

文章编号:1672-3031(2021)01-0055-08

基于试验和仿真的混凝土早龄期抗裂特性方法研究

王振红¹, 张国新¹, 刘毅¹, 辛建达¹, 杨宁², 乔雨²

(1. 中国水利水电科学研究院 水电中心, 北京 100038; 2. 中国长江三峡集团有限公司, 北京 100038)

摘要:目前的混凝土抗裂性能研究方法存在不足,无法考虑工程实际中混凝土温度变化过程,不能考虑混凝土结构所受的约束状态,更不能考虑早龄期阶段的抗裂特性。针对这一问题,中国水利水电科学研究院自主开发了混凝土开裂全过程仿真试验系统,该系统既可以进行混凝土全龄期抗裂性能研究,试验得出真实温度历程、不同约束条件下的混凝土材料参数,特别是3天龄期前的参数,还可以进行仿真计算,与试验结果相互验证,分析混凝土的真实抗裂特性。该研究方法已在乌东德特高拱坝建设过程中成功应用,为评价低热水泥混凝土抗裂特性和温控曲线优化提供了科技支撑,也为混凝土抗裂性能评价提供了新的方法和思路。

关键词:混凝土, 温度应力; 早龄期; 试验; 抗裂特性

中图分类号: TV431

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20200141

1 研究背景

混凝土在硬化过程中产生一定的体积变形,同时混凝土也受周围岩体、结构的约束。变形与约束作为混凝土结构内部产生应力的两个基本要素一旦形成,混凝土便会有开裂的风险^[1-9]。为了研究混凝土热力学参数和抗裂性能,学者们设计了不同的试验方法,包括平板法^[10],圆环法^[11],以及开裂试验架法^[12]。Springenschmid在1980年代设计出第一代混凝土温度应力试验机(简称TSTM),通过试验验证了该机器在判断混凝土开裂性能方面的有效性^[13]。Bloom和Bentur^[14]以及Kovler^[15]不断改进和丰富试验机功能,研发出第二代混凝土温度应力试验机。但这些方法逐渐显露出不足,主要表现在:(1)混凝土升温降历程的缺失,实际工程混凝土会经历温升-温降过程,但当前规范要求采用恒温环境(恒温20℃)进行养护,与工程实际不符;(2)混凝土早龄期材料参数的缺失,刚浇筑混凝土强度较弱和测试设备限制,常采用7天、14天、28天等龄期的参数进行研究,对早龄期(前3天)的参数不考虑或者说忽略不计,不能反映实际参数;(3)混凝土约束状态的缺失,目前混凝土材料参数和性能的测量都是以标准自由试件为基础,不涉及混凝土约束状态问题,与工程实际不符。

鉴于上述原因,中国水利水电科学研究院研发了新型混凝土开裂全过程仿真试验机,可以开展不同约束程度、不同降温速率及不同环境条件下混凝土真实温度应力试验,测定混凝土真实材料特性,同时评判在不同约束模式下、不同养护龄期、不同降温速率,以及不同湿度、风速、温度骤降环境条件下混凝土实际开裂特性,揭示混凝土真实抗裂和开裂特性。

2 基本原理

2.1 位移控制模式下的真实约束度理论 基于约束混凝土试件变形,可得名义约束度 γ'_R 下混凝土被约束的变形为:

收稿日期: 2020-07-22; 网络首发时间: 2021-01-22

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.20210122.0900.001.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0406700); 国家自然科学基金资助项目(51779277); 中国水科院科研专项(SS0145B712017, SS0145B612017, SS0145B392016); 乌东德温度应力试验项目(WDD0428)

作者简介: 王振红(1978-), 教授级高级工程师, 主要从事水工结构研究。E-mail: 18852999@qq.com

$$\varepsilon^{res} = \gamma'_R (\varepsilon^{free} - \varepsilon^{creep}) \quad (1)$$

