

• 化学工程与材料工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201700740

新型秸秆纤维混凝土实心砖的性能试验研究

李碧雄, 廖 桥*, 吴瑾炎

(四川大学 建筑与环境学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 为了有效利用农业剩余物研制出具有良好综合性能的新型墙体材料, 研究了秸秆纤维混凝土配合比, 并对比新型秸秆纤维混凝土实心砖 (new straw fiber solid concrete brick, NSFCB) 与普通混凝土实心砖 (general solid concrete brick, GCB) 的力学性能和物理性能。进行了秸秆纤维混凝土抗压强度试验, 以及实心砖大面抗压、抗折、保温隔热和干缩试验。对砖的受压应力与应变关系、早期干缩率随时间变化规律进行函数拟合分析。结果表明: 氯化钙、高岭土对增强秸秆纤维混凝土强度效果明显; 由于秸秆纤维的掺入, 与 GCB 相比, NSFCB 的大面抗压强度和抗折强度分别降低 28.5% 和 6.8%, 但折压比提高了 30.5%, 并且延性也较好; 采用改进的有理分式很好地拟合了实心砖受压应力-应变试验曲线, 决定系数值接近 1, 具有良好的相关性; NSFCB 保温隔热性能突出, 同 GCB 相比, 其导热系数值下降了 18.9%; 7 d 后 NSFCB 的干缩率变化较小, 干缩性能良好; 采用双曲线函数式拟合 NSFCB 干缩率-时间试验曲线, 总体分布无显著差异, 拟合度较高。

关键词: 混凝土实心砖; 秸秆纤维; 力学性能; 物理性能

中图分类号: TU522.3

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2018)05-0216-08

Experimental Study on Mechanical and Physical Properties of New Straw Fiber Solid Concrete Brick

LI Bixiong, LIAO Qiao*, WU Jinyan

(College of Architecture and Environment, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to take advantage of agricultural residues, a new type of wall material with good comprehensive properties was developed. The mix proportion of straw fiber reinforced concrete was studied. The mechanical and physical properties of new straw fiber solid concrete brick (NSFCB) and general solid concrete brick (GCB) were studied. The compressive strength of straw fiber reinforced concrete was tested. Compression tests on the largest face, flexure tests, heat insulation tests and dry shrinkage tests of solid bricks were respectively carried out. The compressive stress-strain curves and early dry shrinkage ratio-time curves of bricks were analyzed by function fitting. The results showed that the effects of calcium chloride and kaolin on strengthening the strength of straw fiber reinforced concrete were obvious. The compressive strength on the largest face and flexural strength of NSFCB were respectively reduced by 28.5% and 6.8% due to straw fiber. However, the ratio of flexural strength to compression strength of NSFCB was improved 30.5%, and it was better than GCB in the ductility. The improved rational fraction was sufficiently suitable for the compression stress-strain test curves of brick, and adjusted coefficient of determination was almost close to 1. NSFCB was outstanding in heat insulation performance, and the average thermal conductivity was decreased by 18.9%. The drying shrinkage ratio of NSFCB changed little after 7 days, and dry shrinkage performance of NSFCB was good. Early dry shrinkage ration-time test curve of NSFCB that fitted by hyperbolic function possessed a high fitting degree, and there was no significant difference in population distribution.

Key words: solid concrete brick; straw fiber; mechanical property; physical property

生产水泥的过程中, 不但会消耗大量的资源, 而且会造成十分严重的环境污染问题。有数据表明, 2010 年中国的水泥及水泥基材料行业的资源消耗量

已达到 $154.41 \times 10^8 \text{ t}^{[1]}$ 。每生产 1 t 水泥 (P1525、PO425 和 PS325) 排放 295.4~445.6 kg 的二氧化碳^[2]。中国是一个农业大国, 每年会有大量的农业剩余物

收稿日期: 2017-09-11

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (51678379); 四川省学术带头人培养基金资助项目 (川人社办发[2016]183-2)

作者简介: 李碧雄 (1970—), 女, 教授。研究方向: 混凝土材料。E-mail: libix@126.com

* 通信联系人 E-mail: liaoqiaomail@163.com

网络出版时间: 2018-08-29 23:44:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180829.2344.006.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

产出。仅在2006年, 稻谷、小麦、玉米、棉花和油菜籽等5种主要作物秸秆量就达了 4.33×10^8 t, 但可能源化利用量却仅为 1.77×10^8 t^[3]。作者希望以秸秆替代混凝土中的部分水泥来配制秸秆纤维混凝土, 用于制备新型混凝土实心砖。以减少水泥用量, 节约资源和保护环境。同时, 为秸秆资源化利用开辟新途径。

