

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2023.03.001

# 新型装饰建筑结构一体化墙板收缩性能研究

黄心宇, 陈东, 李峰

(安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 新型 GRC-PC 复合墙板是由预制混凝土 (PC) 与玻璃纤维增强水泥 (GRC) 两种材料复合而成的装配式集成产品。为研究该复合墙板的抗裂性能, 以纯 GRC 墙板、纯混凝土墙板和不同厚度的 GRC-PC 复合墙板为对象, 探讨了 GRC 材料的抗裂性能以及 GRC 与 PC 层间连接方式对其影响。通过长期收缩试验, 系统分析了纤维、胶粉的添加质量分数对 GRC 材料抗裂性能的影响。同时, 以 GRC 厚度和复合材料界面连接方式为变量, 开展 GRC-PC 复合墙板的收缩试验。结果表明: GRC 厚度为 15 mm 的复合墙板的收缩性能优于 GRC 厚度为 10 mm 的复合墙板; 在 GRC 与 PC 复合界面采用平接、拉毛、铺设钢丝网 3 种方式中, 使用平接方式可以更有效地提高复合墙板的收缩性能和抗裂性能。

**关键词:** 装配式建筑; GRC-PC 复合墙板; 收缩性能; 抗裂性能

中图分类号: TU375.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2023)03-0001-06

**引文格式:** 黄心宇, 陈东, 李峰. 新型装饰建筑结构一体化墙板收缩性能研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(3): 1-6.

## Study on Shrinkage Performance of New Decorative Integrated Wallboard

HUANG Xinyu, CHEN Dong, LI Feng

(College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

**Abstract:** In order to study the crack resistance performance of the new GRC-PC composite wallboard, a prefabricated integrated product composed of precast concrete (PC) and glass fiber reinforced cement (GRC), taking pure GRC wallboard, pure concrete wallboard and GRC composite wallboard with different thickness as the object, a research has thus been carried out on the crack resistance performance of GRC material and the connection mode between GRC and PC layers, followed by a systematic analysis of the influence of the mass fraction of fiber and rubber powder on the crack resistance of GRC material based on long-term shrinkage tests. Meanwhile, a shrinkage test of GRC-PC composite wallboard is carried out with GRC thickness and composite interface connection mode as variables. The results show that the shrinkage performance of the composite wallboard with a GRC thickness of 15 mm is much better than that of the composite wallboard with a GRC thickness of 10 mm; of the three methods of butt joint, roughening and laying steel wire mesh used for the composite interface, the adoption of butt joint for GRC and PC interface can effectively improve the shrinkage function of the composite wallboard as well as its crack resistance.

**Keywords:** prefabricated building; GRC-PC composite wallboard; shrinkage function; crack resistance performance

收稿日期: 2022-07-06

基金项目: 安徽省教育厅高校自然科学研究基金资助项目 (KJ2021A0608); 安徽省住房与城乡建设科技计划基金资助项目 (2020-YF47)

作者简介: 黄心宇 (1997-), 男, 安徽合肥人, 安徽建筑大学硕士生, 主要研究方向为装配式混凝土结构,  
E-mail: 593844507@qq.com

通信作者: 陈东 (1981-), 男, 安徽蚌埠人, 安徽建筑大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为建筑信息化,  
E-mail: chendong@ahjzu.edu.cn

## 0 引言

GRC<sup>[1-2]</sup> (glass-fiber reinforced compound) 是由水泥、耐碱玻璃纤维、石英砂等原料制备的一种复合材料,因其优异的耐久性和可塑性,常被作为建筑工程领域的功能材料和装饰材料,且被认为是一种绿色建筑材料,具节能环保等特点<sup>[3-4]</sup>。预制混凝土 (precast concrete, PC) 由普通沙子、水泥和水制成。GRC-PC 构件是在 PC 表面复合 GRC 层形成的新型装配构件体系,该体系既能被作为建筑的主体结构,又能发挥 GRC 材料的装饰和构造作用,发挥了两种材料的优势。

