

文章编号: 1673-9469 (2018) 02-0075-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.02.017

富含砖粒再生混凝土抗剪性能研究

安新正, 牛薇, 张亚飞, 杨莹莹

(河北工程大学土木工程学院, 河北邯郸 056038)

摘要: 为了研究富含砖粒再生混凝土的抗剪性能, 制备了4组不同配合比的富含砖粒再生混凝土试件, 以28d立方体抗压强度值为变化因素, 在分析立方体抗压强度对抗剪强度影响的基础上, 研究了立方体抗压强度值对剪应力-应变曲线的影响。结果表明: 富含砖粒再生混凝土的剪切破坏形态与普通混凝土相似, 其抗剪强度随着抗压强度的提高呈显著增长趋势; 建立了剪应力-应变的本构方程, 提出了富含砖粒再生混凝土的剪切模量计算式。

关键词: 富含砖粒; 再生混凝土; 抗压强度; 抗剪强度; 剪切模量

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

Study on shear resistance of brick - rich recycled concrete

AN Xinzheng, NIU Wei, ZHANG Yafei, YANG Yingying

(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan, 056038, China)

Abstract: In order to study the shear resistance of brick-rich recycled concrete, four groups with different proportions of brick-rich recycled concrete specimens were prepared. Taking 28d cube compressive strength value as variable, the influence of cube compressive strength on shear stress-strain curve was studied based on the analysis of the effect of cubical compressive strength on shear strength. The results show that the shear failure mode of recycled brick-reinforced concrete is similar to that of ordinary concrete. With the increase of compressive strength, the shear strength of recycled brick-rich recycled concrete shows an obvious increasing trend. Based on the test results, the constitutive equation of shear stress-strain was established and the formula for calculating the shear modulus of brick-rich recycled concrete was proposed.

Key words: brick-rich; recycled concrete; compressive strength; shear strength; shear modulus.

再生混凝土由于具有绿色、环保的建筑意义, 受到很多研究学者的青睐。目前, 大多数的国内外学者对于再生混凝土的研究都集中在再生粗骨料对再生混凝土基本性能的影响方面。据不完全统计, 在大量的建筑垃圾中, 除废弃的混凝土外, 废弃砖粒也占有相当大的比例, 因此对于含废弃砖粒再生混凝土的研究很有必要^[1]。但迄今为止, 对含废弃砖粒再生混凝土的研究也主要集中在其抗压强度方面, 主要针对再生砖粒的掺量, 水胶比等因素对混凝土抗压强度的影响^[2-5]以及再生混凝土抗压强度计算式的适用性问题^[6-7]; 对其抗剪性能的研究鲜有

涉及, 而抗剪强度和剪切变形是混凝土的一项基本性能^[8]。所以, 对含砖粒再生混凝土的抗剪性能的研究具有一定的意义。已有研究成果表明, 混凝土强度对其抗剪性能有着很大的影响, 故本文主要以立方体抗压强度值为主要变化因素, 探讨抗压强度对富含砖粒再生混凝土抗剪强度、剪切变形和峰值应变的影响, 并分析了28d立方体抗压强度与抗剪强度的关系, 对含砖粒的再生混凝土的剪应力-剪应变方程和剪切模量的计算式进行了探讨, 旨在为富含砖粒再生混凝土在工程中的应用提供一定的参考。

收稿日期: 2018-01-20

特约专稿

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(E2015204111); 河北省科学技术研究与发展计划项目(15273609D)

作者简介: 安新正(1963-), 男, 河南镇平人, 博士, 副教授, 研究方向为混凝土结构耐久性理论与设计。

1 富含砖粒再生混凝土基本情况

1.1 主要原材料情况

水泥：采用太行山 P.O425 级普通硅酸盐水泥；粗骨料：结构实验室废弃的混凝土梁和废弃的黏土砖，经颚式破碎机破碎后得到的再生粗骨料；细骨料：采用模度细数为 1.6 的河砂；水：采用邯郸市自来水；粉煤灰：采用 I 级粉煤灰；减水剂：采用聚羧酸高性能减水剂。再生骨料的基本性能见表 1。

