

早龄期预制叠合剪力墙收缩变形研究和开裂风险预测

吴 曦, 汪梦甫

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 为研究早龄期预制叠合剪力墙的收缩变形特性, 制作了一片小尺寸预制叠合剪力墙试件并进行试验观测. 通过对剪力墙内部自干燥和湿度扩散形成的湿度场计算, 基于 GL2000 收缩模型, 对预制叠合剪力墙收缩应变进行了计算分析, 计算结果与试验结果吻合良好. 比较了墙厚和外部环境湿度条件参数对预制叠合剪力墙收缩变形的影响, 并对暴露在不同环境湿度条件下的早龄期预制叠合剪力墙开裂风险进行了预测.

关键词: 叠合剪力墙; 收缩; 自干燥; 湿度扩散; 开裂风险

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)01-0061-08

Investigation of shrinkage effect and prediction of cracking risk of precast superimposed shear wall at early ages

WU Xi, WANG Mengfu

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: To investigate the shrinkage behavior of precast superimposed reinforced concrete shear wall (SRCSW) at early ages, one SRCSW specimen in small size was constructed and tested. The moisture field of the specimen developed by self-desiccation and moisture diffusion was analyzed. According to the GL2000 theory, the shrinkage response was calculated and the analytical results match well with the test results. Lastly, the influence of wall thickness and the environmental humidity on the shrinkage behavior was discussed and the cracking potential of SRCSW under different environmental humidity conditions was predicted.

Key words: superimposed shear wall; shrinkage; self-desiccation; moisture diffusion; cracking risk

混凝土收缩是工程结构中的普遍现象, 早龄期 (通常指混凝土基材拌和开始至 28 d 时间段) 混凝土在未形成足够强度之前, 因环境温度、湿度条件和内部自干燥引起的收缩是工程结构产生非荷载裂缝的主要原因, 也是影响混凝土结构可靠性和耐久性不可忽视的因素^[1-3]. 已有的研究表明: 混凝土中的水分会因水泥的水化作用和蒸发而降低, 水化作用引起的自干燥在混凝土内部相对稳定均匀, 水分蒸发则与混凝土所处位置相关, 靠近大气环境的混凝土水分更容易蒸发. 混凝土内部会形成复杂的湿度场, 湿度的不均匀会引起结构收缩变形不平衡^[4-6], 当收缩变形产生的应力大于混凝土的抗拉强度时, 会引起墙体的开裂 (如图 1 所示).

预制叠合剪力墙作为我国近些年来重点推广的装配建筑结构形式, 已在我国众多省份进行工程应用, 但由于施工过程中养护不当或者施工工艺缺

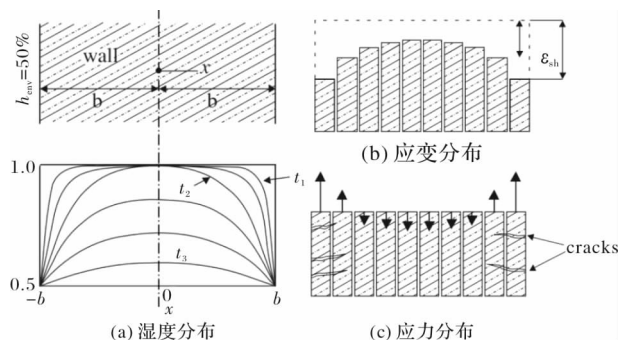


图 1 混凝土由于收缩变形不平衡引起内应力示意图

Fig. 1 Illustration of intrinsic strain generated by inconsistent shrinkage in concrete

陷, 部分已建成的装配建筑中出现了因墙体、楼板及后浇筑部分非结构裂缝引起的渗水问题^[7]. 预制叠合剪力墙是由工厂预制和现场浇筑混凝土部分组成的半预制结构体系, 各组成部分混凝土龄期、环境条件和养护条件不同, 混凝土内部湿度存在差

收稿日期: 2020-08-13

修改稿日期: 2021-01-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578225)

第一作者: 吴曦(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事结构工程抗震方面的研究. E-mail: wuxi_ce@163.com

通讯作者: 汪梦甫(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事结构工程抗震方面的研究. E-mail: wangmengfu@126.com

异, 收缩变形情况也不一致。

目前, 关于预制叠合剪力墙结构的研究多集中在宏观力学性能上, 针对微观层次收缩变形方面尚无研究, 为了解预制叠合剪力墙的收缩变形特性, 本文进行了一系列试验和理论研究。

1 收缩变形试验

1.1 试件设计及制作

本试验设计了一片小尺寸叠合剪力墙, 墙片尺寸为 $1\,000\text{ mm} \times 1\,450\text{ mm} \times 160\text{ mm}$, 各叠合层厚度比为 $1:2:1$, 即两面预制层厚度为 40 mm , 夹心层厚度为 80 mm , 因试件为小尺寸剪力墙构件, 各叠合层厚度较小, 不便振捣, 各叠合层均采用 C30 级自密实混凝土(SCC)分批次进行浇筑。水泥采用南方水泥有限公司坪塘水泥厂生产的 PO 42.5 级基准硅酸盐水泥, 细骨料为细度模数 2.65 的河砂, 粗骨料为最大粒径不超过 12.5 mm 的碎石。经过试配, 试验采用自密实混凝土配合比及工作性能^[8]如表 1 所示。分别留置 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 立方体试块和 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 棱柱体试块用于测量混凝土 3 d、7 d、14 d 和 28 d 抗压强度和弹性模量, 各龄期混凝土的强度和弹性模量如表 2 所示。

