【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

改性聚酯纤维对混凝土早期开裂与收缩的影响

吴豪祥¹, 吴永根¹, 李文哲²

1) 空军工程大学航空工程学院, 陕西西安 710038; 2) 武警部队研究院工程设计研究所, 北京 100020

摘 要: 为探究改性聚酯纤维对混凝土早期开裂和收缩的影响, 以纤维掺量为变量, 采用平面薄板和非接触法收缩测定仪对改性聚酯纤维混凝土的早期开裂和收缩进行测试分析. 结果表明, 改性聚酯纤维对混凝土的早期收缩和开裂均有明显的改善作用. 随着纤维掺量的增加, 裂缝面积和早期收缩呈现先减小后增大的趋势. 当纤维掺量为 1.2 kg/m^3 时, 纤维对混凝土早期开裂和收缩性能的改善均达到最好的效果, 与未掺纤维的对比试样相比, 裂缝面积可降低 86.4%, 早期收缩率可降低 68.7%. 试验结果表明, 纤维的掺入对混凝土的早期抗折强度影响不大, 相较于对照试样而言, 纤维混凝土的 7 d 抗折强度增长率均在 6% 以下. 通过裂缝面积、早期收缩和早期抗折强度的对比分析, 发现改性聚酯纤维对混凝土抗裂性能的增强主要是由于纤维的掺入减小了混凝土的早期收缩.

关键词: 建筑材料; 改性聚酯纤维; 混凝土; 早期收缩; 早期开裂; 抗折强度

中图分类号: TU528.572

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2020.02173

Effect of modified polyester fiber on early crack and shrinkage of concrete

WU Haoxiang¹, WU Yonggen¹, and LI Wenzhe²

1) Faculty of Aeronautical Engineering, Airforce Engineering University, Xi'an 710038, Shaanxi Province, P. R. China

2) Institute of Engineering Design, People's Armed Police Academy, Beijing 100020, P. R. China

Abstract: To investigate the effect of modified polyester fiber on the early crack and shrinkage of concrete, taking the fiber content in fiber reinforced concrete as a variable, the early shrinkage and crack of modified polyester fiber concrete are measured and analyzed by flat sheet and non-contact shrinkage tester. Results show that the modified polyester fiber can significantly improve the early shrinkage and crack of concrete. With the increase of fiber content, crack area and early shrinkage decrease first and then increase. When the fiber content is 1.2 kg/m^3 , the fiber improves the early crack and shrinkage to the best extent, with the crack area reduced by 86.4% and the early shrinkage rate reduced by 68.7% compared with those of contrast sample without fiber. The test shows that the fiber has little effect on the early flexural strength of concrete, and the 7 d flexural strength increase rate of fiber reinforced concrete is below 6% compared with that of contrast sample. The comparative analysis of crack area, early shrinkage and early flexural strength show that the improvement of the crack resistance of concrete by modified polyester fiber is mainly due to the reduction of early shrinkage of concrete.

Key words: construction material; modified polyester fiber; concrete; early shrinkage; early crack; flexural strength

Received: 2019-06-10; Accepted: 2019-12-05

Foundation: Military Scientific Research Foundation

Corresponding author: Professor WU Yonggen. E-mail: wuyonggen1@163.com

Citation: WU Haoxiang, WU Yonggen, LI Wenzhe. Effect of modified polyester fiber on early crack and shrinkage of concrete [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(2): 173-177. (in Chinese)

在混凝土中掺入适当的纤维不仅可以改善混凝土的力学性能,提高混凝土的抗压强度、抗拉强度和抗冲击性能,还能改善混凝土的耐久性^[1].目前,纤维混凝土作为一种工程材料已经被广泛应用于公路、桥梁和隧道等.混凝土浇筑完成后,由于自身水化反应以及周围环境温湿度的变化,混凝土会出现明显的早期收缩.当混凝土的自由收缩受到约束时,就会产生拉应力,一旦超过混凝土的抗拉强度便会产生裂缝^[2].从长期效应来看,早期开裂会加快混凝土的碳化,加速钢筋腐蚀,同时为氯离子等进入混凝土内部提供通道,影响混凝土的耐久性和使用性能,缩短混凝土的使用寿命^[3].针对不同类型纤维对混凝土早期开裂和收缩的影响,许多学者进行了广泛的研究.王新忠等^[4]进行了玄武岩纤维对混凝土早期开裂影响的研究,发现随着纤维含量增大,早期裂缝逐渐减小,当体积分数为 0.2% 时,可见裂缝基本消失.陈歆等^[5]认为玄武岩纤维之所以能够约束混凝土的收缩变形,主要是因为承受了一部分收缩应力.管宗甫等^[6]研究了聚丙烯纤维混凝土的早期开裂,认为聚丙烯纤维的最佳纤维长度为集料最大粒径的 3/5,纤维最佳掺量为 0.9 ~ 1.2 kg/m³.BANTHIA 等^[3]研究了不同类型聚丙烯纤维的抗裂作用.马一平等^[7]研究了不同类型聚乙烯醇 (polyvinyl alcohol, PVA) 纤维对水泥砂浆的早期干缩开裂作用,认为在塑性阶段,纤维的直径越小,减裂的效果越好.银英姿等^[8]则认为不同直径 PVA 纤维的减裂效果与纤维的掺量有关.BOOYA 等^[9]则证明了工程纸浆纤维对混凝土塑性收缩的改善作用.