1.2 混凝土配合比情况

本试验富含砖粒再生混凝土的配合比配置是基于自由水胶比之上，并结合试验目的考虑了再生粗骨料的吸水性^[9]。具体配合比如表 2 所示。每种配合比下配置的再生混凝土分别用 ZRC1、ZRC2、ZRC3 和 ZRC4 表示，在标准养护条件下，四组配合比对应的 28 d 立方体抗压强度值分别为 17.82、23.01、26.73 及 32.02 MPa。本试验中，粉煤灰掺量为水泥用量的 10%，减水剂掺量为胶凝材料用量的 1.2%。

2 试件设计与试验方法

2.1 试件设计与制作

根据文献 [10] 可知，四点受力的等高变宽梁能更好地接近纯剪应力状态且在纯剪切区没有缺口，避免了应力集中现象的发生，故本实验采用四点受力的等高变宽梁来进行抗剪性能的分析^[8]。试件制作简单容易，形状规则，且试件中部厚度较薄，使梁易于在中部发生剪切破坏；在试件梁的两端布置有钢筋，防止在两端处梁发生受弯破坏。试件的截面尺寸及配筋如图 1 所示。试件制作数量：共浇筑 4 组不同配合比的试件，每个配合比下浇筑 3 根再生混凝土梁。

2.2 基本试验方案

本实验采用万能试验机进行逐级加载，从零荷载开始一直加载至试件的破坏，基于预计估算荷载值，取 1 kN 作为初荷载，每级加载量不超过最大加载量的 20%，本次试验取 4 kN 作为荷载增量逐级加载，每级加载的持荷时间为 3 min，接近极限荷载时

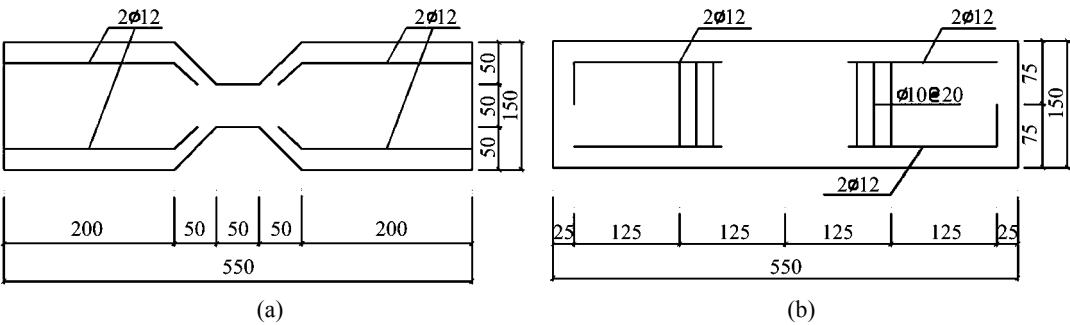


图 1 试件截面尺寸及配筋图 (单位: mm)
Fig.1 specimen cross-section size and reinforcement (unit: mm)

表 1 再生骨料的基本性能
Tab.1 Basic properties of recycled aggregate

再生粗骨料名称	粒径范围 /mm	级配	堆积密度 /(kg·m ⁻³)	24 h 吸水率 /%	含泥量 /%
含砖粒再生粗骨料	5 ~ 20	连续级配	1 295	11.7	0.875

表 2 设计配合比
Tab.2 The design of mix ratio (单位: kg/m³)

试件编号	试验材料			
	水	水泥	河砂	再生粗骨料
ZRC1	161	196	697	986
ZRC2	161	264	671	966
ZRC3	161	296	641	922
ZRC4	161	327	629	905