表 1 自密实混凝土配合比及工作性能

Tab. 1 Mix proportion and workability of SCC

材料用量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$						坍落度	扩展时
水	水泥	粉煤灰	卵石	沙	减水剂	/mm	间 T_{500}/s
180	320	160	835	840	3.8	760	1.8

表 2 自密实混凝土材料参数

Tab. 2 Mechanical properties of SCC

立方体抗压强度/MPa				弹性模量/GPa			
3 d	7 d	14 d	28 d	3 d	7 d	14 d	28 d
13.2	21.8	25.2	31.4	18.6	21.6	25.6	28.9

试件制作按照预制叠合剪力墙的施工顺序进行: 先制作钢筋笼, 分两次浇筑预制墙身。第一面预制墙身养护 7 d 达到拆模强度后翻转进行第二面预制墙身制作, 待第二面预制墙身养护达到 75% 设计强度后, 将其直立并固定于混凝土基础梁上, 浇筑夹心层混凝土。

1.2 试验观测方案

因混凝土收缩是一个缓慢变化过程, 要求试验测试仪器具备良好的稳定性, 本次试验采用振弦式应变计测试剪力墙的应变变化情况。为比较预制叠合剪力墙不同结构层的收缩徐变差异, 分别在预制

层安装表粘式振弦应变计, 在夹心层安装埋置式振弦应变计。预制层表粘式应变计在第二面预制墙身拆除木模板后通过嵌入支座固定于混凝土表面, 埋置式应变计在制作剪力墙钢筋笼时固定于钢筋上, 待夹心层混凝土浇筑后与剪力墙形成整体。表粘应变计和埋置应变计对应测点位置分别为距离墙外面 10 mm 和 70 mm 处, 应变计的安装平面及剖面定位如图 2 所示。

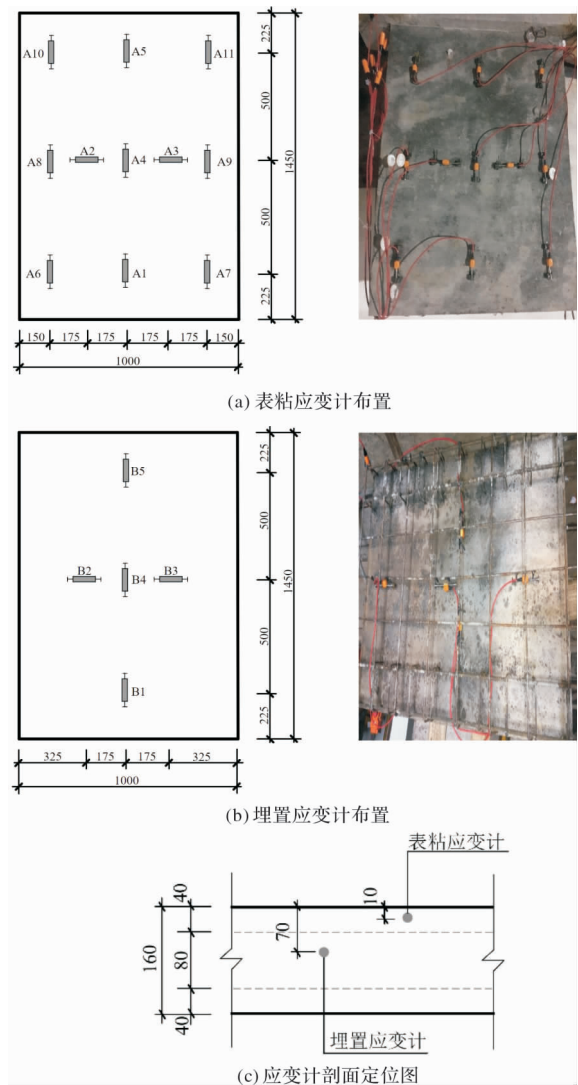


图 2 应变计安装示意图

Fig. 2 Arrangement of strain gauges

早期混凝土收缩变形观测周期从夹心层混凝土浇筑开始, 测量频率为每天观测一次, 同步记录实验室温度和湿度, 持续观测 28 d。为避免扰动, 保持相对稳定环境条件, 试件放置于湖南大学工程楼地下实验室进行长期观测。

1.3 试验结果

28 d 观测周期内实验室温度和湿度如图 3 所示, 温度在 $25.0 \sim 27.8^\circ\text{C}$ 之间波动, 相对湿度变化范围为 $80\% \sim 92\%$, 环境条件相对比较稳定,

观测周期内平均湿度和温度约为 86% 和 26.3℃。如图 4(a)~(d)所示, 受环境条件影响, 预制层各测点收缩应变曲线存在一定程度波动, 但收缩应变发展趋势相近, 随着龄期的增长收缩应变逐步增大。预制层 225 mm 高度竖直方向测点(A1、A6、A7)收缩应变范围为 66~75 微应变, 预制层 725 mm 高度竖直方向测点(A4、A8、A9)收缩应变范围为 79~84 微应变, 预制层 1 225 mm 高度竖直方向测点(A5、A10、A11)收缩应变范围为 82~86 微应变, 水平方向测点(A2、A3)应变变化为 78 微应变。由图 5 可知, 由于叠合墙板内腔封闭, 夹心层前 10 d 时间高湿度自密实混凝土表现为微膨胀状态, 最大膨胀应变约为 30 微应变, 随后混凝土凝固收缩, 应变随着龄期的增长不断增大, 在第 28 天水平方向测点(B2、B3)收缩应变值分别为 50 和 54 微应变, 竖直方向测点(B1、B4、B5)应变变化分别为 55、58、62 微应变。