聚酯纤维是一种弹性模量较低的合成纤维,可提高混凝土的抗冲击性、强度以及弹性模量,但传统聚酯纤维由于不能抵抗混凝土的碱性环境,限制了它在水泥混凝土中的使用^[10].随着技术的不断进步,改性聚酯纤维已可以很好地用于混凝土中,并被证明具有良好的耐久性^[11].近年来针对聚酯纤维混凝土力学性能、抗磨耗性和抗干缩性能的研究较多^[12],但关于改性聚酯纤维混凝土的早期抗裂和收缩性能研究较少.本研究以纤维掺量为变量,对改性聚酯纤维混凝土的早期开裂和收缩进行研究,并通过早期抗折强度的试验对纤维改善混凝土开裂和收缩现象的一致性进行分析.

1 材料与方 法

1.1 原材料及混凝土配合比

对比混凝土试样(未掺纤维混凝土)的水灰比为 0.45,每立方米的水泥、砂和石的用量分别为 330、595 和 1 389 kg.其中,水泥为 42.5 级普通硅酸盐水泥;粗集料为石灰石,按照 5 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 40 mm 3 个级配的质量比 1:3:6 进行配制;细集料为河砂,细度模数为 2.73;水为普通自来水.在对比混凝土中分别掺入 0.8、1.0、1.2 和 1.4 kg/m³ 的纤维,可得到相对应的掺纤维混凝土样品,编号分别为 F08、F10、F12 和 F14.

选用的改性聚酯纤维由清华大学生产,纤维长度为 5 ~ 20 mm,比重为 0.9 ~ 1.3,弹性模量为 6.1 GPa,断裂伸长率为 3.1%,抗拉强度为 760 MPa.

1.2 试件制备

采用 60 L 单卧轴强制式搅拌机进行试样制备.为保证纤维在水泥混凝土中的均匀性,先将水泥和砂干拌 30 s,均匀撒布纤维后继续干拌 30 s,然后加水湿拌 30 s,最后加入骨料拌和 120 s.

1.3 试验方法

采用平板试验法进行早期抗裂性能研究,试件尺寸为 800 mm × 600 mm × 100 mm,试验按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准 (GB/T 50082—2009)》中的规定进行.

1.4 早龄期收缩试验

试验选用 SRF-710 型非接触式混凝土收缩变形测定仪.按照规范要求,混凝土带模测定早期收缩.试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 515 mm.

1.5 强度试验

对含不同纤维掺量混凝土的早期 (7 d) 抗折强度进行测试.试验根据《普通混凝土力学性能试验方法标准 (GB/T 50081—2002)》中的规定进行.抗折强度测试试件为 150 mm × 150 mm × 600 mm 标准小梁试件.

2 结果与分 析

2.1 不同纤维掺量混凝土的早期抗裂性试验结果

混凝土搅拌后置于室内,温度为 (20 ± 2) °C,湿度为 (60 ± 5) %,自搅拌加水 24 h 后对裂缝数和面积进行统计,其中,裂缝长度采用钢尺测量,裂缝宽度使用读数显微镜测量.统计结果见表 1.

表1 早期抗裂试验结果
Table 1 Results of early crack resistance test

编号	裂缝条数	裂缝条数降低率/%	裂缝总面积/mm ²	裂缝面积降低率/%
P	25	—	157.65	—
F08	20	20	65.8	58.3
F10	16	36	34.20	78.3
F12	13	48	21.40	86.4
F14	14	44	68.30	56.7

由表1可见:

1) 改性聚酯纤维能够有效提高混凝土的抗裂能力, 掺入纤维对减少裂缝的作用十分明显. 当纤维掺量在 0.8 ~ 1.4 kg/m³ 时, 裂缝数减少了 20% ~ 44%, 裂缝面积减少了 56.7% ~ 86.4%.

