

文章编号: 1000-4750(2012)02-0121-08

早龄期混凝土湿度应力计算与开裂风险评估

高 原, 张 君, 侯东伟

(清华大学土木工程系, 结构工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 该文以现浇混凝土圆柱为例, 建立了自收缩与干燥收缩统一的早龄期混凝土收缩应力解析计算方法, 并采用松弛系数法对混凝土徐变的影响作了修正, 同时对混凝土早期开裂风险进行了分析。应用所建模型, 对不同环境湿度条件、不同尺寸混凝土圆柱的湿度应力进行了计算与分析。结果表明: 混凝土内部湿度随时间的变化幅度是控制湿度应力的主要因素, 混凝土内部湿度与环境湿度差值越小, 干缩应力越小; 徐变参数的取值对混凝土湿度应力的计算影响较大; 构件尺寸对干缩应力也有一定的影响, 柱半径越大, 相同条件下其外表面拉应力越大, 越容易开裂。

关键词: 混凝土; 湿度场; 湿度变形; 湿度应力; 开裂风险

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A

CALCULATION OF MOISTURE INDUCED STRESSES AND EVALUATION OF CRACKING RISK IN EARLY-AGE CONCRETE

GAO Yuan, ZHANG Jun, HOU Dong-wei

(Key Laboratory of Structural Safety and Durability of China Education Ministry,
Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Taking the cast-in-situ concrete column as an example, an analytic model for moisture induced shrinkage stress calculation in early-age concrete is developed in the present paper. The model relied on the relationship between interior humidity and shrinkage strain and the calculation on moisture field in concrete. The influence of creep of concrete on the stresses is taken into account by relaxation coefficient method. The cracking risk of concrete at early-ages is analyzed. Using the model, the effect of the environment humidity and the size of concrete column on the moisture induced stresses are calculated and analyzed. The results show that the variation of the interior humidity inside of concrete with concrete age is the main factor controlling the magnitude of the moisture stresses. The smaller the discrepancy between interior humidity and environment humidity, the smaller the moisture stresses. The parameters related with concrete creep may greatly influence the moisture stresses. In addition, the dimension of concrete column has certain impact on the moisture stresses as well. Under the same environmental conditions, the larger the column, the higher the moisture stresses and the greater the cracking risks.

Key words: concrete; moisture field; moisture deformation; moisture induced stress; cracking risk

混凝土表面裂缝产生的一个重要原因是混凝土表面的干缩应力或称湿差应力。混凝土内部湿度变化将引起混凝土变形, 相对湿度增大, 混凝土会

膨胀, 反之会收缩。混凝土结构中出现干缩裂缝主要有两种情况^[1]: 一是混凝土整体干缩在外部结构约束下引发贯穿性裂缝, 主要发生于构件截面尺寸

收稿日期: 2010-05-11; 修改日期: 2010-08-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(50978143); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009CB623200)

通讯作者: 张 君(1962—), 男, 内蒙古人, 教授, 博士, 博导, 从事混凝土材料及其力学研究(E-mail: junz@tsinghua.edu.cn).

作者简介: 高 原(1986—), 男(苗族), 贵州遵义人, 博士生, 从事混凝土材料及其力学研究(E-mail: y-gao04@mails.tsinghua.edu.cn);

侯东伟(1981—), 男, 河北人, 博士生, 从事混凝土材料研究(E-mail: houdw06@mails.tsinghua.edu.cn).

较小,表层脱水干缩起主导作用的情况;二是在内外湿度梯度的作用下,混凝土内外湿度差异所致不协调变形会导致应力的产生。当拉应力达一定水平时,混凝土就会开裂。由于干缩变形是混凝土内部水分含量(通常可用相对湿度表征)变化的结果,了解混凝土的湿度特性及其分布是研究混凝土干缩变形及其引发结构开裂的前提和基础,同时混凝土湿度与干缩应变的关系是计算干缩应力的关键。因此展开对混凝土湿度场、湿度变形和湿度应力研究是混凝土结构开裂预测预防的基础性工作,而目前仍缺乏基于混凝土内部水分变化的混凝土结构收缩应力的系统计算方法。本文首先根据 Fick 第二定律,给出了混凝土内部湿度场的计算模型,然后通过引入混凝土干缩变形与其内部湿度关系,采用弹塑性力学方法,对典型圆型截面的混凝土柱进行因混凝土收缩引发的应力场进行解析计算,并结合材料强度,对其早期开裂风险进行了分析。

1 混凝土湿度应力的计算

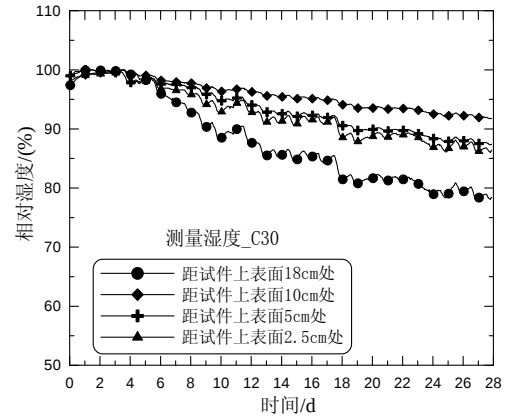
1.1 混凝土内部湿度分布的计算

湿度场的计算是计算含水量变化引发应力(通常称之为湿度应力,以示与温度应力的区别)的基础。早龄期混凝土内部湿度随龄期发展经历了湿度饱和期和湿度下降期这 2 个阶段,同时由于初始水分分布和表面干燥的影响,沿不同高度和距干燥面不同距离处存在明显的湿度梯度。文献[2]试验测定了早龄期混凝土板内不同高度处的相对湿度随龄期的变化情况,结果如图 1 所示。因此在早龄期混凝土内收缩应变梯度是非常明显的,湿度场的计算应该将初始含水量的差异及其湿度开始下降时刻的不同考虑在内。

