

再生粗骨料模型混凝土轴心抗压性能试验研究

李真玉¹, 林大地^{2,*}, 吴瑾³

1. 温州职业技术学院, 瑞安学院, 浙江, 温州, 325000
2. 温州理工学院, 建筑与能源工程学院, 浙江, 温州, 325000
3. 南京航空航天大学, 民航学院, 江苏, 南京, 210000

摘要: 再生混凝土粗骨料中由于含有残余砂浆, 因其力学性能和材料性能的不同导致再生混凝土的材料性能与普通混凝土有很大区别。在本文开发的六相再生粗骨料模型混凝土 (Modeled Recycled Coarse Aggregate Concrete) 当中, 除再生粗骨料模型 (Modeled Recycled Coarse Aggregate) 的取代率外, MRCA 排列方式以及旧砂浆覆盖率对 MRCAC 的应力应变特性的影响较为明显, 针对旧砂浆覆盖率对 MRCAC 材料本构关系的影响情况的研究较少, 为了从内力传递的角度对 MRCAC 本构关系变化进行研究, 引入了 MRCA 矩阵式排列方式以排除内力传递不规则的因素。本章围绕 18 组 MRCAC 在抗压性能进行试验分析, 根据本文试验数据研究 MRCA 排列方式、MRCA 取代率以及旧砂浆覆盖率对 MRCAC 的破坏形态和立方体抗压强度的影响规律。

关键词: 再生粗骨料; 再生混凝土模型化; 力学性能; 应力-应变特性

Study on Axial Compressive Behavior of Modeled Recycled Coarse Aggregate Concrete

Li Zhen-Yu¹, Lin Da-Di^{2,*}, Wu Jin³

1. Rui'an College, Wenzhou Polytechnic, Wenzhou, Zhejiang, China, 325011
2. College of Architecture and Energy Engineering, Wenzhou University of Technology, Wenzhou, Zhejiang, China, 325011
3. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu, China, 210000

Abstract: Due to the presence of residual mortar in recycled concrete coarse aggregates, the mechanical and material properties of recycled concrete differ significantly from those of ordinary concrete. In the six-phase modeled recycled coarse aggregate (MRCA) concrete developed in this study, besides the replacement ratio of MRCA, the arrangement pattern of MRCA and the old mortar coverage ratio have notable effects on the stress-strain characteristics of modeled recycled coarse aggregate concrete (MRCAC). However, limited research has focused on the influence of the old mortar coverage ratio on the constitutive relationship of MRCAC. To investigate the evolution of the constitutive relationship of MRCAC from the perspective of internal force transfer, a matrix-type MRCA arrangement was introduced to eliminate irregularities in internal force transfer. This chapter conducts experimental analyses on the compressive behavior of 18 groups of MRCAC specimens. Based on experimental data, the effects of MRCA arrangement patterns, MRCA replacement ratios, and old mortar coverage ratios on the failure modes and cube compressive strength of MRCAC are systematically investigated.

Keywords: Modeled recycled coarse aggregate; Recycled concrete modeling; Mechanical of performance; stress-strain characteristics

当前建筑行业对建筑材料的大量消耗带来了非常严重的环境问题, 随着该问题的加剧, 新型再生建筑材料应运而生, 例如废玻璃^[1,2]、橡胶^[3]、木材^[4]甚至燃烧残渣^[5]。2015 年联合国大会上 193 个国家领导人共同通过的 17 项可持续发展目标 (SDGs), 是指导世界在 2030 年前实现变革的行动计

划^[6]。混凝土在未来数十年仍是最广泛使用的建筑材料,当前每年产生 120 亿吨建筑拆除废弃物(C&DW)^[7-9],且 C&DW 的产生量预计持续增长,因此将拆除建筑产生的 C&DW 作为再生粗骨料(RCA)循环利用以制备混凝土,是落实循环经济与发展目标的有效途径之一。再生粗骨料是通过破碎、筛分拆除旧建筑所得的废弃混凝土获得,因此获得的再生粗骨料由天然骨料和旧水泥砂浆组成。旧水泥砂浆具有孔隙率大、吸水性强等特点,因此再制备的再生混凝土强度会受到较大影响。通过研究再生粗骨料附着旧水泥砂浆的情况,可以更好地研究这种情况对再生混凝土性能的影响。

现有再生粗骨料混凝土数值分析模型是由石子、旧水泥砂浆、新水泥砂浆及它们之间的界面过渡区(ITZ)构成的五相复合材料^[10-14]。目前关于旧水泥砂浆对力学性能影响的研究仍然较少^[15-21],现有研究通过对再生混凝土试件进行切片、扫描和图像处理获得了具有六相特征的再生混凝土二维数值分析模型^[22],但该方法并不具备普适性。

本文基于再生粗骨料模型化的思路,制备具有不同覆盖率残余砂浆的再生粗骨料模型,浇筑于新砂浆内获得具有新旧砂浆、各相材料之间的界面过渡区的六相再生粗骨料模型混凝土棱柱体试件,通过轴心抗压试验获取不同残余砂浆覆盖率下以及排列方式下的应力应变特性的变化。

1 试验概况

1.1 试验材料

试验所需的天然粗骨料为南京本地购买的碎石,经过筛分与挑选,获得粒径为 16mm—19mm(筛孔大小)的碎石,同时剔除片状与长条状碎石,保证天然粗骨料外观相近。

试验采用的细骨料为天然河砂,保留粒径小于 4.75mm 的颗粒。细度模数为 2.7,属于中砂,经过清洗和晾晒后,含泥量约为 1.1%,低于 2%,其性能满足《普通混凝土用砂、石质量标准及检验方法标准》(JGJ52-2006)中对细骨料的基本性能要求。

试验用水泥为海螺牌 P·O42.5 普通硅酸盐水泥,水泥性能参数均满足规范《通用硅酸盐水泥》(GB175-2007)的要求。

试验用水为城市普通自来水。

1.2 试件制备

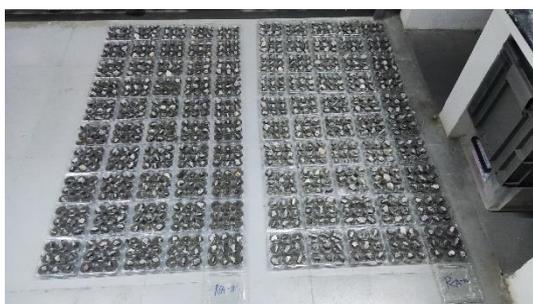
如图 1 所示,MRCA 的制备过程如下:将筛选好的石子按试验方案分别做好标记,保证模拟旧砂浆覆盖高度准确,同时在专用模具上做好标记,在石子和模具上进行标记时,预留 2mm 空间以保证底部砂浆具有约 2mm 厚度。将搅拌好的模拟旧砂浆倒入模具中,放入石子并埋入至标记处,24h 后脱模,进行打磨,保证周边模拟旧砂浆厚度均为 4mm 左右。将打磨好的 MRCA 放入水中养护 3 天后取出进行天然养护至 28 天。

