

文章编号:1673-2049(2014)04-0016-07

再生混凝土单轴力学性能指标统一计算方法

丁发兴,方常靖,龚永智,余志武,胡莉娜

(中南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410075)

摘要:对大量再生混凝土单轴力学性能试验资料进行整理分析,基于统计分析方法,在借鉴普通混凝土力学模型的基础上,对不同取代率下再生混凝土的各种力学性能指标进行统一分析,提出了适用于不同取代率下再生混凝土的立方体抗压强度、轴心抗压强度、轴心抗拉强度、劈裂抗拉强度、弹性模量、轴心受压峰值应变和轴心受拉峰值应变的统一计算公式,建立了再生混凝土单轴受压、受拉的应力-应变全曲线表达式,并将公式计算结果与试验结果进行对比。结果表明:计算结果与试验结果吻合较好;提出的再生混凝土单轴力学性能指标统一计算公式精度较高。

关键词:再生混凝土;力学性能;取代率;应力-应变全曲线

中图分类号:TU398

文献标志码:A

Unified Calculation Method of Uniaxial Mechanical Performance Index of Recycled Concrete

DING Fa-xing, FANG Chang-jing, GONG Yong-zhi, YU Zhi-wu, HU Li-na

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China)

Abstract: Abundant literatures on the uniaxial tests and theoretical analysis of recycled concrete were studied. Based on the method of statistical analysis and the mechanical model of normal concrete, unified analysis of the mechanical performance index of recycled concrete with different substitution rates was conducted. The unified calculation formulae for recycled concrete cubic compressive strength, axial compressive strength, axial tensile strength, split tensile strength, elastic modulus, peak uniaxial compressive and tensile strains, as well as compressive and tensile stress-strain curves were proposed. The calculation results from formulae were contrasted to the test results. The results show that the calculation results agree with test results, and the proposed unified calculation formula for uniaxial mechanical performance index of recycled concrete has high precision.

Key words: recycled concrete; mechanical performance; substitution rate; stress-strain curve

0 引言

再生混凝土技术是实现建筑资源环境可持续发展的主要措施之一,具有显著的社会、经济和环境效益。目前,各国学者对再生混凝土受压、受拉等力学

性能开展了较为广泛的试验研究,取得了一些重要的研究成果^[1-2]。由于影响再生混凝土力学性能的因素较多,包括再生骨料取代率、配合比方法、再生粗骨料强度、再生混凝土来源、龄期等,导致再生混凝土力学性能的离散性较大,不同学者基于小样本

收稿日期:2014-07-25

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAJ09B02)

作者简介:丁发兴(1979-),男,回族,浙江瑞安人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:dinfaxin@csu.edu.cn。

统计分析提出的计算公式适用性较局限。为了便于再生混凝土结构的计算分析,本文中通过对不同取代率下再生混凝土的基本力学性能试验研究资料^[3-35]进行分析,在普通混凝土力学性能指标研究成果的基础上,提出考虑再生骨料取代率的再生混凝土的立方体抗压强度、轴心抗压强度、轴心抗拉强度、劈裂抗拉强度、弹性模量、轴心受压峰值应变和轴心受拉峰值应变等力学性能指标的统一计算公式,并建立不同取代率下的再生混凝土单轴受压、受拉的应力-应变全曲线方程。

1 再生混凝土力学性能指标

1.1 立方体抗压强度

文献[3]中的研究表明,再生混凝土试件的尺寸效应有别于普通混凝土,小试件的强度反而低于大试件的强度。由于现有再生混凝土尺寸效应的试验研究很少,文献[4]中根据现行规范规定,取普通混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 与边长为 100 mm 的立方体抗压强度 $f_{cu,10}$ 的比值 $f_{cu}/f_{cu,10}$ 为 0.95。

