

高韧性水泥基复合材料配合比优化研究

杨明清¹, 胡德津², 许莉², 林若鸣², 李文勃³, 张广达²

[1. 福州市城乡建总集团有限公司, 福建 福州 350007; 2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108;

3. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 为探究高韧性水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composite, ECC)合理配合比, 减少配合比对ECC性能的不利影响从而改善ECC的工作表现, 在保持聚乙烯纤维(PE纤维)体积掺量2%的基础上, 以砂胶比、粉煤灰替代率和减水剂掺量为基本参数设置9组正交试验进行流动指标、抗压、抗拉性能以及极限应变测试, 并对实验结果中的影响参数进行分析。试验分析结果表明, 在满足试验强度设计要求前提下, 当选择0.3、35%、0.003比例的砂胶比、粉煤灰替代率和减水剂掺量配合比时, 所得PE-ECC流动性能、抗压强度、抗拉强度以及极限应变最佳, 相比基础配合比显著改善了ECC的工作表现。

关键词: 聚乙烯纤维; ECC; 正交试验; 配合比

中图分类号: TU528^{+.1}

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)01-0251-05

Study on Mix Ratio Optimization of High Toughness Cement-based Composites

YANG Mingqing¹, HU Dejin², XU Li², LIN Ruoming², LI Wenbo³, ZHANG Guangda²

[1. Fuzhou Urban and Rural Construction General Group Co., Ltd., Fuzhou 350007, China; 2. College of Civil Engineering, Fuzhou

University, Fuzhou 350108, China; 3. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: In order to explore the reasonable mix ratio of high toughness cement-based composite (engineered cementitious composite, ECC), the adverse effect of mix ratio on ECC performance should be reduced to improve the job performance of ECC. On the basis of maintaining the volume content of polyethylene fiber (PE fiber) of 2%, nine groups of orthogonal test are set with the sand binder ratio, fly ash substitution rate and water reducing agent content as the basic parameters to carry out the flow index, compressive property, tensile property and ultimate strain tests. And the influencing parameters in the experimental results are analyzed. The experimental analysis results show that on the premise of meeting the design requirements of test strength, and when choosing 0.3, 35%, 0.003 ratio of sand binder ratio, fly ash replacement rate and water reducing agent content mix ratio, the obtained flow performance, compressive strength, tensile strength and ultimate strain of PE-ECC are the best, and the job performance of ECC is obviously improved in the comparison with basic mix ratio.

Keywords: polyethylene fiber; ECC; orthogonal test; mix ratio

0 引言

高韧性水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composite, ECC)作为一种高性能材料, 因出色的韧性、自愈合性和耐久性等优点^[1-3], 在土木工程结构建设及加固领域展现了广泛的应用潜力。ECC由胶凝材料、石英砂、水、减水剂等混合而成, 并在水泥基体

中加入纤维, 形成水泥基复合材料, 不同纤维的掺入让混凝土在强度、韧性、耐久性方面均有不同程度的提高^[4-7]。研究表明, PE纤维的掺入可减少混凝土因原始缺陷产生的应力集中现象, 从而起到增韧阻裂作用, 在承受拉应力或弯拉应力时有更大的变形能力^[8]。然而, 由于配合比的不同可能改变纤维在基体中的分散系数, 使ECC出现工作性能不佳的情况^[9-10]。为减少配合比对ECC工作性能的不利影响, 本文对单掺PE纤维ECC的配合比进行优化研究。

本文设计满足C50强度的ECC基础配合比, 制定基础配合比优化方案来进行正交试验和结果分

收稿日期: 2024-02-22

作者简介: 杨明清(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁结构抗震性能研究与材料研发工作。

通信作者: 许莉(1977—), 女, 博士, 教授, 从事结构抗震和新型材料在结构中应用研究工作。电子邮箱: fzucivilxuli@fzu.edu.cn

析。针对ECC的工作性能提出评价方法,以流动指标作为主要评价指标。通过对正交试验结果进行极差分析和方差分析,探讨砂胶比、粉煤灰替代率、减水剂掺量对PE-ECC性能指标的影响。最终,结合极差分析和方差分析结果,确定各影响因素中最优的组合方案,并得出优化配合比。

