

文章编号: 1673-2049(2012)02-0055-06

超高性能混杂钢纤维混凝土力学性能试验

孙小凯^{1,2}, 刁波^{1,2}, 叶英华^{1,2}, 耿娇¹, 玛丽娅¹

(1. 北京航空航天大学 土木工程系, 北京 100191;

2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要:采用工程上常用的 2 种不同长径比、不同强度的端弯型钢纤维和超细型钢纤维,通过立方体抗压试验和小梁抗弯试验,研究纤维体积率(体积分数)为 2.0% 时,端弯纤维和超细纤维混合比例对超高性能混凝土抗压强度、抗弯强度、延性的影响。结果表明:端弯纤维和超细纤维分别主导了超高性能混凝土强度和延性性能;随着超细纤维体积率增加,超高性能混凝土抗压强度、抗弯强度和弯曲韧性提高;随着端弯纤维体积率提高,小梁的延性增强;2 种纤维混合,可以均衡地改善基体混凝土的相应性能;综合考虑各力学性能指标和经济性,端弯纤维与超细纤维体积率分别为 0.5% 和 1.5% 时为最佳配比。

关键词:超高性能纤维混凝土;力学性能;纤维混杂;弯曲韧性;延性;抗弯强度

中图分类号:TU528.572 **文献标志码:**A

Experiment on Mechanical Properties of Ultra-high Performance Reinforced Concrete with Hybrid-fiber

SUN Xiao-kai^{1,2}, DIAO Bo^{1,2}, YE Ying-hua^{1,2}, GENG Jiao¹, MA Li-ya¹

(1. Department of Civil Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: When doped volume ratio of fiber (volume fraction) was 2.0%, through cubic compressive tests and beam flexural tests, hybrid-fibers between end-hooked and superfine tape steel fibers with different ratios of length to diameter and different parameters were used to study their effects on compressive strength, flexural strength, ductility of the ultra-high performance concrete (UHPC). The results show that the end-hooked and superfine fibers have their own dominative effects on mechanical properties of the bearing capacity and ductility behavior. With the increase doped volume ratios of superfine fibers, the mechanical properties of compressive strength, flexural strength and bend ductility of the UHPC increase. With the increase doped volume ratios of end-hooked fibers, the beam has a better performance on ductility. Hybrid-fibers between end-hooked and superfine fibers can enhance performance in all aspects of mechanical properties of concrete. Taking all factors of mechanical property index and economical efficiency into consideration, it is the best mixture proportion when doped volume ratios of end-hooked and superfine fibers are 0.5%, 1.5%.

Key words: ultra-high performance fiber reinforced concrete; mechanical property; hybrid-fiber;

收稿日期: 2011-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(50978010); 亚热带建筑科学国家重点实验室开放基金项目(2010KB04)

作者简介: 孙小凯(1987-), 男, 苗族, 湖南湘西人, 北京航空航天大学工学硕士研究生, E-mail: sunxiaokai37@163.com。

bend ductility; ductility; flexural strength

0 引言

国际上通常定义坍落度大于 240 mm、抗压强度高于 100 MPa、抗弯强度高于 10 MPa、断裂能高于 $15 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 的纤维混凝土为超高性能纤维混凝土(Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete, UHPFRC)^[1-2]。相对于传统混凝土,超高性能纤维混凝土具有高(抗压、抗拉)强度、高延性和高耐久性等优点。

各国对超高性能纤维混凝土的研究主要有: Yang 等^[3] 试验研究了用普通河砂替代石英砂以及不同养护温度对超高性能纤维混凝土力学性能的影响; Markovic^[4] 研究了浇筑方法对超高性能纤维混凝土力学性能的影响,发现纤维易于沿着浇筑的方向分布,使得超高性能纤维混凝土梁在垂直于混凝土流动方向上的抗弯性能较强,因此可以控制某一方向的纤维增强效果;胡晓波^[5] 试验研究了掺入不同钢纤维体积率时活性粉末混凝土(Reactive Power Concrete, RPC)的力学性能,指出劈拉强度、抗折强度及轴心抗压强度随着钢纤维体积率的增加而增大;高丹盈等^[6] 研究了钢纤维体积率对混凝土断裂韧度和断裂能的影响;Banthia 等^[7] 试验研究了大直径波浪纤维和小直径波浪纤维混杂的纤维混凝土,结果表明,纤维混杂可以显著增强混凝土的韧性。综上所述,对超高性能混凝土材料配比、纤维体积率影响的研究成果较多,但对超高性能纤维混凝土中掺入混杂纤维的力学性能研究较少。

