

骨料粒径对模型骨料混凝土剪切性能影响研究

Effect of Aggregate Particle Size on Shear Performance of Modeled Aggregate Concrete

王之鑫, 孙 畅, 刘 琼

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘 要: 通过对 17、23、30 mm 三种不同骨料粒径的模型骨料混凝土试件进行剪切试验, 研究骨料粒径对模型骨料混凝土剪切性能及裂缝开展规律的影响, 揭示模型骨料混凝土剪力传递机理, 分析不同骨料粒径对混凝土剪切性能影响。结果表明: 随着骨料粒径由 17 mm 增大至 30 mm, 峰值荷载逐渐增大, 增长速度逐渐下降; 峰值荷载对应的剪切滑移增大, 增长速度逐渐上升。三种骨料粒径的模型骨料混凝土试件荷载-位移曲线均近似呈现上升、下降及回升或平稳三个阶段。裂缝宽度-滑移曲线的增长趋势与骨料断裂情况有关。三种不同骨料粒径模型骨料混凝土试件的骨料断裂情况及裂缝发展呈现不同特征, 应变集中区分布与骨料断裂情况有关。偏小粒径, 骨料发生断裂, 骨料裂缝间机械咬合与摩擦作用传递剪力; 偏大粒径, 骨料保持完整, 骨料与砂浆间机械咬合与摩擦作用传递剪力; 中等粒径, 表现出过渡性破坏模式; 不同粒径试件呈现差异化剪力传递特征。

关键词: 模型骨料混凝土; 骨料粒径; 裂缝发展; 剪切性能

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 01-0007-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.01.002

WANG Zhixin, SUN Chang, LIU Qiong

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science
and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Through shear tests on modeled aggregate concrete specimens with three distinct aggregate particle sizes of 17, 23, and 30 mm, this study investigates the influence of aggregate particle size on the shear performance and crack development behavior of modeled aggregate concrete. The study clarifies the shear transfer mechanism in modeled aggregate concrete and analyzes different aggregate particle sizes affect concrete's shear performance. According to the results, as the aggregate size increases from 17 mm to 30 mm, the peak load increases gradually and the growth rate decreases gradually. Correspondingly, the shear slip at peak load also increases, with its growth rate accelerating. The Load-displacement curves for specimens with the three aggregate particle sizes show approximately three stages: an initial rise, followed by a decline, and then either a secondary rise or stabilization. The fracture condition of the aggregate influences the trend of crack width-slip curves. Specimens with different aggregate particle sizes display distinct characteristics in terms of aggregate fracture and crack propagation, with strain concentration areas correlating closely with aggregate fracture patterns. Specifically, smaller particles tend to fracture, leading to mechanical interlock and friction between cracks to transfer shear forces; larger particles remain

基金项目: 国家自然科学基金 (51808338)。

作者简介: 王之鑫 (1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 混凝土结构。

通信作者: 孙 畅 (1987—), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 再生混凝土结构研究。

收稿日期: 2023-04-20

材料科学

intact, relying on mechanical interlock and friction between the aggregate and mortar to transfer shear forces; medium-sized particles exhibit transitional failure modes. Overall, specimens with varying particle sizes demonstrate distinct shear force transfer characteristics.

Key words: modeled aggregate concrete; aggregate particle; crack propagation; shear performance

0 引言

混凝土结构是现代建筑中主要的结构形式之一,其性能研究始终是推动建筑业进步的重要因素,混凝土抗剪是混凝土结构基本理论的经典问题之一。随着混凝土结构抗剪性能研究的进展,提出许多混凝土结构抗剪理论:桁架模型、塑性理论、极限平衡理论、统计分析法、非线性有限元分析等^[1]。

在主要受力构件中,梁的受力形式是多样的,其中剪切破坏属于脆性破坏。在无腹筋梁剪切破坏中,构件中虽然没有腹筋提供抗剪作用,但是无腹筋钢筋混凝土梁破坏的影响因素也较多,其剪力传递机理复杂导致难以合理准确地计算其受剪承载力。无腹筋梁剪切破坏研究还需从剪切破坏本质层面对破坏机理进行深度研究^[2]。