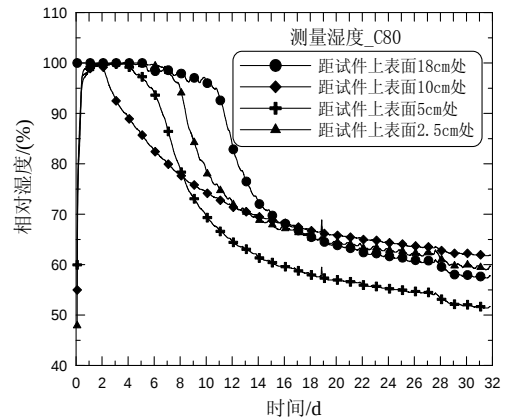
在湿度下降期,混凝土内水分含量随浇筑龄期而减少原因主要有 2 个: 1) 水泥水化消耗水分而引发的湿度下降 ΔH_s ; 2) 由于混凝土表面水分蒸发扩散导致的内部湿度下降 ΔH_d , 水分扩散的驱动力 $\Delta(H-H_s)$ 随龄期和位置的变化。忽略温度的影响,一维传输条件下以相对湿度(H)表示的水分扩散方程为^[2]:

$$\frac{\partial(H-H_s)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial(H-H_s)}{\partial x} \right) \quad (1)$$

式中, D 为水分传输系数,是相对湿度及混凝土配合比的函数。令 $H_0 = H - H_s$, 为求解上述微分方程,引入变量 S :



(a) C30



(b) C80

图 1 C30、C80 混凝土顶面失水状态下湿度随龄期发展规律
Fig.1 Development of interior humidity with age in C30 and C80 concretes

$$S = \int_{H_m}^{H_0} D dH_0 \quad (2)$$

这里 H_m 是任意选取的湿度值,通常选取混凝土所能达到的最小湿度。由式(1)、式(2)得:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = D \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} \quad (3)$$

这样就将求解式(1)中相对湿度 H 的问题转化为求解式(3)中参数 S 的问题,有了 S 值再由式(2)转换为相应的 H 值。而不同位置、不同时刻 S 值可通过式(3)进行常规的数值求解,本文采用有限差分法对式(3)进行求解。图 2 为混凝土内部湿度场求解中的典型节点,对于内部节点,其方程为:

$$S_{i,t+\Delta t} = D \frac{\Delta t}{h^2} (S_{i+1,t} + S_{i-1,t} - 2S_{i,t}) + S_{i,t} \quad (4)$$

对于表面节点,水分直接蒸发到空气中,若环境相对湿度为 H_a ,影响表层混凝土水分扩散速率的表面系数为 a_m ,则表面节点的湿度为:

$$H_{1,t} = \frac{hH_a + (D/a_m)H_{2,t}}{h + D/a_m} \quad (5)$$

式中: $a_m/(m/s)$ 是表面系数; H_a 、 $H_{2,t}$ 分别是 t 时刻环境和干燥表面内第 2 个节点的湿度值。

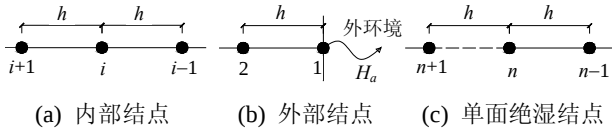


图2 湿度场计算的典型结点示意图

Fig.2 Types of node used in humidity analysis

单面绝湿节点处没有湿度交换, 假想节点外有节点 $n+1$, 则有 $H_{n+1}=H_n$, 由式(4)求得底部节点的 S 值为:

$$S_{n,t+\Delta t} = D \frac{\Delta t}{h^2} (S_{n-1,t} - S_{n,t}) + S_{n,t} \quad (6)$$

另外, 用多段线性函数来模拟相对湿度与扩散系数的关系, 如图 3 所示, 每一段的扩散系数用线性函数表示为:

$$D_j = k_j H + d_j$$

$$\text{当 } H_j \leq H < H_{j+1}, \quad j = 1 \sim n \quad (7)$$

式中 k_j 和 d_j 是由实验确定的常数。由参数 S 定义有:

$$S_m = \sum_{j=1}^m \left(\int_{H_j}^{H_{j+1}} (k_j H + d_j) dH \right), \quad m = 1, 2 \cdots n \quad (8)$$

这样对于给定的 S , 假定其相应的湿度 H 从 H_m 到 H_{m+1} 之间变化, 则有:

$$H = \frac{\sqrt{d_m^2 - 2k_m \left(S_m - S - \frac{1}{2} k_m H_m^2 - d_m H_m \right)} - d_m}{k_m} \quad (9)$$

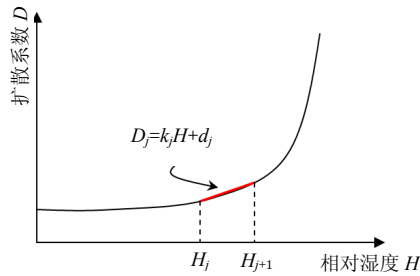


图3 湿度与扩散系数关系

Fig.3 The simulation of humidity dependent diffusivity by multiple-linear functions

由于湿度下降 H_s 是由水泥与水的反应引起, 所以其下降幅度是水化反应程度 α 的函数。在 Oh 等描述水泥水化引起的湿度下降模型基础上, 考虑混凝土内部湿度发展的双阶段特点, 文献[2]采用如下模型描述水泥水化引发的内部湿度下降, 即:

$$H_s = \begin{cases} 0 & \text{当 } \alpha \leq \alpha_c \\ (1 - H_{s,u}) \left(\frac{\alpha - \alpha_c}{\alpha_u - \alpha_c} \right)^\varphi & \text{当 } \alpha > \alpha_c \end{cases} \quad (10)$$

