

文章编号:1671-6833(2007)02-0005-06

钢纤维再生混凝土抗压强度试验研究

高丹盈, 楼志辉, 王占桥

(郑州大学 新型建材与结构研究中心, 河南 郑州 450002)

摘 要:以钢纤维体积率、钢纤维类型、再生粗骨料处理方式以及试件尺寸作为参数,通过与钢纤维天然混凝土对比,探讨钢纤维对再生混凝土抗压性能的影响.试验结果表明:钢纤维再生混凝土抗压强度略低于钢纤维天然混凝土,钢纤维的加入可以在一定程度上提高再生混凝土的抗压强度,钢纤维再生混凝土立方体抗压强度的尺寸效应系数与钢纤维天然混凝土差别不明显.根据对试验数据的统计分析,铣削型钢纤维(MF)对天然混凝土抗压强度的影响系数为 0.25,对预湿水再生混凝土抗压强度的影响系数为 0.35,钢纤维对再生混凝土的增强效果优于天然混凝土.

关键词:钢纤维再生混凝土;抗压强度;尺寸效应;骨料预处理方式

中图分类号: TU 528

文献标识码: A

0 引言

据统计,目前我国每年由旧建筑物拆除产生的废弃混凝土约为 1 360 万吨,这些废弃混凝土的处理费用巨大而且由此引起的环境问题十分突出^[1].将废弃混凝土经过清洗、破碎和分级,按一定比例相互配合得到的再生骨料作为部分或全部骨料配制成新的再生骨料混凝土(简称再生混凝土)的方法是解决废弃混凝土应用的有效途径.

国内外的研究成果表明^[2],与天然骨料相比,再生骨料具有孔隙率高、吸水性大、强度低等特性,使再生骨料混凝土与天然骨料混凝土性能相差较大,在一定程度上限制了再生骨料混凝土的推广应用.本试验在再生混凝土中加入钢纤维,利用钢纤维的增强与增韧作用改善再生混凝土的性能.通过与天然骨料钢纤维混凝土(钢纤维天然混凝土)的试验对比,研究了钢纤维类型、钢纤维体积率(纤维掺量)、再生粗骨料的处理方式以及尺寸效应对钢纤维再生混凝土立方体抗压强度的影响,建立了适合于钢纤维再生混凝土特点的抗压强度计算公式.

1 试验设计与试验方法

试验采用 32.5 级普通硅酸盐水泥;再生粗骨料是从强度 30~40 MPa 的实验室废弃混凝土构

件经人工破碎分级而成,粒径为 5~20 mm 连续级配,实测级配见表 1.用于对比钢纤维天然混凝土和天然素混凝土所用的天然粗骨料为石灰石碎石,粒径为 5~20 mm 连续级配;细骨料均为天然河砂;FDN-1 型高效减水剂,掺量为水泥用量的 1.0%.试验采用 3 种类型钢纤维(铣削型 MF、切断弓型 BF、剪切波纹型 SF),其特征参数见表 2.

表 1 再生粗骨料级配

Tab. 1 Composing of the recycled coarse aggregate

筛孔尺寸/mm	26.5	19.0	9.5	4.75	2.36
累计筛余/%	0	2.6	76.7	99.0	99.8

表 2 钢纤维特征参数

Tab. 2 Characteristics of steel fibers

纤维类型	平均长度	等效直径	长径比
	l_f/mm	d_f/mm	l_f/d_f
铣削型 MF	32.312	0.944	34.229
剪切波纹型 SF	30.004	0.756	39.689
切断弓型 BF	62.013	0.753	82.299

试验主要研究骨料预处理方式、钢纤维体积率和钢纤维类型、试件尺寸等对钢纤维再生混凝土立方体抗压强度的影响.总结国内外专家学者的研究,对于再生混凝土的配合比设计主要有基于自由水灰比之上的配合比设计方法、普通法和

收稿日期:2006-12-26;修订日期:2007-03-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50678159);2006 年度高等学校博士学科点专项科研基金(2006459006)

作者简介:高丹盈(1962-),男,河南三门峡人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要从事新型复合建筑材料及其结构性能研究.

