文章编号：1001-4888(2022)03-0341-10

再生混凝土直剪力学性能试验及其本构关系*

陈宇良[1,2]，晏方[1]，张绍松[1]，叶培欢[1]，徐鸿飞[2]
(1. 广西科技大学 土木建筑工程学院，广西柳州 545006；2. 柳州欧维姆机械股份有限公司，广西柳州 545036)

摘要： 为研究再生混凝土的直剪力学性能，以再生粗骨料取代率为变化参数，设计了 66 个试件进行直剪试验。本文通过试验观察了试件破坏形态，获取了再生混凝土全过程荷载-位移曲线及力学性能指标，分析了取代率对再生混凝土力学性能的影响。结果表明：直剪作用下再生混凝土发生典型的脆性破坏，剪切斜裂缝小于 10°，断面酥碎；与普通混凝土相比，再生混凝土峰值剪力略微降低，幅度小于 6.3%；随着取代率增大，再生混凝土峰值剪力变化不大，峰值位移、残余强度升高。再生混凝土直剪强度由黏结强度、咬合强度、摩阻强度构成，三者在总体中占比均为 1/3。文中提出了再生混凝土直剪强度计算公式，并拟合得到了再生混凝土分段式剪切本构方程，拟合结果与实测结果吻合良好。

关键词： 直剪；再生混凝土；破坏机理；剪切强度；本构方程
中图分类号： TU528 **文献标识码：** A DOI：10.7520/1001-4888-21-188

0 引言

再生混凝土是指采用废弃混凝土制成的骨料等量替代天然骨料配置而成的混凝土，它能有效解决建筑垃圾处理问题，促进资源循环利用，符合可持续发展理念。各国对再生混凝土单轴抗压性能[1,2]、单轴抗拉性能[3]、三轴受压性能[4]等基本力学性能进行了大量的试验研究，结果表明：随着取代率增大，再生混凝土抗压强度、抗拉强度略微有所降低；围压值越大再生混凝土强度越大。在实际工程中，构件往往受到复合受剪的作用，此时构件处于二维及以上的受力状态，情况非常复杂，加上试验条件的限制，目前仍未有成熟的试验手段测得为大家所公认的结果，因此也无法得到精细化的计算方法。

直剪作为复合受剪的基本受力状态，是研究复合受剪的基础。Wong[5]、陈宇良[6-8]、余振鹏[9]等通过混凝土直剪试验，探究了直剪作用下混凝土剪力构成及其影响因素，绘制了混凝土材料摩尔应力圆包络线，提出了压剪复合应力下混凝土的破坏准则及强度计算公式。邓志恒等[10]对再生混凝土进行直剪试验，研究了取代率、压剪比对直剪作用下再生混凝土剪力构成的影响，并提出压-剪强度计算公式。Waseem 等[11]通过再生混凝土直剪试验，探究取代率、强度等级、压剪比对再生混凝土的单剪力成分的影响，分析得出了剪力传递机理，并提出了相应计算模型。

以上文献对研究再生混凝土受剪破坏机制提供了丰富的试验数据，但由于研究方法的差异及试验条件所限，使得试验中存在附加外力(弯矩、扭矩等)，导致其试验结果相差较大，加之有限的数据仍未能阐述再生混凝土剪切破坏机理，因此，为了揭示直剪作用下混凝土全过程破坏机理，为结构的受力破坏分析、有限元计算等提供依据，本课题组基于对现有国内外有关直剪试验装置的总结与改进，自行研发

* **收稿日期：** 2021-08-19；**修回日期：** 2021-10-07
基金项目： 国家自然科学基金(51908141)；广西科技基地和人才专项(AD19110068)；广西工程材料与结构重点实验室(GXHRI-WEMS-2020-05)；广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2019KY0361)
通信作者： 叶培欢(1988－)，男，硕士，讲师。主要从事绿色资源化利用的研究。Email：peihuan.ye@gxust.edu.cn

了一套可消除附加外力影响的直剪试验系统,设计了66个再生混凝土试件进行直剪试验,通过观察试件的破坏形态,分析再生粗骨料取代率对混凝土特征参数的影响,提出直剪破坏全过程剪力的构成要素及直剪强度计算公式,并建立了受剪本构方程。

1 试验概况

1.1 试验原材料

水泥为P·O 42.5R鱼峰牌普通硅酸盐水泥;细骨料为细度模数2.45的柳州中砂,表观密度为2581kg/m^3;拌合水为城市自来水;再生粗骨料(Recycled Aggregate Coarse,简称RAC)来源于C30混凝土试验梁,经鄂式破碎机破碎后筛洗、清分而成;天然粗骨料(Natural Aggregate Coarse,简称NAC)采用同等条件筛洗、清分的天然碎石;两者粒径都为5~20mm,连续级配。粗骨料的物理性能试验参照规范GB/T14685-2011《建筑用卵石、碎石》[12]进行,物理性能指标见表1。