图 1 为不同强度等级再生混凝土在不同再生骨料取代率 r 下的立方体抗压强度 $f_{cu(r)}$ 与相同配合比下无再生骨料时的普通混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 比值的试验结果变化规律。由图 1 可以看出,再生骨料取代率对再生混凝土抗压强度影响的离散性较大,但是大体上再生混凝土立方体抗压强度与普通混凝土立方体抗压强度的比值随着再生骨料取代率的增加而降低。通过对图 1 所示的 124 组研究资料进行分析可知,再生混凝土立方体抗压强度 $f_{cu(r)}$ 与普通混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 关系的计算公式为

$$f_{cu(r)} = (1 - 0.1r) f_{cu} \quad (1)$$

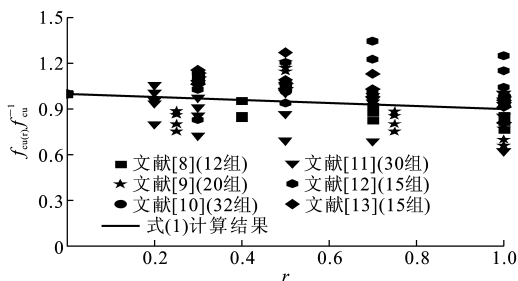


图 1 再生混凝土立方体抗压强度比值与取代率的关系

Fig. 1 Relations Between Ratio of Recycled Concrete Cubic Compressive Strength and Substitution Rate

1.2 轴心抗压强度

图 2 为不同强度等级再生混凝土在不同再生骨料取代率 r 下的轴心抗压强度 $f_{c(r)}$ 与相同配合比下

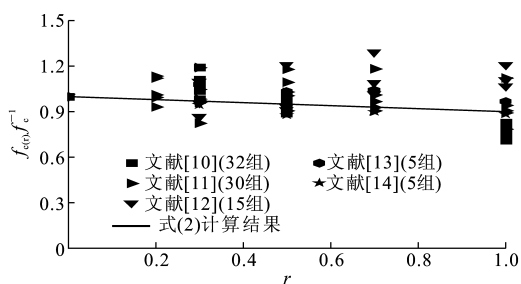


图 2 再生混凝土轴心抗压强度比值与取代率的关系

Fig. 2 Relations Between Ratio of Recycled Concrete Axial Compressive Strength and Substitution Rate

无再生骨料时的普通混凝土轴心抗压强度 f_c 比值的试验结果变化规律。通过对图 2 所示的 87 组研究资料进行分析得

$$f_{c(r)} = (1 - 0.1r) f_c \quad (2)$$

Ding 等^[5]提出的普通混凝土轴心抗压强度统一计算公式为

$$f_c = 0.4 f_{cu}^{7/6} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),可得

$$f_{c(r)} = (1 - 0.1r) \times 0.4 f_{cu}^{7/6} \quad (4)$$

肖建庄^[1]建议的再生混凝土轴心抗压强度 $f_{c(r)}$ 和立方体抗压强度 $f_{cu(r)}$ 的换算关系为

$$f_{c(r)} = 0.76 f_{cu(r)} \quad (5)$$

李旭平^[6]提出的再生混凝土轴心抗压强度 $f_{c(r)}$ 和立方体抗压强度 $f_{cu(r)}$ 的关系为

$$f_{c(r)} = 0.79 f_{cu(r)} \quad (6)$$

式(4)~(6)计算所得轴心抗压强度计算结果与试验结果比较的特征值见表 1。从表 1 可以看出:当再生骨料取代率较小时,采用式(4)~(6)计算所得轴心抗压强度都与试验结果吻合较好;当再生骨料取代率 $r > 0.7$ 时,采用本文中提出的式(4)计算所得轴心抗压强度与试验结果的吻合程度优于另外 2 个公式,且离散率较小。

1.3 轴心抗拉强度

图 3 为不同强度等级再生混凝土在不同再生骨料取代率 r 下的轴心抗拉强度 $f_{t(r)}$ 与相同配合比下无再生骨料时的普通混凝土轴心抗拉强度 f_t 比值的试验结果变化规律。通过对图 3 所示的 15 组研究资料进行分析得

$$f_{t(r)} = (1 - 0.1r) f_t \quad (7)$$

Ding 等^[5]提出的普通混凝土轴心抗拉强度统一计算公式为

$$f_t = 0.24 f_{cu}^{2/3} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)可得

$$f_{t(r)} = (1 - 0.1r) \times 0.24 f_{cu}^{2/3} \quad (9)$$

表 1 再生混凝土轴心抗压强度、轴心抗拉强度、劈裂抗拉强度与弹性模量计算结果特征值比较

Tab. 1 Comparison of Calculated Eigenvalues About Axial Compressive Strength, Axial Tensile Strength, Split Tensile Strength and Elastic Modulus of Recycled Concrete

