

再生混凝土骨料咬合及剪力传递机理

肖建庄, 孙 畅, 谢 贺

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 通过预裂再生混凝土 push-off 试件的裂缝处剪力传递性能试验, 研究了再生混凝土裂缝处骨料咬合及剪力传递性能。结果表明: 再生混凝土裂缝处剪力传递性能总体上与普通混凝土较为接近; 约束刚度越大, 试件的剪力传递强度越高; 再生混凝土强度越高, 试件的剪力传递强度有一定的提高; 相同混凝土强度下, 随着再生粗骨料取代率的提高, 试件剪力传递强度略有降低。借鉴 Walraven 的理论, 并考虑再生混凝土的细观结构与再生粗骨料的几何特点, 得到了再生混凝土中的骨料咬合模型。试验中各试件的剪力传递强度值与相关理论计算值吻合良好。

关键词: 再生混凝土; 裂缝; 剪力传递; push-off 试件; 骨料咬合模型

中图分类号: TU528

文献标志码: A

Aggregate Interlock and Shear Transfer Mechanism in Recycled Aggregate Concrete

XIAO Jianzhuang, SUN Chang, XIE He

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the tests of pre-crack push-off specimens, the aggregate interlock and shear transfer performance of recycled aggregate concrete (RAC) were investigated. The experimental results reveal that the shear transfer performance across cracks in RAC is similar to that in natural aggregate concrete. When the constraint stiffness is larger, the shear transfer strength of RAC is also higher. With the increase of the RAC strength, the shear transfer strength of the specimen is improved but not obviously. Under the same strength of concrete, the shear transfer strength of specimens decreases slightly with the increase of recycled coarse aggregate replacement ratio, but it decreases marginally. On the basis of Walraven's investigation and a consideration of the meso-structure of RAC as well as the geometry shape of recycled coarse aggregate, an aggregate interlock model for RAC is developed. The shear transfer strength values of each

test specimen and the values calculated by the theory agree well with each other.

Key words: recycled aggregate concrete; crack; shear transfer; push-off specimens; aggregate interlock model

利用再生骨料作为部分或全部骨料配制的混凝土称为再生骨料混凝土 (recycled aggregate concrete, RAC), 简称再生混凝土^[1-2]。由于再生骨料表观密度小, 吸水率大, 孔隙率大等^[2-3]特点, 在等水灰比的情况下, 再生混凝土的强度略低于普通混凝土^[4-5]。国外学者通过混凝土构件的剪切试验及针对剪力传递研究设计的界面剪切试验表明^[6-11], 骨料咬合对无腹筋混凝土梁竖向剪力有重要贡献, 且骨料咬合主要受裂缝宽度、约束钢筋、混凝土强度等因素影响。Walraven^[7]提出了一种物理模型, 解释并预测普通混凝土的骨料咬合作用机理。然而再生粗骨料由于其表面附着老水泥砂浆, 材料本身及制备过程产生大量的微裂缝, 内部损伤较大, 致使开裂后的再生混凝土裂缝处再生粗骨料咬合作用机理与天然骨料可能不尽相同。对于再生混凝土的骨料咬合机理还缺乏相应的物理模型。本文针对这一问题开展了基础研究。

1 试验设计

1.1 配合比设计

采用级配为 5~26.5 mm 再生粗骨料, 天然骨料为碎石, PO42.5R 普通硅酸盐水泥, 普通中砂。再生混凝土配合比见表 1, 钢筋性能见表 2。表 1 中 mix1~mix8 的数字表示不同水灰比, 其中 A 组配合比为 28d 等强度的配合比, B 组为等水灰比的配合比。

收稿日期: 2013-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178340), 上海市科委项目(10231202000)

第一作者: 肖建庄(1968—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师。主要研究方向为再生混凝土。E-mail: jzx@tongji.edu.cn

