

文章编号:1671-6833(2004)03-0046-06

钢纤维高强混凝土的配合比及基本性能研究

高丹盈<sup>1</sup>, 汤寄予<sup>2</sup>, 朱海堂<sup>1</sup>

(1. 郑州大学环境与水利学院, 河南 郑州 450002; 2. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘 要:**探讨了钢纤维高强混凝土配合比的设计方法. 根据钢纤维高强混凝土的特点和要求配制出 3 种钢纤维(铣削型钢纤维 MF、切断弓型钢纤维 BF、剪切波纹型钢纤维 SF) 高强混凝土, 进行了立方体和棱柱体试件的抗压试验及弹性模量试验, 分析了水泥浆含量  $\rho_p$  和钢纤维体积率  $\rho_f$  对拌合物工作性及高强混凝土基本力学性能的影响. 研究表明: 水泥浆含量和钢纤维体积率均是影响高强混凝土拌合物工作性及力学性能的重要因素, 所得结果可为进一步研究提供有益的参考.

**关键词:** 钢纤维; 高强混凝土; 配合比; 水泥浆含量  $\rho_p$ ; 钢纤维体积率  $\rho_f$ ; 基本性能

**中图分类号:** TU 528 **文献标识码:** A

0 引言

钢纤维高强混凝土, 具有钢纤维混凝土的抗拉、抗弯、抗冲击、耐疲劳、阻裂、限缩等方面的突出特点, 同时表现出高强混凝土的强度高、耐久性好等优异性能, 是水泥基复合材料向高性能化发展的新方向, 开发与应用潜力极大, 已成为目前国内广泛关注热点. 在推动这种新型材料与技术走向实用化的进程中, 对其配制方法的研究是首要关心的问题. 与传统混凝土相比, 无论是原材料选择、拌合物配合比设计, 还是生产和施工中的各个环节, 钢纤维高强混凝土都有其自身的特点和要求<sup>[1~3]</sup>. 由于钢纤维高强混凝土组份的复杂性, 使得其配合比设计也十分复杂. 目前, 钢纤维高强混凝土的配合比设计还处于试验研究阶段, 也有不少学者提出了各自的理论和方法, 但可被广泛接受的、统一的方法尚未形成, 其配合比设计只能参照有关资料或经验, 通过仔细的试配并经反复检验修改后确定. 本文介绍的钢纤维高混强混凝土配合比设计方法是在参照相关资料的基础上对实践经验的总结, 并尽力与当前通用的普通混凝土的配合比设计方法相衔接, 可为实际中钢纤维高强混凝土配合比设计提供一种基本思路. 但最优的配合比还应根据结构施工所需拌合料的和易性、结构设计所需的强度、工程应用所需的耐

久性并结合本地区的原材料特点进行合理的设计.

本文通过适宜的配合比设计, 采用常规的工艺, 经材料优选配制出 3 种钢纤维高强混凝土, 由试验结果分析了钢纤维及浆体含量对基本力学性能的影响.

1 原材料选择

钢纤维高强混凝土所用原材料与普通混凝土无太大差别, 但对材质的要求较高, 本试验通过试配筛选采用的原材料如下.

- (1) 水泥: 强度等级为 42.5 级的普通硅酸盐水泥, 指标合格;
- (2) 砂: 中粗砂, 细度模数为 2.91, 级配连续、良好;
- (3) 石子: 粒径 5~20 mm 连续级配的石灰岩碎石;
- (4) 钢纤维: 铣削型 MF、切断弓形 BF 及剪切波纹型 SF 3 种类型的钢纤维, 其特征参数见表 1.

表 1 钢纤维特征参数

Tab. 1 Characteristics of steel fibers			
钢纤维类型	平均长度	等效直径	长径比
	$l_f/\text{mm}$	$d_f/\text{mm}$	$l_f/d_f$
铣削型 MF	32.312	0.943 6	34.24
切断弓型 BF	30.529	0.559 2	54.60
剪切波纹型 SF	32.426	0.564 8	57.40

收稿日期: 2004-04-10; 修订日期: 2004-06-18

基金项目: 河南省自然科学基金项目(0311052800); 郑州大学青年骨干教师资助计划项目

作者简介: 高丹盈(1962-), 男, 河南省三门峡市人, 郑州大学教授, 博士生导师, 主要从事新型建筑复合材料及其结构性能方面的研究.