本文中笔者在研究自密实成型和常温养护的强度等级为 CF100 以上超高性能纤维混凝土,以及试验研究各种类型长纤维(波浪型、端钩型、哑铃型)增强混凝土力学性能的基础上^[8-10],基于 2.0% 的最佳纤维体积率(体积分数,下文同),试验研究了端弯钢纤维和超细钢纤维混杂时超高性能混杂钢纤维混凝土的力学性能,并提出了承载力计算方法。

1 试验概况

1.1 材料配比及成型工艺

采用中国建筑材料科学研究总院的混凝土外加剂检测专用基准水泥,标号为 PI 42.5,中国建筑材料科学研究总院的混凝土外加剂检测专用砂,细度模数为 2.6~2.9 的中粗河砂,北京邦德印合成材料研究所生产的硅灰,平均直径 $0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$,比表面

积为 $20 \sim 28 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,菏泽联强建筑材料有限公司生产的 LQ-IIA 型液态聚羧酸高效减水剂。超高性能基体混凝土用料及配合比见表 1。

表 1 混凝土配合比

Tab. 1 Mixture Proportions of Concrete

各材料用量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)				水胶比	高效减水剂质量分数/%
水泥	粉煤灰	硅灰	砂		
718.4	368.4	119.4	1 050.0	0.15	1.05

在混凝土配合比中,粉煤灰和硅灰的水泥替代率分别为 30% 和 10%,液态聚羧酸高效减水剂将水胶比降至 0.15,从而达到超高性能纤维混凝土的低需水量,减水剂液体含量包含在混凝土配合比总用水量中。

成型工艺:试件采用自密实成型,搅拌时按照水泥、硅灰、粉煤灰的顺序放入搅拌机干拌 1 min,随后加入水和减水剂的混合液继续搅拌 10 min,然后加入纤维,继续搅拌 5 min 后浇模,保湿养护 24 h 后拆模,20 °C 保湿养护 28 d。

1.2 试件设计

基于文献[8]~[10]中的研究结果,试件纤维体积率取 2.0%。采用拉拔钢丝切断端弯型钢纤维(简称端弯纤维,记为 W)和拉拔钢丝切断镀铜型超细钢纤维(简称超细纤维,记为 X),2 种钢纤维的几何尺寸和力学性能如表 2 所示。按 2 种纤维混杂比例变化分为 6 组试件,每组包含 3 个 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的立方体试块和 2 个 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的小梁试件,试件编号见表 3。

表 2 端弯、超细钢纤维的几何尺寸和力学性能

Tab. 2 Geometric Dimensions and Mechanical Properties of End-hooked and Superfine Steel Fibers

钢纤维类型	直径/mm	长度/mm	拉直长度/mm	抗拉强度/MPa	市场价格/(元· kg^{-1})
端弯型	0.7	35	38	1 800	9
超细型	0.2	19	19	2 800	13

表 3 小梁试件编号

Tab. 3 Numbers of Specimens of Beams

试件编号	端弯纤维体积率/%	超细纤维体积率/%	纤维总体积率/%
W0X0-a,b	0.0	0.0	0.0
W2X0-a,b	2.0	0.0	2.0
W1.5X0.5-a,b	1.5	0.5	2.0
W1X1-a,b	1.0	1.0	2.0
W0.5X1.5-a,b	0.5	1.5	2.0
W0X2-a,b	0.0	2.0	2.0

