

新型棒状聚丙烯纤维混凝土抗剪性能试验与比较

丁春林¹, 张国防², 张 骅³

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 200092;
3. 上海裕之杰企业管理有限公司, 上海 200030)

摘要: 针对最新引进日产棒状聚丙烯纤维和喷射混凝土衬砌中常用的钢纤维, 通过 18 组 72 个混凝土试样的双面剪切试验, 研究了不同基体强度、不同纤维掺量混凝土抗剪强度变化特性. 试验结果表明: ①棒状聚丙烯纤维混凝土抗剪强度随着纤维掺量增加呈现先增大后减小的趋势, 钢纤维混凝土抗剪强度随着纤维掺量增加而增大; ②纤维掺量在 0.5% 以内, 棒状聚丙烯纤维混凝土抗剪强度增大幅度接近钢纤维混凝土, 纤维掺量在 0.5% 以上, 棒状聚丙烯纤维混凝土抗剪强度增大幅度低于钢纤维混凝土; ③两种纤维对 C30 混凝土抗剪强度的改善一般比 C50 混凝土大. 最后, 基于回归分析理论得到纤维混凝土抗剪强度拟合计算公式, 公式计算结果与试验结果比较一致.

关键词: 隧道工程; 纤维混凝土; 剪切试验; 抗剪强度; 棒状聚丙烯纤维

中图分类号: TU 528.57

文献标识码: A

Experiment and Comparison on Shear Behavior of New Type Rod-like Polypropylene Fiber Reinforced Concrete

DING Chunlin¹, ZHANG Guofang², ZHANG Hua³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Yzj Investment and Management Co., Ltd., Shanghai 200030, China)

Abstract: Aiming at the rod-like polypropylene fiber introduced from Japan and common steel fiber used in the shotcrete lining, this paper presents a study on changes of the shear strength of concrete with different matrix strength and fiber content through the shear test of 72 specimens divided into 18 groups. The results show that as the fibre content increases, the shear strength of the rod-like polypropylene

fiber concrete increases at first and then drops down, while the shear strength of the steel fiber concrete increases. When the fibre content is within 0.5%, the shear strength increase of the rod-like polypropylene fiber concrete is close to that of the steel fiber concrete, when the fibre content exceeds 0.5%, the shear strength increase of the rod-like polypropylene fiber concrete is lower than that of the steel fiber concrete. The fibers improve more on the shear strength of the C30 concrete than the C50 concrete. Finally, fitting formulas on the shear strength of the fiber concrete are gained based on the theory of regression analysis, and the calculation results of the formulas are accordant with the experimental results well.

Key words: tunnel engineering; fiber reinforced concrete; shear test; shear strength; rod-like polypropylene fiber

混凝土抗剪强度是混凝土基本力学性能之一, 实际工程中, 混凝土结构由于纯剪应力导致破坏的情况一般很少, 因而混凝土抗剪强度指标一直被人们忽视. 然而随着混凝土材料应用领域的不断扩大和研究工作的不断深入, 混凝土的抗剪性能已开始受到人们重视, 特别是近年来, 随着城市地铁和交通基础设施的迅速发展, 采用新奥法和浅埋暗挖法施工的隧道日益增多, 而这种施工方法要求喷射混凝土衬砌具有较高的抗剪强度和变形能力, 以防衬砌在地压作用下受剪破坏, 因此, 混凝土抗剪强度是这种施工方法的主要设计指标之一^[1-2]. 此外, 对于高层建筑剪力墙和梁柱节点的局部增强^[3-5]、以及桥面的补强与修补^[6-7], 抗剪强度也是结构设计中一个重要的衡量指标. 为改善混凝土抗剪强度和变形能力, 学者们为此开展了大量的研究, 如: 文

收稿日期: 2010-03-24

第一作者: 丁春林(1968—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为隧道与地下工程、结构工程材料等.
E-mail: chunlinding308@tongji.edu.cn