式中: $H_{s,u}$ 是仅考虑自干燥作用时水泥最终水化度对应的相对湿度, 为水灰/胶比的函数, 可由试验确定; α_u 是混凝土内部水泥最终水化度; α_c 是混凝土内部相对湿度由 100% 开始下降时的水化度, 可由测定的湿度开始下降时间 t_c 计算获得。需要注意得的是温度对水泥水化的影响通过等效龄期来体现。参数 φ 为 1.5~1.8 之间的常数。

应用上述模型, 可以得到早龄期混凝土内部湿度场, 对于给定的时间增量 (Δt), 由水泥水化引起的湿度下降 H_s 由式(12)计算, 然后把 $(H - H_s)$ 作为初始湿度状态, 同样时间间隔内由水分扩散引起的湿度变化可通过对式(4)进行数值求解。

1.2 混凝土湿度变形模型

湿度和自由变形的关系, 直接影响混凝土湿度应力的计算, 张君等^[3-5]在大量混凝土自由变形与内部湿度关系测定, 以及前人相关研究^[6-7]的基础上, 给出了混凝土收缩与其内部湿度之间的关系^[4], 该模型同时包含自收缩与干燥收缩, 将二者的推动力统一到混凝土内部水分变化上, 而环境的影响将通过对其内部湿度变化来体现, 具体模型为:

$$\varepsilon_w = \begin{cases} \eta [1 - \sqrt[3]{1 - (V_{cs} - V_0)}], & \text{当 } RH = 1 \\ \eta [1 - \sqrt[3]{1 - (V_{cs} - V_0)}] + \frac{S \rho R T}{3M} \left(\frac{1}{K_s} - \frac{1}{K} \right) \ln(RH), & \text{当 } RH < 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中: η 为化学减缩修正系数; R 是理想气体常数, 8.314 J/mol · K; T 是开尔文温度; M 是水的摩尔质量, 0.01802 kg/mol; ρ 是水的密度; K_s 混凝土固体部分的体积弹性模量; K 是含孔介质体积弹性模量; V_{cs} 是化学减缩导致的体积应变; V_0 为初凝时刻化学减缩导致的体积应变; S 是表征混凝土中水泥饱和度程度的常数。对不掺加硅灰的普通混凝土和掺加硅灰的高强度等级混凝土, V_{cs} 和 S 的计算公式不同。对不掺加硅灰的普通混凝土:

$$V_{cs} = 0.2(1 - p)\alpha, \quad S = \frac{p - 0.7(1 - p)\alpha}{p - 0.5(1 - p)\alpha},$$

$$p = \frac{w/c}{w/c + \rho_w / \rho_c}. \quad (12)$$

对掺加硅灰的高强混凝土(设硅灰掺量为 S):

$$V_{cs} = k \left(0.2 + 0.7 \frac{S}{c} \right) (1 - p)\alpha,$$

$$p = \frac{w/c}{w/c + \rho_w / \rho_c + (\rho_w / \rho_c)(s/c)},$$

$$k = \frac{1}{1 + 1.4(s/c)},$$

$$S = \frac{p - 0.8k(1-p)\alpha}{p - k[0.6 - 0.7(s/c)](1-p)\alpha} \quad (13)$$

1.3 湿度应力的计算

下面以现浇混凝土柱子为例,进行早龄期混凝土收缩应力的计算。为分析问题方便,做如下假设: 1) 湿度分布沿混凝土柱长度方向不变; 2) 混凝土柱湿度场为轴对称分布; 3) 混凝土为各向同性材料; 4) 混凝土的弹性模量和泊松比不随混凝土相对湿度变化而变化; 5) 不考虑体力的作用。由假设 1) 和假设 2) 可以将本问题简化为轴对称平面应变问题,计算单元如图 4 所示。设湿度轴对称平面应变问题极坐标下用应变分量表示的分布函数为 $H=H(r)$, 湿度应变函数为 $\varepsilon_H = \varepsilon_H(r)$ 。

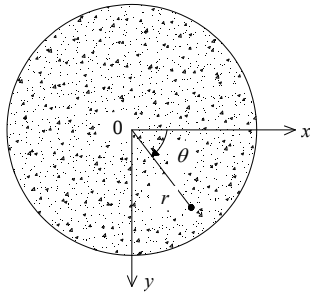


图 4 混凝土柱计算单元

Fig.4 Calculation element of concrete column

物理方程为:

$$\sigma_r = \frac{E(1-\mu)}{1-\mu-2\mu^2} \left[\varepsilon_r + \frac{\mu\varepsilon_\theta}{1-\mu} - \frac{\varepsilon_H(r)}{1-\mu} \right],$$

$$\sigma_\theta = \frac{E(1-\mu)}{1-\mu-2\mu^2} \left[\varepsilon_\theta + \frac{\mu\varepsilon_r}{1-\mu} - \frac{\varepsilon_H(r)}{1-\mu} \right] \quad (14)$$

轴对称平面问题的几何方程为:

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}, \quad \gamma_{r\theta} = 0 \quad (15)$$

不计体力,平衡方程为:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (16)$$

由式(14)~式(16)及边界条件 $u(r=0)=0$, $\sigma_r(r=R)=0$ 可得:

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \left(\frac{1}{R^2} \int_0^R \varepsilon_H(r) \cdot r dr - \frac{1}{r^2} \int_0^r \varepsilon_H(r) \cdot r dr \right),$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \left(\frac{1}{R^2} \int_0^R \varepsilon_H(r) \cdot r dr + \frac{1}{r^2} \int_0^r \varepsilon_H(r) \cdot r dr - \varepsilon_H(r) \right) \quad (17)$$