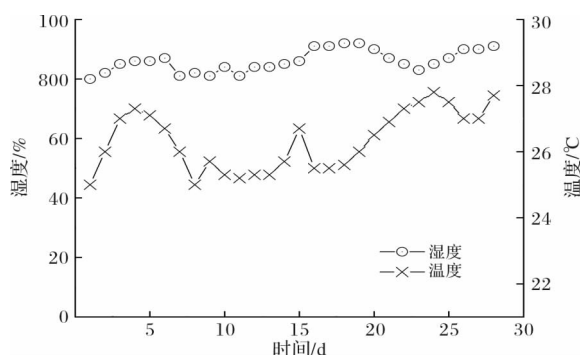


图 3 温度和湿度变化

Fig. 3 Ambient temperature and relative humidity changes

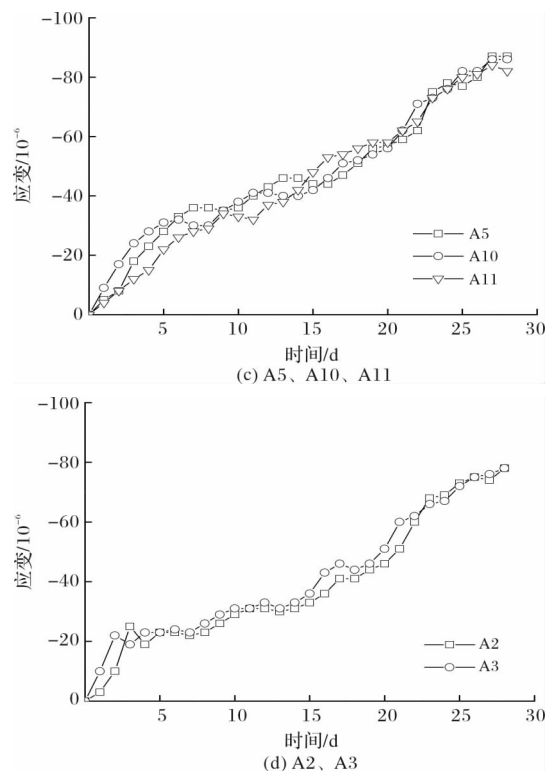
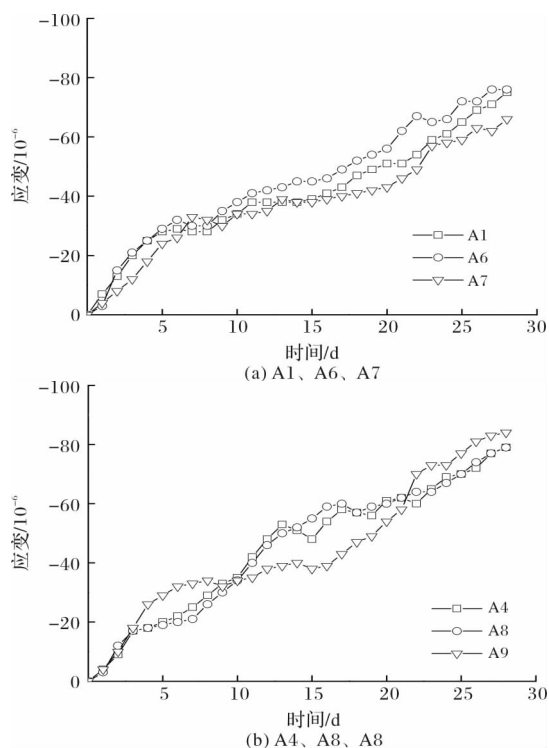


图 4 预制层测点收缩应变变化

Fig. 4 Time development of shrinkage at the prefabricate layer

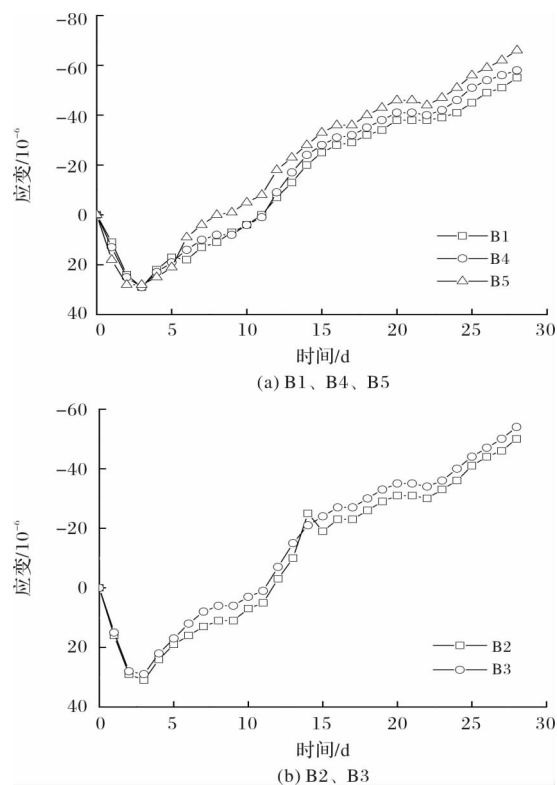


图 5 夹心层测点收缩应变变化

Fig. 5 Time development of shrinkage at the internal layer

试件预制层和夹心层因浇筑时间不同, 收缩应变呈现一定差异, 预制墙身收缩应变大于夹心层应变, 这种应变不平衡可能会导致墙体非结构裂缝。预制层和夹心层在水平方向应变变化相当, 竖直方

向上部测点由于没有顶部约束, 应变变化比下部靠近基础梁处测点稍大. 总体而言, 沿墙面方向各个测点收缩变形较为均匀, 呈现各向同性变化. 沿墙厚方向, 与大气环境接触的预制层收缩变形更明显.