增加水泥浆用量法等^[3]. 本试验采用 3 种再生骨料预处理方式,即预湿水再生粗骨料(R_I)、未处理再生粗骨料(R_{II})和水泥浆预包裹再生粗骨料(R_{III})^[4]分别与前面 3 种配合比设计方法相对应. 试验中再生混凝土和钢纤维再生混凝土是以 3 种类型的再生粗骨料完全取代天然粗骨料,然后参照普通钢纤维混凝土配合比设计. 这里,预湿水再生粗骨料是指再生粗骨料在浇筑前预先吸水达到饱和面干状态;水泥浆预包裹是指再生粗骨料搅拌前,用设计水泥浆的 10% (不包含在设计水泥浆用量里)先对再生粗骨料进行预裹浆. 本试验在预湿水方式下研究钢纤维体积率(ρ_f)、钢纤维类型、尺寸效应的影响. 其中: ρ_f 分别为 0、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%;钢纤维类型及特征参数见表 2;试件尺寸采用边长为 150 mm 的立方体标准试件,同时制作边长为 100 mm 和 200 mm 的立方体非标准试件研究尺寸效应的影响. 在研究钢纤维类型和试件尺寸的影响时,采用钢纤维体

积率为 1.0% 的钢纤维预湿水再生混凝土和钢纤维天然混凝土试件为研究对象. 为消除基体再生混凝土变异对试验结果的影响,浇筑钢纤维再生混凝土的同时,浇筑相同配合比的再生素混凝土作为对比试件. 为了更好地反映钢纤维的作用效果,在浇筑钢纤维再生混凝土和再生素混凝土的同时,还浇筑用于对比的钢纤维天然混凝土和天然素混凝土试件. 钢纤维再生混凝土、再生素混凝土、以及用于对比的钢纤维天然混凝土和天然素混凝土设计强度等级均为 CF30,其中钢纤维混凝土的配合比按照《钢纤维混凝土》(JG/T 3064 - 1999)中有关规定并参照作者以往研究成果^[5]进行设计. 配合比设计结果列于表 3. 按照《钢纤维混凝土试验方法》(CECS13:89)的规定,每种混凝土类型的试件为一组,共 30 组,每组 3 个试件. 考虑到研究尺寸效应的需要,本次试验共计成型 114 个试件. 钢纤维再生混凝土抗压强度试验结果见表 3 及表 4.

表 3 混凝土试件配合比及标准立方体抗压强度试验结果

Tab. 3 Mix proportion of concrete and test results of compressive strength of standard specimens

试件编号	水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	砂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	石子/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	高效减水剂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	钢纤维/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	立方体抗压 强度/MPa
NC00	164	342	661	1 283	3.4	0	42.8
R_I C00	164	342	661	1 283	3.4	0	40.8
MFNC0.5	172	358	749	1 171	3.6	39.5	42.8
MFNC0.5-0	172	358	749	1 171	3.6	0	42.3
MFR _I C0.5	172	358	749	1 171	3.6	39.5	42.1
MFR _I C0.5-0	172	358	749	11 71	3.6	0	41.8
MFNC1.0	180	375	796	1 099	3.8	79	48.9
MFNC1.0-0	180	375	796	1 099	3.8	0	47.1
MFR _I C1.0	180	375	796	1 099	3.8	79	45.6
MFR _I C1.0-0	180	375	796	1 099	3.8	0	38.6
MFNC1.5	188	392	842	1 029	3.9	118.5	52.6
MFNC1.5-0	188	392	842	1 029	3.9	0	49.4
MFR _I C1.5	188	392	842	1 029	3.9	118.5	49.8
MFR _I C1.5-0	188	392	842	1 029	3.9	0	45.1
MFNC2.0	196	408	886	960	4.1	158	48.1
MFNC2.0-0	196	408	886	960	4.1	0	38.3
MFR _I C2.0	196	408	886	960	4.1	158	52.1
MFR _I C2.0-0	196	408	886	960	4.1	0	40.8
BFNC1.0	180	375	796	1 099	3.8	79	45.4
BFNC1.0-0	180	375	796	1 099	3.8	0	39.8
BFR _I C1.0	180	375	796	1 099	3.8	79	42.6
BFR _I C1.0-0	180	375	796	1 099	3.8	0	34.6
SFNC1.0	180	375	796	1 099	3.8	79	45.4
SFNC1.0-0	180	375	796	1 099	3.8	0	48.7
SFR _I C1.0	180	375	796	1 099	3.8	79	29.6
SFR _I C1.0-0	180	375	796	1 099	3.8	0	31.2

