

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.03.003



早龄期约束水泥砂浆环开裂预测模型分析

胡 辉^a, 陈朝晖^a, 王晓莹^a, 陈 科^b, 王 新^b, 陈 珂^a

(重庆大学 a. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室;

b. 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘 要:采用约束圆环试验研究了早龄期水泥砂浆的应力变化规律与开裂趋势。应用早龄期砂浆水化热模型、收缩与徐变等预测分析模型,建立了考虑温度、干缩与自收缩、徐变及硬化等多种效应综合作用下的约束水泥砂浆环早龄期时变应力分析模型,讨论了约束钢环与砂浆环的相对约束刚度对钢环约束效应的影响,提出了圆环开裂预测因子以分析约束水泥砂浆环的开裂趋势,与实际观察结果和数值分析结果的对比表明,上述理论分析与预测模型是合理并适用的。

关键词:圆环试验; 开裂; 水化热; 干燥收缩; 徐变

中图分类号: TU502.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)03-0019-07

Cracking tendency prediction model of early-age restraint mortar ring

Hu Hui^a, Chen Zhaohui^a, Wang Xiaoying^a, Chen Ke^b, Wang Xin^b, Chen Ke^a

(a. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University), Ministry of Education;

b. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: The restraint ring test is used to assess the restraint stresses development and cracking potential for early-age cement based construction materials. An analytical expression is presented to estimate the time-dependent residual stresses of the restraint mortar ring considering the synthetic effects of hydration heat, autogenous shrinkage, drying shrinkage, creeping and restraint by the steel ring. The relative stiffness of the steel ring to the mortar ring is discussed. The tendency and age of cracking of the restraint mortar ring is predicted by introducing the cracking tendency factor. The present analytical method demonstrates significant agreement with the restraint ring test and numerical simulation by FEM.

Key words: ring test; cracking; hydration; drying shrinkage; creep

近年来,随着工程结构向大跨超高层发展,高强 高性能混凝土日益受到工程界的广泛关注。而高强

收稿日期: 2014-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(11272362); 教育部科学技术研究重大项目(315039); 中央高校基本科研业务费资助(CDJZR12245501)

作者简介: 胡辉(1992-),男,主要从事混凝土耐久性研究,(E-mail)huhui1014@foxmail.com。

陈朝晖(通信作者),女,教授,博士生导师,(E-mail)czh1222@163.com。

Received: 2014-10-30

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 11272362); Foundation for Key Program of Ministry of Education, China (No. 315039); Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (No. CDJZR12245501).

Author brief: Hu Hui (1992-), main research interest: durability of concrete, (E-mail)huhui1014@foxmail.com.

Chen Zhaohui(corresponding author), professor, doctoral supervisor, (E-mail)czh1222@163.com.

尤其是高性能混凝土由于水灰比较低,易导致混凝土尤其是水泥砂浆基质材料的收缩变形增大^[1-2],若变形受到约束,则在其早期由于砂浆强度不足将导致混凝土结构内部开裂,不利其受力性能与耐久性能的发展。

在混凝土早期硬化过程中,由于水化反应及其伴随的内部温度、湿度变化,将主要导致水泥砂浆基质材料发生显著的体积变化,而骨料的体积变形相对很小;此外,混凝土硬化过程中,水泥砂浆基体的强度与流动性变化也远较骨料显著,因而,骨料对于水泥砂浆基体而言,构成了对其体积变形尤其是收缩变形的约束,使水泥砂浆基体内部及其与骨料的界面处易产生裂缝。

早龄期混凝土或砂浆开裂的试验研究方法包括圆环试验^[3-4]、平板约束试验^[5]和单轴约束试验^[6-7]等,其中圆环试验以其试验简单、操作容易、开裂快速等优点而被较多采用。但目前的研究多限于通过观察试件表面裂纹来确定其开裂时间和开裂情况,对其内部开裂机制的理论分析与数值模拟不足,使服役期混凝土性能定量分析以及混凝土结构耐久性定量分析预测缺乏有力依据^[8]。

为此,本文重点研究约束状态下早龄期水泥砂浆基体的应力发展及其裂缝产生情况,将采用约束圆环试验研究其在非荷载条件下的应力变化规律与开裂趋势,建立考虑温度、收缩、徐变及硬化等多种效应的综合作用下,早龄期约束水泥砂浆环时变应力分析模型与裂缝开展趋势预测模型,以期为后续早龄期混凝土裂缝衍生机制研究奠定基础。