旧砂浆覆盖率的确定:本研究制备的 MRCA 模型具有不同覆盖程度旧砂浆的特征,根据 MRCA 数值模拟建模过程中的几何统计结果,本文所浇筑的 MRCA 中旧砂浆深度 5mm、10mm 和 15mm 分别对应覆盖率 33%、50%和 66%,此对应方式在第四章部分进行了详细说明。不同旧砂浆覆盖率的 MRCA 模型如图 2 所示。

配合比设计如表 1 所示。新旧砂浆水灰比均为 0.5,棱柱体试件的粗骨料以 MRCA 个数计量,每个试件共投入 28 颗骨料,分别以矩阵式和随机两种形式投料。由于试件粗骨料以个数计量,表中的其他材料均以单个标准立方体试件作为单位体积。



(a) MRCA 标记



(b) MRCA 的浇筑



(c) MRCA 打磨



(d) 处理后的 MRCA 俯视视角

图 1 MRCA 的制备与后处理

Fig 1. Preparation and Post-Treatment of MRCA



图 2 不同旧砂浆覆盖率的 MRCA 模型

Fig 2. MRCA with Different Old Mortar Coverage

表 1 混凝土配合比设计

Table 1 Concrete Mix Proportion Design

混凝土类型	水泥/kg	水/kg	天然粗骨料/颗	MRCA/颗	细骨料/kg
NC	1.32	0.66	28	—	1.68
MRCAC-50	1.32	0.66	14	14	1.68
MRCAC-100	1.32	0.66	0	28	1.68

如图 3 所示，MRCAC 棱柱体试件的制备过程如下：首先在模具底部铺设约 8mm 模拟新砂浆，将 MRCA 放入模拟新砂浆中，待砂浆略微凝固时继续浇入模拟新砂浆至骨料顶部约 13mm 处，放置第二层 MRCA，反复操作至 MRCAC 全部浇筑完毕。在每层浇筑时，用铁棒对模具外壁进行敲击，浇筑结束后放置振捣台进行短时间振捣，以保证手动浇入的砂浆密实性。



图 3 MRCAC 棱柱体浇筑

Fig 3. Prism Casting of MRCAC

本研究共设计了 18 组 MRCAC 试件，试件尺寸为 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 300\text{mm}$ 。采用 X-Y-Z 形式编号，其中 X 代表 MRCA 的排列方式，Y 代表 MRCA 取代率，Z 代表旧砂浆覆盖率，NC 代表仅使用天然粗骨料浇筑的混凝土试件，为研究不同应力传递下 MRCA 取代率以及旧砂浆覆盖率对 MRCAC 材料本构关系的影响规律，设计 0、50% 和 100% 三种取代率和 0、33%、50%、66% 和 100% 旧砂浆覆盖率，分别按照矩阵式和随机式两种投料方式浇筑。试验方案如表 2 所示。

表 2 MRCAC 棱柱体轴心抗压试验方案

Table 2 Test Scheme for Axial Compressive Strength of MRCAC Prisms

试件名称	MRCA 取代率/%	旧砂浆覆盖率/%	MRCA 分布方式
AD-NC	0	0	
AD-50-33	50	33	
AD-50-50	50	50	
AD-50-66	50	66	
AD-50-100	50	100	矩阵式分布
AD-100-33	100	33	
AD-100-50	100	50	
AD-100-66	100	66	
AD-100-100	100	100	
RD-NC	0	0	
RD-50-33	50	33	
RD-50-50	50	50	
RD-50-66	50	66	
RD-50-100	50	100	随机式分布
RD-100-33	100	33	
RD-100-50	100	50	
RD-100-66	100	66	
RD-100-100	100	100	

1.3 试验方法与加载

试验在 1000kN 的压缩试验机 (MTS) 上进行。在试件的相对侧面安装 2 个位移传感器, 用于测量试件受荷载产生的压缩位移, 在试件与加载端之间放置荷载传感器用于实时采集作用在试件上的压缩荷载。单轴压缩位移与荷载均由 DH-3820 动态采集仪同步记录。为了避免加载偏心与系统松弛, 每个试件开始试验前均进行 30% 峰值荷载的预加载^[89]。正式试验时加载速率控制在 0.2mm/min, 每 0.05s 采集一次数据直至试验结束。试验加载装置及试验过程如图 4 所示。

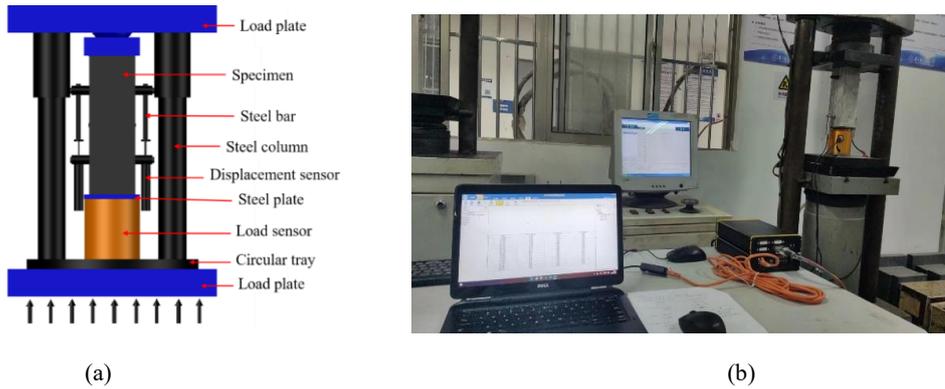


图 4 轴心抗压强度试验
Fig 4. Axial Compressive Strength Test

试件压应力 σ 应按式 (1) 计算:

$$\sigma = \frac{F_v}{A_v} = \frac{F_v}{100 \times 100} = 10^{-4} F_v \quad (1)$$

式中:

σ 为试件压应力 (MPa)

F_v 为试件受压过程中的荷载 (N)

A_v 为试件截面面积 (mm^2)

试件应变 ε 应按式 (2) 计算:

$$\varepsilon = \frac{R_{v,1} + R_{v,2}}{2R_v} = \frac{R_{v,1} + R_{v,2}}{2 \times 200} = \frac{R_{v,1} + R_{v,2}}{400} \quad (2)$$

式中:

$R_{v,1}$ 和 $R_{v,2}$ 为通过位移传感器获取的竖向位移

R_v 为位移传感器的测量距离, 本试验测量距离为 200mm

2 结果与分析

2.1 破坏过程与破坏特征

当 MRCA 为矩阵式排列的试件受压破坏过程中, 试件的损伤主要分为三个阶段, 裂纹产生, 裂纹的开展和试件破坏。从图中可以很清楚的看出, 两种排列方式的再生粗骨料导致试件的破坏形态有明显不同。在 MRCA 为规则排布的情况下, 试件出现的为两条竖向主裂缝, 在 MRCA 有限元分析过程中也可以发现, 裂缝沿骨料方向延伸, 但裂缝只向正下方或正上方延伸, 并未出现左右两侧骨料裂缝的交叉。

MRCA 为随机排布的试件在加载至极限荷载之前，试件没有出现碎裂情况，表面无裂缝。随着荷载的增加，试件内部开始出现开裂，进而影响到表面出现细小裂缝。当荷载达到峰值荷载时，试件表面的多个细微裂缝逐渐延伸，形成斜向主裂缝。随着荷载继续增加，主裂缝贯穿试件界面，最终试件破坏，与普通混凝土试件的破坏模式相似。

图 5 展示了试验后试件的破坏情况。所有试件的破坏特征均为受压破坏，由于不同 MRCA 的排列方式导致试件的内力传递方式的不同，产生了不同的破坏形态，当 MRCA 为矩阵式排列时试件的破坏形态为两条主裂缝，MRCA 取代率为 50%的试件会出现两条竖向裂缝在延伸过程出现汇合，进而出现“Y”形的主裂缝，这是由于竖向排列的 MRCA 覆盖的旧砂浆位置不统一，改变了裂缝的延伸方向导致的；当 MRCA 为随机式排列时，试件最终呈现明显的斜裂缝，部分试件表面会出现沙漏形的破坏形态，试件裂缝的开展、延伸以及最终破坏形态与普通混凝土相近。

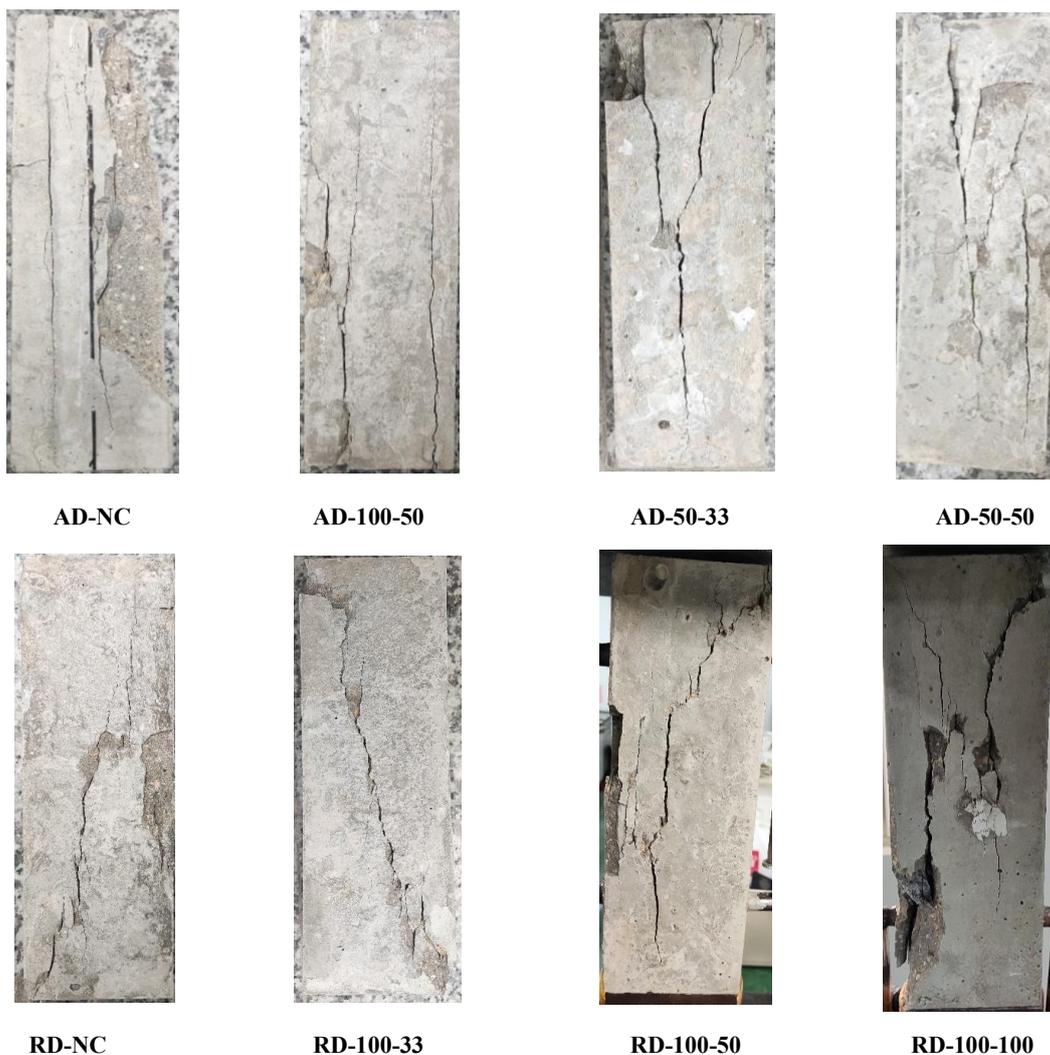


图 5 棱柱体试件破坏形态

Fig 5. Failure Mode of Prism Specimens

图 6 为 MRCA 规则排布情况下的试件裂缝开展情况。在被破坏的试件中可以清晰的看到内部的裂缝开展情况，主裂缝均直接贯穿旧砂浆部分，沿加载方向延伸，两侧骨料的开裂未出现交叉。试件的主要开裂位置在天然骨料与新砂浆或旧砂浆处，旧砂浆与新砂浆之间几乎没有开裂，这说明天

然骨料处的 ITZ 最薄弱；裂缝由天然骨料处发生，覆盖在天然骨料上的旧砂浆则对裂缝的发展有一定导向作用，即裂缝均向有旧砂浆的一侧发展，两侧骨料的开裂均未出现交叉。



