

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2013.02.021

# 钢纤维自密实高强混凝土的制备技术

王冲, 林鸿斌, 杨长辉, 叶建雄, 白光

(重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400045)

**摘要:**通过坍落扩展度、 $T_{500}$ 、U型仪和L型仪等测试方法探讨了不同水胶比、砂率及不同钢纤维掺量条件下,钢纤维自密实高强混凝土的制备技术,研究了不同条件下制备的钢纤维自密实高强混凝土力学性能。结果显示,在试验条件下,适宜水胶比及砂率条件下钢纤维混凝土满足自密实混凝土工作性能要求;随着钢纤维掺量的增加,钢纤维自密实混凝土的强度提高,混凝土流动性降低。研究制得的钢纤维高强混凝土在满足自密实性能要求条件下,抗压强度达到CF90技术要求,抗折强度 $>11.0$  MPa。

**关键词:**钢纤维;自密实高强混凝土;制备技术;力学性能

**中图分类号:**TU528.53 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)02-0129-06

## Preparation Technology of Fiber Toughened Self-compacting High-strength Concrete

Wang Chong, Lin Hongbin, Yang Changhui, Ye Jianxiong, Bai Guang

(College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:**Preparation technology of fiber toughened self-compacting high-strength concrete was tested by measuring influence of water/binder ratio, sand percentage, and steel fiber content on spread,  $T_{500}$  time, U-shape value, and L-shape value of fresh concrete. Mechanical properties were analyzed in case of different water/binder ratio, sand percentage, and steel fiber content. The test results show that suitable W/B and sand percentage were necessary to satisfy self-compacting performance of the fresh concrete. With the increase of steel fiber content, the compressive strength and flexural strength were improved while workability of fresh concrete was cut down. Steel fiber toughened self-compacting high-strength concrete was prepared successfully with a strength grade of CF90 and a flexural strength of more than 11.0 MPa.

**Key words:** steel fiber; self-compacting high-strength concrete; preparation technology; mechanical properties

近年来随着结构工程的高层化和大跨化发展,以及严酷使用环境对混凝土性能要求越来越高,建设工程领域对高强超高强混凝土的需求日益强烈。不过,由于高强超高强混凝土的脆性较大,限制了其在工程中的广泛应用。现有工程多用钢管复合高强超高强混凝土以改善其脆性<sup>[1-4]</sup>,而较少采用传统的钢筋约束高强混凝土结构形式。诸多研究表明<sup>[5-8]</sup>,

可通过在高强超高强混凝土中掺加纤维以降低混凝土的脆性,从而可进一步与钢筋复合。不过,制备高强超高强混凝土时水胶比较低,获得良好拌和物流动性相对不易,若进一步掺入纤维,势必严重影响混凝土的施工性能。制备施工性能良好的纤维增韧超高强混凝土是钢筋复合高强混凝土的关键技术。

此外,城市建设中混凝土工程施工也面临着越来越

收稿日期:2012-06-15

基金项目:重庆市建设科研项目城科学(2011-2-21)

作者简介:王冲(1972-),男,副教授,博士,主要从事水泥混凝土研究,(E-mail)chongwang@cqu.edu.cn。

越多的问题,比如:噪音污染严重、工程进度慢、复杂结构浇筑困难等,这也是自密实混凝土发展的原因之一。

利用纤维增韧技术制备纤维自密实混凝土的国内外相关成果较多<sup>[9-12]</sup>,不过,将纤维混凝土、高强混凝土与自密实混凝土三种技术融合在一起,制备纤维自密实高强混凝土的技术难度很大。高强混凝土的技术特点是水胶比低,与混凝土的自密实性能要求矛盾,纤维的掺入,更导致混凝土自密实性能难以满足,且这些问题随着混凝土强度的增加而加剧。彭明祥<sup>[13]</sup>已将 C60 钢纤维自密实高强混凝土成功应用于中央电视台新台址的建设,但针对强度等级更高的纤维自密实混凝土的制备技术的研究在国内尚属空白,而国外已有抗压强度为 100 MPa 的纤维复合超高强自密实混凝土的研究报道<sup>[14]</sup>。本研究的目的,是研究抗压强度满足 CF90 技术要求,抗折强度  $\geq 11.0$  MPa 的纤维自密实高强混凝土制备技术。

