

# 掺氧化镁的 RCC 特性试验研究 及在马堵山大坝高温施工中的温控仿真

谢祥明

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘 要:**掺 MgO 的 RCC 混凝土主要运用提高混凝土的防裂特性. 通过外掺氧化镁碾压混凝土的特性试验研究, 通过弹性模量与自生体积变形的试验, 确定本文中碾压混凝土中恰当的 MgO 掺量为 5.5%, 并对马堵山大坝碾压混凝土的最大浇筑块的高温环境施工进行精确的温度场和应力场仿真计算, 结果表明采用外掺氧化镁技术与埋设 HDPE 冷却水管相结合的措施对 RCC 高温施工的防裂是行之有效的温控防裂方法, 为随后进行的马堵山碾压混凝土大坝高温环境的施工方案提供了重要的科学依据.

**关键词:**氧化镁混凝土; 试验研究; 仿真; 碾压混凝土特性

**中图分类号:**TV52

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7930(2011)01-0137-06

氧化镁微膨胀在工程中主要用于重力坝基础约束区, 基础深槽、基础垫层、导流洞, 压力钢管外围混凝土、接触与填充注浆以及全断面使用<sup>[1]</sup>. 另外, 大掺量 MgO 混凝土变形的安定性和工程应用中坝体上补偿部位、补偿时间、补偿量的确定等问题仍待进一步研究. 关于碾压混凝土外掺 MgO 技术在工程实际应用的实例不多, 在国内, 有公开资料可查的工程实例有四川沙牌水电站<sup>[2]</sup>和贵州索风营电站<sup>[3]</sup>. 目前我集团公司正在施工的云南马堵山水电站工程也开展了碾压混凝土外掺 MgO 筑坝技术的应用研究.

由于马堵山碾压混凝土大坝工程建设工期短, 大坝又必须面临高温条件施工的技术问题, 混凝土采用强制制冷技术措施因其热量倒灌大而不能使温控达到预期效果. 在类似工程南沙水电站的温控经验的基础上, 马堵山大坝碾压混凝土拟用的主要温控措施为采用埋设 HDPE 冷却水管和外掺氧化镁技术相结合的防裂方法. 本文主要研究了外掺氧化镁碾压混凝土的特性以及在此基础上采用通水冷却技术措施的温控效果, 对马堵山碾压混凝土的最大浇筑试块进行了温控防裂仿真的有限元计算, 以科学地制定高气态环境条件下碾压混凝土施工的确定可行的温控技术措施.

## 1 外掺氧化镁碾压混凝土力学性能试验

### 1.1 原材料与混凝土配合比

**表 1 不同氧化镁掺量碾压混凝土试验配合比**

Tab. 1 Ratio of concrete with different MgO contents

Strength grade	MgO content/%	Material dosage of 1 m <sup>3</sup> concrete /kg							V <sub>c</sub> /s	
		Water	Cement	Fly-ash	Sand	Big stone	Middle stone	Slag		
C <sub>90</sub> 15	0	88	62	93	730	450	600	450	0	5.1
	4.5	88	62	93	730	450	600	450	6.98	6.5
	5.5	89	62	93	730	450	600	450	8.53	4.7
	6.5	90	62	93	730	450	600	450	10.08	5.2
	7.5	90	62	93	730	450	600	450	11.63	5.7

注: 通海秀山 42.5 普通硅酸盐水泥, 水泥中氧化镁含量 1.2%, 昆明阳宗海 II 级粉煤灰, 辽宁海城市东方滑镁公司生产的水工轻氧化镁, 山西格瑞特 FDN-II 缓凝高效减水剂, 河砂和河卵石.

收稿日期: 2010-03-09 修改稿日期: 2010-12-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50579080)

作者简介: 谢祥明(1974-), 男, 广东增城人, 高级工程师, 博士生, 主要研究混凝土材料方向.

1.2 抗压弹性模量

混凝土弹性模量在标准养室养护至相应龄期进行试验,检测环境温度为  $20\pm5^{\circ}\text{C}$ . 线膨胀系数于  $20\pm2^{\circ}\text{C}$  的环境养护 30 d 后,放入恒温水箱进行检测,水的起始温度在  $16\sim19^{\circ}\text{C}$  之间,满足规范要求( $10\sim20^{\circ}\text{C}$  之间).

