

# 纤维淤泥制陶粒混凝土强度正交试验研究

黄 炜<sup>1</sup>, 李 斌<sup>1</sup>, 宋 林<sup>2</sup>, 熊宇凯<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中铁一局集团有限公司, 陕西 西安 710054;  
3. 汉嘉设计集团股份有限公司西安分公司, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 采用以城市淤泥制陶粒全部或部分替代天然骨料, 并在其中掺入纤维来配置纤维淤泥制陶粒混凝土(FSCC), 通过正交试验方法, 探讨了水灰比、骨料取代率、纤维掺量三个因素对聚丙烯纤维淤泥制陶粒混凝土(PFSCC)及钢纤维淤泥制陶粒混凝土(SFSCC)的 28d 立方体抗压强度、劈裂抗拉强度的影响。试验结果表明: 骨料取代率、水灰比、纤维掺量对 PFSCC 的抗压强度、劈裂抗拉强度的影响依次减小, 其中骨料取代率和水灰比对劈裂抗拉强度影响相当; 骨料取代率、纤维掺量、水灰比对 SFSCC 抗压强度的影响依次减小; 钢纤维掺量对劈裂抗拉强度的影响突出, 而水灰比和骨料取代率的影响较小。

**关键词:** 淤泥制陶粒; 纤维淤泥制陶粒混凝土; 正交试验; 抗压强度; 劈裂抗拉强度

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)01-0022-07

## Orthogonal experiment research on the strength of fiber reinforced silt ceramsite concrete

HUANG Wei<sup>1</sup>, LI Bin<sup>1</sup>, SONG Lin<sup>2</sup>, XIONG Yukai<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech, Xi'an 710055, China;  
2. China Railway First Group Co. Ltd, Xi'an 710054, China;  
3. Han jia design group co. LTD. Xi'an branch, Xi'an 710056, China)

**Abstract:** The fiber reinforced silt ceramsite concrete (FSCC) was prepared and mixed with fiber based on urban silt ceramics aggregate of all or part of the replacement of natural aggregate. The effect of the water cement ratio, aggregate replacement ratio and fiber contents was investigated on the 28d cube compressive strength, splitting tensile strength of polypropylene fiber reinforced silt ceramsite concrete (PFSCC) and steel fiber reinforced silt ceramsite concrete (SFSCC) by the orthogonal experiments. Test results show that the influence of aggregate replacement ratio, water cement ratio and fiber contents on the compressive strength and splitting tensile strength of the PFSCC reduce in turns. The influence of aggregate replacement ratio on the splitting tensile strength is the same as the water cement ratio. The influences of aggregate replacement ratio, fiber contents and water cement ratio on the compressive strength of the SFSCC reduce in turns. The influence of steel fiber contents on the splitting tensile strength is significant, but the influence of the water cement ratio and aggregate replacement is not as great.

**Key words:** silt ceramsite; fiber reinforced silt ceramsite concrete; orthogonal experiment; compression strength; splitting tensile strength

为解决传统的装配式剪力墙仍存在墙体材料使用单一, 新型绿色墙材应用较少、预制构件连接复杂、整体性较差等缺点, 课题组将前期研究成果——装配式复合墙结构构造原理<sup>[1]</sup>与装配式剪力墙结构有机结合, 相互取长补短、各汲优点, 提出新型装配式抗震墙结构体系<sup>[2]</sup>。其主要由预制的绿色混凝土墙板、现浇边缘连接构件及现浇

或叠合楼板装配整浇而成(如图 1)。其中绿色混凝土墙板拟选用符合生态环保, 可循环再生的新型绿色墙材作为基体材料, 如图 2。故课题组积极寻找符合上述原则的新型绿色墙材作为关键部品的基材。经长期调研发现, 城市地下淤泥具有含砂较少、颗粒较小, 良好的结合力及可塑性可作为陶粒骨料的原料来替代传统粘土。故利用城