献[8]建议隧道衬砌采用喷射纤维增强混凝土,以改善衬砌混凝土抗剪、弯曲等力学性能,并对喷射纤维增强混凝土的设计与施工技术进行了规范;文献[9]采用平板试验,研究对比了钢纤维混凝土板和常见钢筋网增强混凝土板的冲剪应力和弯曲韧性,阐明了隧道衬砌采用喷射钢纤维混凝土的有效性;文献[10]试验研究了静荷载作用下钢纤维混凝土梁的弯曲韧性和板的能量吸收性质,研究结果显示:与钢筋网喷射混凝土衬砌相比,采用喷射钢纤维混凝土衬砌,其厚度可大大减小;文献[11-13]试验研究了钢纤维、碳纤维和玻璃纤维对混凝土试件、混凝土剪力墙与梁抗剪强度和变形性能的影响;文献[14-15]试验研究了玻璃纤维、碳纤维、及混杂纤维对桥梁车道板的增强作用.在上述研究的这些混凝土增强纤维中,钢纤维增强混凝土技术尽管应用得比较成熟,但钢纤维搅拌时易结团,分散均匀性差,不易施工,且钢纤维对于硫离子或氯离子等引起的锈蚀问题随之而来,严重影响混凝土的寿命;碳纤维也是较理想的混凝土增强增韧材料,但因价格昂贵和操作困难而在实际工程中受到一定限制;而玻璃纤维混凝土暴露于大气中一段时间后,其强度和韧性会有大幅度下降,加之玻璃纤维耐碱性不好,目前应用较少.聚丙烯纤维作为一种新型的高分子建筑材料,具有化学稳定性好、密度小、不吸水、价格低等优点.本次研究采用的最新引进日产棒状X型聚丙烯纤维(图1),除具有普通丝状或网状聚丙烯纤维特点外,它抗拉强度高,外形和截面独特,与混凝土之间咬合力好;在混凝土中易分散均匀,避免钢纤维在混凝土施工中易结团现象;且耐热和耐碱性好,具有永久不生锈的特性(图2).本文针对最新引进的这种新型纤维,对不同基体强度、不同纤维掺量的混凝土抗剪性能进行试验研究,并与钢纤维混凝土进行试验对比,同时探讨了不同掺量纤维混凝土抗剪强度拟合计算公式.

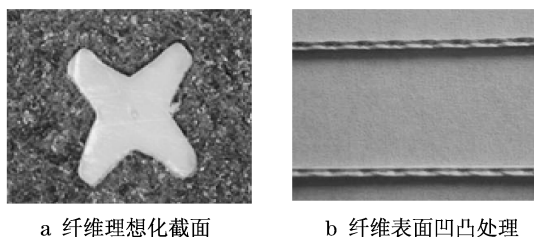
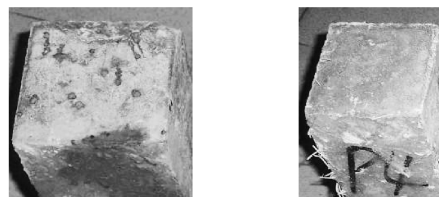


图1 棒状聚丙烯纤维示意图

Fig.1 Sketch of rod-like polypropylene fiber



a 钢纤维 b 棒状聚丙烯纤维

图2 钢纤维混凝土与棒状聚丙烯纤维混凝土锈蚀比较

Fig.2 Comparison of rusting of steel fiber concrete and rod-like polypropylene fiber concrete

1 混凝土抗剪强度试验

1.1 试验材料与配合比

试验配制的混凝土强度等级为C30和C50两种系列,分别采用安徽宁国海螺水泥厂生产的海螺牌42.5R普通硅酸盐水泥和52.5R硅酸盐水泥;粗集料采用5~20mm碎石,连续级配,产地浙江温岭;细集料采用河砂,产地福建闽江.聚丙烯纤维为日本生产的棒状X型聚丙烯纤维,截面面积为 0.363 mm^2 ,纤维长度40mm,抗拉强度经试验平均达到525MPa,拉伸弹性模量为4142MPa,其他各项性能指标参见文献[16].钢纤维为上海青浦某厂家生产,截面为波浪型,长度30mm,等效直径0.8mm,长径比38,抗拉强度685MPa,其他性能达到或超过标准YB/T 151—1999的规定.经过计算和试配,最后得到C30系列混凝土配合比($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)为:水泥:砂:石:水=380:680:1149:179,棒状X型聚丙烯纤维和钢纤维掺量分别为混凝土体积的0.1%,0.3%,0.5%,1%;C50系列混凝土配合比($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)为:水泥:砂:石:水=451:601:1178:183,同样,棒状X型聚丙烯纤维和钢纤维掺量分别为混凝土体积的0.1%,0.3%,0.5%,1%,同时通过掺加SN-II型高效减水剂将混凝土的坍落度控制在50~70mm.