表1 粗骨料物理性能指标

Tab. 1 Physical properties of coarse aggregates

骨料	含水率/%	吸水率/%	堆积密度/(kg/m^3)	表观密度 /(kg/m^3)	压碎指标/%
NAC	0.098	0.309	1412	2714	19.89
RAC	0.715	1.680	1274	2579	22.80

由表1可见,与天然粗骨料相比,再生粗骨料的含水率、吸水率及压碎指标明显增大,但堆积密度、表观密度降低,这是由于再生骨料表面附着大量水泥基体及破碎过程中再生粗骨料产生微裂缝所致。

1.2 试件设计

考虑再生骨料取代率,设计11种再生混凝土试件,每种配合比制作6个试件(直剪试验、抗压强度试验各3个),共66个试件,试件尺寸为150mm×150mm×150mm的立方体。采用人工拌合,经振捣、补浆及抹平,放置24h后脱模移至标准养护室内养护28d。

1.3 配合比设计

参照JGJ55-2011《普通混凝土配合比设计规程》[13]设计普通混凝土配合比,设计强度等级为C30。再生混凝土配合比设计以普通混凝土配合比为基准,保持水泥及细骨料用量不变,再生粗骨料等量取代天然粗骨料(取代率为0%~100%,级差为10%),其中再生骨料不进行预处理,浇筑过程中考虑附加用水,附加用水量为再生骨料质量与再生骨料吸水率与天然骨料吸水率之差的乘积。再生混凝土配合比及立方体抗压强度见表2。

1.4 加载装置及加载制度

以RMT-301电液伺服机为基础,本课题组研发了一套直剪试验加载系统[14]作为加载装置,直剪加载系统如图1(a)、(b)所示。由图可见,剪切装置主要由剪切盒、可垂直向上滑动的限位板、电液伺服的作动器等部分组成,剪切盒由上、下剪切盒组成,其中上剪切盒右端设计有一大刚度的圆弧形自调杆,自调杆与限位板共同作用,可消除试验中潜在偏心引起的弯矩或扭矩等附加外力影响,从而保证试件仅承受剪切荷载的作用。上剪切盒底面、下剪切盒顶面、自调杆中心与试件中部平齐,以保证剪力施加在试件中部水平面上。试件的受力模型如图1(c)所示。

将试件内置于剪切盒后,安放于加载系统中,试验加载前分别对剪切盒的垂直、水平方向进行预加载以消除试件与剪切盒间缝隙;开始加载试验,垂直方向保持恒载(垂直力<1kN,与水平剪切荷载相比可忽略不计),再采用位移控制的加载方式施加水平剪切荷载直至试件破坏,加载速度为0.02mm/s。通过内置高精度采集系统采集试验全过程数据。图1(d)为直剪试验加载现场图。

表 2　再生混凝土配合比

Tab. 2　Mix proportions of concrete

编号	配合比/(kg·m^{-3})					f_{cu}/MPa
	水泥	水	砂	NAC	RAC	
RAC-0	353.9	195.0	666.4	1184.7	0.0	30.93
RAC-10	353.9	197.0	666.4	1066.2	118.5	28.01
RAC-20	353.9	199.0	666.4	947.8	236.9	27.46
RAC-30	353.9	201.0	666.4	829.3	355.4	30.63
RAC-40	353.9	203.0	666.4	710.8	473.9	28.85
RAC-50	353.9	205.0	666.4	592.4	592.4	27.45
RAC-60	353.9	206.9	666.4	473.9	710.8	26.04
RAC-70	353.9	208.9	666.4	355.4	829.3	25.74
RAC-80	353.9	210.9	666.4	236.9	947.8	27.96
RAC-90	353.9	212.9	666.4	118.5	1066.2	27.52
RAC-100	353.9	214.9	666.4	0.0	1184.7	26.67