市淤泥作为原料生产陶粒混凝土是一种可持续发展的绿色混凝土,既能合理地循环利用废弃物,也为城市淤泥的处理探索一条切实可行的有效途径。

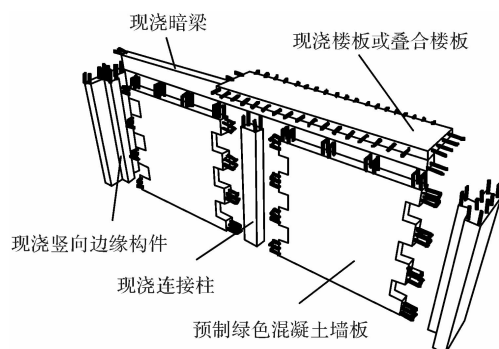


图1 新型装配式抗震墙结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of new precast seismic wall structure

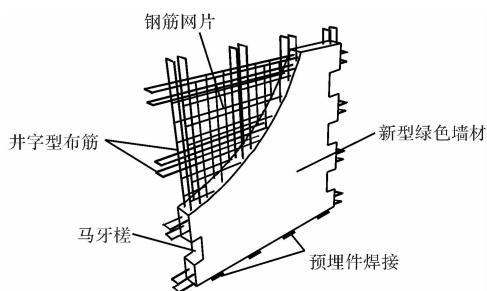


图2 预制绿色混凝土墙板

Fig.2 The precast green concrete panel

然而,陶粒骨料的强度及延性较普通骨料低,使得淤泥制陶粒混凝土具有一定的缺陷。为此,课题组在淤泥制陶粒混凝土中掺入纤维以改善其基本力学性能。目前,国内外部分学者对陶粒等轻骨料混凝土进行大量研究:刘喜<sup>[3]</sup>分别用三种粘土陶粒、粉煤灰陶粒、页岩陶粒作为轻骨料制成陶粒混凝土,并进行立方体抗压试验研究,研究骨料强度、水胶比、粉煤灰掺入量对其强度的影响规律,给出最佳配合比方案;袁海庆<sup>[4]</sup>用不同掺量的废橡胶粉取代页岩陶粒混凝土中的部分砂,配置成橡胶轻骨料混凝土 RLC,并对其进行受压性能试验研究,结果表明:废橡胶粉掺量的增加可有效改善陶粒混凝土的破坏形态,废橡胶粉的引气作用增强水泥石的界面结合力;Feldman 等<sup>[5]</sup>对钢纤维和聚丙烯纤维组成的混合纤维进行了试验。试验结果表明:钢纤维可以对混凝土抗压强度起到增大作用,聚丙烯纤维对混凝土的延性和韧性改善明显;文献<sup>[6]</sup>研究了陶粒混凝土的抗冻性能与预湿时间及水灰比的关系,结果表明:随

着预湿时间的延长,陶粒混凝土的抗冻性能有所增强,随着水灰比的增加其抗冻性能有所降低。杨健辉<sup>[7]</sup>对全轻页岩陶粒混凝土进行了一系列强度影响因素试验以确定最佳配合比设计参数,根据试验结果指出页岩陶粒混凝土强度主要取决于水泥砂浆强度、骨料自身强度和预湿时间;张学兵<sup>[8]</sup>利用正交试验方法对钢纤维粉煤灰再生混凝土的强度性能进行了试验,考察了粉煤灰取代率、钢纤维掺量和再生粗骨料取代率对再生混凝土 28 d 立方体抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度的影响,并对试验结果进行了系统分析。基于上述分析,课题组以城市下水道淤泥制陶粒作为再生骨料,初步选用聚丙烯和钢纤维作为增强材料,并采用正交试验的方法来研究水灰比,骨料取代率,纤维含量对两种纤维淤泥制陶粒混凝土力学性能的影响。

## 1 试验

### 1.1 原材料

本试验采用秦岭 P. O32.5 普通硅酸盐水泥;细骨料(砂)为河砂,其细度模数为 2.6~2.9(试验取 2.8);粗骨料:天然碎石以及由开封市御锦环保建材有限公司提供的城市下水道淤泥制陶粒骨料(见图 3),其相关物理参数见表 1;纤维:聚丙烯纤维和钢纤维分为由上海影佳实业发展有限公司生产以及河北衡水某公司生产,其基本性能指标列于表 2;水:混凝土拌合与养护用水均为普通自来水。