<i>r</i>	统计特征值	$f_{c(r)}^0 (f_{c(r)}^c)^{-1}$			$f_{t(r)}^0 (f_{t(r)}^c)^{-1}$		$f_{ts(r)}^0 (f_{ts(r)}^c)^{-1}$			$E_{c(r)}^0 (E_{c(r)}^c)^{-1}$	
		式(4)	式(5)	式(6)	式(9)	式(10)	式(13)	式(14)	式(15)	式(18)	式(19)
0.0	均值	1.073	1.009	0.971	1.024	1.024	1.087	1.215	0.826	0.940	1.163
	离散系数	0.030	0.037	0.037	0.022	0.022	0.061	0.073	0.065	0.132	0.130
0.3	均值	1.049	1.068	1.028	1.005	1.043	1.075	1.136	0.778	0.951	1.110
	离散系数	0.098	0.137	0.137	0.058	0.086	0.039	0.036	0.053	0.171	0.127
0.5	均值	1.033	0.993	0.955	1.031	1.151	1.080	1.104	0.761	0.980	1.041
	离散系数	0.050	0.180	0.180	0.113	0.132	0.050	0.072	0.069	0.118	0.122
0.7	均值	1.074	1.148	1.105	1.006	1.196	1.075	1.115	0.778	0.935	0.930
	离散系数	0.074	0.163	0.163	0.171	0.178	0.035	0.114	0.143	0.293	0.298
1.0	均值	1.010	0.965	0.929	1.013	1.255	1.093	1.104	0.779	0.921	0.817
	离散系数	0.111	0.213	0.213	0.130	0.116	0.030	0.151	0.182	0.192	0.202

注：上标 o 表示计算值；上标 c 表示试验值； $f_{t(r)}$ 为轴心抗拉强度； $f_{ts(r)}$ 为劈裂抗拉强度； $E_{c(r)}$ 为弹性模量。

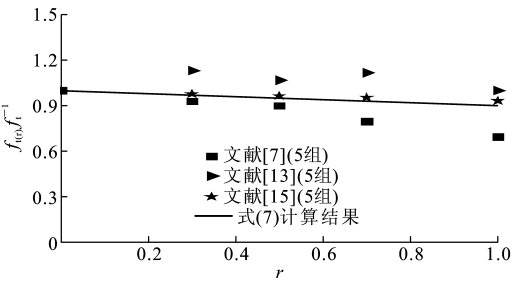


图 3 再生混凝土轴心抗拉强度比值与取代率的关系
Fig. 3 Relations Between Ratio of Recycled Concrete Axial Tensile Strength and Substitution Rate

肖建庄等^[7]建议的再生混凝土抗拉强度 $f_{t(r)}$ 和立方体抗压强度 $f_{cu(r)}$ 的换算关系为

$$f_{t(r)} = (0.06r + 0.24) f_{cu(r)}^{2/3} \quad (10)$$

式(9)，(10)的轴心抗拉强度计算结果特征值如表 1 所示。由表 1 可见，式(9)所得到的轴心抗拉强度更接近试验结果。

1.4 劈裂抗拉强度

图 4 为不同强度等级再生骨料混凝土在不同再生骨料取代率 r 下的劈裂抗拉强度 $f_{ts(r)}$ 与相同配合比下无再生骨料时的普通混凝土劈裂抗拉强度 f_{ts} 比值的试验结果变化规律。通过对图 4 所示的 71 组研究资料进行分析，可得

$$f_{ts(r)} = (1 - 0.1r) f_{ts} \quad (11)$$

Ding 等^[5]提出的普通混凝土劈裂抗拉强度统一计算公式为

$$f_{ts} = 0.16 f_{cu}^{4/5} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)可得

$$f_{ts(r)} = (1 - 0.1r) \times 0.16 f_{cu}^{4/5} \quad (13)$$

肖建庄^[1]建议的再生混凝土劈裂抗拉强度

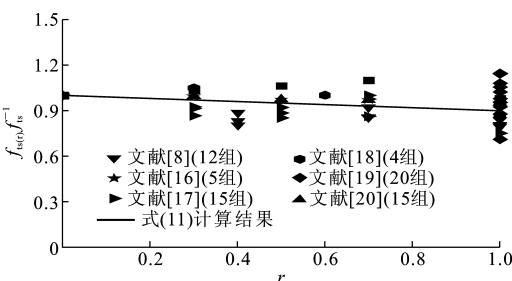


图 4 再生混凝土劈裂抗拉强度比值与取代率的关系
Fig. 4 Relations Between Ratio of Recycled Concrete Split Tensile Strength and Substitution Rate