注：RAC-X 代表再生粗骨料取代率为 X%的再生混凝土，如 RAC-20 代表再生粗骨料取代率为 20%的再生混凝土。

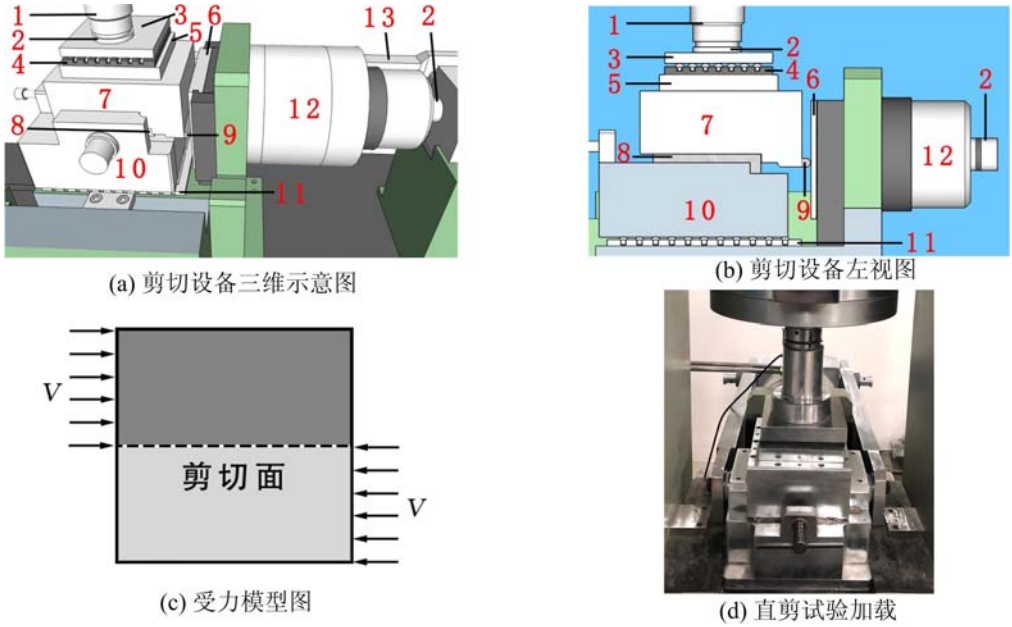


图 1　加载装置及加载模型

1-垂直作动器，2-球铰，3-压板，4-上滚轴板，5-滚轴传力板，6-限位板，7-上剪切盒，8-试件，9-自调杆，10-下剪切盒，11-下滚轴板，12-水平作动器，13-拉杆

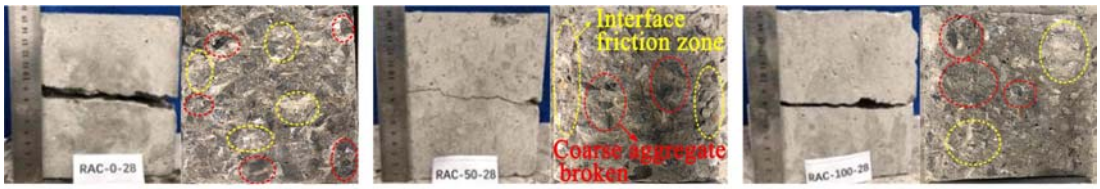
Fig. 1　Test the loading device and loading model

1-Vertical actuator, 2- Spherical, 3-Platen, 4- Upper rollers, 5-Roller transfer plate, 6- Limit plate, 7-Upper shear box, 8-Specimen, 9-Self-adjusting rod, 10-Lower shear box, 11-Lower roller plate, 12-Horizontal actuator, 13-Horizontal rod

2 试验结果及分析

2.1 破坏形态

开始加载至峰值荷载前,试件外表无可视裂缝;荷载达到峰值荷载时,伴随“嘭”的剧烈响声,试件沿剪切面瞬间出现直剪裂缝,为明显的脆性破坏;峰值荷载后,剪切盒内持续发出断面摩擦的“呲呲”声。试验结束后,采集不同取代率下再生混凝土直剪破坏形态图(如图 4)。为了便于分析试件破坏形态,使用实线椭圆圈出了粗骨料界面摩擦区及剪碎形成的细小颗粒,虚线椭圆标记了粗骨料剪短的位置。



(a) RAC-0 (b) RAC-50 (c) RAC-100

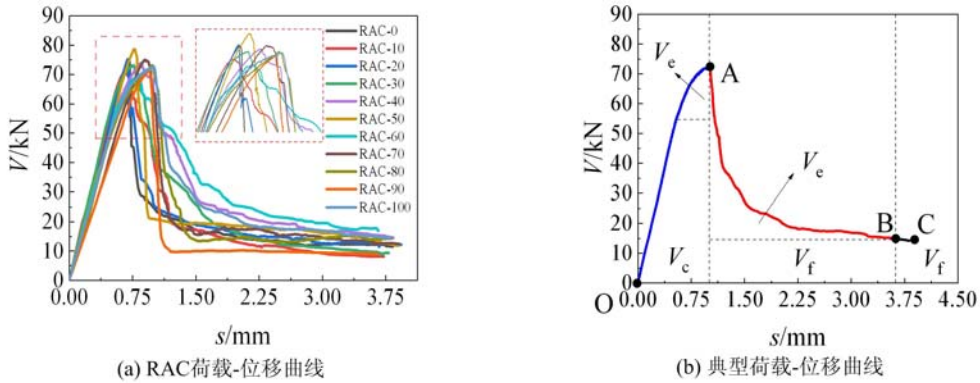
图 2 部分试件破坏形态

Fig. 2 Failure patterns of specimens

由图 2 可见,再生混凝土剪切裂缝呈一定角度(<10°),破坏面边缘处存在骨料脱落造成的缺口,总体上破坏形态差异不大,与取代率无关。观察混凝土横截面破坏形态图可知,试件断面上散落着完整的粗骨料与细小颗粒残渣,存在明显的深色粗骨料断面及白色划痕(磨碎的粗骨料及水泥基粉末),发生了粗骨料剪断破坏及骨料与水泥基间的界面破坏。随着取代率增大,试件断面上碎渣数量增多,断面更为酥碎,这是由于再生粗骨料破碎过程中产生了微裂纹,直剪过程中更易剪断、磨碎所致。