图3 淤泥制陶粒

Fig.3 Silt ceramsite

### 1.2 试验设计

共制作 108 个纤维淤泥制陶粒混凝土试件,其中尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm 的标准立方体试件共 108 个,分 2 大组,每组又分为 9 小组,每小组共 6 个试件。

根据正交试验法,本文对比分析水灰比(A),

骨料取代率( $B$ ), 纤维掺量( $C$ )等三种关键因素对 FSCC 的 28 d 立方体抗压强度及劈裂抗拉强度的影响, 每个因素各取 3 个水平, 并设计了  $L9(3^4)$  正

交表. 因素与水平的选择见表 3, 立方体试件的配合比见表 4.

表 1 淤泥制陶粒的物理性能指标  
Tab. 1 Properties of the silt ceramicsite

项目	未通过筛孔(mm)百分率					
	26.5	19.0	9.5	4.75	2.36	2.00
级配范围	0	0~5	0~10	20~60	85~100	95~100
实测值	0	5	8	60	99	99
检测项目	堆积密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	筒压强度/MPa	抗拉强度/MPa	压碎指标/%	针片状物/%	1 h 吸水率/%
实测值	886	5.0	0.8	38.5	3.1	14.7

表 2 聚丙烯(钢)纤维的物理性能指标  
Tab. 2 Properties of the polypropylene fibers and steel fibers

纤维种类	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	长度/mm	直径/mm	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	燃点/ $^{\circ}\text{C}$	形状
聚丙烯纤维	400	3500	19	0.18	170	590	
钢纤维	2300	20000	35	0.56	—	—	波浪形

表 3 试验因素与水平  
Tab. 3 Factors and levels of experiment

水平	因素		
	水灰比 $A$	骨料取代率 $B/\%$	纤维掺量 $C/\%$
1	0.45	30	0.9
2	0.50	65	1.2
3	0.55	100	1.5

所有试件的制备及养护参照《纤维混凝土应用技术规程》(JGJ/T221-2010)中的要求进行<sup>[9]</sup>; 待试件龄期达到 28 d 后, 按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2002)进行试验<sup>[10]</sup>. 其中立方体试件强度采用 TYA-2000 型电液式压力试验机进行.

表 4 材料配合比  
Tab. 4 Mix proportion of concrete

							$\text{kg}/\text{m}^3$
编号	正交设计	水	水泥	砂	淤泥制陶粒骨料	天然粗骨料	聚丙烯纤维(钢纤维)
1	A1B1C3	180	400	819	155	794	13.65(117)
2	A2B1C1	180	360	819	155	794	8.19(70.2)
3	A3B1C2	180	330	819	155	794	10.92(93.6)
4	A1B2C2	180	400	819	335	397	10.92(93.6)
5	A2B2C3	180	360	819	335	397	13.65(117)
6	A3B2C1	180	330	819	335	397	8.19(70.2)
7	A1B3C1	180	400	819	516	0	8.19(70.2)
8	A2B3C2	180	360	819	516	0	10.92(93.6)
9	A3B3C3	180	330	819	516	0	13.65(117)

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试件的破坏形态

如图 4 所示, 纤维淤泥制陶粒混凝土立方体试件的破坏形态与普通混凝土有明显的区别. 在立方体抗压试验中, 没有出现普通混凝土的典型的倒三角型破坏形态, 其破坏裂缝主要是由于试件侧面的凸起所产生. 由于纤维乱向分布于淤泥制陶粒混凝土, 使其具有比普通混凝土良好的匀质性和各向同性, 其纤维桥接作用和高拉伸应变特性使材料具有更高的抗裂性能和抗压韧性<sup>[11]</sup>. 纤维抑制了裂缝的发展, 使试块保持良好的完整性,

在整个承压过程中, 并没有出现明显的剥落现象, 依然比较完好; 劈裂抗拉试验中, 普通混凝土沿劈裂面完整地断开, 被劈裂成两部分. 而在纤维淤泥制陶粒混凝土中, 只出现沿劈裂面有一条明显的裂纹, 试块完整性较好, 这是因为纤维的抗拉和桥接作用, 有效地抑制了劈拉裂缝形成贯通缝, 当荷载持续增加至纤维破坏时, 混凝土试块进而被完整地劈开.

