

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.05.033

不同类型钢纤维混凝土力学性能室内试验分析

姬小祥¹, 张帆², 邵景干³

(1. 河南交院公路工程技术有限公司, 河南 郑州 451460;

2. 福建省高速公路达通检测有限公司, 福建 福州 350000; 3. 河南交通职业技术学院, 河南 郑州 451460)

摘要: 为探明不同种类钢纤维混凝土的工作性能, 依托某高速公路桥梁改扩建项目, 根据现场工程的实际要求制定了相应的配合比设计参数, 通过室内试验对不同类型的钢纤维混凝土的坍落度、坍落拓展度、抗离析指标、密度、30 min 坍落度损失和力学强度等指标进行测试和分析。结果表明: 钢纤维混凝土的抗离析指标均小于 15%, 铣削型、端钩型和压痕型三种类型钢纤维混凝土在 28 d 时抗压强度均在 68 MPa 左右; 铣削型钢纤维混凝土的劈裂抗拉强度和拉压比明显要比端钩型和压痕型的大, 说明其韧性较好, 采用铣削型钢纤维混凝土用于桥面后浇带的施工能够较好的满足相关规范技术要求。

关键词: 桥梁工程; 钢纤维混凝土; 拉压比; 桥面铺装

中图分类号: TU528.572

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2015)05-0168-05

Laboratory Experimental Study on the Mechanical Properties of Different Kinds of Steel Fiber Reinforced Concrete

Ji Xiaoxiang¹, ZHANG Fan², SHAO Jinggan³

(1. He'nan Institute of Highway Engineering Technology Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan 451460, China;

2. Fujian Expressway Datong Testing Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350000, China;

3. He'nan Vocational and Technical College of Communications, Zhengzhou, He'nan 451460, China)

Abstract: To study the work performance of different kinds of steel fiber reinforced concrete, the design parameters of mix ratio were determined according to the requirements of an expressway reconstruction project. Laboratory experiments were conducted on different kinds of steel fiber reinforced concrete, the slump, slump flow, segregation resistance, bulk density, slump loss in 30 minutes, and mechanical strength (3 d, 7 d, 28 d) of the concrete samples were tested and analyzed. The results indicate that the segregation resistance index is less than 15%, and the 28 d compressive strength of the samples are about 68 MPa. The splitting tensile strength and tensile compressive strength ratio of milling type steel fiber reinforced concrete are much higher than those of the hook type and indentation type, which suggest that the milling type possesses better tenacity. The indexes of milling type steel fiber reinforced concrete applied at the construction of the bridge deck pavement can meet the requirements of the related specifications.

Keywords: bridge engineering; steel fiber reinforced concrete; tensile compressive strength ratio; bridge deck pavement

钢纤维混凝土是由细骨料、粗骨料、水泥以及乱向分布的钢纤维组成的一种多相非均质复合材料, 由于钢纤维的阻裂、增强效应, 使得钢纤维混凝土的抗拉、抗剪、抗扭等性能得到大幅度提高^[1-3]。国内外的学者对钢纤维混凝土的力学性能已进行了一定

程度的研究, 并取得了不少的研究成果。罗章等^[4-5]人采用改进的材料试验机对钢纤维体积掺量为 1% ~ 4% 的钢纤维混凝土梁进行了弯曲和劈拉试验, 结果表明钢纤维混凝土的抗拉强度与钢纤维的体积掺量大致成线性关系; 郝维钊、王仁龙等^[6-9]人认为不同类型的纤维, 对纤维混凝土的增韧机理

不同,产生的增韧效果也有差异,长径比越大对钢纤维混凝土的增韧效果越明显。国内外的研究主要集中在钢纤维混凝土的力学性能及微观机理的分析上,而对不同种类钢纤维所浇筑的混凝土的性能研究较少。

某高速公路工程全长 106 km,其桥面后浇带采用钢纤维混凝土浇筑的形式,混凝土强度等级要求达到 C50 以上。依托高速公路实际工程,对不同类型的钢纤维混凝土的坍落度、密度、力学强度等指标进行室内试验分析与对比,以期为实际工程提供指