式中： ε^{creep} 是混凝土徐变变形； γ'_R 是名义约束度。

则混凝土真实约束度为：

$$\gamma_R = \frac{\varepsilon^{free} - (1 - \gamma'_R)(\varepsilon^{free} - \varepsilon^{creep})}{\varepsilon^{free}} \quad (2)$$

假定 $K = \varepsilon^{creep} / \varepsilon^{free}$ ，则式(2)可写为：

$$\gamma_R = \gamma'_R + (1 - \gamma'_R)K \quad (3)$$

又知 $K = \varphi / (1 + \varphi)$ ， φ 是徐变系数，可计算出混凝土的真实约束度。假定预设的约束度 γ'_R 是 0.5，可看出混凝土真实约束度偏高，得到偏保守的开裂风险。

2.2 荷载控制模式下的弹性应变理论 混凝土开裂全过程仿真试验机每个循环过程中如果荷载不恒定，则由变形协调可得混凝土弹性应变增量为：

$$\Delta \varepsilon^e(t_i) = \frac{\varepsilon(t_i) E_S A_S}{E_c(t_i) A_c} \quad (4)$$

则总弹性应变为：

$$\varepsilon^e = \sum_{i=1}^n \varepsilon^e(t_i) = \frac{E_S A_S}{A_c} \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon(t_i)}{E_c(t_i)} \quad (5)$$

假定约束试件的变形为变形阈值 ε_0 ，保持弹性模量不变，则累加的弹性应变为：

$$\varepsilon^e = \frac{E_S A_S}{E_c A_c} \sum_{i=1}^n \varepsilon(t_i) = n \varepsilon_0 \frac{E_S A_S}{E_c A_c} \quad (6)$$

又 $n \varepsilon_0 (n \varepsilon_{cumulative}^e)$ 是基于传统变形分离方法得到的累计弹性应变，则混凝土的真实弹性应变为：

$$\varepsilon_{true}^e = \varepsilon^e + \varepsilon_{cumulative}^e = \left(1 + \frac{E_S A_S}{E_c A_c}\right) \varepsilon_{cumulative}^e \quad (7)$$

若 $\frac{E_S A_S}{E_c A_c} = \Omega$ ，则混凝土的真实弹性应变为：

$$\varepsilon_{true}^e = (1 + \Omega) \varepsilon_{cumulative}^e \quad (8)$$

根据不同应变分离模式下的混凝土累计弹性应变，可以看出，若试验单次循环不保证应力恒定，则混凝土真实弹性应变更高，导致采用传统应变分离模式高估了混凝土的徐变能力。

2.3 位移直接测量和自动补偿原理 采用直接测量的方法，也是本文中混凝土开裂全过程仿真试验系统选用的测量方法。将位移传感器固定于石英玻璃棒（其线膨胀系数较小，约为 $1 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ ）的一端，再采用预埋件将石英玻璃棒直接埋入混凝土开裂全过程仿真试验系统混凝土试件模板的端部，保证石英玻璃棒在混凝土浇筑时不发生倾斜移动，待混凝土初凝后，将预埋件去除，使石英玻璃棒带动位移传感器与混凝土试件同步变形，从而保证位移传感器测量出混凝土试件的实际变形，避免引入不必要的测量误差。

此外，由于大体积混凝土温变速率较薄壁结构混凝土更慢，因此，在系统中添加了位移自动补偿功能，进一步降低位移测量系统的误差，公式如下：

$$l = l^{mea} - \alpha_{qua} \Delta T_{qua} l_{qua} \quad (9)$$

式中： l^{mea} 是 LVDT 测量的数据； l_{qua} 是石英棒的长度，为 1100 mm； α_{qua} 是石英棒的热膨胀系数，约为 $0.8 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ ； T_{qua} 是试验过程中的温度变化量。

