

网络出版时间:2013-05-02 10:54

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20130502.1054.012.html>

氧化镁微膨胀混凝土对温度应力的补偿效应

司 政, 李守义, 黄灵芝, 宋志强

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

【摘 要】 【目的】研究氧化镁微膨胀混凝土对温度应力的补偿特性,为简化大体积混凝土温控防裂措施提供理论依据。【方法】在充分分析和研究温度应力补偿计算方法和氧化镁微膨胀混凝土自生体积变形特性的基础上,针对某碾压混凝土重力坝,考虑混凝土热、力学参数随龄期变化及混凝土实际浇筑过程对温度应力的影响,利用大型商业有限元计算软件 ANSYS 平台开发出的温度场与温度应力场仿真计算程序,对掺与不掺氧化镁 2 个对比方案的大坝碾压混凝土温度应力进行计算分析。【结果】掺氧化镁方案中施工期末整个坝体碾压混凝土出现体积膨胀,最大膨胀变形量超过 70.0×10^{-6} ;氧化镁微膨胀混凝土对坝体基础约束区中心部位应力状态有明显的改善效果,最大拉应力减小约 1.0 MPa;但对脱离约束区的坝体混凝土应力的改善效果非常有限。【结论】在坝体约束区采用氧化镁微膨胀混凝土,可以达到简化温控防裂措施、降低建设成本、加快施工速度的目的。

【关键词】 氧化镁混凝土;微膨胀;自生体积变形;温度应力;补偿效应

【中图分类号】 TU528.042

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2013)05-0228-07

Compensative effect of MgO micro-expansive concrete on thermal stress

SI Zheng, LI Shou-yi, HUANG Ling-zhi, SONG Zhi-qiang

(Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: 【Objective】 This research studied the compensation characteristics of MgO micro-expansive concrete to simplify temperature control measures for crack prevention. 【Method】 Based on full study of thermal stress compensation method and autogenous volume deformation characteristics of MgO micro-expansive concrete, and considering the variation of concrete mechanical parameters with time and impacts on thermal stress of concrete pouring process, the temperature field and stress field of a roller compacted concrete gravity dam were analyzed with two contrast schemes by a temperature field and thermal stress field simulation program developed on ANSYS platform. 【Result】 The results showed that concrete of the whole RCC dam mixed with MgO had a micro-expansive volume at the end of construction with a maximum expansive deformation of higher than 70.0×10^{-6} . Stress state of central part of dam foundation restraint area was significantly improved using MgO micro-expansive concrete with a maximum tensile stress decreases of about 1.0 MPa, but the improvement of dam concrete out of restraint area was limited. 【Conclusion】 Using MgO micro-expansive concrete in dam restraint area can predigest temperature control measures, which would achieve the purpose of reducing constructing cost and expediting construction.

Key words: MgO concrete; micro-expansive; autogenous volume deformation; thermal stress; compensative effect

〔收稿日期〕 2012-08-21

〔基金项目〕 国家自然科学基金项目(51009116);中央财政支持地方高校发展专项(106-5X1205);陕西省重点学科建设专项(106-00X903)

〔作者简介〕 司 政(1981—),男,湖北浠水人,讲师,博士,主要从事水工结构应力及温度应力研究。E-mail: sz123hlz@163.com

水工大体积混凝土结构由于水泥水化热及周围环境温度变化的复杂性,往往产生较大的温度应力,从而导致结构出现裂缝,因此温度应力是影响大体积混凝土结构建设的一个瓶颈。自 20 世纪 70 年代在我国东北吉林省严寒地区修建白山电站重力拱坝时发现氧化镁有补偿收缩效果以来,许多科研人员对其进行了深入的研究。李承木等^[1-2]通过长期试验观测发现,氧化镁混凝土自生体积变形稳定,微膨胀对混凝土的长期力学性能影响不大;陈昌礼等^[3]和袁明道等^[4]结合实际工程,分别对氧化镁混凝土自生体积变形的长期原型观测资料进行了分析研究;朱伯芳^[5-6]、杨光华等^[7-8]、陈昌礼等^[9]和张国新等^[10-12]根据氧化镁微膨胀混凝土在不同养护温度下自生体积变形的试验资料,得出自生体积变形与养护温度以及龄期密切相关,并提出了一系列用于计算氧化镁微膨胀混凝土自生体积变形的模型;李鹏辉等^[13]和卢小琳等^[14]对氧化镁水化反应过程及水化产物结构特征进行了微观观察与分析,并以此对宏观试验结果加以解释;李维维等^[15]对不同水灰比的外掺氧化镁混凝土自生体积变形进行了研究,得出水灰比对外掺氧化镁混凝土自生体积变形的影响规律;胡平等^[16]探讨了外掺氧化镁混凝土对温度应力补偿的计算方法。由此可见,目前对氧化镁混凝土的研究主要集中在试验观测及自生体积变形计算模型上,而对氧化镁混凝土对坝体温度应力补偿的空间效应研究甚少。本研究在充分分析和研究温度应力补偿计算方法和氧化镁微膨胀混凝土自生体积变形特性的基础上,针对某碾压混凝土重力坝,采用三维有限元仿真计算程序对掺与不掺氧化镁 2 个方案的大坝混凝土温度应力进行计算,分析掺加氧化镁对坝体不同区域温度应力的补偿效应,旨在为氧化镁微膨胀混凝土坝的温控设计及温控方案选择提