(1)主要试验设备:2 000 kN 压力机;千分表;应变片(150 mm)以及 502 胶水;试件为  $150\text{ mm}\times150\text{ mm}\times300\text{ mm}$  棱柱体,每组成型 6 个试块,3 个测定轴心抗压强度,3 个测定弹性模量.

(2)试验步骤以及试验结果处理按照水工混凝土试验规程(S352—2006)执行.

混凝土抗压弹性模和线胀系数试验结果见表 2.

表 2 不同 MgO 掺量混凝土弹性模量和线胀系数  
Tab. 2 Parameter of concrete mixed with MgO

Strength grade	MgO Content / %	Linear expansion coefficient/ $(\times10^{-6}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	Modulus / $\times10^4\text{ MPa}$		
			28 d	90 d	180 d
C <sub>90</sub> 15	5.5	9.392	2.602	3.418	3.597
	6.5	9.569	2.640	3.496	3.781
	7.5	9.350	2.763	3.520	3.702

1.3 自生体积变形

(1)主要试验设备:带有搅拌器的自动控制恒温水箱;差动式电阻应变计(长度 150 mm)及其率定设备;水工比例电桥;试件直径为  $D=200\text{ mm}$ ,高 500 mm 带盖白铁皮桶,每组成型 2 个试块.

(2)试验步骤以及试验结果处理按照水工混凝土试验规程(S352-2006)执行. 混凝土自生体积变形试件放置在  $20\pm2^{\circ}\text{C}$  的环境养护;试验结果见图 1. 结果表明:混凝土自生体积变形为膨胀型.

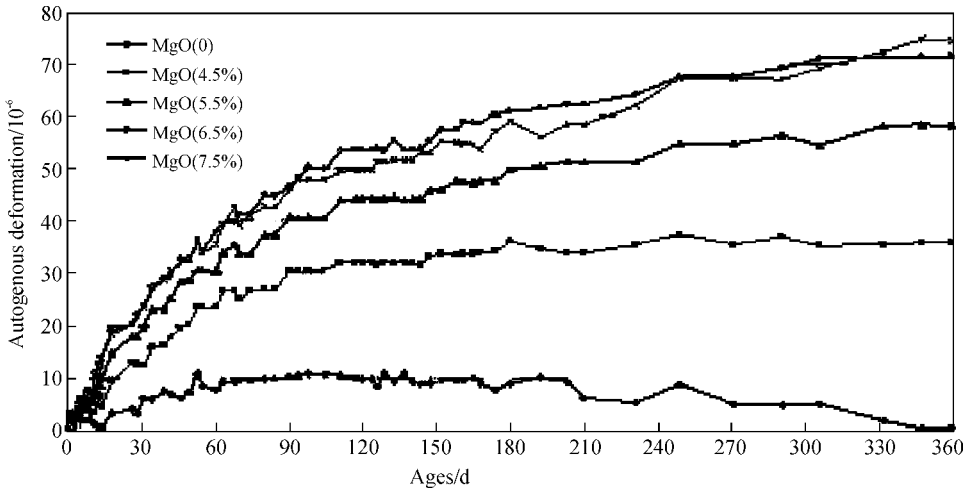


图 1 混凝土自生体积变形随龄期变化趋势  
Fig. 1 Autogenous deformation history of concrete

1.4 试验结果小结

(1)氧化镁掺量由 5.5%增加至 7.5%,混凝土 28 d 和 90 d 龄期抗压弹性模量均有所增加,28 d 龄期在  $2.602\times10^4\text{ MPa}\sim2.763\times10^4\text{ MPa}$  之间,90d 龄期在  $3.418\times10^4\text{ MPa}\sim3.520\times10^4\text{ MPa}$  之间. 180 d 龄期时,氧化镁掺量由 5.5%增加至 6.5%,混凝土抗压弹性模量仍有增加;氧化镁掺量由 6.5%增加至 7.5%,混凝土抗压弹性模量略有降低.

(2)氧化镁掺量在 4.5%~6.5%范围时,混凝土线膨胀系数随氧化镁掺量的增加而增大,掺量为 6.5%时达到最大,当氧化镁掺量为 7.5%时,混凝土线膨胀系数有所降低.