2 基于湿度场的收缩变形计算

早龄期混凝土的收缩与其水化作用产物—水化硅酸钙(CSH)有关. 混凝土由水泥基材拌和时的流动状态逐步凝固硬化直至趋于稳定过程中, 混凝土内 CSH 胶凝体逐渐形成. 同时, 随着水化作用进行, 形成网状结构的 CSH 胶凝体体积逐渐减小, 并形成孔隙结构. 当环境湿度低于混凝土内部湿度时, 孔隙中的毛细水会蒸发. 因此, 早龄期混凝土形成结构强度过程中, 一方面会因水化作用出现体积自收缩现象, 另一方面, CSH 胶凝体材料孔隙毛细孔水蒸发作用引起混凝土的干收缩^[9-10].

2.1 考虑自干燥与水分扩散的湿度场变化

预制叠合剪力墙墙身单元为工厂制作, 运至施工现场安装定位好后, 进行二次浇注混凝土, 通过往叠合剪力墙内腔浇注混凝土使之形成结构整体. 夹心层混凝土为现场浇筑, 初期自密实混凝土处于湿度饱和状态, 经过一段时间后混凝土内部开始水化作用, 夹心层混凝土湿度逐渐下降, 并产生收缩反应. 叠合剪力墙预制墙身暴露于外部环境中, 当环境相对湿度低于墙内部湿度时, 夹心层水分会向外部散失, 并随混凝土龄期的增长逐步与外部环境湿度趋于平衡.

(1) 自干燥效应

根据文献[11], 早龄期混凝土随龄期发展, 混凝土内部水分会不断减少, 主要为水泥水化作用引起的自干燥水分损失(Δh_s)和湿度梯度差导致的湿度扩散(Δh_d)(如式(1)和图 6 所示). 其中内部水化作用下混凝土的湿度变化可分为两个主要阶段: (1)湿度饱和阶段, 混凝土处于塑性状态, 混凝土内部水分充足; (2)湿度下降阶段, 随着水泥水化作用进行, 混凝土流动性下降, 水泥逐步硬化, 水泥石之间形成毛细孔隙, 孔隙间液态水逐渐减少. 文献[12]通过试验测定了完全密闭条件下, 这两个阶段湿度变化同混凝土水化程度 α 的关系如式(2)所示:

$$\Delta h = \Delta h_s + \Delta h_d \quad (1)$$

$$\Delta h_s = \begin{cases} 0, \alpha \leq \alpha_c \\ (1.0 - h_{s,u}) \left(\frac{\alpha - \alpha_c}{\alpha_u - \alpha_c} \right)^\beta, \alpha > \alpha_c \end{cases} \quad (2)$$

$$\alpha = \alpha_u \exp[-(A/t_e)^B] \quad (3)$$

$$t_e = \int_0^t \exp\left(\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273 + T_c} \right)\right) dt \quad (4)$$

上述公式中, $\alpha_u = \frac{1.031w/c}{0.194 + w/c}$ 为水泥的最终

水化度, 可根据混凝土中的水灰比(w/c)确定. $h_{s,u}$ 是水泥完全水化作用下对应的相对湿度, α_c 是混凝土内部相对湿度由 100% 开始下降时的临界点水化度. 水泥水化度 α 可按公式(3)计算其在 20℃ 标准温度下与水泥等效龄期 t_e 的变化, R 为标准气体常量, T_c 为混凝土的温度, E_a 为水泥水化作用活化能^[12-13].

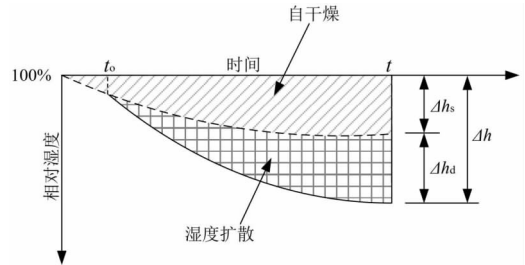


图 6 早龄期混凝土内部湿度变化

Fig. 6 Variation of relative humidity in concrete at early ages

(2) 湿度扩散效应

将叠合剪力墙看做各向同性的多孔介质, 其内部湿度扩散类似于热力学中热能传递, 服从 Fick 第二定律, 按照板厚方向的一维扩散考虑(如图 7 所示), 其湿度扩散可按公式(5)表示, 其中, $D(h)$ 为水分扩散系数, 可根据 CEB-FIP 2010^[14] 推荐取值.

$$\frac{\partial h_d}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D(h) \frac{\partial h_d}{\partial x} \right] \quad (5)$$

$$D(h) = D_1 \left\{ m + \frac{1-m}{1 + [(1-h)/(1-h_c)]^n} \right\} \quad (6)$$

对于表面暴露于环境条件下的叠合剪力墙, 墙体内部湿度的传递速度跟混凝土内部湿度与边界处湿度差成比例, 其关系如式(7)所示.

$$-D(h) \frac{\partial h}{\partial x} = f_h (h - h_{en}) \quad (7)$$

上式中, f_h 为界面湿度交换系数, h_{en} 为界面处相对湿度.