3 混凝土开裂全过程仿真试验系统

研发的新型混凝土开裂全过程仿真试验机系统，主要用于混凝土温度应力试验，既可以进行不同温度历程、不同约束程度和不同环境下的试验，测定混凝土弹性模量、线膨胀系数、自生体积变形、徐变、干缩变形、抗拉强度、极限拉伸值等力学参数，特别是早龄期混凝土的热力学参数，还可以对自然因素影响下的温度应力和开裂机理进行仿真，评判混凝土在不同温控措施下混凝土开裂特性，为工程高质量建设提供科技支撑。该试验机系统主要包括温度控制系统、位移控制系统、荷载测量系统、环境模拟系统和软件系统。效果图和实物图见图1和图2。

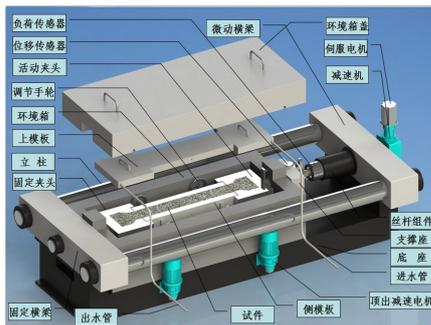


图1 混凝土开裂全过程试验机效果图

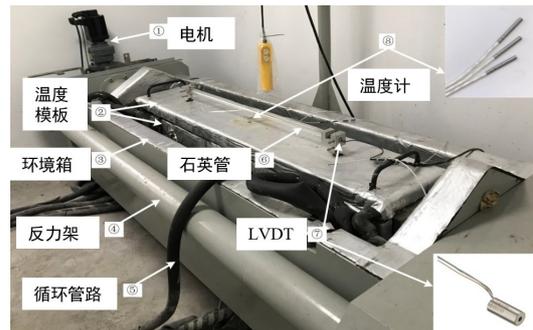


图2 混凝土开裂全过程仿真试验系统实物图

3.1 温度控制系统 温度控制系统主要包括加热/制冷装置以及循环系统(图3)。传感器可以测得循环介质、介质进出、混凝土内部等部位的温度值。根据预设温控模式，通过电脑自动调节模板中循环介质的温度来间接控制混凝土温度，温度控制系统的控温范围是 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，满足混凝土任意温度变化的需求。

该实验系统的温度控制模式不仅可满足工业与民用建筑、路桥、核工业建筑等混凝土温度变化较快的要求，还可以满足水工混凝土结构日降温 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的要求，这对于实验室内实现大体积混凝土精准温控模拟具有非常重要的意义。图4给出了基于混凝土开裂全过程仿真试验系统获取的 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d} \sim 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的温度历程模拟。

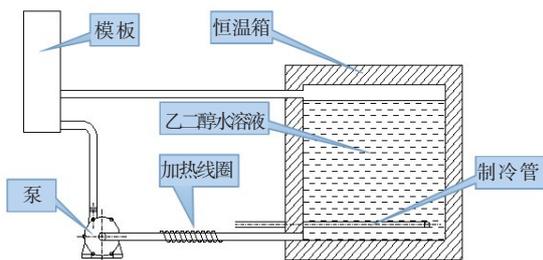


图3 温控系统组成示意图

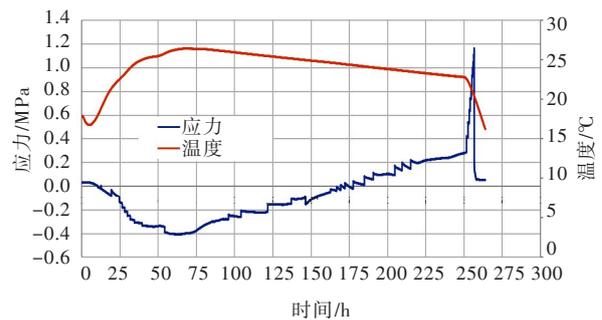


图4 混凝土温度-应力历程

3.2 位移控制系统 本设备的位移测量方式的优点在于改进位移测量方式。为了消除夹头变形、反力架变形，以及试件与夹头间的空隙对变形测量的影响，本文设备采用直接测量的方式，将位移传感器固定于石英玻璃棒(其热膨胀系数较小，约为 $1\text{ }\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$)的一端，再采用预埋件将石英玻璃棒直接固定于试验机混凝土试件模板的上部；待混凝土硬化后，将预埋件去除，使石英玻璃棒带动位移传感器与混凝土试件同步变形，保证位移传感器测量出混凝土试件的真实变形。试验机系统的基础是位移数据，采用位移直接测量方式较传统设备采用的位移间接测量方式(位移传感器多布置于试验机金属夹头或反力架上)更合理。

