

超高索塔锚固区泵送钢纤维混凝土的制备

蒋金洋, 孙伟, 张云升, 秦鸿根, 王晶

(东南大学材料科学与工程学院, 南京 210096, jinyangjiang@163.com)

摘要: 为了提高索塔锚固区混凝土结构的抗裂性能和力学行为, 经过优化混凝土基体组成和纤维外形与尺度, 制备了索塔锚固区专用的钢纤维混凝土材料. 该钢纤维混凝土不仅能够一级泵送到高达 300 m 索塔上, 而且该钢纤维混凝土能大幅度降低后期的干燥收缩, 提高混凝土基体的抗拉强度和韧性. 通过弯曲梁的抗裂性试验和索塔锚固区的足尺模型试验发现: 由于钢纤维的加入, 使混凝土梁的抗裂度提高了近 40%; 用该钢纤维混凝土浇筑的拉索锚固区, 在受荷时其开裂裂缝的宽度、长度和贯穿裂缝的数目均比用对比混凝土浇筑的相应部位小得多. 因此, 优选出的钢纤维混凝土不仅能够满足索塔锚固区的要求, 而且能够应用到其他受力复杂的区域.

关键词: 钢纤维混凝土; 收缩; 抗裂度; 抗拉强度; 韧性

中图分类号: TP528.0

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)02-0307-06

Preparation of super-high pumping SFRC in anchorage zone between steel anchorage box and cable

JIANG Jin-yang, SUN Wei, ZHANG Yun-sheng, QIN Hong-gen, WANG Jing

(School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China, jinyangjiang@163.com)

Abstract: To ensure successful pumping and excellent crack resistance, special SFRC was prepared through optimizing the matrix, the shape and size of fibers. The pumpability, shrinkage, cracking, direct tensile strength and toughness were considered. According to the vertically pumping results, the prepared SFRC can be continuously pumped up to a concrete tower with the height over 300 m. Test results demonstrate that steel fiber can diminish the dry shrinkage of concrete in later period, and can improve the mechanical behaviors of concrete matrix. Results of cracking test indicate that the crack resistance is increased by 40% approximately due to the addition of steel fiber to concrete beam. It is also found that in the full-scale model test of main tower, the maximum crack width, cracking length and run-through crack number of anchorage zone poured by SFRC are all less than those of anchorage zone poured by contrast concrete. Therefore, the prepared SFRC is suitable for anchorage zone of the concrete tower and can be used in other zones suffering complex forces.

Key words: steel fiber reinforced concrete (SFRC); shrinkage; crack resistance; tensile strength; toughness

某千米级跨径的斜拉桥, 其索塔采用倒 Y 形, 总高 306 m, 其中上塔柱高 91.36 m. 索塔锚固区采用钢锚箱, 其与混凝土共同工作. 因此, 对索塔锚固区混凝土的物理力学性能、抗裂性能、耐疲劳

性能和耐久性能均提出了很高的要求. 尽管在混凝土中掺入适量的钢纤维可以满足上述性能^[1-3], 但是普通钢纤维混凝土因纤维掺入, 提高了混凝土自身阻力导致流动性和可泵性均变差, 成为了钢纤维混凝土在现代混凝土施工中的一大弊端, 其一次泵送高度达到 200 m 国内外尚无先例. 为解决这一工程难题, 本文首先对钢纤维的尺度和形貌进行优选与优化, 一方面使其长度变短

收稿日期: 2008-04-29.

基金项目: 国家高技术研究发展计划重点资助项目 (2008AA030704).

作者简介: 蒋金洋(1974—), 男, 博士, 讲师;

孙伟(1935—), 女, 教授, 中国工程院院士.

和直径变细(保证适宜的长径比),另一方面两端哑铃和中间刻痕,从而不仅能够保证其在混凝土中的均匀分散,满足高程达300m以上的泵送施工要求,而且提高混凝土基体的力学行为.然后,对泵送性能优异的钢纤维混凝土进行了收缩、开裂、抗拉强度、弯曲韧性的研究.最后,对其抗裂的机理作了分析.