供参考。

1 氧化镁微膨胀混凝土温度应力补偿计算方法

采用氧化镁微膨胀混凝土筑坝,在温度徐变应力场仿真计算时必须考虑其自生体积变形对应力的影响,其有限元方程可表示为:

$$[K]^e \{ \Delta \delta_n \}^e = \{ \Delta P_n^e \}^e + \{ \Delta P_n^T \}^e + \{ \Delta P_n^g \}^e + \{ \Delta F_n \}^e. \quad (1)$$

式中: $[K]^e$ 为单元刚度矩阵, $\{ \Delta \delta_n \}^e$ 为单元节点位移增量向量, $\{ \Delta P_n^e \}^e$ 为徐变引起的荷载增量向量, $\{ \Delta P_n^T \}^e$ 为单元温度变化所引起的荷载增量向量, $\{ \Delta P_n^g \}^e$ 为混凝土自生体积变形引起的荷载增量向量, $\{ \Delta F_n \}^e$ 为单元外荷载增量向量。

对于混凝土自生体积变形引起的荷载增量向量 $\{ \Delta P_n^g \}^e$, 有:

$$\{ \Delta P_n^g \}^e = \int_{\Omega} [B^e]^T [\bar{D}_n] \{ \Delta \epsilon_n^g \}^e d\Omega. \quad (2)$$

式中: $[B^e]$ 为应变矩阵, $[B^e]^T$ 为应变矩阵的转置矩阵, $[\bar{D}_n]$ 为弹性矩阵, $\{ \Delta \epsilon_n^g \}^e$ 为混凝土自生体积变形增量矩阵。

对弹性矩阵 $[\bar{D}_n]$, 有:

$$[\bar{D}_n] = \bar{E}_n [Q]^{-1}. \quad (3)$$

$$\bar{E}_n = \frac{E(\bar{\tau}_n)}{1 + E(\bar{\tau}_n)C(t_n, \bar{\tau}_n)}. \quad (4)$$

式中: $\bar{\tau}_n$ 为计算时段混凝土中点龄期, 假定计算时段起止时刻分别为 τ_{n-1} 和 τ_n , 则 $\bar{\tau}_n = (\tau_{n-1} + \tau_n)/2$; $E(\bar{\tau}_n)$ 为混凝土中点龄期 $\bar{\tau}_n$ 时的弹性模量; $C(t_n, \bar{\tau}_n)$ 为混凝土的徐变度。

对于空间问题, $[Q]^{-1}$ 可表示为:

$$[Q]^{-1} = \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\mu}{1-\mu} & \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

式中： μ 为混凝土的泊松比。

将式(1)对所有单元集成后,即可得到计算域上的整体位移方程,求解整体位移方程可得时段位移增量 $\{\Delta \delta_n\}$,相应时段应力增量可按下式求得:

$$\{\Delta \sigma_n\} = [\mathbf{D}_n][\mathbf{B}]\{\Delta \delta_n\} - \{\Delta \epsilon_n^C\} - \{\Delta \epsilon_n^g\} - \{\Delta \epsilon_n^T\} \quad (6)$$

式中： $\{\Delta \sigma_n\}$ 为时段应力增量, $[\mathbf{B}]$ 为集成后的应变矩阵, $\{\Delta \epsilon_n^C\}$ 、 $\{\Delta \epsilon_n^g\}$ 、 $\{\Delta \epsilon_n^T\}$ 分别为混凝土徐变应变增量、自生体积应变增量和温度应变增量。