图 6 MRCA 在试件中的开裂形态
Fig 6. Cracking Pattern of MRCA in Specimens

2.2 应力应变关系

图 7 为 MRCA 排列方式对 MRCAC 的应力-应变关系的影响。曲线上升阶段的初始部分是线性的，然后应力缓慢增加至峰值应力。不同的 MRCA 排列方式会使试件出现不同的内力传递方式，进而影响内部裂缝的扩展速度与方向，最直观的体现在于 MRCAC 应力应变曲线上升阶段的线性部分，当 MRCA 为矩阵式排列时，受轴向荷载的作用下，大多数 MRCA 在这种排列方式下几乎同时受到水平的拉应力作用，在开裂之前，处于弹性阶段的试件的应力上升速度更快；当 MRCA 为随机排列时，由于内部 MRCA 的分布位置复杂，内部应力的传递方向也错综复杂，与矩阵式排列方式不同，MRCA 受到来自各个方向的拉应力和压应力，这致使处于弹性阶段的试件的应力上升速度较慢，因此出现了弹性模量低于 MRCA 为矩阵式排列的试件的情况。当加载至峰值荷载附近时，MRCA 为矩阵式排列的试件由于内部轴向压应力和水平拉应力的共同作用下，MRCA 及试件内部很快出现开裂并快速延伸形成主裂缝，这导致试件在达到峰值荷载后快速下降并破坏；MRCA 为随机式排列的试件内部应力传递更复杂，MRCA 之间既存在拉应力也存在压应力，因此试件内部开裂速度较慢，延伸的速度较慢，试件加载至峰值荷载处下降速度较慢，同理，试件的峰值应力均高于 MRCA 为矩阵式排列下的试件。从应力应变曲线可以看出，当试件进入弹塑性阶段和峰值阶段时，MRCA 为矩阵式排列下的试件的峰值上升和下降的总应变小于 MRCA 为随机式排列的试件。

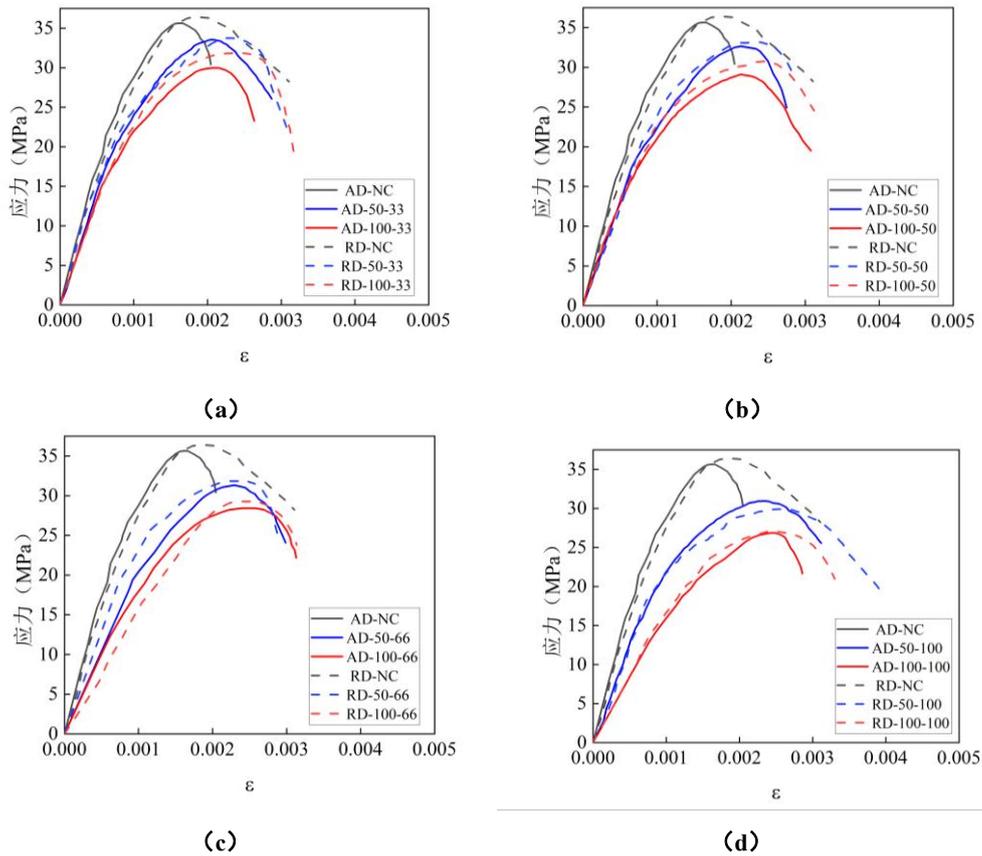


图 7 MRCAC 应力应变曲线
Fig 7. Stress-Strain Curve of MRCAC

2.3 峰值应力

图 8 为不同 MRCA 排列方式下再生混凝土的峰值应力平均值。由于 MRCA 矩阵式排列与随机排列情况下的 MRCAC 试件内力传递方式的不同，两种排列方式下的 MRCAC 试件呈现了不同的峰值应力的下降情况。当 MRCA 为矩阵式排列时，两种取代率下的 MRCAC 试件的峰值应力随旧砂浆覆盖率增加体现出较缓慢的下降幅度；当 MRCA 为随机式排列时，两种取代率下的 MRCAC 试件的峰值应力随旧砂浆覆盖率的增加体现出较快速的下降幅度。

