

不同尺寸下再生骨料混凝土直剪性能及其损伤本构

陈宇良^{1,2}, 刘 杰¹, 吴辉琴¹, 姜 锐¹, 晏 方¹

(1. 广西科技大学土木建筑工程学院, 广西 柳州 545006; 2. 柳州东方工程橡胶制品有限公司, 广西 柳州 545005)

摘 要: 以再生粗骨料取代率、试件尺寸为变化参数, 设计并制作了 45 个再生骨料混凝土试件。通过直剪试验, 观察了不同尺寸下再生骨料混凝土的破坏形态, 分析了取代率和试件尺寸对再生骨料混凝土直剪性能和损伤本构的影响情况, 建立了不同尺寸下再生骨料混凝土的损伤本构模型。结果表明: 峰值变形、延性系数均具有明显的尺寸效应, 普通混凝土损伤发展速度变慢, 再生骨料混凝土损伤发展变快; 随取代率的增加, 峰值变形先减小后增大, 延性系数先增大后减小, 损伤发展规律与取代率不成线性关系。采用的本构模型能较好地反映不同尺寸再生骨料混凝土的剪切荷载-变形关系以及损伤演化过程。

关键词: 再生骨料; 破坏机理; 尺寸效应; 直剪性能; 损伤本构

中图分类号: TU528.01; TU317.1 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)02-0388-08

网络出版时间: 2022-01-19



Direct Shear Behavior and Damage Constitutive Model of Recycled Aggregate Concrete at Different Sizes

CHEN Yuliang^{1,2}, LIU Jie¹, WU Huiqin¹, JIANG Rui¹, YAN Fang¹

(1. College of Civil and Architecture Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, Guangxi, China;

2. Liuzhou Dongfang Engineering Rubber Products Co., Ltd., Liuzhou 545005, Guangxi, China)

Abstract: To investigate the effects of replacement rate and sample size on the direct shear performance and damage of recycled aggregate concrete (RAC), 45 RAC specimens were manufactured. The failure modes of RAC with different sizes were characterized, and the effects of replacement rate and specimen size on the direct shear performance and damage constitutive model of RAC with different sizes were investigated via direct shear tests. The results show that the peak deformation and ductility coefficient have a size effect, the damage development rate of natural concrete becomes slow, and the damage development rate of RAC becomes faster. The peak deformation firstly decreases and then increases, while the ductility coefficient firstly increases and then decreases with the increase of the replacement rate. The damage development law does not have a linear relationship with the replacement rate. The constitutive model can well reflect the shear load-deformation relationship and the damage evolution process of the RAC with different sizes.

Keywords: recycled aggregate; failure mechanism; size effect; direct shear performance; damage constitutive

再生骨料混凝土既能实现废弃混凝土的循环利用, 又能减轻建筑垃圾因填埋、堆放对环境产生的负担, 国内外学者对其进行了大量的研究^[1-2]。再生骨料通过机械破碎获得, 此过程会导致骨料本身存在一定的微裂纹, 使得再生骨料混凝土存在天然的损伤, 且其表面黏附着水泥基体, 使再生粗骨料表

面的粗糙度和吸水率与天然粗骨料不同^[3]。另一方面, 实际结构中构件尺寸较大, 受试验条件制约, 难以进行足尺试验, 只能进行缩尺试验, 因此, 开展不同尺寸再生骨料混凝土的研究, 对于指导实际工程应用具有深远意义。

张丽等^[4]进行了不同尺寸再生骨料混凝土抗压

收稿日期: 2021-07-19。 修订日期: 2021-10-19。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51908141), 中国博士后基金项目(2021M693854), 广西自然科学基金(2019GXNSFBA245030) 广西科技大学博士基金项目(校科博 18Z09)。

第一作者: 陈宇良(1987—), 男, 博士, 副教授。

通信作者: 吴辉琴(1965—), 女, 硕士, 教授。

Received date: 2021-07-19. Revised date: 2021-10-19.

First author: CHEN Yuliang (1987—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: ylchen@gxust.edu.cn

Correspondent author: WU Huiqin (1965—), female, Master, Professor.

E-mail: whq6329@163.com

强度试验, 得出再生骨料混凝土抗压强度尺寸效应明显, 随取代率增加, 再生骨料混凝土抗压强度受尺寸效应影响降低; 杨海涛等^[5]对再生骨料混凝土抗压、劈裂强度尺寸效应进行研究, 发现再生骨料混凝土抗压强度尺寸效应较普通混凝土尺寸效应明显, 随试件尺寸增大, 劈拉强度减小。Wang 等^[6]对再生骨料混凝土的尺寸效应进行研究, 发现再生骨料混凝土取代率对抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量的尺寸效应影响不大, 试件截面尺寸对抗压强度的尺寸效应比长细比的影响更显著。陈宇良等^[7-8]对不同取代率再生骨料混凝土的直剪变形性能及损伤进行了研究, 发现剪切模量随取代率的增加逐渐减小, 延性变形增加, 损伤耗能增大。Liu 等^[9]研究了再生骨料类型对再生骨料混凝土抗剪强度、峰值应变及剪切模量的影响, 并建立了再生骨料混凝土应力-应变本构模型。

综上, 再生骨料混凝土的研究大多集中在抗压、劈裂抗拉等方面, 剪切性能为混凝土基本的力学性能指标之一, 关于其研究尚少, 且传统的剪切试验技术, 所得特征参数相差悬殊^[10]。因此, 为研究不