### 2.2 正交试验结果及分析

表 5 为两种 FSCC 的 28 d 立方体抗压强度及劈裂抗拉强度的试验结果; 按照正交试验分析法, 对各强度结果处理后得正交试验极差表, 见表 6.

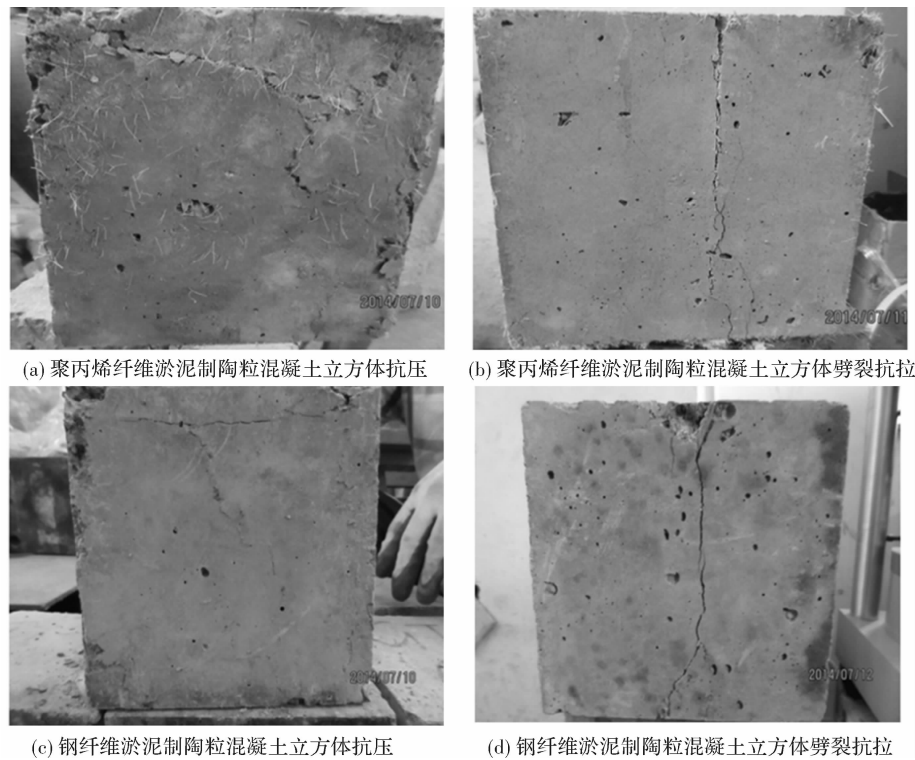


图 4 试件典型破坏形态

Fig. 4 Typical failure appearance of specimens

以 FSCC 的 28 d 立方体抗压强度、劈裂抗拉强度为指标，求出每一因素各水平下的强度平均值，并作出图 5。

表 5 各强度正交试验结果

Tab. 5 Strength results of the orthogonal experiment

编号	PFSCC		SFSCC	
	28 d 抗压强度/MPa	28 d 劈裂抗拉强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa	28 d 劈裂抗拉强度/MPa
1	25.7	2.94	42.8	3.73
2	27.9	2.79	30.8	3.07
3	22.3	2.55	32.5	3.67
4	27.1	2.83	32.1	3.68
5	21.9	2.59	33.6	3.79
6	22.1	2.53	34.3	2.90
7	23.7	2.61	28.4	3.10
8	19.6	2.37	27.7	3.04
9	19.8	2.37	29.6	3.37