表 1 配合比

Tab.1 Mixture proportion

配合比编号	再生粗骨料取代率/%	水泥质量/kg	砂质量/kg	天然粗骨料质量/kg	再生粗骨料质量/kg	水质量/kg	水灰比
mix 1(A,B)	0	373	730	1 120	0	182	0.488
mix 2	0	370	730	1 100	0	200	0.540
mix 3	0	440	720	1 050	0	190	0.430
mix 1(B)	100	373	730	0	1 120	182	0.488
mix 4(A)	100	430	700	0	950	185	0.430
mix 5	100	430	700	0	1 000	165	0.380
mix 6(A)	30	400	710	742	318	185	0.463
mix 1(B)	50	373	730	560	560	182	0.488
mix 7(A)	50	406	730	510	510	185	0.456
mix 8(A)	70	415	720	300	700	185	0.446

表 2 钢筋力学性能

Tab.2 Mechanical properties of steel

钢筋	屈服强度 f_y /MPa	弹性模量 $E/10^5$ MPa
$\phi 8$	340.0	2.11
$\phi 14$	549.4	1.96

表 3 试件基本情况

Tab.3 Specimens' basic information

试件编号	再生粗骨料取代率/%	箍筋数目	配合比	立方体强度/MPa	试件/个
N-12	0	2 $\phi 8$	1	29.0	1
N-13	0	3 $\phi 8$	1	29.0	1
N-14	0	4 $\phi 8$	1	29.0	3
N-24	0	4 $\phi 8$	2	31.8	1
N-32	0	2 $\phi 8$	3	29.6	1
N-33	0	3 $\phi 8$	3	29.6	1
N-34	0	4 $\phi 8$	3	29.6	1
R-14	100	4 $\phi 8$	1	19.3	2
R-42	100	2 $\phi 8$	4	27.0	1
R-43	100	3 $\phi 8$	4	27.0	1
R-44	100	4 $\phi 8$	4	27.0	3
R-52	100	2 $\phi 8$	5	33.8	1
R-53	100	3 $\phi 8$	5	33.8	1
R-54	100	4 $\phi 8$	5	33.8	1
R30-64	30	4 $\phi 8$	6	25.8	3
R50-14	50	4 $\phi 8$	1	24.9	2
R50-72	50	2 $\phi 8$	7	24.7	1
R50-73	50	3 $\phi 8$	7	24.7	1
R50-74	50	4 $\phi 8$	7	24.7	3
R70-84	70	4 $\phi 8$	8	29.3	3

1.2 试件设计

共制作 32 个 push-off 试件. 试件尺寸为 400 mm×600 mm. 在试件前后两端各预留一个 V 形槽, 用来对试件进行预裂, V 形槽长度为 300 mm, 深度为 15 mm. 试件形状及尺寸见图 1.

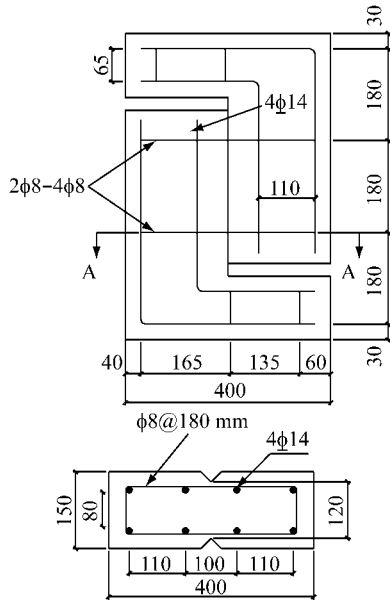


图 1 试件形式及尺寸(单位:mm)

Fig.1 Form and size of specimen(units: mm)

试件的横向约束钢筋垂直穿过剪切面, 选用光圆钢筋 $\phi 8$, 试件中约束钢筋均采用闭合箍筋的形式. 试验中箍筋分别为 2 $\phi 8$ 、3 $\phi 8$ 和 4 $\phi 8$ 三种, 并在裂缝处箍筋表面包裹长度为 40 mm 的软性套管. 试件的配筋情况及混凝土强度见表 3.