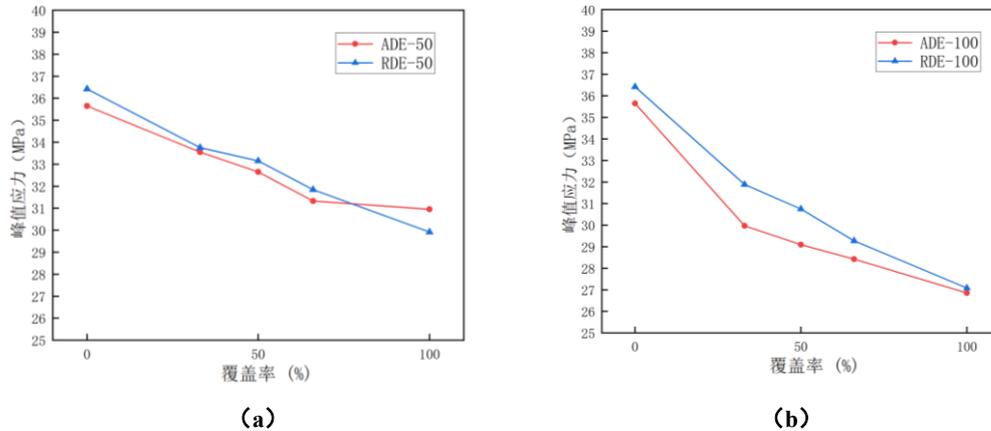


图 8 两种 MRCA 排列方式下的峰值应力
Fig 8. Peak Stress of MRCAC under Two Arrangement Modes

图 9 展示了覆盖率对 MRCAC 峰值应力的影响。随着旧砂浆覆盖率的增加，各组 MRCAC 试件

的峰值应力均呈现出下降趋势, 相对与天然骨料试件, 当取代率为 50% 情况下, MRCA 为矩阵式排列下的试件峰值应力分别下降了 5.9%、8.4%、12.1% 和 13.2%, MRCA 为随机式排列下的试件峰值应力分别下降了 7.3%、9%、12.6% 和 17.8%; 当取代率为 100% 情况下, MRCA 为矩阵式排列下的试件峰值应力分别下降了 15.9%、18.4%、20.3% 和 24.7%, MRCA 为随机式排列下的试件峰值应力分别下降了 12.4%、15.6%、19.6% 和 25.6%。在不同取代率下, MRCAC 峰值应力的下降情况随覆盖率的变化出现了不同表现, 当取代率为 50% 时, MRCA 为随机式排布下试件的峰值应力受旧砂浆覆盖率的影响更明显, 而取代率为 100% 时, 两种排列方式下的试件在旧砂浆覆盖率大于 50% 时峰值应力的下降程度接近。

在棱柱体试件受压过程中, 更容易受由竖向压力导致的水平拉应力作用并破坏。与立方体试件类似, 由于 MRCA 为矩阵式排列, 由水平拉应力作用产生的损伤更严重, 当 MRCA 取代率为 50% 时, 由于部分天然骨料周围有旧砂浆覆盖, 且不完全覆盖旧砂浆的粗骨料在水平和垂直方向的传力受到影响, 使整个 MRCAC 试件细观结构很快失去稳定, 最终破坏; 当 MRCA 为随机式排列时, 在受压作用过程中产生的水平应力由于骨料的排列位置错综复杂, 因此并没有大量直接的水平应力使试件产生损伤, 但受棱柱体外观影响, 因压荷载产生的内部应力在水平方向传递距离短, 相对于立方体试件更容易破坏, 因此尽管 MRCA 为随机排列方式的试件因内部应力传递复杂, 因此峰值应力相对于 MRCA 为矩阵式排列的试件更大, 但相对于立方体抗压强度试验结果, 两种排列方式的峰值应力较为接近。

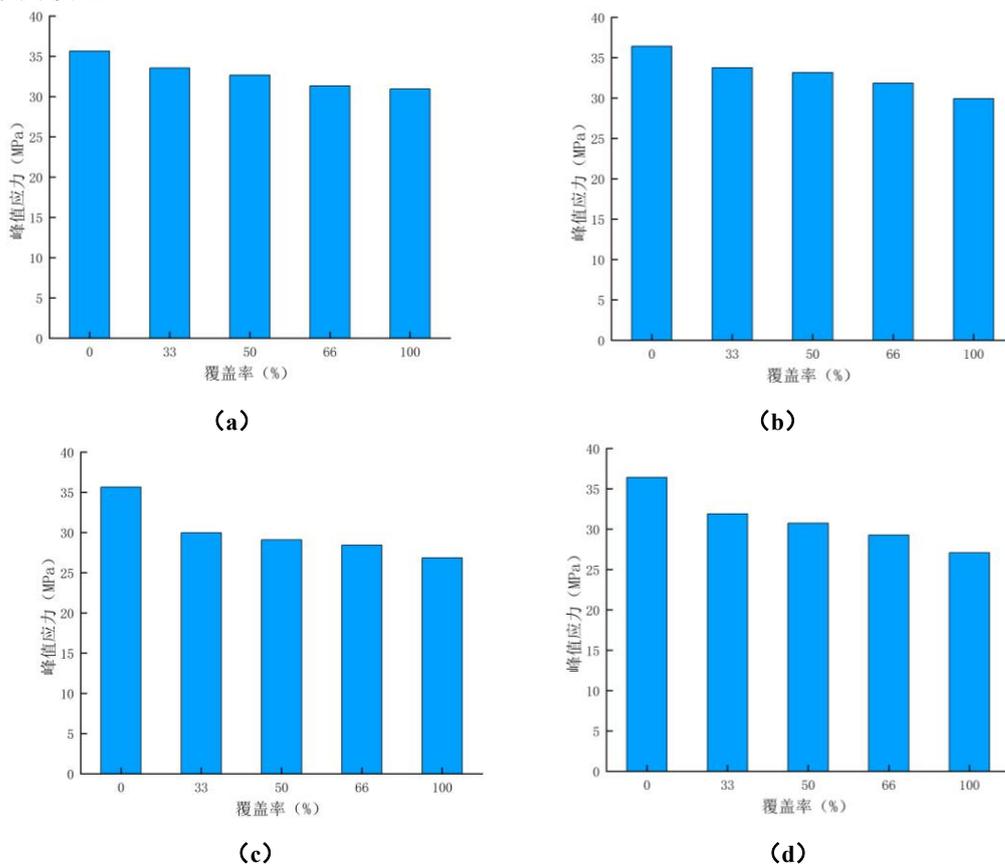


图9 覆盖率对 MRCAC 峰值应力的影响

Fig 9. Effect of Coverage Rate on Peak Stress of MRCAC

2.4 峰值应变

图 10 为不同 MRCA 排列方式下再生混凝土的峰值应变平均值。可以明显看出, MRCA 为随机排列下的试件的峰值应变均大于矩阵式排列的试件, 从 MRCAC 应力应变曲线的分析部分可以发现, MRCA 为随机排列下的试件因其内部的内力传递复杂, 试件的破坏是由内部产生的细小裂缝的延伸, 进而相接形成主裂缝导致的, 整个破坏过程相对于 MRCA 为矩阵式排列的试件较长, 即随机排列下的试件从进入弹塑性阶段到后峰值阶段更持久, 因此 MRCA 为随机排列方式的试件在达到峰值应力时产生的应变更大。