2.2 荷载-位移曲线

图 3(a)为再生混凝土剪切全过程荷载-位移曲线,由试验系统自动记录的荷载、位移数据绘制。由图可见,不同取代率下再生混凝土试件的曲线形状相似,均存在上升段、下降段、稳定段 3 个阶段。



(a) RAC荷载-位移曲线 (b) 典型荷载-位移曲线

图 3 荷载-位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curves

直剪作用下再生混凝土全过程荷载-位移典型曲线如图 3(b),根据再生混凝土受力过程,可将其分为 3 个阶段。各阶段具体分析如下:

(1)上升段(OA 段):开始加载至 70%峰值剪力,荷载随位移增大而线性增大,试件发生弹性形变,内部无微裂缝开展;荷载到达 70%峰值剪力,试件到达弹性极限状态,此后继续加载,荷载上升速度减缓,试件内部由于水泥基与骨料间黏结界面逐渐破坏而产生塑性变形,出现沿加载方向的微裂缝,微裂缝两侧粗骨料相互咬合。

(2)下降段(AB 段):荷载达到峰值(A 点)时,试件内粗骨料与水泥基间黏结界面完全破坏,内微裂缝开展完全相互连通,与此同时,部分粗骨料由于强度不足被剪断,出现宏观剪切裂缝,试件强度大幅降低,荷载-位移曲线陡然下降,呈现明显的脆性破坏特征。继续加载,断面间骨料摩擦咬合产生应力集中,造成更多的粗骨料脱落与剪断磨平,直至断面相对平整。

(3)稳定段(BC 段)：此时试件断面相对平整，加载时试件产生塑形形变，荷载-位移曲线趋于水平，剪力达到稳定值，变化幅度不大，定义试件达到稳定值时强度为残余强度 R_s，为避免数据的离散性，取稳定段强度均值。

2.3　特征点参数

通过对荷载-位移曲线处理，得到试件的峰值荷载、峰值位移、残余强度等特征参数，每种配比再生混凝土特征参数取 3 个试件的平均值。为了比较再生混凝土抗压强度、直剪强度的关系，定义再生混凝土抗剪强度与抗压强度之比为剪切-轴压系数。各试件特征参数见表 3。抗剪强度 τ_u、剪切-轴压系数 ξ 的计算公式如下：

$$\tau_u = \frac{V_u}{A}, \quad \xi = \frac{\tau_u}{f_{cu}} \tag{1}$$

式中：V_u为峰值剪力；A 为受剪面面积，A =150mm×150mm；s_e为对应的变形。

表 3　试件特征参数

Tab. 3　Feature parameters of specimens

No.	V_u/kN	s_u/mm	R_s/MPa	τ_u/MPa	ξ	No.	V_u/kN	s_u/mm	R_s/MPa	τ_u/MPa	ξ
RAC-0	74.93	0.704	0.54	3.33	0.108	RAC-60	70.20	0.794	0.78	3.12	0.120
RAC-10	70.88	0.657	0.37	3.15	0.112	RAC-70	74.93	0.893	0.56	3.33	0.129
RAC-20	75.38	0.693	0.56	3.35	0.122	RAC-80	73.13	0.981	0.63	3.25	0.116
RAC-30	73.13	0.762	0.42	3.25	0.106	RAC-90	72.00	0.957	0.41	3.20	0.116
RAC-40	74.03	0.849	0.67	3.29	0.114	RAC-100	71.78	1.004	0.65	3.19	0.120
RAC-50	78.53	0.777	0.55	3.49	0.127						

注：V_u 为峰值剪力，s_u 为峰值剪力对应的位移，R_s 为残余剪力，τ 为峰值应力，ξ 为压-剪相关系数。

3　影响因素分析

3.1　取代率对峰值剪力的影响

不同取代率再生混凝土峰值剪力如图 4 所示。由图可见，随着取代率增大，再生混凝土峰值剪力变化不大，且略低于普通混凝土峰值剪力，计算可得降低幅度在 6.3%内，这可能与再生骨料自身特性有关，再生骨料吸水导致试件实际水灰比降低，混凝土强度提高，而再生骨料表面附着的水泥基降低了界面强度，导致混凝土整体强度降低，两者相互作用致使再生混凝土的峰值剪力随取代率变化不明显。