同尺寸下再生粗骨料混凝土直剪性能及损伤机理, 提出能够较好模拟再生骨料混凝土直剪非线性行为和损伤演化过程的本构模型, 对 3 种不同尺寸、5 种不同再生粗骨料取代率的混凝土试件进行直剪试验研究, 以期对再生骨料混凝土理论研究提供参考。

1 实验

1.1 原材料

胶凝材料: P·O 42.5 硅酸盐水泥; 细骨料: 河砂, 细度模数 2.38, II 区中砂, 表观密度为 2 580 kg/m³; 再生粗骨料: 以 C30 废弃碎石类混凝土为骨料来源, 经鄂式破碎机破碎、筛分和清洗后得到再生粗骨料, 粒径 5~20 mm, 连续级配; 天然粗骨料: 碎石, 粒径 5~20 mm, 连续级配; 拌合用水: 城市自来水。

1.2 粗骨料物理性能试验

按照国家标准规范《建筑用卵石、碎石》(GB/T 14685—2011)规定的方法, 分别测试天然粗骨料(NCA)、再生粗骨料(RCA)的物理性能, 结果见表 1。

表 1 粗骨料基本物理性能
Table 1 Physical properties of coarse aggregates

Coarse aggregate	w(Water)/%	w(Water absorption)/%	Apparent density/(kg·m ⁻³)	Stacking density/(kg·m ⁻³)	w(Crushing indicators)/%
NCA	0.10	0.31	2 714	1 412	19.89
RCA	0.72	1.68	2 579	1 274	22.80

w is mass of fraction.

1.3 配合比设计

配合比设计参照 JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》进行设计, 以取代率为 0 即普通混凝土为基准混凝土, 名义水灰比取 0.55, 考虑再生骨料吸水率高的特点, 加入附加用水进行补偿, 其用量取再生粗骨料饱和吸水率与再生粗骨料质量的乘积。配合比设计时, 保持其它成分不变, 仅改变再生粗骨料与天然骨料的比例。再生骨料混凝土配合比设计见表 2。

1.4 试件设计与制作

以再生骨料取代率 r (0、30%、50%、70%、100%), 试件尺寸 m (150 mm×150 mm×150 mm、150 mm×150 mm×200 mm、200 mm×200 mm×200 mm) 为变化参数, 每组设计 3 个试件, 共 15 组 45 个试件。

1.5 加载装置与加载方案

直剪试验在 RMT-301 试验机上完成。剪切盒由上剪切盒、下剪切盒两部分组成, 剪切盒最右端

固定有大刚度的圆弧形自调杆以降低试验过程中试件偏心产生的弯矩。试件尺寸与剪切盒内空尺寸基本一致, 试件紧贴剪切盒确保混凝土试件在安装和受力过程中不会发生偏位, 从而有效减轻旋转效应的影响。剪切装置与机体其余部分的接触面之间装有减摩滚动体, 可有效减轻试验中摩擦效应的影响。

表 2 再生骨料混凝土配合比
Table 2 Mix proportions of RAC

$r/\%$	Mix proportion/(kg·m ⁻³)						f_{cu}/MPa
	C	W	WA	S	NCA	RCA	
0	353.9	195.0	0.0	666.4	1 184.7	0.0	30.9
30	353.9	201.0	6.0	666.4	829.3	355.4	30.6
50	353.9	205.0	10.0	666.4	592.4	592.4	27.6
70	353.9	208.9	13.9	666.4	355.4	829.3	25.7
100	353.9	214.9	19.9	666.4	0.0	1 184.7	26.7

Notes: r —Replacement rate; C—Cement; W—Water; WA—Additional water; S—Sand; NCA—Natural coarse aggregate; RCA—Regenerate coarse aggregate; f_{cu} —Cube compressive strength.

试验前,对剪切盒的垂直和水平方向分别施加预荷载,以消除试验装置之间的孔隙;预加载完成后,采用位移控制的加载制度进行试验,当试件剪力变化趋于稳定时停止试验,位控的加载速率为 0.02 mm/s 。

2 结果与讨论

2.1 破坏形态及剪力-变形全曲线分析

2.1.1 破坏形态 图 1 为再生骨料混凝土典型的直剪破坏形态(黄圈内为粗骨料剪断面,红圈内为再生骨料及水泥基碾压破碎成的碎屑)。由图 1 可见,再生骨料混凝土直剪破坏形态与普通混凝土类似,破坏形式为骨料与水泥基体之间黏结破坏以及粗骨料本身的剪断破坏,属于典型的脆性破坏。直剪破坏后试件正面为一条平直水平贯穿裂缝,侧面近似为一条倾斜的贯穿裂缝,水平倾角随取代率增加略微降低。再生骨料混凝土剪切破坏后碎屑较多,普

通混凝土中剪切破坏后碎屑较少,原因在于再生骨料表面附着水泥基体,内部存在微裂纹,破坏时再生骨料混凝土产生的损伤积累较多,故破坏后碎屑增多。

采用裂缝水平倾角 α (侧面剪切裂缝中裂缝最高点,最低点的差值与侧面长度的比值的正切值对应的角度)来描述侧面贯穿裂缝角度,水平倾角产生的原因可能在于受剪过程中试件正面宏观主裂缝形成后侧面裂缝还未完全贯穿,在侧面裂缝贯穿过程中先剪断的骨料及水泥基残留在剪切面上造成剪切面的粗糙度增加,理论上剪切面(试件中部平面)为直剪薄弱面,但是当剪切面粗糙度增加后薄弱面会随着水平变形的增加而不断向上延伸,导致试件破坏后侧面裂缝会有一定的水平倾角;CRAC 试件裂缝水平倾角约为 RAC 的 1.53 倍,LRAC 试件裂缝倾角为 CRAC 试件的 1.24 倍,故随着试件尺寸增大,裂缝水平倾角随之增加,这是因为随着试件尺