2 氧化镁混凝土的自生体积变形

图 1 为国内某已建高碾压混凝土重力坝混凝土自生体积变形试验成果^[17],图中给出了碾压混凝土

掺质量分数 5% 氧化镁后,养护温度分别为 20, 30, 40 °C 时的自生体积变形以及在 20 °C 养护温度下未掺氧化镁时碾压混凝土的自生体积变形。由图 1 可看出,当龄期为 200 d, 养护温度为 20 °C 且未掺氧化镁时,该碾压混凝土的自生体积变形为收缩 13.12 × 10⁻⁶, 掺氧化镁后自生体积变形为膨胀 47.25 × 10⁻⁶; 氧化镁掺量相同情况下,当龄期为 200 d, 养护温度为 30 °C 时,其自生体积变形为膨胀 63.26 × 10⁻⁶, 40 °C 时自生体积变形为膨胀 78.94 × 10⁻⁶。由此可以得出,掺氧化镁使得碾压混凝土产生膨胀性自生体积变形,并且在相同龄期条件下,氧化镁混凝土自生体积变形随养护温度的升高而增大。

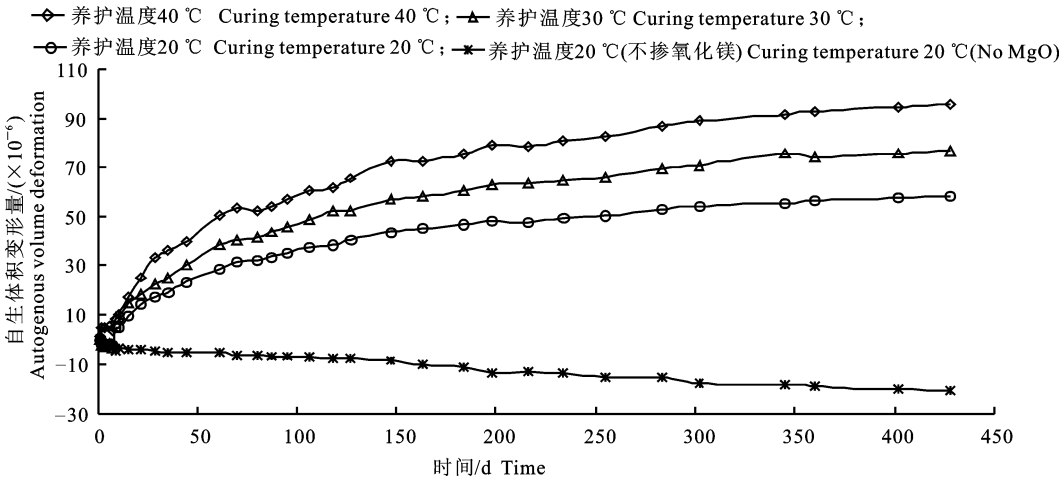


图 1 高碾压混凝土重力坝在不同养护温度下掺加氧化镁对混凝土自生体积变形的影响
Fig. 1 Effect of MgO mixed at different curing temperatures on concrete autogenous volume deformation of a high RCC gravity dam

氧化镁微膨胀混凝土的膨胀性具有如下特点^[6,16]: (1) 氧化镁混凝土的最终膨胀变形量只取决于氧化镁的含量, 氧化镁的掺加量越高, 最终膨胀变形量越大; (2) 氧化镁混凝土膨胀的过程就是氧化镁水化生成氢氧化镁的过程, 温度越高水化速度越快, 因此掺氧化镁混凝土的自生体积变形不仅是龄期的函数, 同时还是温度的函数; (3) 氧化镁水化反应不可逆, 由此所产生的膨胀亦不可逆, 且单调增加。因此, 氧化镁混凝土的膨胀性也是单调递增且不可逆的。

由此可知, 氧化镁混凝土自生体积变形 $\epsilon^g(\tau)$ 应满足以下条件: (1) $\tau=0$ 时, $\epsilon^g_0=0$; (2) 当混凝土龄期 $\tau \rightarrow \infty$ 时, $\frac{\partial \epsilon^g(\tau)}{\partial (\tau)}=0$, 即膨胀速率为 0, 其最终膨胀变形量趋于稳定; (3) 养护温度 T 一定时, ϵ^g 随混凝土龄期 τ 单调增加; (4) 当混凝土龄期一定时, ϵ^g 随养护温度 T 单调增加。氧化镁混凝土的自生体

积变形 $\epsilon^g(\tau)$ 不仅与混凝土龄期有关, 还与温度 T 有关。关于微膨胀混凝土自生体积变形的计算模型, 已有很多学者进行了大量的研究^[5-12], 最终的研究成果均是将自生体积变形以函数的形式给出, 函数拟合曲线尽量与混凝土自生体积变形试验曲线相吻合。此种做法是受以往计算机硬件发展水平的限制, 混凝土自生体积变形以函数的形式给出能节省计算机的内存。但是影响混凝土自生体积变形的因素非常多, 可能有些仍不为人们所认识, 因此将混凝土自生体积变形的复杂变化过程仅采用函数的形式给出, 显然是不妥的。现今计算机硬件水平得到了长足的发展, 而且一些有限元商业软件如 ANSYS、ABAQUS、MARC 等, 能将混凝土自生体积变形试验实测数据以表格的形式输入计算程序中, 计算出任意时刻、任意温度下混凝土的自生体积变形值。因此本研究在计算时, 即将碾压混凝土自生体积变