1.3 预裂及加载装置

首先在缺口处对 push-off 试件进行预裂, 试验

装置如图 2 所示. 加载时为控制各个试件裂缝宽度,

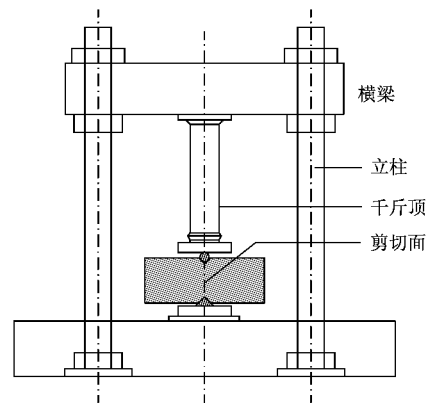


图 2 push-off 试件预裂试验装置图

Fig.2 Pre-crack push-off specimen testing device schematic

当试件内部钢筋的应变达到 600×10^{-6} 时停止加载^[9]. 随后将试件直立通过千斤顶对 push-off 试件施加剪切荷载,如图 3 所示.

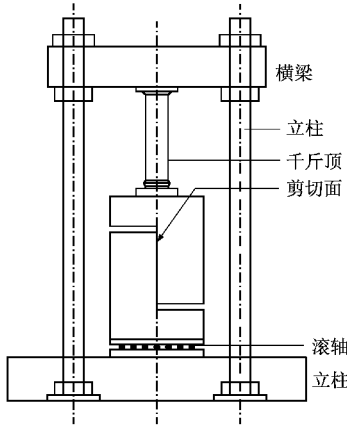


图 3 混凝土裂缝处剪力传递试验装置图

Fig.3 Concrete shear transfer across cracks testing device schematic

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

剪切荷载施加前期, push-off 试件表面没有征兆,各试件临近极限剪切荷载前(达到剪切强度 80% 左右),试件表面出现肉眼可见的竖向裂缝,裂缝宽度不断加大,裂缝两侧之间伴有明显的剪切位移,当达到极限剪切位移后裂缝宽度迅速扩展,直到试件因裂缝宽度和剪切位移过大而破坏. 试验中各个试件表面的剪切裂缝形状不尽相同,某些试件的竖向裂缝沿着剪切面呈直线形,个别试件竖向主裂缝周围延伸出若干条斜向裂缝,其余试件的竖向裂缝则沿着剪切面呈接近直线的曲线形.

2.2 裂缝处剪力传递性能的影响因素

2.2.1 约束刚度的影响

假设剪切应力均匀分布在剪切面上, P_0 为试件剪切极限荷载, A_c 为剪切面面积, τ_0 为极限剪切应力,即 P_0/A_c (对于本试验来说, $A_c = 36\ 000\ \text{mm}^2$). R-52、R-53、R-54 是一组约束刚度各不相同的 push-off 试件. 各组试件的剪切应力-剪切位移关系曲线见图 4. 从图中可以明显看出,对于等再生粗骨料取代率的再生混凝土,内置钢筋数量越多,约束刚度越大,关系曲线上上升段斜率越大,试件的极限剪切强度也越高.

2.2.2 混凝土强度的影响

为研究再生粗骨料取代率为 100% 的再生混凝土

的剪力传递性能受混凝土强度的影响,选定三类试件: R-14、R-44、R-54,图 5 为 R-14a、R-44b、R-54 这三个试件剪切应力-剪切位移关系曲线(多个试件时,编号后加注 a, b, c). 在剪力传递初期,3 个试件的剪切刚度逐渐增强,这是由于水灰比不同,导致各试件混凝土强度不同. 但从图中下降段所显示的曲线上看,并无显著差异,这可能是由于 3 个试件的再生粗骨料取代率均为 100%.