1.2 试验方法

纤维混凝土抗剪强度试验主要参照GB/T50081—2002以及CECS13—89进行,具体要求和步骤如下:

(1) 试件要求

采用 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 棱柱体试件,每组4个试件.试件制作及养护符合相关标准规定.

(2) 试验设备

试验主要设备包括带有球形铰支座的压力试验机和符合 CECS13—89 规范要求的抗剪夹具。

(3) 试验步骤

①试件经标准养护取出,测定试件尺寸和检查外观,并尽快进行试验以保持原有的干湿状态;

②将抗剪夹具套在试件两个相对的非成型面上,夹具应与试件靠紧,将夹具套摆成水平位置并用固紧螺丝固定,如图 3 所示;



图 3 混凝土抗剪强度试验照片

Fig.3 Photos for shear strength test of concrete

③加荷前,夹具上下支座必须对中,开动试验机,当上压板与试件接近时,调整球形铰支座,使接触均衡;在试验进行过程中如发生偏斜现象,应立即停止试验重新对中;

④加荷应连续匀速进行,加荷速度控制在 $0.06 \sim 0.10 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$,直至试件剪断为止;试件剪断后,应立即卸荷以防损坏夹具,记录最大破坏荷载。

⑤检查破坏面,若破坏面不在预定位置,则试验结果无效。

1.3 试验结果计算

混凝土试件的抗剪强度按下式计算:

$$f = F/2bh$$

式中: f 为混凝土抗剪强度,MPa; F 为混凝土剪切破坏荷载,N; b 为试件平均宽度,mm; h 为试件平均高度,mm。

以 4 个试件测值的算术平均值作为该组试件的抗剪强度值。4 个测值中的最大值或最小值中如有一个与中间值的差值超过中间值的 15%,则把最大及最小值一并舍除,取两中间值的平均值作为该组试件的抗剪强度,如两个测值与平均值相差超过 15%,则该试验结果无效。

4 个试验结果中如一个不在预定破坏面,则取其他 3 个的算术平均值作为抗剪强度值,4 个试验中如有两个不在预定破坏面,则该试验结果无效。

2 试验结果及分析

2.1 纤维种类对纤维混凝土抗剪强度影响

根据试验数据,整理得到 C30 和 C50 系列棒状聚丙烯纤维混凝土和钢纤维混凝土抗剪强度试验结果如表 1~表 2 所示。

由表 1~表 2 分析可知:纤维掺量在 0.1%~1.0%,除个别掺量试件外,棒状聚丙烯纤维混凝土抗剪强度比基准混凝土增大 8.6%~20.5%不等,钢纤维混凝土抗剪强度比基准混凝土增大 0.2%~42.6%不等,且同掺量钢纤维对混凝土抗剪强度的提高比棒状聚丙烯纤维要大。

分析表明:在混凝土中掺加棒状聚丙烯纤维和钢纤维,由于乱向分布纤维的抗拉和牵扯作用,纤维混凝土的抗剪强度将有所提高;另一方面,由于钢纤维比棒状聚丙烯纤维的弹性模量和抗拉强度大,故钢纤维对混凝土抗剪强度的提高比棒状聚丙烯纤维要大。

表 1 C30 系列纤维混凝土抗剪强度与纤维掺量关系

Tab.1 Relationship between shear strength and fiber content of different fiber concrete of serial C30

试件编号	纤维体积掺量/%	抗剪强度/MPa	抗剪强度相对值/%
C30 基准	0	4.74	100.0
P1(S1)	0.1	5.19(5.18)	109.5(109.3)
P2(S2)	0.3	5.55(5.72)	117.1(120.7)
P3(S3)	0.5	5.71(5.86)	120.5(123.6)
P4(S4)	1.0	5.15(6.76)	108.6(142.6)