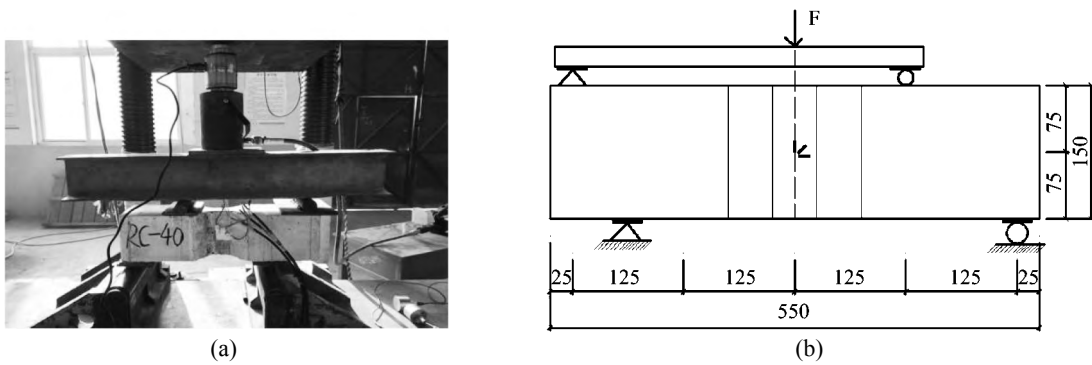


图2 试件加载装置图 (单位: mm)

Fig.2 Test piece loading device diagram (unit: mm)

缩小加载级距,改用荷载增量为1 kN 加载直至裂缝完全贯穿,在此期间利用裂缝显微镜详细观测裂缝的发展情况^[11]。应变片粘贴在梁纯剪区中部的0°、45°和90°方向,在试验进程中用应力-应变采集仪实时保存三个方向的应变值。

按图2所示加载装置,荷载传感器得出的值是 F ,则试件中间截面的剪力是 $F/3$ (令 $V=F/3$),令试件破坏时的剪力为 V_P ,考虑到剪力分布的不均匀,文献[10]给出的四点受力等高变宽梁的抗剪强度计算式,则本试验中的 τ 和 τ_P 见式(1)。

$$\tau = 1.2 \frac{V}{A}; \quad \tau_P = 1.2 \frac{V_P}{A} \quad (1)$$

$$\gamma = \varepsilon_1 - \varepsilon_3 \quad (2)$$

$$\text{令 } H = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2}; \quad I = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{2}; \quad J = \frac{2\varepsilon_{45} - \varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{2} \quad (3)$$

$$\varepsilon_1 = H + \sqrt{I^2 + J^2} \quad \varepsilon_3 = H - \sqrt{I^2 + J^2} \quad (4)$$

式中: γ 为剪应变; ε_1 为主拉应变; ε_3 为主压应变; A 为试件的中间截面积。

3 试验结果与分析

3.1 破坏特征

对于不同配合比下的再生混凝土梁,其剪切破坏形态与由天然骨料配置的混凝土的破坏形态基本一致。首先是在梁的纯剪切区段的中部出现一条斜裂缝,裂缝方向与梁的中轴轴线夹角大致呈45°角,随着荷载的增加,裂缝不断朝着梁端和梁底发展,当达到极限荷载以后,到达梁顶和梁底方向的裂缝呈现出竖直状态,从而试件被剪切成两段,但梁两侧的混凝土并无明显的破坏。试件的裂缝和破坏形态见图3。

在试验不断的加载过程中,可以发现试件最明显的破坏特征就是裂缝的出现和发展。对于ZRC2的再生混凝土梁来说,当荷载达到30.6 kN时,在

梁的纯剪区段处开始出现裂缝,随着荷载的不断增大,裂缝也不断向梁顶、底部发展。当达到极限荷载36 kN时,混凝土梁试件最终会延着与轴线大约呈45°方向的斜裂缝破坏。其他配合比的梁的破坏形式类似于ZRC2的梁,同样是在接近于极限荷载的85%时,在梁的纯剪区部位出现了裂缝,往后,随着荷载的逐级施加,裂缝不断发展,在达到极限荷载时,梁会出现嘶嘶的响声,最终脆断。