导,并为类似工程提供一定的借鉴。

1 原材料性质

(1) 水泥选用坚固 P·O 52.5 水泥,其主要性能指标见表 1。

(2) 粉煤灰主要选用洛阳热电厂生产的 I 级和 II 级粉煤灰,主要性能指标见表 2。

(3) 粗集料采用偃师碎石 5 mm ~ 10 mm, 10 mm ~ 20 mm 连续级配的石灰岩碎石,其主要性能指标见表 3。

表 1 水泥性能指标

比表面积 /($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	标准稠度 用水量/%	安定性	初凝时间 /(h:min)	终凝时间 /(h:min)	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
					3 d	28 d	3 d	28 d
388	27.8	0.5	2:23	3:17	27.9	55.4	5.9	9.1

表 2 洛阳热电厂粉煤灰性能指标

粉煤灰 类型	细度(0.045mm 筛余)/%	烧失量 /%	含水率 /%	碱含量 /%	SO ₃ /%	氯离子 含量/%	需水 量比/%	活性 指数/%
I 级	9.8	2.1	0.3	1	0.64	0.007	93	84
II 级	11	5.1	0.6	1	0.95	0.008	96	80

表 3 偃师碎石主要性能指标

表观密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	堆积密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	空隙率 /%	含泥量 /%	针片状含量 /%	母岩抗 压强度/MPa	氯离子 含量/%	碱活性 /%
2658	1550	41.7	0.7	2.2	110	0.008	0.035

(4) 细骨料选用宜阳天然河砂,其主要性能指标见表 4。

(5) 外加剂采用的是 HSP - GJS 聚羧酸高性能减水剂,其匀质性指标见表 5。

表 4 宜阳天然河砂主要性能指标

细度模数	表观密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	堆积密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	含泥量 /%	空隙率 /%	氯离子 含量/%	碱活性 /%
2.61	2662	1550	1.8	41.8	0.006	0.08

表 5 聚羧酸高性能减水剂匀质性指标

含固量/%	密度/($\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	pH 值	Cl ⁻ 含量/%	碱含量/%
20.4	1.08	6.4	0.041	1.69

2 钢纤维混凝土配合比的确定

2.1 钢纤维混凝土配合比设计原则

按照《普通混凝土配合比设计规程》^[10](JGJ 55 - 2011)、《纤维混凝土应用技术规程》^[11](JGJ/T221 - 2010)和《纤维混凝土结构技术规程》^[12](CECS38 - 2004)的相关技术要求,并根据现场实际的需求,得出钢纤维混凝土配合比设计要求:

(1) 钢纤维混凝土水胶比为 0.28 ~ 0.32,砂率为 41% ~ 45%;

(2) 钢纤维长径比 $l_f/d_f = 50 \sim 70$,纤维体积掺量宜为 0.5% ~ 2.0%,钢纤维表面需有防腐涂层,可采用铣削、端钩、压痕等类型的钢纤维,钢纤维抗拉强度应达到 600 MPa 以上;

(3) 若钢纤维混凝土为新拌制的,则其坍落度应大于 120 mm;

(4) 水泥型号应尽可能采用强度高、抗磨损性好,干缩性能及抗冻性均较好的普通硅酸盐水泥或硅酸盐水泥,以保证混凝土的力学性能;

(5) 砂子的细度模数应保证 $2.6 < \mu < 3.0$,要求颗粒坚硬耐磨、级配良好、表面粗糙有棱角;石子不宜采用石灰岩碎石,最大粒径不宜大于 20 mm 和钢纤维长度的 1/2;

(6) 减水剂宜采用聚羧酸高性能减水剂,掺量为胶凝材料用量的 0.5% ~ 1.5%;

(7) 各种原材料除满足上述要求外,还应满足相关规范、规程和标准的要求。

而根据《普通混凝土配合比设计规程》^[10](JGJ 55-2011)和《纤维混凝土应用技术规程》^[11](JGJ/T221-2010)要求,得出钢纤维混凝土配合比设计要求如下:

(1) 钢纤维混凝土水胶比为 0.30,砂率为 43%,减水剂掺量为 1.2% ~ 1.5%;

(2) 掺入混凝土中的钢纤维规格为:直径 0.75 mm,长 40 mm,体积掺量为 0.8%;

(3) 若钢纤维混凝土为新拌制的,则其坍落度应在 100 mm ~ 120 mm 之间;

