

文章编号: 1671-0444(2018)04-0608-09

内埋型钢混凝土柱的收缩和徐变参数分析

戴碧琳, 吴杰, 张其林
(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 基于有限元软件 ANSYS 对内埋型钢混凝土柱湿度场分布进行了数值模拟, 考虑截面湿度分布采用纤维模型并结合 B3 预测模型计算构件收缩和徐变效应, 对内埋型钢混凝土柱进行参数化分析, 探究截面形式、截面尺寸、型钢开闭口面积比、腹板宽度与截面尺寸的比值等参数对构件收缩和徐变效应的影响。结果表明: ANSYS 的热分析模块可以较为准确地计算型钢混凝土构件截面的湿度场分布; 型钢开闭口面积比、腹板宽度与截面尺寸之比是影响构件收缩和徐变的主要因素, 现行预测模型应对此加以考虑。

关键词: 内埋型钢混凝土柱; 收缩和徐变; 参数分析

中图分类号: TU 973.2 **文献标志码:** A

Parametric Analysis of Shrinkage and Creep for Steel Reinforced Concrete Column

DAI Bilin, WU Jie, ZHANG Qilin

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on finite element analysis software ANSYS, numerical simulation of humidity distribution of steel reinforced concrete column was conducted. Fiber model and B3 prediction model was combined to calculate shrinkage and creep of column with considering humidity distribution. Parametric analysis was carried out in order to investigate the effects of some factors, including section type, member size, ratio of open area to enclosed area of steel, web width, on shrinkage and creep. The results show that humidity distribution of members can be simulated accurately by thermal module of ANSYS. Web width and ratio of open area to enclosed area of steel are both main parameters affecting shrinkage and creep, which should be taken into account in the current prediction model.

Key words: steel reinforced concrete column; shrinkage and creep; parametric analysis

随着设计理论与建筑工艺的发展,近年来国内外建造了大量超高层建筑。相比普通混凝土柱,内埋型钢混凝土柱凭借其良好的强度、刚度及耐久性,在超高层建筑中得到了广泛应用。但混凝土的收缩和徐变会导致钢和混凝土之间发生应力重分布,导

致竖向构件发生变形差异,从而引发水平构件的附加内力,进而影响结构的安全和正常使用。

混凝土的收缩和徐变受环境影响较大,其中,相对湿度是一个主要的影响参数。型钢会阻碍混凝土湿度扩散,延缓构件的收缩和徐变。不同开闭口面

收稿日期: 2018-04-03

基金项目: 上海市自然科学基金资助项目(16ZR1438900);上海市科技创新行动计划资助项目(16DZ1200103);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(0200219220)

作者简介: 戴碧琳(1994—),女,广东广州人,硕士研究生,研究方向为建筑组合结构, E-mail: 1194075131@qq.com
吴杰(联系人),男,副教授, E-mail: wwujie@tongji.edu.cn

积的型钢对湿度扩散阻碍的程度不同,相应构件的收缩和徐变也会不同。如图 1 所示,箭头代表湿度扩散的方向, d 代表截面尺寸, γ 代表型钢腹板宽度与截面尺寸的比值。目前常用的收缩和徐变预测模型多基于素混凝土试验,其会高估内埋型钢混凝土柱的收缩和徐变。为了准确计算内埋型钢混凝土柱收缩和徐变,国内外学者对湿度场模拟展开了研究。Parrot^[1] 基于试验结果拟合了混凝土的相对湿度与距离干燥面深度、干燥时间的关系式。Akita 等^[2] 通过编制有限元程序求解混凝土内部湿度场,但此方法对于复杂实体结构湿度场求解存在困难。高原^[3] 采用有限差分法求解混凝土湿度场,但此方法仅适用于一维和二维湿度场求解。赵国卫等^[4] 利用 Matlab 求解湿度扩散控制方程,对高强混凝土湿度分布进行数值模拟,并分析了环境湿度对高强混凝土应变的影响。虽然上述成果对探究湿度场分布有很大价值,但是过程繁琐,不利于实际工程推广。另外也没有对型钢几何参数、截面尺寸等因素与湿度场分布和截面收缩、徐变之间的关系进行探讨。

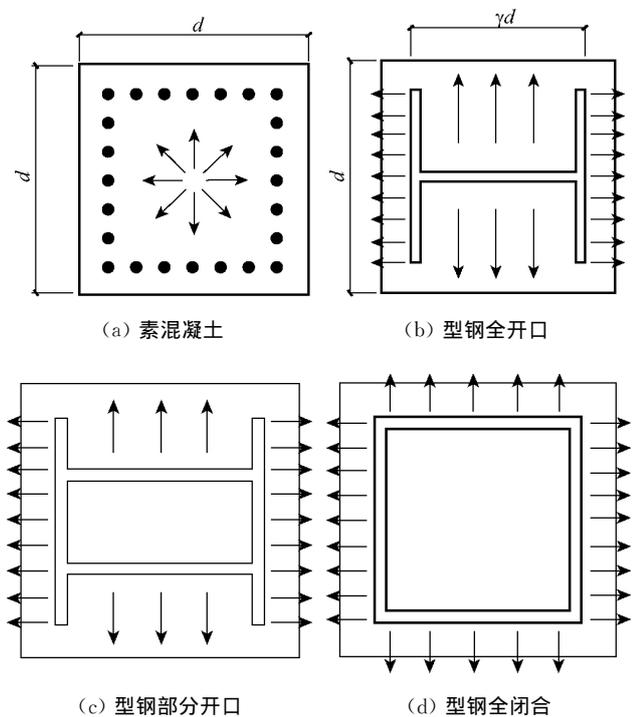


图 1 构件湿度扩散图

Fig. 1 Schematic illustration of members' humidity diffusion

本文利用有限元分析软件 ANSYS 的热分析模块对构件湿度场分布进行数值模拟研究,并通过与试验数据对比验证该方法的可行性。而后基于纤维模型及 B3 预测模型计算内埋型钢混凝土柱收缩和徐变效应,并探究截面形式、截面尺寸、型钢开闭口面积比、腹板宽度与截面尺寸之比等参数对构件收缩和徐