## 1 原材料及试验方法

### 1.1 试验材料

水泥采用重庆拉法基水泥厂生产的 42.5R 普通

硅酸盐水泥;硅灰为挪威埃肯公司的半聚集态硅微粉,比表面积为  $20\,000\text{ m}^2/\text{kg}$ ;重庆腾辉新型建材有限公司生产的 S95 级矿渣,比表面积为  $430\text{ m}^2/\text{kg}$ 。胶凝材料的化学成分见表 1 所示。

粗集料为歌乐山石灰石碎石,试验中将粒径 5~10 mm 和粒径 10~20 mm 各按 50% 混合使用。细集料采用岳阳产中砂,含泥量 1.4%,细度模数 2.3。

聚羧酸高效减水剂,含固量 31%。减水剂以胶凝材料总量的质量百分比掺入。

重庆宜筑工程纤维制造有限公司生产的镀铜微钢纤维(长度 10 mm、长径比 66.7),钢纤维的形貌示于图 1 中。



图 1 微钢纤维形貌

表 1 胶凝材料的化学成分

材料	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	总碱量	烧失量
普通 42.5R	21.30	2.53	5.79	60.15	2.35	2.54	0.72	3.66
硅灰	95.19	0.13	0.00	0.00	0.80	0.00	1.05	1.90
磨细矿渣	33.36	2.80	12.69	40.00	6.75	0.00	0.00	0.00

### 1.2 试验方法

1.2.1 钢纤维自密实混凝土拌合物性能试验 试验按照中国土木工程学会标准《自密实混凝土设计

与施工指南》(CCES02—2004)要求的方法进行。测试指标包括:坍落扩展度、T<sub>500</sub> 流动时间、L 形仪指标、U 形仪指标试验。各指标见下表 2。

表 2 自密实混凝土拌合物工作性检测方法与指标要求<sup>[15]</sup>

序号	测试方法	指标要求	检测性能	
1	坍落扩展度	I 级	650 ≤ SP ≤ 750 mm	填充性
		II 级	550 ≤ SP ≤ 650 mm	
2	T <sub>500</sub> 流动时间	2 s ≤ T <sub>500</sub> ≤ 5 s	填充性	
3	L 形仪 (H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> )	I 级	钢筋净距 40 mm	间隙通过性 抗离析性
		II 级	钢筋净距 60 mm	
4	U 形仪 (ΔH = H <sub>1</sub> - H <sub>2</sub> )	I 级	钢筋净距 40 mm	间隙通过性 抗离析性

1.2.2 钢纤维自密实混凝土力学性能试验 混凝土的抗压强度与抗折强度试验按照中华人民共和国国家标准《普通混凝土力学性能试验方法》(GB/T 50081—2002)进行。

## 2 钢纤维自密实混凝土制备技术及工作性评价

### 2.1 自密实混凝土配合比

通过大量试验与配合比调整,自密实混凝土配

合比试验配合比如表3所示。

表3 自密实混凝土配合比试验配合比

配比编号	水胶比	砂率/%	纤维体积掺量/%	单位用水量/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	胶凝材料用量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$			粗集料用量/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	细集料用量/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	减水剂/%
					水泥	矿渣	硅灰			
1	0.20	46	0	155	543	155	77.5	794	676	2.0
2	0.22	46	0	155	494	141	70.5	832	708	2.0
3	0.24	46	0	155	452	129	64.5	864	736	2.0
4	0.22	44	0	155	494	141	70.5	862	678	2.0
5	0.22	48	0	155	494	141	70.5	801	739	2.0
6	0.22	50	0	155	494	141	70.5	770	770	2.0
7	0.22	46	0.30	155	494	141	70.5	832	708	2.0
8	0.22	46	0.60	155	494	141	70.5	832	708	2.0
9	0.22	46	0.90	155	494	141	70.5	832	708	2.0