2) 随着纤维掺量的增加, 裂缝条数和裂缝面积降低率均呈先升后降趋势, 且均在纤维掺量为 1.2 kg/m³ 时达到最低. 对比裂缝数和面积的降低率可以看出, 在纤维含量较低时, 纤维对缩小裂缝宽度较为明显; 而当纤维掺量为 1.4 kg/m³ 时, 虽然混凝土裂缝数仅比 F12 组多 1 根, 但是裂缝总面积却是 F12 组的 3.2 倍. 主要原因是由于纤维过量, 形成纤维的重叠聚团, 增多了混凝土的薄弱环节, 在一些薄弱面出现较大的开裂.

2.2 不同纤维掺量混凝土的早期收缩试验结果

试验观测到, 3 d 的收缩率仅在 24 h 之内变化幅度较大, 24 h 之后基本不变. 为与早期抗裂试验进行比较, 本次混凝土自由收缩试验主要针对前 24 h 进行研究. 试验测得的混凝土收缩率见图 1.

由图 1 可见, 纤维对混凝土早期收缩的抑制作

图1 混凝土收缩率曲线

Fig. 1 Concrete shrinkage ratio curve

用十分显著, 掺入纤维的混凝土早期收缩率明显低于对照混凝土样品. 纤维掺量在 0.8 ~ 1.4 kg/m³ 的变化过程中, 24 h 时的混凝土收缩率比对照试样分别降低了 50.8%、56.2%、68.7% 和 45.3%, 纤维对混凝土早期收缩抑制效果呈现先增大后减小的趋势.

WANG^[13] 将混凝土早期体积变化过程按时间分为塑性沉降、流动收缩、自收缩和二次塑性收缩 4 个发展阶段; GHOURCHIAN^[14] 则把混凝土的塑性收缩划分为塑性沉降和干燥两个阶段. 本研究结合实际曲线, 将混凝土 24 h 的早期收缩变化划分为 3 个阶段: 第 1 阶段为起始反应阶段, 主要对应于水泥水化反应的诱导期, 此时反应速率较慢, 对水分的消耗较少, 水分未出现明显迁移, 混凝土收缩相对较小; 第 2 阶段为急速增长阶段, 主要与水泥水化反应的凝结期相对应, 该阶段水泥快速水化, 凝胶体膜层围绕水泥颗粒成长, 随后水化产物互相贯穿形成网状结构, 混凝土中的水分随着水泥水化反应和表面的持续蒸发不断减少, 混凝土出现明显收缩; 第 3 阶段为稳定阶段, 对应于水泥水化反应的硬化期, 该阶段水泥水化反应速率相对较低, 水分迁移速率减慢且随着混凝土逐渐凝固, 固相形成相对稳定的网状结构, 混凝土的弹性模量和强度不断增长, 混凝土收缩所需的毛细孔压力越来越大, 因而随着时间推移, 早期收缩率的增长逐渐变缓^[15].

本次分析以 15×10^{-6} 的收缩率作为阶段划分的依据, 由于第 1 阶段持续时间较短, 第 3 阶段变化幅度很小, 因此主要对第 2 阶段进行分析, 对第 2 阶段的混凝土收缩率变化曲线进行一元线性回归处理, 拟合曲线见图 2, 具体分析结果见表 2.

图2 第2阶段收缩率的拟合曲线

Fig. 2 The fitted curve of shrinkage rate in the 2nd stage

表 2 第 2 阶段数据分析
Table 2 Data analysis of the second stage

编号	持续时间/h	10^6 拟合直线斜率/ h^{-1}	R^2
P	0 ~ 7	90.7	0.93
F08	1 ~ 7	47.5	0.96
F10	1 ~ 7	42.7	0.96
F12	1 ~ 5	40.2	0.98
F14	1 ~ 7	52.7	0.97

结合图 1、图 2 和表 2 可以看出, 相对于对比混凝土试样, 掺纤维的混凝土试样 0 ~ 1 h 的收缩率相对较低, 小于 15×10^{-6} , 同时收缩率的曲线斜率也出现大幅度下降, 掺纤维混凝土试样的拟合直线斜率均低于 $55 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$, 远低于对比混凝土试样的 $90 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$; 当纤维浓度为 $0.8 \sim 1.2 \text{ kg/m}^3$ 时, 随着纤维含量的增大, 斜率只出现细微变化; 当纤维浓度为 1.2 kg/m^3 时, 不仅拟合直线的斜率最小, 第 2 阶段的时间也出现明显缩短; 而当纤维浓度为 1.4 kg/m^3 时, 拟合直线的斜率出现了明显增长, 且第 2 阶段持续时间恢复为 6 h.