然而在实际工程使用中, GRC-PC 体系产品因 GRC 面层易出现开裂与脱落现象。裂痕的出现不但会降低产品的耐久性,还会使起装饰作用的 GRC 面层外观受到影响。因此解决和改善 GRC-PC 体系构件的开裂问题、提高其耐久性成为该新产品研发过程中的重点内容。研究表明, GRC-PC 构件开裂的根本原因是材料的收缩变形引发的裂缝,收缩变形会使构件内部受拉应力的影响,当收缩产生的拉应力超出材料自身所能承受的最大拉应力时,构件就会产生裂痕<sup>[5]</sup>。其中收缩变形主要包括内部水分蒸发引起的干燥收缩与温湿度变化引起的体积收缩,因此欲提高 GRC-PC 体系构件的抗裂性能,应从减少构件干燥收缩与温度变形两方面考虑<sup>[6-7]</sup>。

1) 考虑调整 GRC 配方以减少构件收缩程度。已有研究表明,对 GRC 材料力学性能起决定作用的是原材料中的玻璃纤维和水泥,其中玻璃纤维增强了水泥砂浆的延性和抗拉强度,而水泥砂浆在压缩玻璃纤维时避免了玻璃纤维的屈曲,两种材料组合能有效弱化 GRC 干燥收缩,从而抑制其开裂<sup>[8-10]</sup>。Fang Y. 等<sup>[11]</sup>对不同纤维体积分数和黏结剂/集料比玻璃纤维增强水泥砂浆的抗压强度、抗折强度和耐水性能进行了试验研究,结果表明玻璃纤维对抗弯强度的影响较抗压强度更显著,对比得知添加玻璃纤维的最佳体积分数为 2.5%。Feng H. 等<sup>[12]</sup>以养护时间、纤维体积分数、水灰比为变量,对纤维水泥砂浆进行了压缩和弯曲试验,结果表明纤维含量和水泥用量增加会使砂浆弯曲破坏模式从脆性转变为延性,且能明显增强水泥砂浆抗压强度。因此,适当调整原材料与配合比,可明显改善 GRC 材料的收缩变形性能。

2) 从 GRC-PC 体系构件的尺寸规格、复合面类型、制作工艺等因素研究其收缩性质。D. D. Theodorakopoulos<sup>[13]</sup>研究了以预混铸造工艺和喷雾抽吸铸造工艺制作的两种 GRC 板,在不同尺寸、厚度、

环境湿度因素下的收缩性能,认为 GRC 板的收缩主要受板厚度、制作工艺、环境湿度的影响。同样, Yoo D. Y. 等<sup>[14]</sup>根据 GRC 板收缩开裂的评定,认为板厚的增加可以提高 GRC 板收缩开裂的抗性。另外,在制作过程中分层浇筑混凝土与 GRC 材料时,两种材料的凝结硬化时间差以及黏结度、粗糙度差异也会影响其收缩变形及裂缝的开展<sup>[15-16]</sup>。因此,需考虑 GRC 与 PC 复合交界面工艺,最大程度优化该构件生产方案,达到成品抗裂要求。

为优化和解决 GRC-PC 体系构件的开裂问题,本研究基于自主研发的新型抗裂 GRC 材料,制作并展开了 GRC-PC 复合墙板的收缩试验。研究以 GRC-PC 复合墙板的 GRC 面层厚度与 GRC-PC 复合连接方式为变量,通过测量复合墙板在试验期内的收缩应变,得到其收缩应变规律,并与纯混凝土板和 GRC 板收缩模型进行比照,研究 GRC 与混凝土两种材料以不同方式复合后对于构件长期收缩应变的影响,以为 GRC-PC 复合板材的实际应用以及未来的发展提供理论参考。