$f_{ts(r)}$ 与立方体抗压强度 $f_{cu(r)}$ 的换算关系为

$$f_{ts(r)} = 0.24 f_{cu(r)}^{0.65} \quad (14)$$

孙晓雪等^[8]提出的劈裂抗拉强度 $f_{ts(r)}$ 为

$$f_{ts(r)} = (0.25 - 0.01r) f_{cu(r)}^{3/4} \quad (15)$$

根据式(13)~(15)计算的劈裂抗拉强度特征值如表 1 所示。由表 1 可以看出，式(13)计算所得到的劈裂抗拉强度更接近试验结果，且离散率更小。

1.5 弹性模量

图 5 为不同强度等级再生混凝土在不同再生骨料取代率 r 下的弹性模量 $E_{c(r)}$ 与相同配合比下无再生骨料时的普通混凝土弹性模量 E_c 比值的试验结果变化规律，其中， E 为混凝土弹性模量。通过对 111 组受压弹性模量和 10 组受拉弹性模量试验资料进行分析得

$$E_{c(r)} = (1 - 0.3r) E_c \quad (16)$$

Ding 等^[5]提出的普通混凝土弹性模量统一计算公式为

$$E_c = 9\,500 f_{cu}^{1/3} \quad (17)$$

将式(17)代入式(16)可得

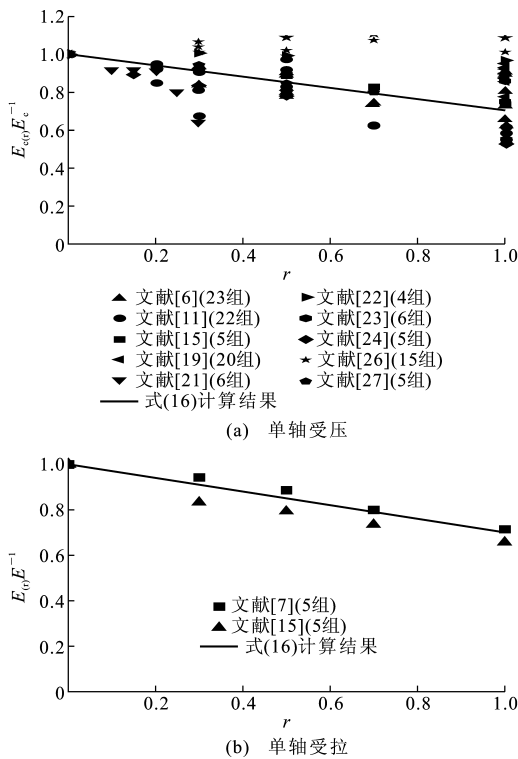


图 5 再生混凝土弹性模量比值与取代率的关系

Fig. 5 Relations Between Ratio of Recycled Concrete Elastic Modulus and Substitution Rate

$$E_{c(r)} = (1 - 0.3r) \times 9\,500 f_{cu}^{1/3} \quad (18)$$

肖建庄^[1]建议的再生混凝土弹性模量与再生混凝土立方体抗压强度的换算关系为

$$E_{c(r)} = \frac{10^5}{2.8 + 40.1/f_{cu(r)}} \quad (19)$$

根据式(18), (19)计算的再生混凝土弹性模量与试验结果的特征值如表 1 所示。由表 1 可以看出, 采用式(18)计算所得结果较试验值偏大, 采用式(19)计算所得结果在取代率较小时比试验值偏小, 取代率较大时明显比试验值偏大, 相比而言, 式(18)计算结果较为理想。