## 2.2 自密实混凝土工作性能测试

根据试验室的设备条件,试验主要采用坍落扩展度试验、 $T_{500}$ 、U型仪及L型仪这几种检测方法来自密实混凝土的工作性能进行评价。

2.2.1 水胶比对自密实高强混凝土拌合物性能的影响 试验测试了水胶比分别为0.20、0.22及0.24时混凝土的拌和物自密实性能,试验结果如图2~5所示。

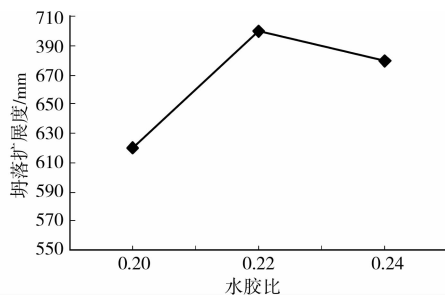


图2 不同水胶比条件下坍落扩展度试验结果

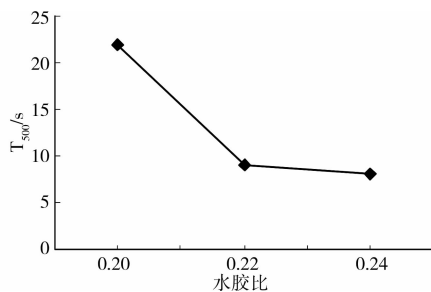


图3 不同水胶比条件下 $T_{500}$ 试验结果

对试验结果分析可知,水胶比对自密实高强混凝土的工作性能影响较大。水胶比为0.20时,坍落扩展度、 $T_{500}$ 、U型仪及L型仪等指标明显比水胶比较高时差。W/B=0.24时, $T_{500}$ 较小,坍落扩展度也

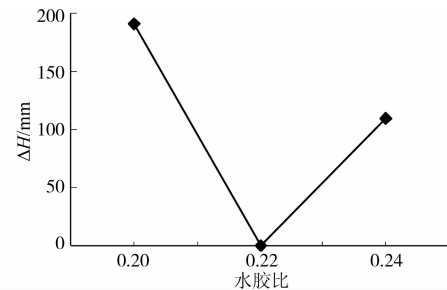


图4 不同水胶比条件下U型仪试验结果

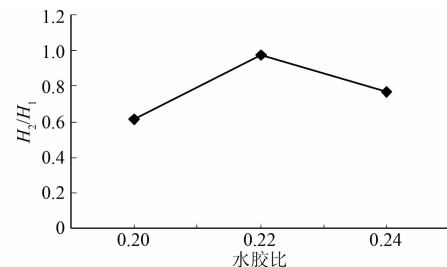


图5 不同水胶比条件下L型仪试验结果

较大,但是U型仪与L型仪试验效果不佳。W/B=0.22时工作性最好。这是因为水胶比过小,自密实混凝土拌合物粘度增大,导致混凝土流动性、填充性和间隙通过性能变差;水胶比过大,砂浆粘度虽然减小,但拌合物出现离析与泌水,混凝土的抗离析性下降。导致拌合物工作性能变差。

2.2.2 砂率对自密实高强混凝土拌合物性能的影响 针对砂率分别为44%、46%、48%及50%等4种不同砂率进行了试验。试验结果如图6~9。

对以上试验结果分析可得,砂率44%时,自密实混凝土的坍落扩展度、U型仪及L型仪试验效果都很差,但是 $T_{500}$ 时间却是很短,这是因为砂率过低时,会造成自密实混凝土粗集料跟砂浆分离,尽管砂

浆流动较快,但是自密实混凝土整体性能较差。砂率 46% 时,混凝土自密实混凝土坍落扩展度、 $T_{500}$ 、U 型仪及 L 型仪试验效果都是最佳,表明其流动性、粘聚性等各方面的指标综合最佳。砂率超过 46% 以后,随着砂率的增加,自密实混凝土的坍落扩展度、 $T_{500}$ 、U 型仪及 L 型仪测试值越来越差,因为随着砂率的增加,混凝土粘聚性虽然增大,但流动性切也越来越差。

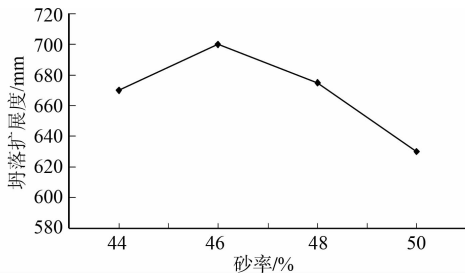


图 6 不同砂率条件下坍落扩展度试验结果

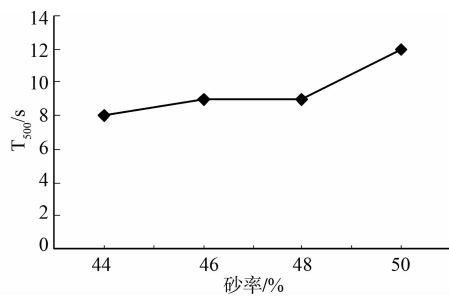
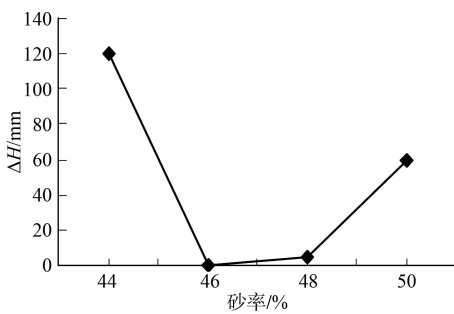
图 7 不同砂率条件下  $T_{500}$  试验结果