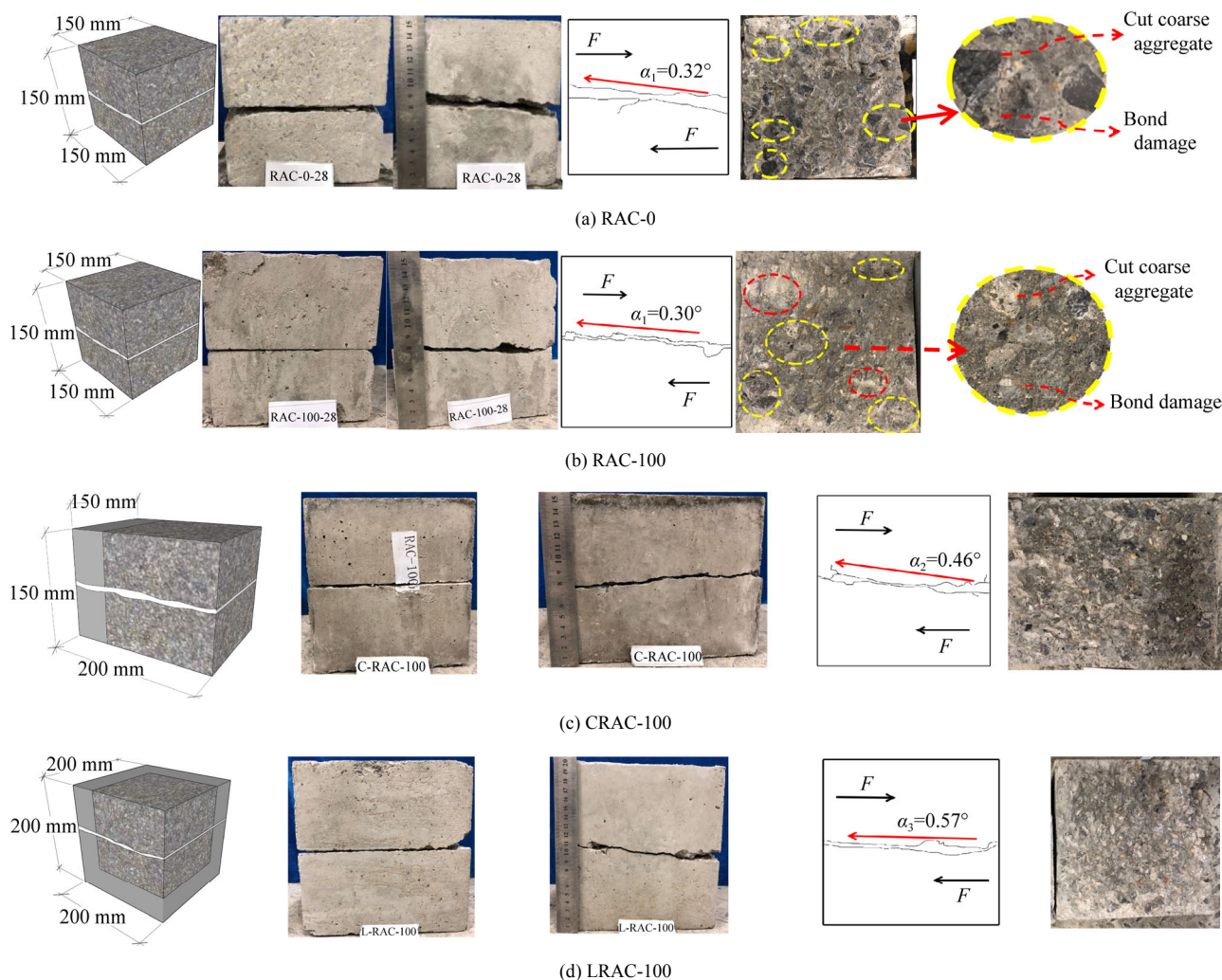


图 1 不同尺寸再生骨料混凝土直剪破坏形态

Fig. 1 Direct shear failure patterns of RAC with different sizes

寸增大, 剪切面也随之增大, 残留的骨料及水泥基愈多, 剪切面则越粗糙, 使得试件薄弱面向上延伸的程度加剧, 宏观上则表现为随尺寸增加, 裂缝水平倾角增加。

2.1.2 再生骨料混凝土剪力-变形全曲线 图 2 为不同取代率、尺寸的再生骨料混凝土试件剪力-变形曲线及典型剪力-变形曲线。由图 2 可见, 不同取代率、不同尺寸下的剪力-变形全曲线的变化规律相似均经历了弹性阶段、弹塑性阶段、下降阶段和收敛阶段。(1) 弹性阶段(微裂纹扩展 OA 段): 剪力范围为从开始加载至 60% 的峰值剪力, 剪力-变形曲线呈现出线性增长的关系, 此阶段, 主要由黏聚力抵抗剪切力, 水泥基体及水泥基体与粗骨料的界面开始形成微裂缝, 未出现肉眼可见裂缝。(2) 弹塑性阶段(裂缝稳定发展 AB 段): 剪力范围为 60%~100% 的峰值荷载, 剪力-变形曲线向上微凸, 主要由黏聚力、骨料咬合力抵抗剪力, 骨料咬合力占主导地位。剪切界面上水泥基体微裂缝快速发展, 剪切面上粗骨料内部开始出现微裂纹。当黏聚力、骨料咬合力达到最大时, 剪力达到峰值。(3) 下降段(裂缝失稳 BC 段): 剪力范围从峰值剪力下降到峰值剪力的 10% 左右。阶段前期, 主要由骨料咬合力抵抗剪力, 随着剪切变形的增加, 剪切面上水泥基体和骨料内部微裂纹不断扩展延伸逐渐形成一条贯穿直裂缝, 剪切界面上砂浆-骨料、骨料-骨料的联系逐渐消失, 剪力迅速降低, 试件被剪断; 阶段后期, 由少部分骨料咬合力和界面摩擦力共同抵抗剪力, 随着剪切变形的增加, 骨料咬合力逐渐消失, 剪力降低速度变慢。(4) 收敛段(CD 段): 剪力下降缓慢, 试件完全破坏, 剪力由剪切面上界面摩擦力抵抗。