1.6 受压峰值应变

图 6 为不同强度等级再生混凝土在不同再生骨料取代率 r 下的受压峰值应变 $\epsilon_{c(r)}$ 与相同配合比下无再生骨料时的普通混凝土受压峰值应变 ϵ_c 比值的试验结果变化规律。通过对图 6 所示的 49 组研究资料进行分析得

$$\epsilon_{c(r)} = (1 + 0.2r) \epsilon_c \quad (20)$$

Ding 等^[5]建议的普通混凝土受压峰值应变统一计算公式为

$$\epsilon_c = 383 f_{cu}^{7/18} \times 10^{-6} \quad (21)$$

将式(21)代入式(20)可得

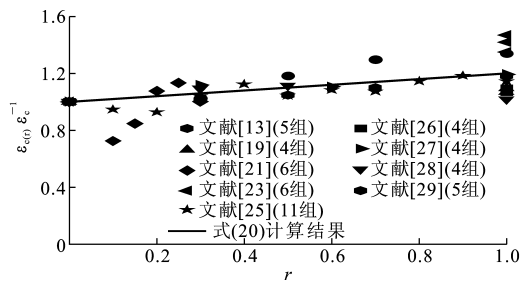


图 6 再生混凝土受压峰值应变比值与取代率的关系

Fig. 6 Relations Between Ratio of Recycled Concrete Peak Compressive Strain and Substitution Rate

$$\epsilon_{c(r)} = (1 + 0.2r) \times 383 f_{cu}^{7/18} \times 10^{-6} \quad (22)$$

1.7 受拉峰值应变

图 7 为不同强度等级再生混凝土在不同再生骨料取代率 r 下的受拉峰值应变 $\epsilon_{t(r)}$ 与相同配合比下无再生骨料时的普通混凝土受拉峰值应变 ϵ_t 比值的试验结果变化规律。根据图 7 所示的 5 组研究资料进行分析得

$$\epsilon_{t(r)} = (1 + 0.1r) \epsilon_t \quad (23)$$

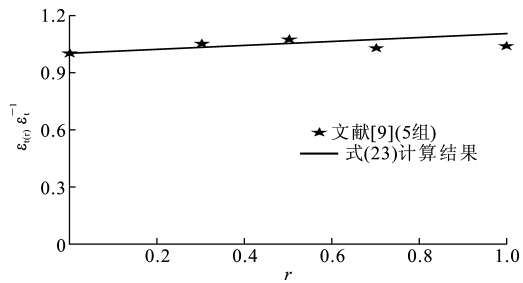


图 7 再生混凝土受拉峰值应变比值与取代率的关系

Fig. 7 Relations Between Ratio of Recycled Concrete Peak Tensile Strains and Substitution Rate

Ding 等^[5]提出的普通混凝土受拉峰值应变统一计算公式为

$$\epsilon_t = 33 f_{cu}^{1/3} \times 10^{-6} \quad (24)$$

将式(24)代入式(23)得

$$\epsilon_{t(r)} = (1 + 0.1r) \times 33 f_{cu}^{1/3} \times 10^{-6} \quad (25)$$

2 单轴受力应力-应变全曲线

借鉴 Ding 等^[5]建议的普通混凝土单轴受力应力-应变全曲线表达式的基础上, 提出量纲为 1 形式的再生混凝土单轴受力的应力-应变全曲线方程为

$$y = \begin{cases} \frac{A_{n(r)}x + (B_{n(r)} - 1)x^2}{1 + (A_{n(r)} - 2)x + B_{n(r)}x^2} & x \leq 1 \\ \frac{x}{\alpha_{n(r)}(x-1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (26)$$

式中: $A_{n(r)}$ 为再生混凝土弹性模量与峰值割线模量的比值; $B_{n(r)}$ 为参数; $\alpha_{n(r)}$ 为下降段参数。

式(26)可避免混凝土的弹性模量在弹性阶段的衰减。当再生混凝土处于单轴受压状态时,式(26)中 $y=\sigma/f_c$ (σ 为应力, $f_c=0.4f_{cu}^{7/6}$), $x=\epsilon/\epsilon_c$ (ϵ 为应变, $\epsilon_c=383f_{cu}^{7/18}\times 10^{-6}$), 此时 $n=1$, 则式(26)中

$$A_{1(r)}=\frac{(1-0.3r)(1+0.2r)}{1-0.1r}\times 9.1f_{cu}^{-4/9} \quad (27)$$

$$B_{1(r)}=5(A_{1(r)}-1)^2/3 \quad (28)$$

$$\alpha_{1(r)}=2.5\times 10^{-5}f_{cu}^3 \quad (29)$$

对于约束再生混凝土结构,取 $\alpha_{1(r)}=0.15$ 。

当再生混凝土处于单轴受拉状态时,式(26)中 $y=\sigma/f_t$ ($f_t=0.24f_{cu}^{2/3}$), $x=\epsilon/\epsilon_t$ ($\epsilon_t=33f_{cu}^{1/3}\times 10^{-6}$), 此时 $n=2$, 则式(26)中