1.3 试验方案

图 1 为小梁抗弯试验加载装置,采用三分点加载,纯弯段长度为 100 mm。加载速度通过固定于梁跨中的位移传感器控制,跨中加载速率为 $0.3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

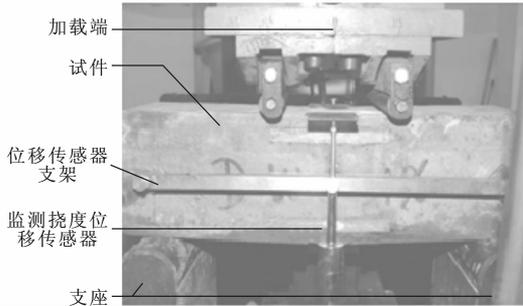


图 1 试验加载装置

Fig. 1 Test Loading Equipment

2 试验结果分析

2.1 立方体抗压强度

不同纤维配比下的立方体抗压强度 f_{cu} 如表 4 所示,图 2 中给出了 2% 纤维体积率下,随超细纤维体积率的增加,立方体抗压强度的变化趋势。相对于素混凝土,纤维的掺入,延缓了混凝土内部微裂缝的发展,对混凝土受压产生的横向应变起到限制作用,从而提高了立方体试块抗压强度。相对于不同配比的纤维混凝土,纤维体积率都为 2%,但随着超细纤维体积率增加,单位体积混凝土纤维数量增加,纤维由于混凝土粘结面积增加,因此出现相同纤维体积率下,随着超细纤维体积率的增加,立方体抗压强度基本满足相应增加的要求。相对于素混凝土而言,立方体抗压强度提高幅度为 11.7%~32.0%。从立方体破坏形态及表面裂缝分布来看,素混凝土压碎脱落,呈现与普通混凝土类似的对称角锥形破坏面;端弯纤维体积率为 2% 时,立方体试块侧面有贯通裂缝,表面混凝土有崩落现象;超细纤维体积率为 2% 时,立方体试块侧面几乎没有贯通裂缝,表面混凝土仅有小面积的崩落现象。

表 4 立方体抗压强度

Tab. 4 Cubic Compressive Strength

端弯纤维体积率/%	0.0	2.0	1.5	1.0	0.5	0.0
超细纤维体积率/%	0.0	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0
立方体抗压强度 f_{cu} /MPa	103	115	121	121	122	136

2.2 小梁试验

2.2.1 荷载-挠度曲线

表 5 中给出了超高性能混合纤维混凝土当混合

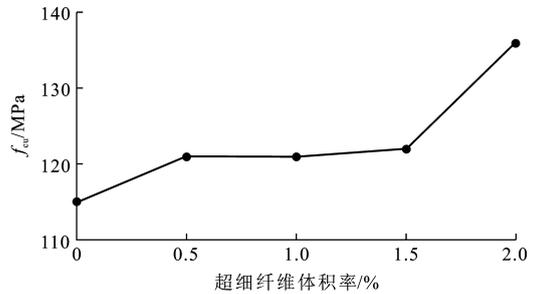


图 2 不同超细纤维体积率下的立方体抗压强度

Fig. 2 Cubic Compressive Strength Under Different Doped Volume Ratios of Superfine Fibers

表 5 各试件主要试验结果

Tab. 5 Main Experiment Results of Specimens

试件编号	初裂荷载 P_{cr} /kN	极限荷载 P_{max} /kN	抗弯强度 M_{fu} /MPa
W0X0		41.1	12.3
W2X0	38.7	44.9	13.5
W0.5X1.5	40.1	45.1	13.6
W1X1	41.0	58.6	17.6
W1.5X0.5	45.7	64.4	19.3
W0X2	50.7	67.7	20.2