秸秆在墙体材料中已得到了一定的应用, 国外较早前采用的简单压制秸秆纤维砌块保温隔热性能良好, 隔声性能突出。陈国新等^[4]提出了用棉花秸秆、脲醛树脂胶和中粗砂制备棉花秸秆砌块的工艺, 并研究由棉花秸秆砌块制作的复合墙体的抗震性能。试验表明, 相比于其它几种砌块, 其抗震耗能能力较好。利用水泥作为胶结材料研制秸秆纤维混凝土砌块也引起了一部分研究者的兴趣。Zhang等^[5]发现, 掺入植物纤维(如秸秆纤维)能有效改善混凝土空心砌块的保热隔热性能; 刘丹等^[6]研究了稻秸秆水泥基砌块材料墙板的延性性能, 认为该砌块可在一定程度上提高结构的抗震能力; 王佳慧等^[7]分析发现, 在单轴受压试验中, 相同应变下的棉花秸秆水泥基砌块较普通混凝土的残余强度高, 抗震性能好; 吕信敏等^[8]将玉米秸秆纤维掺入蒸压加气混凝土砌块中, 发现砌块抗压强度无明显提高, 但劈裂抗拉强度却有显著改善; 陈国新等^[9]研究表明, 碱液浸泡处理过的棉花秸秆掺量是影响水泥基砌块材料抗压强度和劈裂抗拉强度的最主要因素。

综上所述, 秸秆纤维与水泥复合是可行的, 且对材料的抗震耗能能力、保温隔热性能和抗拉强度等均有一定的改善作用。混凝土实心砖是一种应用较为广泛的墙体材料。为提高混凝土实心砖的综合性能和农业剩余物的再利用率, 减少水泥消耗。本文探讨秸秆纤维混凝土配合比和以预处理秸秆纤维替代部分水泥的新型秸秆纤维混凝土的配置工艺, 深入

研究用该材料研制的新型秸秆纤维混凝土实心砖大面抗压、抗折、保温隔热和干缩变形等性能及其数学表示, 并与普通混凝土实心砖进行对比。

1 秸秆纤维混凝土配合比试验

1.1 秸秆纤维预处理

使用DC-07多功能粉碎机将麦秸秆粉碎为长度达10~30 mm的片状纤维, 并在浓度为3.5%的氢氧化钠溶液中浸泡1 d, 然后过滤得到预处理秸秆纤维。浸泡过程如图1所示。



图 1 浸泡在氢氧化钠溶液中的秸秆纤维

Fig. 1 Straw fibers soaked in sodium hydroxide solution

1.2 配合比设计

普通混凝土(作为对照组, 记为PC)水灰比0.54, 砂率为0.4, 聚羧酸高效减水剂(含固量为29.7%)和低钙粉煤灰分别为水泥质量的1%和10%。秸秆纤维不利于水泥水化反应^[10], 对混凝土强度的抑制作用明显。为提高秸秆纤维混凝土(秸秆纤维掺量为水泥质量5%, 记为FC)的强度, 基于氯化钙促凝作用和高岭土活性作用, 考虑在普通混凝土配合比基础上添加氯化钙或高岭土, 试验研究掺入与否对秸秆纤维混凝土抗压强度的影响。混凝土配合比如表1所示。

表 1 配合比及强度

Tab. 1 Mix proportion and strength

试件编号	组分/(kg·m ⁻³)									抗压强度/ MPa
	水	水泥	砂	碎石	减水剂	粉煤灰	秸秆纤维	氯化钙	高岭土	
FC	168	311	800	1 200	3.1	31.1	15.55	0	0	5.7
FC-C5	168	311	800	1 200	3.1	31.1	15.55	15.55	0	8.3
FC-G5	168	311	800	1 200	3.1	31.1	15.55	0	15.55	6.2
FC-G10	168	311	800	1 200	3.1	31.1	15.55	0	31.10	7.1
FC-G15	168	311	800	1 200	3.1	31.1	15.55	0	46.65	7.4
PC	168	311	800	1 200	3.1	31.1	0	0	0	12.2

1.3 试件制备及试验方法

按照GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》, 每组配合比制作3个边长为150 mm的立方体试件。采用正反双面振捣混凝土, 即首先使

用振动台振捣试件60 s, 然后将其翻面再振捣60 s。由于氯化钙促凝作用和高岭土活性作用主要是在水泥水化早期明显^[11-12], 故仅标准养护试件7 d后就进行抗压强度试验。

1.4 试验结果及分析

普通混凝土、掺入氯化钙或高岭土与否的秸秆纤维混凝土抗压强度值见表1。秸秆纤维混凝土抗压强度明显低于普通混凝土,说明掺入秸秆纤维会降低混凝土的强度。分析认为,1)氢氧化钠溶液未完全去除秸秆纤维表面的光滑蜡质层,导致秸秆纤维与基体间的界面粘结力和摩擦力均较低;2)秸秆纤维密度、强度较低,使其成为秸秆纤维混凝土中的弱相组分;3)秸秆纤维中含有许多的亲水性基团(羟基)^[13],增加了纤维表面的含水率,致使其周围的基体水灰比变大,强度下降;4)秸秆纤维中的部分糖类物质析出后吸附在水泥颗粒表面,抑制水泥水化;5)秸秆纤维与基体间的过渡区存在微裂纹和孔隙。