$$A_{2(r)}=1.306\frac{(1-0.3r)(1+0.1r)}{1-0.1r} \quad (30)$$

$$B_{2(r)}=5(A_{2(r)}-1)^2/3 \quad (31)$$

$$\alpha_{2(r)}=1+3f_{cu}^2\times 10^{-4} \quad (32)$$

图 8 为不同强度等级下再生骨料取代率 $r=0, 0.5, 1.0$ 时再生混凝土单轴受力应力-应变全曲线, 其中, RC 表示混凝土强度。由图 8 可以看出, 曲线形式与相同强度等级时无再生骨料取代的曲线形式一致。

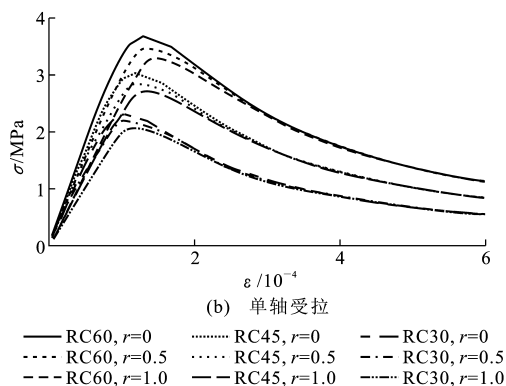
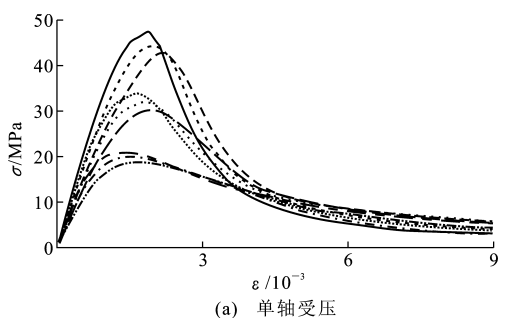


图 8 不同强度等级再生混凝土应力-应变全曲线

Fig. 8 Stress-strain Curves of Recycled Concrete Under Different Strength Grades

3 结 语

(1)本文中建立的不同强度等级再生混凝土立

方体抗压强度、轴心抗压强度、轴心抗拉强度、劈裂抗拉强度、弹性模量、轴心受压峰值应变、轴心受拉峰值应变等力学性能指标统一计算公式形式简单, 且计算精度较高。

(2)本文中提出的不同强度等级再生混凝土轴心受力的应力-应变关系统一计算公式形式简单, 与相同强度等级时无再生骨料取代的曲线形式一致, 且上升段曲线避免了弹性模量衰减过快的缺点。

参考文献:

References:

- [1] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
XIAO Jian-zhuang. Recycled Concrete[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [2] KHATIB J M. Properties of Concrete Incorporating Fine Recycled Aggregate[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35: 763-769.
- [3] 袁 彪. 再生混凝土抗压抗拉强度取值研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
YUAN Biao. On Values of Compressive Strength and Tensile Strength of Recycled Aggregate Concrete [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [4] 李佳彬, 肖建庄, 黄 健. 再生粗骨料取代率对混凝土抗压强度的影响[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(3): 297-301.
LI Jia-bin, XIAO Jian-zhuang, HUANG Jian. Influence of Recycled Coarse Aggregate Replacement Percentages on Compressive Strength of Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(3): 297-301.
- [5] DING F X, YING X Y, ZHOU L C, et al. Unified Calculation Method and Its Application in Determining the Uniaxial Mechanical Properties of Concrete [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2011, 5(3): 381-393.
- [6] 李旭平. 再生混凝土基本力学性能研究(I)——单轴受压性能[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(5): 598-603.
LI Xu-ping. Study on Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete (I) — Behavior Under Uniaxial Compression[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(5): 598-603.
- [7] 肖建庄, 兰 阳. 再生混凝土单轴受拉性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(2): 154-158.
XIAO Jian-zhuang, LAN Yang. Investigation on the Tensile Behavior of Recycled Aggregate Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(2): 154-158.
- [8] 孙晓雪, 赵吉坤, 张晓敏. 再生混凝土力学性能试验研究[J]. 低温建筑技术, 2012(2): 11-13.