因此,如已知混凝土内部湿度分布,即可由式(17)计算混凝土内部的湿度应力。

1.4 湿度应力的徐变修正

混凝土的徐变会引起应力松弛,计算的应力应进行徐变修正。由于混凝土内湿度随时间变化,湿度应力也将随时间不断变化,与通常恒定应力条件下的应力松弛情况相比,计算过程更加复杂。本文参考文献[8-10]中介绍的离散计算方法,具体计算过程如下:首先将时间离散为 n 个小段,然后根据时间将连续变化的应力离散化为 n 段应力变量,并假设每小段时间内应力不变,不考虑徐变影响时 t 时刻的应力为:

$$\sigma(t) = \sigma(t_0) + \sum_{i=1}^n \Delta\sigma_i(t_i) \quad (18)$$

考虑徐变影响,按应力松弛系数法求解每小段应力增量经过该时间段后的应力残值,并将每小段应力残值累加起来,即可得到相应的松弛后应力值:

$$\sigma(t, t_i) = \frac{\sigma(t_0)}{1 + \varphi(t, t_0)} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta\sigma(t_i)}{1 + \varphi(t, t_i)} \right) \quad (19)$$

式中 $\varphi(t, t_0)$ 为徐变系数,文献[11]给出的表达式为:

$$\varphi(t, t_i) = \varphi_1 t_i^{-d} (t - t_i)^p \quad (20)$$

其中, φ_1 、 d 、 p 均为材料特性参数,文献[11]建议 φ_1 取 2.6~3.7, d 取 0.3~0.4, p 取 0.12~0.18,作为算例,本文首先取 $\varphi_1=2.9$, $d=0.32$, $p=0.12$,然后再研究各参数取值对结果的影响。

2 模型参数

弹性模量直接影响材料变形引发的应力大小,混凝土的弹性模量与胶凝材料的水化程度有关,基于水化度的混凝土弹性模量可由下式计算^[4,8]:

$$E(\alpha) = 1.05 E_{28} \left(\frac{\alpha - \alpha_c}{\alpha_u - \alpha_c} \right)^{1/2} \quad (21)$$

式中: E_{28} 是 28d 弹性模量; α 为水泥水化度; α_c 为水泥凝结时的水化度(近似为内部湿度开始下降的时刻); α_u 为最终水化度。因为水泥一般不可能完全水化, $\alpha_u < 1$ 。根据文献[12-13],水泥最终水化度可由下式计算:

$$\alpha_u = \frac{1.031 \cdot w/c}{0.194 + w/c} \quad (22)$$

式中 w/c 为水灰比。水泥水化度与龄期的关系为^[4]:

$$\alpha = \alpha_u \exp - (A/t_e)^B \quad (23)$$

式中: t_e/h 为参考温度为 20℃ 时的等效龄期; A 和

B 是经验常数,可由试验确定。临界水化度 α_c 可通过试验测定的临界时间 t_c 由式(23)计算。等效龄期由下式计算:

$$t_e = \int_0^t e^{\frac{1}{R} \left(\frac{U_{ar}}{293} - \frac{U_{aT}}{273+T} \right)} dt \quad (24)$$

式中: R 为气体常数,取 $8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$; U_{ar} 为参考温度时的水泥水化反应活化能; U_{aT} 为温度为 T 时的反应活化能。其中 U_a 是时间和温度的函数,可近似表达为^[14]:

$$U_a = (42830 - 43T)e^{(-0.00017T)t} \quad (25)$$

文献[4]给出了 C30 强度等级混凝土的湿度变形的计算参数,如表 1。另外,根据文献[15]混凝土抗拉强度 f_t ,可以通过下式计算:

$$f_t(t_e) = f_{t,28} \left[\exp \left(0.21 \left(1 - \sqrt{\frac{672}{t_e - 12}} \right) \right) \right]^{0.573} \quad (26)$$

式中, $f_{t,28}$ 为混凝土标准养护 28d 的抗拉强度,根据我国《混凝土结构设计规范》,C30 混凝土取 2.01 MPa 。混凝土在某时刻的开裂风险(ζ)可以定义为该时刻混凝土的最大拉应力 $\sigma_t(t)$ 与其抗拉强度 $f_t(t)$ 的比值^[16-18],即:

$$\zeta = \frac{\sigma_t(t)}{f_t(t)} \quad (27)$$

混凝土材料的力学性能具有一定的波动性,一般认为当开裂风险达到 0.7 时^[17],混凝土开裂的可能性已经很大。

表 1 混凝土湿度应力计算参数

Table 1 Parameters for moisture stress calculation

混凝土	w/c	η	E_{28}/GPa	ν	α_u
C30	0.78	0.004737	30	0.2	0.83
混凝土	A	B	E_s/GPa	$H_{s,u}$	
C30	19.73	0.68	79	0.95	

3 模型计算与分析

3.1 模型结果与有限元验算

首先对半径为 200mm, 强度等级为 C30 的混凝土圆柱进行湿度应力计算。根据《混凝土结构工程施工质量验收规范》中的规定,普通硅酸盐水泥混凝土浇水养护时间不得少于 7d,对有抗渗要求的混凝土浇水养护时间不得少于 14d,算例中选择浇水养护时间为 14d。浇水养护期间,设外环境相对湿度为 100%,因胶凝材料的水化反应,混凝土内部可能会出现小幅的相对湿度降低。浇水养护结束

后,外环境相对湿度取 60%。分别采用本文模型和使用 ANSYS 建模对混凝土柱 28d 时截面应力分布进行了计算,结果如图 5 所示。图 5 中应力为正时为拉应力,负时为压应力。ANSYS 建模时采用可以计算平面应变和轴对称问题的 PLANE42 单元。从图 5 首先可以看出,模型计算结果和有限元计算结果之间差异很小,说明所建立的分析模型是可靠的。其次,混凝土 28d 时,环境相对湿度对混凝土柱内部相对湿度的影响仅在距外表面 60mm 范围内,从 $r=140\text{mm}$ 到外表面,湿度逐渐下降,外表面湿度接近外环境相对湿度;混凝土柱径向应力全为压应力,在距圆心 140mm 范围内,应力水平基本不变,为 -1.6 MPa 左右,在距表面 60mm 范围内,随着相对湿度的降低,径向压应力逐渐减小,外表面处径向应力减至零;在混凝土柱靠近圆心附近,环向应力为压应力,沿径向湿度开始下降位置处,环向压应力减小,最终变为拉应力。在混凝土外表面,环向应力达到 22.77 MPa ,远远超过其抗拉强度。