变的影响。

1 混凝土收缩和徐变预测模型

国内外学者根据大量混凝土柱的收缩、徐变试验结果与现场实测数据,提出了一些经验或半经验计算公式,其中应用较多的有 CEB—FIP(1978)及 CEB—FIP(1990)模型、ACI209 及 ACI209R 模型、B3 模型、GL2000 模型等。由于 B3 模型概念明确,物理意义清晰且具有较高的预测精度,因此,本文基于 B3 模型展开研究。该模型以徐变函数 $J(t, \tau)$ 表征混凝土徐变,表达式^[5]为

$$J(t, \tau) = q_1 + C_0(t, \tau) + C_d(t, \tau, t_0) \quad (1)$$

基本徐变度

$$C_0(t, \tau) = q_2 Q(t, \tau) + q_3 \ln[1 + (t - \tau)^n] + q_4 \ln(t/\tau) \quad (2)$$

$$q_2 = 185.3 c^{0.5} (f'_c)^{-0.9} \quad (3)$$

$$q_3 = 0.29 (\omega/c)^4 \quad (4)$$

$$q_4 = 20.3 (a/c)^{-0.7} \quad (5)$$

干燥徐变

$$C_d(t, \tau, t_0) = q_5 [e^{-8H \langle t \rangle} - e^{-8H \langle \tau \rangle}]^{0.5} \quad (6)$$

$$H(t) = 1 - (1 - h) S(t) \quad (7)$$

$$q_5 = 7.57 \times 10^5 f'_c \varepsilon_{\infty}^{-0.6} \quad (8)$$

收缩应变 $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$ 表示为

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = -\varepsilon_{\infty}(t, t_0) k_h S(t) \quad (9)$$

$$S(t) = \tanh\left(\frac{t - t_0}{\tau_{sh}}\right)^{1/2} \quad (10)$$

$$k_h = 1 - h^3 \quad (11)$$

$$\varepsilon_{\infty} = a_1 a_2 [1.903 \times 10^{-2} \omega^{2.1} (f'_c)^{-0.28} + 270] \quad (12)$$

式中: q_1 为单位应力产生的瞬时应变; t 为混凝土计算龄期; t_0 为混凝土干燥龄期; τ 为混凝土加载龄期; f'_c 为混凝土 28 d 圆柱体抗压强度标准值; $Q(t, \tau)$ 为与混凝土龄期有关的二项式积分; c 为混凝土的水泥含量; ω 为混凝土的含水量; a 为混凝土骨料含量; h 为环境相对湿度; τ_{sh} 为与体表比和抗压强度有关的参数。

2 基于 ANSYS 的混凝土湿度场数值模拟

2.1 理论基础

湿度分布理论模型的控制方程一般基于 Fick

第二流动定律建立,因此湿度流量与湿度驱动力之间的关系^[6]可表示为

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \text{div}(D \text{grad}(H)) \quad (13)$$

式中: H 为构件截面湿度;初始条件 $h(x, y, z, 0) = 100\%$; D 为湿度扩散系数。

边界条件为假定经过混凝土表面的水分流量和环境相对湿度与混凝土表面湿度差值成正比,即:

$$D \left(\frac{\partial H}{\partial n} \right)_s = f(h - h_s) \quad (14)$$

式中: h_s 为混凝土表面湿度; f 为表面湿度交换系数。

混凝土湿度场的求解主要取决于相关参数的选取。表面湿度交换系数 f 和湿度扩散系数 D 与外界环境及混凝土水灰比、级配情况密切相关,学者们一般通过湿度扩散试验确定特定条件下相关级配混凝土的参数。Sakata^[7] 通过试验结果发现, f 与混凝土水灰比有关,当水灰比为 0.4~0.6 时, f 为 $3.125 \times 10^{-5} \sim 3.125 \times 10^{-4} \text{ m/h}$ 。Bazant 等^[8] 通过试验研究发现:当 h 大于 90% 时, D/D_1 (D_1 为饱和状态下的湿度扩散系数) 接近 1;当 h 处于 70%~90% 时, D/D_1 迅速下降;当 h 小于 70% 时, D/D_1 基本为一常数,可表示为

$$\frac{D}{D_1} = a + \frac{1-a}{1 + [(1-h)/(1-h_c)]^n} \quad (15)$$

式中: a 为湿度扩散系数最小值与饱和状态下湿度扩散系数的比值; h_c 为 $D = 0.5 D_1$ 时混凝土的相对湿度; n 为幂常数。CEB-FIP(1990)模型^[9] 建议 $a=0.05$, $h_c = 0.08$, $n=15$, D_1 按式(16)取值。

$$D_1 = \frac{D_{1,0}}{(f_{cm} - 8)/f_{cko}} \quad (16)$$

式中: $D_{1,0} = 3.6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$; f_{cm} 为圆柱体抗压强度; $f_{cko} = 10 \text{ MPa}$ 。

2.2 ANSYS 模拟及试验验证

湿度场的控制方程为非线性微分方程,可通过加权余量法及有限差分法进行求解,但过程十分繁琐,且计算量大。通过对比发现,湿度场的扩散与温度场的热传导在微分控制方程、初始条件及边界条件等方面具有形式上的一致性。因此,可以利用 ANSYS 的热分析模块对湿度场进行数值模拟,但