(3)混凝土自生体积变形为膨胀型,氧化镁掺量在 4.5%~6.5%之间时,混凝土膨胀变形随掺量的增加而增大;氧化镁掺量由 6.5%增至 7.5%时,混凝土自生体积变形变化不大. 360 d 龄期时,膨胀率最

高的为 MgO 掺量为 6.5% 的混凝土,其自生体积膨胀变形高达  $71\mu$  并趋于稳定。

综上,对上述不同掺量氧化镁的胶材(40%水泥+60%粉煤灰)砂浆进行蒸压安定性试验,安定性试验结果均在合格范围内.考虑到粉煤灰对氧化镁微膨胀的抑制作用,结合目前规范推荐的掺量限制和上述试验结果,确定碾压混凝土氧化镁的外掺量为 5.5%。

2 工程算例

2.1 算例概况

马堵山水电站位于红河干流个旧市与金平县交界处,是红河干流上规划十二个梯级开发的第十级电站.大坝类型为碾压混凝土重力坝,工程规模属大 II 型工程.坝顶高程▽ 222.5 m,最大坝高 107.5 m,坝顶全长 365.0 m,水库总库容  $5.5\times 10^8\text{ m}^3$ ,总装机容量  $28.8\times 10^4\text{ kW}$ ,混凝土总方量为  $1\times 10^6\text{ m}^3$ ,其中碾压混凝土  $62\times 10^4\text{ m}^3$ ,常态混凝土  $38\times 10^4\text{ m}^3$ .工程地处典型的炎热气候区,多年平均气温 23.8℃,最高气温 41.3℃,无冬季.大坝设置了施工纵缝,最大坝块为 20 m×45 m.由于环境气温高,混凝土采用强制制冷技术措施因其热量倒灌大而不能使温控达到预期效果,因而针对最大坝块进行温控防裂的仿真分析对大坝的整体温控防裂措施起到重要的指导作用。

2.2 仿真模型

仿真计算采用图 2 所示计算模型模型单元数为 41 342,节点数为 46 966;模拟施实际施工过程采用分层浇筑,总共 23 层,水管布置按照 1.5 m×1.0 m 沿 45m 边长方向布置,浇筑温度按照施工实际情况取月平均温度,根据所分析问题的要求主要设计计算两个工况:

- 工况 1:未掺氧化镁,不采取通水冷却;
- 工况 2:掺 5.5% 氧化镁,根据实际工程情况,通 20℃ 冷却水冷却 10 d;

由于环境温度较高,不考虑表面保温计算中表面自由散热

特征点选取:选取具有代表性的表面点和内部点各一个作为结果分析的特征点,分别用于研究早期水管冷却对表面应力的影响,以及后期氧化镁对于内部应力的影响。

2.3 仿真计算方法

2.3.1 非稳定温度场计算

在计算域  $R$  内任何一点处,不稳定温度场  $T(x,y,z,t)$  须满足热传导方程

$$\frac{\partial T}{\partial t}=a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+\frac{\partial \theta_0}{\partial \tau}$$

(1)

式中: $T$  为温度(℃); $a$  为导温系数( $\text{m}^2/\text{h}$ ); $\theta_0$  为混凝土绝热温升(℃); $t$  为时间(d); $\tau$  为龄期(d)。

利用变分原理,对式(1)采用空间域离散,时间域差分,引入初始条件和边界条件后,可得向后差分的温度场有限元计算递推方程<sup>[4]</sup>为

$$\left([H]+\frac{1}{\Delta t_n}[R]\right)\{T_{n+1}\}-\frac{1}{\Delta t_n}[R]\{T_n\}+\{F_{n+1}\}=0$$

(2)

式中: $[H]$ 为热传导矩阵, $[R]$ 为热传导补充矩阵, $\{T_n\}$ 和  $\{T_{n+1}\}$ 为结点温度列阵, $\{F_{n+1}\}$ 为结点温度荷载列阵, $n$  为时段序数, $\Delta t$  为时间步长.根据递推公式(2),有已知上一时刻的结点计算温度 $\{T_n\}$ 可以推出下一时刻的结点温度 $\{T_{n+1}\}$ 。

2.3.2 水管冷却混凝土温度场计算

根据傅立叶热传导定律和热量平衡条件,可得水管沿程水温的增量为

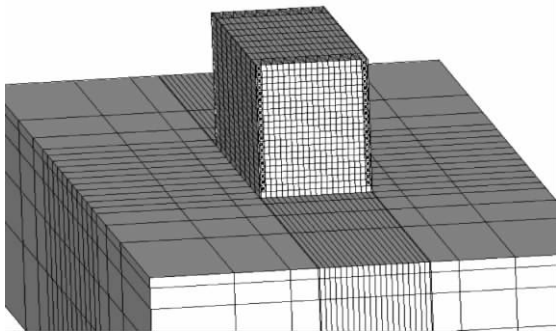


图 2 计算模型  
Fig. 2 Finite element mesh

$$\Delta T_{wi} = \frac{-\lambda}{c_w \rho_w q_w} \iint_{\Gamma^0} \frac{\partial T}{\partial n} ds \quad (3)$$