1 原材料与配合比设计

1.1 原材料

水泥:南通华新水泥P·O42.5;粉煤灰:镇江谏壁电厂苏源I级粉煤灰;粗集料:镇江茅迪石场玄武岩,粒径5~16mm;细集料:江西赣江中砂,其细度模数为2.7;外加剂:江苏博特新材料公司聚羧酸类高效减水剂JM-PCA,掺量1.2%;特制

异型钢纤维:压痕型,长度 $l_f = 20$ mm,直径 $d_f = 0.35$,长径比 $l_f/d_f = 57.1$.

1.2 配合比设计

在确保水胶比不变的情况下,调整胶砂比和纤维及外加剂的掺量.根据钢纤维临界体积率的计算公式^[4]和极限抗拉强度,确定钢纤维体积率分别为0.6%和0.8%.为了对比短纤维的性能,试验过程中增加了混杂纤维(0.6%的短钢纤维与0.1%的PPF)以及0.6%的长钢纤维(长度为25mm,直径为0.35mm).根据混凝土出机口坍落度 ≥ 200 mm,扩展度 ≥ 450 mm,出机1h后的坍落度 ≥ 180 mm,扩展度 ≥ 400 mm,以及相对压力泌水率 $\leq 40\%$ 的泵送施工要求,优选的配合比如表1所示.

表1 混凝土配合比

$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

编号	水泥	粉煤灰	砂子	石子	水	纤维	JM-PCA
SBH	384	96	744	1070	160	0	3.816
SBSF1	384	96	778	990	161	短钢纤维46.8	4.22
SBSF1	384	96	778	990	161	长钢纤维46.8	4.22
SBSF2	388.8	97.2	806	946	163	短钢纤维62.4	4.37
SBHSP	391.2	97.8	778	990	164	短钢纤维46.8+PPF0.9	4.4

注:SF为钢纤维,PPF为聚丙烯纤维.

2 泵送性能

通过对比基准混凝土和纤维体积率为0.8%的钢纤维混凝土的泵送指标,来确定纤维混凝土的泵送性能.

2.1 纤维混凝土拌合物性能

室内试验的目的在于调整混凝土配合比、和易性,测试坍落度、扩展度、坍落度损失、泌水率、含气量、凝结时间等.试验结果如表2所示.

表2 混凝土和纤维混凝土拌合物性能

试验编号	坍落度/扩展度/mm			含气量/%	凝结时间/min		压力泌水/%
	初始	1h	2h		初凝	终凝	
SBH	215/550	205/450	200/430	2.3	18h36	19h46	31
SBSF2	203/530	197/425	190/400	3.3	19h26	20h13	36

通过表2坍落度、扩展度和压力泌水的比较可以看出:基准混凝土和纤维体积率为0.8%的钢纤维混凝土均符合泵送施工要求,为钢纤维混凝土配合比的优选提供了依据.

2.2 现场216m高塔泵送工艺试验

在施工现场,泵送了体积掺量为0.8%的钢纤维混凝土.管道布置如下:水平管为69m,垂直管为216.9m,半径分别为1000、500mm的90°弯管各4个,锥管和分配阀各一个.环境温度为18℃,湿度为65%,混凝土温度20℃.具体的试验结果如表3所示.

根据216m的试验结果,可以预测泵送到

306m高度时的泵送压力.泵压主要克服来自纤维混凝土的自重($P_{静}$),局部压力损失($P_{局}$)和沿程阻力损失($P_{沿程}$)3部分.试验准备配用,半径分别为1000、500mm的90°弯管各4个,锥管和分配阀各一个.因为弯管和锥管的压力损失分别为0.1MPa,分配阀压力损失为0.2MPa,所以其局部压力损失 $P_{局} = 1.1$ MPa.

根据216m泵送试验数据,计算试验钢纤维混凝土的沿程压力损失 $\Delta P_l/m$.而纤维混凝土自重压力损失 $P_{静} = \rho g H = 5.19$ MPa,纤维混凝土在管道内的沿程压力损失 $P_{沿程} = P_{出口} - P_{局} - P_{静} = 6.51$ MPa,则单位长度的沿程压力损失为: ΔP_l

$$= 6.51 / (69 + 216) = 0.023 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1}.$$

因此,泵送 306 m 所需要压力为

$$P = 0.023 \times (69 + 306) + 2450 \times 9.8 \times 306 \times 10^{-6} + 1.1 = 17.1 \text{ MPa}.$$