注:表中 P1~P4 为棒状聚丙烯纤维混凝土试件;S1~S4 为钢纤维混凝土试件(下表同)。

表 2 C50 系列纤维混凝土抗剪强度与纤维掺量关系

Tab.2 Relationship between shear strength and fiber content of different fiber concrete of serial C50

试件编号	纤维体积掺量/%	抗剪强度/MPa	抗剪强度相对值/%
C50 基准	0	6.35	100.0
5P1(5S1)	0.1	5.95(6.36)	93.7(100.2)
5P2(5S2)	0.3	6.21(6.58)	97.8(103.6)
5P3(5S3)	0.5	7.29(7.18)	114.8(113.1)
5P4(5S4)	1.0	7.53(8.74)	118.6(137.6)

注:表中 5P1~5P4 为棒状聚丙烯纤维混凝土试件,5S1~5S4 为钢纤维混凝土试件(下表同)。

2.2 基体强度对纤维混凝土抗剪强度影响

由表 1~表 2 分析可知:纤维掺量在 0.1%~1.0%,C30 系列棒状聚丙烯纤维混凝土抗剪强度比

基准混凝土提高 8.6%~20.5%,同掺量 C50 系列棒状聚丙烯纤维混凝土抗剪强度变化范围在 -6.3%~18.6%;而 C30 系列钢纤维混凝土抗剪强度比基准混凝土提高 9.3%~42.6%,同掺量 C50 系列钢纤维混凝土抗剪强度比基准混凝土提高 0.2%~37.6%.分析可知,纤维对 C30 混凝土抗剪强度的改善一般比高强 C50 混凝土要好.

2.3 纤维掺量对纤维混凝土抗剪强度影响

图 4 是根据试验数据整理得到的纤维掺量与混

凝土抗剪强度关系图.

由图 4 分析可知:棒状聚丙烯纤维混凝土抗剪强度基本随着纤维掺量增加呈现先增大后下降或减弱的趋势,而钢纤维混凝土抗剪强度则随着纤维掺量增加而增大.分析原因在于:随着纤维掺量的增大,棒状聚丙烯纤维混凝土在试验中易产生泌水现象,引起混凝土抗剪强度的下降,而钢纤维混凝土基本没有泌水现象发生.