2.2.1 极差及因素指标分析

(1) PFSCC 强度分析

因素 A 的影响：如图 5，对于 28 d 抗压强度及劈裂抗拉强度因素 A 的都是最大的；当水灰比从水平 1(0.45)增加至水平 2(0.50)以及水平 3(0.55)时，抗压强度分别下降 9.4%，7.4%，劈裂抗拉强度分别下降 7.5%，3.9%。说明随着水灰比的增大，PFSCC 的 28 d 抗压强度及劈裂抗拉

强度均降低，且下降幅度不显著。

表 6 正交试验极差表

Tab. 6 Ranges of the orthogonal experiment

材料种类	材料强度	水灰比 A	骨料取代率 B/%	纤维体积率 C/%
PFSCC	28 d 抗压强度	4.1	4.3	2.1
	28 d 劈裂抗拉强度	0.31	0.31	0.06
SFSCC	28 d 抗压强度	2.3	6.8	4.6
	28 d 劈裂抗拉强度	0.19	0.32	0.61

因素 B 的影响：PFSCC 的 28 d 立方体抗压强度及劈裂抗拉强度均随着淤泥制陶粒取代率的增加而减小。当骨料取代率从 30%逐步增加至 100%时，其抗压强度、劈裂抗拉强度分别降低 17.0%，11.2%，其中下降显著的是抗压强度，这是由于随着陶粒骨料取代率的增加，混凝土内部粗骨料均由陶粒代替，而陶粒本身具有表面粗糙、疏松多孔、自身强度低等特点，导致受力时抗压强度下降明显，而对于劈裂抗压强度，虽然随着陶粒取代率的增加，但由于聚丙烯纤维的加入，使得混凝土劈裂抗拉强度下降有所缓解。

因素 C 的影响：对于 28 d 抗压强度及劈裂抗拉强度因素 C 的  $\bar{K}_1$  都最大，说明当聚丙烯纤维掺量采用第一水平(0.9%)时，抗压强度和劈裂抗拉强度最大，当纤维掺量从水平 1(0.9%)增至水平 2