形实测数据以表格的形式输入到 ANSYS 软件中,若计算点处在 2 个实测数据点之间,则采用插值方法推求计算点的数据。

3 工程实例计算与分析

某水利枢纽工程挡水坝最大坝高(H)121.0 m,坝段宽度 15.0 m。坝体混凝土主要采用了二级配和三级配碾压混凝土,二级配位于坝体上游面,主要起防渗作用,其厚度在坝高 84.0 m 以下为 6.0 m,84.0 m 以上为 4.0 m。仿真计算时取整个坝段为研究对象,计算模型见图 2,整体模型中坐标原点在左侧坝踵处,沿坝轴线方向为 X 方向,指向右岸为正;沿水流方向为 Y 方向,指向下游为正;铅直方向为 Z 方向,向上为正。

温度场与温度徐变应力场仿真计算程序是在大型商业有限元软件 ANSYS 平台上,采用 APDL 语言进行二次开发的^[17]。计算过程中温度场边界条件^[18]为:地基地面和 4 个侧面为绝热边界;坝体上、下游面根据实际蓄水过程在水位以上为固-气边界,水位以下为固-水边界。固-气边界按第 3 类边界条件处理,固-水边界按第 1 类边界条件处理。温度徐变应力场计算边界条件为:地基地面按固定支座处理,左、右侧面按 X 向简支处理,上、下游侧面按 Y 向简支处理;地基顶面、坝体上下游面以及横缝面均为自由边界。

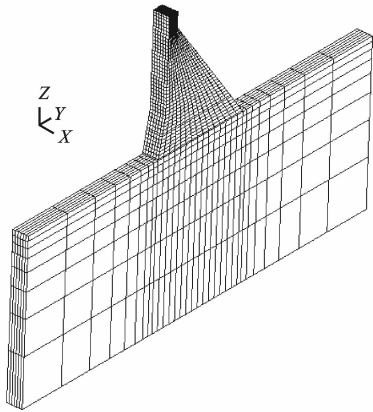


图 2 某水利枢纽工程挡水坝段有限元计算模型
Fig.2 Finite element calculation model for water retaining dam section of a hydraulic project

3.1 计算方案

计算时为了能够反映出氧化镁混凝土对温度应力的补偿效应,因而采用对比方案,即方案一坝体采用常规碾压混凝土;方案二全坝段采用掺质量分数 5%氧化镁的碾压混凝土,氧化镁混凝土自生体积变形见图 1。2 个方案坝体碾压混凝土开浇时间、浇筑

温度和浇筑进度完全相同。

3.2 计算参数

由于外掺氧化镁对碾压混凝土的热力学参数影响甚小^[19],因此在仿真计算时,对掺与不掺氧化镁的碾压混凝土的热力学参数均采用相同值(表 1)。基岩弹性模量取 12.0 GPa。二级配碾压混凝土的绝热温升表达式为 $\theta(\tau)=22.68\tau/(2.08+\tau)$,三级配碾压混凝土的绝热温升表达式为 $\theta(\tau)=17.61\tau/(2.82+\tau)$,其中 $\theta(\tau)$ 为混凝土绝热温升, τ 为混凝土的龄期。碾压混凝土弹性模量采用双曲线公式表示,二级配碾压混凝土的弹性模量($E(\tau)$)为 $E(\tau)=28.6\tau/(5.08+\tau)$,掺氧化镁的二级配碾压混凝土的弹性模量为 $E(\tau)=29.8\tau/(4.02+\tau)$;三级配碾压混凝土的弹性模量为 $E(\tau)=27.4\tau/(5.08+\tau)$,掺氧化镁的三级配碾压混凝土的弹性模量为 $E(\tau)=28.5\tau/(4.02+\tau)$ 。

碾压混凝土徐变度($\times 10^{-6}/\text{MPa}$)近似按下式计算:

$$C(t,\tau)=(A_1+B_1\tau^{-C_1})[1-e^{-D_1(t-\tau)}]+(A_2+B_2\tau^{-C_2})[1-e^{-D_2(t-\tau)}] \quad (7)$$