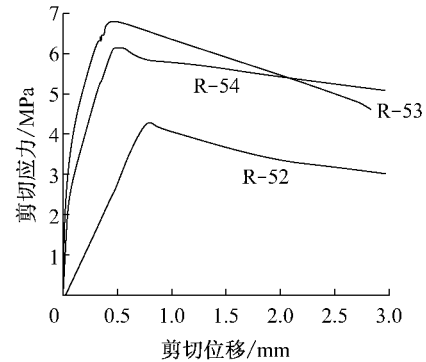


图 4 不同约束刚度下剪切应力-剪切位移关系

Fig.4 Shear stress-shear displacement curve comparison with different restraint stiffness

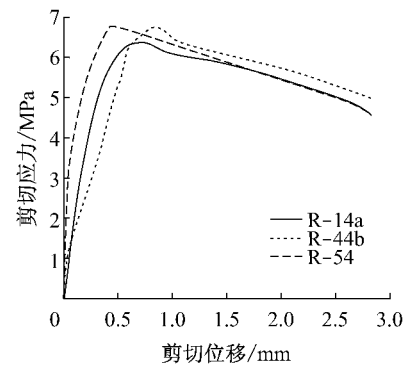


图 5 不同混凝土强度下剪切应力-剪切位移关系

Fig.5 Shear stress-shear displacement curve comparison with different concrete strengths

2.2.3 再生骨料取代率的影响

(1) 相同混凝土强度下再生粗骨料取代率的影响

N-14a、R50-74b、R-44b 为约束刚度相同,混凝土强度相同,取代率分别为 0%、50% 和 100% 的一组试件. 图 6 给出了 N-14a、R50-74b、R-44b 剪切应力-剪切位移关系曲线. 从图中可以得到,在相同的约束刚度及混凝土强度下,随着再生粗骨料取代率的增大,试件裂缝处剪力作用逐渐降低,但总体上讲 3 个试件之间的剪力传递性能差异并不大.

(2) 相同混凝土水灰比下再生粗骨料取代率的影响

N-14a、R50-14a、R-14a 为约束刚度相同,水灰比相同,取代率分别为 0%、50%和 100%的一组试件.图 7 给出三个试件的剪切应力-剪切位移曲线.从图中可以看出,在相同水灰比和相同约束刚度的情况下,不同再生粗骨料取代率的试件的剪切应力-剪切位移曲线形状较为一致,但剪切强度随着再生粗骨料取代率提高而下降.

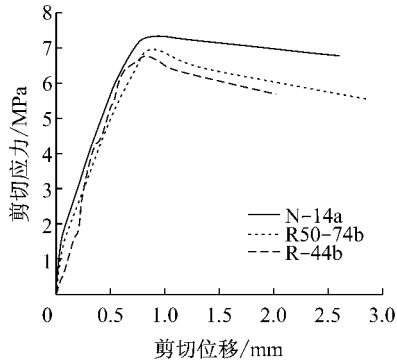


图 6 同强度下剪切应力-剪切位移关系

Fig.6 Shear stress-shear displacement curve comparison with the same strength

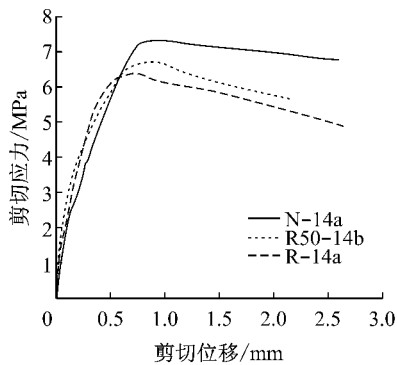


图 7 同配合比下剪切应力-剪切位移关系

Fig.7 Shear stress-shear displacement curve comparison with the same mix proportion

3 理论分析

3.1 普通混凝土分析模型

Walraven^[12]针对普通混凝土提出了剪力传递理论.对于普通混凝土,骨料颗粒的强度和刚度都要大于硬化水泥砂浆,两种材料界面过渡区为最薄的部分,因此开裂混凝土的裂缝一般都穿过砂浆并绕过粗骨料表面.在 Walraven^[12]的理论中,将凸出骨料模拟成球形,且骨料嵌入裂缝中的深度以相同概率分布,如图 8 所示.把开裂混凝土体(图 8a)视作很多混凝土切片(图 8c)的集合,且通过对单个切片性能的研究可以进一步推导出整个裂缝的受力性能.