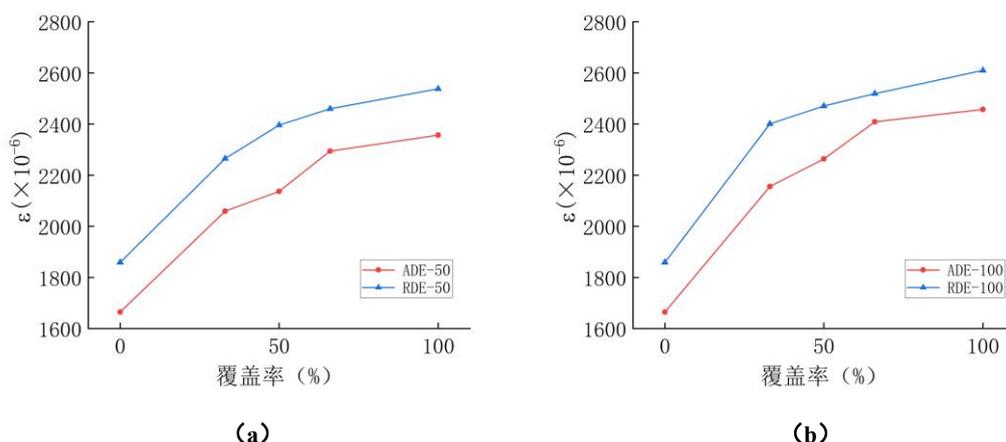


图 10 两种 MRCA 排列方式下的峰值应变

Fig 10. Peak Strain of MRCA under Two Arrangement Modes

图 11 展示了覆盖率对 MRCAC 峰值应变的影响。随着旧砂浆覆盖率的增加, 各组 MRCAC 试件的峰值应变均呈现出增加的趋势, 相对与天然骨料试件, 当取代率为 50% 情况下, MRCA 为矩阵式排列下的试件峰值应变分别增加了 19.1%、22.1%、27.4% 和 29.4%, MRCA 为随机式排列下的试件峰值应变分别增加了 17.9%、22.4%、24.4% 和 26.8%; 当取代率为 100% 情况下, MRCA 为矩阵式排列下的试件峰值应变分别增加了 22.8%、16.4%、30.9% 和 32.2%, MRCA 为随机式排列下的试件峰值应变分别增加了 22.6%、24.8%、26.2% 和 28.8%。可以看出, 再生粗骨料的投入对混凝土的峰值应变影响非常明显, 在不同粗骨料排列方式情况下, 尽管再生粗骨料为随机排列下的 MRCAC 的峰值应变大于矩阵式排列的情况, 但随着旧砂浆覆盖率的增加, 随机排列下的 MRCAC 的峰值应变的变化率略低于矩阵式排列的 MRCAC, 说明再生粗骨料的排列方式对 MRCAC 的峰值应变的影响更大。

对于 MRCAC 试件本身, 不同的 MRCA 排列方式导致试件在受压过程中内力传递方式不同。采用 MRCA 矩阵式排列方式浇筑的 MRCAC 试件的内部传力方向呈现规则状态, 在受压力作用过程中产生的水平应力使试件快速开裂并损伤。而天然粗骨料覆盖部分旧砂浆, 因旧砂浆力学性能较差, 对试件内部开裂具有一定导向效果, 因此内力传递受到影响, 试件破坏时产生的应变增加。采用随机式排列的 MRCAC 试件, 内部传力方向并不规则, 受压过程中内部应力传递过程复杂, 因此采用随机式排列的 MRCAC 试件的峰值应变均高于相同 MRCA 规格的矩阵式排列的 MRCAC 试件。

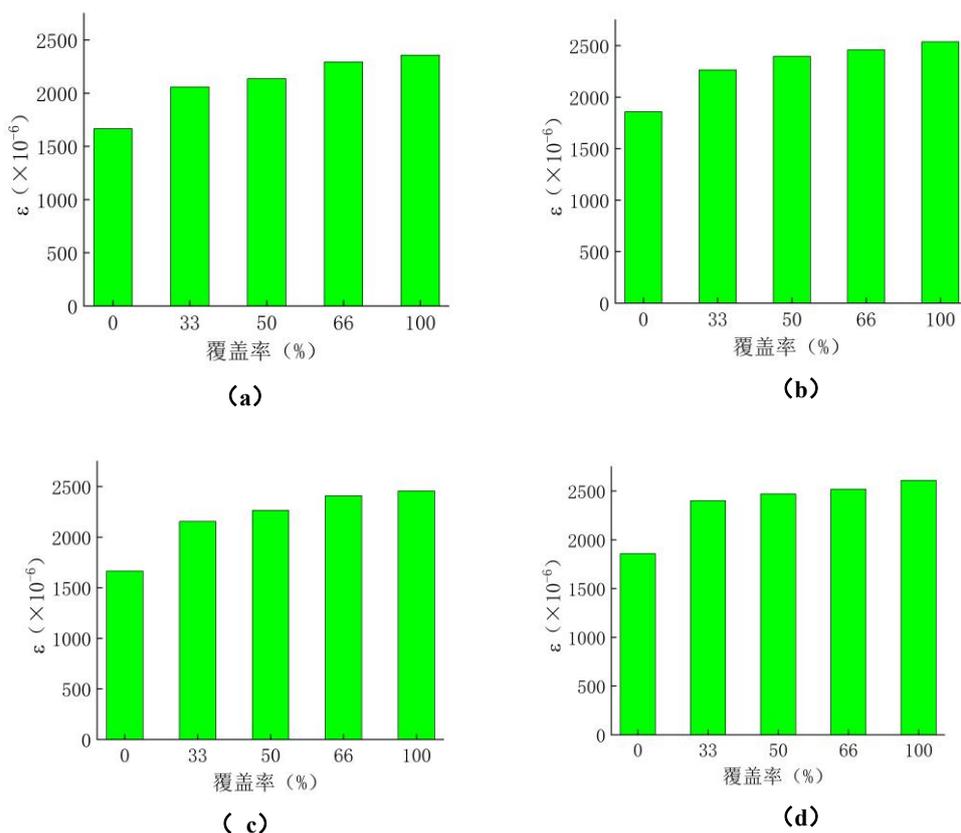


图 11 覆盖率对 MRCAC 峰值应变的影响

Fig. 11 Effect of Coverage Rate on Peak Strain of MRCAC

2.5 弹性模量

图 12 为不同 MRCA 排列方式下再生混凝土的弹性模量平均值。由于 MRCA 矩阵式排列与随机排列情况下的 MRCAC 试件内力传递方式的不同，导致矩阵式排列下的 MRCAC 的材料相对更脆，弹性模量相比随机式排列下的 MRCAC 试件更高。对于 MRCA 矩阵式排列下的试件，由于不存在随机式排列情况导致的复杂内力传递，因此受旧砂浆含量的影响，随着旧砂浆覆盖率的增加，两种取代率下的 MRCAC 弹性模量下降更快，而随机排列下的 MRCAC 的弹性模量随旧砂浆覆盖率的增加而下降较慢。