需要将命令流中热传导的相关参数替换为湿度场参数,使之适用于湿度场的分析。湿度场与温度场参数对比如表 1 所示。

表 1 湿度场与温度场参数对比

Table 1 Comparison of humidity and temperature field parameters

特性	温度场	湿度场
对流系数	$h(\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}))$	$f(\text{m}/\text{d})$
密度	$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$
比热容	$c(\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}))$	$D_1(\text{m}^2/\text{d})$
传导率	$K(\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}))$	$D \cdot D_1 \cdot \rho$

选用三维热实体单元 Solid 70 计算混凝土湿度场,该单元每节点只有一个温度自由度,可用于三维热分析,实现均匀热流的传递。通过 BLOCK 或 BL 4 命令建模,对于型钢混凝土构件,型钢位置不进行湿度传递,建模时可将此处挖空以起到阻挡作用;通过 MP 命令定义非线性材料参数,可假定比热容和密度均为 1,则传导率即为湿度扩散系数 D ;通过 SFA 命令施加边界条件。

Kim 等^[10] 进行了一维干燥条件下混凝土内部湿度测量试验。试件尺寸为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$,干燥面积为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$,其余 5 个面用环氧树脂密封,不与外界进行水分交换,混凝土的水灰比为 0.4,强度为 53 MPa,环境相对湿度为 50%。用传感器测量距离干燥面为 3、7 和 12 cm 的形心位置处的相对湿度。

用 ANSYS 建立有限元模型,选取 $D_1 = 3.84 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{d}$, $f = 4.8 \times 10^{-4} \text{ m}/\text{d}$,模拟计算结果与文献^[10] 试验结果对比如图 2 所示,两者匹配良好,最大误差为 1.5%,证明了本文方法的可行性。

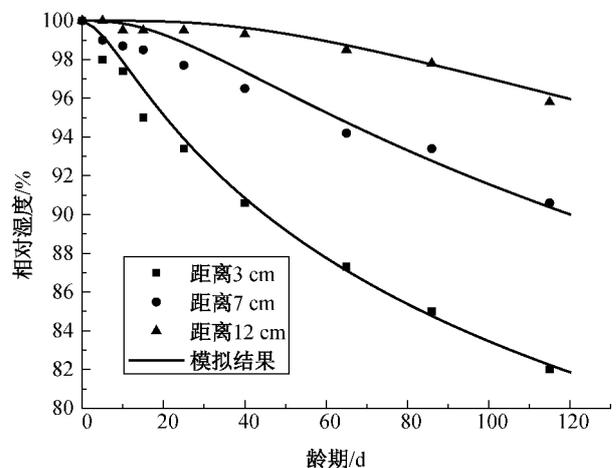


图 2 相对湿度的计算值与实测值对比
Fig. 2 Comparison between calculated results and measured results of relative humidity

3 参数分析

3.1 计算方法

混凝土预测模型用环境相对湿度表征截面相对湿度,将高估内埋型钢混凝土的收缩和徐变。本节采用纤维模型计算考虑湿度分布的内埋型钢混凝土截面的收缩和徐变。基于 ANSYS 湿度场数值模拟结果,利用 Matlab 编程进行计算,计算思路如下:

(1) 将截面划分为若干纤维单元,计算纤维单元的形心 (x_i, y_i) 及面积 A_i ;

(2) 基于 ANSYS 获取各个纤维单元形心处随时间变化的相对湿度分布情况,并存储相对湿度数据;

(3) 将时间分段,输入(2)中得到的相对湿度数据,基于 B3 预测模型计算单元 n_i 在时间 t_j 的收缩应变 ϵ_{shij} 与单元面积 A_{ij} 的乘积 s_{ij} 、徐变函数 J_{ij} 与单元面积 A_{ij} 的乘积 c_{ij} ;

(4) 循环(3)中的计算过程,得到所有单元在时间 t_j 的 s_j 及 c_j ,然后将其分别求和除以截面面积 A ,得到时间 t_j 截面的收缩应变 ϵ_{shj} 及徐变函数 J_j ;