1 试验方法与试验数据

1.1 原材料及配合比

试验原材料为:拉法基 PO42.5R 水泥、普通河砂中砂和聚羧酸减水剂,砂浆配合比见表 1。其中,水灰比 $w/c=0.32$,胶砂比 $c/s=1:3$ 。

表 1 砂浆配合比

Table 1 Proportioning of mortar

kg · m ⁻³			
水泥	水	砂	聚羧酸减水剂
586	188	1 758	5.86

1.2 试验方法

依据 ASTM 标准^[9]采用受钢环约束的砂浆环试验,试验装置如图 1,其中 P1 至 P4 为沿径向埋入砂浆环内的温度传感器,由外而内依次放置于砂浆

环的四分点处。构件浇筑时环境温度为 30 ℃,相对湿度大于 50%,养护 24 h 后脱模并移入恒温 20 ℃、相对湿度为 50%±4% 的干燥室。试验进行至观察到砂浆表面有贯通裂缝时止。

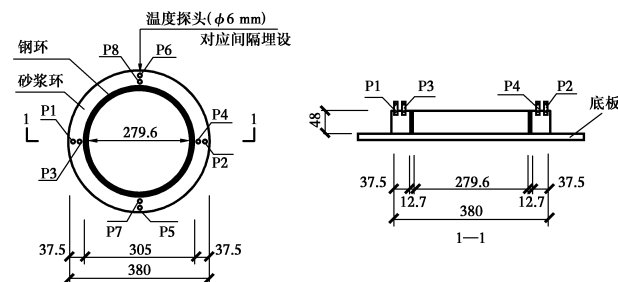


图 1 圆环砂浆约束试件(带温度传感器)

Fig. 1 Restraint mortar Ring and Instruments

另同批浇筑同样配比的 100 mm×100 mm×300 mm 棱柱体试件测试砂浆弹性模量、40 mm×40 mm×160 mm 棱柱体试件测试抗折与抗压强度、25 mm×25 mm×280 mm 试件测试自由收缩,各试件的养护方法均与圆环试件一致,测定龄期相继为 1~7、10、14 和 28 d。浇筑 100 mm×100 mm×400 mm 棱柱体试件测试其徐变,同时制作相应棱柱体测抗压强度及收缩变形。徐变加载应力为棱柱体抗压强度的 40%,拆模 7 d 后上架,相继测得龄期为 1、3、5、7、14 和 28 d 的试件变形值,扣除相同环境条件下收缩试件的变形值,得到试件静力受压下的徐变值。

1.3 试验数据分析

约束砂浆环的第一条裂缝出现在第 25 d,试件抗压强度、抗拉强度与弹性模量如图 2 所示。

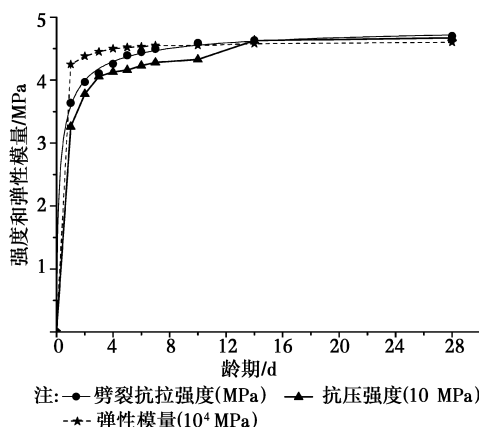


图 2 砂浆强度及弹模发展曲线

Fig. 2 Compressive and splitting tensile strengths, and elastic modulus of mortar

由图可见,砂浆的弹性模量在第 1 d 内增长迅速,而后缓慢发展,至第 5 d 逐渐趋于稳定;抗拉强

度在前 7 d 发展较为迅速,随后缓慢上升;抗压强度在前 3 d 快速增长,此后仍有一定幅度的提升。由图 3 测得的温度变化曲线可见,因水泥的水化作用,在 24 h 内砂浆的温度迅速升高并达到峰值,随后缓慢下降。26.7 h 后,环境温度降为 20 °C,砂浆环内温度迅速降低,直至趋于环境温度。由于砂浆环的厚度较小,径向各点处温度梯度不明显。