- (5) 外加剂:FDN-1 型高效减水剂;
- (6) 水:自来水.

2 钢纤维高强混凝土配合比设计的基本思路

钢纤维高强混凝土的配合比应根据拌合料的特性及硬化后使用性能的特点和要求进行合理的设计. 本文中对钢纤维高强混凝土的配合比设计参照文献[2]的方法通过设计计算, 然后经试配确定, 其设计要点如下:

2.1 确定钢纤维高强混凝土的配制强度

根据钢纤维高强混凝土的立方体抗压强度标准值 $f_{fcu}$ 、立方体抗压强度标准差  $\sigma_1$  和强度保证率系数 $Z$  求得钢纤维高强混凝土配制抗压强度 $\bar{f}_{fcu}$ :

$$\bar{f}_{fcu} = f_{fcu} + Z\sigma_1 \tag{1}$$

经计算,CF 60 级的配制强度为 70 MPa .

2.2 确定水灰比

钢纤维高强混凝土的水灰比按文献[2]中的方法由钢纤维高强混凝土的配制抗压强度 $\bar{f}_{fcu}$ 与水泥强度等级 $f_{ce}$ 、水灰比  $W/C$  的关系式求得, 即

$$\frac{W}{C} = \frac{\alpha_f f_{ce}}{f_{fcu} + Z\sigma_1 + \alpha_g \alpha_f f_{ce}} \tag{2}$$

式中:  $\alpha_g, \alpha_f$  为经验系数. 对本文试验中的粗骨料碎石, 可取  $\alpha_g = 0.46, \alpha_f = 0.07$ .

根据上式的计算并由经验确定钢纤维高强混凝土的水灰比为 0.30.

2.3 确定钢纤维体积率和单位体积用量

钢纤维体积率  $\rho$  的大小, 对钢纤维高强混凝土的力学性能有重要影响. 随钢纤维体积率的增加, 拌合物的坍落度  $S$  显著减小. 研究表明, 当钢纤维体积率低于 0.5% 时, 增强效果不明显; 当钢纤维体积率过高时, 将使施工拌和更加困难, 钢纤维不能均匀分布. 因此, 一般钢纤维体积率控制在混凝土体积的 1.0%~2.0%. 本次试验中, 为研究钢纤维体积率对强度的影响, 以钢纤维体积率为变化参数, 确定了钢纤维体积率分别为 0%, 0.5%, 1.0%, 2.0% 的 4 个配合比, 并以 0.5% 对应的配合比为基准配合比, 其它纤维率对应的配合比可通过调整单位体积用水量和水泥用量得到. 钢纤维体积率为 0.5% 的单位体积用量为  $F_0 = 0.5\% \times 7\,860\text{ kg/m}^3 = 39.3\text{ kg/m}^3$ .

2.4 确定单位体积用水量

由于影响单位体积用水量的因素较多, 选用的原材料差异, 因而用水量也有不同. 在实际应用

中, 可通过试验或根据已有经验. 在水灰比保持一定的条件下, 单位体积用水量和钢纤维体积率是控制拌合料和易性的主要因素, 用水量的确定应使拌合料达到要求的和易性. 参考文献[2] 确定钢纤维体积率为 0.5% 对应配合比的单位体积用水量为 156 kg, 本文配合比中钢纤维体积率每增减 0.5%, 单位体积用水量相应增减 8 kg .

2.5 确定单位体积水泥用量

钢纤维高强混凝土中, 由于包裹钢纤维和粗细骨料表面的水泥浆用量较普通混凝土多, 因而单位体积水泥用量较大. 钢纤维高强混凝土的单位体积水泥用量可根据强度和钢纤维体积率而定, 钢纤维体积率较大时, 单位体积水泥用量也适当增加.