表3 钢纤维混凝土泵送试验主要指标

时间/h	出机坍落度/mm	出机扩展度/mm	泵管出口(216 m)坍落度/mm	泵管出口(216 m)扩展度/mm	主系统油压/MPa	出口压力/MPa
0	255	635	230	550	20	12.8
0.5	200	460	185	406	22	14.1

2.3 现场 306 m 高塔泵送

在施工现场,泵送了体积掺量为 0.8% 的钢纤维混凝土,测试了三一泵 HBT90C 泵送压力和

306 m 高度处混凝土的坍落度及扩展度,结果如表 4 所示.泵送至标高 306 m 的平台时混凝土的和易性、黏聚性及保水性均良好.

表4 钢纤维混凝土泵送试验主要指标

时间/h	出机坍落度/mm	出机扩展度/mm	泵管出口(306 m)坍落度/mm	泵管出口(306 m)扩展度/mm	主系统油压/MPa	出口压力/MPa
0~0.5	208	560	200	450	26	16.6

根据表 4 的试验结果,结合普通混凝土的泵送经验,可以得到:1) 体积掺量为 0.8% 的钢纤维混凝土泵送性能参数与普通混凝土差不多.2) 只要确保新拌钢纤维混凝土的工作性能和相对压力泌水率,就能保证 306 m 高塔可泵性.在 306 m 高空泵送试验过程中,混凝土泵的最高压力为 26 MPa.而三一托泵(HBT90CH)的液压系统工作压力可达 35 MPa,因而还有足够的压力空间来提高钢纤维混凝土的泵送高度.3) 推算结果与试验结果非常接近.根据预测,泵送 306 m 高度所需要的压力为 17.1 MPa,而实际泵送的出口压力为 16.6 MPa,二者相差不大.因此,216 m 和 306 m 的高空泵送试验结果及其管道的计算方法可以指导类似的钢纤维混凝土泵送工程.

3 纤维混凝土对混凝土基体干燥收缩性能的影响

3.1 开裂环试验(有约束)

圆环法所用的装置是由一个钢制圆环和用薄铁板弯成的外环模组成,其中内环直径为 250 mm,外环直径为 300 mm,高 150 mm.因为收缩试验的模具内外环之间的间距只有 50 mm,需要在装模之前将粗骨料滤掉,只留下混凝土浆体和纤维作为测试的对象.图 1 为基准混凝土和钢纤维混凝土对应的砂浆在 50 d 内干燥收缩试验结果.由此可知:1) 基准混凝土干燥 9 d 后就出现裂缝,50 d 的最大裂缝宽度可以达到 0.68 mm;2) 尽管加入聚丙烯纤维之后,裂缝的开裂时间推迟,干燥 15 d 才出现裂缝,但是开裂 28 d 后最大裂缝宽度达到 0.4 mm,抑制干燥收缩效果不显著;3) 掺加体积率为 0.6% 的钢纤维混凝土

(SBSF1 和 SBSF I)干燥 23 d 出现了不同程度的开裂,但是出现裂缝后 28 d 最大宽度 < 0.1 mm,而纤维体积率为 0.8% 的钢纤维混凝土(SBSF2),在干燥 50 d 的干燥期间内未出现裂缝,这说明钢纤维体积率越高,抑制混凝土的干燥收缩能力就越显著.

3.2 棱柱体(无约束干燥收缩)

按照 GBJ82 - 85,干燥收缩试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 515 mm.混凝土自由干燥 180 d 的试验结果如图 2 所示.从图 2 中可以得出:1) 高性能混凝土干燥收缩值均高于钢纤维混凝土;2) 当钢纤维的体积掺量超过 0.8%,高性能钢纤维混凝土自由干燥 90 d 的收缩值同基准混凝土相比下降了近 50%,并且随着钢纤维掺量的增加,能明显降低干燥收缩值.

3.3 机理分析

本文制备的特种钢纤维混凝土,其各项性能形成的关键因素主要归因于纤维尺度与外形的改变提高了其阻裂能力.钢纤维的加入大大提高了混凝土抵抗干燥收缩的能力.Jun Zhang 等^[5]认为当混凝土发生收缩时,混凝土基体与纤维之间产生剪切力,该剪切力影响着混凝土基体的变形,从而使得纤维混凝土的干燥收缩值低于素混凝土的.并且,纤维混凝土的收缩值取决于纤维与混凝土基体的弹性模量比值、纤维的长径比以及纤维的掺量.在混凝土硬化的早期,因钢纤维与基体的弹性模量相对比值高,所以钢纤维抑制混凝土干燥收缩能力就特别强;同时,因为聚丙烯纤维与混凝土基体的弹性模量相对比值小,所以该纤维抑制混凝土干燥收缩的能力差.