- SUN Xiao-xue, ZHAO Ji-kun, ZHANG Xiao-min. Study of Mechanical Properties of Recycled Concrete [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2012(2):11-13.
- [9] 施养杭,吴泽进,彭冲,等.再生粗骨料混凝土立方体抗压强度试验研究[J].建筑科学,2011,27(7):25-27,21.
SHI Yang-hang, WU Ze-jin, PENG Chong, et al. Experimental Investigation of the Compressive Strength of RAC[J]. Building Science, 2011, 27(7): 25-27, 21.
- [10] 马静,王振波,王健.再生砼抗压强度的试验研究[J].淮阴工学院学报,2010,19(3):54-58.
MA Jing, WANG Zhen-bo, WANG Jian. An Experimental Study on Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete[J]. Journal of Huaiyin Institute of Technology, 2010, 19(3): 54-58.
- [11] 肖祥.再生混凝土基本力学性能试验研究[D].青岛:山东科技大学,2008.
XIAO Xiang. Research on the Basic Strength Features of Recycled Concrete[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2008.
- [12] 吴淑海,李晓文,肖慧,等. C30 再生混凝土变形性能及应力-应变曲线试验研究[J].混凝土,2009(12):21-25.
WU Shu-hai, LI Xiao-wen, XIAO Hui, et al. Experimental Research on Deformation Properties and Stress-strain Curve of C30 Recycled Concrete [J]. Concrete, 2009(12): 21-25.
- [13] 林俊.再生混凝土抗压和梁受弯性能研究[D].南宁:广西大学,2007.
LIN Jun. Experiment Research on Compressive Strength of Recycled Concrete and Performance of Recycled Reinforced Concrete Beam [D]. Nanning: Guangxi University, 2007.
- [14] 肖建庄,李佳彬.再生混凝土强度指标之间换算关系的研究[J].建筑材料学报,2005,8(2):197-201.
XIAO Jian-zhuang, LI Jia-bin. Study on Relationships Between Strength Indexes of Recycled Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(2): 197-201.
- [15] 邢振贤,周曰农.再生混凝土的基本性能研究[J].华北水利水电学院学报,1998,19(2):30-32.
XING Zhen-xian, ZHOU Yue-nong. Study on the Main Performance of Regenerated Concrete[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 1998, 19(2): 30-32.
- [16] 何东林.再生骨料及再生混凝土试验研究[D].大连:大连理工大学,2006.
HE Dong-lin. Experimental Research on Recycled Aggregate and Recycled Concrete [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [17] 张波志,王社良,张博,等.再生混凝土基本力学性能试验研究[J].混凝土,2011(7):4-6.
ZHANG Bo-zhi, WANG She-liang, ZHANG Bo, et al. Experimental Analysis of the Basic Mechanical Properties of Recycled Concrete [J]. Concrete, 2011(7): 4-6.
- [18] 鲁雪冬.再生粗骨料高强混凝土力学性能研究[D].成都:西南交通大学,2006.
LU Xue-dong. Study on the Mechanical Properties of Recycled Aggregates High Strength Concrete [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [19] 张李黎.再生混凝土材料性能试验研究[D].合肥:合肥工业大学,2009.
ZHANG Li-li. Experimental Investigation on Material Properties of Recycled Aggregate Concrete [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.
- [20] 丁政.再生骨料及再生混凝土试验研究[D].北京:北京工业大学,2008.
DING Zheng. Experimental Study on Recycled Aggregate and Recycled Concrete [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2008.
- [21] 骆行文,管昌生.再生混凝土力学特性试验研究[J].岩土力学,2007,28(11):2440-2444.
LUO Xing-wen, GUAN Chang-sheng. Experimental Research on Mechanical Characteristics of Reproductive Concrete [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(11): 2440-2444.
- [22] 李宏,肖建庄.基于弹性模量的再生混凝土疲劳强度分析[J].建筑材料学报,2012,15(2):260-263,273.
LI Hong, XIAO Jian-zhuang. On Fatigue Strength of Recycled Aggregate Concrete Based on Its Elastic Modulus [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(2): 260-263, 273.
- [23] 胡琼,宋灿,邹超英.再生混凝土力学性能试验[J].哈尔滨工业大学学报,2009,41(4):33-36.
HU Qiong, SONG Can, ZOU Chao-ying. Experimental Research on the Mechanical Properties of Recycled Concrete [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(4): 33-36.
- [24] 邢峰,冯乃谦,丁建彤.再生粗骨料混凝土[J].混凝土与水泥制品,1999(2):10-13.
XING Feng, FENG Nai-qian, DING Jian-tong. Recycled Aggregate Concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 1999(2): 10-13.
- [25] 陈宗平,薛建阳,余兴国,等.再生混凝土轴心抗压强