图 13 展示了覆盖率对 MRCAC 弹性模量的影响。随着旧砂浆覆盖率的增加，各组 MRCAC 试件的弹性模量均呈现出下降趋势，相对于天然骨料试件，当取代率为 50% 情况下，MRCA 为矩阵式排列下的试件弹性模量分别下降了 29.4%、27.8%、43.1 和 30.8%，MRCA 为随机式排列下的试件弹性模量分别下降了 5.47%、19.9%、19.1 和 23.3%；当取代率为 100% 情况下，MRCA 为矩阵式排列下的试件弹性模量分别下降了 26.9%、30.2%、44.9% 和 54.8%，MRCA 为随机式排列下的试件弹性模量分别下降了 26.2%、17.6%、48.2% 和 43.9%。在不同取代率下，MRCAC 弹性模量的下降情况随覆盖率的变化出现了不同表现，取代率对于不同 MRCA 排列方式下的 MRCAC 试件的弹性模量的变化规律影响不大，在 MRCA 为矩阵式排列情况下的 MRCAC 试件受旧砂浆覆盖率的影响，弹性模量

明显下降，而 MRCA 为随机式排列情况下的 MRCAC 的弹性模量的变化不大。

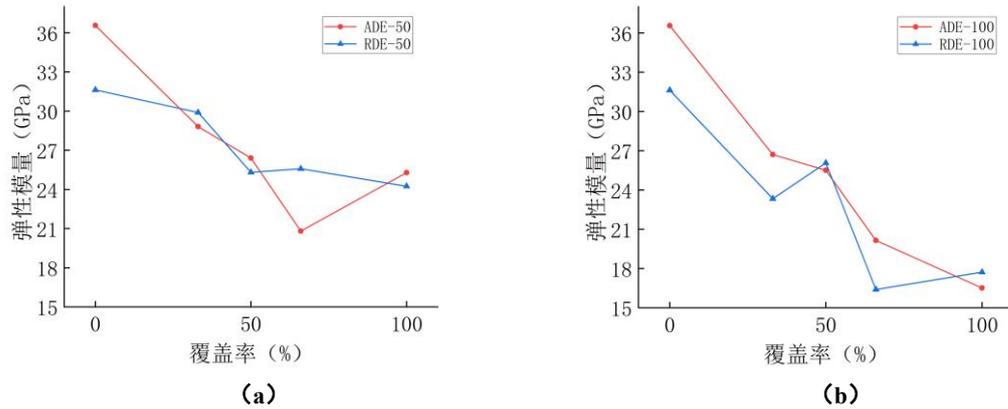


图 12 两种 MRCA 排列方式下的弹性模量

Fig. 12 Elastic Modulus of MRCA under Two Arrangement Modes

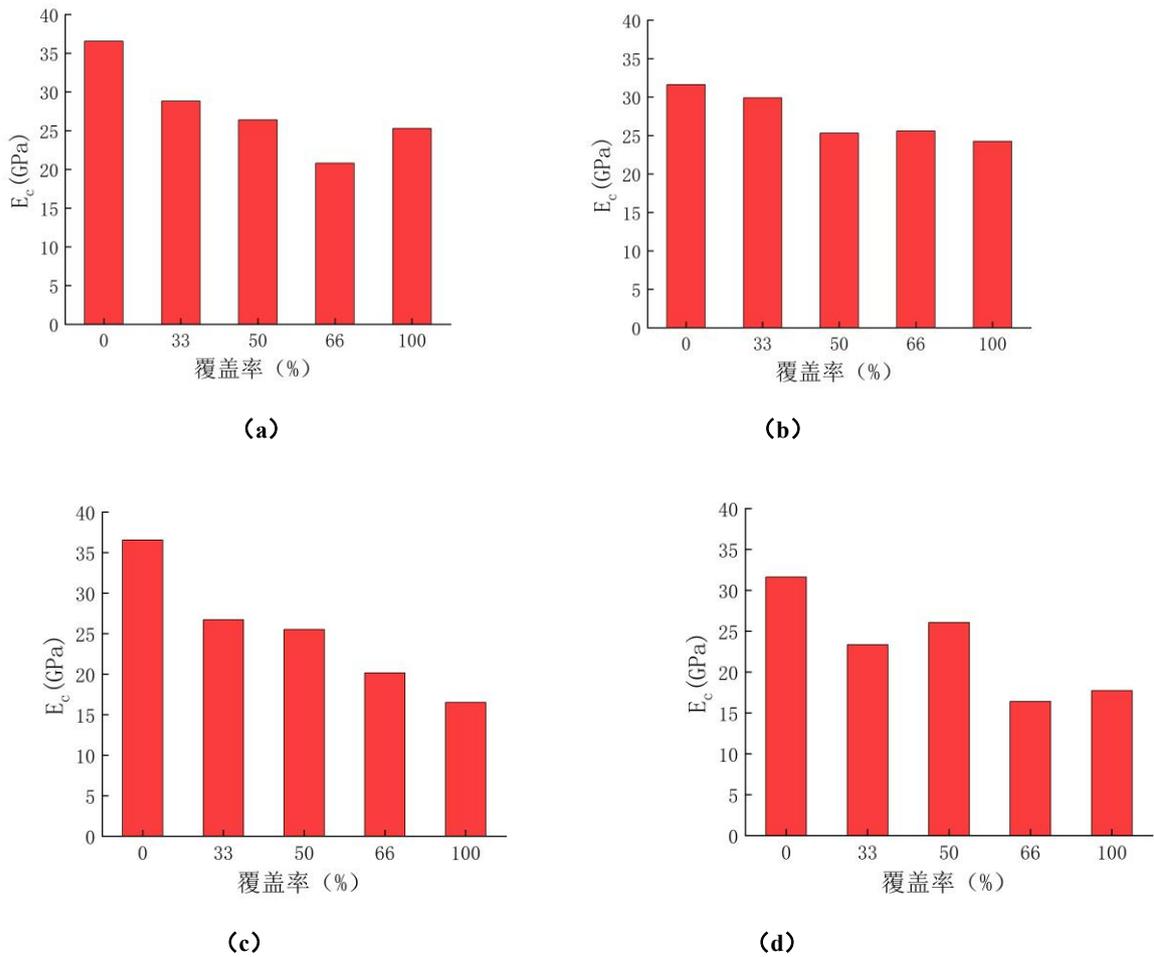


图 13 覆盖率对 MRCAC 弹性模量的影响

Fig. 13 Effect of Coverage Rate on Elastic Modulus of MRCAC

根据 MRCAC 的细观组成以及试验结果可以看出，导致弹性模量变化的主要因素在于 MRCA 的排列方式、旧砂浆的覆盖情况以及 MRCA 的取代率，由于 MRCA 矩阵式排列下的试件内力传递更

为直接, 试件快速达到峰值应力并发生破坏, 试件整体破坏偏向脆性破坏。而 MRCA 为随机式排列的情况, 试件内力传递复杂, 试件达到峰值应力的速度低于矩阵式排列下的试件, 与 MRCA 矩阵式排列的试件相比偏向延性破坏, 因此 MRCA 为规则排列的试件弹性模量大于 MRCA 为随机式排列的试件。