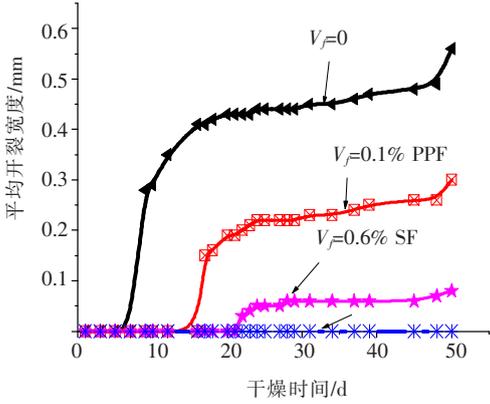


图1 纤维类型和掺量对基准砂浆开裂宽度影响

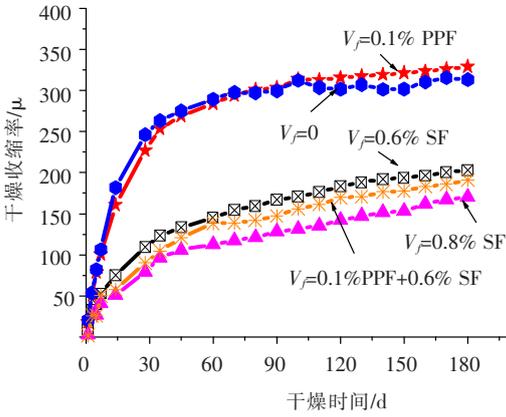


图2 纤维类型和掺量对混凝土干燥收缩率影响

4 钢纤维对混凝土构件及混凝土结构裂缝宽度的限制

4.1 混凝土构件的抗裂度试验

为了验证钢纤维混凝土是否对配筋构件的初

裂载荷、极限载荷和裂缝宽度有显著影响,进行了混凝土梁的抗裂度试验. 试验选用了6根尺寸为150 mm × 200 mm × 1 580 mm,受拉区配筋率为0.8%的配筋梁,其中基准混凝土和体积率为0.8%的钢纤维混凝土梁各3根. 通过四点加载法施加抗弯载荷,逐级加到构件破坏. 图3和图4分别为各级载荷作用下基准混凝土配筋梁和配筋钢纤维混凝土梁的裂缝发展过程. 图5和图6分别为两种梁的最终破坏形态. 图7对比了两种梁随着载荷作用下最大裂缝的发展过程.

根据图3~图7的试验结果可得到:1) 钢纤维混凝土提高了混凝土构件的抗裂度. 基准混凝土梁的初裂强度为30 kN,当加入体积率为0.8%的钢纤维时,其初裂强度达到了42 kN. 也就是说,当掺加钢纤维后,使混凝土梁的抗裂度提高了近40%. 2) 钢纤维混凝土能够减小裂缝间距和控制裂缝扩展. 钢纤维混凝土能够抑制和分散裂缝,形成更多细小的微细裂缝,呈现多缝开裂的形态. 最重要的一点它能有效控制裂缝宽度. 随着荷载的增大,基准混凝土梁的最大裂缝宽度迅速增大,而相应的钢纤维混凝土梁的最大裂缝宽度增加十分缓慢. 3) 同基准混凝土梁相比,钢纤维混凝土梁的极限载荷提高了20%. 并且使混凝土梁受压区的破坏形态由压碎破坏转向塑性破坏.