配比不同时小梁的主要试验结果,图 3,4 中分别给出了小梁的荷载-挠度曲线和不同超细纤维体积率下的小梁抗弯强度 M_{fu} 的变化趋势。

从表 5 可以看出,相对于素混凝土小梁,超细纤

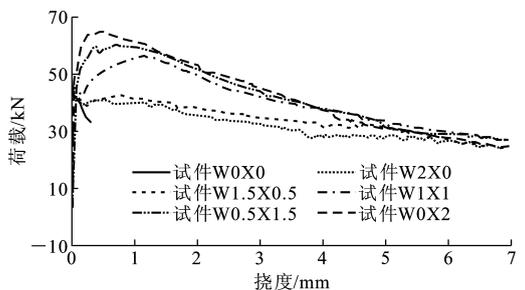


图 3 小梁荷载-挠度曲线

Fig. 3 Load-deflection Curves of Beams

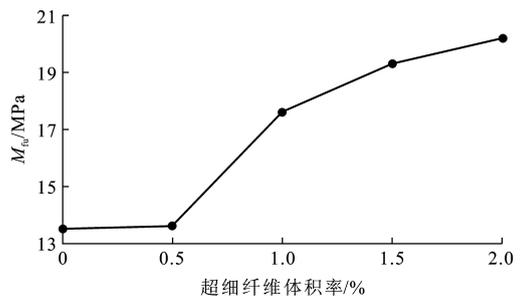


图 4 不同超细纤维体积率下的小梁抗弯强度

Fig. 4 Flexural Strength of Beams Under Different Doped Volume Ratios of Superfine Fibers

纤维体积率分别为1%,2%时,混凝土小梁抗弯强度提高幅度分别为43.1%,64.7%,提高幅度随超细纤维体积率的增大而增大。这归功于掺入纤维后,材料抗拉强度、抗压强度的增强。素混凝土小梁开裂后立即断成两截,而纤维混凝土小梁,因为纤维的桥联作用,使得梁的受弯承载力得到维持。

2.2.2 延性

表6中给出了不同纤维配比下的小梁延性系数 μ ,其中,极限挠度 f_u 采用下降段0.85倍极限荷载 P_{max} 对应挠度。相对于素混凝土而言,纤维混凝土除了增加承载力外,最主要是改善了混凝土梁的延性和弯矩性能^[11-15]。从图3和表6可以看出,相对于超细纤维混凝土,端弯纤维混凝土延性表现更好,随着端弯纤维掺入比例的提高,相对于W0X2配比,延性系数提高幅度为15.7%~67.8%。在达到极限承载力后,端弯纤维两端的弯起部分使其具有更好的抗拔出能力并承担了较大的拉力,而超细纤维比较易于拔出,拔出后相应截面区域的混凝土退出工作,使得构件在荷载峰值后难以维持承载能力,出现荷载-挠度曲线较为明显的下降段。

表6 不同纤维配比下的小梁延性系数

Tab.6 Ductility Coefficients of Beams with Different Mixture Proportions of Fibers

试件编号	初裂挠度 f_{cr}/mm	极限挠度 f_u/mm	延性系数 μ
W2X0	0.04	1.69	42.25
W1.5X0.5	0.04	1.61	40.25
W1X1	0.06	2.06	34.33
W0.5X1.5	0.07	2.04	29.14
W0X2	0.06	1.52	25.17

2.2.3 弯曲韧性

以往对于弯曲韧性主要运用定性的方式表示,本文中将通过弯曲韧性指数和断裂能指标给出定性分析,其中弯曲韧性指数取值参照中国工程建设标准化协会颁布的《钢纤维混凝土试验方法》(CECS 13:89),断裂能计算方法是根据目前最通用,也是第1个发表高性能纤维混凝土论文的Richard等^[16]所使用的计算方法,即抗弯应力-挠度曲线积分至受弯试件跨中挠度为1.5mm,结果如表7所示。

由表7可以看出,随着超细纤维体积率增加,断裂能呈现上升趋势。极限承载力的提高,使得超细纤维混凝土小梁在前期加载过程中能吸收更多的能量;弯曲韧性指数在纤维配比为W1.5X0.5时到达最大。《钢纤维混凝土试验方法》中弯曲韧性指数为初裂挠度的3,5.5,15.5倍挠度值对应的荷载-挠度