式中:  $q_w$ 、 $c_w$  和  $\rho_w$  分别为冷却水的流量、比热和密度;  $\lambda$  为导热系数;  $n$  为混凝土与水管之间混凝土面的外法线,  $\Gamma^0$  为水管的管壁。

由于冷却水的入口温度已知, 利用上述公式, 对每一根冷却水管沿水流方向可以逐段推求沿程管内水体的温度。水管的沿程水温计算与温度梯度  $\partial T / \partial n$  有关, 因此带冷却水管的混凝土温度场是一个边界非线性问题<sup>[4-5]</sup>, 温度场的解无法一步得出, 必须采用迭代解法逐步逼近真解<sup>[6-7]</sup>。

### 2.3.3 应力场计算

混凝土在复杂应力状态下的应变增量包括弹性应变增量、徐变应变增量、温度应变增量、干缩应变增量和自生体积应变增量, 因此有

$$\{\Delta \epsilon_n\} = \{\Delta \epsilon_n^e\} + \{\Delta \epsilon_n^c\} + \{\Delta \epsilon_n^T\} + \{\Delta \epsilon_n^s\} + \{\epsilon_n^0\} \quad (4)$$

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

由物理方程、几何方程和平衡方程, 可得任何时段  $\Delta t_i$  在区域  $R_i$  上的有限元支配方程为

$$[K_i] \{\Delta \delta\}_i = \{\Delta P_i^G\} + \{\Delta P_i^C\} + \{\Delta P_i^T\} + \{\Delta P_i^S\} + \{\Delta P_i^0\} \quad (5)$$

式中:  $\{\Delta \delta\}_i$  为区域  $R_i$  内所有节点三个方向上的位移增量,  $\{\Delta P_i^G\}$ 、 $\{\Delta P_i^C\}$ 、 $\{\Delta P_i^T\}$ 、 $\{\Delta P_i^S\}$  和  $\{\Delta P_i^0\}$  分别为  $\Delta t_i$  时段内由外荷载、徐变、变温、干缩和自生体积变形引起的等效结点力增量<sup>[4]</sup>。

## 3 计算结果分析

结果分析:

(1) 冷却效果分析:

根据计算结果见图 3—图 4 可以看出未通水时内部峰值达到了 38.1℃ 左右, 时刻的外表面点温度为 29.17℃, 此时混凝土龄期为 17 d, 内外温差峰值达到了 9.0℃ 左右。在 20℃ 冷却水 10 d 时, 相同内部特征点温度峰值达到 34.72℃, 此时外部特征点温度为 27.8℃, 内外温差为 7℃ 左右, 但是峰值被提前到龄期 14 d 左右, 由于冷却水温较高(20℃)冷却效果不是非常明显, 但是可以看出冷却对于降低峰值和内外温差还是起到了一定的效果。

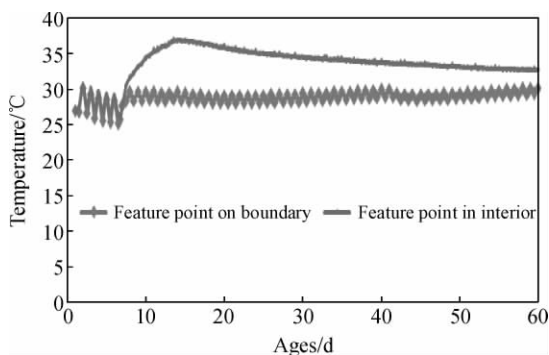


图 3 工况 1 特征点温度

Fig. 3 Temperature of feature point in condition 1

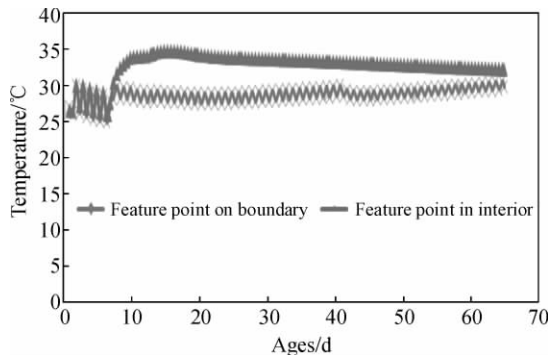


图 4 工况 2 特征点温度

Fig. 4 Temperature of feature point in condition 2

(2) 通水及外掺氧化镁对于早期表面拉应力的影响:

根据计算结果见图 5~图 6 在没有进行通水冷却的情况下产生了 0.67 MPa 的拉应力, 大于当时的容许拉应力 0.65 MPa, 开裂风险较大。而掺加了氧化镁和进行通水冷却的后, 早期在表面特征点产生的拉应力均小于允许抗拉强度, 可以看出所采取的温控措施有效地减小表面拉应力降低了开裂风险。

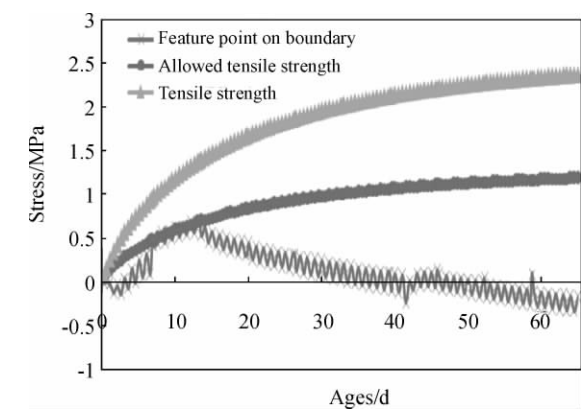


图 5 工况 1 边界特征点  $\sigma_1$

Fig. 5  $\sigma_1$  of exterior point in condition 1

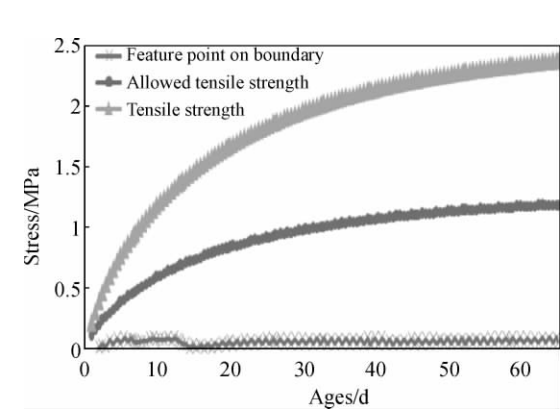


图 6 工况 2 边界特征点  $\sigma_1$

Fig. 6  $\sigma_1$  of exterior point in condition 2

3. 氧化镁微膨胀作用在后期对于内部应力场的影响：

根据计算结果见图 7~图 8,分析氧化镁后期对于内部应力的改善,主要比较后期也就是 250~500 d 应力结果;可以看出前者,在后期 392 d 左右,此时混凝土内部经过一段时间的降温拉应力逐渐到达一个峰值 1.52 MPa,大于容许拉应力 1.27 MPa,开裂风险较大,而根据图 3 后者在这一时段的应力峰值只有 0.879 MPa 小于对应的容许拉应力 1.27 MPa,开裂风险有效的被降低. 峰值应力降低了 30.7%,计算表明由于后期氧化镁混凝土的微膨胀作用内部应力水平被有效的降低.