## 1 试验概况

### 1.1 原材料

本研究所用材料主要为 GRC 水泥砂浆和预制混凝土。GRC 的原材料包括:水泥,用作 PW,采用 52.5 级白硅酸盐水泥;沙,选用河沙,细度模数为 1.4;减水剂,选用 PCA-1 聚羧酸盐高效减水剂;纤维选用短切耐碱玻璃,密度为 2.68 g/cm<sup>3</sup>,弹性模量为 72 GPa,抗拉强度为 1 700 MPa,直径为 14 μm;胶粉选用可再分散乳胶粉,U 型膨胀助剂,主要由硫酸铝、铝等组成的氧化物、硫酸铝钾等膨胀剂组成,可以提高材料的抗裂性能。本试验采用浇筑法制作 GRC 试件,根据性能指标,水灰质量比为 0.31,水泥与河砂的质量比为 11<sup>[17]</sup>。本试验使用粉煤灰和偏高岭土替代部分水泥,以减少水泥用量,降低水化速率,减少 GRC 材料在土木工程中的开裂和收缩问题。所设计水灰质量比为 0.281,水泥与河砂质量之比为 8:9。表 1 列出了砂浆的基础配合比,表 2 列出了纤维、胶粉、减水剂、粉煤灰、偏高岭土的配比。粉煤灰质量分数固定为 10%,偏高岭土质量分数固定为 5%,减水剂质量分数固定为 2%。GRC 材料的抗裂性能可以通过添加玻璃纤维来提高,本研究提出从降低收缩和提高水泥基材料抗拉强度出发,系统研究纤维、胶粉对 GRC 材料力学性能和抗裂性能的影响:1) 质量分数为 0.1%, 1.5%, 2.0% 纤维的

掺入对 GRC 力学性能和抗裂性能的影响; 2) 质量分数为 1.5%, 2.5%, 3.5% 胶粉的掺入对 GRC 力学性能和抗裂性能的影响。

表 1 砂浆基础配合比

Table 1 Mix ratio of mortar foundation

名称	水泥	砂子	粉煤灰	偏高岭土	减水剂
添加质量/g	800	900	80	40	16

表 2 GRC 砂浆试验配比分组

Table 2 GRC mortar test ratio grouping

编号	添加质量分数/%				
	粉煤灰	偏高岭土	减水剂	玻璃纤维	改性胶粉
0	10	5	2	0	0
1	10	5	2	1.0	0
2	10	5	2	1.5	0
3	10	5	2	2.0	0
4	10	5	2	2.0	1.5
5	10	5	2	2.0	2.5
6	10	5	2	2.0	3.5

## 1.2 试件制作

### 1.2.1 干缩试验试件制作

首先进行每组 GRC 的流动度测定, 再根据表 2 所示配合比, 每组试件制作 3 块体积均为 25 mm × 25 mm × 280 mm 的试件进行干缩试验。使用比长仪测量不同养护龄期下试件长度, 每龄期 3 个试件, 取平均值, 不同龄期水泥砂浆干缩率计算公式见式 (1)。

$$P_t = [(L_t - L_0) / 250] \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $P_t$  为第  $t$  天的干缩率; 250 为砂浆试件有效长度 (mm);  $L_t$  为砂浆试件在第  $t$  天的长度测量值 (mm);  $L_0$  为砂浆试件的初始长度测量值 (mm)。

考虑不同湿度的影响, 每组设置 40% 和 70% 两个湿度环境变量进行对比试验<sup>[18]</sup>。

### 1.2.2 不同复合方式试验试件制作

浇筑 6 块复合墙板试件, 其尺寸及参数见表 3。

表 3 新型 GRC-PC 复合墙板尺寸参数

Table 3 Dimension parameters of new GRC-PC composite wallboard

试件编号	试件尺寸 (长 × 宽 × 高)/mm	GRC 装饰层厚度/mm	混凝土厚度/mm	分界面连接方式
S1	1 000 × 1 000 × 15	15		
S2	1 000 × 1 000 × 60		60	
S3	1 000 × 1 000 × (10+60)	10	60	平接
S4	1 000 × 1 000 × (15+60)	15	60	平接
S5	1 000 × 1 000 × (15+60)	15	60	粗糙面连接
S6	1 000 × 1 000 × (15+60)	15	60	钢丝网连接

表 3 中, 试件 S1 为纯 GRC 墙板, S2 为纯混凝土墙板; S3 为 10 mm 厚的 GRC 材料与 60 mm 厚的混凝土材料采用平接方式复合成的墙板; S4 为