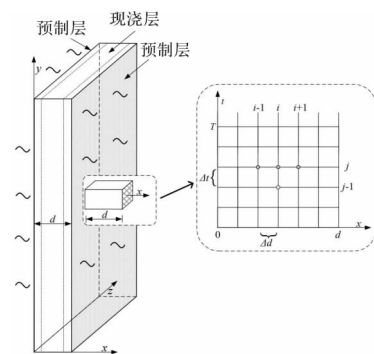


图 7 叠合剪力墙湿度场模拟示意图

Fig. 7 Illustration of moisture transformation in SRCWSW

2.2 湿度场计算结果

结合式(1)~(7)可建立偏微分方程组(8)。选取试件混凝土浇筑时相对湿度作为初始条件,即相对湿度为 $h_i=100\%$ 。将与剪力墙外边缘接触的环境湿度作为边界湿度,根据实验室测得平均湿度 $h_{en}=86\%$, d 为叠合剪力墙的厚度。将叠合剪力墙厚度和时间离散化,沿墙厚方向划分为16个位移单元,将时间按照28 d进行分割,利用无条件计算稳定的向后差分法,可以求解叠合剪力墙内部湿度变化情况。综合文献[6, 12, 13, 14],采用如表3所示的湿度计算模型参数,计算得到的湿度场情况如图8所示:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(D(h)\frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial h_s}{\partial x}, x \in [0, d], t \in [0, T] \\ h(x, t) = h_i, t = 0, x \in [0, d] \\ D(h)\frac{\partial h}{\partial t} = f_h(h - h_{en}), x = 0, t \in [0, T] \\ D(h)\frac{\partial h}{\partial t} = f_h(h - h_{en}), x = d, t \in [0, T] \end{cases} \quad (8)$$

从图8(a)可以看出,28 d计算周期内,应变计

测点深度位置相对湿度随龄期增长不断降低,预制层与大气接触,在平均环境湿度为86%的实验室条件下,湿度扩散速度比靠近墙中心的现浇层快,随着龄期的增长,预制层分析点湿度由初始时刻100%的相对湿度逐渐降低,并与环境湿度趋近。由图8(b)可以知道,墙厚方向,湿度梯度呈现抛物线状,靠近扩散表面的位置湿度变化速率更快。

2.3 预制叠合剪力墙收缩应变计算

对于混凝土收缩变形的基本特性,已经形成多种计算理论,比较经典的有CEB-FIP 2010、ACI-209、B3、GL2000^[14-17]等,大多数研究认为混凝土收缩产生的应变变化与其内部相对湿度和龄期有关,本文采用计算结果更为精确的GL2000模型来计算叠合剪力墙收缩应变^[18]。

$$\epsilon_{sh} = \epsilon_{shu}\beta(h)\beta(t) \quad (9)$$

$$\epsilon_{shu} = 900K\left(\frac{30}{f_{cm28}}\right)0.5 \times 10^{-6} \quad (10)$$

$$\beta(h) = 1 - 1.18h^4 \quad (11)$$

$$\beta(t) = \left[\frac{t - t_c}{t - t_c + 0.12(v/s)}\right]^{0.5} \quad (12)$$

表 3 湿度场计算模型参数

Tab. 3 Input parameters for moisture calculation

$h_{s,u}$	α_c	β	α		$D(h)/m^2 \cdot d^{-1}$				$f_h/m \cdot d^{-1}$
			A	B	D_1	h_c	m	n	
0.835	0.52	3.187	19.7	1.5	8.64×10^{-5}	0.8	0.05	15	0.055

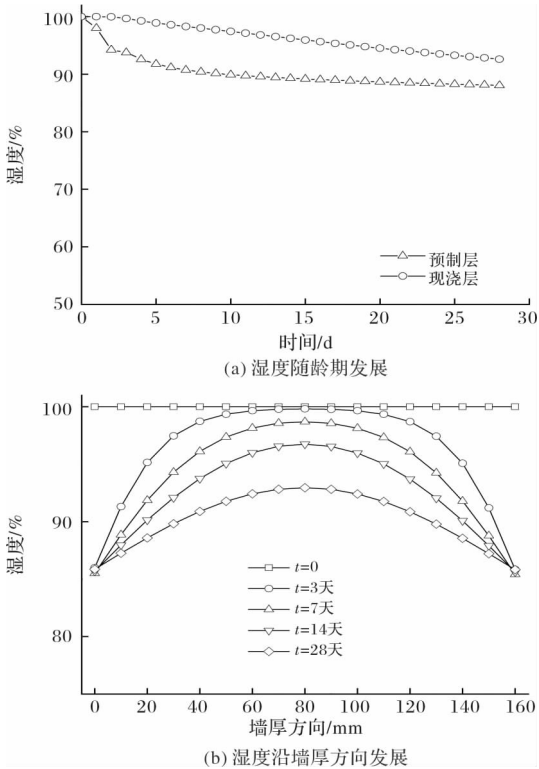


图 8 预制叠合剪力墙湿度场模拟结果

Fig. 8 Simulation results of moisture diffusion in SRCSW

式中, t_c 为养护时间; K 是与水泥砂浆相关的参数,文中为普通硅酸盐水泥,按照1.0取值; v/s 为体表面积比; f_{cm28} 为混凝土28 d龄期的抗压强度。