由已确定的水灰比  $C/W$  和单位体积用水量  $W_0$ , 即可由公式  $C_0 = W_0 \times C/W$  求得单位体积水泥用量  $C_0$ .

2.6 确定砂率

由于影响砂率的因素很多, 诸如粗骨料的品种和最大粒径、钢纤维体积率和长径比、砂的细度模数、水灰比等因素. 因此, 砂率可通过试验或根据已有经验确定, 也可根据所用材料的品种规格、钢纤维体积率、水灰比等因素确定. 本文根据文献[2]的方法计算并经试配确定本次试验采用的砂率为  $S_p = 0.4$ .

2.7 确定单位体积砂、石用量

上述基本参数确定后, 可用绝对体积法或假定密度法求得单位体积的砂、石用量.

因假定密度(容重)法计算较简单, 便于应用, 本文采用此法. 假定钢纤维高强混凝土的密度为  $\gamma_c$ , 则

$$C_0 + W_0 + F_0 + S_0 + G_0 + A_0 = \gamma_c \tag{3}$$

式中:  $C_0, W_0, F_0, S_0, G_0, A_0$  分别为水泥、水、钢纤维、砂、石以及高效减水剂的容重.

参考文献[2] 将钢纤维高强混凝土的密度取为  $\gamma_c = 2\,450\text{ kg/m}^3$ . 根据假定的密度和已确定的参数, 由上式可计算出单位体积中砂、石的总重量. 再按砂率可分别求得砂、石的用量, 即

$$S_0 + G_0 = \gamma_c - W_0 - C_0 - F_0;$$

$$S_0 = (S_0 + G_0) S_p;$$

$$G_0 = (S_0 + G_0) - S_0.$$

由此可得钢纤维体积率为 0.5% 的试验配合比为水:水泥:砂:石:钢纤维:高效减水剂 = 156:520:710:1 064:39.3:10.4. 其它钢纤维体积率下

的配合比可在此基础上,通过调整单位体积用水量及水泥用量确定.每组类型的钢纤维高强混凝土在各钢纤维体积率下都有相应的作为对比组的高强混凝土的配合比见表 2.

表 2 钢纤维高强混凝土试验配合比

Tab.2 Mx proportion of steel fiber reinforce high-strength concrete							kg/m <sup>3</sup>
试件代号	水泥	水	砂	石子	高效减水剂 (FDN-1)	纤维	
HSC00	487	146	618	1 199	9.47	—	
HSC0.5	520	156	710	1 065	10.40	—	
MFHSC0.5	520	156	710	1 065	10.40	39.3	
HSC1.0-1	547	164	696	1 044	10.93	—	
HSC1.0-2	547	164	696	1 044	10.93	—	
HSC1.0-3	547	164	696	1 044	10.93	—	
MFHSC1.0	547	164	696	1 044	10.93	78.6	
BFHSC1.0	547	164	696	1 044	10.93	78.6	
SFHSC1.0	547	164	696	1 044	10.93	78.6	
HSC1.5	573	172	682	1 023	11.47	—	
MFHSC1.5	573	172	682	1 023	11.47	117.9	
HSC2.0-1	600	180	668	1 002	12.00	—	
HSC2.0-2	600	180	668	1 002	12.00	—	
HSC2.0-3	600	180	668	1 002	12.00	—	
MFHSC2.0	600	180	668	1 002	12.00	157.2	
BFHSC2.0	600	180	668	1 002	12.00	157.00	
SFHSC2.0	600	180	668	1 002	12.00	157.00	

说明,HSC、MFHSC、BFHSC、SFHSC 分别代表高强混凝土、铣削型钢纤维高强混凝土、切断弓型钢纤维高强混凝土、剪切波纹型钢纤维高强混凝土;后面小数 00,0.5,1.0,1.5,2.0 代表钢纤维体积率分别为 0%,0.5%,1.0%,1.5%,2.0%;最后数字 1,2,3 代表试件组数.