续表 3

试件编号	水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	砂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	石子/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	高效减水剂/ (kg/m^{-3})	钢纤维/ (kg/m^{-3})	立方体抗压 强度/ MPa
MFR _{II} C1.0	180	375	796	1 099	3.8	79	47.3
MFR _{II} C1.0-0	180	375	796	1 099	3.8	0	41.4
MFR _{III} C1.0	180	375	796	1 099	3.8	79	41.6
MFR _{III} C1.0-0	180	375	796	1 099	3.8	0	37.6

说明:试件编号中,MF,铣削型钢纤维;BF,切断弓型钢纤维;SF,剪切波纹型钢纤维;N,天然粗骨料;R,预湿水再生粗骨料; R_I ,再生粗骨料预湿水; R_{II} ,未处理再生粗骨料; R_{III} ,水泥浆预包裹再生粗骨料;后面的数字表示纤维体积率;“-0”表示与钢纤维混凝土对应的素混凝土基体.例如 NC,天然混凝土;RC,再生混凝土; R_I C,预湿水再生混凝土;MFNC 1.0,纤维体积率为 1.0%的铣削型钢纤维天然混凝土;MFNC1.0-0,与纤维体积率为 1.0%的铣削型钢纤维天然混凝土相对应的天然素混凝土基体.

表 4 非标准立方体抗压强度的试验结果

Tab. 4 Test results for compressive strength of nonstandard specimens

试件编号	试件尺寸/mm	抗压强度/ MPa	试件编号	试件尺寸/mm	抗压强度/ MPa
MFNC1.0	100 × 100 × 100	55.2	MFR _I C1.0	100 × 100 × 100	50.6
MFNC1.0-0	100 × 100 × 100	53.5	MFR _I C1.0-0	100 × 100 × 100	45.9
MFNC1.0	200 × 200 × 200	46.9	MFR _I C1.0	200 × 200 × 200	42.0
MFNC1.0-0	200 × 200 × 200	42.7	MFR _I C1.0-0	200 × 200 × 200	41.6

2 抗压强度的影响因素与计算方法

为了反映钢纤维的影响,将某一钢纤维体积率的钢纤维再生混凝土的抗压强度与对应配合比的再生素混凝土抗压强度的比值称为抗压强度增强比,下面重点分析钢纤维体积率和类型、再生粗骨料处理方式和试件尺寸对钢纤维再生混凝土抗压强度及其增强比的影响.