1 原材料及配合比设计

1.1 原材料

试验所需的ECC组成材料包括水泥、粉煤灰、S95矿渣、石英砂、减水剂、水、聚乙烯纤维(PE纤维)。为了综合考虑力学需求和就地取材的方便性,本试验选用了福建省顺昌水泥厂生产的炼石牌PO42.5普通硅酸盐水泥。本试验在ECC中掺入一级粉煤灰等量替代水泥,实现ECC低碳化;降低用水量,同时改善混凝土拌合物的和易性,减少混凝土的徐变。试验所采用的细骨料为平均粒径250 μm石英砂。减水剂选用的CX-8聚羧酸,减水率达25%,能满足高减水率、高流动性和高耐久性需求。本试验采用增强PE纤维,其主要参数见表1。

表1 增强纤维参数

纤维类型	密度/ (g·cm ⁻³)	拉伸强 度/GPa	弹性模 量/GPa	直径/ μm	长度/ mm
PE	0.97	3.0	116	24	12

1.2 配合比设计

根据国内外不同研究团队所开发的ECC配比方案^[11-12],通过试验计算、配合比设计及试验,配制得到抗压强度为C50以上的PE-ECC,其具体设计配合比见表2。为保证研究试验中设计的ECC材料更易于实际工程中施工应用,同时考虑到后续混杂纤维的研究中,高纤维掺量对其工作性能的影响。本试验在保持PE纤维体积掺量2%的基础上,进行以优化工作性能为目标的配比优化方案设计。

表2 基础配合比

水胶比	水泥	矿渣粉	粉煤灰	石英砂	水	减水剂	PE纤维/%
0.28	1	0.5	0.5	0.64	0.56	0.002	2

在《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)^[13]中可知

$$W/B = \frac{\alpha_a f_b}{f_{cu,0} + \alpha_a \alpha_b f_b} \tag{1}$$

$$f_{cu,0} = \frac{\alpha_a f_b - W/B(\alpha_a \alpha_b f_b)}{W/B} \tag{2}$$

式中:W/B为水胶比;α_a、α_b为系数;f_b为胶凝材料28 d

胶砂抗压强度;f_{cu,0}为混凝土配置强度。

从公式可知,水胶比与混凝土强度呈负相关。试配试验结果也表明,水胶比变化对试配混凝土强度有严重影响。原因是胶凝材料水化所需的化学结合水一般约占胶凝材料质量的20%~25%。然而,为了使混凝土具有良好的流动性,设计时会有一定过量的水,以满足混凝土的搅拌、浇筑和振捣需要。过多的水可能会导致混凝土中的孔隙和毛细孔隙增加,从而降低混凝土的密实度和强度。因此在优化方案设计中,为保证在优化试验方案下得到的PE-ECC强度指标接近或超过基础配合比,同时有效提高其工作性能,在保持基础配合比水胶比基础上,设置了3个优化因素,分别为砂胶比、粉煤灰替代率和减水剂掺量。

砂胶比是混凝土中砂用量与胶凝材料用量之比。在保持水胶比不变的情况下,砂胶比越小,说明水泥浆相对越多,更好地填充集料的空隙和包裹集料表面,则流动性越大,工作性能越好。但过小的砂胶比会导致黏聚性、保水性差,因而本试验中适当降低砂胶比,将其水平范围设置为0.28~0.32。

粉煤灰替代率是粉煤灰替代水泥后,其粉煤灰用量与总胶凝材料用量之比,该比例是指内掺方式。粉煤灰具有细度高、比表面积大等特点,可以填充水泥颗粒之间的空隙,改善混凝土的紧密度和内聚力,从而提高混凝土的流动性。本试验中,提高粉煤灰替代率,将粉煤灰替代率水平范围设置为25%~35%。