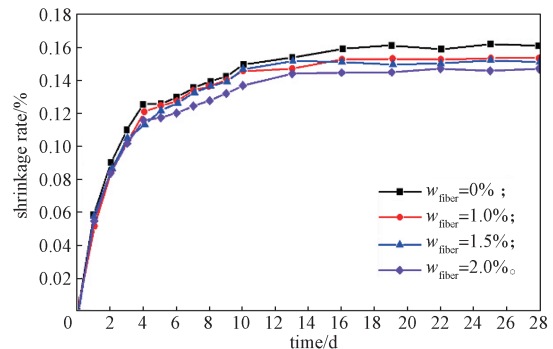
15 mm 厚的 GRC 材料与 60 mm 厚的混凝土材料采用平接方式复合成的墙板; S5 为 15 mm 厚的 GRC 材料与 60 mm 厚的混凝土材料采用粗糙面连接方式复合成的墙板; S6 为 15 mm 厚的 GRC 材料与 60 mm 厚的混凝土材料采用钢丝网连接方式复合成的墙板。

## 2 试验结果与分析

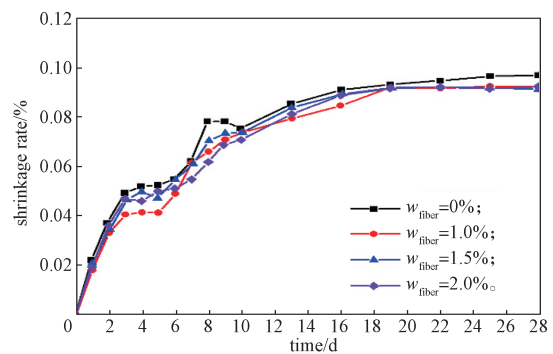
### 2.1 材料组分对 GRC 力学性能和抗裂性能的影响

#### 2.1.1 纤维掺量对 GRC 干缩性能的影响

相对湿度为 40% 和 70% 下, 不同玻璃纤维添加质量分数 GRC 试件的收缩率曲线如图 1 所示。



a) RH=40%



b) RH=70%

图 1 不同相对湿度下不同纤维掺量试件的收缩率变化曲线

Fig. 1 Shrinkage change curves of specimens with different fiber content under different relative humidity

由图 1 可看出, 两种湿度环境下随着纤维添加质量分数的升高, GRC 试件的干缩率均略有降低。纤维的存在增大了水泥基材料的韧性与延性, 使水泥的抗拉强度被提高, 抑制了裂缝的产生, 这就是纤维掺量的增加使试件干缩率降低的主要原因。另外, 在同样龄期及配比下 (以不添加纤维为例), 相对湿度为 70% 条件下的 GRC 干缩率约为 0.09%; 而相对湿度为 40% 条件下的 GRC 干缩率约为 0.16%, 这说明环境湿度的提高可减少 GRC 干缩, 从而抑制裂缝的产生。

#### 2.1.2 胶粉掺量对 GRC 干缩性能的影响

图 2 为 40% 和 70% 相对湿度下, 不同胶粉添加

质量分数 GRC 试件的收缩率变化曲线。

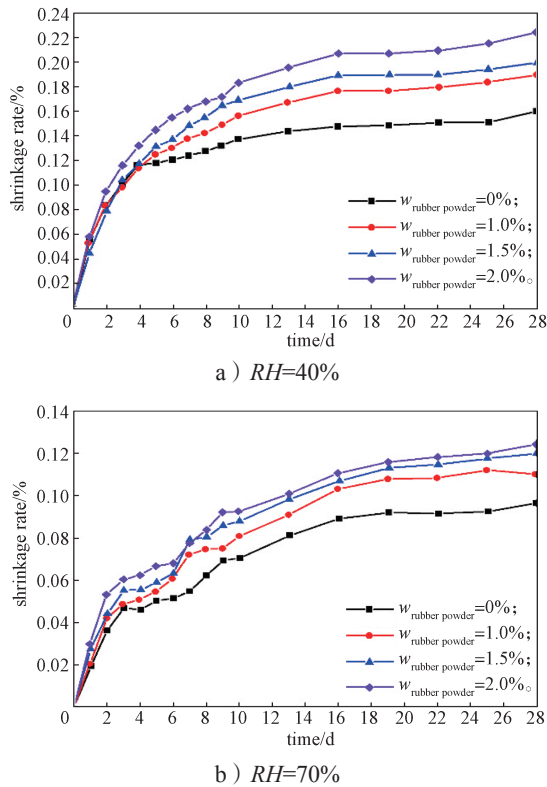


图2 不同相对湿度下不同胶粉掺量试件的收缩率变化曲线  
Fig. 2 Shrinkage change curves of test pieces with different rubber powder content under different relative humidity