2.1 钢纤维体积率和钢纤维类型对立方体抗压强度的影响

图 1 和图 2 分别给出了在相同钢纤维类型和再生粗骨料处理下,钢纤维再生混凝土和钢纤维天然混凝土立方体抗压强度和抗压增强比随钢纤维体积率的变化规律.从图中可以看出,铣削型钢纤维预湿水再生混凝土(MFR_I C)和铣削型钢纤维天然混凝土(MFNC)一样,随钢纤维体积率的增加具有相同的变化规律.从图 1 可以看出,铣削型钢纤维预湿水再生混凝土和铣削型钢纤维天然混凝土的抗压强度随钢纤维体积率的增加而增大.当纤维体积率为 0.5%、1.0%、1.5% 和 2.0% 时,铣削型钢纤维天然混凝土立方体抗压强度比其基准混凝土(NC00)立方体抗压强度分别提高 0、14.3%、22.9%、12.4%,铣削型预湿水钢纤维混凝土(MFR_I C)立方体抗压强度比其基准混凝土(R_I C00)立方体抗压强度分别提高 3.2%、11.7%、22.1%、27.8%.消除基体混凝土

变异对试验结果的影响,天然混凝土立方体抗压增强比在 1~1.26 之间变化,再生混凝土立方体抗压增强比在 1~1.28 之间变化.显然,钢纤维对再生混凝土立方体抗压强度的增强效果较为明显.

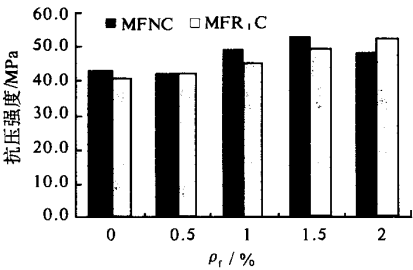


图 1 抗压强度与钢纤维体积率的关系

Fig. 1 Relationships between compressive strength and steel fiber volume fraction

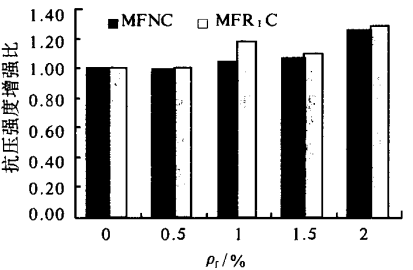


图 2 抗压增强比与钢纤维体积率的关系

Fig. 2 Relationships between ratio of compressive strength and fiber volume fraction

试验结果表明,铣削型钢纤维预湿水再生混凝土的立方体抗压强度要略低于铣削型钢纤维天然混凝土立方体抗压强度,但差别不是很大.当钢纤维体积率为 0.5%、1.0% 和 1.5% 时,铣削型钢纤维预湿水再生混凝土的立方体抗压强度比铣削型钢纤维天然混凝土分别降低 1.6%、6.8%、5.3%;当纤维体积率为 2.0% 时,还提高了 8.4%.与之相对应的再生混凝土基体比钢纤维天然混凝土基体的立方体抗压强度则分别下降了 1.2%、18.0%、8.7%,而当纤维体积率为 2.0% 时,只提高了 6.5%.有资料表明^[6-7]:再生混凝土的抗压强度较相同配合比的天然混凝土降低 14%~32%.很显然,钢纤维再生混凝土与钢纤维天然混凝土之间的立方体抗压强度差异要小于没有加入钢纤维的再生混凝土与天然混凝土之间的差异,而且离散性也有一定的降低.由图 2 可以看出,钢纤维对预湿水再生混凝土的增强效果要比天然混凝土好.原因可能是由于再生混凝土内部存在的缺陷要比天然混凝土多,受荷时容易产生更多的应力集中,从而使得再生混凝土的抗压强度普遍低于天然混凝土,但是,钢纤维加入使得再生混凝土内部受力趋于均匀,减少了应力集中,从而改善了再生混凝土的抗压性能.