2.3 不同纤维掺量混凝土的抗折强度试验结果

混凝土的抗拉强度对于研究混凝土的早期收缩和开裂十分重要, 但早期混凝土呈现明显塑性, 很难对混凝土的早期抗拉强度进行直接测量, 因此采用 7 d 抗折强度反映早期混凝土的抗拉能力.

试验测得 P、F08、F10、F12 和 F14 的 7 d 抗折强度分别为 5.27、5.28、5.37、5.58 和 5.31 MPa. 根据试验结果可以看出: ① 随着混凝土纤维掺量的增加, 混凝土 7 d 抗折强度呈现先上升后下降的趋势, 在纤维浓度为 1.2 kg/m^3 时, 7 d 抗折强度提高 5.88%; ② 纤维浓度为 0.8 kg/m^3 时, 对比混凝土试样和掺纤维混凝土试样的抗折强度相当, 其原因与低掺量纤维无法形成稳定的网络结构密切相关; ③ 该类型纤维的弹性模量较低 (6.1 GPa), 只能桥接混凝土早期内部的微裂缝并阻止其扩展, 对于破坏试验过程中产生的宏观裂缝不能给予良好的桥接^[16].

2.4 对比与分析

混凝土早期在特定约束下产生裂缝的多少主要取决于两个因素, 一是混凝土的早期收缩大小; 二是混凝土自身抵抗应力和应变的能力. 图 3 为裂缝降低率、收缩降低率以及早期抗折强度增长率的比较. 由图 3 可见, 掺纤维混凝土试样抵抗早期收缩和早期开裂的能力随着纤维掺量的变化呈现出明显

的一致性, 纤维掺量在 $0.8 \sim 1.4 \text{ kg/m}^3$ 时, 裂缝面积和早期收缩率降低率均在 45% 以上. 而纤维的掺入对混凝土早期 (7 d) 抗折强度并没有明显的影响, 除纤维浓度为 1.2 kg/m^3 外, 其余掺纤维混凝土试样的强度增长率均在 2% 以内. 例如, 虽然 F08 的早期抗折强度 and 对比混凝土试样基本相同, 但 F08 的抗裂性能和抗收缩性能却有明显提升, 裂缝面积降低率为 58.3%, 早期收缩率降低率为 50.8%. 因此可以判断, 对于混凝土的早期性能而言, 混凝土抗裂性能的提高主要是由于高性能合成纤维的掺入减小了混凝土的早期收缩, 而纤维对早期抗弯拉能力的增强作用并不明显.

图 3 裂缝降低率、收缩降低率以及早期抗折强度增长率的比较

Fig. 3 Comparison of crack reduction rate, shrinkage reduction rate and early flexural strength increase rate

3 结 论

1) 改性聚酯纤维可以有效地增强混凝土早期抗裂能力, 减小混凝土的早期收缩变形. 纤维掺量在 $0.8 \sim 1.4 \text{ kg/m}^3$ 时, 纤维混凝土的早期裂缝面积和早期收缩率比普通混凝土均降低 45% 以上.

2) 改性聚酯纤维对混凝土早期 (7 d) 抗折强度的贡献较小. 纤维掺量为 0.8 、 1.2 和 1.4 kg/m^3 时, 强度增长率在 2.00% 以下; 纤维掺量在 1.2 kg/m^3 时, 强度增长率达到 5.88%.

3) 随着纤维掺量的增加, 混凝土的抗裂能力、早期收缩率降低率以及早期抗折强度均呈现先增大后降低的趋势, 且均在纤维掺量为 1.2 kg/m^3 时能够获得最佳效果, 其中裂缝面积降低率可达 86.4%, 早期收缩率降低率可达 68.7%.

4) 纤维对混凝土早期抗裂能力的影响与其对

混凝土的早期抗折强度的影响没有明显的相关性,纤维主要通过降低混凝土的早期收缩来减小混凝土面临的早期开裂风险。

基金项目:军队科研基金资助项目

作者简介:吴豪祥(1995—),空军工程大学硕士研究生。研究方向:工程材料与施工。E-mail: 18710400495@163.com

引文:吴豪祥,吴永根,李文哲. 改性聚酯纤维对混凝土早期开裂与收缩的影响[J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(2): 173-177.