3 试验方法与试验结果

按照《钢纤维混凝土试验方法》(CECS 13:89)<sup>[4]</sup>的规定制作试件并进行试验.测定立方抗压强度、轴心抗压强度及弹性模量的试件尺寸分别采用 150 mm×150 mm×150 mm、150 mm×150 mm×300 mm、150 mm×150 mm×300 mm 的标准试件.

试件制备前将石子过筛,除去超径颗粒( $d>25\text{ mm}$ ),反复冲洗干净,拣出针片状颗粒、胶泥块等杂物,砂子用 5 mm 孔筛进行筛分.浇筑时为使钢纤维均匀分散于拌合物中,采用强制式搅拌机拌和,拌料顺序为:依次加入水泥、粉状高效减水剂、砂子、石子干拌一分钟,接着将钢纤维均匀洒入干拌 30s,随后加水湿拌一分钟出料.将新拌混凝土装入试模中,振动台振动成型,24 h 后拆模,于养护地点洒水养护到 28 d 后进行试验.试验测

试结果见表 3.由测试结果可以看出,通过原材料优选及适宜的配合比设计可以配制出满足工作及强度要求的钢纤维高强混凝土.

表 3 钢纤维高强混凝土试件测试结果

Tab.3 Test results of steel fiber reinforce high-strength concrete				
试件代号	坍落度 /mm	立方抗 压/MPa	轴心抗 压/MPa	弹性模 量/MPa
HSC00	10	60	65	46 730
HSC0.5	15	61	58	39 462
HSC1.0-1	60	68	56	44 357
HSC1.0-2	70	58	52	47 292
HSC1.0-3	42	63	54	40 423
HSC1.5	200	65	52	44 379
HSC2.0-1	140	56	55	44 417
BFHSC2.0	13	74	58	43 292
HSC2.0-2	180	63	56	42 419
HSC2.0-3	120	60	55	38 857
MFHSC0.5	22	69	58	48 887
MFHSC1.0	8	72	51	47 276
BFHSC1.0	23	66	52	47 576
SFHSC1.0	13	66	55	40 761
MFHSC1.5	12	71	57	44 268
MFHSC2.0	12	63	56	41 026
SFHSC2.0	12	76	55	41 477

4 影响钢纤维混凝土性能的因素

4.1 水泥浆含量  $\rho_p$  及钢纤维体积率  $\rho_f$  对拌合物工作性的影响

影响钢纤维高强混凝土拌合物工作性的因素有钢纤维体积率  $\rho_f$ 、水泥浆含量  $\rho_p$ 、砂率、外加剂和骨料的性质等.其中,钢纤维体积率及水泥浆含量是最主要的因素.

在保持水灰比不变的情况下,单位体积高强混凝土拌合物中水泥浆含量愈多,拌合物的流动性愈好(本文水泥浆含量  $\rho_p$  为 30%~37%,如图 1(a)所示).P.K.Mehta 认为<sup>[3]</sup>,水泥浆体在高强混凝土中所占的体积以 35%为最优,过低的浆体含量使拌合物的工作性变差,过多的浆体含量则对硬化混凝土的收缩和徐变等体积稳定性不利.与高强混凝土拌合物相比,在相同水泥浆用量下,钢纤维高强混凝土坍落度大幅度降低,主要是在钢纤维高强混凝土拌合物中,除必须有足够的水泥浆填充骨料的空隙外,还需要有一部分水泥浆包裹骨料和钢纤维的表面形成润滑层,以减少骨料和钢纤维彼此间的摩阻力,使拌合物有一定的流动性.在钢纤维高强混凝土中,水泥浆不仅要包

裹骨料的表面,而且还要有足够的水泥浆包裹钢纤维的表面,此外,钢纤维在拌合物中交叉搭接形成的网络结构增大了拌合物流动时的阻力.因此,水泥浆的用量比高强混凝土相对多.