在相同钢纤维体积率和再生粗骨料预湿水处理条件下,钢纤维再生混凝土和钢纤维天然混凝土立方体抗压强度与掺入钢纤维类型的关系见图 3 和图 4.图 3 表明,与钢纤维天然混凝土相似,钢纤维类型对再生混凝土立方体抗压强度也有影响.由图 4 可以看出,钢纤维体积率为 1.0% 时,剪切波纹型(SF)、铣削型(MF)和切断弓型 BF 的钢纤维天然混凝土抗压增强比分别为 0.93、1.04 和 1.14,钢纤维预湿水再生混凝土抗压增强比分别为 0.95、1.18 和 1.23.可见,不同类型的钢纤维对再生混凝土的立方体抗压强度的增强效果要

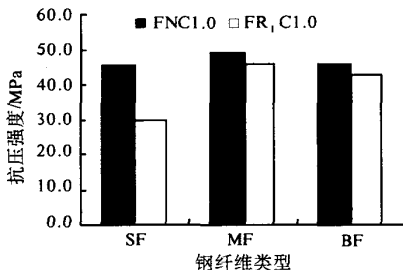


图 3 不同钢纤维类型与抗压强度的关系

Fig.3 Relationships between compressive strength and different steel fibers

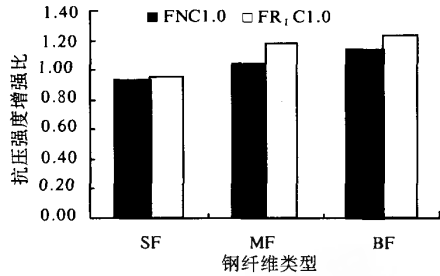


图 4 不同钢纤维类型与抗压强比的关系

Fig.4 Relationships between ratio of compressive strength and different steel fibers

比天然混凝土好,其中切断弓型 BF 型钢纤维的增强效果相对较好.

2.2 再生粗骨料处理方式对钢纤维再生混凝土抗压强度的影响

图 5 和图 6 为相同钢纤维类型和体积率下,再生粗骨料处理方式对再生混凝土抗压强度和抗压增强比的影响.由图 5 可以看出,MFR_{II}C1.0 的抗压强度较 MFR_IC1.0 大 3.7%,MFR_{III}C1.0 的抗压强度较 MFR_IC1.0 小 8.8%.MFR_{II}C1.0 的抗压强度较大,主要是因为 R_{II} 吸水率很大,过多的吸收了配合比中的自由水使水灰比减小,从而

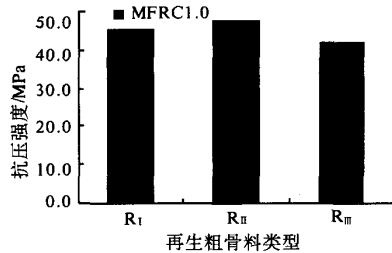


图 5 再生粗骨料处理方式和抗压强度的关系

Fig.5 Relationships between compressive strength and pretreatment ways of recycled coarse aggregate

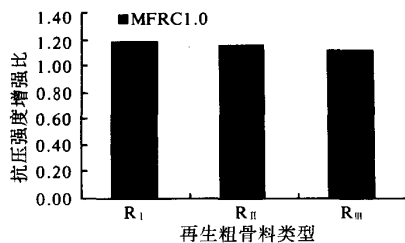


图 6 再生粗骨料处理方式和抗压增强比的关系

Fig.6 Relationships between ratio of compressive strength and pretreatment ways of recycled coarse aggregate

使立方体抗压强度增大,而 $\text{MFR}_{\text{II}}\text{C1.0}$ 的抗压强度较 $\text{MFR}_{\text{I}}\text{C1.0}$ 小,可能是因为加入 10% 的水泥浆后搅拌时间不够,使这些附加的水分没有被充分吸收,导致立方体抗压强度减小。图 6 显示, $\text{MFR}_{\text{I}}\text{C1.0}$ 、 $\text{MFR}_{\text{II}}\text{C1.0}$ 、 $\text{MFR}_{\text{III}}\text{C1.0}$ 这 3 者的抗压增强比分别为 1.18、1.14、1.11,说明 3 种再生粗骨料处理方式下,钢纤维均提高了再生混凝土抗压强度,钢纤维对预湿水再生混凝土的增强效果比其他两种再生混凝土的增强效果要好。