- 度试验研究[J]. 混凝土, 2011(9): 4-7, 11.
- CHEN Zong-ping, XUE Jian-yang, YU Xing-guo, et al. Experimental Research on the Axial Compression Strength of Recycled Coarse Aggregate Concrete [J]. Concrete, 2011(9): 4-7, 11.
- [26] 夏 琴, 柳炳康, 曹 勇. 再生混凝土单轴受压变形性能的试验研究[J]. 安徽建筑工业学院学报: 自然科学版, 2009, 17(1): 11-14.
- XIA Qin, LIU Bing-kang, CAO Yong. Experimental Research on Deformation Behavior Under Uniaxial Compression of Recycled Aggregate Concrete [J]. Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry: Natural Science, 2009, 17(1): 11-14.
- [27] 刘数华, 阎培渝. 再生骨料混凝土的力学性能[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2010, 43(1): 85-88, 101.
- LIU Shu-hua, YAN Pei-yu. Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2010, 43(1): 85-88, 101.
- [28] 王雪婷, 杨德健. 再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验[J]. 天津城市建设学院学报, 2010, 16(3): 175-178.
- WANG Xue-ting, YANG De-jian. Experimental Investigation on Complete Stress-strain Curve of Recycled Concrete Under Uniaxial Loading [J]. Journal of Tianjin Institute of Urban Construction, 2010, 16(3): 175-178.
- [29] 肖建庄. 再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(11): 1445-1449.
- XIAO Jian-zhuang. Experimental Investigation on Complete Stress-strain Curve of Recycled Concrete Under Uniaxial Loading [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(11): 1445-1449.
- [30] 丁发兴, 余志武, 欧进萍. 混凝土单轴受力损伤本构模型[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(4): 70-73.
- DING Fa-xing, YU Zhi-wu, OU Jin-ping. Damage Constitutive Model for Concrete Under Uniaxial Stress Conditions [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(4): 70-73.
- [31] 余志武, 丁发兴. 圆钢管混凝土偏压柱的力学性能[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 40-46.
- YU Zhi-wu, DING Fa-xing. Mechanical Behavior of Concrete Filled Circular Steel Tubular Columns Under Eccentric Compression [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 40-46.
- [32] 谷利雄, 丁发兴, 付 磊, 等. 圆端形钢管混凝土轴压短柱受力性能研究 [J]. 中国公路学报, 2014, 27(1): 57-63.
- GU Li-xiong, DING Fa-xing, FU Lei, et al. Mechanical Behavior of Concrete-filled Round-ended Steel Tubular Stub Columns Under Axial Load [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(1): 57-63.
- [33] 朱丽华, 戴 军, 白国良, 等. 再生混凝土砌块砌体力学性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 52-57.
- ZHU Li-hua, DAI Jun, BAI Guo-liang, et al. Experiment on Mechanical Properties of Recycled Concrete Hollow Block Masonry [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(3): 52-57.
- [34] 肖建庄, 朱永明, 王璞瑾, 等. 再生混凝土 U 型叠合梁抗剪性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(2): 1-6.
- XIAO Jian-zhuang, ZHU Yong-ming, WANG Pu-jin, et al. Shear Behavior of Recycled Concrete U-shaped Composite Beams [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(2): 1-6.
- [35] 丁发兴, 余志武, 蒋丽忠. 圆钢管混凝土轴压中长柱的承载力[J]. 中国公路学报, 2007, 20(4): 65-70.
- DING Fa-xing, YU Zhi-wu, JIANG Li-zhong. Bearing Capacity of Middle Long Concrete-filled Circular Steel Tubular Columns Under Axial Compression [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(4): 65-70.