(4) 砂子的细度模数应保证 $2.6 < \mu < 2.8$,碎石粒径在 5 mm ~ 20 mm 之间。

2.2 钢纤维掺量的确定

纤维临界体积率是混凝土破坏形式的突变点:当纤维掺量小于纤维临界体积率时,基体开裂后,纤维不能承担基体开裂而转移的荷载,会在基体开裂后破坏混凝土的结构形式;当纤维掺量大于纤维临界体积率时,当基体开裂后,纤维能承担基体转移的

荷载,甚至使承载能力提高一定的幅度^[13-17]。

文献[18]给出了乱向非连续纤维复合材料的纤维临界体积率公式,并根据经验对纤维的掺量进行确定^[18]:

$$\rho_{fc} = \frac{f_{mu}}{f_{mu} + \eta_f(f_{fu} - \epsilon_{mu} E_f)} \quad (1)$$

式中: f_{mu} 为纤维混凝土基体极限抗拉强度,MPa; f_{fu} 为纤维的极限抗拉强度,MPa; ϵ_{mu} 为纤维混凝土基体极限抗拉应变; η_f 为纤维的方向有效系数; E_f 为纤维的弹性模量,GPa。

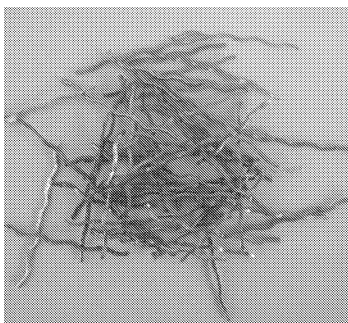
对于一般的 C50 混凝土而言: $f_{mu} = 4.11$ MPa, $\epsilon_{mu} = 100 \times 10^{-6}$;对于钢纤维来说, $f_{fu} = 1450$ MPa, $E_f = 210$ GPa; $\eta_f = 0.5$,代入式(1)中计算得钢纤维的临界体积率为 0.57%。在参阅大量资料和试验数据的基础上,考虑到现场的施工成本、混凝土设计要求等的影响,最终确定钢纤维的体积掺量均为 0.6%。

2.3 钢纤维混凝土配合比方案

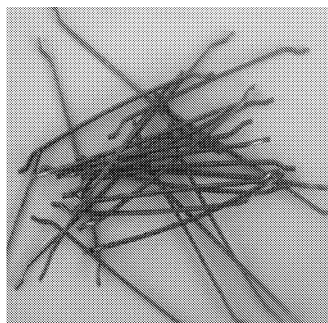
钢纤维混凝土配合比方案中选用铣削型、端钩型、压痕型三种钢纤维形状,如图 1 所示。依托某高速公路现场施工路段,该现场施工中的桥面混凝土强度等级为 C50,且混凝土的 3 d 抗压强度须达到设计强度的 50% 以上,根据钢纤维混凝土配合比设计基本原则及钢纤维混凝土配合比的设计要求,配合比方案参数设计见表 6。

表 6 钢纤维混凝土配合比 单位:kg/m³

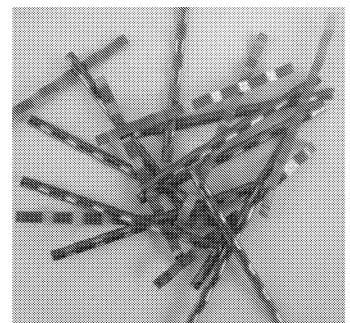
水泥量	水量	砂量	石子量	外加剂	钢纤维量
475	140	750	1010	6.65	46.8



(a) 铣削型



(b) 端钩型



(c) 压痕型

图 1 不同类型钢纤维形貌

3 室内试验结果分析

3.1 钢纤维混凝土的工作性能

分别对端钩型、铣削型、压痕型三种形状的钢纤维

混凝土的工作性能(坍落度、坍落拓展度、抗离析指标、密度和 30 min 坍落度损失)进行室内试验,依照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》^[19](GB/T 50080-2002)和《Specification and Guidelines for Self

- Compacting Concrete》^[20]的有关规定对相关的工作性能指标进行测试,试验结果见表 7。

表 7 钢纤维混凝土试验结果

编号	纤维类型	坍落度 /mm	扩展度 /mm	抗离析指标 /%	密度 / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	30 min 坍落度损失 /%
1	铣削型	190	420 × 350	10.4	2406	0.0
2	端钩型	175	330 × 330	9.8	2385	2.4
3	压痕型	175	390 × 330	11.7	2392	3.5