表7 小梁断裂能及弯曲韧性指数

Tab.7 Fracture Energies and Bend Ductility Indexes of Beams

端弯纤维体积率/%	2.0	1.5	1.0	0.5	0.0
超细纤维体积率/%	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0
断裂能/($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$)	17.1	17.1	24.0	26.8	27.9
弯曲韧性指数-3.0	4.2	3.7	4.0	4.1	3.9
弯曲韧性指数-5.5	7.8	6.8	8.1	8.6	7.9
弯曲韧性指数-15.5	22.9	19.3	26.5	29.6	26.5

曲线面积值与初裂对应面积值之比,由荷载-挠度曲线可以看出,加载后期,超细纤维的增多使得小梁延性降低,越到后期,曲线包围面积增幅越小。

2.2.4 最优配比

综合考虑超高性能纤维混凝土各力学性能指标和经济性,纤维体积率为2.0%时:配比W0.5X1.5时弯矩性能最佳,相对于W0X2配比,抗弯强度及断裂能仅下降4.9%,3.9%,且具有更好的经济性,为试验最优配比。

3 抗弯强度计算

《纤维混凝土结构技术规程》(CECS 38:2004,以下简称规程)^[17]中给出的纤维混凝土强度计算和构件抗弯强度计算公式的适用范围为CF20~CF80,而CF100~CF120纤维混凝土抗弯强度计算方法未见相关研究文献,笔者将根据试验数据对超高性能纤维混凝土小梁抗弯强度进行计算并与实测数据进行比较。

规程中指出纤维混凝土强度换算可采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)^[18]。本文中试验基体混凝土立方体抗压强度平均值为103MPa。《混凝土结构设计规范》中建议的混凝土棱柱体抗压强度 f_c 与立方体抗压强度 $f_{cu}^{0.55}$ 的换算关系为: $f_c = 0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu}^{0.55}$;轴心抗拉强度 f_t 与立方体抗压强度 $f_{cu}^{0.55}$ 的换算关系为 $f_t = 0.88\alpha_{c2} \times 0.395f_{cu}^{0.55}$,其中, α_{c1} 为强度换算系数, α_{c2} 为脆性折减系数,0.88为混凝土试件与构件的差异系数。《混凝土结构设计规范》中混凝土强度等级最高为C80,尚无C80以上系数规定。依照《混凝土结构设计规范》中系数随混凝土强度的线性变化规律对CF90~CF140进行线性外延,具体取值见表8,其中, β_1 为系数。

按上述系数计算的超高性能纤维混凝土棱柱体抗弯强度平均值见表9。参照规程中给定的钢纤维含量特征值计算公式 $\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$ 和纤维抗拉强度计算公式 $f_{fu} = f_t \beta_{fu} \lambda_f$ (其中, β_{fu} 为受弯构件纤维混凝土

表 8 参数取值
Tab. 8 Values of Parameters

混凝土强度等级	α_{c1}	α_{c2}	β_1
C80	0.82	0.87	0.74
C90	0.84	0.84	0.72
C100	0.86	0.81	0.70
C110	0.88	0.78	0.68
C120	0.90	0.75	0.66
C130	0.92	0.72	0.64
C140	0.94	0.69	0.62

土抗拉作用影响系数, $\beta_{tu} = 1.3$, ρ_f 为体积率, l_f 为纤维长度, d_f 为纤维直径), 2种纤维混杂时纤

表 9 超高性能纤维混凝土梁抗弯强度

Tab. 9 Flexural Strength of UHPFRC Beams

试件编号	f_{cu}/MPa	f_c/MPa	λ_f	f_{tu}/MPa	β_1	x/mm	x_t/mm	R_c/MPa	R_t/MPa	$R_t R_c^{-1}$
W0X0	103	63.14	0.000	3.60	0.70	5.27	92.47	10.2	12.3	1.21
W2X0	115	69.46	1.000	4.68	0.68	6.13	90.99	13.1	13.5	1.03
W1.5X0.5	121	71.87	1.225	5.73	0.66	7.12	89.22	15.9	13.6	0.86
W1X1	121	71.87	1.450	6.79	0.66	8.26	87.48	18.5	17.6	0.95
W0.5X1.5	122	72.47	1.675	7.84	0.66	9.29	85.92	21.1	19.3	0.91
W0X2	136	77.62	1.900	8.89	0.62	9.67	84.41	23.8	20.2	0.85