已有试验表明<sup>[3]</sup>,在混凝土拌合物中加入不同量的钢纤维时,其拌合物的坍落度随钢纤维体积率的增大而减小.这是由于钢纤维体积率增大后,钢纤维的表面积增大,拌合物内部的摩阻力增

大,流动性减小,因而表现出坍落度的减小,和易性变差.拌合物和易性还与钢纤维长径比和表面状态有关.长径比越大,纤维表面愈粗糙,其和易性降低愈明显.故随水泥浆体体积率的增大,与高强混凝土相比,钢纤维高强混凝土拌合物坍落度无明显的提高.这是因为随钢纤维体积率的增大,水泥净浆需要量也增大,而坍落度变化不大,如图1(b)、(c)所示.

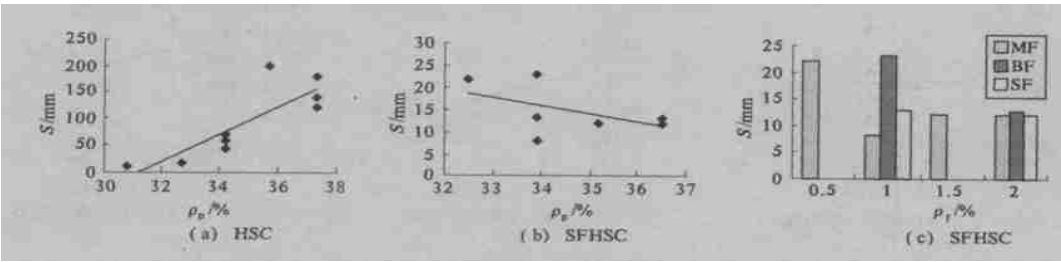


图1 水泥浆体及钢纤维体积率对拌合物和易性的影响

Fig.1 Influence of cement paste content and volume fractions of steel fibers on mixture workability

4.2 水泥浆体含量对基本力学性能的影响

在保持水灰比不变的情况下,单位体积的混凝土拌合物中,水泥浆的用量不仅影响拌合物的和易性,而且会影响硬化混凝土的强度及耐久性.图2给出了浆体含量与高强混凝土及钢纤维高强混凝土基本力学性能的关系.在本文的试验条件下,随水泥浆体含量的增大,高强混凝土立方抗压强度、轴心抗压强度、弹性模量均有降低的趋势;与高强混凝土不同,除弹性模量外,钢纤维高强混凝土立方抗压强度及轴心抗压强度随浆体含量的增大则有提高的趋势.

材料的宏观行为取决于材料的组成和内部结构<sup>[9]</sup>.硬化的混凝土由水泥浆体、界面过渡区和集料3个重要的环节组成.混凝土的性能取决于上述3个环节各自的性质及其相互间的关系和整体均匀性.钢纤维高强混凝土由于较低的水灰比及使用了高效减水剂,硬化后的组成和结构有其特点.低水灰比提高了水泥石的强度和弹性模量,使水泥石和集料间弹性模量的差别减小,因而使界面处水膜层厚度减小,晶体生长的自由空间减小,水化物结晶颗粒尺寸变小,富集程度和取向程度下降,硬化后的界面过渡层孔隙率也下降.过量的未参与水化的水泥微细颗粒对界面孔隙的填充作用也使过渡层更加致密.界面的加强表现在宏观上,就是高强混凝土受力破坏,断裂面都穿过石子粗骨料.可见,硬化后的高强混凝土更接近于均质材料,一定的水灰比下决定了界面过渡区的性质

也是不变的.本文试验条件下,混凝土的性能主要取决于水泥浆体与骨料(砂石和钢纤维)的性质及相对含量,因骨料的性质是不变的,所以,水泥浆体的性质及含量就对硬化混凝土的性能起了主导作用.孔是混凝土微结构中重要的组份之一,对混凝土的宏观力学性能有着重要的影响.一定的水灰比下,水泥石的孔结构是相同的,而孔的数量就成为影响混凝土的强度的重要因素,随水泥浆体含量增大,孔含量也增多,高强混凝土的强度就随之而降低,而对比的高强混凝土由于钢纤维的加入则使强度得到了提高.随水泥浆体含量的增大,混凝土中凝胶及凝胶孔含量也增大,高强混凝土的收缩和徐变增大,弹性模量降低.由于处于弹性范围,钢纤维不能对基体混凝土的弹性性能产生影响,钢纤维高强混凝土的弹性模量取决于基体的性质,所以,随水泥浆体含量的增大,其弹性模量与高强混凝土具有相同的变化趋势.