根据湿度场变化可以求得剪力墙的收缩应变随龄期的增长情况,计算结果如图9所示。叠合剪力墙预制层外侧暴露于大气环境,混凝土湿度相较于夹心层变化更大,产生的收缩应变相较于夹心层变化大,因此预制叠合剪力墙与大气接触的表面是更容易因收缩反应产生裂缝的部位。同时,夹心层混凝土在初期相对湿度较大,会产生正向膨胀应变,随龄期的增长逐渐转变为收缩应变。由图9可以看出,计算得到的测点收缩应变情况与试验结果(图4和图5所示试验结果平均值)曲线吻合较好。

3 收缩变形参数分析与开裂风险预测

3.1 构件尺寸对收缩变形的影响

为了研究墙厚变化对湿度及收缩应变的影响,比较了160 mm、240 mm、300 mm三种厚度叠合剪力墙在环境湿度为85%时,28 d龄期内的易产

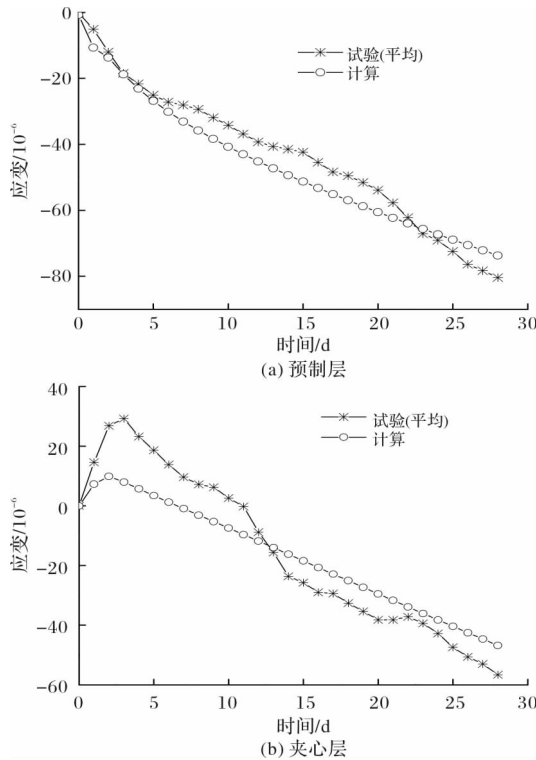


图 9 试验结果与计算结果的比较

Fig. 9 Comparison of test results with calculated results

生收缩裂缝的墙身外表面湿度变化和收缩应变的发展情况,结果如图 10 所示:三种不同厚度剪力墙在相同的环境湿度条件下,墙身外表面湿度变化和收缩应变变化趋势相同,在较早的几天,湿度变化剧烈,随龄期的增长趋于平缓,并逐步与外部环境湿度趋近。较小的墙厚剪力墙,水分更容易蒸发,产生的收缩应变也更加明显。

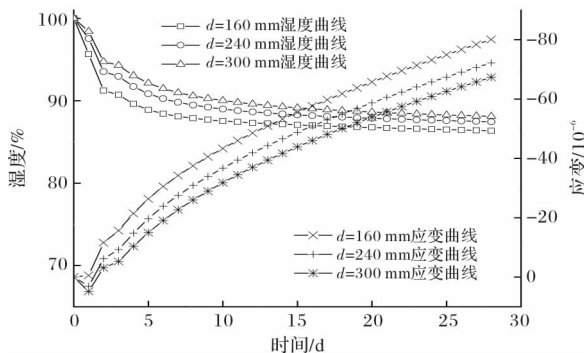


图 10 墙厚参数对湿度和收缩应变的影响

Fig. 10 Effect of the thickness of shear wall on the moisture diffusion and shrinkage strain

3.2 环境湿度对收缩变形的影响

为了研究外部环境湿度对混凝土水分散失和收缩应变的影响,分别计算了相同墙厚条件下,外部环境湿度分别为 85%、65% 和 45% 时,墙身外表面混凝土湿度和收缩应变情况。由图 11 可知,较低的外部环境湿度会产生较大的湿度场差值,墙体内部过大的湿度损失会引起明显的收缩应变变化。

因此,混凝土收缩对外部湿度环境较为敏感,控制剪力墙表面湿度是减少收缩变形有效手段。

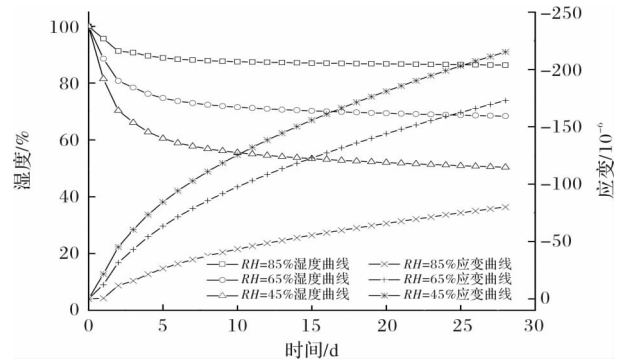


图 11 环境湿度参数对湿度和收缩应变的影响

Fig. 11 Effect of the environmental humidity on the moisture diffusion and shrinkage strain