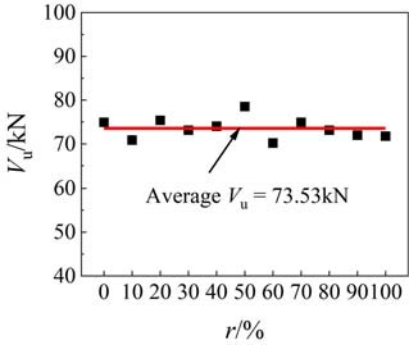


图 4　再生混凝土峰值剪力

Fig. 4　Peak stress of RAC

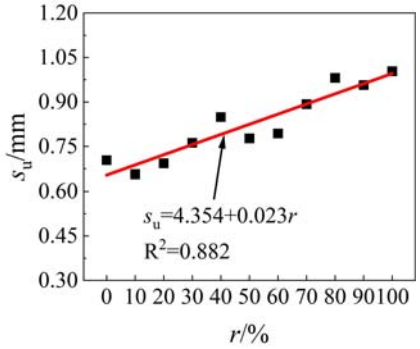


图 5　再生混凝土峰值位移

Fig. 5　Peak strain of RAC

3.2　取代率对峰值位移的影响

不同取代率再生混凝土峰值位移变化趋势如图 5 所示。由图可见，随着取代率的增大，再生混凝土

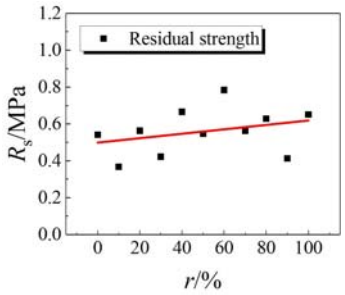


图 6 再生混凝土残余强度

Fig. 6 Residual strength of RAC

峰值位移增大。整体上,再生混凝土峰值位移高于普通混凝土,最高增长了 44.5%,其原因在于,再生骨料上存在未完全清除的水泥基,增大了试件的胶凝体总含量,而随着胶凝体含量的增加,试件峰值位移不断增大。

3.3 取代率对残余强度的影响

不同取代率再生混凝土的残余强度变化趋势如图 6 所示。由图可见,随着取代率增大,残余强度在整体上呈现上升形式。原因可能在于,随着取代率的增大,试件内部分布在剪切面上的再生粗骨料增多,而再生骨料较天然骨料强度低,压碎指标大,在剪切过程中更易被剪断,断面间骨料的充分摩擦咬合增大了残余强度。

4 剪力构成分析

4.1 阶段剪力分析

根据试验结果,可将混凝土剪切承载力构成分为:(1)水泥基体与骨料的黏结力 V_c;(2)骨料间的咬合力 V_e;(3)破坏面间的摩阻力 V_f。3 种剪力成分在直剪过程不同阶段发挥的作用不同。为探究 3 种剪力成分在再生混凝土直剪过程的构成占比,作以下假定:(1)在上升段,混凝土内部微小裂缝对黏结力无影响,黏结力保持恒定;(2)在下降段,破坏面上粗骨料的脱落对摩阻力无影响,摩阻力保持恒定;(3)在稳定段,骨料咬合力完全消失,破坏截面间只存在摩阻力。根据以上假定,对各阶段剪力构成进行划分,如图 3(b)所示。

应用能量法计算各剪力成分做功,即 OA、AB、BC 段内各区域面积,经分析可得到再生混凝土上升段、下降段剪力构成(见表 4)。由表可得,上升段剪力构成中,随着取代率增大,黏结力占比呈减小趋势。这是因为,再生粗骨料表面附着有大量未清除完全的水泥基,使再生混凝土界面间黏结强度下降,故取代率越大,界面间黏结力越小。

表 4 再生混凝土阶段剪力构成

Tab. 4 Part shear strength components of RAC

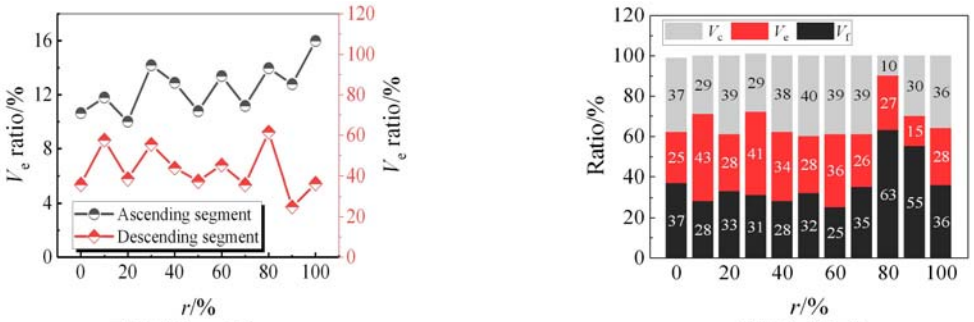
编号	上升段		下降段		编号	上升段		下降段	
	V_c	V_e	V_e	V_f		V_c	V_e	V_e	V_f
RAC-0	89.36%	10.64%	35.87%	64.13%	RAC-60	86.61%	13.39%	45.30%	54.70%
RAC-10	88.20%	11.80%	57.61%	42.39%	RAC-70	88.83%	11.17%	35.76%	64.24%
RAC-20	89.99%	10.01%	38.50%	61.50%	RAC-80	86.03%	13.97%	61.58%	38.42%
RAC-30	85.81%	14.19%	55.54%	44.46%	RAC-90	87.21%	12.79%	19.17%	80.83%
RAC-40	87.11%	12.89%	43.81%	56.19%	RAC-100	84.01%	15.99%	36.30%	63.70%
RAC-50	89.21%	10.79%	37.38%	62.62%					