氯化钙对增强秸秆纤维混凝土抗压强度有利,且效果显著。掺加水泥质量5%的氯化钙后,秸秆纤维混凝土的抗压强度提高了45.6%。其作用机理,本文认为5%掺量的氯化钙是一种高浓度的弱碱强酸盐,通过加速硅酸盐离子、钙离子溶解来提高水泥水化速率,生成含有大量化学结合水的不溶性水化氯铝酸钙、氧氯化钙等,使混凝土中的固相比例得到明显提升。

掺入高岭土对提高秸秆纤维混凝土抗压强度也是有利的。随高岭土掺量的增加,混凝土强度不断提升,其最大增幅为29.8%。分析认为,高岭土与火山灰活性掺合料类似,水化产物氢氧化钙被高岭土中的二氧化硅、氧化铝等主要氧化物所消耗,加快了硅酸三钙、硅酸二钙的水化反应速率。在同等掺量条件下,氯化钙对增强秸秆纤维混凝土强度更加有利。当高岭土掺量超过10%后,秸秆纤维混凝土抗压强度增加并不显著,考虑经济因素后认为水泥质量10%的高岭土掺量是比较合适的。

2 新型秸秆纤维混凝土实心砖性能

2.1 配合比设计

基于上述试验结果,NSFCB采用以下配合比,水:水泥:砂:碎石:减水剂:粉煤灰:秸秆纤维:氯化钙:高岭土=168:311:800:1 200:3.1:31.1:15.55:15.55:31.1(质量比)。GCB中不添加氯化钙、高岭土和秸秆纤维,并且与NSFCB相比,其水和水泥的用量各增加20%。

2.2 试件制备

力学性能试验采用的试件尺寸为240 mm×115 mm×90 mm。两种实心砖各包含12个试件,NSFCB-1~NSFCB-6和GCB-1~GCB-6用于测定砖的大面抗压,NSFCB-7~NSFCB-12和GCB-7~GCB-12用于抗折试验。

保温隔热性能试验的试件尺寸采用300 mm×300 mm×40 mm,每种实心砖包含3个试件,即为NSFCB-13~NSFCB-15和GCB-13~GCB-15。

干缩性能试验中使用的试件大小为100 mm×100 mm×550 mm,两种实心砖各包含3个试件,分别为NSFCB-16~NSFCB-18和GCB-16~GCB-18。

试件成形方式为正反双面振捣,在温度为(20±5)℃的环境中静置一昼夜,然后拆模放入温度为(20±2)℃,相对湿度为(60±5)%的标准养护箱中养护,直至试验。

2.3 试验方法

2.3.1 力学性能测试

根据GB/T 4111—2013《混凝土砌块和砖试验方法》,由于 $H/B=90/115=0.783>0.6$,故可直接进行试件制备,而不采用叠块方法。试件制备步骤如下:1)试件养护24 d后,按 $m(\text{水}):m(\text{水泥})=1:3$ 的比例配置水泥净浆。2)在试件的大面上均匀涂抹水泥净浆,保证厚度小于3 mm,并用水平尺检查,以确保试件的平整度。养护1 d后按同样方法完成试件另一承压面的找平,并确保上、下承压面相互平行。3)再养护3 d。使用微机控制全自动压力试验机以0.1 MPa/s的加载速率进行实心砖大面抗压试验,以0.2 kN/s的加载速率进行实心砖抗折试验。

2.3.2 保温隔热性能测试

参照GB/T 10295—2008《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 热流计法》,采用JTRG-III导热系数测试仪进行热阻试验,测定试件养护28 d后的导热系数。

2.3.3 干缩性能测试

依据GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》,通过铁建飞鸿公司生产的非接触式干缩测量仪来测定试件在28 d内的干缩率。

2.4 试验结果及分析

2.4.1 实心砖大面抗压

实心砖大面抗压破坏形态如图2和图3所示。GCB的四周产生多条竖向裂缝和斜向裂缝,致使大量块体从试件上剥落,呈正倒相连的四角锥破坏形态。由于处在裂缝上的秸秆纤维能提供一定的拉结作用,NSFCB表现出良好的整体性,四周仅向外鼓起,块体剥落较少。

表2为实心砖大面抗压强度。NSFCB强度值低于GCB,这主要是因为秸秆纤维的弹性模量和密度比水泥要小很多,秸秆纤维替代部分水泥后,可用于承载的组分相应减少。同时,秸秆纤维与砂浆的界面过渡区存在许多微裂缝和孔隙,强度较低。根据GB/T 21144—2007《混凝土实心砖》的规定,NSFCB大面