由图2能看出,随着胶粉添加质量分数的增加,GRC试件的干缩率显著增大。这主要是由于可分散乳胶粉的掺入增加了砂浆中微孔的数量,导致毛细管张力增加,引起砂浆进一步收缩。另外,在同样龄期及配比下,相对湿度从40%增加到70%时,掺入胶粉GRC的干缩率随之降低,再次证明增加环境湿度有利于减少GRC试件的收缩。

综上所述,短切3mm耐碱玻璃纤维的掺入能够一定程度降低砂浆的干燥收缩率,并明显提高砂浆的抗折强度,从而提高基体的抗裂性能,且纤维掺量越大,作用效果越明显。在0~3.5%可分散乳胶粉的添加质量分数下,随着可分散乳胶粉的掺入,砂浆的抗折强度先增加后降低,但砂浆的掺入由于引入较多的孔隙,会引起抗压强度降低,导致毛细管张力增加,加剧砂浆干燥收缩。

## 2.2 复合方式对GRC收缩性能的影响

### 2.2.1 GRC材料厚度对复合墙板收缩性能的影响

为探究GRC厚度对复合墙板收缩性能的影响,试验分别设计了10mm(S3)与15mm(S4)两种厚度GRC,图3给出了纯GRC材料与不同厚度GRC复合墙板表面收缩性能的对比曲线。如图所示,开始阶段,由于水化反应,S1、S3和S4试件的收缩

应变都有所增加,此时试件处于膨胀受拉状态,后期水化反应减弱,试件处于压缩状态,收缩应变趋于稳定。28d后,S1试件的表面收缩应变随时间变化曲线呈现出波状变化,但S3和S4试件的变化趋势不同,表明GRC材料厚度对复合墙板的表面收缩性能存在一定程度的影响。由图3还可以看出,S4试件的收缩应变明显小于S1和S2试件的收缩应变。

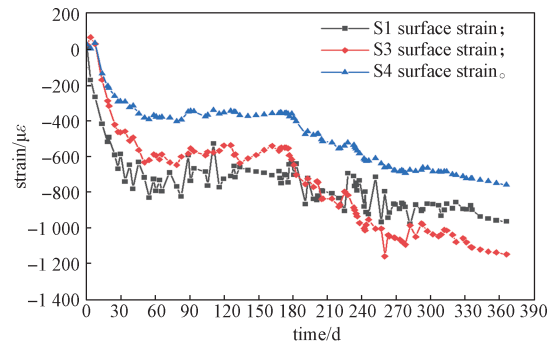


图3 S1、S3、S4试块表面收缩应变随时间变化曲线  
Fig. 3 Time varying curves of surface shrinkage strain of S1, S3 and S4 test blocks

表4给出了各种试件的最大收缩应变值。

表4 试件最大收缩应变值

Table 4 Maximum shrinkage strain values of the specimen

类别	表面收缩应变 (GRC)	内部收缩应变 (PLC)
S1	$831.369 \times 10^{-6}$	
S2		$304.116 \times 10^{-6}$
S3	$647.199 \times 10^{-6}$	$252.723 \times 10^{-6}$
S4	$401.107 \times 10^{-6}$	$82.828 \times 10^{-6}$
S5	$353.058 \times 10^{-6}$	$229.676 \times 10^{-6}$
S6	$499.319 \times 10^{-6}$	$108.701 \times 10^{-6}$

由表4可知,S1、S3、S4试件的表面最大应变值分别为 $831.369 \times 10^{-6}$ 、 $647.199 \times 10^{-6}$ 、 $401.107 \times 10^{-6}$ ,可知S3、S4试件的收缩应变比S1试件的收缩应变约小22%,52%。故S4试件的表面收缩应变降低最大,这表明15mm的GRC装饰层可明显改善复合墙板中GRC材料的收缩性能。