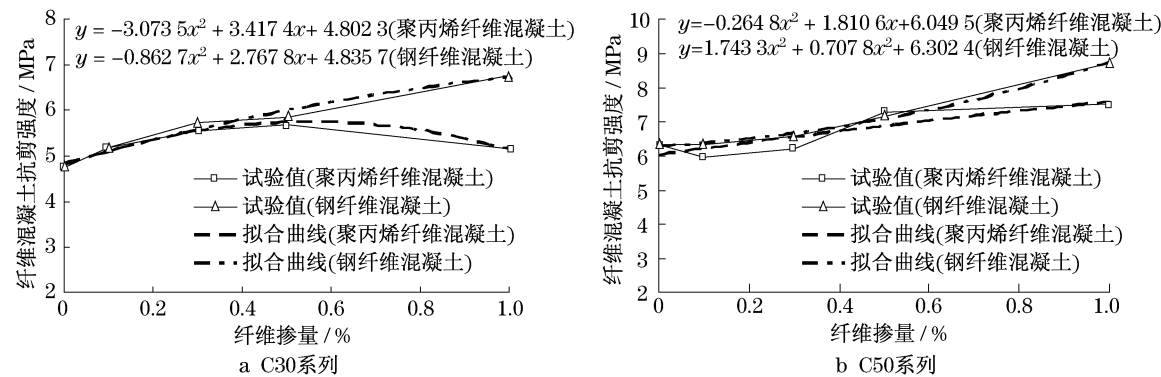


图 4 纤维混凝土抗剪强度随纤维掺量变化关系图

Fig.4 Relationship of fiber content and shear strength of fiber concrete

另一方面,当纤维掺量在 0.5%以内时,棒状聚丙烯纤维混凝土抗剪强度增大幅度与同掺量钢纤维混凝土抗剪强度增大幅度接近;当纤维体积掺量大于0.5%时,棒状聚丙烯纤维混凝土抗剪强度增大幅度明显低于同掺量钢纤维混凝土抗剪强度增大幅度.原因是:当纤维掺量不大时,尽管棒状聚丙烯纤维的弹性模量和抗拉强度比钢纤维小,但由于棒状聚丙烯纤维密度小,每立方混凝土投入纤维的数量(根数)比同掺量钢纤维多,相应纤维混凝土试件截面中棒状聚丙烯纤维数量比钢纤维多,因此,棒状聚丙烯纤维对混凝土抗剪强度的改善也得到提高.

2.4 纤维混凝土抗剪强度拟合计算公式

表 3 是根据试验数据拟合得到的不同强度纤维混凝土在不同纤维掺量下的抗剪强度拟合计算公式.从拟合公式的拟合优度系数分析,除 C50 系列中棒状聚丙烯纤维混凝土拟合公式外,其余各公式拟合优度系数 R^2 值均接近 1,说明拟合效果较好.表 4 为试验值与拟合公式计算值的比较,由表 4 分析可知,试验值与计算值比较吻合,最大误差为 5.8%,最小仅为 0.1%.分析可知,拟合公式应用于同类纤维混凝土,将具有一定的参考价值.

表 3 纤维混凝土抗剪强度随纤维掺量变化的拟合公式

Tab.3 Fitting formulas for shear strength of fiber concrete

混凝土强度等级	混凝土类型	拟合公式	拟合优度系数 R^2
C30	棒状聚丙烯纤维混凝土	$y = -3.0735x^2 + 3.4174x + 4.8023$	0.9813
	钢纤维混凝土	$y = -0.8627x^2 + 2.7678x + 4.8357$	0.9774
C50	棒状聚丙烯纤维混凝土	$y = -0.2648x^2 + 1.8106x + 6.0495$	0.7640
	钢纤维混凝土	$y = 1.7433x^2 + 0.7078x + 6.3024$	0.9952

注:表中 y 表示混凝土抗剪强度,MPa; x 表示纤维体积掺量,%,各式使用条件为 $0 \leq x \leq 1.0$.

3 结论

根据试验研究结果,可得到以下几点结论:

(1) 在混凝土中掺加棒状聚丙烯纤维和钢纤维,混凝土抗剪强度随纤维掺量有不同程度的增大.总的来看,棒状聚丙烯纤维对混凝土抗剪强度的提高比同掺量钢纤维要小,但它可避免钢纤维施工易

表 4 纤维混凝土抗剪强度试验值与拟合
公式计算值比较

Tab.4 Comparison on test results and calculation results
from formulas of shear strength of fiber concrete

试件编号	抗剪强度/MPa		误差/%
	试验值	计算值	
C30 基准	4.74	4.80(4.84)	1.2(1.9)
P1(S1)	5.19(5.18)	5.11(5.10)	1.5(1.4)
P2(S2)	5.55(5.72)	5.55(5.59)	0.1(2.4)
P3(S3)	5.71(5.86)	5.74(6.00)	0.6(2.5)
P4(S4)	5.15(6.76)	5.15(6.74)	0.1(0.4)
C50 基准	6.35	6.05(6.30)	4.7(0.7)
5P1(5S1)	5.95(6.36)	6.23(6.39)	4.7(0.5)
5P2(5S2)	6.21(6.58)	6.57(6.67)	5.8(1.4)
5P3(5S3)	7.29(7.18)	6.89(7.09)	5.5(1.2)
5P4(5S4)	7.53(8.74)	7.60(8.75)	0.9(0.2)

结团、易锈蚀等不足,应用于地下隧道喷混凝土衬砌具有一定优势;此外,两种纤维对 C30 混凝土抗剪强度的提高幅度要大于高强 C50 混凝土.