随着取代率的增加, 峰值剪力、初始切线刚度随之减小, 峰值变形随之增大; 随着试件尺寸增加, 峰值剪力、初始切线刚度随之增加, 峰值变形随之减小。说明再生骨料混凝土剪力-变形全曲线具有较为明显的尺寸效应, 原因在于受剪过程中尺寸越大剪切面的面积越大, 直剪作用下尺寸大的试件一旦起裂, 则裂缝发展速度会明显大于尺寸小的试件, 宏观主裂缝出现的时间早于尺寸小的试件, 此外大尺寸试件的脆性破坏特征较小尺寸试件更加明显。

2.2 直剪变形性能分析

2.2.1 再生骨料混凝土峰值变形 图 3 给出了各个尺寸再生骨料混凝土峰值点对应的峰值变形 d_p , 图中 A 表示不同尺寸再生骨料混凝土试件剪切面面积, 如: 150 mm×150 mm×200 mm 试件剪切面面积

为 $300 \times 10^2 \text{ mm}^2$ 。由图 3 可见, 再生骨料混凝土峰值变形受取代率和尺寸的影响显著。RAC 试件随取代率 r 增大, d_p 逐渐增大, 这是因为再生粗骨料表面生骨料混凝土中的胶凝体含量, 导致试件峰值变形粘附水泥基, 实际上相当于在一定程度上增加了再有所增大^[12]。CRAC 试件 d_p 在取代率 $r \leq 50\%$ 时逐渐降低, $r > 50\%$ 时 d_p 不断增大, 较普通混凝土最多降低 14%, 最多增大 27%; LRAC 试件 d_p 也呈现先降低后增大

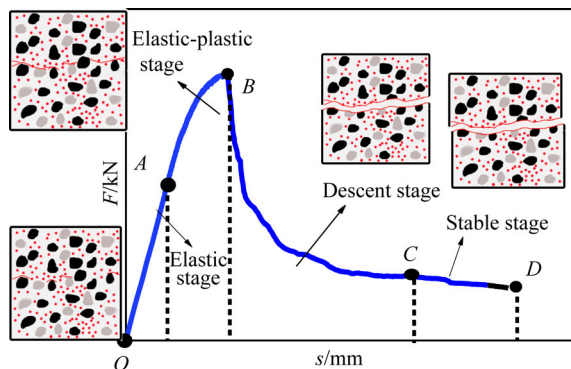
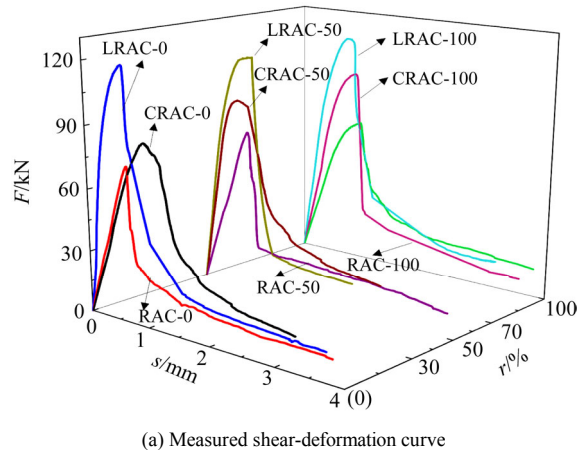


图 2 再生混凝土剪力变形曲线
Fig. 2 Shear deformation curves of RAC

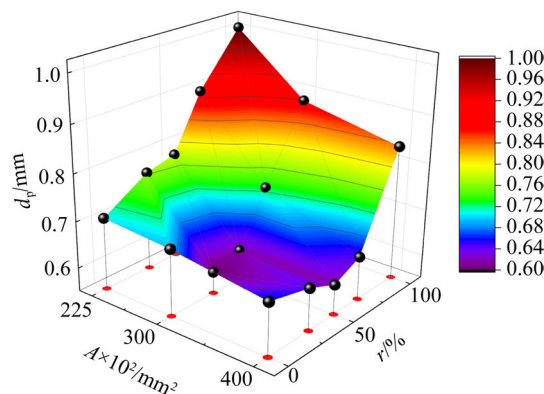


图 3 再生骨料混凝土峰值变形
Fig. 3 Peak deformation of different sizes

的趋势,较普通混凝土最多降低 7.4%,最多增大 26%,原因在于再生粗骨料内部存在较多微裂纹,在受力时使得试件承压面的约束作用降低,加速混凝土的破坏,导致 d_p 降低,但粘附的水泥基会使 d_p 有所增大,上述两方面在再生骨料混凝土受力变形过程中同时存在,互相抵消,因此出现 d_p 随取代率变化增大或减小的现象。