3.3 荷载测量系统 该系统通过安装于试验机端部的荷载传感器直接测量约束试件荷载，以此监测混凝土压/拉应力发展过程；本系统可实现拉压双向 200 kN 的加载要求，最大拉应力可达 8.9 MPa，可对普通混凝土、高强/高性能混凝土、纤维混凝土等进行约束试验，确保满足多种混凝土性能试验，获取有效的开裂参数。

3.4 环境模拟系统 通过安装于试验机环境箱内部的控件，可以实现对混凝土环境边界的模拟，如图 5 所示。环境模拟系统可以实现：①模拟混凝土浇筑后的环境边界，与混凝土自身水化热耦合，实现环境温度的模拟；②通过湿度控制器，调控环境箱内的环境湿度；③通过风速调节器，调控试件周边风速大小，模拟环境风速对混凝土的影响。

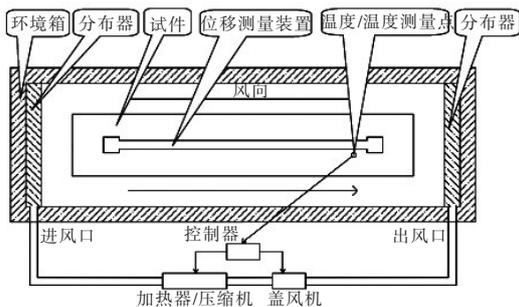


图 5 湿度控制系统示意图

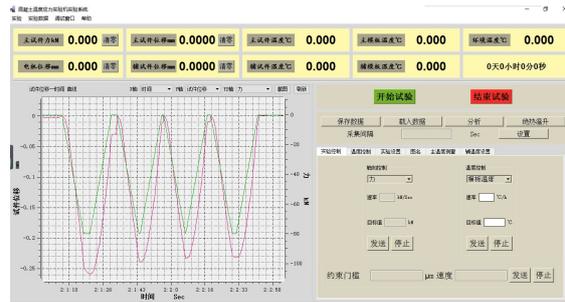


图 6 新型试验机软件界面

3.5 控制软件系统 混凝土温度应力试验机的软件操作系统满足：①能够实时显示各采集数据，快速响应；②接口丰富，可与其他采集设备接口兼容；③界面友好，易学、易懂、易操作；④数据自动存盘，并提供多种保存格式，便于后续数据处理。图 6—图 9 是新型试验机的操作软件主界面，可以实现任意温度历程、不同约束度、混凝土材料参数实时计算等功能模块。

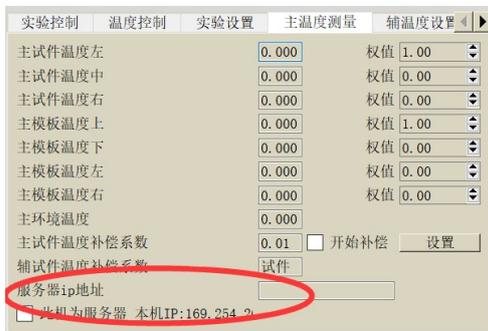


图 7 多机无限远程控制



图 8 变约束度功能



图 9 混凝土弹性模量计算模块

4 仿真试验系统功能介绍

(1)从浇筑开始全过程跟踪混凝土真实工作状态下的材料特性和温度应力历程，真实反映工程实际；

(2)直接测定混凝土真实材料特性，特别是早龄期混凝土的抗拉强度、弹性模量、绝热温升、线膨胀系数、干缩变形、极限拉伸值、徐变、温度应力、开裂应力、开裂温度，以及开裂敏感性等多达 11 项材料特性，解决传统试验设备性能单一、试件尺寸各异等缺点，极大提升混凝土材料数据的有效性；