图 8 不同砂率条件下 U 型仪试验结果

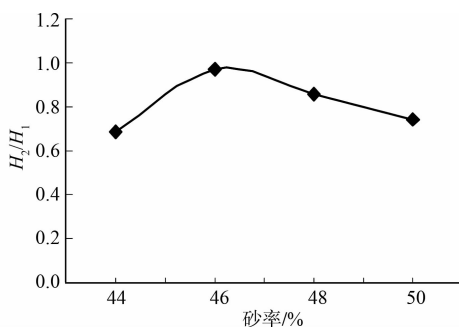


图 9 不同砂率条件下 L 型仪试验结果

2.2.3 纤维掺量对自密实高强混凝土拌合物性能的影响 在混凝土中加入乱向分布的钢纤维会在一定程度影响到自密实混凝土的工作性能,根据多次试验,确定 0.30%、0.60% 及 0.90% 3 种不同掺量进行试验,试验中,将不同掺量纤维掺入到水胶比 0.22,砂率为 46% 的混凝土中,测试了纤维掺量对自密实混凝土拌合物性能的影响规律。试验结果见图 10~13。

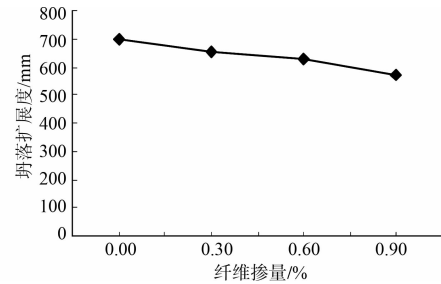


图 10 不同纤维掺量下坍落扩展度试验结果

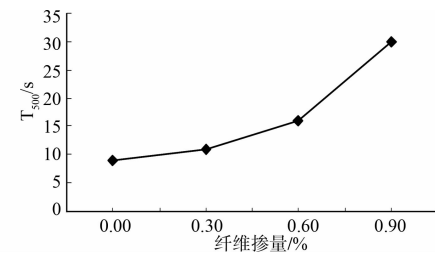
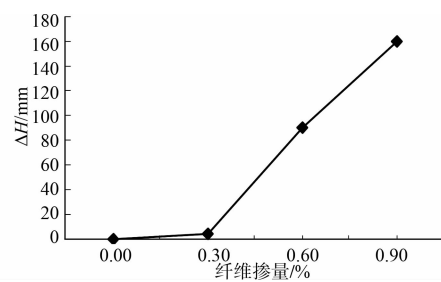
图 11 不同纤维掺量条件下  $T_{500}$  试验结果

图 12 不同纤维掺量下 U 型仪试验结果

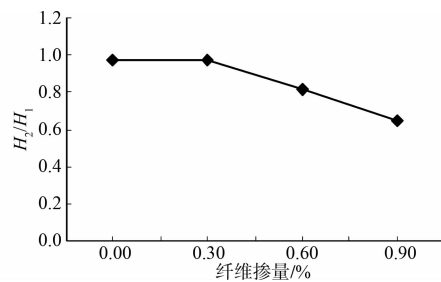


图 13 不同纤维掺量下 L 型仪试验结果

对以上结果进行分析可得,掺入钢纤维后,纤维掺量 0.3% 时,混凝土拌合物满足自密实混凝土工作性能要求。随着钢纤维掺量的增加,混凝土拌合

物坍落扩展度、 $T_{500}$ 、U型仪及L型仪试验测试值都变差,混凝土不能满足自密实性能要求。

## 2.4 钢纤维自密实混凝土力学性能研究

2.4.1 水胶比对自密实高强混凝土力学性能的影响 试验分别对比了0.20、0.22及0.24等3种不同的水胶比进行力学性能试验,分析水胶比对自密实高强混凝土力学性能的影响。试验结果示于图14~15。