式中: t 为时间, τ 为混凝土的龄期; $t-\tau$ 为持荷时间。 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 、 A_2 、 B_2 、 C_2 、 D_2 为碾压混凝土徐变度参数,根据坝体碾压混凝土徐变试验资料^[17],对各徐变度参数进行拟合,其结果见表 2。

3.3 计算结果及分析

碾压混凝土浇筑层厚 0.3 m,根据实际浇筑进程逐层激活各层混凝土单元。温度场及温度徐变应力场计算的时间步长在施工期为 0.25 d,运行期采用 0.5~30 d 的变步长。由于计算时 2 个方案碾压混凝土的热学参数相同,浇筑进度、浇筑温度以及边界条件也相同,因此 2 个方案的温度场计算结果相同。

图 3 为大坝中横剖面施工期末温度等值线图。由图 3 可知,施工期末坝体边界温度低,中心部位温度高。沿高程方向坝体温度场有 2 个高温区,中心在 45.0 m 高程处的高温区碾压混凝土浇筑时间为夏季,浇筑温度高、散热条件差、沿水流方向尺寸较大是该高温区出现的主要原因;另一个高温区中心高程 100.0 m,碾压混凝土龄期较短,混凝土仍处于高发热期,热量积累致使其温度较高。

图 4 为方案二大坝中横剖面施工期末碾压混凝土自生体积变形等值线图。由氧化镁微膨胀混凝土的膨胀特性可知,混凝土所处环境温度越高,膨胀速率越大,相应的膨胀变形量也越大。施工期末靠近

坝体边缘膨胀变形量小,中心部位膨胀变形量大。层面上温度较上,下层混凝土温度偏低,因此其膨胀变形量也相应较小。施工期末坝体 45.0 m 高程中部碾压混凝土膨胀变形量超过 70.0×10^{-6} 。

表 1 坝体碾压混凝土与基岩热力学参数值

Table 1 Thermodynamic parameters of roller compacted concrete and bedrock				
序号 Serial number	项目 Item	二级配碾压混凝土 Two-graded RCC	三级配碾压混凝土 Three-graded RCC	基岩 Bedrock
1	导热系数/($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$) Thermal conductivity	10.105	10.223	6.87
2	导温系数/($\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$) Thermal diffusivity	0.004 4	0.004 5	0.003 6
3	比热/($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$) Specific heat	0.943	0.952	0.716
4	线膨胀系数/($\times10^{-6}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$) Linear expansion coefficient	8.825	8.746	7.0
5	放热系数/($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$) Heat transfer coefficient	67.0	67.0	67.0
6	容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$) Bulk density	24.37	24.10	26.66
7	泊松比 Poisson's ratio	0.167	0.167	0.23

表 2 坝体碾压混凝土的徐变度参数值

Table 2 Creep parameters of the roller compacted concrete									
碾压混凝土 Roller compacted concrete		A_1	B_1	C_1	D_1	A_2	B_2	C_2	D_2
二级配碾压混凝土 Two-graded RCC		0.06	100	0.5	0.5	0	99.84	0.45	0.075
三级配碾压混凝土 Three-graded RCC		4.56	100	0.31	0.5	0	100	0.33	0.1

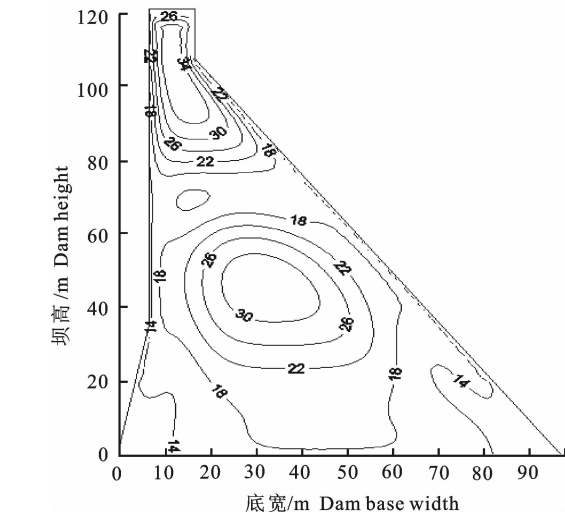


图 3 施工期末坝体中横剖面温度等值线图(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 3 Temperature contour map at the end of construction stage

选择建基面中心点、约束区中部水平截面(0.2H水平截面)中心点、非约束区中部水平截面(0.7H水平截面)中心点为坝体温度应力分析的典型点,给出典型点方案一、方案二温度应力最大值(表 3)及温度应力历时曲线(图 5),以分析得出氧化镁微膨胀混凝土对温度应力的补偿效应。坝体混凝土浇筑时实行通仓碾压,浇筑块沿水流方向(Y向)边长最长,因此 Y 向温度应力最大。未掺氧化镁(方案一)时建基面中心点 Y 向温度应力最大值为 2.88 MPa,掺氧化镁后(方案二)其温度应力减小为 1.96 MPa,应力值减小了 0.92 MPa,补偿效果非常