平均抗压强度为 20.8 MPa, 单块都大于 16 MPa, NSFCB 强度等级为 MU20; GCB 大面平均抗压强度为 29.1 MPa, 并且单块均大于 21 MPa, 故 GCB 为 MU25。考虑到本文并未采用制砖机, 故可以认为 NSFCB 能满足 GB/T 21144—2007《混凝土实心砖》中 MU20 的强度要求, 作为一种承重材料应用于中低层建筑(6 层及 6 层以下)的承重墙中。



图 2 GCB 的大面抗压破坏形态

Fig. 2 Failure form of GCB subjected to compress on the largest face



图 3 NSFCB 的大面抗压破坏形态

Fig. 3 Failure form of NSFCB subjected to compress on the largest face

表 2 实心砖大面抗压强度

Tab. 2 Compressive strength of solid bricks on the largest face

编号	试件尺寸/ (mm×mm×mm)	强度/MPa	均值/MPa
GCB-1	240×115×90	29.0	29.1
GCB-2		27.1	
GCB-3		26.3	
GCB-4		30.4	
GCB-5		31.8	
GCB-6		29.7	
NSFCB-1	240×115×90	17.9	20.8
NSFCB-2		22.9	
NSFCB-3		21.0	
NSFCB-4		20.1	
NSFCB-5		21.0	
NSFCB-6		21.9	

由图 4 可知, NSFCB 的上升段和下降段曲线均比较平缓, 曲线下包围的面积较大。GCB 的曲线陡峭, 曲线下所包围的面积小。因此, 前者的延性与后者相比较, 塑性变形能力更强。分析原因, 长短不一的秸秆纤维具有较好的变形能力, 在混凝土中呈三维

网络状分布, 可延缓裂缝发展。同时, 秸秆纤维相对较低的弹性模量降低了混凝土干缩时产生的收缩应力, 减少内部初始裂纹数量。

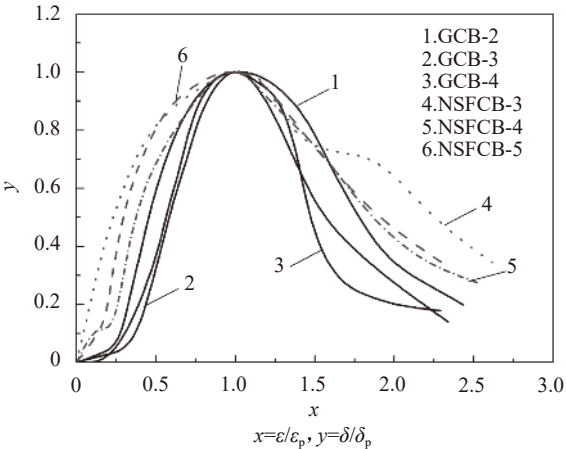


图 4 实心砖大面受压应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of solid bricks subjected to compress on the largest face

混凝土受压应力-应变全曲线方程一般有 5 种函数类型, 即多项式、指数式、三角函数、有理分式和分段式。可能是由于混入秸秆纤维以及试件尺寸等原因, 除 Saenz^[14]提出的有理分式拟合效果较好外, 其它函数拟合的结果均不太理想。为进一步提高拟合度, 在该有理分式的基础上, 做如下改进:

$$y = \frac{x}{c_1 + c_2x + c_3x^2 + c_4x^3 + c_5x^4}$$

(1)

式中, x 和 y 与上述相同, c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 和 c_5 均为拟合参数。

采用改进有理分式拟合 6 块实心砖的大面受压应力-应变试验曲线, 并将威尔科克森符号平均秩检验 (Wilcoxon signed rank test) 用于测试结果与拟合结果总体分布的显著性检验, 结果见表 3。决定系数 (Ad R-square) 均大于 0.98, 表明式 (1) 拟合实心砖大面受压时的应力与应变关系, 具有良好的相关性。相伴概率均大于显著性水平 0.05, 无显著差异存在。图 5 为实心砖大面受压拟合曲线与测试曲线的对比, 两条曲线吻合度高, 并未出现较大的偏离。因此, 本文提出的拟合实心砖大面受压应力-应变全曲线的改进有理分式是合理的。

2.4.2 实心砖抗折

NSFCB 的断裂面很不平整, 破坏面上少量秸秆纤维被拔出, 大部分被拉断, 说明纤维与混凝土粘接良好。在 GCB 的断面上, 大部分面积是砂石骨料拉脱的界面, 其余是沿着骨料界面和水泥砂浆被拉断。

表 3 实心砖大面受压应力-应变拟合结果

Tab. 3 Fitting parameters about stress-strain of solid bricks subjected to compress on the largest face