在上升段,荷载超过弹性极限荷载时,试件内部产生微裂缝降低了黏结力,由于假定(1)中高估了黏结力占比,所以取黏结力占比保守值,可知上升段中黏结力占比约为 85%,咬合力占比约为 15%。

下降段中,随着水平位移增大,摩阻力并非恒定,且混凝土的非均质特性导致试验终止时并非所有试件摩阻力都达到稳定的最小值,假定(2)中高估了摩阻力占比,取其占比相对较小值(取代率为 90% 时,数据偏差较大,不予考虑),可得下降段中黏结力占比约为 40%,摩阻力占比约为 60%。

4.2 整体剪力分析

上升段、下降段剪力构成中都包含咬合力,两阶段咬合力占比变化如图 7(a)所示。由图可见,随着取代率的增大,两阶段中咬合力占比变化趋势相似,都呈波动式变化,整体上略微升高。



(a) 不同阶段V_e占比　　(b) 整体剪力组成

图 7　剪力构成

Fig. 7　Shear strength components

累加上升段、下降段中黏结力、咬合力、摩阻力所做功（平稳段中，各组试件水平位移终值有所差异，不予考虑），计算得出整体剪力构成，如图 7(b)。由图可得，整体剪力构成中，黏结力、咬合力、摩阻力占比大致相等，都约为1/3。

4.3　直剪强度计算公式

对不同取代率下剪切-轴压系数 ξ 进行拟合，得出取代率 r 与剪切-轴压系数 ξ 间的关系，再生混凝土直剪强度与抗压强度之比在 0.10～0.13 之间，结果如图 8 所示。

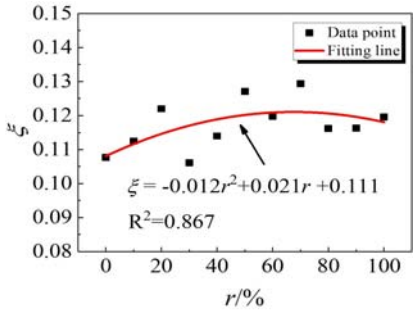


图 8　剪切-轴压系数

Fig. 8　Compressive-shear coefficient

直剪强度计算公式为

$$\tau_u = \xi f_{cu}, \quad \xi = -0.012r^2 + 0.021r + 0.111 \qquad (2)$$

再生混凝土抗剪强度的计算值与实测值对比见表 5。由表可见，计算值与实测值比值的平均值为 1.001、方差为 0.003、变异系数为 0.052，计算值与实测值吻合较好。

表 5　再生混凝土抗剪强度的计算值与实测值对比

Tab. 5　Comparison of calculated and measured direct shear strength of RAC

r/%	实测值/MPa	计算值/MPa	计算值/实测值	r/%	实测值/MPa	计算值/MPa	计算值/实测值
0	3.43	3.33	1.03	60	3.10	3.12	0.99
10	3.16	3.15	1	70	3.08	3.33	0.92
20	3.15	3.35	0.94	80	3.35	3.25	1.03
30	3.56	3.25	1.09	90	3.30	3.20	1.03
40	3.39	3.29	1.03	100	3.19	3.19	1
50	3.25	3.49	0.93				

5　再生混凝土剪切本构方程

将荷载-位移曲线转换为应力-应变曲线（剪应变 γ 非试件真实剪应变，为名义剪应变），转换公式如下：

$$\tau = \frac{V}{A}, \quad \gamma = \frac{\Delta l}{l} \qquad (3)$$

式中：V 为剪力；A 为受剪面面积；Δl 为水平位移；l 为试件长度，l =150mm。

试件应力-应变曲线经归一化处理后，参考文献[15]的研究方法，采用分段式本构方程对直剪作用下再生混凝土应力-应变本构方程进行拟合：

$$y=\begin{cases}\alpha x^4-\dfrac{3\alpha+1}{2}x^3+\dfrac{\alpha+3}{2}x, & 0\leqslant x<1\\ \dfrac{x}{\beta(x-1)^{\eta}+x}, & x\geqslant 1\end{cases} \tag{4}$$