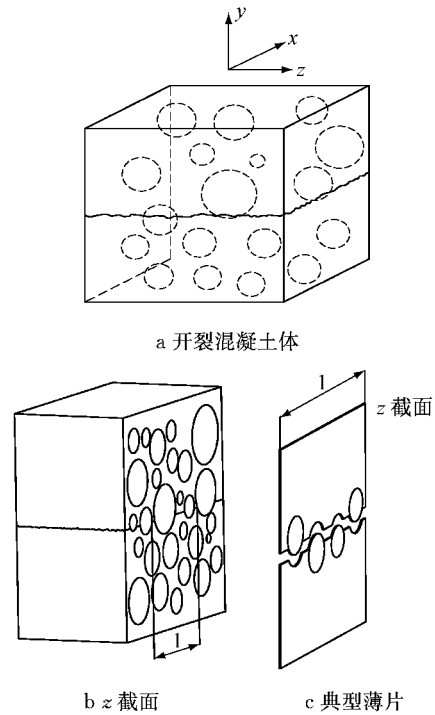


图 8 骨料模型^[12]

Fig.8 Aggregate model^[12]

相应地 Walraven 提出了切片中所截骨料的骨料咬合模型如图 9 所示.图 9 中,骨料中与砂浆接触的曲线在 x 和 y 方向上的投影分别为 a_x 和 a_y , σ_{pu} 和 τ_{pu} 分别为砂浆出现塑性变形时的法向应力和剪应力.图中阴影部分代表出现塑性变形的砂浆. Walraven 把骨料与砂浆接触过程中的摩擦系数 μ 和砂浆出现塑性变形时的法向应力 σ_{pu} 设为模型中的两个调整系数,并建立了相应的理论模型,从而得出了裂缝处应力表达式^[12]如下:

$$\sigma = \sigma_{pu}(\bar{A}_x - \mu \bar{A}_y) \tag{1}$$

$$\tau = \sigma_{pu}(\bar{A}_y + \mu \bar{A}_x) \tag{2}$$

式(1)~(2)中: σ 和 τ 分别为裂缝处的正应力和剪切应力; \bar{A}_x 和 \bar{A}_y 分别为单位裂缝面积下骨料与砂浆接触部分在 X 面和 Y 面上的平均投射面积之和.

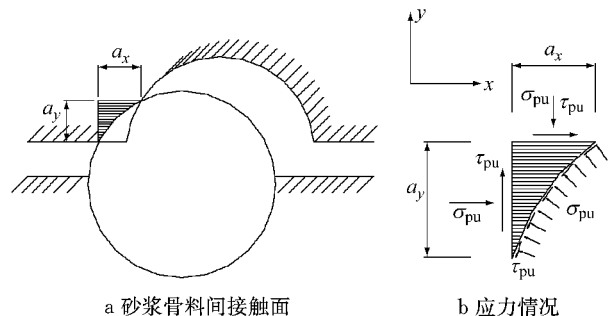


图 9 骨料咬合模型^[12]

Fig.9 Aggregate interlock model^[12]

3.2 再生混凝土分析模型

再生混凝土的内部构造模型如图 10 所示. 图中的界面主要包括新界面和老界面,老水泥砂浆与新水泥砂浆的界面和再生粗骨料内部分裸露的天然骨料与新水泥砂浆的界面分别称为新界面 1、新界面 2,再生粗骨料内天然骨料与老水泥砂浆的界面,称为老界面^[2]. 国内外研究^[13-15]表明,再生混凝土裂缝主要穿过新老砂浆及老界面和新界面 2,在此基础上,本文假定再生混凝土的裂缝面结构如图 11 所示,考虑到部分裸露的天然骨料与新水泥砂浆的界面与普通混凝土的骨料砂浆界面在本质上区别不大,模拟时将二者等同.