由表 7 中的试验结果可以看出,铣削型、端钩型、压痕型的钢纤维混凝土的坍落度分别为 190 mm、175 mm、175 mm,均在 175 mm 以上,表明其流动性较同强度等级的普通混凝土有一定的损失。三种结构形式的混凝土抗离析指标分别为 10.4%、9.8%、11.7%,能够满足欧洲规范《Specification and Guidelines for Self - Compacting Concrete》^[20]中不超过

15%的要求;三种结构形式的钢纤维混凝土 30min 坍落度损失均在 4% 以内,完全能够满足现场的施工需要。

3.2 钢纤维混凝土的力学强度

分别对端钩型、铣削型、压痕型三种形状的钢纤维混凝土在不同龄期(3 d、7 d、28 d)的抗压强度和劈裂抗拉强度进行室内试验,试验结果如图 2 所示。

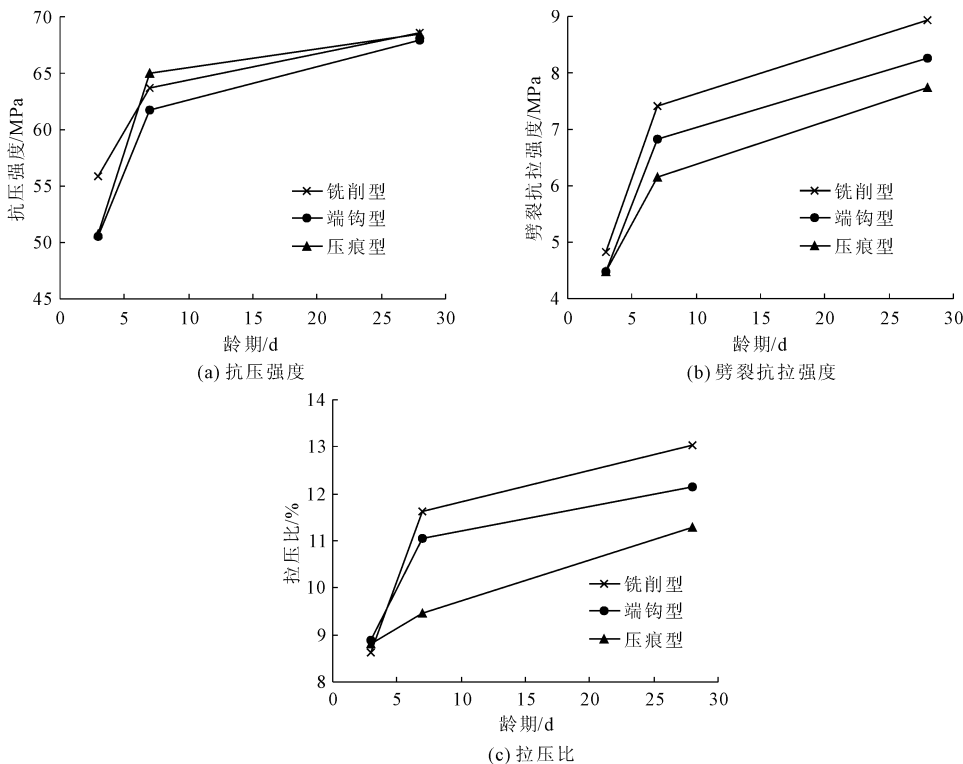


图 2 钢纤维混凝土的力学强度

从图 2(a)中可以看出,钢纤维混凝土的抗压强度在 3 d 的时候,三种钢纤维混凝土的强度均在 50 MPa 以上,已经达到了设计强度的限值;7 d 后抗压强度均在 60 MPa 以上,完全能够满足混凝土强度设计要求,其中 3 d ~ 7 d 的混凝土强度增长幅度平均为 21%,7 d ~ 28 d 的平均增长幅度 8%,三种结构形式钢纤维混凝土 28 d 的抗压强度差别不大。从图 2(b)中可以看出,劈裂抗拉强度在第 3 d 时为 4.5 MPa 左右,3 d ~ 7 d 增幅为 48%,7 d ~ 28 d 的增幅为