式中：α、β、η为再生混凝土控制系数；$x=\gamma/\gamma_p$，γ_p为峰值应力时对应的应变；$y=\tau/\tau_p$，τ_p为峰值应力。本构方程满足以下边界条件：$\gamma=0$时，$\tau=0$；$\gamma/\gamma_p=1$时，$\tau/\tau_p=1$及$\mathrm{d}\tau/\mathrm{d}\gamma=0$；$\gamma/\gamma_p=+\infty$时，$\mathrm{d}\tau/\mathrm{d}\gamma=0$。

拟合出各取代率下再生混凝土控制系数后，再采用线性函数对取代率与控制系数间关系进行拟合，得出取代率为r的再生混凝土控制系数计算公式：

$$\alpha=-1.3966+0.0081r \tag{5}$$

$$\beta=4.2488+0.0314r \tag{6}$$

$$\eta=0.9555+\frac{0.6274}{1+\left(\dfrac{\beta}{4.7433}\right)^{28.0335}} \tag{7}$$

采用公式计算得到不同取代率再生混凝土控制系数后，绘制出拟合得到的应力-应变曲线，与试件实测应力-应变曲线对比(如图 9)，由图可见，两者吻合良好。

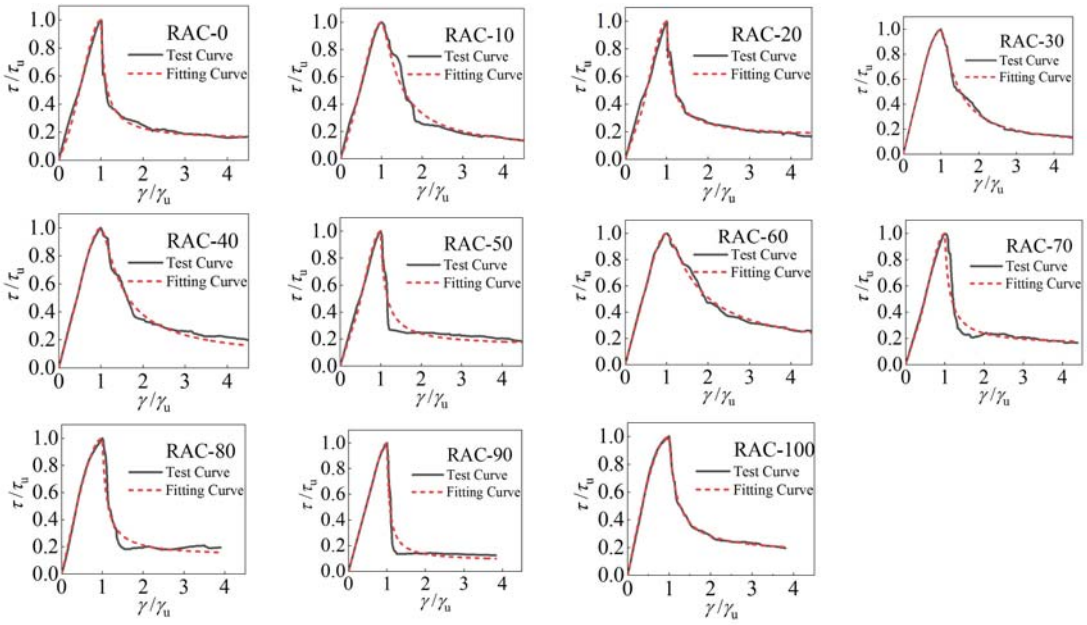


图 9 试验与理论计算的归一化应力-应变曲线对比

Fig. 9 Comparison between calculated and experimental normalized stress-strain curve

6 结论

(1) 再生混凝土剪切裂缝小于 10°时，取代率对其影响不大，但随着取代率增大，试件断面上剪断骨料与碎屑数量增多，破坏面更为酥碎。

(2) 再生混凝土强度低于普通混凝土，最大降低了 6.3%，峰值位移高于普通混凝土，最大增高了 44.5%，且随取代率增大，再生混凝土强度变化不大，峰值位移、残余强度升高。

(3) 再生混凝土直剪强度由黏结强度、咬合强度、摩阻强度构成，为轴心抗压强度的 10%～13%，3 种构成成分在不同阶段占比不同，但在总体中占比大致相等，都约占 1/3。

(4) 采用两段式方程对直剪作用下再生混凝土本构方程进行分析，提出再生混凝土本构方程控制系数计算公式，拟合方程与实测结果吻合良好。

参考文献：

[1] 周伯贤，张磊，贺玲凤. 两种再生粗骨料混凝土单轴受压性能研究[J]. 实验力学，2017，32(1)：43－48（ZHOU Boxian，ZHANG Lei，HE Lingfeng. Experimental Investigation on properties of concrete with two kinds of recycled coarse aggregate subjected to uniaxial compression[J]. Journal of Experimental Mechanics，2017，32(1)：43－48 (in Chinese))

[2] 陈宗平，周春恒，陈宇良. 再生碎石混凝土力学性能试验研究[J]. 实验力学，2014，29(3)：333－343（CHEN Zongping，ZHOU Chunheng，CHEN Yuliang. Experimental investigation on mechanical properties of recycled gravel aggregate concrete[J]. Journal of Experimental Mechanics，2014，29(3)：333－343 (in Chinese))