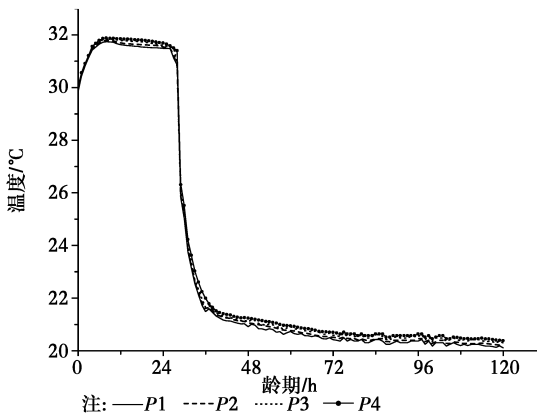


图 3 砂浆温度发展曲线

Fig. 3 measured temperature development of mortar

棱柱体砂浆试件的自由收缩应变随龄期的发展见图 4。可见,收缩变形在前 3 d 增长较快,而后增速减缓,至 28 d 龄期仍呈上升趋势。以往研究表明,砂浆早龄期的收缩主要包括干燥收缩和自收缩^[10],目前尚未有较理想的自收缩预测模型。Yang 等^[11]的试验研究结果显示,对于低水灰比的混凝土材料,其自收缩值在浇筑后 2 d 内发展显著。推测其原因可能是由于低水灰比混凝土中自由水含量低,早期水泥水化过程使自由水消耗较快,为保证水化的进行,只有消耗其内部毛细孔水,造成毛细孔产生负压并引起水泥石的自收缩。根据 Wang 等^[12]对水灰比同为 0.32 的棱柱体构件自收缩试验结果建立拟合模型,其 28 d 的相对自收缩值为 200×10^{-6} ,则经验自收缩预测模型如下:

$$\epsilon_{AS} = 237 \frac{t^{0.3}}{t^{0.3} + 0.5} \times 10^{-6} \quad (1)$$

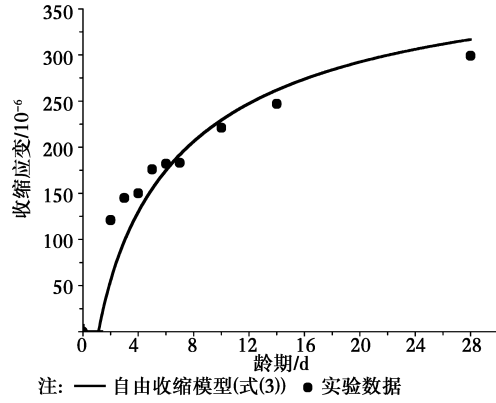
在试件内部均匀干缩条件下,CEB/FIP MC90 干缩模型如式(2)所示,它具有参数少、适应性较好的特点^[13]:

$$\epsilon_{DS}(t, t_{DS}) = \epsilon_{DS}(f_{c28}) \beta_{RH} \beta_{DS}(t, t_{DS}) \quad (2)$$

式中: $\epsilon_{DS}(f_{c28})$ 为砂浆的 28 d 收缩值; β_{RH} 为环境相对湿度; $\beta_{DS}(t, t_{DS})$ 与试件几何尺寸有关; t_{DS} 为干缩开始时间,由此得到棱柱体干缩模型:

$$\epsilon_{DS}(t) = 512 \left(\frac{t}{t+9.8} \right)^{0.5} \times 10^{-6} \quad (3)$$

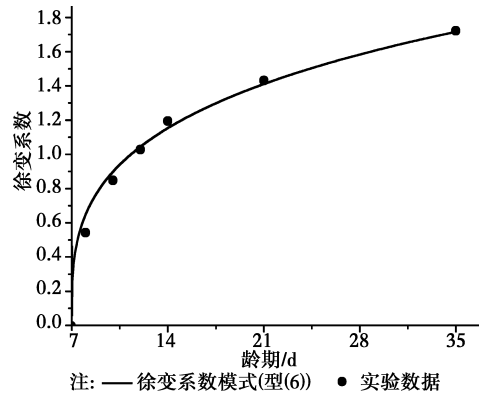
预测的棱柱体干缩曲线示于图 4,可见该预测曲线与试验数据点变化趋势一致,总体吻合较好。



注: — 自由收缩模型(式(3)) ● 实验数据

图 4 自由收缩实测值与预测模型

Fig. 4 Measured shrinkage strains and prediction model



注: — 徐变系数模式(型(6)) ● 实验数据

图 5 徐变系数实测值与预测模型

Fig. 5 Measured Creep coefficient and prediction model

考虑到试件几何尺寸对干缩的影响,修正后的约束砂浆环总收缩值(包括自收缩与干缩)的预测模型为

$$\epsilon_{SH}(t) = \left[512 \left(\frac{t}{t+61.7} \right)^{0.5} + 237 \frac{t^{0.3}}{t^{0.3} + 0.5} \right] \times 10^{-6} \quad (4)$$

棱柱体试件的徐变系数随龄期的变化见图 5。可见,加载的前 2 d 徐变系数增长迅速,随后渐缓,至 28 d 仍呈上升趋势。

分析比较显示,CEB/FIP MC90 徐变模型^[13](式(5))的模拟值与本次试验数据吻合较好(模型拟合值与实测数据的比较见图 5)。

$$\varphi_{CR}(t, t_0) = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \cdot \beta_c(t - t_0) \quad (5)$$