对于相同取代率、不同尺寸下的再生骨料混凝土,随试件尺寸增大,峰值变形不断减小,CRAC 试件峰值变形较 RAC 试件平均降低 15.1%,LRAC 试件峰值变形较 CRAC 试件平均降低 2.7%,原因在于试件的尺寸越大脆性破坏特征越明显^[11]且受剪过程中尺寸越大承剪面的面积越大导致微裂纹的扩展速度越快,从而宏观主裂缝或裂缝出现的时间提前,导致整个结构过早失效。

2.2.2 再生骨料混凝土变形延性 延性是衡量材料变性能力的重要指标,采用延性系数 μ_c 表述再生骨料混凝土试件直剪状态下的延性变形能力。 μ_c 为再生骨料混凝土初始屈服变形 y_s (上升段 85%峰值剪力对应的变形)与再生骨料混凝土破坏峰值变形 u_s (下降段 85%峰值荷载对应的变形)的比值。

$$\mu_c = \frac{y_s}{u_s} \quad (1)$$

图 4 给出了不同尺寸再生骨料混凝土试件的延性系数。由图 4 可见,取代率对延性系数影响较大,随着取代率 r 的增大, μ_c 均先增大后减小,总体上大于普通混凝土。RAC 试件以取代率 r 为 30%为分

界点, μ_c 较普通混凝土最多提高 30.1%, CRAC、LRAC 试件 μ_c 以取代率 r 为 50%为分界点,分别较普通混凝土最多提高 15.3%、16.2%。

由图 4 可见, CRAC 试件延性系数较 RAC 试件平均提高 15.0%, LRAC 试件延性系数较 CRAC 平均提高 7.2%,可见,延性系数具有明显的尺寸效应。

2.3 损伤演变过程分析

2.3.1 损伤变量及表达式的确定 为反映不同尺寸效应下再生骨料混凝土直剪损伤演变,通过损伤变量 D 进行分析,试件在直剪状态时 $D=0$ 对应无损状态,当 D 趋于 1 时对应试件已发生相对滑移,阻碍剪切变形发展的仅为剪切面上的界面摩擦力,试件完全破坏。参考文献^[13]提出的损伤变量表达式,可得直剪作用下的损伤变量如下:

$$D = 1 - \frac{G_r s_e^2}{G_0 s^2} = 1 - \frac{F_r \sqrt{2G_0 W_p}}{G_0 s^2} \quad (2)$$

式中: G_r 为任意点的剪切变形模量(kN/mm); G_0 为初始变形模量(kN/mm),取剪切荷载-变形曲线上上升段 0.4 倍峰值荷载处的割线模量; s_e 为受剪过程中的弹性变形; s 为受剪过程中荷载-变形曲线中任意点的实测变形; F 为受剪过程中任意点的剪切力; W_p 为任意点的应变能。

直剪作用下刚度退化与应变能的关系式为:

$$\frac{G_r}{G_0} = \frac{F}{\sqrt{2G_0 W_p}} \quad (3)$$

W_p 采用微分近似下式计算:

$$W_p = \int_0^s F_r ds \approx \sum_{\xi} \frac{F_{r\xi} + F_{r\xi-1}}{2} (s_{\xi} - s_{\xi-1}) \quad (4)$$

式中: $F_{r\xi-1}$ 与 $F_{r\xi}$ 为某一分段前后的剪切力; $s_{\xi-1}$ 与 s_{ξ} 为某一分段前后剪切力所对应的剪切变形。

直剪作用下弹性、塑性变形可通过下式计算。

$$s_e = \frac{F}{G_r} \quad s_d = s - s_e \quad (5)$$

式中: s_d 为任意点的塑性变形。

2.3.2 不同尺寸对再生骨料混凝土损伤的影响

图 5 给出了不同尺寸再生骨料混凝土的损伤演化过程。由图 5 可以看出:损伤演变具有明显尺寸效应,对于普通混凝土,大尺寸试件损伤发展速度慢;对于再生骨料混凝土,大尺寸试件损伤发展速度快。有利因素为大尺寸试件粗骨料更多,单位时间内损伤量增加不大,相对损伤量变小,在相同加载速率下损伤较慢;不利因素为再生骨料混凝土内

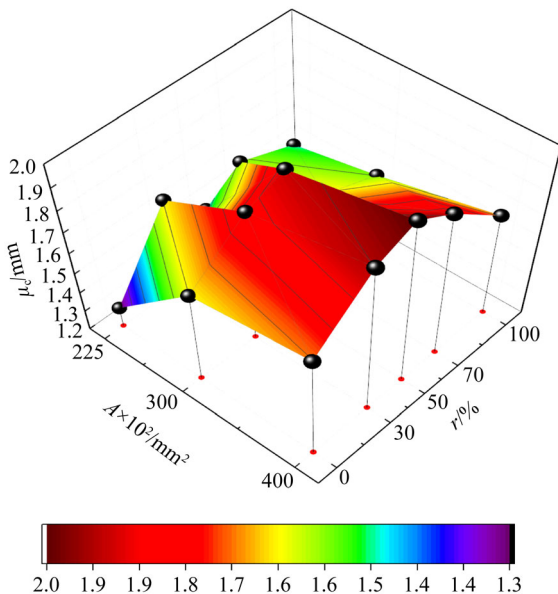


图 4 再生骨料混凝土延性系数
Fig. 4 Ductility coefficient of RAC

部存在微裂纹, 表面黏附水泥基体, 单位时间损伤积累速度加快, 在相同加载速率下损伤较快。对于普通混凝土, 有利因素起主导作用, 故损伤发展速度随尺寸的增加而变慢; 对于再生骨料混凝土, 不利因素起主导作用, 故损伤发展速度随尺寸的增加而变快。