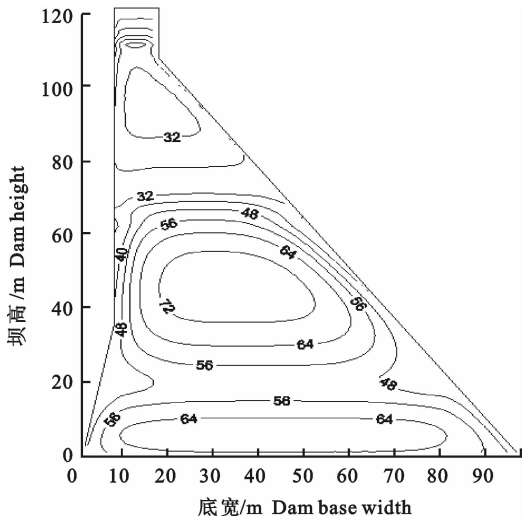


图 4 施工期末坝体中横剖面混凝土自生体积

变形等值线图($\times10^{-6}$)

Fig. 4 Autogenous volume deformation contour map at the end of construction stage

显著;掺氧化镁对建基面中心点 X、Z 向应力也有所补偿,但补偿幅度较小。0.2H 水平截面属于坝体约束区范围,未掺氧化镁时其中心点 Y 向温度应力最大值为 2.12 MPa,掺氧化镁后温度应力减小为 1.61 MPa,应力值减小了 0.51 MPa。0.7H 水平截面脱离坝体约束区范围,未掺氧化镁时其中心点 Y 向温度应力最大值为 1.28 MPa,掺氧化镁后温度应力减小为 1.14 MPa,补偿效果甚微。由此可见,在基础约束区采用氧化镁微膨胀混凝土,利用氧化镁水化产生的延迟微膨胀性来补偿由于混凝土收缩和温降引起的应力,能取得非常好的补偿效果。

表 3 坝体内典型点的温度应力最大值

Table 3 The maximum thermal stress of the dam typical points

MPa

方案 Scheme	建基面中心点 Center point of dam foundation			0.2H 水平截面中心点 Center point of 0.2H horizontal section			0.7H 水平截面中心点 Center point of 0.7H horizontal section		
	σ_X	σ_Y	σ_Z	σ_X	σ_Y	σ_Z	σ_X	σ_Y	σ_Z
1	0.34	2.88	1.18	0.15	2.12	0.82	0.23	1.28	0.63
2	0.16	1.96	0.76	0.07	1.61	0.59	0.15	1.14	0.52