减水剂是一种能够降低混凝土水泥浆体表面张力的化学添加剂。水泥在加水搅拌后形成絮凝状结构,其中包裹着很多拌合水,从而降低了新拌混凝土流动性。加入减水剂能将水泥包裹的水释放出来,提高混凝土的流动性。为避免过量使用降低混凝土的强度和耐久性,设置减水剂掺量水平范围为0.2%~0.4%。

为分析砂胶比、粉煤灰替代率和减水剂掺量对PE-ECC工作性能的影响,设计四因素三水平的正交试验方案,选择PE-ECC的流动度、抗压强度、抗拉强度作为评价指标。该评价指标能一定程度反映出PE-ECC的工作性能与力学性能。因不设置重复试验,为避免其他因素及不同因素间的交互作用,设置一组空白因素用于误差分析。将砂胶比、粉煤灰替代率、减水剂掺量、空白列分别设置为A、B、C和D四个因素,每个因素均取3个水平值。正交试验因素及其水平见表3,正交试验方案见表4。

表3 试验因素及水平

水平	因素			
	A 砂胶比	B 粉煤灰替代率/%	C 减水剂掺量	D 空白
1	0.32	25	0.002	1
2	0.30	30	0.003	2
3	0.28	35	0.004	3

表4 正交试验方案

编号	A 砂胶比	B 粉煤灰替代率	C 减水剂掺量	D 空白
ZJ 1	1	1	1	1
ZJ 2	1	2	2	2
ZJ 3	1	3	3	3
ZJ 4	2	1	2	3
ZJ 5	2	2	3	1
ZJ 6	2	3	1	2
ZJ 7	3	1	3	2
ZJ 8	3	2	1	3
ZJ 9	3	3	2	1

2 材料制备与试验方法

由于PE纤维在搅拌中易发生结团,为保证PE纤维的均匀分布,本试验采用纤维后加的方式。材料制备与养护过程见图1,工序如下。

(1)将搅拌机锅壁预湿润后,将称好的水泥、S95矿渣粉、粉煤灰、石英砂依次倒入搅拌锅内,干拌5 min。

(2)保持搅拌机继续运转,同时加入2/3的水和减水剂,搅拌至呈面团状,再缓慢加入剩余1/3水并继续搅拌5 min,直至材料充分均匀混合。

(3)将PE纤维人为分散,均匀加入搅拌锅中,并继续搅拌10 min,以确保PE纤维分布均匀。

(4)将拌合后的ECC加入刷过油的模具中,放至振动台上震动1 min,以减少ECC中的空隙。

(5)用保鲜膜密封装有ECC的模具,放置24 h后进行脱模。脱模后将ECC模块放至标准养护室中,温度为20℃,相对湿度为95%,养护时间为28 d。

2.1 流动度测定

在ECC制备完成后,根据GB/T 2419—2005^[14]进行跳桌试验,装置见图2(a)。流动度测定过程见图2,试验总时长应小于6 min,具体步骤如下。

(1)将ECC分两次加入截锥圆模,第一次加入试模总高度的2/3处,用捣棒由内而外振捣15次,使圆模内ECC均匀无气泡;盖上模套,第二次加入超出圆模高度2 cm的ECC,并用捣棒再次由内而外振捣上层ECC 10次,平移取下模套,刮平截锥圆模上表面