式中: φ_{RH} 、 $\beta_c(t - t_0)$ 分别为与构件相对湿度和名义尺寸有关的系数; $\beta(f_{cm})$ 为构件抗压强度影响系数; $\beta(t_0)$ 为加载龄期影响系数。由此得到如下针对本文试验的棱柱体徐变系数预测模型

$$\varphi_{CR}^p(t, 7) = 3.67 \left[\frac{t-7}{(t-7)+325} \right]^{0.3} \quad (6)$$

考虑到砂浆环尺寸与形状的影响,自任意加载龄期 t_0 起,砂浆环的徐变系数预测模型为:

$$\varphi_{CR}(t, t_0) = 6.0 \left(\frac{1}{0.1 + t_0^{0.2}} \right) \left[\frac{t - t_0}{(t - t_0) + 313} \right]^{0.3} \quad (7)$$

2 早龄期水泥砂浆环约束应力分析

2.1 温度应力分析

2.1.1 水化热温度分析 设约束砂浆环内、外半径分别为 R_1 、 R_2 ,则水泥水化过程的热传导方程为:

$$\frac{\partial T(t, r)}{\partial t} - a \frac{\partial^2 T(t, r)}{\partial r^2} - \frac{a}{r} \frac{\partial T(t, r)}{\partial r} = \frac{Q_m}{c\rho} \quad (8)$$

式中: $a=k/c\rho$, k 、 c 、 ρ 分别为砂浆的导热系数、比热容和密度; $Q_m=dQ/dt$,为水泥水化放热速率,可取为 $Q=Q_0(1-e^{-mt})$ ^[14], Q_0 是单位质量水泥水化放热量,取 340 kJ/kg; m 为水化系数,取 0.312。初始条件为: $T(0, r)=T_c$, T_c 为室温;由于钢环较薄,故可忽略其与约束砂浆环之间的热传导作用,则内外边界均可作为第三类边界条件,即:

$$-k \frac{\partial T(t, r)}{\partial r} = h(T - T_c) \quad (9)$$

式中: T 为圆环表面温度; h 为砂浆与空气的对流换热系数。

利用差分法求解式(8),建立如下约束砂浆环边界内各点的差分格式

$$T_i^j = (1 - \frac{2a\Delta t}{\Delta r^2})T_i^{j-1} + \frac{a\Delta t}{\Delta r^2}[(T_{i+1}^{j-1} + T_{i-1}^{j-1}) + \frac{\Delta r}{2r}(T_{i+1}^{j-1} - T_{i-1}^{j-1})] + \frac{Q_m\Delta t}{c\rho} \quad (10)$$

式中: T 的上标 j 表示时间步;下标 i 表示沿径向的位置。

边界条件的差分格式为

$$\begin{cases} k \frac{T_2^j - T_0^j}{2\Delta r} = h(T_1^j - T_c) \\ k \frac{T_{m+1}^j - T_{m-1}^j}{2\Delta r} = h(T_m^j - T_c) \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)代入式(10),消去 T_0^j 和 T_{m+1}^j ,则约束砂浆环内外边界的温度为

$$\begin{cases} T_1^j = (1 - \frac{2a\Delta t}{\Delta r^2} - \frac{2ah\Delta t}{k\Delta r} + \frac{ah\Delta t}{kr})T_1^{j-1} + \frac{2a\Delta r}{\Delta r^2}T_2^{j-1} + (\frac{2ah\Delta t}{k\Delta r} - \frac{ah\Delta t}{kr})T_c + \frac{Q_m\Delta t}{c\rho} \\ T_m^j = (1 - \frac{2a\Delta t}{\Delta r^2} - \frac{2ah\Delta t}{k\Delta r} - \frac{ah\Delta t}{kr})T_m^{j-1} + \frac{2a\Delta r}{\Delta r^2}T_{m-1}^{j-1} + (\frac{2ah\Delta t}{k\Delta r} + \frac{ah\Delta t}{kr})T_c + \frac{Q_m\Delta t}{c\rho} \end{cases} \quad (12)$$

图 6 对比了砂浆环内部 P4 点温度变化的分析计算曲线与实测曲线,两者吻合较好。

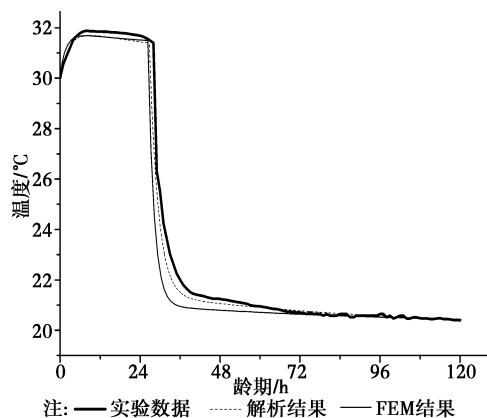


图 6 P4 点温度变化曲线

Fig. 6 Predicting temperature development at point 4

2.1.2 约束温度应力分析 设钢环在整个过程中不产生变形,则由弹性力学理论,可得到以下约束砂浆环的温度应力-应变基本方程

$$\frac{\partial \sigma_r^T}{\partial r} + \frac{\sigma_r^T - \sigma_\theta^T}{r} = 0 \quad (13-a)$$