编号	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	Ad R-square	显著性
GCB-2	6.814	-20.979	26.736	-14.905	3.312	0.994 5	无显著差异
GCB-3	7.509	-21.874	26.214	-14.111	3.261	0.994 8	无显著差异
GCB-4	7.253	-31.283	54.818	-41.534	11.758	0.980 0	无显著差异
NSFCB-3	0.408	0.071	0.873	-0.530	0.217	0.993 7	无显著差异
NSFCB-4	1.658	-3.831	5.275	-2.818	0.742	0.986 1	无显著差异
NSFCB-5	1.232	-3.425	6.066	-3.910	1.066	0.983 4	无显著差异

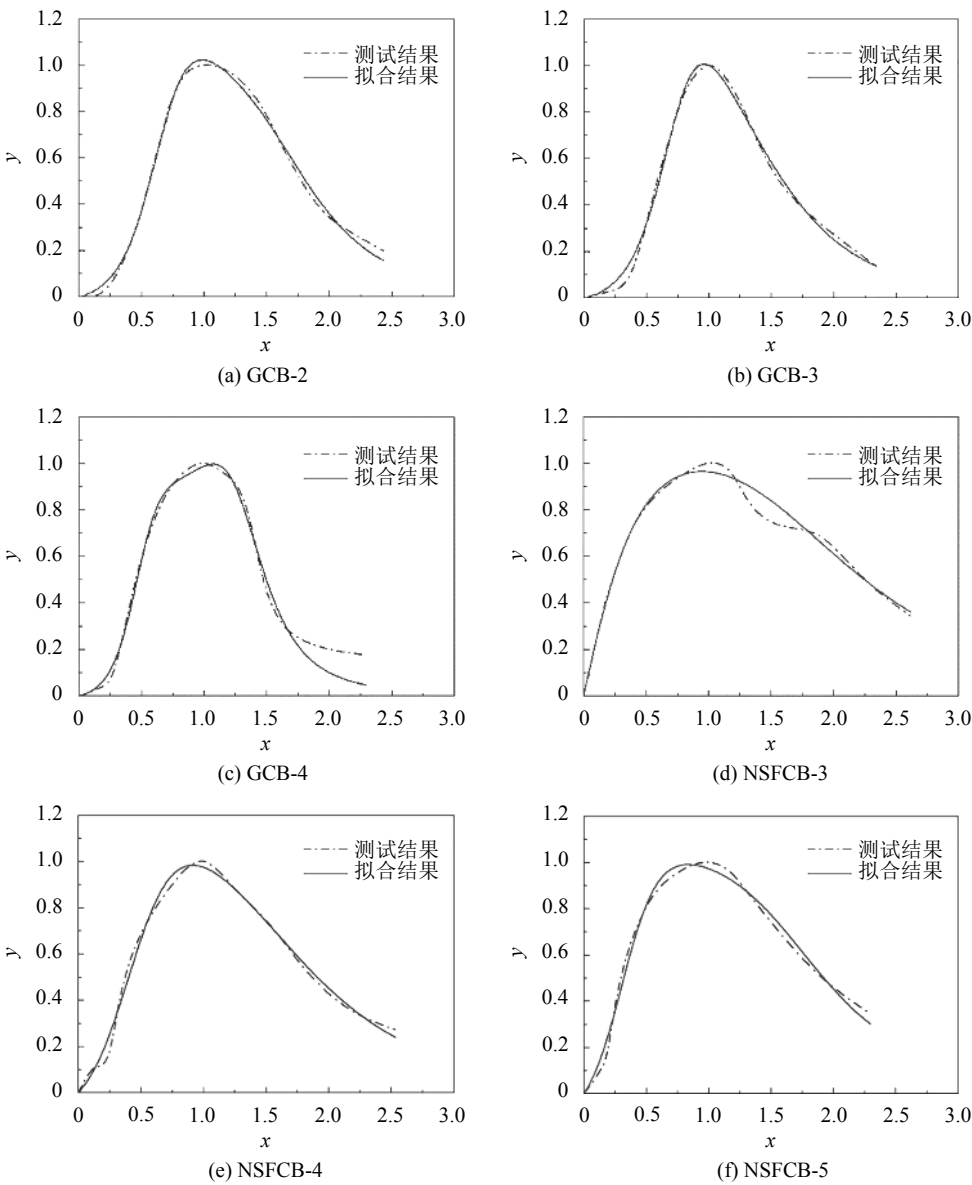


图 5 实心砖大面受压拟合曲线与测试曲线的对比

Fig. 5 Comparison of fitting curves and test curves concerning solid bricks subjected to compress on the largest face

实心砖抗折强度见表4。由于NSFCB中组分的种类太多，不均匀性增加，导致抗折强度变化幅度较大。GCB的平均抗折强度为4.4 MPa，NSFCB为4.1 MPa，强度降低了6.8%。NSFCB的大面平均抗压强度和平均抗折强度分别是GCB的0.7倍、0.9倍，可见秸秆纤维在抗折试验中很好的发挥了抗拉强度较高的优点。分析原因，秸秆纤维在氢氧化钠溶液中浸泡后，弹性模量和拉伸强度均提高^[15]。当混凝土因受