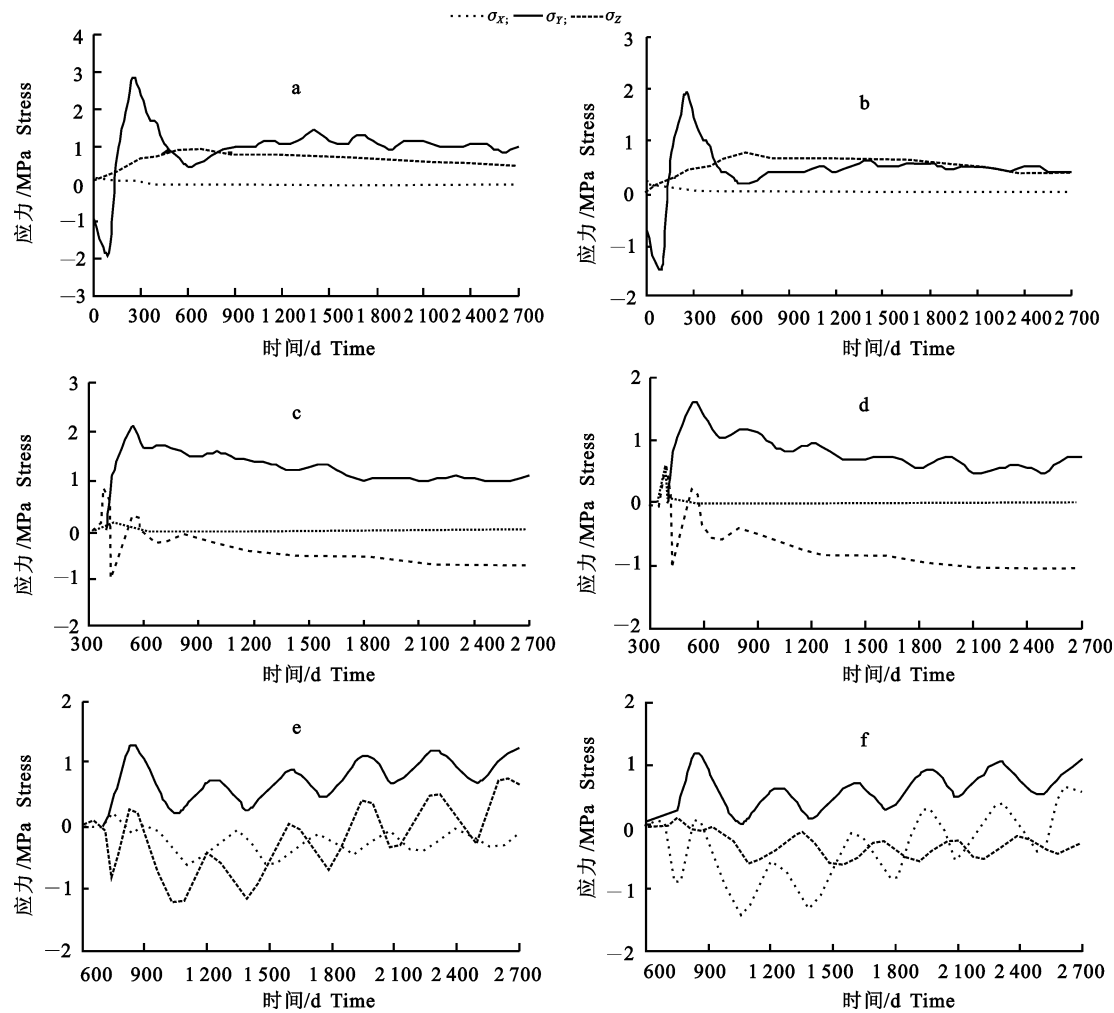


图 5 挡水坝段典型点温度应力历时曲线

a. 方案一建基面中心点;b. 方案二建基面中心点;c. 方案一 0.2H 水平截面中心点;d. 方案二 0.2H 水平截面中心点;e. 方案一 0.7H 水平截面中心点;f. 方案二 0.7H 水平截面中心点

Fig. 5 Thermal stress history curve of the dam typical points

a. Scheme 1 thermal stress history curve of dam foundation center point;b. Scheme 2 thermal stress history curve of dam foundation center point;c. Scheme 1 thermal stress history curve of 0.2H horizontal section center point; d. Scheme 2 thermal stress history curve of 0.2H horizontal section center point;e. Scheme 1 thermal stress history curve of 0.7H horizontal section center point;f. Scheme 2 thermal stress history curve of 0.7H horizontal section center point

4 结 语

碾压混凝土筑坝技术在当今水利枢纽建设中有非常重要的地位,其快速施工的优越性已得到工程界的广泛认可,但同时也使得碾压混凝土内部积累

大量的热量,在后期降温时产生较大的温度应力。从筑坝材料入手,在碾压混凝土中外掺适量的氧化镁,利用其延迟微膨胀性补偿温度应力,计算结果表明在坝体约束区补偿效果较好,可达到简化温控防裂措施、降低工程成本、加快施工进度目的。

[参考文献]