4.3 钢纤维体积率对基本力学性能的影响

为反映钢纤维体积率  $\rho_f$  对高强混凝土基本力学性能的影响,并消除材料变异、浇筑及养护等闲素对试验结果造成的干扰,采用了钢纤维高强混凝土基本力学性能指标与对比组的高强混凝土之比值.由图3可以看出,随钢纤维体积率的增大,各类型的钢纤维高强混凝土立方抗压强度比及轴心抗压强度比均有提高的趋势.这是由于随纤维率的增大,钢纤维在混凝土中形成的空间网络结构更加紧密,使混凝土更趋于各向同性材料,

尤其是钢纤维高强混凝土使用了较小的水灰比和高效减水剂,进一步增强了钢纤维与高强混凝土基体的粘结性能,使钢纤维有效地阻止了高强混凝土受力破坏时裂缝的开展与延伸,大大改善了高强混凝土受压破坏时的性能,尤其是破坏形态上,使爆裂式的脆性破坏转变为缓慢的延性破坏.随钢纤维体积率的提高,钢纤维高强混凝土弹性

模量的比值却无较明显的提高趋势,这是由于试验中采用的为 40%轴压强度应力时的割线模量,在这种低应力状态下,钢纤维对混凝土的受力性能影响甚微.因此,与普通强度钢纤维混凝土相似,钢纤维高强混凝土静力受压弹性模量同样可取与相同配比的基体高强混凝土的相同值.

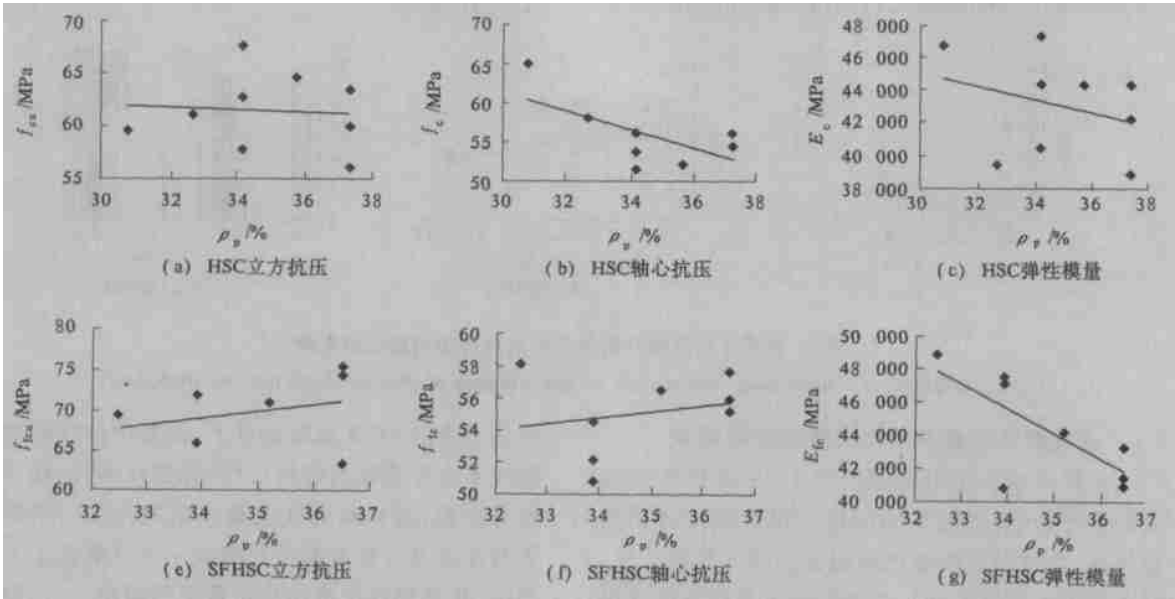


图 2 浆体含量对高强混凝土及钢纤维高强混凝土力学性能的影响  
Fig.2 Influence of cement paste content on mechanical properties of HSC and SFHSC