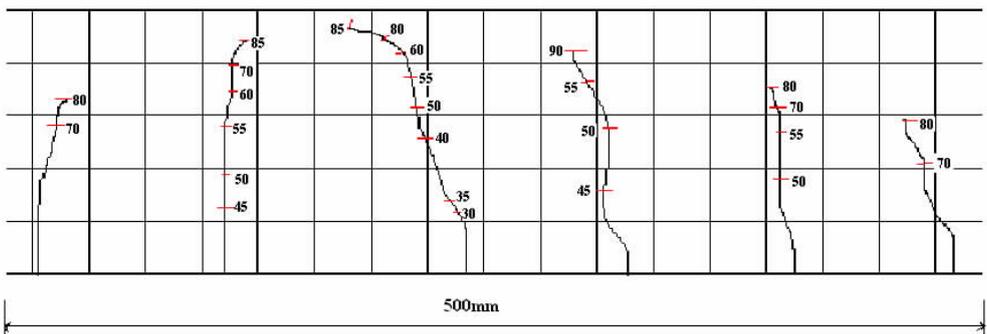


图3 在分级载荷作用下基准混凝土配筋梁的裂缝传播过程

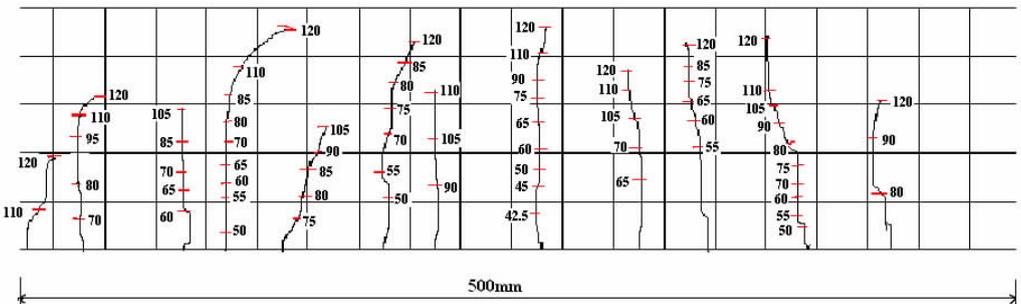


图4 在分级载荷作用下钢纤维混凝土配筋梁的裂缝传播过程

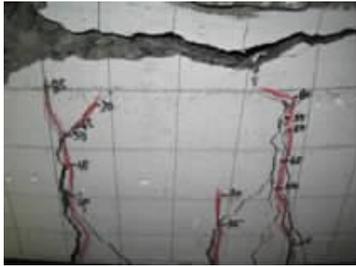


图5 基准混凝土梁的破坏形态



图6 配筋纤维混凝土梁的破坏形态

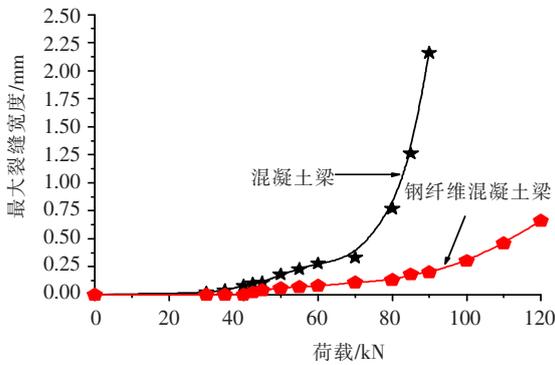


图7 载荷作用下基准混凝土梁和钢纤维混凝土梁最大裂缝宽度的对比

4.2 索塔锚固区足尺模型试验

为了反映钢纤维混凝土抵抗结构裂缝的能力,进行了索塔锚固区足尺模型试验. 1/2 用高性能混凝土(基准混凝土), 1/2 用本文优选的体积掺量为 0.8% 的钢纤维混凝土, 如图 8 所示. 图 8 也表明了索塔各个截面的受力状态: 1-1 截面是小偏心受拉构件, 2-2 截面是纯弯构件, 3-3、4-4 截面是大偏心受拉构件.

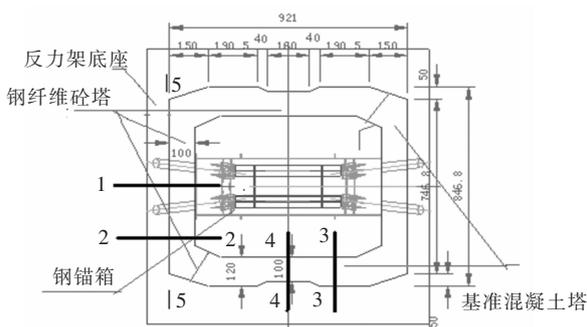


图8 足尺模型的试验设计(单位是 cm)

试验利用反力架,通过千斤井加载,单根索正

常承受的载荷 (P) 为 750 t, 加载试验从 0 逐级加载到 $1.7 P$. 图 9 描述了分级荷载作用下用钢纤维混凝土浇筑的拉索锚固区处裂缝的最大宽度. 图 10 展示了用基准混凝土浇筑的装饰槽塔壁内侧面裂缝的开裂过程.