$$\epsilon_r^T = \frac{du_r^T}{dr}, \epsilon_\theta^T = \frac{u_r^T}{r} \quad (13-b)$$

$$\begin{cases} \epsilon_r^T = \frac{1}{E(t)}(\sigma_r^T - \mu\sigma_\theta^T) + \alpha^T T \\ \epsilon_\theta^T = \frac{1}{E(t)}(\sigma_\theta^T - \mu\sigma_r^T) + \alpha^T T \end{cases} \quad (13-c)$$

边界条件为: $r=R_1$ 时, $u_r^T=0$; $r=R_2$ 时, $\sigma_r^T=0$ 。式中:上标 T 表示与温度有关的变量, E 、 μ 、 α^T 分别为砂浆的弹性模量、泊松比和线膨胀系数,参数 T 为前述分析所得约束砂浆环水化热温度场。

求解方程(13),得到约束温度应力为

$$\begin{cases} \sigma_r^T = -\frac{E(t)\alpha^T}{r^2} \int_{R_1}^r T(r, t) r dr + \frac{E(t)}{1-\mu^2} \left[(1+\mu)C - (1-\mu) \frac{D}{r^2} \right] \\ \sigma_\theta^T = \frac{E(t)\alpha^T}{r^2} \int_{R_1}^r T(r, t) r dr + \frac{E(t)}{1-\mu^2} \left[(1+\mu)C - (1-\mu) \frac{D}{r^2} \right] - E(t)\alpha^T \end{cases} \quad (14)$$

将钢环对混凝土的约束视为完全刚性,这对于弹性模量较小、流动性较高的早期砂浆是适用的。但随着龄期的增长,砂浆弹性模量增大,钢环在砂浆环的收缩作用下会产生收缩变形,从而降低对砂浆环的约束作用,则忽略钢环变形可能高估砂浆环的约束应力^[15]。根据钢环与砂浆环的变形协调条件,可得钢环与砂浆环之间的接触应力为

$$\Delta p(t) = \frac{R_s(t)E(t)\Delta \epsilon(t)}{(R_2^2 + R_1^2)/(R_2^2 - R_1^2) + \nu} \quad (15)$$

式中: R_s 为约束度,即

$$R_s(t) = \frac{A_s E_s}{A_s E_s + A_c E(t)} \quad (16)$$

则考虑砂浆环与钢环变形协调作用的砂浆环应力增量为

$$\begin{cases} \Delta \sigma_\theta(t) = \frac{R_2^2/r^2 + 1}{R_2^2/R_1^2 - 1} \Delta p(t) \\ \Delta \sigma_r(t) = \frac{R_2^2/r^2 - 1}{R_2^2/R_1^2 - 1} \Delta p(t) \end{cases} \quad (17)$$

由式(14)与(17)分析得到约束砂浆环温度应力变化曲线,如图 7 所示。

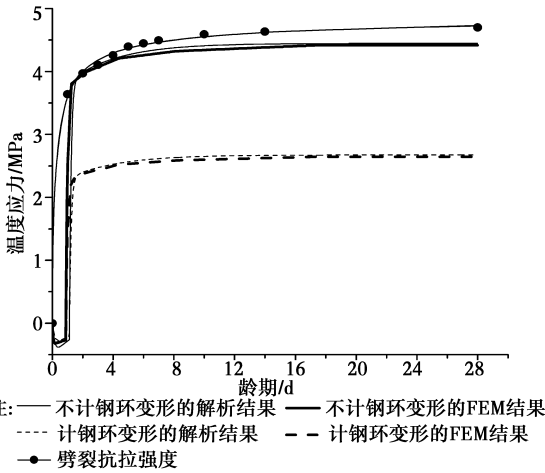


图 7 P4 点约束温度应力变化

Fig. 7 Thermal residual stress development with age at point 4

图 7 同时比较了采用 ABAQUS 软件的 FEM 分析结果。FEM 分析首先将热传导方程和确定的水化热模型代入 ABAQUS 温度场模块,求出砂浆环的温度场后,再采用顺序耦合法,将分析所得温度场作为预定义场进行热应力数值分析,从而得到砂浆环的温度应力。由图 7 可见,砂浆环第 1 d 水化过程剧烈,温度较高,砂浆环中径向拉应力增长迅速;约 2 d 后,水化过程逐渐稳定,温度应力趋于平稳。而随着砂浆弹性模量的增大,钢环在砂浆环的收缩作用下产生了变形,降低了钢环对砂浆环的约束作用,导致约束收缩条件下砂浆环的实际应力较不考虑二者变形协调的为小(图中,实线是未考虑钢环与砂浆环变形协调的结果,虚线为考虑二者变形协调的结果)。数值模拟与理论分析的结果吻合很好。