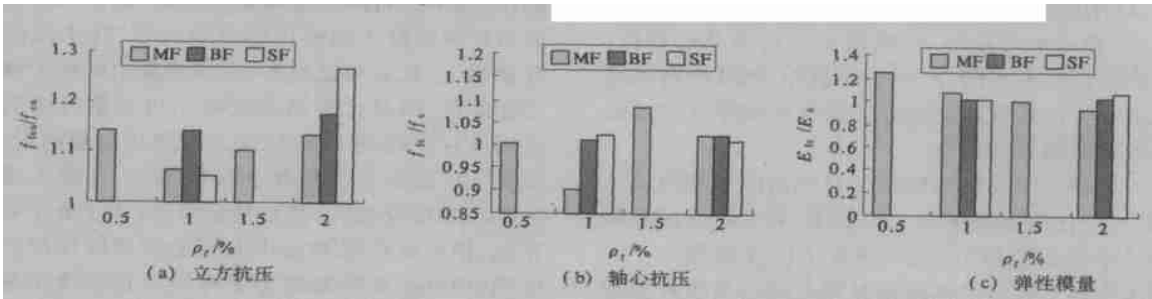


图 3 钢纤维体积率对高强混凝土基本力学性能的影响  
Fig.3 Influences of volume fractions of steel fibers on mechanical properties of HSC

5 结论

- (1) 通过原材料优选及适宜的配合比设计可以配制出满足工作性及强度要求的钢纤维高强混凝土.
- (2) 随水泥浆体含量增大,高强混凝土拌合物坍落度也增大;钢纤维体积率越大,拌合物坍落度越小.
- (3) 高强混凝土的强度及弹性模量随水泥浆

体含量的提高而有降低的趋势;钢纤维的加入使钢纤维高强混凝土的立方抗压强度及轴心抗压强度均有提高的趋势,但对弹性模量影响不大.

参考文献:

[1] 高丹盈,徐磊,李趁趁.钢纤维混凝土轴拉初裂强度的计算方法[J].郑州大学学报(工学版),2002,23(1):31~33.  
[2] 高丹盈,赵军,朱海堂.钢纤维混凝土设计与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2002.

[ 3 ]  汤寄予.纤维高强混凝土基本力学性能的试验研究 [ J ] .  
[ D ] .郑州:郑州大学,2003.

[ 4 ]  CECS 131:89,钢纤维混凝土试验方法[ S ] .

[ 5 ]  CECS 104:99,高强混凝土结构设计与施工指南[ S ] .

[ 6 ]  吴中伟,廉慧珍.高性能混凝土[ M ] .北京:中国铁道出版社,1999.

Research on Mxing and Elementary Properties of Steel Fiber  
Reinforced High-strength Concrete

GAO Dan -ying<sup>1</sup>, TANG Ji -yu<sup>2</sup>, ZHU Hai -tang<sup>1</sup>

( 1.College of Environmental Engineering ,Zhengzhou University ,Zhengzhou 450002,China ; 2.College of Civil Engineering ,Zhengzhou University ,Zhengzhou 450002,China )

**Abstract** : A method of mixing design for steel fiber reinforced high -strength concrete(SFHSC) is investigated in this paper ,and three types of steel fiber reinforced high -strength concrete( MFHSC ,BFHSC ,SFHSC) are prepared according to their characteristics .Experiments on cubic compressive strength ,axial compressive strength and elastic modulus are performed ,and the influence of cement paste content and volume fractions of steel fibers on mixture workability and elementary mechanical properties of high -strength concrete is analyzed ,which shows that cement paste content and volume fractions of steel fibers are bey factors that affect the mixture workability and elementary mechanical properties of high -strength concrete .The test results can provide useful reference for further researches .

**Key words** : steel fiber ; high -strength concrete( HSC) ; mixing ; cement paste content ; steel fiber volume frac -  
tion ; elementary property