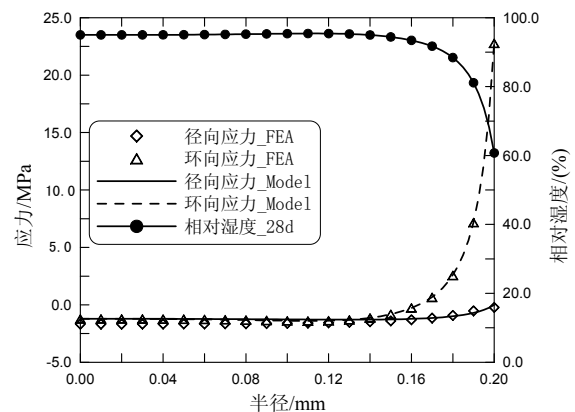


图 5 模型结果与有限元结果的比较

Fig.5 Comparison between model finite element methods on moisture stresses

图 6 为考虑混凝土徐变之后混凝土柱内环向与径向应力随位置的变化规律。图 7 为考虑徐变前后柱表面环向应力随时间的变化情况。可见,考虑徐变之后,混凝土柱的应力水平有大幅度的下降,柱外表面最大拉应力在考虑徐变之后降幅超过 50%,说明徐变对混凝土应力发展的影响是不可忽略的。在后续分析中都考虑了徐变的影响。

3.2 构件尺寸对湿度应力的影响

为了研究混凝土柱尺寸对湿度应力的影响,计算了半径为 200mm、400mm 和 600mm 的三种尺寸的 C30 混凝土柱 28d 时的内部应力分布和外表面结点应力随龄期的发展,结果如图 8、图 9 所示。由

图 8 可以看出, 三种尺寸的混凝土柱 28d 时沿径向的相对湿度分布和应力分布形式相同, 在距外表面一定范围(60mm)内相对湿度和应力变化较为明显, 而其他位置之间的相对湿度和应力水平差别不大。这表明外部环境湿度对于混凝土内部湿度场的影响深度是有限的, 但是对于受外环境相对湿度影响较大的部分, 其相对湿度的变化将导致较大干缩应力的产生。由图 9 首先可以看出, 不同尺寸混凝土柱, 在相同环境湿度下, 其外表面湿度随龄期的变化是一致的, 在湿养护结束之后, 混凝土柱暴露于相对湿度 60%的环境中, 其外表面湿度会在短期内(1d 左右)出现大幅下降, 然后基本维持在与环境相对湿度相当的水平。同时, 混凝土柱表层环向应力也会因为相对湿度的下降而出现大幅增加。

由图 9 还可以看出, 对不同尺寸的混凝土柱, 虽然其外表面结点的相对湿度随龄期的变化是一致的, 但是由于尺寸不同, 柱子自身约束不一样, 不同尺寸柱子表面应力会有一定差别, 尺寸越大, 表面环向拉应力越大。

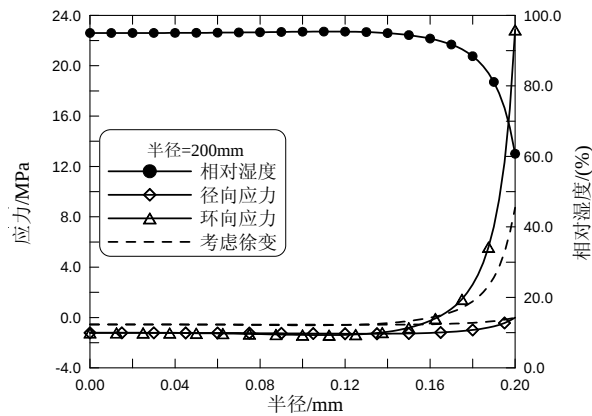


图 6 28d 时不同位置处的湿度应力
Fig.6 Moisture stresses at 28d

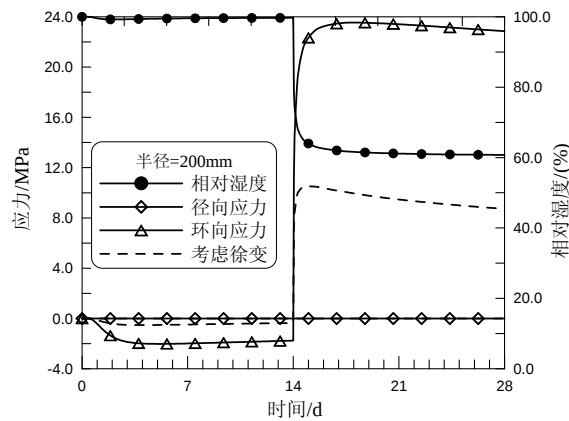
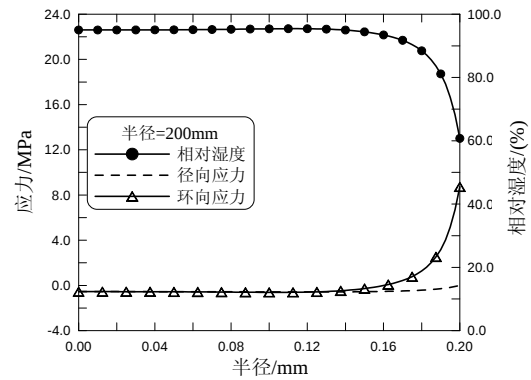
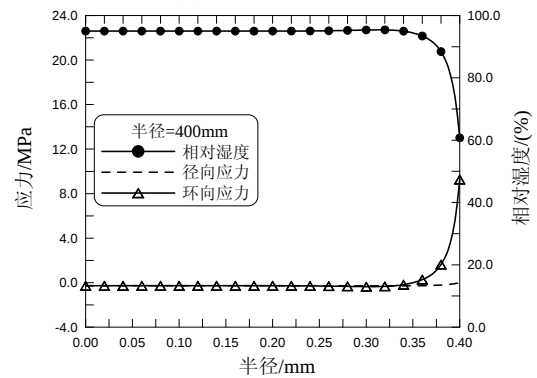