(3)评判混凝土在设计通水冷却工况、不同约束模式、不同养护龄期、不同降温速率，以及温度骤降环境条件下混凝土实际性能，揭示混凝土真实抗裂和开裂特性；真实反映混凝土工程不同部位的约束历程，并评价开裂风险，提早预警；设定任意温度历程，考察温度历程对混凝土温度应力及开裂风险的影响，为预防混凝土的开裂提供最优材料配比和施工期温控建议。

5 基于试验和仿真的混凝土早龄期抗裂特性

金沙江乌东德拱坝为 300m 级特高拱坝，全坝使用低热水泥混凝土，在国内外尚属首次。基于混凝土开裂全过程仿真试验机，对乌东德大坝低热水泥混凝土的强度发展规律、抗裂特性和开裂机理进行了研究，从温控历程、约束度控制以及混凝土原材料配比等方面为提高乌东德大坝施工的安全性提供多项技术支撑。这里通过试验研究，对比分析低热水泥和中热水泥混凝土早龄期抗裂特性。同时进行相同工况下的仿真计算，与试验对比分析，相互验证。

混凝土温度应力表示如下：

$$\sigma = R \cdot K_p \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (10)$$

式中： σ 为温度应力； R 为约束系数； K_p 为混凝土徐变引起的应力松弛系数； E 为混凝土弹性模量； α 为混凝土线膨胀系数； ΔT 为混凝土温差。

为了防止裂缝产生，必须控制温度应力不超过允许拉应力，即抗拉强度与温度应力的比值大于安全系数。

$$\frac{f_t}{\sigma} \geq K \quad (11)$$

式中： σ 为温度应力； f_t 为混凝土抗拉强度； K 为安全系数。

5.1 混凝土抗裂特性试验结果 试验室实现了模拟大体积混凝土真实环境、约束和温降条件下的温度应力历程，得到了低热和中热水泥混凝土温度应力历程曲线(图 10)、抗裂安全系数对比(图 11)、早龄期低热和中热水泥混凝土松弛能力(图 12)以及不同约束度条件下低热和中热水泥混凝土开裂特性(图 13)。可以看出，低热水泥混凝土在早龄期 3 d、7 d 和 14 d 的开裂温差分别为 5.9、7.1 和 9.2 °C，开裂温差与龄期正相关，表现出混凝土的抗裂能力随龄期不断增长的特点。虽然低热水泥 14d 龄期抗拉强度低于中热水泥混凝土(即图 10 所示的应力峰值)，但低热水泥混凝土 14 d 的开裂温差与中热水泥混凝土 14d 龄期的开裂温差值(8.7 °C)相差不大，说明低热水泥混凝土 14 d 龄期的抗裂能力与中热水泥混凝土基本持平，这一现象的主要原因是由于低热水泥混凝土的高徐变/松弛能力(图 12)使得混凝土承受的温差有所提高，因此针对早龄期混凝土的开裂风险评价，不能采取抗拉强度等单一评价指标，这也是早龄期混凝土与成熟混凝土的主要区别(成熟混凝土松弛能力很低，对削减应力贡献不大)。需说明的是，位移达到约束阈值后，系统启动使位移归零，实现试件全约束状态，故图 10 和图 11 中应力过程线会出现台阶或者突降，是必要反应。

试验结果同时表明，多因素耦合条件下，低热水泥混凝土充分发挥水化温升低、徐变强的优势，降低温度应力幅值，抗裂安全系数(强度/应力)全龄期高于中热水泥混凝土。以上成果是 14 天内