图1 材料制备与养护过程

ECC。

(2)将试模快速提起,同时启动跳桌,总跳动次数为25次,频率为每秒一次。

(3)跳动结束后立即用钢尺进行测量,并记录最大扩散直径和垂直方向直径,取得两直径的平均数即为ECC的流动度。测量方式见图2(d)。

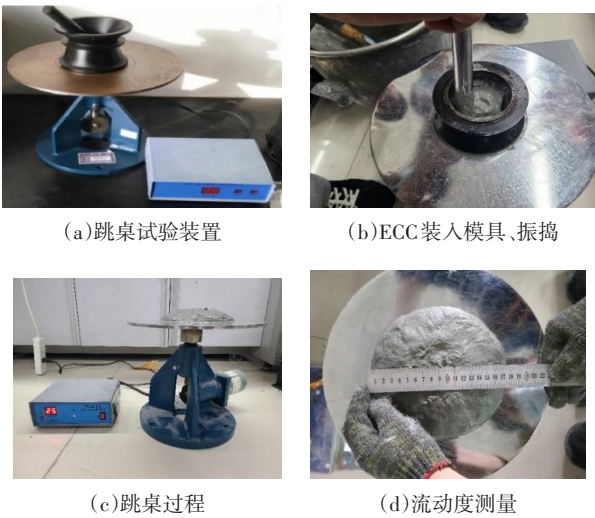


图2 流动度测定过程

(4)清洗跳桌圆盘和截锥圆模,再次重复进行一次测试,两次所得结果取平均值。

2.2 流动指标评价方法

由于ECC材料中掺有PE纤维,易在搅拌中结

团,影响工作性能,因此ECC对流动性的要求要高于其他混凝土。结合ECC材料特性、试验现象与参考数据,对应跳桌试验结果提出流动指标对ECC工作性能进行评价。流动指标评价方法见表5。

表5 流动指标评价方法

流动指标 (跳桌试验结果)	16.5以下 ($<165\text{ mm}$)	16.5~19.0 ($165\sim190\text{ mm}$)	19.0以上 ($>190\text{ mm}$)
ECC工作性能评价	ECC流动性差,不利于施工及后期强度增加	ECC流动性一般,泵送难度大,施工中可能出现泵送不畅的问题	ECC流动性良好,适宜施工与泵送

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

通过流动度测试及抗压、抗拉性能测试,得到优化方案的正交试验结果。PE-ECC流动指标、抗压强度、抗拉强度和极限应变的测试值见表6。

表6 正交试验结果

试验号	A	B	C	D	流动指标/mm	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	极限应变/%
ZJ 1	1	1	1	1	15.3	52.3	3.2	4.3
ZJ 2	1	2	2	2	16.9	61.1	3.5	3.7
ZJ 3	1	3	3	3	17.5	50.5	3.5	4.2
ZJ 4	2	1	2	3	18.6	57.1	3.3	4.3
ZJ 5	2	2	3	1	18.1	56.2	3.6	4.1
ZJ 6	2	3	1	2	19.2	65.3	4.1	4.7
ZJ 7	3	1	3	2	19.0	35.8	2.4	3.0
ZJ 8	3	2	1	3	19.6	44.4	2.9	3.5
ZJ 9	3	3	2	1	20.5	43.9	3.0	3.8

3.2 试验结果分析

根据表6中的正交试验结果可知,试验组ZJ 1~ZJ 6的试件抗压强度满足设计要求,即满足C50强度要求,而试验组ZJ 7~ZJ 9的试件抗压强度出现明显下降,不满足设计要求。在9组试验结果中,试验组ZJ 9的流动指标最高,达到20.5,比基础配合比(ZJ 1)提高34.0%;试验组ZJ 6的抗压强度最高,达到65.3 MPa,相比ZJ 1提高了24.9%;试验组ZJ 6的抗拉强度最高,达到4.1 MPa,相比ZJ 1提高了28.1%;试验组ZJ 6的极限应变最高,达到4.7%,相比ZJ 1提高了9.3%。

综合上述试验结果分析发现,试验组ZJ 6在9组试验配合比中所得到的ECC抗压强度、抗拉强度及极限应变都是最出色的。考虑到ZJ 7~ZJ 9组试验配合比下所获得的ECC不满足抗压强度设计要求,而ZJ 6的流动性指标在ZJ 1~ZJ 6这6组试验配合比当

中是最高的。因此,在满足试验C50强度要求前提下,ZJ 6组配合比下,即砂胶比:粉煤灰替代率:减水剂掺量=0.3:35%:0.003,所获得的ECC流动性、强度和延性都是最出色的。对应的优化配合比见表7。