22%,其中 28 d 时,铣削型比端钩型和压痕型的劈裂抗拉强度都大。

混凝土的韧性常以劈裂抗拉强度与抗压强度的比值(拉压比)来衡量,拉压比越大,表明混凝土的韧性越好,三种不同形状的钢纤维混凝土的拉压比如图 2(c)所示。随龄期增长,拉压比也逐渐上升,7 d 和 28 d 时的拉压比均是铣削型的最大,表明铣削型形状的钢纤维混凝土韧性最好。普通混凝土的拉压比一般在 5% ~ 8% 范围内,三种形状的钢纤维混凝土

土拉压比分别为 13.03%、12.16%、11.28%，均高于普通混凝土，表明钢纤维能较好地改善混凝土的韧性性能。

4 结 论

依托某高速公路建设工程实际，根据现场的具体情况 and 后浇带钢纤维混凝土的设计原则和配合比的设计要求，确定出了具体的配合比参数，并通过室内试验对相关的工作性能指标进行了试验分析研究，主要结论如下：

(1) 钢纤维混凝土坍落度均在 175 mm 以上，说明其流动性较同强度等级的普通混凝土有一定的损失，其抗离析指标均在 15% 以内，且 30 min 的坍落度损失在 4% 以内，能够满足相关规范和现场施工的技术需要；

(2) 三种结构形式的纤维在 28 d 时抗压强度均在 68 MPa 左右，但铣削型钢纤维混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度以及拉压比均优于端钩型和压痕型结构形式的钢纤维混凝土；

(3) 随龄期增长，铣削型钢纤维混凝土拉压比上升趋势最为明显，表明铣削型形状的钢纤维混凝土韧性最好，钢纤维能较好地改善混凝土的韧性性能。

参考文献：

[1] 刘永胜. 钢纤维混凝土力学性能和抗侵蚀机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.

[2] 周翔, 顾侃, 叶奋, 等. 路面层铺式钢纤维混凝土力学强度分析[J]. 中外公路, 2005, 25(5): 136-138.

[3] 刘永胜, 王肖钧, 金挺, 等. 钢纤维混凝土力学性能和本构关系研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(7): 717-723.

[4] 罗章. 中应变率下钢纤维混凝土的本构关系研究[D]. 长沙: 中南大学, 2004.

[5] 韩嵘, 赵顺波, 曲福来. 钢纤维混凝土抗拉性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 30(11): 63-67.

[6] 郝维钊. 新型钢纤维混凝土力学性能的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.

[7] 王仁龙, 张启明, 朱海堂, 等. 钢纤维混凝土抗折强度的影响因素分析[J]. 河北工业大学学报, 2014, 43(6): 39-42.

[8] 曹擎宇, 孙伟, 赵勇, 等. 纤维素纤维混凝土性能及在二次衬砌中的应用[J]. 铁道学报, 2012, 34(7): 103-107.

[9] 陈猛, 白帅, 张海鹏, 等. 混杂纤维混凝土抗压和抗拉性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(10): 113-117.

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ55 - 2011 普通混凝土配合比设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 221 - 2010 纤维混凝土应用技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

[12] 中国工程建设标准化协会. CECS 38: 2004 纤维混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.

[13] 吕应臣, 邵景干. 后浇带桥面铺装钢纤维混凝土配合比设计与试验研究[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2014(8): 162-164.

[14] 胡瀚. 钢纤维聚合物高强混凝土的温度疲劳性能[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.

[15] 姬小祥, 梁倩, 侯广真. 护栏与桥面铺装混凝土的配合比设计及试验分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2015(1): 83-86.

[16] 郭文瑛, 黄培彦, 李铁峰. C60 钢纤维泵送混凝土的试验研究[C]//超高层混凝土泵送与超高性能混凝土技术的研究与应用国际研讨会论文集(中文版), 2008.

[17] 郑顺潮. 钢纤维聚合物高强结构混凝土的力学性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.

[18] 蒋金洋, 孙伟, 戴捷, 等. 超高程泵送钢纤维混凝土关键性能及试验研究[C]//全国博士生学术论坛——力学、土木工程、水利工程分论坛, 2006.

[19] 中华人民共和国建设部. GB/T 50080 - 2002 普通混凝土拌合物性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

[20] EFNARC. Specification and Guidelines for Self - Compacting Concrete[S]. UR: Association house, 2002.