3.3 开裂风险预测

早龄期混凝土强度(抗压和抗拉强度)处在不断增长阶段。研究表明,当混凝土的收缩应力大于 70% 受拉强度时,混凝土会出现较大的开裂风险^[19]。因此,本文根据式(13)来定义混凝土的开裂风险,其中, $\sigma_s(t)$ 为叠合剪力墙外表面因收缩作用而产生的应力, $E_{cm}(t)$ 为混凝土的弹性模量, $f_t(t)$ 为混凝土受拉强度,通常认为抗拉强度大约等于抗压强度的 0.1 倍左右。利用 GL2000 理论中的混凝土弹性模量和强度计算公式,可以得到不同强度等级混凝土材料力学性能随龄期的发展规律,通过式(13)即可计算得到各种工况下叠合剪力墙的开裂风险。

$$\zeta = \frac{\sigma_s(t)}{f_t(t)} = \frac{\varepsilon_s(t)E_{cm}(t)}{f_t(t)} \quad (13)$$

由上文的参数分析可知,因收缩应力导致的裂缝更容易出现在厚度较小的叠合剪力墙表面。为预测不同强度等级混凝土和外部环境湿度条件下,叠合剪力墙的开裂风险,本文以 160 mm 厚剪力墙为例,比较了采用强度等级 C30~C45 混凝土强度材料和 55%~85% 环境湿度条件下剪力墙的开裂风险。由图 12 可以看出 85% 环境湿度条件下,28 d 龄期内,收缩应力始终低于混凝土抗拉强度,叠合剪力墙不存在开裂风险;当环境湿度降至 75% 时,采用 C30 级混凝土的叠合剪力墙在第 12 天龄期开始出现墙体开裂风险,因剪力墙内部湿度散失,墙体表面收缩应力逐渐增大并大于混凝土抗拉强度增长。提高混凝土强度等级至 C45 级,早龄期剪力墙开裂风险低于临界值 0.7;当环境湿度继续降低,混凝土开裂临界点逐步提前。在 55% 环境湿度条件下,采用 C30~C45 强度等级混凝土的剪力墙因墙体与环境湿度场差值较大,墙体内部水分散失明显,由此引起的收缩应力快速增长,在第 4~

12 天龄期便开始出现开裂风险. 同时, 采用更高强度等级的混凝土可以延缓开裂风险临界点出现时间.

综合图 12(a)~(d)分析结果可知, 随着环境湿度降低, 墙体开裂风险迅速增长. 当环境湿度降至 85% 以下, 在较早龄期开始对混凝土进行养护可以有效降低墙体开裂风险.

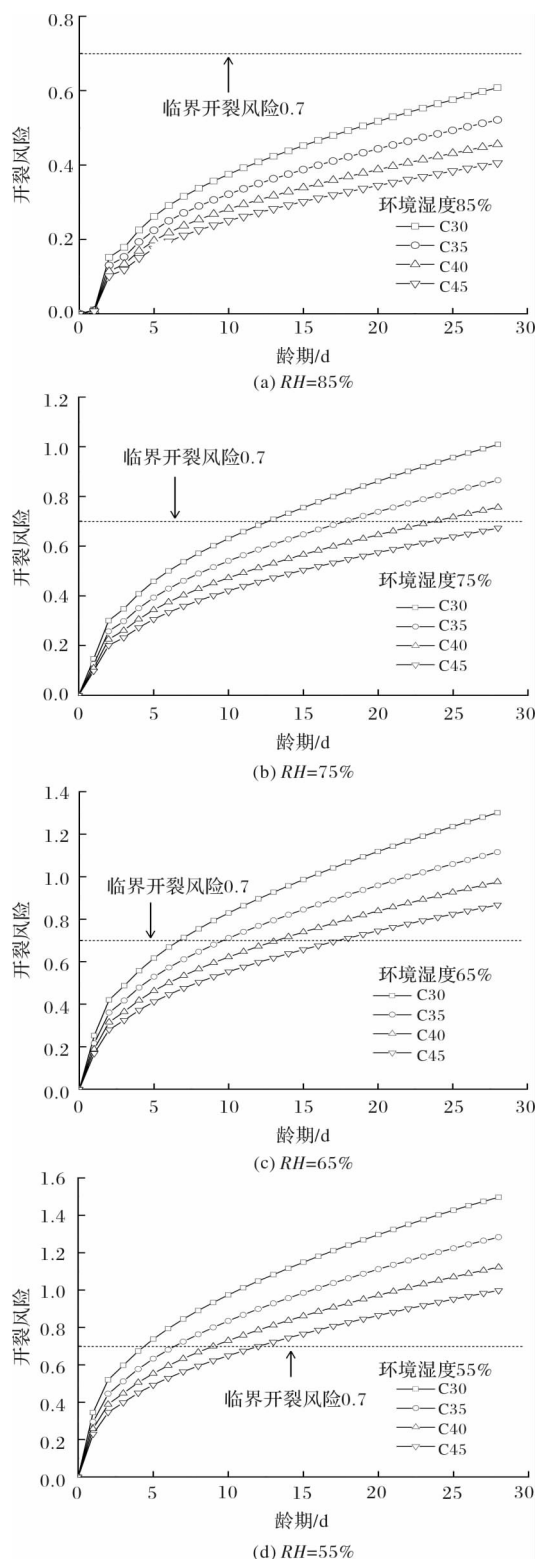


图 12 开裂风险预测

Fig. 12 Prediction of cracking risk

4 结论

(1) 预制叠合剪力墙因混凝土浇筑时间不同, 各叠合层收缩变形情况不一致, 预制层收缩应变大于夹心层. 夹心层混凝土现场浇筑后, 初期高湿度混凝土呈现膨胀状态, 之后随着混凝土硬化转为收缩变形状态. 沿墙面方向各个测点收缩应变变化较为接近, 呈现各向同性变化. 沿墙厚方向, 与大气环境接触的预制层收缩变形更明显;