混凝土内部各项材料力学性能差距较大,加之裂缝孔隙和初始缺陷的存在,导致混凝土基本性能影响因素复杂^[3]。有学者基于试验模型化的思想,对含1颗骨料的模型骨料混凝土进行加载试验,发现微裂缝最先在界面过渡区出现^[4];有学者通过模型再生混凝土受压动态力学特征试验,研究不同砂浆强度、不同取代率和不同材料下的模型再生混凝土动态力学性能研究^[5];通过模型再生混凝土的细观数值分析,对模型再生混凝土进行变参数分析,研究不同力学参数对模型再生混凝土应力分布的影响^[6]。目前对于混凝土结构基本理论中的抗剪性能研究,通过模型骨料混凝土开展抗剪性能研究相对较少。

1968年Fenwick等^[7]首次通过试验量化了骨料咬合在剪力传递中贡献,结果表明裂缝间的骨料咬合传递的竖向剪力占剪力的60%~70%。至此学术界才逐渐深入研究剪力传递过程中骨料咬合作用。已有大量试验研究证明骨料咬合是素混凝土抗剪最重要的抗剪传递机制^[8-10]。基于混凝土骨料传递的研究,通过再生混凝土剪力传递试验,研究了再生混凝土骨料咬合及剪力传递机理^[11]。骨料咬合模型基

于纵向应变、裂缝宽度和裂缝间隙的关系。Peters等^[12]提出了数字图像相关方法(DIC),它是分析变形前后的图像点位变化计算出位移信息,捕捉物体表面应变场信息的数字图像方法,被广泛应用于试验研究。Belbachir等^[13]利用DIC方法获得不同尺寸梁的断裂参数,研究了尺寸效应对无腹筋梁抗剪强度及骨料咬合机理的影响;任会兰等^[14]通过试验分析验证了DIC方法在混凝土变形测量的合理性;刘琼等^[15]制作模型再生混凝土试件,利用DIC方法研究其受压过程中的裂缝发展和损伤演化机制。

因此,通过DIC方法对模型骨料混凝土在剪切荷载作用下裂缝发展全过程进行分析,研究骨料粒径对模型骨料混凝土裂缝开展情况的影响,探索混凝土剪力传递机理。

1 试验方案

1.1 试件设计

试验模型骨料混凝土是由圆柱体骨料和旧水泥砂浆浇筑成的。试验选取直径分别为17、23和30mm,高度为30mm的圆柱体骨料。为研究新旧混凝土界面处骨料咬合作用,设置新旧浇筑间隔为7d。砂浆材料包括:P·O 52.5水泥、砂和自来水,砂筛选粒径小于2.36mm。新旧砂浆选用相同配合比(质量比):水:水泥:砂为1.0:2.9:2.5。三组试件,每组测试3个试件,取其平均值做为试验值。试件编号规则为:“NA”表示天然骨料,数字表示骨料粒径,NA17表示试件粒径为17mm的天然骨料的模型骨料混凝土。

试件的尺寸信息如图1所示,先浇筑左侧砂浆及骨料,放入标准养护箱养护7d,浇筑右侧的砂浆并养护28d。

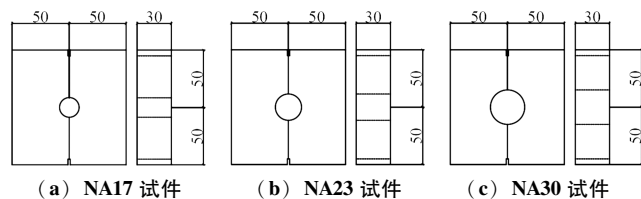


图1 试件设计及尺寸

Fig.1 Specimen design and size

1.2 试验加载装置

试验加载设备选用万能试验机，如图 2（a）所示。加载过程采用位移加载，加载速率 0.1 mm/min，加载至位移 4 mm 时停止加载。图 2（b）为试验简化图，试件通过夹具固定后进行加载，用工业相机拍摄记录。