[3] 刘丰，白国良，柴园园，等. 再生骨料混凝土抗拉强度和抗剪强度试验研究[J]. 工业建筑，2010，40(12)：70－74（LIU Feng，BAI Guoliang，CHAI Yuanyuan，et al. Experimental research on recycled aggregate concrete tensile and shear strength[J]. Industrial Construction，2010，40(12)：70－74 (in Chinese))

[4] Chen Yuliang，Chen Zongping，Xu Jinjun，et al. Performance evaluation of recycled aggregate concrete under multiaxial compression[J]. Construction and Building Materials，2019，229：116935.

[5] Wong R C K，Ma S K Y，Wong R H C，et al. Shear strength components of concrete under direct shearing[J]. Cement and Concrete Research，2007，37(8)：1248－1256.

[6] 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. Mechanical properties and strength index conversion of recycled aggregate concrete under direct shear[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2021，38(11)：3962－3970 (in Chinese))

[7] Liang X，Yan F，Chen Y，et al. Study on the strength performance of recycled aggregate concrete with different ages under direct shearing[J]. Materials，2021，14(9)：2312.

[8] 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 Zongpin，et al. Deformation performance and damage analysis of recycled concrete under direct shearcondition[J]. Materials Reports，2021，35(19)：19015－19021 (in Chinese))

[9] Yu Zhenpeng，Huang Qiao，Xie Xinghua，et al. Experimental study and failure criterion analysis of plain concrete under combined compression-shear stress[J]. Construction and Building Materials，2018，179：198－206.

[10] 邓志恒，李作华，杨海峰，等. 再生混凝土压-剪复合受力性能研究[J]. 建筑结构学报，2019，40(5)：174－180（DENG Zhiheng，LI Zuohua，YANG Haifeng，et al. Mechanic behavior of recycled aggregate concrete subjected to compression-shear loading[J]. Journal of Building Structure，2019，40(5)：174－180 (in Chinese))

[11] Waseem S A，Singh B. Shear transfer strength of normal and high-strength recycled aggregate concrete－An experimental investigation[J]. Construction and Building Materials，2016，125：29－40.

[12] GB/T14685－2011，建筑用卵石、碎石[S]. 北京：中国标准出版社，2011 (GB/T14685－2011. Pebble and crushed stone for building[S]. Beijing：China Standards Press，2011 (in Chinese))

[13] JGJ55－2011，普通混凝土配合比设计规程[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011 (JGJ55－2011，Specification for mix proportion design of ordinary concrete[S]. Beijing：China Architecture & Building Press，2011 (in Chinese))

[14] 陈宇良，晏方，林桂武，等. 一种循环剪切的拟静力试验装置：CN210128905U[P]. 2020-03-06 (CHEN Yuliang，YAN Fang，LIN Guiwu，et al. A pseudo-static test device for cycle shear：CN210128905U[P]. 2020-03-06 (in Chinese))

[15] 张琦，过镇海. 砼抗剪强度和剪切变形的研究[J]. 建筑结构学报，1992(5)：18－25（ZHANG Qi，GUO Zhenhai. Investigation on shear strength and shear strain of concrete[J]. Journal of Building Structures，1992(5)：18－25 (in Chinese))

Direct shear mechanical properties test and constitutive relations of recycled aggregate concrete

CHEN Yuliang[1,2], YAN Fang[1], ZHANG Shaosong[1], YE Peihuan[1], XU Hongfei[2]

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, Guangxi, China;
2. Liuzhou OVM Machinery Co., Ltd., Liuzhou 545036, Guangxi, China)

Abstract: In order to study the effect of recycle coarse aggregate replacement ratio on the mechanical properties of recycled aggregate concrete (RAC), 66 standard cubes were designed to test direct shear strength. The failure mode of the specimen was observed, the load-displacement curve and mechanical index of the specimens were obtained, and the failure mechanism and the effect of replacement ratio on mechanical performances of specimens were disclosed. The results show that the typical brittle failure of recycled concrete occurs under direct shear, shear cracks $<10^{\circ}$ and the section is brittle. Compared with natural concrete, the peak shear force of RAC is slightly reduced, within 6.3%. With the replacement ratio increases, the peak shear force of RAC change slightly, and the peak displacement and residual strength increase. The shear strength of RAC is comprised of cohesion strength, aggregate interlock strength and interface friction strength. In overall shear strength composition, the ratio of cohesion strength, aggregate interlock strength and interface friction strength are equal and was 1/3. The formula for calculating the direct shear strength of RAC was proposed. The segmented shear constitutive equation of recycled concrete was established and the fitting results are consistent with the measured results.

Keywords: direct shear; recycled aggregate concrete; failure mechanism; shear strength; constitutive equation