3.2 立方体抗压强度与抗剪强度关系

对试验数据进行计算分析可得到立方体抗压强度与抗剪强度关系如图4所示。由图4可知,与普通混凝土类似,含砖粒再生混凝土的抗剪强度随着立方体抗压强度的增加也是逐渐递增的。在对数据进行分析 and 处理后,参照《混凝土结构设计规范》(GB50010-2011)和文献[10, 12]用最小二乘法经回归分析拟合可得到抗剪强度的回归式为



图3 试件破坏形式图

Fig.3 The diagram of specimen destruction form

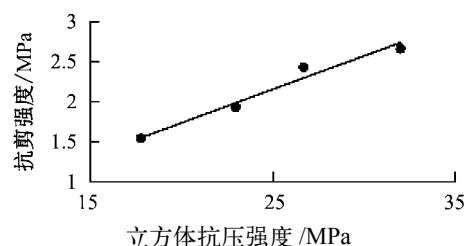


图4 抗剪强度与抗压强度关系曲线

Fig.4 Shear strength and compressive strength curve

$$\tau_p = 0.091 f_{cu}^{0.981} \quad (5)$$

由式 (5) 可知, 对于含砖粒的再生混凝土来说, 抗剪强度与立方体抗压强度值的关系符合幂函数关系, 相关系数为 0.973。由图 4 可知, 试验值与理论值比值平均为 1.0, 均方差为 0.04, 变异系数为 0.04, 说明理论值与试验值吻合较好, 式 (5) 可以为实际工程提供参考。过镇海教授通过进行抗剪试验和单轴抗拉试验得出, 混凝土的抗剪强度近似于其单轴抗拉强度。文献 [10] 中通过试验证明再生混凝土在纯剪应力状态下, 抗剪强度约等于其轴心抗拉强度。本试验中通过对试件的破坏形态和裂缝走势分析可知试件的主拉 / 压应力方向与受剪面大约呈 45° 夹角, 裂缝又垂直于主拉 / 压应力的方向, 所以在纯剪状态下, 试件的剪切破坏取决于其主拉应力, 说明抗剪强度近似于单轴抗拉强度同样适用于含砖粒的再生混凝土。

3.3 剪切性能分析

图 5 为不同配合比下的富含砖粒再生混凝土峰值应变与抗剪强度关系曲线, 每条曲线取值均为实测 3 个试件的平均值。由图 5 可知, 含砖粒再生混凝土的峰值主拉应变大于其峰值主压应变, 这种变化趋势与普通混凝土相似。对数据进行分析处理后得出其 $|\varepsilon_{1p} / \varepsilon_{3p}| = 1.04 \sim 1.65$, 该比值与抗剪强度呈

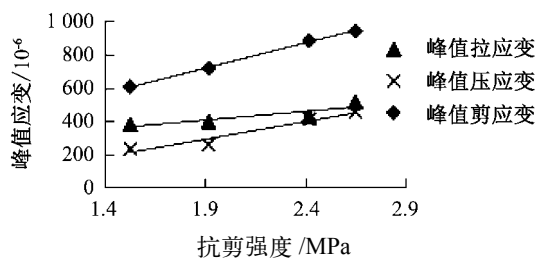


图 5 峰值应变与抗剪强度关系曲线

Fig.5 Peak strain and shear strength curve

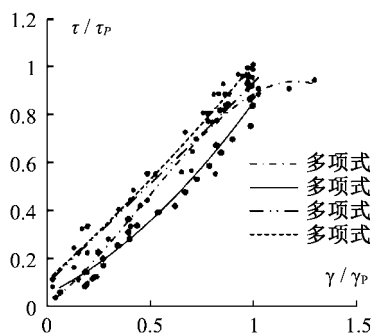


图 6 不同抗压强度下相对剪应力 - 应变曲线图

Fig.6 Relative shear stress-strain curves at different compressive strength

反比关系, 这是因为对于强度比较低的混凝土来说, 其抗剪强度也比较低, 混凝土微裂缝开展较早, 主拉应变发展得比较充分, 所以此比值比较大。对于强度比较高的混凝土, 裂缝开展比较晚, 主拉应变发展不充分, 所以比值偏小。基于试验数据经整理并利用最小二乘法进行回归分析可得到式 (6) — (8)。