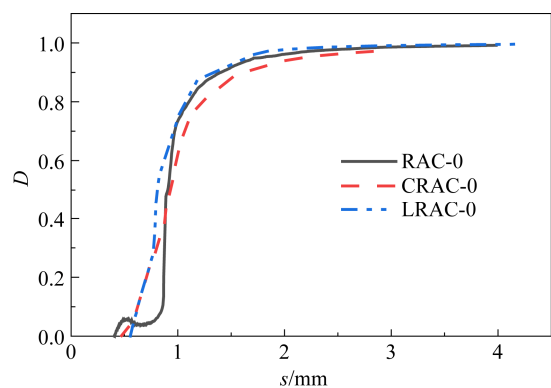
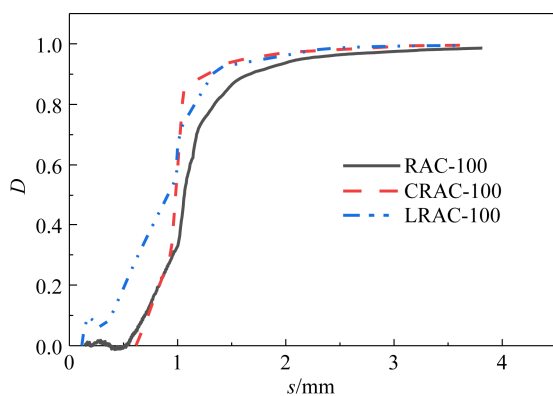
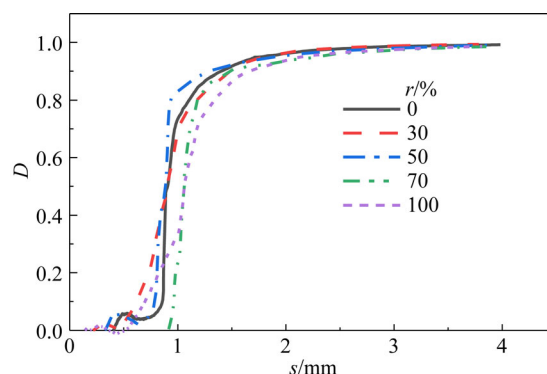
(a) $r=0\%$ (b) $r=100\%$

图5 不同尺寸再生骨料混凝土损伤演化

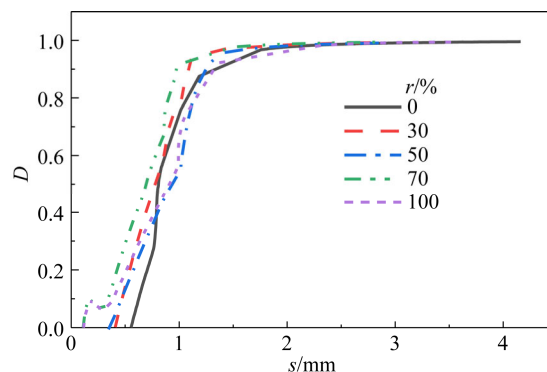
Fig. 5 Damage (D) evolution of RAC in different sizes

2.3.3 取代率对再生骨料混凝土损伤的影响 图6为不同取代率再生骨料混凝土的损伤演化过程曲线。由图6可见, 取代率对损伤发展过程影响较大。RAC 试件: 50%取代率试件损伤发展最为迅速, 其次是0、30%、70%、100%。CRAC 试件: 70%取代率损伤发展最为迅速, 其次是30%、50%、100%、0。LRAC 试件: 70%取代率损伤发展最为迅速, 其次是30%、50%、0、100%, 损伤发展速度与取代率不成比例关系。原因在于, 再生骨料由于内部缺陷含有较多的微裂纹, 受剪作用下会加速损伤的发展, 但再生骨料表面黏附的水泥基在一定程度上相当于增加了混凝土中的胶凝体含量, 使得试件内部

更为密实, 延缓损伤发展。以上两方面在混凝土的受力变形过程中同时存在并互相抵消, 因此就会产生损伤发展随取代率变化或加速或滞后的现象。



(a) RAC



(b) LRAC

图6 取代率对再生骨料混凝土损伤的影响

Fig. 6 Influence of replacement rate on damage of RAC

3 损伤本构关系

3.1 损伤本构模型的建立

Weibull 损伤模型可较好适用直剪峰值点前的损伤情况, 但不适用峰值后的损伤情况^[14-15], 因此, 在峰值点前采用 Weibull 理论模型, 峰值点后采用过镇海模型且引入形状控制系数 a, b 描述峰后曲线的下降段与收敛段。损伤程度表达式如下:

$$D = \begin{cases} 1 - \exp \left[-\frac{1}{m} \left(\frac{s}{d_p} \right)^m \right] & s \leq d_p \\ 1 - \frac{\rho_c}{a \left[\left(\frac{s}{d_p} - 1 \right)^b \right] + \frac{s}{d_p}} & s > d_p \end{cases} \quad (6)$$