图4给出了纯混凝土墙板与不同厚度GRC复合墙板的内部收缩性能对比曲线。可看出试验开始时,由于水化反应,试件处于膨胀受拉状态,后期水化反应减弱,试件处于压缩状态,收缩应变趋于稳定。对比图4中3条时间-应变曲线可知,S2试件和S3、S4试件内部混凝土收缩应变的变化趋势基本相同,在试验后期,S2和S3、S4试件的时间-应变曲线均呈下降趋势,且S4试件的内部收缩应变明显小于S1和S2试件的。由表4可知,S2、S3、S4试件的内部混凝土最大应变分别为 $304.116 \times 10^{-6}$ 、 $252.723 \times 10^{-6}$ 、 $82.828 \times 10^{-6}$ 。故可得知S3、S4试件的收缩应变依次

约比 S2 试件的收缩应变小 17%, 73%。这表明不同厚度的 GRC 装饰层对复合板的混凝土收缩性能影响较大, 且 S4 试件的收缩应变降低最大。

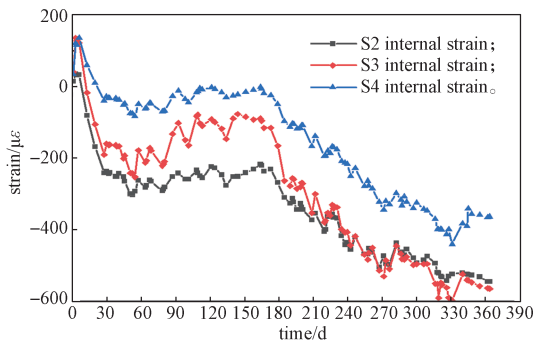


图4 S2、S3、S4 试件内部收缩应变随时间变化曲线  
Fig. 4 Time varying curves of internal shrinkage strains of S2, S3 and S4 test blocks

综上所述, 新型 GRC-PC 复合墙板的收缩性能与 GRC 装饰层厚度密切相关。复合墙板中的 GRC 装饰层采用 15 mm 厚度, 会使 GRC 材料的收缩应变降低约 52%, 混凝土的收缩应变降低约 73%。因此, GRC 装饰层采用 15 mm 厚度的复合墙板, 其抗裂性能显著优于 GRC 装饰层采用 10 mm 的复合墙板。

### 2.2.2 复合界面连接方式对复合墙板收缩性能的影响

试验中设置了 3 种复合界面连接方式 (平接、拉毛和铺设钢丝网), 以通过对复合墙板不同连接方式的研究, 选择两种材料最佳的连接方式。图 5 为 S1、S4、S5 和 S6 试件表面收缩应变随时间变化曲线。

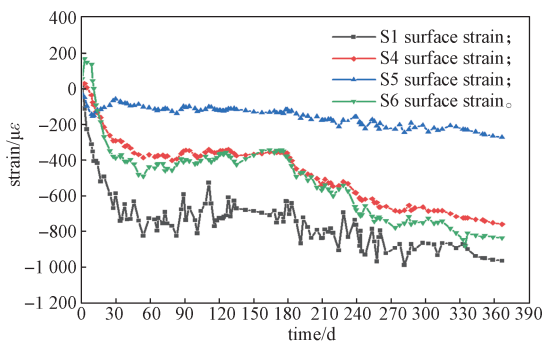


图5 S1、S4、S5、S6 试件表面收缩应变随时间变化曲线  
Fig. 5 Time varying curves of surface shrinkage strains of S1, S4, S5 and S6 test blocks

由图 5 可看出, 试验后期 S4、S5 和 S6 试件的时间-应变曲线近似呈直线型变化, 但是表面收缩应变的变化范围不同, S5 试件的表面收缩应变一直低于 S4 和 S6 试件的, 表明复合界面的不同连接方式对复合墙板的表面收缩性能存在显著影响。对比表 4 中各试件的最大应变值可以得知, S1、S4、S5、S6 试件的表面最大应变值依次为  $831.369 \times 10^{-6}$ ,  $401.107 \times 10^{-6}$ ,  $353.058 \times 10^{-6}$ ,  $499.319 \times 10^{-6}$ 。故可知

S4、S5、S6 试件的表面收缩应变依次比 S1 试件的收缩应变约小 52%, 58%, 40%。可见 S5 试件的收缩应变降低最大, 说明 GRC 材料和混凝土分界面采用拉毛连接方式能更有效地改善复合墙板中 GRC 材料的收缩性能。