注: R_c, R_t 分别为纤维混凝土梁根据极限弯矩得到的抗弯强度计算结果和试验结果。

应力图高度。

根据《混凝土结构设计规范》中等效应力图的高度 x 随混凝土强度的变化规律以及纤维混凝土极限压应变增大的特点, 对 CF90~CF140 的等效矩形应力图高度计算系数 β_1 进行线性外延, β_1 取值见表 8。

表 9 中给出了根据纤维混凝土梁极限弯矩得到的抗弯强度的计算结果, 试验结果 R_t 与计算结果 R_c 的比值见表 9。可见, 采用本文中建议的超高性能纤维混凝土折算强度系数、脆性折减系数和受压区高度换算系数, 按照式(1)~(3)计算超高性能纤维混凝土梁受弯承载力, 计算结果与试验结果吻合较好。

4 结 语

(1)103 MPa 基体超高性能混凝土, 钢纤维体积率为 2.0% 时, 超细纤维和端弯纤维分别主导混凝土在承载力和延性上的表现。相对于基体超高性能混凝土, 随着超细纤维体积率的增加, 承载力提高幅度为 9.6%~67.4%; 相对于超细纤维 W0X2, 随着端弯纤维体积率的增加, 延性系数提高幅度为 15.7%~67.8%。

(2)2 种纤维在混凝土中发挥作用不同, 纤维的

维含量特征值按计算公式 $\lambda_f = \rho_{f1} l_{f1}/d_{f1} + \rho_{f2} l_{f2}/d_{f2}$ 得到, 其中, $\rho_{f1}, \rho_{f2}, l_{f1}, l_{f2}, d_{f1}, d_{f2}$ 分别为端弯纤维和超细纤维体积率、纤维长度和纤维直径。纤维混凝土棱柱体抗压强度、纤维含量特征值及抗拉强度计算结果见表 9。本文中, 纤维混凝土梁极限弯矩计算公式为规程计算公式去除钢筋影响项所得, 即

$$M_{tu} = f_c b x (h - x/2 - x_t/2) \quad (1)$$

$$f_c b x = f_{tu} b x_t \quad (2)$$

$$x_t = h - x/\beta_1 \quad (3)$$

式中: b 为梁截面宽度; h 为截面高度; x 为规范中等效应力图的高度; x_t 为纤维混凝土受拉区等效矩形

混杂能均衡地提高基体混凝土各个方面的表现, 体现出混杂优势。综合承载力、韧性和经济性各项指标, 配比 W0.5X1.5 为最佳配比。

(3)按照现行《混凝土结构设计规范》中的系数变化规律, 线性外延得到混凝土强度折算系数、脆性折减系数和受压区高度换算系数, 采用现行《纤维混凝土结构技术规程》中的公式计算超高性能纤维混凝土梁抗弯强度, 计算结果与试验结果吻合良好。

参 考 文 献:

References:

- [1] 蒲心诚, 严吴南, 王 冲, 等. 150 MPa 超高强高性能混凝土研究与应用前景[J]. 1993(3):13-19.
PU Xin-cheng, YAN Wu-nan, WANG Chong, et al. Current Status and Future Prospects of 150 MPa Super High Strength High Performance Concrete[J]. Concrete, 1993(3):13-19.
- [2] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of Reactive Powder Concretes[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7):1501-1511.
- [3] YANG S L, MILLARD S G, SOUTSOS M N, et al. Influence of Aggregate and Curing Regime on the Mechanical Properties of Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete(UHPFRC)[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(6):2291-2298.