根据应变等效原理将 $\tau = (1-D)\tau_0 = (1-D)G_0s$ 代入式(6)中, 得直剪荷载-变形曲线表达式如下:

$$F_r = \begin{cases} sG_0 \exp\left[-\frac{1}{m}\left(\frac{s}{d_p}\right)^m\right] & s \leq d_p \\ \frac{sG_0\rho_c}{a\left[\left(\frac{s}{d_p}-1\right)^b\right] + \frac{s}{d_p}} & s > d_p \end{cases} \quad (7)$$

式中: F_r 为任意点的直剪荷载; s 为混凝土的直剪变形; d_p 为峰值变形; 强度参数 $m = [\ln(G_0 d_p / F_p)]^{-1}$, $\rho_c = F_p / G_0 d_p$, m 、 ρ_c 与峰值点刚度退化有关, 数值越大, 表明峰值点刚度退化越小, 试件脆性特征越明显; a 、 b 为下降段形状控制系数。

3.2 损伤本构模型验证

不同尺寸、取代率再生骨料混凝土直剪荷载-变形曲线模型参数取值见表3。由表3可见, CRAC试件各取代率平均 m 、 ρ_c 分别为 RAC 试件的 31.4%、88.9%, LRRAC 试件平均 m 、 ρ_c 分别为 RAC 试件的 19.7%、74.4%, 可见强度参数 m 、 ρ_c 随试件尺寸增大明显降低, 说明试件尺寸越大峰值点刚度退化越小; 随着取代率增大强度参数 m 、 ρ_c 略有降低趋势,

说明取代率越大, 试件峰值点刚度退化程度越小。

图7为部分理论曲线与试验曲线对比结果。由图7可知, 模型预测与试验结果吻合较好。

表3 不同尺寸再生骨料混凝土参数取值

Table 3 Parameters of RAC of different sizes

Sample type	$r/\%$	m	ρ_c	a	b
RAC-0	0	12.20	0.92	6.80	0.92
RAC-30	30	9.86	0.79	4.26	1.53
RAC-50	50	14.15	0.93	6.33	0.88
RAC-70	70	14.58	0.94	6.36	1.08
RAC-100	100	9.57	0.71	5.04	1.05
CRAC-0	0	4.92	0.82	4.23	1.73
CRAC-30	30	4.42	0.80	1.62	1.83
CRAC-50	50	3.33	0.74	2.37	1.82
CRAC-70	70	2.76	0.70	6.58	1.11
CRAC-100	100	3.53	0.75	2.46	1.28
LRRAC-0	0	3.48	0.75	7.03	1.23
LRRAC-30	30	2.83	0.70	3.18	2.00
LRRAC-50	50	1.55	0.52	8.50	1.13
LRRAC-70	70	2.17	0.63	4.77	1.98
LRRAC-100	100	1.88	0.59	6.38	1.55