拉开裂后,与裂缝相交的纤维发挥作用,受拉变形,阻滞裂缝发展。

表 4 实心砖抗折强度

Tab. 4 Flexural strength of solid bricks			
编号	试件尺寸/ (mm×mm×mm)	强度/MPa	均值/MPa
GCB-7	240×115×90	4.4	4.4
GCB-8		4.3	
GCB-9		4.4	
GCB-10		4.7	
GCB-11		3.8	
GCB-12		4.7	
NSFCB-7	240×115×90	4.5	4.1
NSFCB-8		4.5	
NSFCB-9		3.6	
NSFCB-10		3.6	
NSFCB-11		4.5	
NSFCB-12		3.8	

折压比是反映混凝土脆性性能的重要标志。NSFCB和GCB的折压比分别为0.197、0.151,前者较后者提高了30.5%。因此,NSFCB的力学性能更为均衡,延性性能较好。这是因为,一方面长短不一的秸秆纤维(预处理后其抗拉强度较高)在混凝土中呈3维网络状分布,增强了混凝土的整体性;另一方面,氯化钙的促凝作用和高岭土的活性作用会加速水泥水化反应,降低混凝土中的孔隙率,改善孔径分布。

2.4.3 保温隔热性能

表5为实心砖导热系数。保温隔热试验测得NSFCB的平均导热系数为1.29 W/(m·K),GCB的为1.59 W/(m·K)。NSFCB的导热系数均比GCB的低。因此,NSFCB具有优异的保温隔热性能。这是因为秸秆纤维比水泥的导热系数低,并且掺入纤维后可在混凝土搅拌过程中带入少量的空气(0℃下,空气的导热系数为0.024 W/(m·K))。同时,氯化钙和高岭土的

表 6 实心砖干缩的函数拟合结果

Tab. 6 Fitting parameters about drying shrinkage of solid bricks										
编号	双曲线函数			对数函数			指数函数			
	ε_{shu}	A	Ad R-square	a	b	Ad R-square	ε_{shu}	c	d	Ad R-square
GCB-16	1 026.106	1.670	0.796 9	257.767	236.689	0.851 6	5.414	-106.183	0.025	0.687 2
NSFCB-16	1 134.713	0.569	0.949 0	490.314	216.875	0.709 1	11.463	-70.303	0.016	0.371 0

在指数函数拟合中,决定系数最大仅为0.687 2,拟合效果很差。采用对数函数拟合,其决定系数最大为0.851 6,拟合结果较差。当以双曲线函数形式进行拟合时,NSFCB-16的决定系数较高为0.949 0。总体分布的显著性检验采用威尔科克森符号平均秩检验,双曲线函数拟合NSFCB-16的检验结果是相伴概

存在可加速水泥水化反应,释放大 量水化热,水分蒸发,在混凝土内部形成大量毛细孔。随着秸秆掺量的增加,NSFCB的保温隔热性能将得到显著提高。

表 5 实心砖导热系数

Tab. 5 Thermal conductivity of solid bricks			
编号	试件尺寸/ (mm×mm×mm)	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	均值/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
GCB-13	300×300×40	1.60	1.59
GCB-14		1.62	
GCB-15		1.55	
NSFCB-13	300×300×40	1.23	1.29
NSFCB-14		1.25	
NSFCB-15		1.40	

2.4.4 干缩性能

早期混凝土收缩变形较大,部分混凝土在28 d内的干缩值约占180 d干缩值的80%,对混凝土的尺寸稳定性影响显著^[16-18]。因此,将实心砖的干缩性能研究聚焦在早期。

混凝土收缩的函数表达式一般有双曲线式、对数式和指数式。本文采用这3种函数式拟合所测得的实心砖干缩率,并将3种拟合结果进行对比。

根据文献^[16],双曲线函数形式为:

$$\varepsilon_{sh}(t)=\varepsilon_{shu}\frac{t}{A+t}$$

(2)

其中, t 为时间, $\varepsilon_{sh}(t)$ 为 t 时的干缩率, ε_{shu} 为最终干缩率, A 为拟合常数。

对数函数形式:

$$\varepsilon_{sh}(t)=a+b\ln(t+1)$$

(3)

式中, a 和 b 为拟合常数。

指数函数形式:

$$\varepsilon_{sh}(t)=\varepsilon_{shu}(1-ce^{dt})$$

(4)

其中, c 和 d 为拟合常数。拟合结果见表6。

率为0.616,大于显著水平0.05,不存在显著差异。图6为实心砖干缩率随龄期的变化情况,NSFCB-16的测试结果曲线与双曲线函数拟合结果曲线吻合度较大,并明显高于GCB-16。因此,双曲线函数拟合NSFCB-16早期干缩率与时间的关系,具有较好的相关性。三种函数形式拟合后得到的决定系数均小于