图 6 给出了 S2、S4、S5 和 S6 试件的内部收缩应变随时间变化曲线。

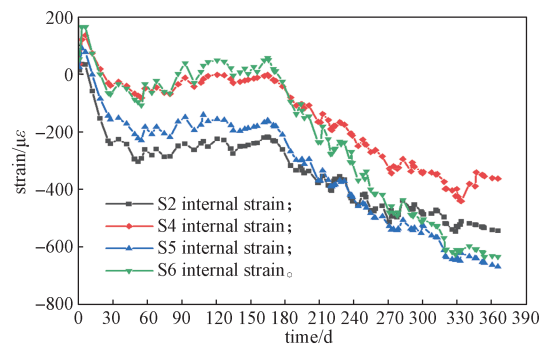


图6 S2、S4、S5、S6 试件内部收缩应变随时间变化曲线  
Fig. 6 Time varying curves of internal shrinkage strains of S2, S4, S5 and S6 test blocks

由图 6 可知, 4 条试件内部收缩应变随时间变化曲线的走势基本一致, 且 S4、S5 和 S6 试件的时间-应变曲线变动幅度基本相同。试验前期 S4 和 S6 试件的收缩应变值一直大于 S5 试件的应变值, 这可能是由于拉毛影响了 GRC 层与混凝土层的连接, 同时表明复合界面不同连接方式会对复合墙板的内部收缩性能产生影响。由表 4 可知, S2、S4、S5、S6 试件的内部混凝土最大应变依次为  $304.116 \times 10^{-6}$ ,  $82.828 \times 10^{-6}$ ,  $229.676 \times 10^{-6}$ ,  $108.701 \times 10^{-6}$ , 可以得知 S4、S5、S6 试件的收缩应变依次约比 S2 试件的收缩应变小 73%, 24%, 64%, 可见 S4 试件的收缩应变降低最大。由曲线图可以看出, 在 3 条曲线中, S4 试件的时间-应变曲线更加贴合 S2 试件的曲线, 这表明分界面采用平接方式更有利于改善复合墙板中混凝土的收缩性能。

## 3 结论

1) 在 GRC 抗裂配方试验中, 加入耐碱玻璃纤维的质量分数不大于 1% 时, 能够有效降低 GRC 的干燥收缩率, 而胶粉的添加提高了 GRC 的干燥收缩率。同时, 在同样龄期及配比下, 相对湿度从 40% 提升到 70% 时, 试件的干燥收缩率明显下降, 表明提高养护湿度可以降低 GRC 材料的干缩程度。

2) 不同 GRC 厚度的复合墙板时间-应变曲线变化趋势大致相同, 但相同时间内收缩应变最大值不同, 即不同 GRC 厚度对复合墙板收缩率存在一定的

影响。对比 GRC 厚度为 15 mm 和 10 mm 复合墙板的收缩率曲线,发现采用 15 mm 的 GRC 层复合墙板的干燥收缩率更趋近于纯 GRC 板和纯混凝土板的自然收缩率。故 GRC 层采用 15 mm 厚度的复合墙板,其抗裂性能明显优于 GRC 层采用 10 mm 的复合墙板。

3) 复合界面的连接方式对新型 GRC-PC 复合墙板的收缩性能影响较大。当分界面采用平接和钢丝网连接时,与拉毛连接相比能有效减小混凝土收缩应变;当分界面采用平接和拉毛连接时,与钢丝网连接相比,能较有效地减小 GRC 收缩应变。通过比照 3 组连接方式的数据可知,分界面采用平接相较于拉毛连接和钢丝网连接能够更有效地改善复合墙板的收缩性能。