$$\varepsilon_{1p} = (106.11 \tau_p + 202.73) \times 10^{-6} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{3p} = (212.97 \tau_p - 115.93) \times 10^{-6} \quad (7)$$

$$\gamma_p = (319.08 \tau_p + 86.8) \times 10^{-6} \quad (8)$$

式中: ε_{1p} 为峰值主拉应变; ε_{3p} 为峰值主压应变; γ_p 为峰值剪应变。

3.3.1 剪应力 - 应变本构方程

结合文献 [10, 13] 中的混凝土本构关系方程, 混凝土单轴受压应力 - 应变曲线方程是三次多项式, 受拉曲线是六次多项式, 而混凝土的变形值和曲线形状都介于两者之间。经过数据归一化处理 and 回归分析, 用最小二乘法拟合可得出不同配合比下再生混凝土的受剪曲线方程为五次多项式 (其中 $y = \tau / \tau_p$, $x = \gamma / \gamma_p$) 如式 (9) 所示。

$$y = ax^5 + 2.68ax^4 - 2.46ax^3 + 0.89ax^2 - 0.16ax \quad (9)$$

式中: a 为多项式系数, 与再生混凝土配合比有关 [12], a 的取值见表 3。

表 3 a 的参考取值

Tab.3 The reference value of a

试件编号	ZRC1	ZRC2	ZRC3	ZRC4
参数 a	2.25	11.20	10.51	10.58

由图 6 可知, 试验值与理论值吻合较好。说明式 (9) 可以作为富含砖粒再生混凝土剪切变形本构模型来参考, 可用于结构或构件有限元的非线性分析。

3.3.2 剪切模量计算式的建立

富含砖粒再生混凝土的剪切模量可以从式 (9) 中的受剪曲线方程中推导得到, 富含砖粒再生混凝土的割线剪切模量 G_s 和切线剪切模量 G_t 为:

$$G_s = \frac{\tau}{\gamma} = G_{sp} \left[0.16a - 0.89a \left(\frac{\gamma}{\gamma_p} \right) + 2.46a \left(\frac{\gamma}{\gamma_p} \right)^2 + a \left(\frac{\gamma}{\gamma_p} \right)^4 \right] \quad (10)$$

$$G_t = \frac{d\tau}{d\gamma} = G_{sp} \left[0.16a - 1.78a \left(\frac{\gamma}{\gamma_p} \right) + 7.38a \left(\frac{\gamma}{\gamma_p} \right)^2 - 10.72a \left(\frac{\gamma}{\gamma_p} \right)^3 + 5a \left(\frac{\gamma}{\gamma_p} \right)^4 \right] \quad (11)$$

式中: G_{sp} 为富含砖粒再生混凝土的峰值割线剪切模量。

按 G_{sp} 定义由式 (5) 和式 (8) 可得:

$$G_{sp} = \frac{\tau_p}{\gamma_p} = \frac{10^6}{319.08 + 86.8/\tau_p} = \frac{10^6}{319.08 + 953.8/f_{cu}^{0.981}} \quad (12)$$

富含砖粒再生混凝土的初始剪切模量 G_0 可使 $\gamma/\gamma_p=0$, 将其代入式 (11) 中可得:

$$G_0 = 0.16aG_{sp} \quad (13)$$

剪切模量试验值与理论值的对比关系如图 7 所示, 由图 7 可知, 试验值与理论值的最大误差为 4.6%, 在允许误差范围内。可知峰值剪切模量与初始剪切模量的实验值与理论值吻合程度都较好, 对于强度等级为 ZRC1 的富含砖粒再生混凝土来说, 由图 7(b) 可知, 其初始剪切模量值发生了突变, 造成其发生的原因可能有以下两方面: 一方面可能由于 ZRC1 的剪切模量试验取值在读数时存在着系统误差; 另一方面受剪曲线方程中参数 a 的取值存在一定的误差。