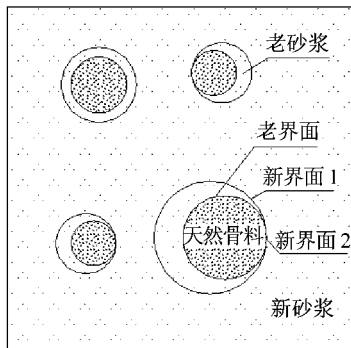


图 10 再生混凝土内部构造模型图
Fig.10 Recycled concrete internal structure model diagram

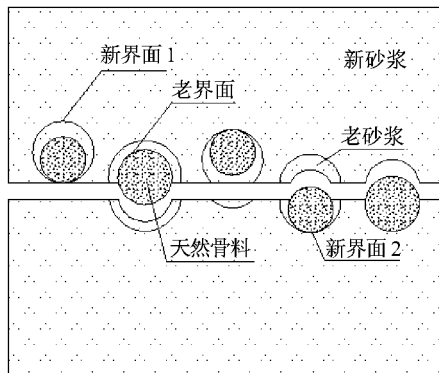


图 11 再生混凝土裂缝面结构
Fig.11 Recycled concrete crack surface structure

从裂缝面结构可得,当裂缝宽度较大时,砂浆之间的接触对于剪力传递贡献不大,所以再生混凝土裂缝面的剪力传递主要来源于裸露出的天然骨料与新砂浆或老砂浆之间的咬合. 因此,图 9 所示的骨料咬合模型以及理论模型(式(1))同样适用于再生混凝土,考虑到凹进裂缝面的新老砂浆分布比例不清楚,故对式(1)中的系数 σ_{pu} 和 μ , 引入新老砂浆的强度等效值 $\sigma_{pu,eq}$ 和摩擦系数等效值 μ_{eq} 两个参数,从而

得到:

$$\sigma = \sigma_{pu,eq} (\bar{A}_x - \mu_{eq} \bar{A}_y) \quad (3)$$

$$\tau = \sigma_{pu,eq} (\bar{A}_y + \mu_{eq} \bar{A}_x) \quad (4)$$

通过推导可以得出裂缝宽度 w 和剪切位移 Δ 下 \bar{A}_x 和 \bar{A}_y 的理论值^[12],然后将相应的 σ 和 τ 的试验值代入式(3)~(4),并对结果进行整理,可以最终求出式中系数 μ_{eq} 和 $\sigma_{pu,eq}$ 的值.

3.3 再生混凝土简化分析模型

通过骨料咬合模型可知:裂缝宽度 w 的增加会造成骨料与砂浆间接触面积减少,并伴随着越来越多的骨料退出工作,相应地裂缝处的剪应力会变小;随着剪切位移的增加,骨料与砂浆间接触面积增大,在剪力传递初期也会有越来越多的骨料进入工作,相应地裂缝处的剪应力会提高.

基于以上分析及本文数据拟合可知,剪应力与裂缝宽度、剪切位移及混凝土强度相关,且裂缝宽度及混凝土强度对其影响为非线性的. 笔者建议的剪应力值 τ 的简化模型如下:

$$\tau = a_1(a_2 - a_3 w^{b_1}) \cdot \Delta \cdot f_c^{b_2} \quad (5)$$

式中: a_1, a_2, a_3, b_1, b_2 均为待定系数; w 为裂缝宽度; Δ 为剪切位移; f_c 为混凝土强度.

参照式(5),对本试验中再生粗骨料取代率 100%的再生混凝土试件(除 R-14a、R-44a、R-54 以外的试件)的剪力传递试验结果进行回归分析,进而可以得到剪应力值 τ 的表达式如下:

$$\tau = 1.211(1.48 - 1.24w^{0.735}) \cdot \Delta \cdot f_c^{0.874} \quad (6)$$

试件 R-14a、R-44a、R-54 的剪应力计算值与试验值的比值的平均值、标准差及计算值与试验值的相关系数见表 4. 从表 4 中可以看出,采用上述简化分析模型(式(6))对 100%再生粗骨料取代率的再生混凝土裂缝处剪应力值进行计算所得的结果与试验结果基本吻合,从而证明了简化分析计算模型拟合效果良好.