0.95, 主要是因为本文测试的是实心砖在28 d内的干缩率, 与文献[16~18]相比时间较短。

由图6可知, NSFCB和GCB在28 d的干缩率分别为 1.19×10^{-3} 、 1.09×10^{-3} , 前者较后者提高了9.2%, 并且在28 d中GCB的干缩率一直小于NSFCB。分析原因, 秸秆纤维细胞中存在大量亲水性的羟基基团, 使其具有很强的吸水能力。因此, 混凝土中的湿秸秆水分含量高, NSFCB的实际水灰比较GCB大。同时, 氯化钙有促凝作用, 高岭土具有活性作用, 结果导致水泥水化反应加快, 产生大量水化热, 吸附水和毛细孔中的水蒸发加速, 毛细孔内形成的毛细管收缩应力增大, 砖的干缩率变大。

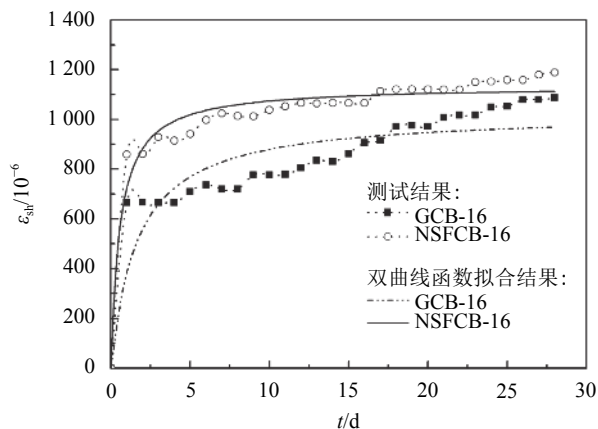


图6 实心砖干缩率

Fig. 6 Dry shrinkage rate of solid brick

两种实心砖7、14和21 d的干缩率与28 d干缩率的比值, NSFCB为86.2%、89.7%和94.3%, GCB为66.2%、76.4%和89.3%。说明NSFCB在7 d后的干缩率变化较GCB小, 具有良好的干缩性能。分析发现, 一方面纤维在混凝土内部呈3维乱向分布, 增加了渗水通道的曲折性, 可减少水分蒸发, 提升了混凝土抗干缩的能力^[19]。另一方面, 水泥水化程度逐步提高, 7 d后水化速率大幅降低, 水化热持续减少, 水分蒸发量变少。

3 结 论

1) 掺入氯化钙或高岭土后, 秸秆纤维混凝土抗压强度增加, 并且相比之下氯化钙促凝效果更加显著。

2) 由于秸秆纤维的掺入, NSFCB的大面抗压强度较GCB低, 但能满足GB/T 21144—2007《混凝土实心砖》中MU20的强度要求, 可作为承重材料应用于中低层建筑的承重墙中。

3) 采用改进的有理分式拟合实心砖大面受压应力与应变关系, 总体分布无显著差异, 拟合效果良好。

4) NSFCB的导热系数低于GCB, 并且随着秸秆

纤维掺量的增加, 导热系数将继续降低, 保温隔热性能不断增强。

5) GCB的早期干缩率要小于NSFCB, 但由于秸秆纤维的存在, 以及水泥水化反应速率的降低, 7 d后NSFCB的干缩性能逐步得到改善。双曲线函数拟合早期NSFCB干缩率随时间的变化关系, 呈现出较好的相关性。

参考文献:

- [1] Zhu Bing, Jiang Di, Chen Dingjiang, et al. SFA-based resource consumption analysis on China's cement and cement-based materials industry[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2014, 54(7): 839–845. [朱兵, 江迪, 陈定江, 等. 基于物质流分析的中国水泥及水泥基材料行业资源消耗研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(7): 839–845.]
- [2] Liu Meng, Li Baizhan, Yao Runming. Embodied carbon emission from energy consumption in the production of selected cement products[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(3): 116–120. [刘猛, 李百战, 姚润明. 水泥生产能源消耗内含碳排放量分析[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(3): 116–120.]
- [3] Cui Ming, Zhao Lixin, Tian Yishui, et al. Analysis and evaluation on energy utilization of main crop straw resources in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(12): 291–296. [崔明, 赵立欣, 田宜水, 等. 中国主要农作物秸秆资源能源化利用分析评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 291–296.]
- [4] Chen Guoxin, Huang Wei, Zhang Yin. Comparison on seismic behavior of ecological composite walls filled with different materials block[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(11): 4491–4500. [陈国新, 黄炜, 张荫. 内填不同材料填充砌块生态复合墙体抗震性能对比[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(11): 4491–4500.]
- [5] Zhang Z P, Zhu S W, Chen G P. Study on Thermal performance for straw fiber concrete hollow block[J]. Advanced Materials Research, 2014, 953/954: 1596–1599.
- [6] Liu Dan, Yao Qianfeng, Jia Yingjie. Experimental study of vegetable fiber-mortar composites in ecological and energy-saving composite wall[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2011, 35(1): 34–38. [刘丹, 姚谦峰, 贾英杰. 生态节能复合墙体植物纤维水泥基材料试验[J]. 北京交通大学学报, 2011, 35(1): 34–38.]
- [7] Wang Jiahui, Chen Guoxin, Chen Liangliang. Study on behavior under uniaxial compression of cotton straw cement-based block materials[J]. Concrete, 2014(12): 142–145. [王佳慧, 陈国新, 陈亮亮. 棉花秸秆水泥基砌块材料单轴受压性能研究[J]. 混凝土, 2014(12): 142–145.]