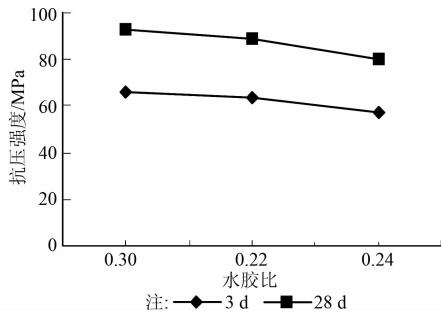


图14 不同水胶比条件下混凝土抗压强度

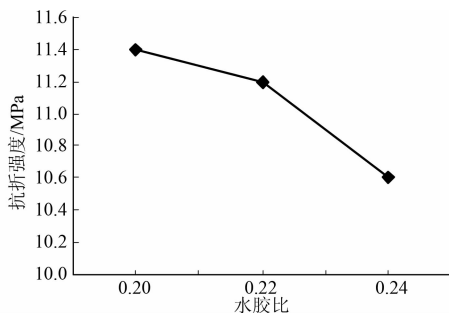


图15 不同水胶比条件下混凝土28 d抗折强度

图14与图15结果显示,随着水胶比的降低,自密实高强混凝土的抗压强度及抗折强度都呈增长趋势。 $W/B=0.22$ 的混凝土28 d抗压强度比 $W/B=0.20$ 的降低4.2%,抗折强度降低1.8%, $W/B=0.24$ 时相比于 $W/B=0.20$ 抗压强度和抗折强度分别降低13.5%和7.0%。因此,选择合适的水胶比对自密实混凝土的配制相当重要。试验结果表明, $W/B=0.22$ 和 $W/B=0.20$ 时混凝土抗压强度和抗折强度皆满足试验目标要求。

### 2.4.2 砂率对自密实高强混凝土力学性能的影响

不同砂率对自密实高强混凝土的力学性能影响试验结果见图16~17。

通过对以上试验结果分析可得,混凝土抗压强度先是随砂率的增大而提高,但是砂率超过46%后是随砂率的增大而降低。砂率为46%时的28d龄期的抗压强度值最大,当砂率低于或高于46%时强度均有不同程度地降低,试验条件下对于力学性能

而言,最佳砂率为46%,这与拌合物工作性试验结果一致。这主要是是因为砂率过低,混凝土离析,混凝土结构不密实;随着砂率的提高,结构密实程度提高,抗压强度随之提高;当砂率超过46%时,砂率过大,粗细集料填充性变差,导致砂浆本身的密实程度降低,影响混凝土的整体均匀性,降低了混凝土的后期强度。

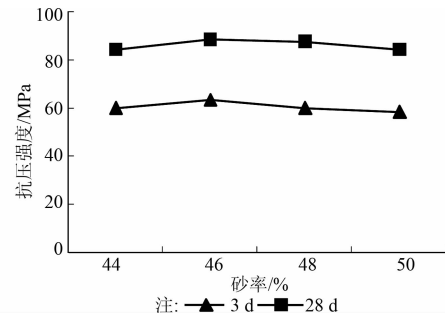


图16 不同砂率条件下混凝土抗压强度

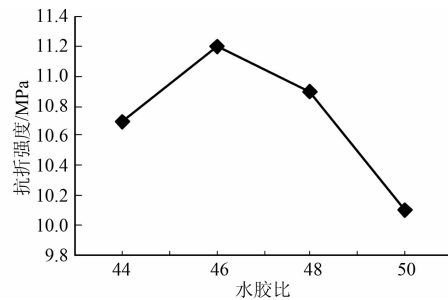


图17 不同砂率条件下混凝土28 d抗折强度

3.4.3 纤维掺量对自密实高强混凝土力学性能的影响 研究了纤维掺入后不同纤维体积掺量对混凝土力学性能的影响,试验中混凝土水胶比为0.22,砂率为46%。试验结果示于图18~19。

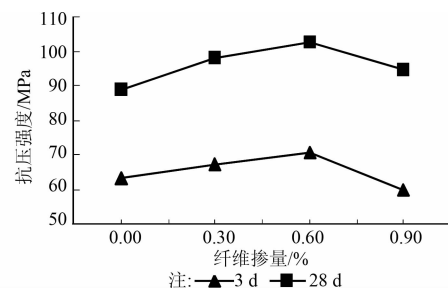


图18 不同纤维掺量下混凝土抗压强度

通过对以上试验结果分析可知,纤维体积掺量为0.3%和0.6%时,自密实高强混凝土28 d抗压强度分别为98.1、102.6 MPa,抗折强度分别为11.6、12.0 MPa。但是当纤维继续增加时纤维自密实高强混凝土的抗压强度及抗折强度呈下降趋势,这是由于钢纤维的掺量太大时导致自密实混凝土的工作

