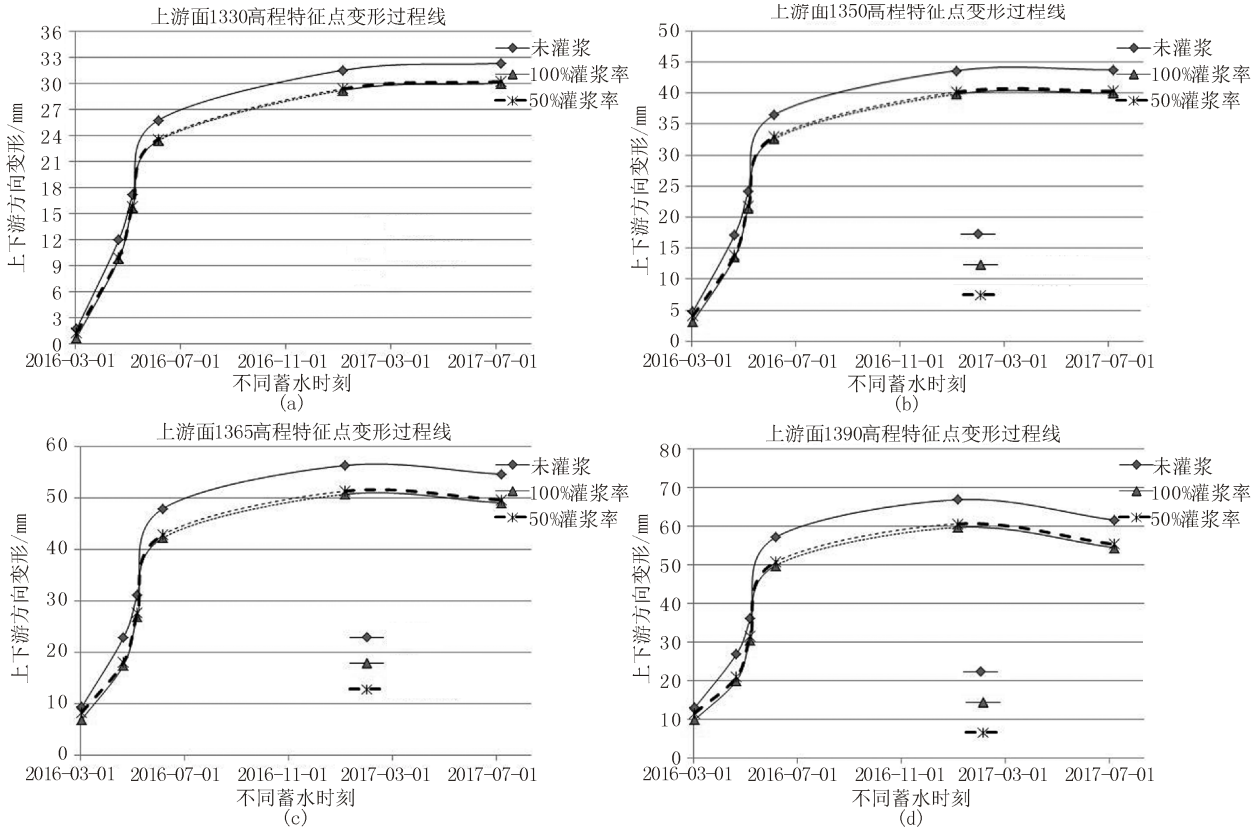


图 10 不同灌浆条件下拱冠梁截面上游面各特征点顺河向位移变化曲线

根据拱冠梁截面上游面各特征点顺河向位移变化曲线可知,诱导缝及横缝进行灌浆后,坝体整体性增强,在水荷载作用下,坝体顺河向变形较未灌浆时有所减小,坝体上部减小较多,下部减少较小;拱冠梁截面顺河向变形最大减少约为 7.0mm,出现在顶部;50% 灌浆率时坝体顺河向变形与 100% 灌浆率时基本一致。这主要是考虑 100% 灌浆率即灌浆后诱导缝强度达到 2.0MPa,蓄水后 2 条横缝以及靠近左岸的 L3#诱导缝基本闭合,剩余的 6 条诱导缝均有不同程度地张开进而导致坝体变形明显低于未灌浆工况。

4 结论与建议

(1)若对诱导缝及横缝不作灌浆处理,相比蓄水前,随着水位上升,在水压作用下拱向开始受压,诱导缝及横缝张开部分开始逐渐闭合。大坝计算变形规律良好,坝体大部分均受压,应力随温度作近似周期变化。坝踵及坝趾竖向均处于受压状态,竖向有较大安全储备。

(2)对诱导缝及横缝按 100% 灌浆率进行处理后,坝体整体性增强,诱导缝强度达到 2.0 MPa;蓄水后,坝体向下游变形相比未灌浆时要小;蓄水后拱冠梁向下游的变形较未灌浆时小。上游面拱向及梁向受力分布规律与未灌浆时基本一致。

(3)对诱导缝及横缝按 50% 灌浆率进行处理后,诱导缝强度可达 0.8 MPa;蓄水后受灌浆影响张开区域面积明显小于未灌浆;坝体工作性态与

100% 灌浆率时基本相同,拱冠梁截面最大顺河向位移略大于 100% 灌浆时。最终建议对诱导缝及横缝按 100% 灌浆率进行处理。

参考文献:

- [1] 潘元炜,刘耀儒,张浣,等.白鹤滩拱坝基础垫座方案优化研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增刊1):2641-2648.
- [2] 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):21-30.
- [3] 董福品,谢微,谭玲,等.混凝土高坝温度应力仿真分析的三分区算法[J].水利学报,2013,44(2):227-231.
- [4] 黄达海,殷福新,宋玉普.碾压混凝土坝温度场仿真分析的波函数法[J].大连理工大学学报,2000,40(2):214-217.
- [5] 毕重,齐丽杰,王学志.碾压混凝土坝诱导缝研究进展[J].辽宁工业大学学报(自然科学版),2008,28(5):310-312.
- [6] 张小刚,宋玉普.碾压混凝土坝诱导缝设置及拱坝诱导缝等效强度[J].水利水电工程学报,2003(4):67-73.
- [7] 周伟,常晓林,喻建清,等.小湾高拱坝上游坝踵人工短缝设置效果的深入分析[J].水力发电学报,2007,26(6):17-23,40.
- [8] 周伟,常晓林,刘杏红.考虑施工期温度作用的碾压混凝土重力坝分缝设置研究[J].水力发电学报,2005,24(6):25-29.