3 结论

本章研究了不同 MRCA 取代率、旧砂浆覆盖率以及 MRCA 排列方式对 MRCAC 的棱柱体轴心抗压强度以及应力-应变特性变化的影响情况, 得到以下主要结论:

(1) 因内力传递方式的不同, MRCA 的排列方式的不同直接影响 MRCAC 棱柱体试件在受轴压作用时的破坏形态, 天然骨料处的 ITZ 最薄弱; 裂缝由天然骨料处发生, 覆盖在天然骨料上的旧砂浆则对裂缝的延伸有一定导向作用。

(2) 旧砂浆的覆盖率在不同 MRCA 排列方式下对其轴心抗压强度的影响情况相似, MRCA 取代率越高, MRCAC 试件的峰值应力随旧砂浆覆盖率的增加而下降幅度越大。

(3) 随着 MRCA 旧砂浆覆盖率及取代率的变化, MRCAC 棱柱体试件的应力-应变特性出现了不同的变化规律, 而出现不同的变化规律的根本原因在于 MRCA 排列方式导致的内力传递特征不同以及旧砂浆覆盖率和 MRCA 取代率导致的试件内的旧砂浆含量的变化, 但 MRCA 排列方式导致的内力传递不同会使试件在同一性能指标上出现不同的表现情况。

参考文献

- [1] R. Xiao, P. Polaczyk, M. Zhang, X.i. Jiang, Y. Zhang, B. Huang, W. Hu, Evaluation of glass powder-based geopolymers stabilized road bases containing recycled waste glass aggregate[J]. *Transportation Research Record*, 2674 (1) (2020) 22–32.
- [2] R. Xiao, P. Polaczyk, X. Jiang, M. Zhang, B. Huang, Cementless controlled low-strength material (CLSM) based on waste glass powder and hydrated lime: synthesis, characterization and thermodynamic simulation[J]. *Construction and Building Materials*, 275 (2021) 122–157.
- [3] T. Gupta, S. Siddique, R.K. Sharma, S. Chaudhary, Behaviour of waste rubber powder and hybrid rubber concrete in aggressive environment[J]. *Construction and Building Materials*, 217 (2019) 283–291.
- [4] F. Berger, F. Gauvin, H.J.H. Brouwers, The recycling potential of wood waste into wood-wool/cement composite[J]. *Construction and Building Materials*, 260 (2020) 119786.
- [5] X.-y. Shang, J.-S. Li, Manufacturing and performance of environment-friendly lightweight aggregates with core-shell structure[J]. *Journal of Cleaner Production*, 276 (2020), 123157.
- [6] M.A.B. Omer, T. Noguchi, A conceptual framework for understanding the contribution of building materials in the achievement of Sustainable Development Goals (SDGs)[J]. *Sustainable Cities and Society*, 52 (2020), 101869.
- [7] V.W.Y. Tam, M. Soomro, J. Evangelista, A. Catarina, A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017)[J]. *Construction and Building Materials*, 172 (5) (2018) 272–292.
- [8] B. Xia, T. Ding, J. Xiao, Life cycle assessment of concrete structures with reuse and recycling strategies: A novel framework and case study[J]. *Waste Management*, 105 (2020) 268–278.
- [9] P. Yan, J. Wu, D. Lin, X. Liu, Uniaxial compressive stress–strain relationship of mixed recycled aggregate concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 350 (2022), 148663.
- [10] L. Lin, D. Shen, H. Chen, W. Xu, Aggregate shape effect on the diffusivity of mortar: A 3D numerical investigation by random packing models of ellipsoidal particle and of convex polyhedral particles[J]. *Computers and Structures*, 144 (2014) 40–51.
- [11] 党娜娜, 彭一江, 周化平, 等. 基于随机骨料模型的再生混凝土材料细观损伤分析方法[J]. *固体力学学报*, 2013,

- 33(S1): 58-62.
- [12] 蒋宝库. 再生混凝土细观力学及氯离子扩散数值模拟[D]. 济南大学, 2015.
- [13] 段东旭. 基于细观结构的再生混凝土力学性能研究[D]. 西安理工大学, 2018.
- [14] 肖建庄, 李文贵, 刘琼. 模型再生混凝土单轴受压性能细观数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(06): 791-797.
- [15] J.J. Zheng, Z.Q. Guo, X.D. Pan, P. Stroeven, L.J. Sluys, ITZ volume fraction in concrete with spheroidal aggregate particles and application: Part I. Numerical algorithm[J]. Magazine of Concrete Research, 63 (7) (2011) 473-482.
- [16] J.J. Zheng, Z.Q. Guo, X.F. Huang, P. Stroeven, L.J. Sluys, ITZ volume fraction in concrete with spheroidal aggregate particles and application: Part II. Prediction of the chloride diffusivity of concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 63 (7) (2011) 483-491.
- [17] 方金杰. 基于细观模型的再生混凝土拉伸应力-应变全曲线研究[D]. 福州大学, 2018.
- [18] M. Guo, F. Grondin, A. Loukili, Numerical analysis of the failure of recycled aggregate concrete by considering the random composition of old attached mortar[J]. Journal of Building Engineering, S2352-7102 (18) (2018) 31451-31459.
- [19] 赫传凯, 张若乔. 再生混凝土单轴受压性能细观数值模拟[J]. 智能建筑与智慧城市, 2019, (02): 49-52.
- [20] L. Ying, Y. Peng, M.M.A. Kamel, Mesoscopic numerical analysis of dynamic tensile fracture of recycled concrete[J]. Engineering Computations, 37 (6) (2020) 1899-1922.
- [21] M. Guo, F. Grondin, A. Loukili, Numerical analysis of the failure of recycled aggregate concrete by considering the random composition of old attached mortar[J]. Journal of Building Engineering, 28 (2020) 10140.
- [22] 岳强, 王丽, 刘福胜, 等. 基于真实细观模型的再生混凝土破坏数值研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(02): 221-228.

第1作者简介: 李真玉 (1996-), 女, 硕士研究生, 讲师, 研究方向: 城市轨道交通管理、交通设施建设、数字孪生与智慧交通等相关基础研究和应用研究。E-mail: 2021000129@wzpt.edu.cn。

***通讯作者简介:** 林大地 (1992-), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向: 高性能橡胶混凝土路面材料性能、再生混凝土力学性能、再生粗骨料细观数字建模、多尺度下再生粗骨料模型混凝土损伤机理等研究。E-mail: 20240136@wzut.edu.cn。