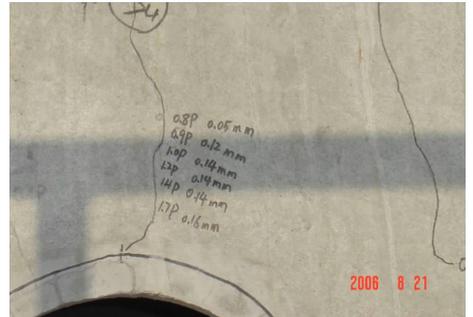


图9 分级荷载作用下索孔(SFRC)裂缝的最大宽度

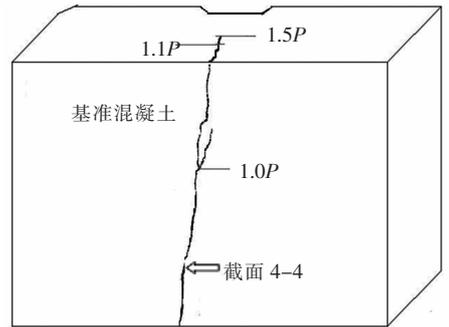


图10 顺桥方向混凝土塔内侧面裂缝的开裂过程

从图 9 和图 10 的试验结果可以得到: 1) 钢纤维混凝土能够提高索塔锚固区的初裂载荷. 因为拉索承受的水平载荷较大, 所以周围的混凝土容易开裂. 当施加给拉索的载荷达到 $0.6 P$ 时, 拉索周围的基准混凝土开始开裂, 而相应部位的钢纤维混凝土直到 $0.8 P$ 时, 才出现裂缝. 这就意味着钢纤维混凝土的应用使拉索锚固区的抗裂度提高了 33%. 2) 钢纤维混凝土具有较高的抵抗结构裂缝形成和推迟其出现的能力. 这一结论可以从顺桥方向的塔壁的对比试验上得出. 因为此塔壁带有装饰槽, 此处的受力状态属于大偏心受拉, 所以装饰槽塔壁的内侧面容易开裂. 设计者对施加正常使用情况下的载荷(每根索力为 $1.0 P$) 的索塔锚固区进行了有限元分析^[6], 从中得出: 横桥方向索塔前壁外侧混凝土产生了约 4.67 ~ 5.33 MPa 的拉应力, 而顺桥方向索塔侧壁内侧混凝土产生了约 3.56 ~ 4.00 MPa 的拉应力. 又因为所配制的基准混凝土和钢纤维混凝土 28 d 的抗拉强度分别为 3.83、4.92 MPa, 所以当拉索的载荷达到 $1.0 P$ 时, 截面 4-4 处的基准混凝土开始开裂, 再加一级载荷到 $1.1 P$ 时, 裂缝开始扩展并逐渐上下贯穿; 而相应处的钢纤维混凝土直至拉

索载荷到 $1.7P$ 时,仍未出现可见裂缝,这说明钢纤维混凝土具有优异的抵抗结构裂缝的能力. 3) 钢纤维混凝土能够有效控制拉索锚固区处的最大裂缝宽度. 在正常使用载荷作用下,用钢纤维混凝土浇筑的拉索锚固区,其最大裂缝宽度为 0.14 mm ;当载荷达到 $1.7P$ 时的正常使用载荷时,其最大裂缝宽度仅为 0.16 mm ,仍然满足耐久性要求. 因此,钢纤维混凝土抑制索塔锚固区最大裂缝宽度的能力特别显著.

5 力学行为分析

5.1 轴心抗拉强度

拉伸实验所用的模具为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 500\text{ mm}$,两端的夹具为直径 200 mm 螺纹钢,在其埋在试件内的 125 mm 钢筋中,靠近端部 50 mm 处均匀的焊有四根等距的细钢筋,可以很好的减轻拉伸过程中的应力集中,防止混凝土试件提早破坏^[7]. 图 11 是基准混凝土和纤维体积率为 0.8% 钢纤维混凝土 7, 28, 90 d 轴心抗拉强度的比较.