2.2 约束收缩应力分析

设砂浆环内部相对湿度以及环向收缩变形为均匀分布,根据弹性力学理论,砂浆环约束收缩应力-应变满足与温度应力-应变类似的关系。

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r^{SH}}{\partial r} + \frac{\sigma_r^{SH} - \sigma_\theta^{SH}}{r} = 0 \\ \epsilon_r^{SH} = \frac{du_r^{SH}}{dr}, \epsilon_\theta^{SH} = \frac{u_r^{SH}}{r} \\ \epsilon_r^{SH} = \frac{1}{E(t)} (\sigma_r^{SH} - \mu \sigma_\theta^{SH}) + \epsilon^{SH} \\ \epsilon_\theta^{SH} = \frac{1}{E(t)} (\sigma_\theta^{SH} - \mu \sigma_r^{SH}) + \epsilon^{SH} \end{cases} \quad (18)$$

式中:上标 SH 表示与收缩有关的变量。

与温度应力不同的是,收缩应力是由于收缩变形受到约束所致,因此,本构关系中的自由应变为无约束状态下的收缩变形^[16],即式(18)中的 ϵ^{SH} 可由式(4)或实测收缩值确定。同理,需考虑砂浆环与钢环间的相对变形影响,见式(15)~(17)。

图 4 中实测干缩数据与模型存在一定误差,考虑高性能砂浆中前期收缩以自收缩为主,故选取合理准确的自收缩模型以及修正后的干缩模型能改善这一点,使得拟合出的总收缩变形能更贴近试验。因此,采用基于修正模型得出的约束砂浆环的总收缩变形(即式(4))计算其收缩应力。

图 8 给出了砂浆环 P4 点的约束收缩应力变化曲线。其中,FEM 数值分析基于 CEB/FIP MC90 干缩模型,考虑了钢环协调变形的约束作用,在二者边界上引入了位移协调条件,编写了用户子程序通过 UMAT 与 ABAQUS 接口,得到砂浆环的径向收缩应力。由图 8 可见,理论分析与 ABAQUS 有限元分析得到的约束收缩应力非常一致。且若不计钢环与砂浆环相对刚度的变化,将大大高估约束收缩应力,使预测开裂时间提前。

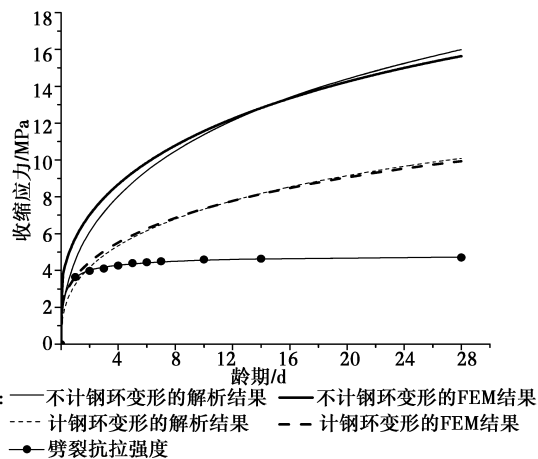


图 8 P4 点约束收缩应力变化

Fig. 8 Shrinkage residual stress development with age at point 4

此外,与图 7 的同期同处温度应力相比,图 8 显示出的约束收缩应力大于约束温度应力,这表明约束收缩是导致早龄期砂浆产生裂缝的最主要原因。

即使考虑了钢环相对约束效应的变化,约束收缩应力仍然在较早时期达到甚至超过了同龄期砂浆的抗拉强度,这意味着仅考虑砂浆环的约束收缩应力和温度应力,预测开裂时间要远早于实际开裂时间。显然,早龄期砂浆环内应存在其他因素影响其应力发展,这即是早期砂浆的应力松弛效应。

2.3 松弛与徐变效应分析

在持续应力作用下,砂浆将发生粘性流动即徐变。尤其在早期,砂浆的弹性模量较小,流动性好,徐变较大;当收缩受到约束时,徐变能够松弛 60% 以上的拉应力^[17],对延缓砂浆开裂的作用较大。考虑徐变作用的砂浆应力-应变关系为

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t, t_0)} = \frac{\sigma(t)}{E(t_0)} [1 + \varphi(t, t_0)] \quad (19)$$