2.3 立方体抗压强度的尺寸效应

图 7 和图 8 为相同钢纤维体积率下,铣削型钢纤维预湿水再生混凝土立方体抗压强度与试件尺寸的关系和尺寸效应系数。钢纤维混凝土理论认为^[8],试件尺寸越小,试件端面与试验机垫板之间的摩擦影响越大,同时由于钢纤维的边壁效应,使边壁的约束作用随尺寸的减小而提高。从图 8 中可以看出,在混凝土配合比、钢纤维类型和钢纤维体积率都相同的情况下,对于边长为 100 mm 的立方体试件,铣削型钢纤维预湿水再生混凝土尺寸效应系数为 0.90,铣削型钢纤维天然混凝土尺寸效应系数为 0.88,两者之间差别较小,并与《钢纤维混凝土试验方法》中规定的边长为 100 mm 的非标准立方体抗压强度尺寸效应系数为

0.9 基本吻合。对于边长为 200 mm 的立方体试件,铣削型钢纤维预湿水再生混凝土尺寸效应系数为 1.08,铣削型钢纤维天然混凝土尺寸效应系数为 1.04,钢纤维再生混凝土尺寸效应系数稍大于钢纤维天然混凝土,主要是由于再生混凝土内部缺陷随着试件尺寸的增大而增多,强度有所下降。由于本文试验数据有限,在实际应用中仍需要进一步的试验验证。

2.4 钢纤维再生混凝土抗压强度计算

许多试验研究和工程实践已经证明,钢纤维的加入提高了普通混凝土的抗压强度,只是由于这种提高幅度有限,通常不考虑钢纤维对普通混凝土抗压强度的影响,认为钢纤维混凝土同普通混凝土抗压强度相同,日本及我国的《纤维混凝土结构技术规程》均是这样规定的。但由上述分析可知,钢纤维对再生混凝土抗压强度的提高幅度较大,在实际应用时可考虑钢纤维对再生混凝土抗压强度的有利影响。考虑钢纤维影响的再生混凝土和天然混凝土的抗压强度的统计公式可表示为

$$f_{\text{fcu}} = f_{\text{cu}} (1 + \alpha_{\text{cu}} \lambda_f) \quad (2)$$

式中: f_{fcu} 为再生或天然钢纤维混凝土立方体抗压强度, MPa; f_{cu} 为再生或天然混凝土立方体抗压强度, MPa; α_{cu} 为钢纤维对再生或天然混凝土抗压强度的影响系数; λ_f 为钢纤维含量特征参数。

通过对铣削型钢纤维混凝土试验数据的统计分析,铣削型钢纤维对天然混凝土抗压强度的影响系数 $\alpha_{\text{cu}} = 0.25$,对预湿水再生混凝土抗压强度的影响系数 $\alpha_{\text{cu}} = 0.35$ 。利用式(2)分别对铣削型钢纤维天然混凝土和铣削型钢纤维预湿水再生混凝土抗压强度进行计算,所得计算值与试验值的比值的平均值分别为 0.981 和 0.993,均方差分别为 0.054 和 0.051,变异系数分别为 0.055 和 0.051,计算值与试验值符合很好。

3 结论

通过对 3 种类型的钢纤维再生混凝土立方体抗压试验研究与分析,得出以下结论:

(1) 钢纤维再生混凝土立方体抗压强度略低于相应的钢纤维天然混凝土。

(2) 钢纤维对再生混凝土立方体抗压强度的增强效果较为明显。在钢纤维体积率为 0~2% 范围内,天然混凝土立方体抗压增强比在 1~1.26 之间变化,再生混凝土立方体抗压增强比在 1~1.28 之间变化。根据对本文试验数据的统计分