参考文献 / References:

- [1] AFROUGHSABET V, BIOLZI L, OZBAKKALOGLU T. High-performance fiber-reinforced concrete: a review [J]. *Journal of Materials Science*, 2016, 51(14): 6517-6551.
- [2] EREN O, MARAR K. Effect of steel fibers on plastic shrinkage cracking of normal and high strength concretes [J]. *Materials Research-Ibero-American Journal of Materials*, 2010, 13(2): 135-141.
- [3] BANTHIA N, GUPTA R. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(7): 1263-1267.
- [4] 王新忠, 李传习, 凌锦育, 等. 玄武岩纤维混凝土早期裂缝试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(11): 3860-3866.
WANG Xinzong, LI Chuanxi, LING Jinyu, et al. Experimental study on early crack of basalt fiber reinforced concrete [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(11): 3860-3866. (in Chinese)
- [5] 陈 歆, 郑秀华, 韩 凯. 玄武岩纤维掺杂混凝土材料特性的研究[J]. 深圳大学学报理工版, 2019, 36(1): 61-66.
CHEN Xin, ZHENG Xiuhua, HAN Kai. Characterization of basalt fiber doped concrete materials [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2019, 36(1): 61-66. (in Chinese)
- [6] 管宗甫, 李颖, 李世华, 等. 矿物掺合料和聚丙烯纤维对混凝土塑性收缩开裂的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(5): 794-798, 803.
GUAN Zongfu, LI Xiaoying, LI Shihua, et al. Effect of mineral admixture and polypropylene fiber on concrete crack property [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 32(5): 794-798, 803. (in Chinese)
- [7] 马一平, 余少同, 游 璐, 等. 纤维参数对水泥基材料减裂效果的影响[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(5): 797-802.
MA Yiping, YU Shaotong, YOU Lu, et al. Effect of fiber parameters on crack reduction of cement based materials [J]. *Journal of Building Materials*, 2018, 21(5): 797-802.
- [8] 银英姿, 仇 贝. 聚乙烯醇纤维混凝土力学性能及早期开裂试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(2): 454-458.
YIN Yingzi, QIU Bei. Experimental study on mechanical properties and early cracking of polyvinyl alcohol fiber concrete [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(2): 454-458. (in Chinese)
- [9] BOOYA E, GOROSPE K, GHAEDEH H, et al. Free and restrained plastic shrinkage of cementitious materials made of engineered kraft pulp fibres [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 212: 236-246.
- [10] 陈润锋, 张国防, 顾国芳. 我国合成纤维混凝土研究与应用现状[J]. 建筑材料学报, 2001(2): 167-173.
CHEN Runfeng, ZHANG Guofang, GU Guofang. State of study and application of synthetic fibers reinforced concrete in China [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2001(2): 167-173. (in Chinese)
- [11] 陈建强, 纪洪广, 刘娟红, 等. 改性聚酯纤维在混凝土中的分散性及对耐久性的影响[J]. 工程科学学报, 2016, 38(11): 1603-1609.
CHEN Jianqiang, JI Hongguang, LIU Juanhong, et al. Dispersivity of modified polyester fibers in concrete and its influence on the durability of concrete [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2016, 38(11): 1603-1609. (in Chinese)
- [12] GUPTA S, RAO V V L K, SENGUPTA J. Evaluation of polyester fiber reinforced concrete for use in cement concrete pavement works [J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2011, 9(3): 441-461.
- [13] WANG K, SHAH S P, PHUAKSUK P. Plastic shrinkage cracking in concrete materials-Influence of fly ash and fibers [J]. *ACI Materials Journal*, 2001, 98(6): 458-464.
- [14] GHOURCHIAN S, WYRZYKOWSKI M, LURA P. A poromechanics model for plastic shrinkage of fresh cementitious materials [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 109: 120-132.
- [15] BULLARD J W, JENNINGS H M, LIVINGSTON R A, et al. Mechanisms of cement hydration [J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(12): 1208-1223.
- [16] BOUZIADI F, BOULEKBACHE B, HAMRAT M. The effects of fibres on the shrinkage of high-strength concrete under various curing temperatures [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 114: 40-48.

【中文责编: 坪 梓; 英文责编: 之 聿】