式中: $E(t, t_0)$ 为砂浆的有效弹性模量; $E(t_0)$ 为龄期 t_0 时砂浆的弹性模量 $\varphi(t, t_0) = \varphi_{28}(t, t_0) E(t_0) / E(28)$; 为砂浆在持续荷载作用下的徐变系数。

则应力松弛系数可表示为

$$K(t, t_0) = \frac{\sigma(t)}{\sigma(t_0)} = \frac{E(t_0)\varepsilon(t)}{[1 + \varphi(t, t_0)]} \cdot \frac{1}{E(t_0)\varepsilon(t_0)} = \frac{1}{1 + \varphi(t, t_0)} \quad (20)$$

采用增量法计算考虑松弛效应后的砂浆环应力,设每一时间步($t_j - t_{j-1}$)内应力增量为常数,则有:

$$\begin{cases} \Delta\sigma_r(i, j) = K(i, j) [\Delta\sigma_r^T(j) + \Delta\sigma_r^{SH}(j)] \\ \Delta\sigma_\theta(i, j) = K(i, j) [\Delta\sigma_\theta^T(j) + \Delta\sigma_\theta^{SH}(j)] \end{cases} \quad (21)$$

第 i 时刻总的应力可由叠加原理得到。

图 9 给出 P4 点总约束应力(包括约束温度应力、约束收缩应力及应力松弛效应)随龄期的变化曲线,包括本文理论模型与 FEM 数值分析的结果。

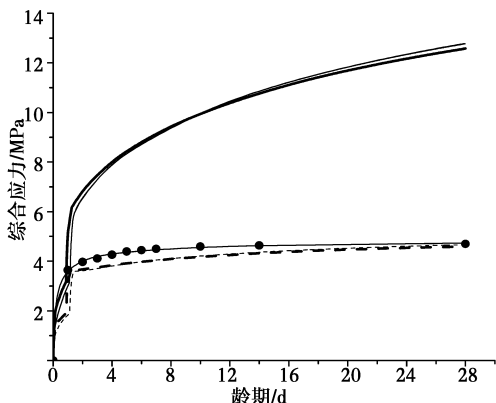


图 9 P4 点综合约束应力变化

Fig. 9 The actual comprehensive residual stresses development with age at point 4

由图 9 可见,总约束应力呈现早期发展迅速、第 2 d 起缓慢增长的趋势。其中,实线为未考虑砂浆环应力松弛的结果,其值在 2 d 内就远远超出了砂浆的抗拉强度,而虚线为考虑了应力松弛作用的总约束应力,应力值降低了约 70%,至 28 d 左右逐渐接近砂浆的抗拉强度,与实际较吻合。

3 砂浆环开裂预测模型

通常,工程上更为关心构件开裂与否及其开裂时间。为此,定义如下开裂趋势因子 $\beta_{CR}(t)$:

$$\beta_{CR}(t) = \frac{\sigma_{\theta-\max}(t)}{f(t)} \quad (22)$$

式中: $\sigma_{\theta-\max}(t)$ 为砂浆环随龄期发展的环向上最大拉应力, $f(t)$ 为砂浆材料的即时抗拉强度。

$\beta_{CR}(t)$ 趋近于 1, 表示试件或构件接近于开裂, 其对应时间即为开裂时间。图 10 给出了本文约束砂浆环的开裂趋势曲线。

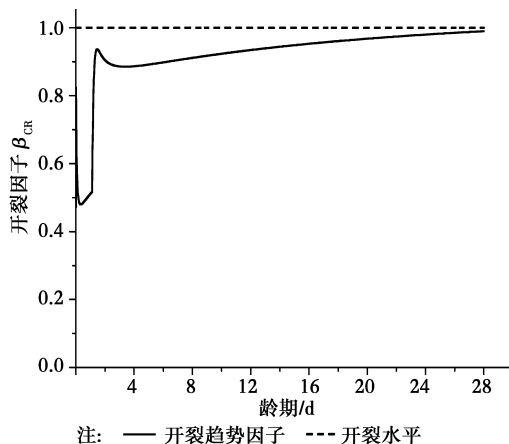


图 10 砂浆环的开裂趋势曲线

Fig. 10 Cracking tendency of early age mortar ring

由图 10 可见,在第 1 d 内,砂浆环中应力增长较快,但砂浆的抗拉强度发展亦很迅速,故 $\beta_{CR}(t)$ 的值较小,开裂可能性较低;至第 2 d,由于砂浆环应力迅速增大,而砂浆强度增长相对缓慢,使 $\beta_{CR}(t)$ 曲线快速上升,并出现尖点;随后,砂浆环的约束应力增长趋势减缓,而此时强度增长提升,因此 $\beta_{CR}(t)$ 呈现下降的趋势;第 3 d 后,由收缩主导的约束应力增长率逐渐超过砂浆强度增长率, $\beta_{CR}(t)$ 又开始呈缓慢上升趋势,至 28 d 左右, $\beta_{CR}(t)$ 的数值接近 1, 即预示砂浆环的开裂,这与实际砂浆环的开裂时间较为一致。