性能变差,影响到混凝土的密实度,对结构性态造成负面影响。

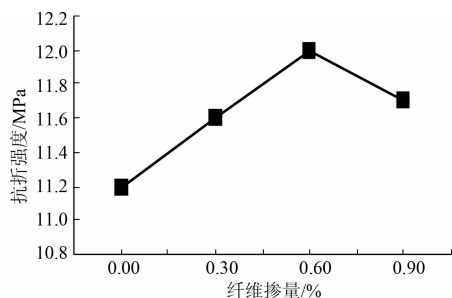


图 19 不同纤维掺量下混凝土 28 d 抗折强度

### 3 结 论

1) 制备了拌和物工作性能基本满足 CCES 02-2004 工作性要求的纤维自密实高强混凝土,其混凝土水胶比为 0.22、砂率 46%,钢纤维掺量 0.30%。

2) 满足自密实性能要求的前提下,制得的纤维自密实高强混凝土抗压强度满足 CF90 技术要求,抗折强度 > 11.0 MPa。

#### 参考文献:

- [1] 王学哲. 超大跨径拱桥高强微膨胀 C50 钢管混凝土配合比设计[J]. 铁道建筑技术, 2009(9): 152-156.  
Wang X Z. Design of high strength micro-expansion C50 steel tube concrete mix in super-long span arch bridge [J]. Railway Construction Technology, 2009 (9): 152-156.
- [2] 张俊梅. 超高层小截面钢管柱泵送高强自密实混凝土施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2008(4): 93-95.  
Zhang J M. Construction technology for steel tube-concrete with small-section pumping high-strength self-compacting concrete in super high-rise buildings [J]. Railway Construction Technology, 2008(4): 93-95.
- [3] 黄华, 伯宏灵, 徐东涛, 等. 高强混凝土在钢管混凝土柱中的应用[J]. 低温建筑技术, 2005, 108(6): 93-95.  
Huang H, Bo H L, Xu D T, et al. Application of high strength concrete in steel tube [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2005, 108(6): 93-95.
- [4] 陈因, 马杰, 黄修, 等. 自密实微膨胀高强钢管混凝土的施工工艺[J]. 混凝土, 2009, 233(3): 76-78.  
Chen N, Ma J, Huang X, et al. Construction process of self-compacting minimum inflation high compressive strength concrete-filled steel tube [J]. Concrete, 2009, 233(3): 76-78.
- [5] Qian C X, Patnaikuni indubhushan. properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete beams in bending[J]. Cement and Concrete Composites, 1999, 21: 73-81.
- [6] Swamy R N, Jojagha A H. Workability of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete [J]. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 1982(4): 103-109.
- [7] Lau A, Anson M. Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2006(6): 1698-1707.
- [8] Ayan E, Saatcio glu Ö, Turanli L. Parameter optimization on compressive strength of steel fiber reinforced high strength concrete[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25: 2837-2844.
- [9] Ferrara L, Park Y D, Shah S P. A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 37(6): 957-971.
- [10] Caverzan A, Cadoni E, Prisco M D. Dynamic tensile behaviour of self compacting steel fibre reinforced concrete[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 82: 220-225.
- [11] King M R, Hebert C D. Steel-fiber reinforced self-compacting concrete on the san vicente aqueduct tunnel [J]. Toronto: Proceedings - Rapid Excavation and Tunneling Conference, 2007: 1243-1251.
- [12] Eduardo N B, Pereira, Joaquim A O. Steel fiber-reinforced self-compacting concrete: experimental research and numerical simulation [J]. Journal of Structure Engineering, 2008, 134(8):1310-1321.
- [13] 彭明祥, 刘小刚, 余成行. C60 钢纤维自密实混凝土配合比设计与制备技术[J]. 施工技术, 2008, 37(8): 82-84.  
Peng M X, Liu X G, Yu C H. Mixiing ratio design and preparation technology of C60 self-compacting concrete with steel fiber [J]. Construction Technology, 2008, 37(8): 82-84.
- [14] Amr S, El D. Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers [J]. Materials and Design, 2009(30): 4286-4292.
- [15] 中国土木工程学会标准.《自密实混凝土设计与施工指南》(CCES02-2004)[M]. 中国建筑工业出版社, 2005, 10.

(编辑 胡 玲)