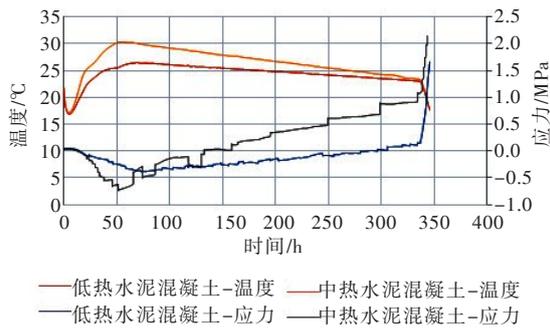


图10 低热和中热水泥混凝土温度应力历程曲线

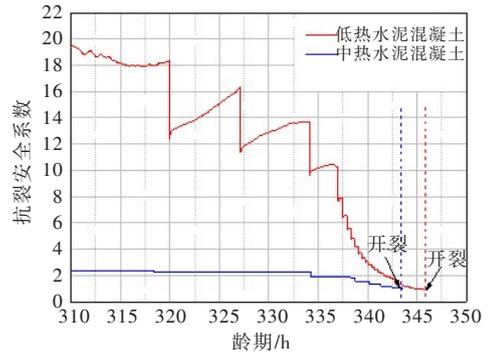


图11 低热和中热水泥混凝土抗裂安全系数对比

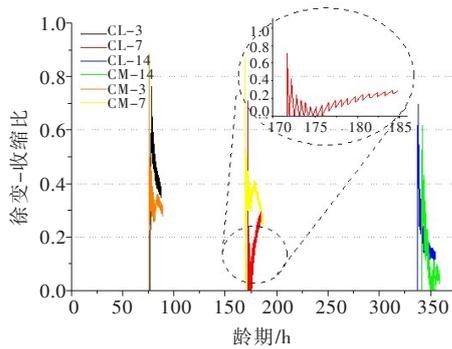


图12 早龄期低热和中热水泥混凝土松弛能力^[16]

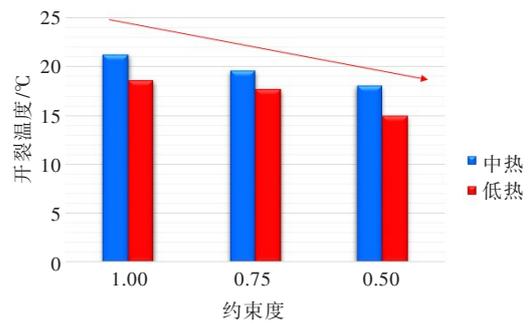


图13 不同约束度下低热和中热水泥混凝土开裂特性

的计算成果，属于早龄期混凝土抗裂特性分析。

5.2 混凝土抗裂特性仿真结果 图14为不同约束度下混凝土抗裂特性试验结果与仿真结果对比，图15为混凝土抗裂特性温度与应力仿真计算云图，从这些图可以看出，100%约束度条件下，随着凝