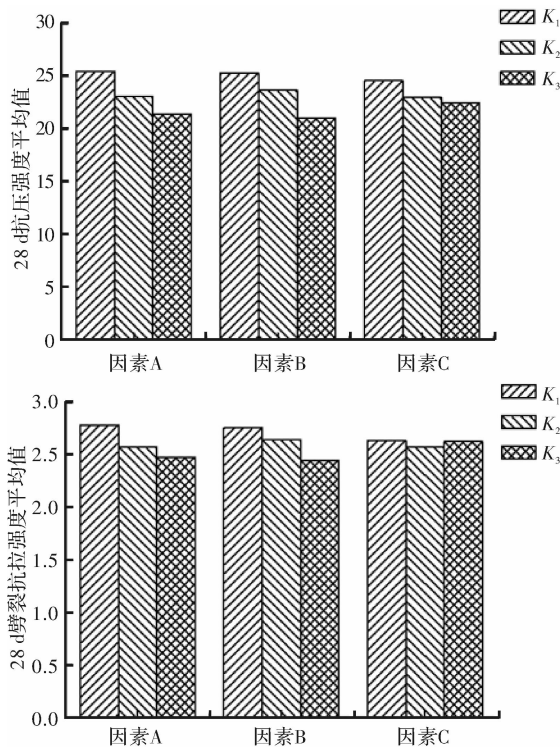


图5 各个因素对PFSCC立方体强度的影响

Fig. 5 Effect of various factors on the cube strength of PFSCC

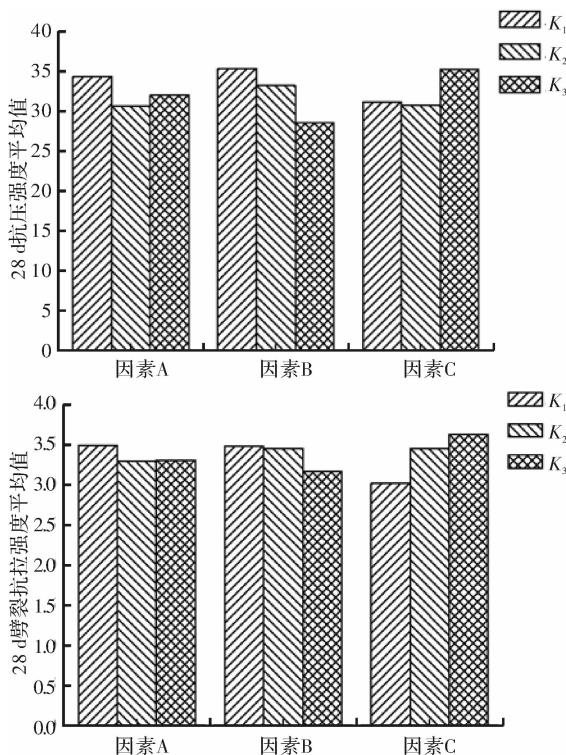


图6 各个因素对SFSCC立方体强度的影响

Fig. 6 Effect of various factors on the cube strength of SFSCC

(1.2%), 抗压强度下降 6.5%, 劈裂抗拉强度下降 2.3%, 从水平 2(1.2%)到水平 3(1.5%)抗压强度下降 2.2%, 劈裂抗拉强度上升 1.9%。从整体上来看, 随着纤维掺量的增加, 抗压强度与劈

裂抗拉强度均有所下降, 但幅度比较小。

综上所述, 对于 PFSCC 的立方体抗压强度, 三种因素对其影响显著性为  $B > A > C$ , 骨料取代率的影响最为显著, 水灰比次之, 纤维掺量影响最小, 为使抗压强度达到最优, 应选取组合为 A1B1C1; 对于劈裂抗拉强度, 三种因素对其的影响显著性为  $A = B > C$ , 水灰比和骨料取代率的影响相当, 纤维掺量影响最小, 为使劈裂抗拉强度达到最优, 应选取组合为 A1B1C3。

## (2) SFSCC 强度分析

因素 A 的影响: 由图 6 可知, 对于 28 d 立方体抗压强度及劈裂抗拉强度, 因素 A 的  $\bar{K}_1$  都是最大; 随着水灰比从水平 1 增至水平 3 时, SFSCC 的 28d 抗压强度及劈裂抗拉强度均降低, 且下降幅度不显著, 这与 PFSCC 的强度分析基本一致。

因素 B 的影响: 28 d 抗压强度及劈裂抗拉强度均随着淤泥制陶粒取代率的增加而减小, 随着骨料取代率从 30%逐步增加至 100%时, 其抗压强度、劈裂抗拉强度分别降低 19.2%, 9.2%, 可以看出抗压强度下降明显, 劈裂抗拉强度下降较小, 此外钢纤维对淤泥制陶粒混凝土劈裂抗拉强度的影响优于聚丙烯纤维, 具有更好地韧性。

因素 C 的影响: 对于 28d 抗压强度及劈裂抗拉强度因素 C 的  $\bar{K}_3$  都最大, 当钢纤维掺量从水平 1(0.9%)增加至水平 3(1.5%)时, 抗压强度提高 13.1%, 劈裂抗拉强度提高 20.2%, 这与聚丙烯纤维掺量变化对强度影响相反, 说明随着钢纤维掺量的增加, 28d 抗压和劈裂抗拉强度均有所增强, 且增长幅度十分显著, 故淤泥制陶粒混凝土采用钢纤维对其强度的改善明显优于聚丙烯纤维。

综上所述, 对于 SFSCC 的立方体抗压强度, 三种因素对其影响显著性为  $B > C > A$ , 骨料取代率的影响最为显著, 纤维掺量次之, 水灰比影响最小; 对于劈裂抗拉强度, 三种因素对其的影响显著性为  $C > B > A$ , 纤维掺量的影响最大, 骨料取代率影响次之, 水灰比影响最小。为使 SFSCC 的抗压强度、劈裂抗拉强度达到最优, 应选取组合为 A1B1C3。