(5) 循环(3)、(4),得到各个时间点截面的收缩应变及徐变函数,绘制曲线。

3.2 参数选用

本节对内埋型钢混凝土截面进行变参数分析,研究不同参数对内埋型钢混凝土截面相对湿度分布及其收缩和徐变的影响。整个参数分析过程如图 3 所示。

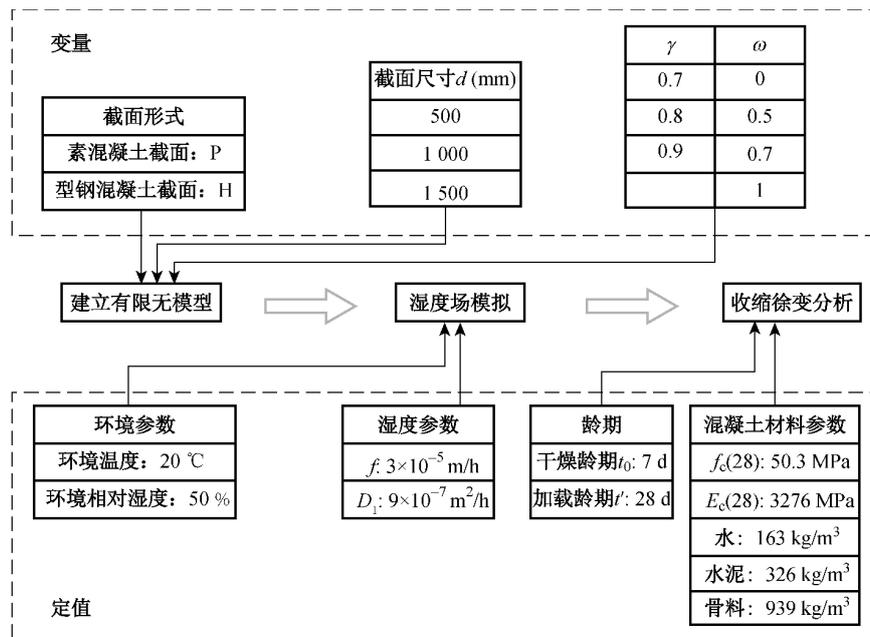


图 3 参数分析流程图

Fig. 3 Procedure of the parametric study

依据不同的截面形式、尺寸、 γ 及 ω (型钢闭口部分翼缘长度与型钢翼缘长度的比值) 值建立有限元模型。其中, ω 可以反映型钢开闭口情况, 例如图 1 (b) 表示 $\omega=0$, 图 1(c) 表示 $\omega=0.5$, 图 1(d) 表示 $\omega=1.0$ 。为避免含钢量不同对结果产生影响, 本文将型钢面积 A_s 及弹性模量 E_s 设为 0, 则可以认为结果的差异均由截面相对湿度分布的差异造成, 与含钢量无关, 从而更好地研究型钢对湿度扩散的阻碍情况。基于文献[11]中给定的环境参数、龄期和混凝土材料参数进行湿度场模拟及收缩和徐变分析, 其中湿度扩散系数由式(15)、(16)计算得到。

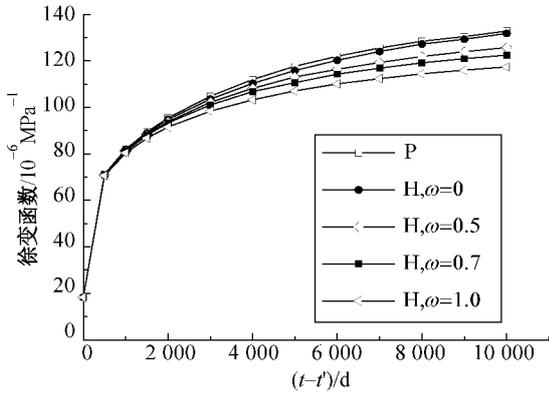
3.3 结果分析

当 $\gamma=0.7, 0.8, 0.9$ 时, 不同尺寸构件的徐变

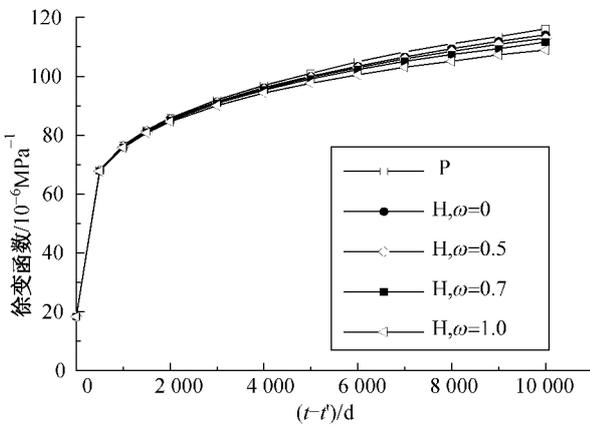
函数分别如图 4~6 所示, 其收缩应变分别如图 7~9 所示。

由图 4~9 可以看出, 截面形式、截面尺寸、开闭口面积比、腹板宽度与截面尺寸之比等参数会对截面的收缩应变和徐变产生影响, 其中对收缩应变的影响更为显著。随着型钢混凝土柱闭口面积增加 (ω 增大), 其徐变与素混凝土柱相比逐渐减小且随时间发展变化更为缓慢, 其中在 $\omega=0.5 \sim 1.0$ 的区间内, 减小幅度较大。这是由于随着 ω 增大, 型钢对湿度扩散的阻碍程度变高, 截面整体湿度水平相对变大。在 γ, ω 不变的情况下, 截面尺寸越大, 其徐变和收缩应变越小且变化越为缓慢。另外, γ 越大, 不同开闭口情况的型钢混凝土柱与素混凝土柱之间收缩应变

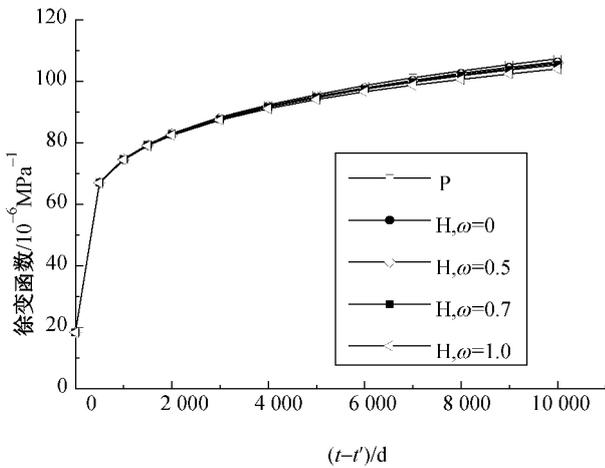
和徐变的差距也越明显,型钢混凝土柱收缩应变和徐变越为缓慢。这是由于 γ 越大,型钢对混凝土湿度扩散的阻碍区域变大,使得截面相对湿度分布与素混凝土相比差异更大。