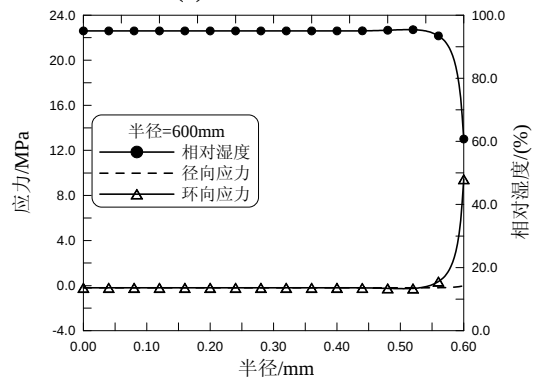
图 7 圆柱外表面应力随龄期发展
Fig.7 Development of moisture stresses at outer surface



(a) 半径为 200mm



(b) 半径为 400mm



(c) 半径为 600mm

图 8 不同尺寸混凝土柱 28d 截面应力分布

Fig.8 Moisture stresses in concrete columns with different dimensions

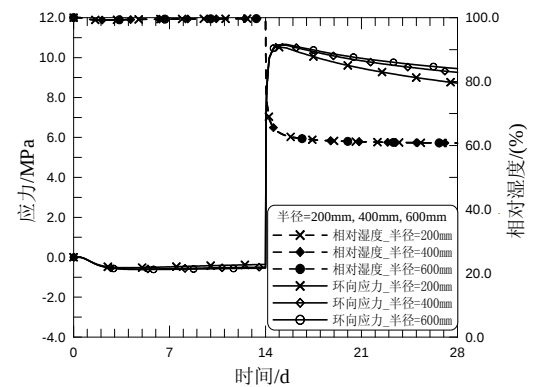


图 9 外表面结点应力随龄期发展的影响

Fig.9 Development of moisture stresses at outer surface of columns with different dimension

3.3 外环境湿度对湿度应力的影响

为研究外部环境湿度对混凝土干缩应力的影响, 计算了半径为 200mm 的 C30 混凝土柱子, 在相对湿度分别为 95%、90%、80%、60%和 40%的环境中, 其表面干缩应力随龄期的发展, 结果如图 10 所示。可见, 混凝土柱外表面结点相对湿度和应力受环境湿度的影响明显, 环境湿度决定混凝土表面结点湿度变化幅度, 进而决定混凝土柱外表面应力水平。一般拆模后 1d, 混凝土柱表面的相对湿度就与环境相对湿度相当, 在相对湿度分别为 95%、90%、80%、60%和 40%环境中的混凝土柱外表面 28d 时应力分别为 0.43MPa、1.3MPa、3.3MPa、8.7MPa 和 16.6MPa。环境湿度越大, 干缩应力越小, 混凝土开裂的可能性越低, 这一点可由图 11 所示的环境相对湿度与混凝土柱外表面结点 28d 应力关系更直观的看出。

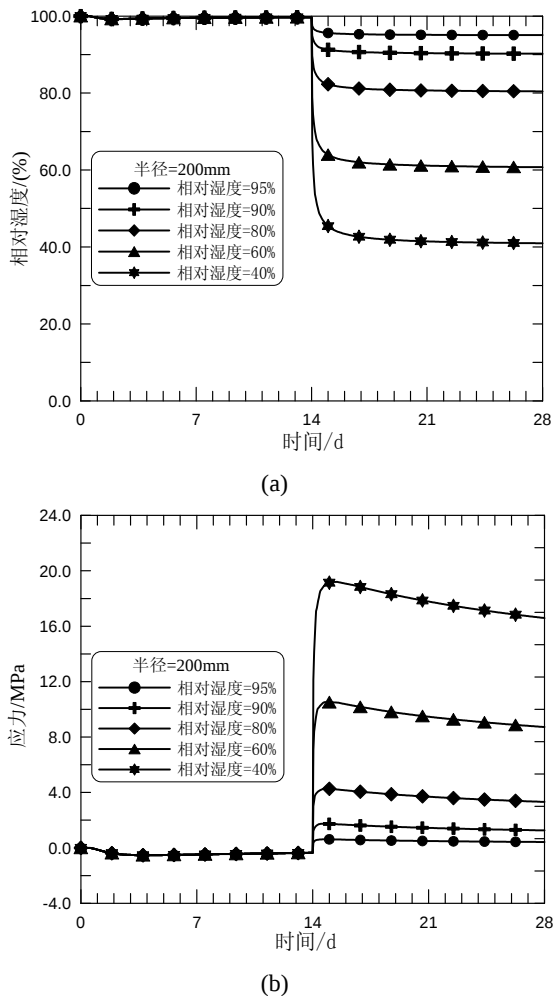


图 10 环境湿度中混凝土柱外表面结点相对湿度和应力随龄期的发展

Fig.10 Development of relative humidity and moisture stresses at surface of column

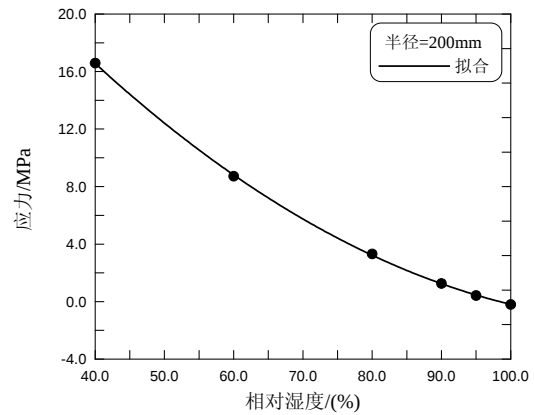
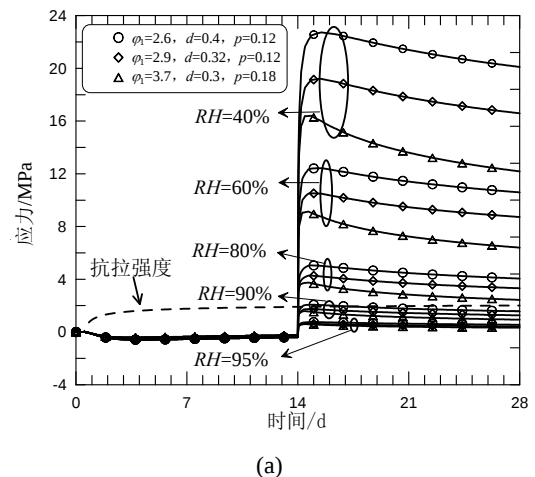