## 2.2.2 方差分析

两种 FSCC 的 28 d 立方体抗压强度及劈裂抗拉强度试验结果的方差分析如表 7 所示。

由表 7 分析可知: 对 PFSCC 的 28 d 抗压强度, 水灰比和骨料取代率的影响较为显著, 而纤维掺量对其影响较小, 基本可以忽略, 这与极差分析结果较符合; 对于 28 d 劈裂抗拉强度, 水灰

比和骨料取代率对 PFSCC 的劈裂抗拉强度影响相当，较为显著，而纤维掺量影响较小，这与极差分析结果较符合。对 SFSCC 的 28 d 抗压强度，骨料取代率影响最为显著，纤维掺量影响其次，水灰比影响最小，这与极差分析结果较符合；对 SF-

SCC 的 28 d 劈裂抗拉强度，纤维掺量的影响非常显著，而水灰比和骨料取代率对其劈裂抗拉强度的影响较小，基本可以忽略，这与极差分析的结果较符合。

表 7 FSCC 正交试验结果方差分析

Tab. 7 Variance analysis of test results of FSCC

考核指标	方差来源	PFSCC					SFSCC				
		自由度	平方和	均方	F	显著性	自由度	平方和	均方	F	显著性
28 d 抗压强度 /MPa	A	2	25.42	12.71	2.23	*	2	21.28	10.64	0.73	~
	B	2	27.88	13.94	2.45	*	2	73.10	36.55	2.52	*
	C	2	7.15	3.58	0.63	~	2	38.38	19.19	1.32	#
	误差	2	11.44	5.70	—	—	2	29.04	14.52	—	—
	总和	8	71.84	—	—	—	8	161.80	—	—	—
28 d 劈裂抗拉强度 /MPa	A	2	0.15	0.075	15	**	2	0.06	0.03	0.38	~
	B	2	0.15	0.075	15	**	2	0.07	0.035	0.44	~
	C	2	0.006	0.003	0.6	~	2	0.80	0.40	5.00	*
	误差	2	0.01	0.003	—	—	2	0.16	0.08	—	—
	总和	8	0.31	—	—	—	8	1.10	—	—	—

注：\*\* 代表非常显著；\* 代表显著；# 代表有影响；~ 代表不显著。

3 结论

(1)骨料取代率对聚丙烯纤维淤泥制陶粒混凝土 28 d 抗压强度和劈裂抗拉强度影响最为显著，随着骨料取代率的增大，其抗压、劈裂抗拉强度明显降低；水灰比对聚丙烯纤维淤泥制陶粒混凝土的抗压强度与劈裂抗拉强度影响次之，水灰比越高，聚丙烯纤维陶粒混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度越低；聚丙烯纤维掺量对抗压强度和劈裂抗拉强度影响最小。

(2)骨料取代率对钢纤维淤泥制陶粒混凝土的抗压强度影响最为显著，对劈裂抗拉强度影响较大；水灰比对抗压强度影响很小，但对劈裂抗拉强度的影响较大；钢纤维掺量对抗压强度影响较小，但对劈裂抗拉强度影响显著。

(3)通过试验分析，在配置纤维淤泥制陶粒混凝土时：水灰比在一定的范围内尽量取比较低的水灰比；取代率在满足强度的要求下，尽量取较高的取代率；纤维的含量则要结合实际情况，在合理的范围内取较高的纤维体积率。

参考文献 References

[1] 黄炜，李斌，张巍，等. 基于可拓识别法的生态复合墙体破坏模式判别[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(1):50-56.  
HUANG Wei, LI Bin, ZHANG Wei, et all. Failure