(a) $d=500$ mm



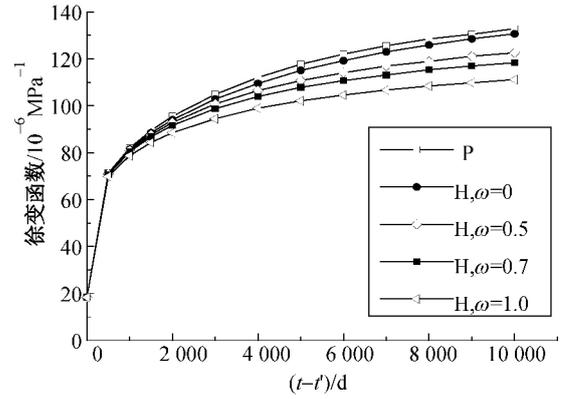
(b) $d=1000$ mm



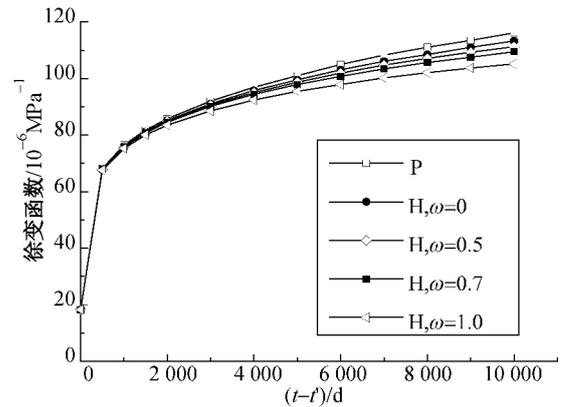
(c) $d=1500$ mm

图 4 不同尺寸构件徐变函数($\gamma=0.7$)

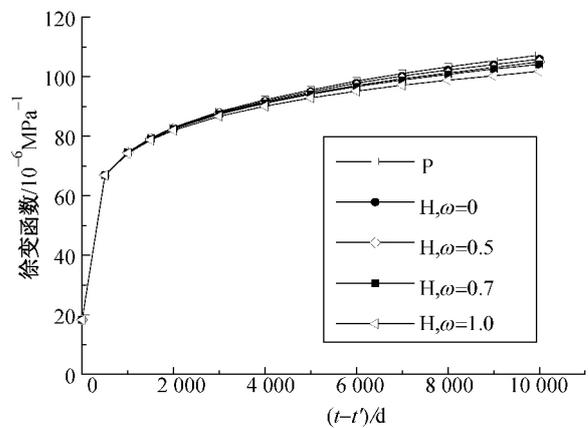
Fig 4 Results of analysis of creep compliance of various columns ($\gamma=0.7$)



(a) $d=500$ mm



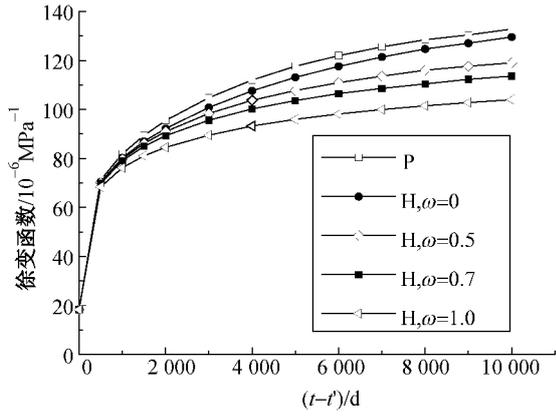
(b) $d=1000$ mm



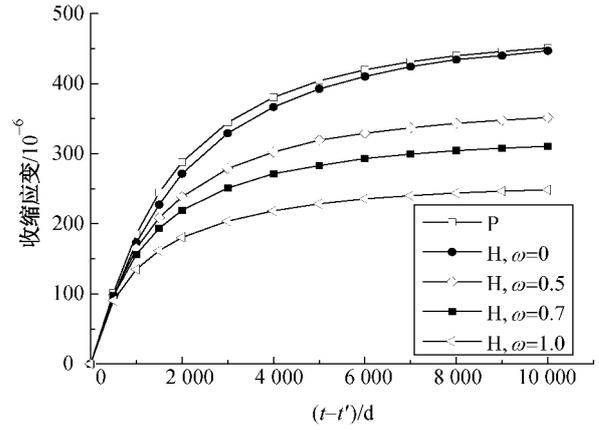
(c) $d=1500$ mm

图 5 不同尺寸构件徐变函数($\gamma=0.8$)

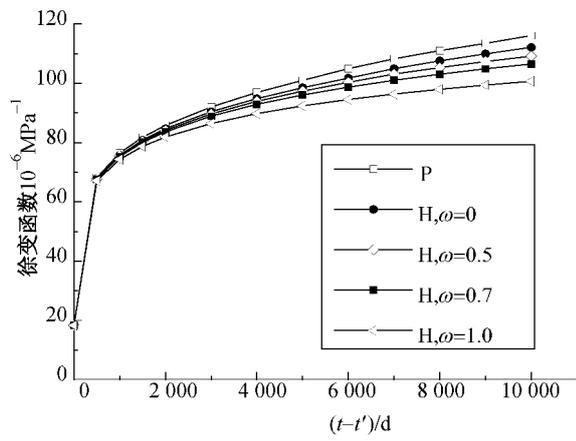
Fig 5 Results of analysis of creep compliance of various columns ($\gamma=0.8$)