#### 参考文献:

- [1] MAJUMDAR A J, LAWS V. Glass Fiber Reinforced Cement[M]. Oxford: BSP Professional Books, 2001: 46-53.
- [2] 边天佑. 耐碱玻璃纤维和 GRC 制品的现状与发展趋势[J]. 玻璃纤维, 1998(5): 16-20.  
BIAN Tianyou. Current Situation and Development Trend of Alkali Resistant Glass Fiber and GRC Products[J]. Glass Fiber, 1998(5): 16-20.
- [3] ENFEDAQUE A, GÁLVEZ J C, SUÁREZ F. Analysis of Fracture Tests of Glass Fibre Reinforced Cement (GRC) Using Digital Image Correlation[J]. Construction and Building Materials, 2015, 75: 472-487.
- [4] CHENG C M, HE J, ZHANG J, et al. Study on the Time-Dependent Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Cement (GRC) with Fly Ash or Slag[J]. Construction and Building Materials, 2019, 217: 128-136.
- [5] LURA P, JENSEN O M, WEISS J. Cracking in Cement Paste Induced by Autogenous Shrinkage[J]. Materials and Structures, 2009, 42(8): 1089-1099.
- [6] CHEN D, LI P K, CHENG B Q, et al. Crack Resistance of Insulated GRC-PC Integrated Composite Wall Panels Under Different Environments: an Experimental Study[J]. Crystals, 2021, 11(7): 775.
- [7] 高原. 干湿环境下混凝土收缩与收缩应力研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.  
GAO Yuan. Studies on Shrinkage and Shrinkage Induced Stresses of Concrete Under Dry-Wet Cycles[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [8] 沈武, 杨鼎宜, 骆静静, 等. 耐碱玻璃纤维混凝土的长期力学性能研究[J]. 混凝土, 2017(6): 102-106.  
SHEN Wu, YANG Dingyi, LUO Jingjing, et al. Research of the Long-Term Mechanical Properties of Alkali Resistant Glass Fiber Concrete[J]. Concrete, 2017(6): 102-106.
- [9] 赵文辉, 苏谦, 李婷, 等. 玻璃纤维增强泡沫轻质混凝土力学性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(9): 110-114, 80.  
ZHAO Wenhui, SU Qian, LI Ting, et al. Experimental Research on Mechanical Properties of Light-Weight Foamed Concrete with Glass Fiber Reinforcement[J]. Industrial Construction, 2017, 47(9): 110-114, 80.
- [10] 赫文秀. 玻璃纤维粉煤灰水泥复合土力学性能试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.  
HE Wenxiu. The Study on Mechanical Properties of Glass Fiber and Fly Ash Composite Cement Soil[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012.
- [11] FANG Y, CHEN B, ODERJI S Y. Experimental Research on Magnesium Phosphate Cement Mortar Reinforced by Glass Fiber[J]. Construction and Building Materials, 2018, 188: 729-736.
- [12] FENG H, CHEN G, GAO D Y, et al. Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced Magnesium Phosphate Cement Mortar[J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018: 1-11.
- [13] THEODORAKOPOULOS D D. Shrinkage Behaviour of GRC Thin Sheets[J]. Cement and Concrete Composites, 1995, 17(3): 229-238.
- [14] YOO D Y, MIN K H, LEE J H, et al. Shrinkage and Cracking of Restrained Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Slabs at Early Age[J]. Construction and Building Materials, 2014, 73: 357-365.
- [15] HE W D, WANG X, DING L N, et al. Experimental Study on Bond Behavior of Interface Between Fiber-Reinforced Polymer Grids and Concrete Substrate[J]. Composite Structures, 2021, 257: 113164.
- [16] SHAH S G, KISHEN J M C. Nonlinear Fracture Properties of Concrete-Concrete Interfaces[J]. Mechanics of Materials, 2010, 42(10): 916-931.
- [17] 秦岩, 彭家顺, 魏有感. 玻璃纤维增强水泥(GRC)特性与展望[J]. 国外建材科技, 2000, 21(3): 5-6, 10.  
QIN Yan, PENG Jiashun, WEI Yougan. Characteristics and Prospect of Glass Fiber Reinforced Cement (GRC) [J]. Science and Technology of Overseas Building Materials, 2000, 21(3): 5-6, 10.
- [18] 张晶晶. PC-GRC 板在室外真实环境下收缩性能试验研究[J]. 安徽建筑, 2019, 26(10): 206-208.  
ZHANG Jingjing. Experimental Study on Shrinkage Performance of PC-GRC Plate in Outdoor Real Environment[J]. Anhui Architecture, 2019, 26(10): 206-208.

(责任编辑: 廖友媛)