- [8] Lü Xinmin, Chen Guoxin, Wang Jiahui, et al. Study on mechanical properties of the fiber reinforced autoclaved aerated concrete block[J]. *Concrete*, 2015(2): 114–117. [吕信敏, 陈国新, 王佳慧, 等. 纤维增强型蒸压加气混凝土砌块力学性能研究[J]. *混凝土*, 2015(2): 114–117.]
- [9] Chen Guoxin, Wang Jiahui, Chen Liangliang. Experimental study on mechanical properties of cotton straw cement-based block material[J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2014, 32(6): 868–871. [陈国新, 王佳慧, 陈亮亮. 棉花秸秆水泥基砌块材料的基本力学性能[J]. *材料科学与工程学报*, 2014, 32(6): 868–871.]
- [10] Onuaguluchi O, Banthia N. Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2016, 68: 96–108.
- [11] He Tingshu, Xie Biao. Effect of microdosage on enhanced of the strength of steam-curing concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(3): 1030–1034. [何廷树, 谢彪. 微量磷酸盐对蒸养混凝土强度增效作用的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(3): 1030–1034.]
- [12] Fan Yingfang, Zhang Shiyi. Mechanical and chloride diffusion behavior of kaolinite clay modified cement-based material[J]. *Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering*, 2014, 36(1): 130–137. [范颖芳, 张世义. 纳米高岭土颗粒改性水泥基复合材料的性能[J]. *土木建筑与环境工程*, 2014, 36(1): 130–137.]
- [13] Alvarez V A, Ruscekaite R A, Vazquez A. Mechanical properties and water absorption behavior of composites made from a biodegradable matrix and alkaline-treated sisal fibers[J]. *Journal of Composite Materials*, 2003, 37(17): 1575–158.
- [14] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 21–23.
- [15] He Chunxia, Fu Leiming, Xiong Jing, et al. Study on the microstructure and properties of wheat straw with different treatments[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2016, 39(2): 325–331. [何春霞, 傅雷鸣, 熊静, 等. 不同表面处理对麦秸秆结构和性能的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2016, 39(2): 325–331.]
- [16] Liu Jianzhong, Sun Wei, Miao Changwen, et al. Effect of mineral admixture on drying and autogenous shrinkage of concrete with low water to binder ratio[J]. *Journal of South-east University(Natural Science Edition)*, 2009, 39(3): 580–585. [刘建忠, 孙伟, 缪昌文, 等. 矿物掺合料对低水胶比混凝土干缩和自收缩的影响[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2009, 39(3): 580–585.]
- [17] Cui Zizhi, Li Shanshan, Zhang Cheng, et al. Drying shrinkage characteristics of magnesium slag composite admixture concrete[J]. *Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*, 2016, 48(2): 207–212. [崔自治, 李姗姗, 张程, 等. 镁渣复合掺合料混凝土的干燥收缩特性[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2016, 48(2): 207–212.]
- [18] Chen Bing, Liu Jie. Experimental research on properties of foamed concrete reinforced with polypropylene fibers[J]. *Journal of Building Materials*, 2010, 13(3): 286–290. [陈兵, 刘捷. 纤维增强泡沫混凝土性能试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2010, 13(3): 286–290.]
- [19] Xue Zhichao, Li Lin. Influence of polypropylene fiber on strength and shrinkage behaviors of concrete for pavement[J]. *Journal of Building Materials*, 2011, 14(1): 132–135. [薛志超, 李林. 聚丙烯纤维对路用混凝土强度及收缩性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2011, 14(1): 132–135.]

(编辑 黄小川)

引用格式: Li Bixiong, Liao Qiao, Wu Jinyan. Experimental study on mechanical and physical properties of new straw fiber solid concrete brick[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(5): 216–223. [李碧雄, 廖桥, 吴瑾炎. 新型秸秆纤维混凝土实心砖的性能试验研究[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(5): 216–223.]