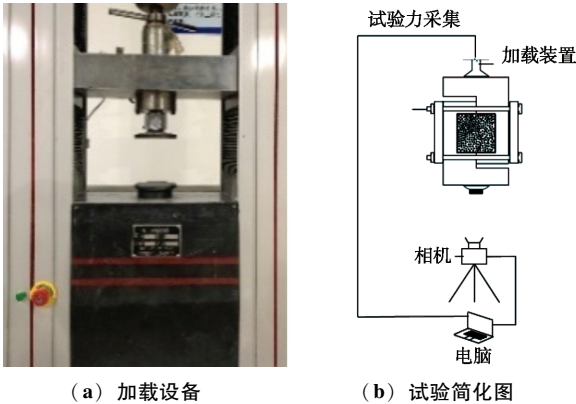


图 2 加载设备与夹具示意图

Fig. 2 Loading equipment and Simplified test diagram

对试件表面的散斑进行图像信息采集，图像采集频率 6 次/s。试件表面斑点呈无序且密集的方式分布，散斑斑点的大小约 0.8 mm。加载结束后通过软件对比散斑相对位置改变，计算试件表面真实位移场，分析得到应变场分布信息。图像采集选用分辨率为 1 024 × 1 024 像素工业相机，可视范围约为 110 mm × 110 mm，整个试件均在拍摄范围内，像素与真实长度关系根据试验图片进行换算。

2 试验结果及数据分析

2.1 主要试验结果

模型骨料混凝土试件试验结果见表 1。其中，试件加载过程中荷载最高点定义为 P 点，荷载下降段结束点定义为 D 点，试验结束加载记为 F 点。NA23、NA30 试件 P 点荷载比 NA17 试件 P 点荷载分别高 34%、38%。峰值荷载逐渐增大，增长速度明显下降。分析三组试件峰值荷载对应位移发现 NA23 试件 P 点位移均值比 NA17 试件 P 点位移均值只多 4%，NA30 试件 P 点位移均值比 NA17 试件 P 点位移均值却多 60%。峰值位移逐渐增大，增长速度逐渐上升。

比较低谷荷载数据，NA30 试件 D 点荷载均值比 NA17 试件高 173%，比 NA23 试件高 120%；NA30 试件 D 点位移均值比 NA17 试件增加了 83%，比

NA23 多 101%。

表 1 主要测试结果列表
Table 1 Lists the main test results

试件编号	P 点荷载/kN	P 点荷载均值/kN	峰值位移/mm	峰值位移均值/mm	D 点荷载/kN	D 点荷载均值/kN	低谷位移/mm	低谷位移均值/mm
a	15.0		1.42		6.1		1.52	
NA17 b	19.6	16.6	1.05	1.29	9.1	7.0	1.05	1.49
c	15.1		1.39		5.9		1.91	
a	22.5		1.32		6.0		1.33	
NA23 b	22.5	22.3	1.55	1.34	11.5	8.7	1.59	1.36
c	22.0		1.15		8.7		1.16	
a	19.1		2.28		15.8		2.61	
NA30 b	25.0	22.9	1.99	2.06	20.7	19.1	3.04	2.73
c	24.7		1.92		20.7		2.53	

2.2 荷载 - 位移曲线

三组试件的荷载 - 位移曲线如图 3 所示，试件的曲线均近似呈现三个阶段：0 - P 上升阶段，P - D 下降阶段，D - F 回升或持平阶段。

17 mm 粒径模型骨料混凝土试件的荷载 - 位移曲线如图 3（a）所示。首先，开始加载到峰值 P 点为第一阶段，曲线呈近似线性阶段，该上升阶段荷载 - 位移曲线斜率较为一致。该组试件三个试件的荷载峰值取值范围为 15.0 ~ 19.6 kN。在峰值点 P 时，观察到骨料开始出现裂纹。随后，由峰值 P 点到谷值 D 点为第二阶段，下降段结束时，该组 3 个试件低谷荷载取值范围为 5.9 ~ 9.1 kN。其中 NA17 - a 和 NA17 - b 荷载 - 位移曲线第二阶段，试件抗剪承载力急剧下降，此时骨料沿剪切方向发生断裂破坏。而 NA17 - c 试件在 P - D 阶段存在局部砂浆挤压压碎现象，曲线呈现多峰值波动状态，随着骨料断裂，承载力急剧下降曲线到达 D 点。在 D 点之后，NA17 三个试件曲线随着荷载增加呈轻微上升趋势，此时沿剪切面断裂的骨料粗糙表面相互摩擦起主要作用。