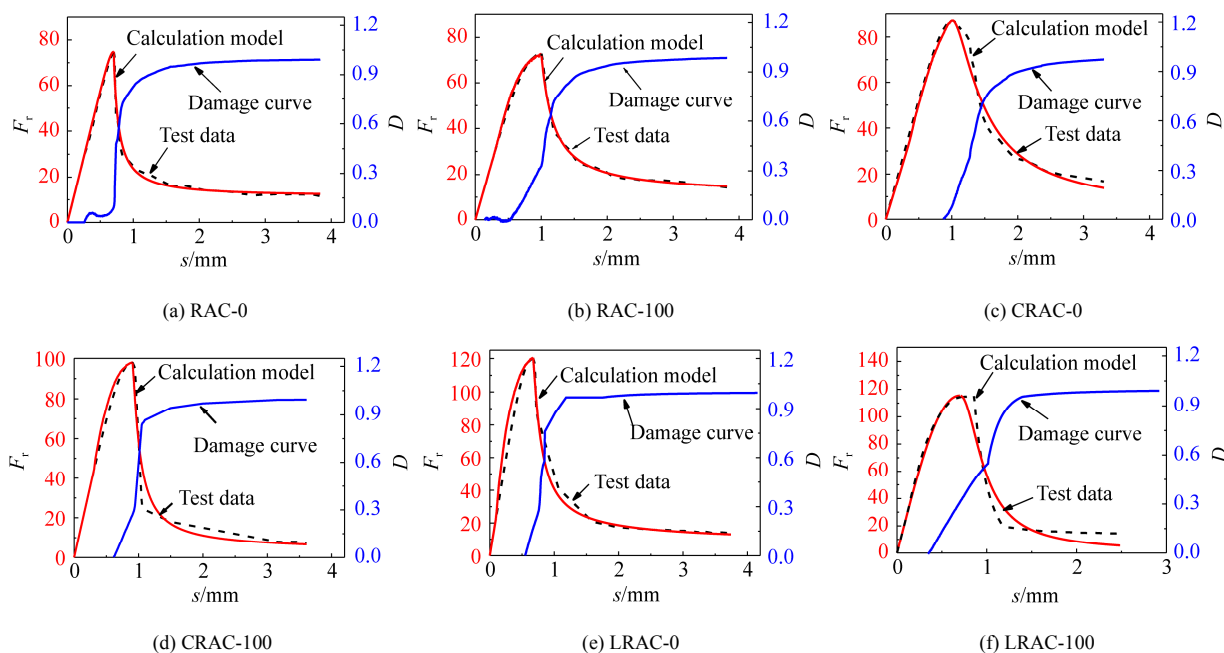


图7 理论曲线与试验曲线对比

Fig. 7 Comparison of present experimental data with proposed mode

4 结论

1) 再生骨料混凝土直剪破坏形态与普通混凝土类似, 均为脆性破坏, 试件尺寸越大脆性特征越明显; 再生骨料取代率越大, 剪切破坏后直剪面上

的碎屑越多; 试件尺寸越大, 试件薄弱面向上延伸的程度加剧, 裂缝水平倾角越大。

2) 峰值变形随再生骨料取代率增加而增大; 延性系数随骨料取代率的增加先增大后减小; 峰值变形、延性系数均具有明显的尺寸效应。

3) 再生骨料混凝土取代率对直剪损伤发展影响较大, 损伤发展速度与取代率不成比例关系; 损伤演化过程具有明显尺寸效应, 对于普通混凝土, 大尺寸试件损伤发展速度慢; 对于再生骨料混凝土, 大尺寸试件损伤发展速度快。

4) 再生骨料混凝土取代率越大, 试件峰值点刚度退化程度越小; 试件尺寸越大, 峰值点的刚度退化越慢。

5) 建立了直剪作用下再生骨料混凝土弹塑性损伤本构模型, 计算模型与试验结果吻合较好。

参考文献:

- [1] MEDINA C, ZHU WENZHONG, HOWIND T, et al. Influence of mixed recycled aggregate on the physical mechanical properties of recycled concrete[J]. *J Cleaner Prod*, 2014, 68: 216–225.
- [2] WASEEM S A, SINGH B, An experimental study on shear capacity of interfaces in recycled aggregate concrete[J]. *Int Federation Struct Concr*, 2018, 19: 230–245.
- [3] CHEN Y L, CHEN Z P, XU J J, et al. Performance evaluation of recycled aggregate concrete under multiaxial compression[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 229: 116935.
- [4] 张丽, 余振鹏, 沈丽, 等. 不同取代率再生混凝土抗压强度尺寸效应研究[J]. *新型建筑材料*, 2019, 46(3): 18–21, 87.
ZHANG Li, YU Zhenpeng, SHEN Li, et al. *New Build Mater* (in Chinese), 2019, 46(3): 18–21, 87.
- [5] 杨海涛, 田石柱. 尺寸效应对再生混凝土性能的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(11): 3818–3823.
YANG Haitao, TIAN Shizhu. *J Centr South Univ (Nat Sci Ed)*, 2016, 47(11): 3818–3823.
- [6] WANG W J, LIU Y Z, QIN X C, et al. Size effects on mechanical properties of recycled aggregate thermal insulation concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 264: 120179.
- [7] 陈宇良, 姜锐, 陈宗平, 等. 直剪状态下再生混凝土的变形性能及损伤分析[J]. *材料导报*, 2021, 35(19): 19015–19021.
CHEN Yuliang, JIANG Rui, CHEN Zongping, et al. *Mater Rev* (in Chinese), 2021, 35(19): 19015–19021.
- [8] 陈宇良, 刘杰, 吴辉琴, 等. 直剪作用下再生混凝土力学性能及强度指标换算[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(11): 3962–3970.
CHEN Yuliang, LIU Jie, WU Huiqin, et al. *Acta Mater Compos Sin* (in Chinese), 2021, 38(11): 3962–3970.
- [9] LIU B, FENG C, DENG Z H. Shear behavior of three types of recycled aggregate concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 217: 557–572.
- [10] 余振鹏, 黄侨, 李富荣, 等. 混凝土剪切多轴受力试验技术与验证[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(2): 460–465.
YU Zhengpeng, HUANG Qiao, LI Furong, et al. *J Build Mater* (in Chinese), 2020, 23(2): 460–465.
- [11] 黄煜镔. 混凝土脆性与力学参数的尺寸效应及其相互关系的研究[D]. 重庆大学, 2002.
HUANG Yubin. Size effect and relationship between brittleness and mechanical parameters of concrete (in Chinese, dissertation). Chongqing: Chongqing University, 2002.
- [12] 陈宗平, 徐金俊, 郑华海, 等. 再生混凝土基本力学性能试验及应力应变本构关系[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(1): 24–32.
CHUN Zongping, XU Jinjun, ZHUENG Huahai, et al. *J Build Mater* (in Chinese), 2013, 16(1): 24–32.
- [13] 肖洋, 彭刚, 黄超, 等. 压剪共同作用下混凝土的损伤演化研究[J]. *水利水电工程学报*, 2018(2): 112–119.
XIAO Yang, PENG Gang, HUANG Chao, et al. *Hydro-Sci Eng* (in Chinese), 2018(2): 112–119.
- [14] 王春来, 徐必根, 李庶临, 等. 单轴受压状态下钢纤维混凝土损伤本构模型研究[J]. *岩土力学*, 2006, 27(1): 151–154.
WANG Chunlai, XU Bigen, LI Shulin, et al. *Rock Soil Mech* (in Chinese), 2006, 27(1): 151–154.
- [15] 龙广成, 杨振雄, 白朝能, 等. 荷载-冻融耦合作用下充填层自密实混凝土的耐久性损伤模型[J]. *硅酸盐学报*, 2019, 47(7): 855–864.
LONG Guangcheng, YANG Zhenxiong, BAI Chaoneng, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2019, 47(7): 855–864.