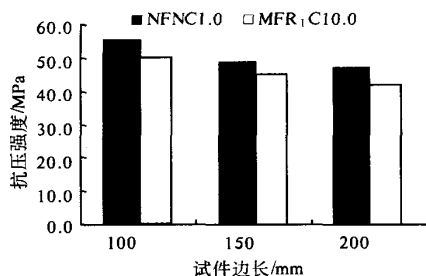


图7 抗压强度与试件尺寸的关系

Fig. 7 Relationships between specimen size and compressive strength

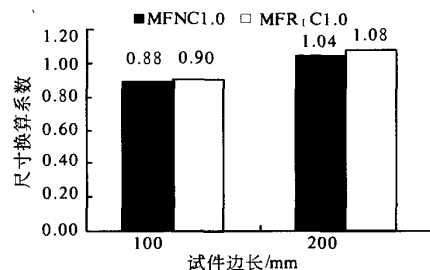


图8 抗压强度尺寸效应系数

Fig. 8 Dimensional conversion coefficient of compressive strength

析,铣削型钢纤维对天然混凝土抗压强度的影响系数为0.25,对预湿水再生混凝土抗压强度的影响系数为0.35,钢纤维对再生混凝土的增强效果优于天然混凝土。

(3)钢纤维类型对再生混凝土基体的增强效果有一定的影响。在本试验条件下,切断弓形(BF)钢纤维的增强效果较好。

(4)粗骨料不同处理方式的再生混凝土MFR_I C1.0、MFR_{II} C1.0、MFR_{III} C1.0的抗压增强比分别为1.18、1.14、1.11,说明再生粗骨料处理方式对再生混凝土基体的增强效果有一定的影响,但差别不大。

(5)钢纤维再生混凝土立方体抗压强度具有一定的尺寸效应。对于100 mm边长的钢纤维再生混凝土尺寸效应系数为0.9,与钢纤维天然混凝土的尺寸效应系数基本相同。

参考文献:

[1] 杜 婷,李慧强,覃亚伟,等.再生混凝土未来发展

的探讨[J].混凝土,2002(4):49-50.

- [2] 董 云.再生骨料及再生混凝土研究进展[J].基建优化,2006,27(1):104-108.
- [3] 郑建军,盛毅生,孔德玉,等.再生混凝土技术与发展[J].浙江工业大学学报,2006,34(1):1-7.
- [4] 王 娟.再生混凝土力学性能和抗冻耐久性性能试验研究[D].郑州:郑州大学,2005.
- [5] 高丹盈,汤寄予,朱海堂.钢纤维高强混凝土的配合比及基本性能研究[J].郑州大学学报(工学版),2004,25(3):46-51.
- [6] 彭献生,陈豪吉,颜 聪.再生骨料混凝土强度性质之探讨[C]//新世纪海峡两岸高性能混凝土研究与应用学术会议论文集.上海:同济大学出版社,2002.
- [7] NIXON P J. Recycled concrete as an aggregate for concrete - A re view[J]. Materials and Structures, 1978, 11(6):371-378.
- [8] 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.

Experimental Research on the Compressive Strength of Steel Fiber Recycled Concrete

GAO Dan - ying, LOU Zhi - hui, WANG Zhan - qiao

(Research Center of New Building Material & Structure, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The influence of the volume fraction for steel fiber and types of steel fiber and the pretreatment ways of recycled coarse aggregate and dimensional effect on compressive strength of steel fiber recycled concrete were explored. Results indicate that the compressive strength of steel fiber recycled concrete is slightly lower than natural steel fiber concrete. The addition of steel fiber can improve compressive strength of recycled concrete to a certain extent. The difference of the conversion coefficient of dimensional effect for compressive strength between steel fiber recycled concrete and natural steel fiber concrete is not obvious. According to the statistic analysis to the experiment data, the influence coefficient of Milling Steel Fiber (MF) to natural steel fiber concrete is 0.25, and to recycled concrete considering water absorption of recycled coarse aggregate is 0.35, the enhancement effect of steel fiber to recycled concrete surpasses natural steel fiber concrete.

Key words: steel fiber recycled concrete; compressive strength; dimensional effect; pretreatment way of recycled coarse aggregate