表7 优化配合比

水胶比	水泥	矿渣粉	粉煤灰	石英砂	水	减水剂	PE纤维/%
0.28	0.8	0.5	0.7	0.6	0.56	0.003	2

基础配合比与优化配合比试验结果比对见表8。由表8可知,在优化配合比与基础配合比试验结果比对中,优化后的PE-ECC流动指标提高25.5%,抗压强度提高24.9%,抗拉强度提高28.1%,应变提高9.3%。

表8 基础配合比优化结果比对

对比	流动指标/mm	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	极限变/%
基础配合比	15.3	52.3	3.2	4.3
优化配合比	19.2	65.3	4.1	4.7
变化率/%	25.5	24.9	28.1	9.3

4 结 语

(1)通过流动指标来评价ECC工作性能,结果表明,当流动指标在16.5~19.0时,ECC流动性一般,泵送难度较大;而当流动指标大于19.0时,ECC流动性良好,适宜施工与泵送。

(2)在满足试验C50强度要求前提下,砂胶比、粉煤灰替代率、减水剂掺量为0.28、0.35、0.003时,流动指标、抗压强度、抗拉强度和极限应变达到最优。

(3)相比原配合比,PE-ECC优化配合比使流动指标、抗压强度、抗拉强度、应变均有提高。这一结果表明,配合比优化具有显著的优化效果,可推广到实际工程当中使用。

参考文献:

[1] Li V C, 张亚梅. 高延性纤维增强水泥基复合材料的研究进展及应用[J]. 硅酸盐学报, 2007(4): 531-536.
[2] Yuan F, Chen M, Pan J. Flexural strengthening of reinforced concrete beams with high-strength steel wire and engineered cementitious composites[J]. Construction and Building Materials, 2020, 25(4): 119-284.
[3] Zheng Y Z, Wang W W, Mosalam K M, et al. Experimental Investigation and Numerical Analysis of RC Beams Shear Strengthened with FRP/ECC Composite Layer[J]. Composite Structures, 2020, 24(6): 112-436.
[4] Yoo D Y, Kim S, Park G J, et al. Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high-performance

- fiber-reinforced cement composites[J]. Composite Structures, 2017, 174 (8): 375-388.
- [5] Huang B, Li Q, Xu S, *et al.* Tensile fatigue behavior of fiber-reinforced cementitious material with high ductility: Experimental study and novel P-S-N model[J]. Construction and Building Materials, 2018, 178(30): 349-359.
- [6] Kim Y Y, Fischer G, Li V C. Performance of bridge deck link slabs designed with ductile engineered cementitious composite[J]. Aci Structural Journal, 2009, 101(6): 792-801.
- [7] Li V C. Engineered Cementitious Composites-Tailored Composites through Micromechanical Modeling[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 1997, 4(3): 405-416.
- [8] Yu K, Yu J, Dai J, *et al.* Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers [J]. Construction & Building Materials, 2018, 15(8): 217-227.
- [9] 王振波,王鹏宇,朱凤强,等. 混杂纤维 ECC 的纤维分布规律及力学性能研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 41(2): 187-198.
- [10] 许玲. 新型混杂纤维增强水泥基材料(HyFRCC)的流变性能[D]. 大连:大连理工大学, 2016.
- [11] Yuan W Y, Han Q, Bai Y L, *et al.* Compressive behavior and modelling of engineered cementitious composite (ECC) confined with LRS FRP and conventional FRP[J]. Composite Structures, 2021, 41(2): 187-198.
- [12] Lepech M, Li V C. Large-Scale Processing of Engineered Cementitious Composites[J]. ACI Materials Journal, 2008, 28(6): 570-574.
- [13] JGJ 55—2011, 普通混凝土配合比设计规程[S].
- [14] GB/T 2419—2005, 水泥胶砂流动度测定方法[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadfloodbridge@163.com