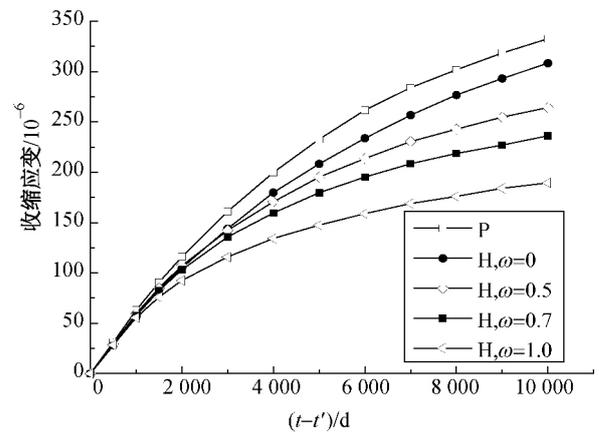
(a) $d=500$ mm



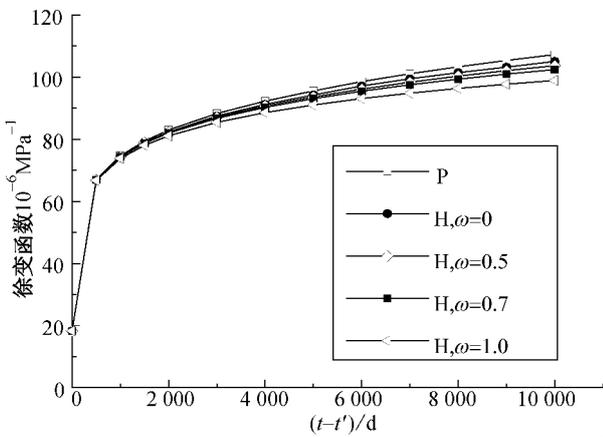
(a) $d=500$ mm



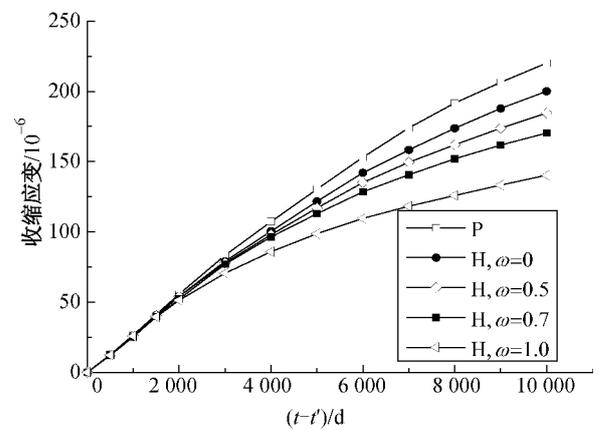
(b) $d=1000$ mm



(b) $d=1000$ mm



(c) $d=1500$ mm



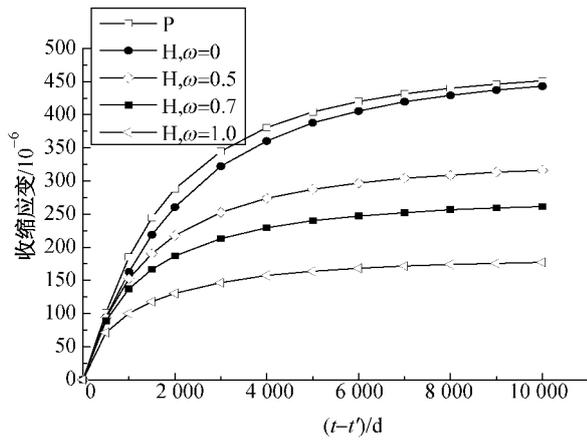
(c) $d=1500$ mm

图 6 不同尺寸构件徐变函数($\gamma=0.9$)

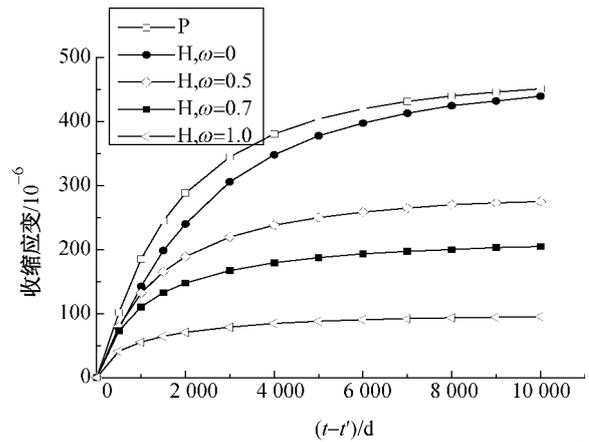
Fig. 6 Results of analysis of creep compliance of various columns ($\gamma=0.9$)

图 7 不同尺寸构件收缩应变($\gamma=0.7$)

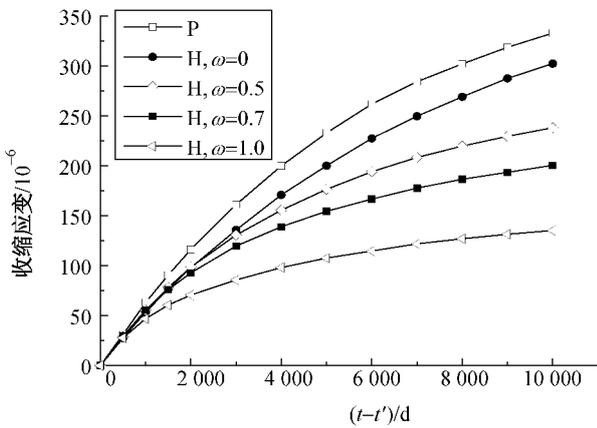
Fig. 7 Results of analysis of shrinkage strain of various columns ($\gamma=0.7$)