- [4] MARKOVIC I. High-performance Hybrid-fibre Concrete; Development and Utilisation [M]. Delft: Delft University Press, 2006.
- [5] 胡晓波. 异形钢纤维改善混凝土性能研究[J]. 工业建筑, 2006, 36(9): 62-67.
HU Xiao-bo. Study on Modification of Deformed Steel Fiber Reinforced Concrete [J]. Industrial Construction, 2006, 36(9): 62-67.
- [6] 高丹盈, 赵伟, 张廷毅, 等. 钢纤维体积分率对高强混凝土断裂性能的影响[J]. 工业建筑, 2008, 38(8): 50-53, 108.
GAO Dan-ying, ZHAO Wei, ZHANG Ting-yi, et al. Influence of Steel Fiber Volume Fraction on the Fracture Performance of High Strength Concrete [J]. Industrial Construction, 2008, 38(8): 50-53, 108.
- [7] BANTHIA N, SAPPAKITTIPAKORN M. Toughness Enhancement in Steel Fiber Reinforced Concrete Through Fiber Hybridization [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(9): 1366-1372.
- [8] 张笑, 杨松霖, 刁波, 等. 硅灰和超塑化剂掺量对高性能混凝土强度及流动性的影响[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(增2): 324-327.
ZHANG Xiao, YANG Song-lin, DIAO Bo, et al. Influence of Silica Fume and Superplasticizer on Compressive Strength and Flow Diameter of High Performance Concrete [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(S2): 324-327.
- [9] 杨松霖. 超高性能混杂纤维混凝土力学性能研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2010.
YANG Song-lin. Study on the Mechanical Property of Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete with Hybrid Fibers [D]. Beijing: Beihang University, 2010.
- [10] 杨松霖, 刁波. 超高性能钢纤维混凝土力学性能[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(2): 8-13.
YANG Song-lin, DIAO Bo. Mechanical Properties of Ultra-high Performance Steel Fiber Reinforced Concrete [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(2): 8-13.
- [11] 李新忠, 魏雪英, 赵均海. 混凝土力学性能的应变率效应[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32(6): 82-86.
LI Xin-zhong, WEI Xue-ying, ZHAO Jun-hai. Strain Rate Effect on Mechanical Properties of Concrete [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(6): 82-86.
- [12] 李炳宏, 江世永, 飞渭, 等. 纤维增强塑料筋混凝土梁抗弯设计数值分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(5): 50-56.
LI Bing-hong, JIANG Shi-yong, FEI Wei, et al. Numerical Analysis of Flexural Design of Concrete Beams Reinforced with FRP Bars [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(5): 50-56.
- [13] 李朋飞, 张擎, 李晶晶. 掺加纳米二氧化硅水泥混凝土路用性能[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(3): 41-46.
LI Peng-fei, ZHANG Qing, LI Jing-jing. Road Performance of Cement Concrete with Nano-SiO₂ [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(3): 41-46.
- [14] 刘贺, 付智, 刘奕含. 路面纤维混凝土韧性试验研究[J]. 中国公路学报, 2012, 25(2): 33-39.
LIU He, FU Zhi, LIU Yi-han. Study of the Toughness of Fiber Reinforced Concrete Pavement in Laboratory [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(2): 33-39.
- [15] 岑国平, 马国强, 王硕太, 等. 机场道面合成纤维混凝土的耐久性[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(3): 43-45.
CEN Guo-ping, MA Guo-qiang, WANG Shuo-tai, et al. Durability of Synthetic Fiber Reinforced Concrete for Airport Pavement [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(3): 43-45.
- [16] RICHARD P, CHEYREZY M. Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength [J]. ACI Special Publication, 1994, 144(1): 507-518.
- [17] CECS 38:2004, 纤维混凝土结构技术规程[S].
CECS 38:2004, Technical Specification for Fiber Reinforced Concrete Structures [S].
- [18] GB 50010—2002, 混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2002, Code for Design of Concrete Structures [S].