- [1] 李承木, 杨元慧. 氧化镁混凝土自生体积变形的长期观测结果 [J]. 水利学报, 1999(3): 54-58.
Li C M, Yang Y H. Study on long term autogenous volume deformation of MgO concrete [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999(3): 54-58. (in Chinese)
- [2] 李承木. 氧化镁混凝土自生体积变形的长期试验研究成果 [J]. 水力发电学报, 1999, 18(2): 11-19.
Li C M. An experimental study of the autogenous volume deformation of the MgO concrete [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 18(2): 11-19. (in Chinese)
- [3] 陈昌礼, 唐成书. 氧化镁混凝土在东风拱坝基础中的应用及长期观测成果分析 [J]. 水力发电学报, 2006, 25(4): 102-107.
Chen C L, Tang C S. The application of MgO concrete in Dongfeng arch dam foundation and the analysis of long-term prototype observation result [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 25(4): 102-107. (in Chinese)
- [4] 袁明道, 肖明, 杨光华. 长沙拱坝氧化镁混凝土自生体积变形的长期原型观测成果分析 [J]. 水力发电学报, 2012, 31(3): 168-174.
Yuan M D, Xiao M, Yang G H. Long-term prototype observation data analysis of autogenous deformation of MgO concrete for Changsha arch dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 31(3): 168-174. (in Chinese)
- [5] 朱伯芳. 兼顾当前温度与历史温度效应的氧化镁混凝土双温计算模型 [J]. 水利水电技术, 2003, 34(4): 16-17.
Zhu B F. Double temperature computing model for the volume expansion of concrete with gentle volume expansion [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34(4): 16-17. (in Chinese)
- [6] 朱伯芳. 微膨胀混凝土自生体积变形的增量型计算模型 [J]. 水力发电, 2003, 29(2): 20-23.
Zhu B F. Incremental type of computing model for the volume expansion of concrete with gentle volume expansion [J]. Water Power, 2003, 29(2): 20-23. (in Chinese)
- [7] 杨光华, 袁明道, 罗军. 氧化镁微膨胀混凝土在变温条件下膨胀规律数值模拟的当量龄期法 [J]. 水利学报, 2004(1): 116-121.
Yang G H, Yuan M D, Luo J. Equivalent age method for simulating MgO concrete expansion under varied temperature condition [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(1): 116-121. (in Chinese)
- [8] 杨光华, 袁明道. MgO 微膨胀混凝土自生体积变形的双曲线模型 [J]. 水力发电学报, 2004, 23(4): 38-44.
Yang G H, Yuan M D. The hyperbola model for autogenous expansion volume deformation of MgO concrete [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 23(4): 38-44. (in Chinese)
- [9] 陈昌礼, 冯林安, 方坤河. 氧化镁混凝土自生体积变形的反正切曲线模型 [J]. 水力发电学报, 2008, 27(4): 106-110.
Chen C L, Feng L A, Fang K H. Arc tangent curve model of the self-volume deformation of MgO concrete [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 27(4): 106-110. (in Chinese)
- [10] 张国新. 考虑温度过程效应 MgO 微膨胀热积分模型 [J]. 水力发电, 2002, 28(11): 28-31.
Zhang G X. MgO micro-expansion thermal integral model considering temperature process effect [J]. Water Power, 2002, 28(11): 28-31. (in Chinese)
- [11] 张国新, 金峰, 罗小青, 等. 考虑温度历程效应的氧化镁微膨胀混凝土仿真分析模型 [J]. 水利学报, 2002, 28(8): 29-34.
Zhang G X, Jin F, Luo X Q, et al. Simulation of expansion process of MgO concrete considering the temperature history effect [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(8): 29-34. (in Chinese)
- [12] 张国新, 陈显明, 杜丽惠. 氧化镁混凝土膨胀的动力学模型 [J]. 水利水电技术, 2004, 35(9): 88-91.
Zhang G X, Chen X M, Du L H. Expansion model of dynamics describing MgO concrete [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(9): 88-91. (in Chinese)
- [13] 李鹏辉, 许维, 刘光廷. 外掺氧化镁混凝土水化宏观试验研究 [J]. 水力发电学报, 2004, 23(5): 28-31.
Li P H, Xu W, Liu G T. Experimental study on hydration process of cement added with magnesia in macro level and meso level [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 23(5): 28-31. (in Chinese)
- [14] 卢小琳, 兰文改, 张洪波, 等. 氧化镁水化产物的微观结构特点表征 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2010, 38(5): 555-558.
Lu X L, Lan W G, Zhang H B, et al. Microstructural characteristics of MgO hydration products [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010, 38(5): 555-558. (in Chinese)
- [15] 李维维, 陈昌礼, 方坤河, 等. 水灰比对外掺氧化镁混凝土自生体积变形的影响 [J]. 水电能源科学, 2011, 29(10): 57-59.
Li W W, Chen C L, Fang K H, et al. Influence of water cement ratio on autogenous volume deformation of concrete with magnesium oxide [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(10): 57-59. (in Chinese)
- [16] 胡平, 杨萍. 掺氧化镁混凝土建造高碾压混凝土重力坝的温度补偿计算方法 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(4): 302-306.
Hu P, Yang P. Study on thermal compensation method for high RCC dam constructed with the admixture of MgO [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2004, 2(4): 302-306. (in Chinese)
- [17] 司政. 严寒地区碾压混凝土重力坝越冬层面混凝土防裂措施研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2012.
Si Z. Research on crack control measures of roller compacted concrete gravity dam overwintering face concrete in severe cold area [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [18] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
Zhu B F. Thermal stresses and temperature control of mass concrete [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999. (in Chinese)
- [19] 李承木. 外掺 MgO 混凝土的基本力学与长期耐久性能 [J]. 水利水电科技进展, 2000, 20(5): 30-35.
Li C M. Basic mechanics and long-term durability of concrete mixed with MgO [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2000, 20(5): 30-35. (in Chinese)