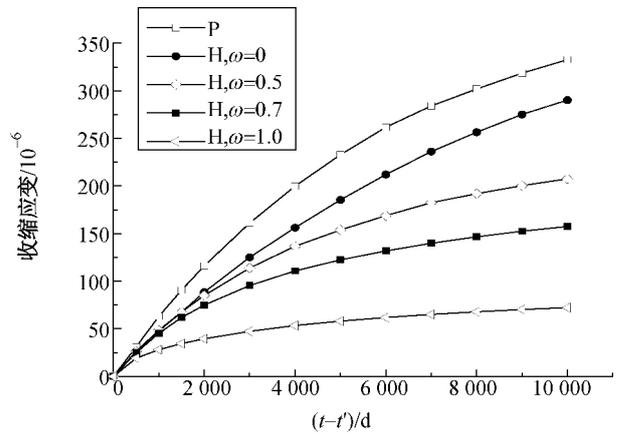
(a) $d=500\text{ mm}$



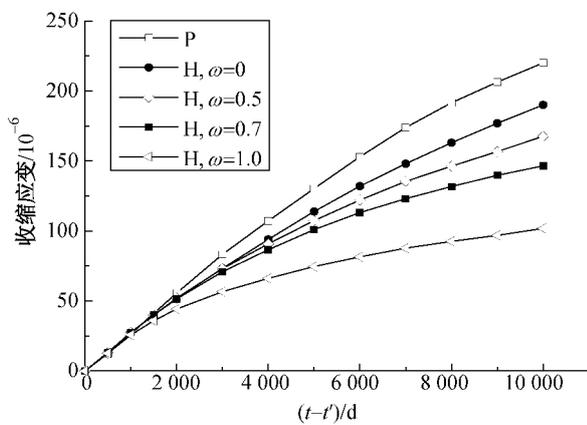
(a) $d=500\text{ mm}$



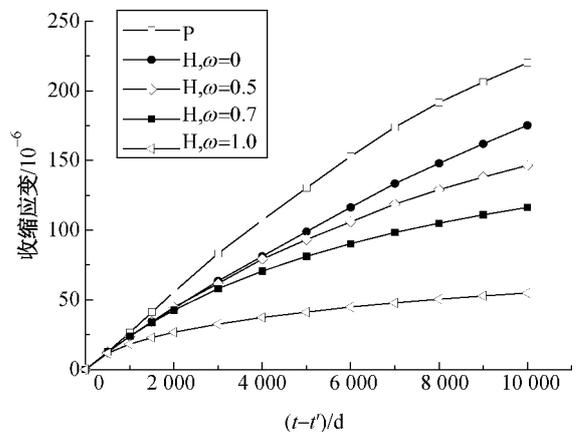
(b) $d=1000\text{ mm}$



(b) $d=1000\text{ mm}$



(c) $d=1500\text{ mm}$



(c) $d=1500\text{ mm}$

图 8 不同尺寸构件收缩应变($\gamma=0.8$)

Fig. 8 Results of analysis of shrinkage strain of various columns ($\gamma=0.8$)

图 9 不同尺寸构件收缩应变($\gamma=0.9$)

Fig. 9 Results of analysis of shrinkage strain of various columns ($\gamma=0.9$)

为了更好地探究相关参数对内埋型钢混凝土柱截面收缩和徐变的影响,需要建立统一的指标对计算结果进行描述。参考 An 等^[11]的研究方法,将型钢混凝土柱截面与相同尺寸素混凝土柱截面之间徐变差异达到 0.1% 的时间定为开始时间 t_1 。 γ 对不同尺寸、不同开闭口面积构件 t_1 的影响如图 10 所示。从图 10 可以看出, $\omega=1.0$ 的型钢混凝土柱截面的徐变差异开始时间 t_1 是 $\omega=0.7$ 的截面的 53% 左右。这主要是由于闭口面积越大对湿度扩散的阻碍越多,使得相应构件截面与素混凝土之间徐变差异达到 0.1% 的时间相对较早。另外, γ 不变,截面尺寸越大,相应 t_1 越晚。这是因为在 γ 相同的情况下,截面尺寸越大,则混凝土保护层厚度越厚,与外界环境进行湿度交换相对困难。

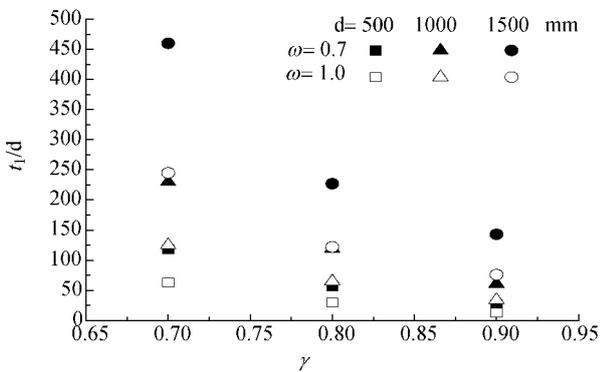
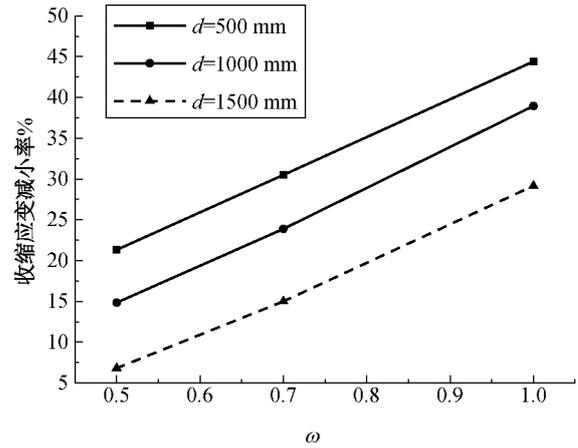