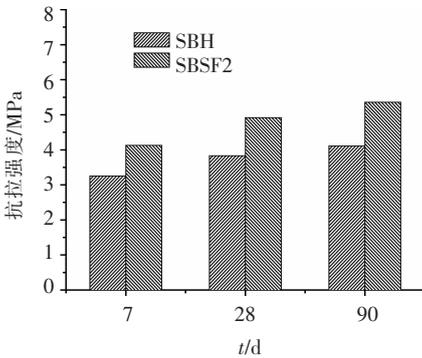


图 11 纤维对混凝土轴心抗拉强度影响

从试验结果可以看出:混凝土试件在拉伸过程中表现出明显的弹性变形,应力—应变曲线接近线性关系,拉伸过程中发生脆性断裂,而钢纤维混凝土在拉伸过程中表现出塑性变形,发生塑性断裂;加入体积率为 0.8% 的钢纤维之后,钢纤维混凝土的抗拉强度同基准混凝土相比明显增大,提高的幅度近 30% ,这有助于提高混凝土基体的抗裂性能.

5.2 弯曲韧性

参照美国材料与试验协会 (ASTM) 试验方法,对满足超高距离泵送要求且抗裂性能优异的纤维混凝土的弯曲韧性进行了研究. 借助弯曲荷载—挠度全曲线,分析了纤维掺量和类型对韧性指数和初裂荷载的影响. 图 12 分别是不同纤维体积率下的钢纤维混凝土韧性指数比较. 从中可得出:钢纤维混凝土具有较高的韧性指数;同基准混凝土相比,纤维体积率为 0.8% 的钢纤维混凝土的韧性指数 I_5 、 I_{10} 和 I_{20} 分别提高了 5.22 、 8.7 、

12.39 倍. 因此,所配制的钢纤维混凝土具有较高的韧性,适合用于受力复杂的部位.

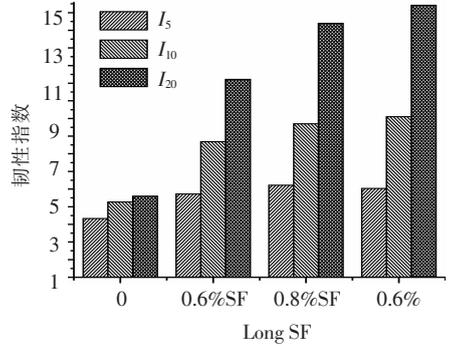


图 12 纤维掺量对混凝土韧性指数的影响

6 结 论

1) 通过优化纤维的尺度、外形及掺量,能够制备出满足泵程高达 300 m 的泵送施工要求的钢纤维混凝土. 该钢纤维混凝土具有较高的抗拉强度和韧性.

2) 所配制的纤维体积率为 0.8% 的钢纤维混凝土能使干燥收缩值降低 50% ,从而显著提高混凝土抵抗非荷载裂缝的能力.

3) 该钢纤维混凝土能够显著提高混凝土构件和索塔锚固区的初裂荷载,有效减少结构裂缝宽度,抑制裂缝生成并限制裂缝扩展.

参考文献:

[1] BARRAGÁN B E, GETTU R. Uniaxial tension test for steel fibre reinforced concrete—a parametric study [J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(7): 767 – 777.

[2] LEE M K, BARR B I G. An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete [J]. Cement & Concrete Composites, 2004, 26(4): 299 – 305.

[3] SONG P S, HWANG S. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2004, 18(9): 669 – 673.

[4] 赵国藩, 彭少民, 黄成逵, 等. 钢纤维混凝土结构 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999: 46 – 62.

[5] ZHANG Jun, LI V. Influence of fibers on drying shrinkage of fiber-reinforced cementitious composite [J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 2001, 127(1): 37 – 44.

[6] 蒋金洋. 超高程泵送 HPFRCC 的服役性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2008.

[7] SWADDIWUDHIPONG S, LU HaiRong, WEE Tiong-Huan. Direct tension test and tensile strain capacity of concrete at early age [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(12): 2077 – 2084.

(编辑 张 红)