图 11 环境相对湿度与混凝土柱外表面结点 28d 应力关系

Fig.11 Relationship between moisture stresses at column surface and environmental humidity at 28d

3.4 开裂风险测算

对于混凝土柱, 干缩应力导致的开裂一定发生在其外表面。根据《混凝土结构设计规范》, 取 C30 强度等级混凝土抗拉强度为 2.01MPa。另外徐变对混凝土湿度应力计算有较大的影响, 文献[11]给出了建议的徐变参数的取值范围。为了研究徐变参数变化对湿度应力水平的影响, 本文选取 3 种徐变参数组合: 1) $\phi_1=2.6, d=0.4, p=0.12$; 2) $\phi_1=2.9, d=0.32, p=0.12$ 和 3) $\phi_1=3.7, d=0.3, p=0.18$ 。由式(19)和式(20)可知, 组合 1)条件下徐变对混凝土应力影响作用最小, 组合 3)条件下徐变对混凝土应力影响作用最大, 组合 2)为本文比较构件尺寸和外环境湿度对混凝土湿度应力影响时采用的参数组合。不同徐变参数组合下, 半径为 200mm 的混凝土柱外表面结点湿度应力和混凝土抗拉强度随龄期的发展的计算结果如图 12(a)。图 12(b)为不同组合下, 混凝土柱在不同环境湿度条件下外表面结点开裂风险随龄期的变化, 图 13 为不同参数组合时, 混凝土柱外表面开裂风险。



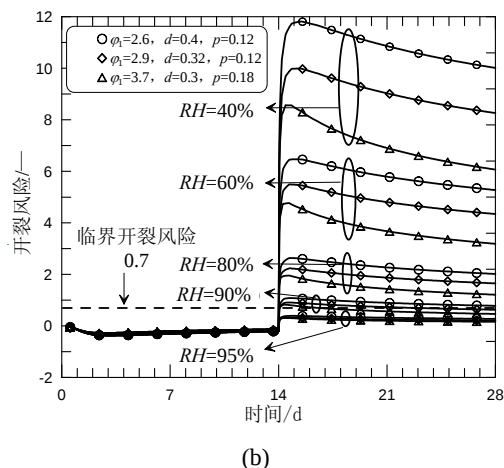


图 12 徐变参数和环境湿度对外表面结点应力及开裂风险的影响

Fig.12 Effect of creep and environmental humidity on the development of moisture stresses and cracking risk

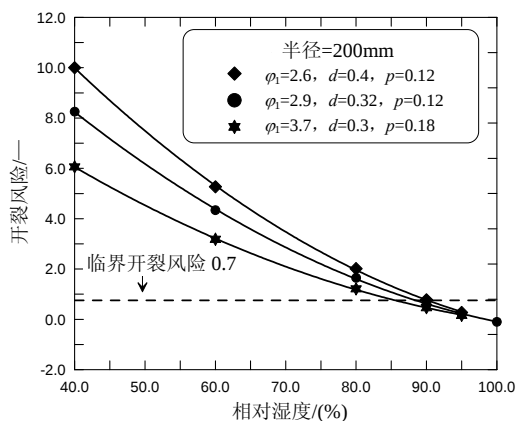


图 13 开裂风险随环境湿度的变化

Fig.13 Variations of cracking risk with environmental humidity

如预期,不同徐变参数对混凝土外表面结点的应力水平影响明显,混凝土整体应力水平越高,不同徐变参数组合计算得到的应力差值越大。外环境湿度为 40% 时,组合 1~组合 3 时混凝土外表面 28d 应力分别为 20.1MPa, 16.6MPa 和 12.2MPa, 差值达到 7.9MPa(见图 12(a))。由图 12(b)可见,当环境湿度小于某一水平时,混凝土柱的开裂风险在拆模后一天左右即超过临界开裂风险 0.7, 开裂可能性大。环境湿度越低,拆模后开裂风险超过临界开裂风险所需的时间越短。可由图 13 可见,随着环境湿度的降低,混凝土内部湿度与环境湿度的差值增大,混凝土外表面结点最大开裂风险增加,开裂可能性增大。其次徐变参数的取值不同,直接影响控制混凝土开裂的临界环境湿度。徐变松弛越大,混凝土能够容忍的自身相对湿度和环境湿度的差值范围越大。

4 结论

本文以现浇混凝土圆柱为例,建立了自收缩与干燥收缩统一的早龄期混凝土干缩应力解析计算方法,计算分析了不同环境湿度条件、不同尺寸的混凝土圆柱的湿度应力及其发展规律。计算结果表明,混凝土内部湿度随时间的变化幅度是控制湿度应力的主要因素,混凝土内部湿度与环境湿度差值越小,干缩应力越小;徐变参数的取值对混凝土湿度应力的计算影响较大;构件尺寸对干缩应力也有一定的影响,柱半径越大,相同条件下其外表面拉应力越大,越容易开裂。

参考文献:

- [1] 富文权, 韩素芳. 混凝土工程裂缝分析与控制[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
Fu Wenquan, Han Sufang. Analysis and control of concrete crack [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002. (in Chinese)
- [2] Zhang J, Qi K, Huang Y. Calculation of moisture distribution in early-age concrete [J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 2009, 135(8): 871–880.
- [3] 张智博, 张君. 混凝土收缩与环境湿度的关系研究[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(6): 720–723.
Zhang Zhibo, Zhang Jun. Experimental study on relationship between shrinkage strain and environmental humidity of concrete [J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(6): 720–723. (in Chinese)
- [4] Experimental and theoretical studies on autogenous shrinkage of concrete at early ages [J]. ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(3): 312–320.
- [5] 张君, 侯东伟, 高原. 混凝土自收缩与干燥收缩的统一内因研究[J]. 清华大学学报, 2010, 50(9): 1321–1324.
Zhang Jun, Hou Dongwei, Gao Yuan. Investigation on the uniform driving force of autogenous and drying shrinkage of concrete [J]. Journal of Tsinghua University (Sci & Tech), 2010, 50(9): 1321–1324. (in Chinese)
- [6] Bentz D P, Garboczi E J, Quenard D A. Modeling drying shrinkage in reconstructed porous materials: application to porous vycor glass [J]. Modeling And Simulation In Materials Science And Engineering, 1998, 6(3): 211–236.
- [7] Mackenzie J K. The elastic constants of a solid containing spherical holes [J]. Proceedings of the Physical Society, 1950, 683: 2–11.
- [8] 张君, 祁锟, 张明华. 早龄期混凝土路面非线性温度场下温度应力的计算[J]. 工程力学, 2007, 24(11): 136–145.
Zhang Jun, Qi Kun, Zhang Minghua. Calculation of the thermal stresses in concrete pavements at early ages [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(11): 136–145. (in Chinese)

(参考文献[9]—[18]转第 148 页)

- 国铁道出版社, 2003.
- Li Guohao. Stability and vibration of bridge structures (Revised edition) [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2003. (in Chinese)
- [3] Brockenbrough R L, Merritt F S. Structural steel designer's handbook [M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1999.
- [4] 鞠小华, 廖海黎, 沈锐利. 对悬索桥对称竖弯基频近似公式的修正[J]. 土木工程学报, 2002, 35(1): 44—49.
Ju Xiaohua, Liao Haili, Shen Ruili. Modification on simplified formula of symmetric-vertical natural frequencies for suspension bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(1): 44—49. (in Chinese)
- [5] 盛善定, 袁万城. 悬索桥振动基频的实用估算公式[J]. 东北公路, 1996, 19(1): 71—76.
Sheng Shanding, Yuan Wancheng. Practical estimation formula of vibration basic frequency of suspension bridge [J]. Northeastern Highway, 1996, 19(1): 71—76. (in Chinese)
- [6] 徐勋, 强士中, 贺拴海. 中央扣对大跨悬索桥动力特性和汽车车列激励响应的影响[J]. 中国公路学报, 2008, 21(6): 57—62.
Xu Xun, Qiang Shizhong, He Shuanhai. Influence of central buckle on dynamic behavior and response of long-span suspension bridge under vehicle group excitation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(6): 57—62. (in Chinese)
- [7] 唐茂林. 大跨度悬索桥空间几何非线性分析与软件开发[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
Tang Maolin. 3D geometric nonlinear analysis of long-span; suspension bridge and its software development [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003. (in Chinese)
- [8] Brownjohn J M W, Dumanoglu A A, Severn R T, al et. Ambient vibration measurements of the Humber Suspension Bridge and comparison with calculated characteristics [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1987, 83(9): 561—600.
- [9] Xu Y L, Ko J M, Zhang W S. Vibration studies of Tsing Ma Suspension Bridge [J]. ASCE Journal of Bridge Engineering, 1997, 2(4): 149—156.
- [10] 彭旺虎, 邵旭东, 胡建华. 大跨悬索桥桁架加劲梁的选型和设计[J]. 公路交通科技, 2009, 26(3): 80—86.
Peng Wanghu, Shao Xudong, Hu Jianhua. Type selection and design of stiffening trusses for long-span suspension bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(3): 80—86. (in Chinese)

(上接第 128 页)

- [9] 张君, 张明华, 郭自力. 自流平砂浆地面收缩应力的计算及其影响因素[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(4): 379—385.
Zhang Jun, Zhang Minghua, Guo Zili. Calculation and analyses of shrinkage induced stresses in self-leveling floor layer [J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(4): 379—385. (in Chinese)
- [10] 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 Bofang. Thermal stress and temperature control in mass concrete [M]. Beijing: China Electric Power Publishing House, 1999. (in Chinese)
- [11] Bazant Z P, Panula L. Practical prediction of time dependent deformation of concrete [J]. Materials and Structures, Parts I and II, 1978, 11(65): 307—328; Parts III and IV: 1978, 11(66): 415—434; Parts V and VI: 1978, 12(69): 169—173.
- [12] Rastrup E. Heat of hydration [J]. Magazine of Concrete Research, 1954, 6(17): 127—140.
- [13] Schindler A K, Folliard K J. Heat of hydration models for cementitious materials [J]. ACI Materials Journal, 2005, 102(1): 24—33.
- [14] Kim J K. Estimation of compressive strength by a new apparent activation energy function [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(2): 217—225.
- [15] Gutsch A W. Properties of early age concrete-Experiments and modeling [J]. Materials and Structures, 2002, 35: 76—79.
- [16] 王甲春, 阎培渝. 早龄期混凝土结构开裂风险分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2006, 14(2): 262—267.
Wang Jiachun, Yan Peiyu. Analyzing of cracking risk of early-age concrete structure [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2006, 14(2): 262—267. (in Chinese)
- [17] Hattel J H, Thorborg J. A numerical model for predicting the thermo mechanical conditions during hydration of early-age concrete [J]. Applied Mathematical Modeling, 2003, 27: 1—26.
- [18] Springenschmid R. Prevention of thermal cracking in concrete at early ages [M]. London: E& FN Spon, 1998: 60—62.