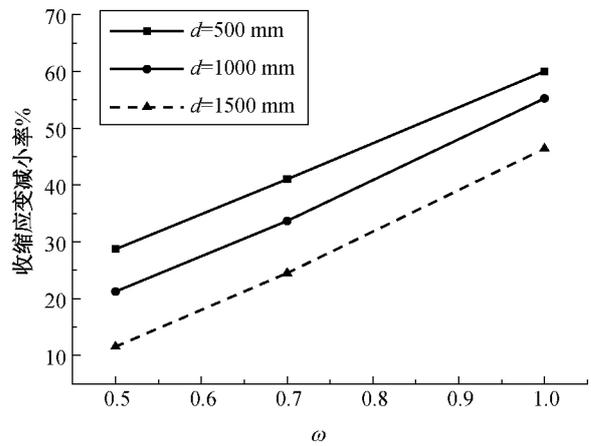
图 10 不同构件的 γ 与开始时间 t_1 关系图

Fig. 10 The relationship diagram between γ and starting time t_1 of various columns

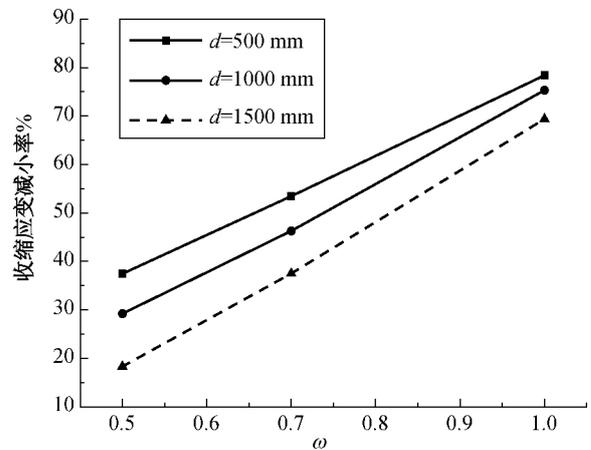
由计算结果可看出,随着 ω 的增加,构件截面收缩应变逐渐减小。为了量化开闭口面积对构件收缩应变的影响程度,本文探讨了收缩应变减小率与开闭口面积指标 ω 之间的关系。计算特定时刻 $t-t'=10\,000$ d (27 年), ω 分别为 0.5、0.7、1.0 的不同尺寸构件的收缩应变的减小率,结果如图 11 所示。由图 11 可以看出,在 γ 相同的情况下,当 ω 在 0.5~1.0 的区间内变化时,构件收缩应变的减小率与 ω 呈线性关系。另外,由图 11 还可以看出,截面尺寸越小,构件收缩应变减小率越大,表明尺寸小的截面收缩变形较快,尺寸大的截面由于湿度扩散缓慢,变形相对缓慢,与上文结论一致。对于构件徐变也有类似结论,此处不再赘述。



(a) $\gamma=0.7$



(b) $\gamma=0.8$



(c) $\gamma=0.9$

图 11 ω 与构件收缩应变减小率关系图

Fig. 11 The relationship diagram between ω and decrease rate of shrinkage strain

4 结 语

本文基于 ANSYS 对部分闭合式型钢混凝土柱湿度场分布进行了数值模拟,利用纤维模型并结合湿度场模拟结果计算考虑截面湿度分布的构件收缩应变和徐变,并对部分闭合式型钢混凝土柱进行了参数化分析,研究截面形式、截面尺寸(d)、开闭口面积比(ω)、腹板宽度与截面尺寸之比(γ)等参数对构件收缩应变和徐变的影响,得出以下主要结论:

(1) 基于 ANSYS 热分析模块可以较为准确地计算混凝土的湿度场分布情况;

(2) 随着型钢混凝土柱闭口面积逐渐增加,构件收缩应变和徐变与素混凝土相比逐渐减小且随时间发展更为缓慢,随着 γ 增大这种差距愈加明显;

(3) 在 γ, ω 不变且时间相同的情况下,截面尺寸越大,构件收缩应变和徐变越小;

(4) $\omega=1.0$ 的型钢混凝土柱徐变与相同尺寸素混凝土柱徐变之间产生 0.1% 差异的开始时间 t_1 是 $\omega=0.7$ 的构件的 53% 左右;

(5) γ 相同,当 ω 在 0.5~1.0 的区间内变化时,构件收缩应变的减小率与 ω 呈线性关系。

参 考 文 献

- [1] PARROT L J. Factors influencing relative humidity in concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 1991, 43(154): 45-52.
[2] AKITA H, FUJIWARA T, OZAKA Y A. Practical procedure

for the analysis of moisture transfer within concrete due to drying[J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(7): 985-994.

- [3] 高原. 干燥环境下混凝土收缩与收缩应力研究[D]. 北京:清华大学土木工程系, 2013: 52-79.
[4] 赵国卫, 张雪, 白浩亮, 等. 基于 Matlab 的高强混凝土早龄期湿度变形计算方法[J]. 工程建设与设计, 2017, (11): 146-148+151.
[5] 杨小兵. 混凝土收缩和徐变预测模型研究[D]. 武汉: 武汉大学土木建筑工程学院, 2004: 76-77.
[6] FICK A. On liquid diffusion[J]. Journal of Membrane Science, 1995, 100(1): 33-38.
[7] SAKATA K. A study on moisture diffusion in drying and drying shrinkage of concrete [J]. Cement & Concrete Research, 1983, 13(2): 216-224.
[8] BAZANT Z P, NAJJAR L J. Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete[J]. Materiaux et Constructions, 1972, 5(1): 3-20.
[9] CLARK L A. CEB-FIP Model Code 1990[J]. Programs Usenix Unix Supplementary Documents, 2008, 40(95): 233-235.
[10] KIM J K, LEE C S. Moisture diffusion of concrete considering self-desiccation at early ages [J]. Cement & Concrete Research, 1999, 29(12): 1921-1927.
[11] AN G H, KWON S H, KIM J K. Effect of wide-flange-steel geometry on the long-term shortening of steel-reinforced concrete columns[J]. Magazine of Concrete Research, 2015, 67(23): 1-15.

(责任编辑: 徐惠华)