(2) 早龄期预制叠合剪力墙因自干燥和湿度传递会产生内部湿度场, 并随龄期的增长, 内部混凝土湿度逐渐降至与环境湿度一致. 剪力墙内部湿度场呈现抛物线形态, 墙体外侧混凝土湿度散失速度较墙体内部大;

(3) 通过对混凝土内部湿度场分析, 结合 GL2000 自收缩预测模型, 本文计算得到了预制叠合剪力墙内部收缩变形情况, 与收缩试验结果吻合良好;

(4) 通过对墙厚、环境湿度等参数进行分析, 比较了不同条件下早龄期预制叠合剪力墙的湿度变化情况. 墙厚较薄的剪力墙容易出现水分散失, 环境湿度是影响叠合剪力墙湿度变化的敏感因素, 过大的剪力墙内外湿度差会引起较大的湿度场变化;

(5) 结合 GL2000 混凝土弹性模量及强度发展理论, 通过对收缩应力与抗拉强度的比较, 对不同环境湿度条件和不同强度等级混凝土材料的剪力墙开裂风险进行预测. 提高混凝土强度等级可以降低剪力墙开裂风险. 当环境湿度低于 85% 时, 随环境湿度降低, 墙体开裂风险迅速增长, 开裂临界点龄期提前, 需要及时对混凝土进行施工养护.

参考文献 References

- [1] 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: 1-7.
ZHU Bofang. Temperature stress and temperature control of mass concrete[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999: 1-7.
- [2] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017: 4-13.
WANG Tiemeng. Cracking control of engineering structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017: 4-13.
- [3] ZDENĚK P. Bažant, MILAN Jirásek. Creep and hygrothermal effects in concrete structures[J]. Solid Mechanics & Its Applications, 2018(225): 43-47.
- [4] LIANG Siming, WEI Ya. Methodology of obtaining

- intrinsic creep property of concrete by flexural deflection test[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2019(97):288-299.
- [5] 张君, 侯东伟, 高原. 混凝土自收缩与干燥收缩的统一内因[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2010, 50(9):1321-1324.
- ZHANG Jun, HOU Dongwei, GAO Yuan. Uniform driving force for autogenous and drying shrinkage of concrete[J]. *Journal of Tsinghua University (Sci & Tech)*, 2010, 50(9):1321-1324.
- [6] 魏亚, 高翔. 混凝土硬化过程中的应力-应变发展和基于内部湿度的开裂风险预估[J]. *工程力学*, 2014(3):138-143.
- WEI Ya, GAO Xiang. Stress-strain development and prediction of cracking potential based on humidity drop rate of hardening concrete[J]. *Engineering Mechanics*, 2014(3):138-143.
- [7] 齐宝库, 王丹, 白庶, 等. 预制装配式建筑施工常见质量问题与防范措施[J]. *建筑经济*, 2016, 37(5):28-30.
- QI Baoku, WANG Dan, BAI Shu, et al. Common quality problems and preventive measures of prefabricated construction[J]. *Construction Economy*, 2016, 37(5):28-30.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 自密实混凝土应用技术规程: JGJ/T 283-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012:8-9.
- MOHURD. Technical specification for application of self-compacting concrete: JGJ/T 283-2012 [S]. Beijing: China Architecture Building Press. 2012:8-9.
- [9] DAVIS H E. Autogenous volume change of concrete [D]//Proceeding of the 43rd Annual American Society for Testing Materials. Atlantic City: ASTM, 1940, 1103-1113.
- [10] POWERS T C. The thermodynamics of volume change and creep[J]. *Matériaux et Constructions*, 1968, 1(6):487-507.
- [11] KIM J, KIM J K, LEE C. Moisture diffusion of concrete considering self-desiccation at early ages[J]. *Cement & Concrete Research*, 1999, 29(12):1921-1927.
- [12] DING Xiaoping, ZHANG Jun, WANG Jiahe. Integrative modeling on self-desiccation and moisture diffusion in concrete based on variation of water content[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2019(97):322-340.
- [13] KIM J K, HAN S H, LEE K M. Estimation of compressive strength by a new apparent activation energy function[J]. *Cement & Concrete Research*, 2001, 31(2):217-225.
- [14] Comité Euro-International du Béton (CEB). CEB-FIP model code for concrete structures[S]. Switzerland: Lausanne, 2010:160-162.
- [15] ACI 209R-92. Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures. In: Reported by ACI Committee 209[C]. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute; 1992:4-16.
- [16] BAZANT. Z. P, HAUGGAARD. A. B, BAWEJA. ULM et al. Microprestress-solidification theory for concrete creep. I: Aging and drying effects[J]. *Journal of Engineering Mechanics*. 1997, 123:1188-1194.
- [17] GARDNER N J, LOCKMAN M J. Design provisions for drying shrinkage and creep of normal strength concrete[J]. *Aci Materials Journal*, 2001, 98(2):159-167.
- [18] GOEL R, KUMAR R, PAUL D, et al. Comparative study of various creep and shrinkage prediction models for concrete[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2007, 19(3):249-260.
- [19] LI Hua, LIU Jiaping, WANG Yujiang, et al. Deformation and cracking modeling for early-age sidewall concrete based on the multi-field coupling mechanism[J]. *Construction & Building Materials*, 2015, 88(30):84-93.

(编辑 沈 波)