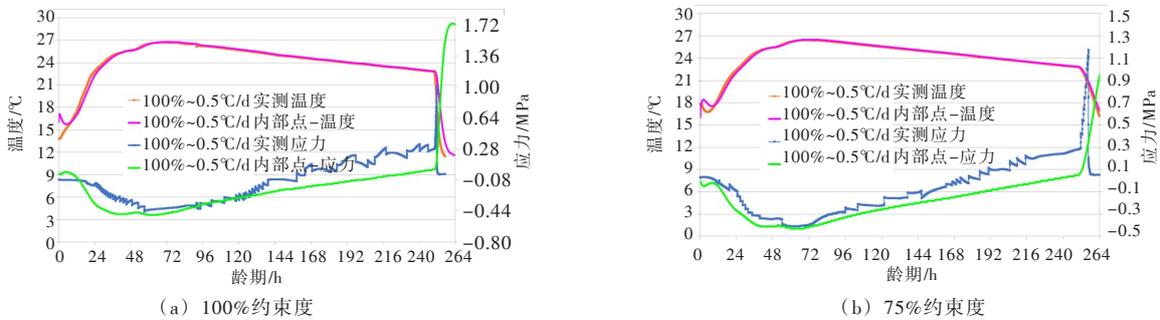


图14 不同约束度下混凝土抗裂特性试验结果与仿真结果对比

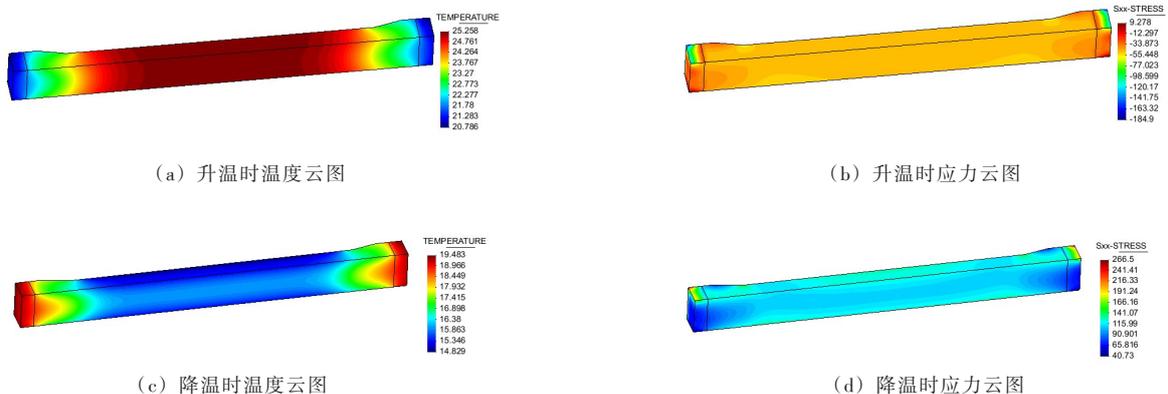


图15 混凝土抗裂特性温度与应力仿真计算云图

土水化反应, 混凝土温度逐渐升高, 随之而来的混凝土压应力逐渐增大; 最高温度过后, 温度逐渐降低, 混凝土压应力减小直至转化为拉应力; 75%约束度条件下, 混凝土温度和应力变化规律同100%约束度的情况, 当混凝土由16℃温度升到27℃的最高温度时, 混凝土最大压应力约为0.3 MPa, 仿真和实验结果很相近。以上成果是10天内的计算成果, 都属于早龄期抗裂特性分析。

基于数值仿真计算的混凝土约束应力结果与试验值较为接近, 表明采用数值计算方法可以作为试验手段的补充和校核; 数值计算模型的建立可以在较短的时间内实现长龄期约束应力测试, 为优化大坝低热水泥混凝土温度控制曲线, 提供数值计算基础。

6 结论

(1) 该仿真试验系统可直接获取1~3天混凝土材料参数和抗裂性能, 弥补常规方法缺少早龄期数据的缺陷; 真实反映工程实际, 包括不同约束程度、不同降温速率及不同环境条件下混凝土真实温度应力, 直接测得混凝土真实材料特性, 包括弹性模量、热膨胀系数、徐变、自生体积变形等基本材料力学参数, 特别是混凝土早龄期的材料特性, 为仿真计算奠定坚实基础。

(2) 混凝土开裂全过程仿真试验系统可以直接评判多因素耦合条件下(通水冷却、不同约束、不同养护、不同降温速率, 以及不同湿度、风速、温度骤降环境等)混凝土实际性能, 揭示混凝土真实抗裂和开裂特性。

(3) 以金沙江乌东德300 m级特高拱坝, 全坝使用的低热水泥混凝土为例, 开展了基于试验和仿真的混凝土早龄期抗裂特性研究, 试验结果表明, 低热水泥混凝土凭借早龄期阶段的高徐变/松弛能力, 使其14 d龄期的抵抗快速温变的能力与中热水泥混凝土持平。

(4) 基于数值仿真计算的混凝土约束应力结果与试验值较为接近, 表明采用数值计算方法可以作为试验手段的补充和校核; 数值计算模型的建立可以在较短的时间内实现长龄期约束应力测试, 为优化大坝低热水泥混凝土温度控制曲线, 提供数值计算基础。

参 考 文 献:

- [1] 过镇海. 钢筋混凝土结构原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [2] 袁勇. 混凝土早期裂缝控制[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [3] MEHTA P K, MONTEIRO J M. Concrete: Microstructure, Properties and Materials[M]. McGraw Hill, 2005.
- [4] FIB. Structural concrete: textbook on behaviour, design and performance, updated knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990[Z]. Fédération internationale du béton (Fib), 1999.
- [5] DARQUENNES A, STAQUET S, DELPLANCHE O M, et al. Effect of autogenous deformation on the cracking risk of slag cement concretes[J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33: 368-379.
- [6] BENBOUDJEMA F, TORRENTI J M. Early-age behaviour of concrete nuclear containments [J]. Nuclear Engineering and Design, 2008, 238(10): 2495-2506.
- [7] DARQUENNES A, STAQUET S, ESPION B. Behaviour of slag cement concrete under restraint conditions[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2011, 15(5): 1017-1029.
- [8] JEON S J, CHOI M S, KIM Y J. Advanced assessment of cracking due to heat of hydration and internal restraint [J]. ACI Materials Journal, 2008, 105(4): 325-333.
- [9] BRIFFAUT M, BENBOUDJEMA F, TORRENTI J M, et al. Numerical analysis of the thermal active restrained shrinkage ring test to study the early age behavior of massive concrete structures [J]. Engineering Structures, 2011, 33(4): 1390-1401.
- [10] KRAAI P. A proposed test to determine the cracking potential due to drying shrinkage of concrete[J]. Concrete Construction. 1985, 30(9): 775-778.
- [11] AASHTO. Standard practice for estimating the cracking tendency of concrete[S]. Washington, DC: American

- Association of State and Highway Transportation Officials, 1996: 34–99 .
- [12] BREITENBUCHER R . Investigation of thermal cracking with the cracking-frame[J] . Materials and Structures, 1990, 23(3): 172–177 .
- [13] SPRINGENSCHMID R, BREITENBUCHER R, MANGOLD M . Development of the cracking frame and the temperature–stress testing machine[C]//Thermal Cracking in Concrete at Early Ages . E&FN SPON, 1994 .
- [14] BLOOM R, BENTUR A . Restrained shrinkage in high strength concrete[C]//Proceedings of the Symposium on Utilization of High Strength Concrete . 1993 .
- [15] KOVLER K . Testing system for determining the mechanical behavior of early–age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage[J] . Materials and Structures, 1994, 27(170): 324–330 .
- [16] XIN J, ZHANG G, LIU Y, et al . Environmental impact and thermal cracking resistance of low heat cement (LHC) and moderate heat cement (MHC) concrete at early ages[J] . Journal of Building Engineering, 2020 (32): 101668 . doi: 10.1016/j.job.2020.101668 .

Research on crack resistance of early age concrete based on experiment and simulation

WANG Zhenhong¹, ZHANG Guoxin¹, LIU Yi¹, XIN Jianda¹, YANG Ning², QIAO Yu²

(1. Department of Structures and Materials, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: there are obvious defects in the current research methods of concrete crack resistance, which cannot consider the process of concrete temperature change in engineering practice, the constraint state of concrete structure, and the crack resistance characteristics of early age stage. In order to solve this problem, China Institute of Water Resources and Hydropower Research independently developed the whole process simulation test system of concrete cracking. The system can not only study the anti-cracking performance of concrete in the whole age, but also obtain the real temperature history, concrete material parameters under different constraint conditions, especially the parameters before the age of 3 days. It can also carry out simulation calculation, and test the results with each other. It is proved that the real crack resistance of concrete is analyzed. The research method has been successfully applied in the construction process of Wudongde super high arch dam, which provides a scientific and technological support for the evaluation of crack resistance characteristics of low heat cement concrete and the optimization of temperature control curve, as well as a new method and idea for the evaluation of crack resistance of concrete.

Keywords: concrete; thermal stress; early age; test; crack resistance

(责任编辑: 祁 伟)