(2) 棒状聚丙烯纤维混凝土抗剪强度随着纤维掺量增加表现为先增大后下降或增势减弱的趋势,钢纤维混凝土抗剪强度则随着纤维掺量增加而增大.当纤维掺量在 0.5%以内时,棒状聚丙烯纤维混凝土抗剪强度增大幅度与同掺量钢纤维混凝土抗剪强度增大幅度比较接近,掺量大于 0.5%时,棒状聚丙烯纤维对混凝土抗剪强度的改善效果会降低,且明显低于钢纤维.可见,在混凝土中掺加棒状聚丙烯纤维,其掺量宜控制在一定范围之内(0.3%~0.5%),一方面,抗剪性能改善的效果会更明显,另一方面,造价比钢纤维也更显优势.

(3) 根据试验拟合得到的不同纤维掺量混凝土抗剪强度拟合计算公式,其计算值与试验值比较吻合,这些拟合公式应用于同类纤维混凝土工程具有一定参考价值.

参考文献:

[1] 小林一辅.纤维补强混凝土[M].邹崇富译.北京:中国铁道出版社,1985.
Kobayashi K. Fiber reinforced concrete [M]. Translated by ZHOU Chongfu. Beijing:China Railway Press,1985.

[2] 高丹盈,刘建秀.钢纤维混凝土基本理论[M].北京:科学技术文献出版社.1994.
GAO Danying, LIU Jianxiu. The basic theory of steel fiber

reinforced concrete [M]. Beijing: Scientific and Technological Documentary Press,1994.

[3] Paterson J, Mitchell D. Seismic retrofit of shear walls with headed bars and carbon fiber wrap [J]. Journal of Structural Engineering,2003,129(5):606.

[4] Dias S J E,Barros J A O. Shear strengthening of T cross section reinforced concrete beams by near-surface mounted technique [J]. Journal of Composites for Construction,2008,12(3):300.

[5] Lee H H. Shear strength and behavior of steel fiber reinforced concrete columns under seismic loading [J]. Engineering Structures,2007,29(7):1253.

[6] El-Gamal S, El-Salakawy E, Benmokrane B. Influence of reinforcement on the behavior of concrete bridge deck slabs reinforced with FRP bars [J]. Journal of Composites for Construction,2007,11(5):449.

[7] Prachasaree W, Gangarao H V S, Shekar V. Performance evaluation of FRP bridge deck under shear loads [J]. Journal of Composite Materials,2009,43(4):377.

[8] Working Group No.6 (“Sprayed Concrete”) of the Association Francaise de Travaux en Souterrain. AFTES recommendations on fibre-reinforced sprayed concrete technology and practice [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1996, 11 (2):205.

[9] Ding Y N, Kusterle W. Comparative study of steel fibre-reinforced concrete and steel mesh-reinforced concrete at early ages in panel tests [J]. Cement and Concrete Research,1999,29 (11):1827.

[10] Gopalakrishnan S,Balasubramanian K, Krishnamoorthy T S, et al. Performance evaluation of steel fiber reinforced shotcrete [J]. Indian Concrete Journal,1998,72(4):181.

[11] Mirsayah A A, Bantia N. Shear strength of steel fiber-reinforced concrete [J]. ACI Materials Journal, 2002, 99 (5):473.

[12] Riyazi M, Esfahani M R. Behavior of coupling beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer sheets [J]. International Journal of Engineering, Transactions B: Applications,2007,20(1):49.

[13] Liu K, Wu Y F, Jiang X L. Shear strength of concrete filled glass fiber reinforced gypsum walls [J]. Materials and Structures/ Materiaux et Constructions,2008,41(4):649.

[14] Park C W, Sim J S, Lee T S. Punching shear strength considering cumulative damage for FRP strengthened bridge decks under fatigue loading [J]. Key Engineering Materials, 2006,324-325:1313.

[15] Bradberry T E. Concrete bridge decks reinforced with fiber-reinforced polymer bars [J]. Transportation Research Record, 2001(1770):94.

[16] 丁春林,张国防,张骅,等. X 型聚丙烯纤维力学性能试验研究 [J].合成材料老化与应用,2008,37(2):24.
DING Chunlin, ZHANG Guofang, ZHANG Hua, et al. Experimental study on mechanical property of X-typical polypropylene fiber [J]. Synthetic Materials Aging and Application,2008,37(2):24.