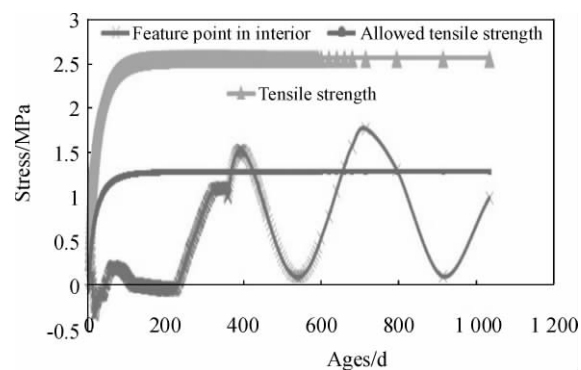


图 7 工况 1 混凝土内部特征点  $\sigma_1$

Fig. 7  $\sigma_1$  of internal point in condition 1

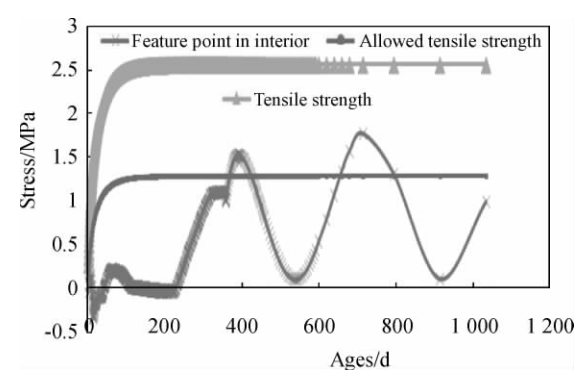


图 8 工况 2 混凝土内部特征点  $\sigma_1$

Fig. 8  $\sigma_1$  of internal point in condition 2

4 结 论

根据对混凝土温度场变化规律的研究以及计算表明,外掺氧化镁对于后期改善应力水平有起到了非常有利的作用,水管冷却可以有效的降低表面开裂风险,结果表明采用外掺氧化镁技术与埋设 HDPE 冷却水管相结合的措施对 RCC 高温施工的防裂是行之有效的温控防裂方法,为随后进行的马堵山碾压混凝土大坝高温环境的施工方案提供了重要的科学依据.

参考文献 References

[1] 袁美栖,唐明述. 吉白山大坝混凝土自生体积膨胀机理的研究[J]. 南京化工学院学报, 1984(2):38-45.  
YUAN Mei-xi,TANG Ming-shu. Study on expansion mechanism of concrete in Jibaishan dam[J]. Journal of Nan-jing University of Technology, 1984(2):38-45.

[2] 陈秋华. 沙牌碾压混凝土拱坝的技术创新及成就[J]. 水电站设计,2006(5):13-17.  
CHEN Qiu-hua. Shapai RCC arch dam technical Innovation and achievement [J],Design of Hydroelectric Power

- Station, 2006(5):13-17.
- [3] 罗明华. 索风营水电站大坝碾压混凝土外掺 MgO 施工工艺[C]//2004 全国 RCCD 筑坝技术交流会论文集. 贵阳: 2004:316-320.
- LUO Ming-hua. Suofengying dam construction technology of RCC incorporating MgO[C] //2004 National Seminar of the RCCD dam Proceedings, Guiyang:2004:316-320.
- [4] 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,1998.
- ZHU Bo-fang. Thermal stresses and temperature control of mass concrete [M]. Beijing: Electric Power Press, 1998.
- [5] 朱岳明,徐之青,贺金仁,等. 混凝土水管冷却温度场的计算方法[J]. 长江科学院院报,2003, 20(2): 19-22.
- ZHU Yue-ming, XU Zhi-qing, HE Jin-ren, et al. A calculation method for solving temperature field of mass concrete with cooling pipes [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2003, 20(2):19-22.
- [6] KAWARABA H, KANOKOGI T, TANABE T. Development of the FEM program for the analysis of pipe cooling effects on the thermal stress of massive concrete [J]. Trans JCI, 1986(8):125-130.
- [7] 刘 宁,刘光廷. 水管冷却效应的有限元子结构模拟技术[J]. 水利学报,1997(12):43-49.
- LIU Ning, LIU Guang-ting. Sub-structural FEM for the thermal effect of cooling pipes in mass concrete structures [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(12):43-49.
- [8] ALTOUBAT S A, LANGE D A. Creep shrinkage and cracking of restrained concrete at early age[J]. ACI Materials Journal, 2001, 98 (4):323-332.
- [9] SCHUTTER G D. Finite element simulation of thermal cracking in massive hardening concrete elements using degree of hydration based material laws [J]. Computers and Structures, 2002(80): 2035-2042.
- [10] KIM K H, JEON S E, KIM J K, et al. An experimental study on thermal conductivity of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2003(33): 363-371.

## Property study on RCC with MgO addition and temperature simulation in the construction of Madushan Dam under high temperatures

XIE Xiang-ming

(Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The addition of MgO to concrete proved to be an effective way to improving the crack-preventing properties of concrete. In this work, the optimal MgO content (5.5wt%) is obtained via investigating the addition of MgO on the modulus and autogenous growth of concrete carefully. Combining with temperature controlling units embedded inside the dam, concrete with optimized MgO content was applied in the construction of Madushan Dam under high temperatures. The temperature and stress field were monitored and simulated. The results showed that the addition of MgO combined with internal temperature controlling units could effectively reduce the maximum temperature, the temperature gap inside and outside as well as the maximum internal stress, which is well known for favoring the crack preventing in concrete curing under high temperatures.

**Key words:** MgO concrete; experimental study; simulation; characteristics of RCC