表 4 剪应力(量纲一)计算值与试验值的对比
Tab.4 Comparison between the calculated and the experimental values of the shear stress

项目	R-14a	R-44a	R-54
平均值	1.027	0.981	1.034
标准差	0.033	0.044	0.081
相关系数	0.997	0.997	0.995

4 结论

根据本文试验和理论分析的结果,可以得到以

下主要结论:

(1) 再生混凝土裂缝处剪力传递性能总体上与普通混凝土接近, 预裂再生混凝土 push-off 试件的破坏模式基本相同;

(2) 再生混凝土强度越高, 试件的剪力传递强度越强, 但效果并不显著; 相同混凝土强度下, 随着再生粗骨料取代率的提高, 试件剪力传递强度略有降低, 但降低幅度不大;

(3) 约束刚度越大, 试件的剪力传递强度越高; 试验中各试件的剪力传递强度值与规范建议公式计算值基本吻合。

(4) 借鉴 Walraven 的理论, 并充分考虑再生混凝土的细观结构与再生粗骨料的几何模型, 得到了骨料咬合的理论分析模型和再生混凝土简化分析模型。经对比分析证明简化分析模型与试验结果吻合良好。

参考文献:

- [1] 邓寿昌, 张学兵, 罗迎社. 废弃混凝土再生利用的现状分析与研究展望[J]. 混凝土, 2006(11): 20.
DENG Shouchang, ZHANG Xuebing, LUO Yingshe. Abandon the concrete present condition of the reborn exploitation analysis and the research outlook[J]. Concrete, 2006(11): 20.
- [2] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
XIAO Jianzhuang. Recycled concrete [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [3] Esaki Fumiya. Elasto-plastic behavior of recyclable R/C columns[J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1998, 38(6): 301.
- [4] Hansen T C. Recycling of demolished concrete and masonry [R]. London: Spon Press, 1992.
- [5] Topcu I B, Gunean N F. Using waste concrete as aggregate [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7): 1385.
- [6] Walraven J C, Reinhardt H W. Theory and experiments on mechanical behaviour of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading[J]. Heron, 1981, 26(1A):1.
- [7] Walraven J C. Aggregate interlock: a theoretical and experimental investigation [D]. Delft: College of Civil Engineering of Delft University of Technology, 1980.
- [8] Taylor H P. Further test to determine shear stresses in reinforced concrete beams[R]. London: Cement and Concrete Association, 1970.
- [9] Fenwick R C, Paulay T. Mechanisms of shear resistance in concrete beams[J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1968, 94(ST1): 2235.
- [10] Taylor H P. Investigation of forces carried across cracks in reinforced concrete beams in shear by interlock of aggregate [R]. London: Cement and Concrete Association, 1970.
- [11] Taylor H P. Investigation of the dowel shear forces carried by the tensile steel in reinforced concrete beams[R]. London: Cement and Concrete Association, 1970.
- [12] Walraven J C. Fundamental analysis of aggregate interlock[J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1981, 107(11): 2245.
- [13] Larrañaga M E. Experimental study on microstructure and structural behavior of recycled aggregate concrete [D]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2004.
- [14] 宋灿. 再生混凝土抗压力学性能及显微结构分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2003.
SONG Can. Recycled concrete compressive mechanical properties and microstructure analysis[D]. Harbin: College of Civil Engineering of Harbin University, 2003.
- [15] 刘琼. 再生混凝土破坏机理的试验研究和格构数值模拟[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2010.
LIU Qiong. The experiment study and lattice model simulation on the failure mechanism of recycled concrete [D]. Shanghai: College of Civil Engineering of Tongji University, 2010.