4 结论

试验及其分析结果表明,约束收缩效应是早龄期砂浆开裂的关键因素,而水泥水化热导致的温度

应力、环境湿度变化产生的干缩与水化反应产生的自收缩等约束收缩应力以及砂浆徐变产生的应力松弛效应是影响开裂应力发展的主要因素。

通过约束砂浆环的开裂试验现象与其开裂预测分析结果的比较表明,本文所建立的早期约束砂浆环应力发展分析模型与开裂预测模型是合理的,所提出的开裂趋势因子能较好地描述早龄期砂浆的开裂演化趋势。研究还揭示,砂浆的材料性质如弹性模量、泊松比、强度等的准确测定对约束应力分析、开裂预测的合理性有着重要影响;所选取的水泥水化热过程模型、干缩与自收缩模型、徐变/应力松弛模型等的合理性与准确性对预测结果同样起着关键作用。

参考文献:

- [1] Maruyama I, Teramoto A. Temperature dependence of autogenous shrinkage of silica fume cement pastes with a very low water-binder ratio [J]. *Cement and Concrete Research*, 2013, 50:41-50.
- [2] Pei H F, Li Z J, Zhang B, et al. Multipoint measurement of early age shrinkage in low w/c ratio mortars by using fiber bragg gratings [J]. *Materials Letters*, 2014, 131:370-372.
- [3] Zachary C G, Matthew D D. Viscoelastic properties and drying stress extracted from concrete ring tests [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2011, 33 (2): 171-178.
- [4] Briffaut M, Benboudjema F, Torrenti J M, et al. A thermal active restrained shrinkage ring test to study the early age concrete behaviour of massive structures [J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41 (1): 56-63.
- [5] 刘岩,王培铭,郭延辉,等. 混凝土开裂性能测试多道应力诱导平板式方法 [J]. *建筑材料学*, 2006, 9 (6): 102-105.
- Liu Y, Wang P M, Guo Y H, et al. Study on concrete crack properties by test slab method with stress risers [J]. *Journal of Building Materials*, 2006, 9(6): 102-105. (in chinese)
- [6] Zhang T, Qin W Z. Tensile creep due to restraining stresses in high-strength concrete at early ages [J]. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(3): 584-591.
- [7] 杨杨,江晨晖,许四法. 高性能混凝土早龄期抗拉性能试验研究 [J]. *建筑材料学报*, 2008, 11(1): 94-99.
- Yang Y, Jiang C H, Xu S F. Experimental study on tensile properties of high performance concrete at early ages [J]. *Journal of Building Materials*, 2008, 11(1): 94-99. (in chinese)
- [8] Ma B, Wang X, Liang W, et al. Study on early-age cracking of cement-based materials with superplasticizers [J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(11): 2017-2022.
- [9] ASTM C1581-04. Standard test method for determining age at cracking and induced tensile stress characteristics of mortar and concrete under restrained shrinkage [S]. ASTM International, West Conshohocken, Pa, USA.
- [10] Jiang C H, Yang Y, Wang Y, et al. Autogenous shrinkage of high performance concrete containing mineral admixtures under different curing temperatures [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 61: 260-269.
- [11] Yang Y, Sato R, Kawai K. Autogenous shrinkage of high-strength concrete containing silica fume under drying at early ages [J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(3): 449-456.
- [12] Wang Z L, Li G D. Experimental method and prediction model for autogenous shrinkage of high performance concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 49: 400-406.
- [13] CEB/FIP Model. CEB-FIP model code for concrete Structures [S]. Lausanne, Switzerland: Thomas Telford, 1990.
- [14] 刘睫,陈兵. 大体积混凝土水化热温度场数值模拟 [J]. *混凝土与水泥制品*, 2010, 5: 15-18.
- Liu J, Chen B. Numerical simulation of massive concrete hydrated heat temperature field [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2010, 5: 15-18. (in chinese)
- [15] Sant G. The influence of temperature on autogenous volume changes in cementitious materials containing shrinkage reducing admixtures [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2012, 34(7): 855-865.
- [16] 马一平,李国友,张乐,等. 基于材料科学观点的砂浆塑性开裂本构方程研究 [J]. *建筑材料学报*, 2012, 15 (5): 612-617.
- Ma Y P, Li G Y, Zhang L, et al. Research on multiple elements constitutive equation for plastic cracking of mortar based on material science [J]. *Journal of Building Materials*, 2012, 15(5): 612-617. (in chinese)
- [17] Maia L, Figueiras J. Early-age creep deformation of a high strength self-compacting concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 34: 602-610.