4 结论

1) 富含砖粒再生混凝土的剪切破坏形态与普通混凝土类似。其抗剪强度与 28 d 立方体抗压强度呈幂函数关系, 且抗剪强度随着立方体抗压强度的增

加而增加。

2) 富含砖粒再生混凝土的峰值拉、压、剪应变随着 28 d 立方体抗压强度值的提高而提高, 且不同抗压强度下的富含砖粒再生混凝土的峰值拉、压、剪应变具有一定的离散性, 随着抗压强度的提高, 离散性越来越小。

3) 根据试验结果建议了富含砖粒再生混凝土的剪应力-应变曲线方程, 在同等应力水平下, 富含砖粒再生混凝土比普通混凝土变形大。探讨了富含砖粒再生混凝土的剪切模量计算式, 试验值与理论值吻合较好, 可为实际工程提供参考。

参考文献:

- [1] 安新正, 牛薇, 张亚飞, 等. 含砖粒再生混凝土基本性能研究 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2017, 34(1): 30-33.
- [2] 王新永, 李云霞, 李秋义. 再生混凝土的用水量和强度试验研究 [J]. 新型建筑材料, 2006 (12): 13-15.
- [3] 王江, 薛燕飞, 周辉. 再生混凝土抗压强度研究 [J]. 混凝土, 2006 (7): 47-49.
- [4] 肖建庄, 雷斌, 袁飏. 不同来源再生混凝土抗压强度分布特征研究 [J]. 建筑结构学报, 2008, 129(15): 94-100.
- [5] PADMINI A K, RAMAMURTHY K, MATHEWS M S. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2009 (23): 829-836.
- [6] 金昌, 王雪萍, AKINKUROLERE Olufunke Olanike, 等. 再生混凝土力学性能指标换算关系试验研究 [J]. 混凝土, 2008(11): 37-39.
- [7] XIAO J, LIA J, ZHANG C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading [J]. Cement and Concrete Research, 2005 (35): 1187-1194.
- [8] 黄莹, 邓志恒, 罗延明, 等. 再生混凝土剪切性能试验研究 [J]. 混凝土, 2010(2): 2-4.
- [9] GB/T 50080-2002, 普通混凝土拌合物性能试验方法标准 [S].
- [10] 过镇海. 混凝土的强度和变形 - 试验基础和本构关系 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [11] GB/T 50081-2002, 普通混凝土力学性能试验方法标准 [S].
- [12] 过镇海. 常温 and 高温下混凝土材料和构件的力学性能 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [13] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 125-245.

(责任编辑 王利君)

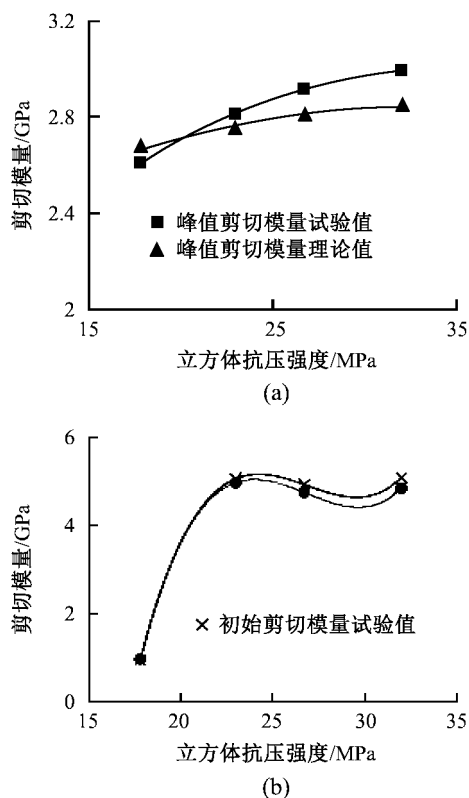


图 7 剪切模量试验值与理论值对比曲线

Fig.7 Comparison of shear modulus test value and theoretical value