mode recognition of ecological composite wall based on the extension identification method [J]. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 43(1): 50-56.  
[2] 黄炜，张敏，江永涛，等. 装配式混凝土墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(10):88-95.  
HUANG Wei, ZHANG Min, JIANG Yongtao, et all. Experimental study on seismic behavior of precast concrete walls[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(10): 88-95.  
[3] 刘喜，吕贝贝，刘全威，等. 高强轻骨料陶粒混凝土配合比及强度影响因素试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(4):847-852.  
LIU Xi, LV Beibei, LIU Quanwei, et all. Mechanical properties of lightweight concrete under mix proportion and strength factors[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(4): 847-852.  
[4] 袁海庆，静行，汤道义，等. 掺废橡胶粉页岩陶粒混凝土的受压性能[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(3): 369-373.  
YUAN Haiqing, JI Xing, TANG Daoyi, et all. Mechanical properties of shale ceramsite concrete with recycle rubber powder under compression[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(3): 369-373.  
[5] FELDMAN D, ZHENG Z. Synthetic fibres for fibre concrete composites [C]//MRS Proceedings. Cambridge:Cambridge University Press, 1993, 305:123.  
[6] WEI J Y, YONG D Y, YI Y. Experimental Study on Frost Resistance of the Shale Ceramsite Concrete[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 11(7): 1754-



- 1758.
- [7] 杨健辉, 陈静, 张鹏, 等. 全轻页岩陶粒混凝土的强度影响因素[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2014, 33(5): 664-670.
- YANG Jianhui, CHEN Jing, ZHANG Peng, et al. Influencing factors of strength on full lightweight shale ceramsite concrete[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2014, 33(5): 664-670.
- [8] 张学兵, 匡成钢, 方志, 等. 钢纤维粉煤灰再生混凝土强度正交试验研究[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(4):677-694.
- ZHANG Xuebing, KUANG Chenggang, FANG Zhi, et al. Orthogonal experimental study on strength of steel fiber reinforced fly ash recycled concrete[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(4):677-694.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 纤维混凝土应用技术规程:JGJ/T 221-2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the P. R. C. Technical specification for application of fiber reinforced concrete:JGJ/T 221-2010[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.
- [10] 中华人民共和国建设部. 普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T 50081-2002[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2003.
- Ministry of Construction of the P. R. C. Standard for method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081-2002[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2003.
- [11] 熊宇凯. 纤维淤泥制陶粒混凝土基本力学性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2015.
- XIONG Yukai. Studies on basic mechanics of fiber reinforced ceramsite concrete[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2015.

(编辑 桂智刚)

(上接第 21 页)

- LI Hao. Study on the Performance of H-beam to Square Tubular Column Connections with Internal Stiffening [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2016.
- [12] 于洪平. T 型钢连接的方钢管柱-工字钢梁节点性能研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2013.
- YU Hongping. Performance Study on T-stub Connected Joint between Square Tubular Column and I-Shaped Steel Beam[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2013.
- [13] 王新武, 李捍无, 蒋沧如, 彭少民. 剖分 T 型钢梁柱连接的滞回性能试验研究[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2003(2):47-49, 60.
- WANG Xinwu, LI Hanwu, JIANG Cangru, et al. Experimental research on hysteretic behavior of the slit T steel connections [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition), 2003(2): 47-49, 60.
- [14] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解 [M]. 北京:机械工业出版社, 2011.
- SHI Yiping, ZHOU Yurong. ABAQUS finite element analysis example explanation [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2011.
- [15] 中华人民共和国建设部. 钢结构设计规范:GB50017 [S]. 北京:中国计划出版社, 2003.
- Ministry of Construction of the P. R. C. Code for design of steel structures:GB50017 [S]. Beijing: China Planning Press, 2003.
- [16] 黄海棠. T 型钢梁柱半刚性连接节点在静载作用下的极限承载性能研究[D]. 南宁:广西大学, 2012.
- HUANG Haitang. Research on the Ultimate Strength of Steel Beam-to-Column T-sub Semi-rigid Connections under Static Load [D]. Nanning: Guangxi University, 2012.
- [17] 付涛, 易慨. 梁柱 T 型钢连接节点有限元分析[J]. 交通科学与工程, 2011(3):41-47.
- FU Tao, YI Kai. Finite element analysis of T-stub connections of beam-to-column [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2011(3): 41-47.
- [18] CEN:ENV1993-1-1. Eurocode 3: Design of steel structures-Parts 1-8: Design of joints[S]. CEN, Brussels: European Committee for Standardization, 2005.

(编辑 桂智刚)