NA23 粒径模型骨料混凝土试件的荷载 - 位移曲线如图 3（b）所示，破坏过程分为三个阶段。首先，开始加载到峰值 P 点为第一阶段。该阶段三者曲线斜率较为固定，荷载 - 位移曲线呈近似线性阶段，该组 3 个试件的荷载峰值取值范围为 22.0 ~ 22.5 kN，此时骨料与砂浆之间的界面黏结逐渐失效。随后，峰值 P 点到谷值 D 点为第二阶段，位移没有明显变化，承载力急剧下降，此时骨料与砂浆之间的界面黏结失效。荷载急剧下降至谷值，该组 3 个试件低谷

材料科学

荷载取值范围为 6.0~11.5 kN。最后, 谷值 D 点到结束 F 点为第三阶段, 在 D 点后, 曲线有短暂上升段, 在上升段结束时, 骨料发生突然断裂, 随后曲线呈平缓上升段, 该阶段断裂后的骨料两侧粗糙表面之间摩擦力提供主要的抗剪承载力。

30 mm 粒径的模型骨料混凝土试件的荷载 - 位移曲线如图 3 (c) 所示。曲线上升段均呈现多峰值波动现象。其中最大值定义为 P 点, 最小值定义为 D 点。首先, 在 0 - P 阶段中: 开始加载到第一个极值 C 点为线性上升段, 该组 3 个试件极值 C 的取值范围为 17.7~20.1 kN, P 点取值范围为 19.1~25.0 kN。C 点到 P 点荷载 - 位移曲线呈波动状态, 此时骨料与

砂浆黏结局部破坏, 黏结作用和局部咬合作用同时存在。随后, 峰值 P 点到谷值 D 点为下降段, 该组 3 个试件 D 点取值范围为 15.8~20.7 kN, 此时黏结彻底失效。最后, 曲线进入近似平稳阶段, 谷值 D 点到结束 F 点。

由图 3 可知, NA17 试件 0 - P 阶段、NA23 试件 0 - P 和 NA30 试件 0 - C 大致为线性。对 17、23 与 30 mm 粒径模型骨料混凝土三组试件每组线性阶段斜率取平均值, 分别为 13.4、16.9 和 14.8 kN/mm。可以发现骨料粒径为 23 mm 试件荷载 - 位移曲线直线斜率最大, 骨料粒径为 17 和 30 mm 试件对应斜率相近。该斜率和骨料的粒径大小非呈正相关。

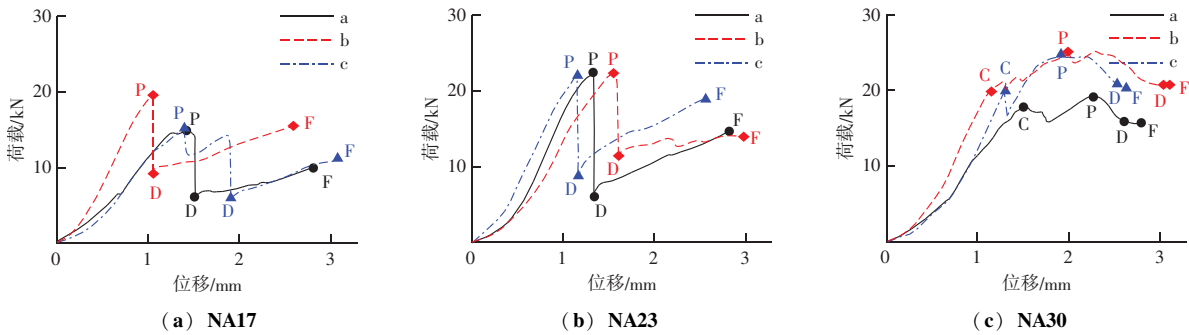


图 3 荷载 - 位移曲线
Fig. 3 Load - displacement curve

3 裂缝发展及应变场分析

3.1 裂缝宽度 - 位移曲线

通过 DIC 技术对试件左右两侧裂缝宽度取平均值, 得出裂缝宽度 - 位移曲线如图 4 所示。每个试件在达到峰值荷载时裂缝宽度均值分别为 0.46、0.46 和 0.59 mm。相较于竖向位移, 裂缝宽度的值较小。

由图 4 (a)、(b) 可知, NA17 和 NA23 两组的裂缝宽度 - 位移曲线相似, 曲线均呈现三个阶段。

加载初期试件位移增长, 裂缝宽度为 0, 此时未发生黏结破坏。随后曲线进入线性上升段直至 D 点, 这一阶段随着试件左右两侧的相对位移增大, 裂缝宽度逐渐扩展。在 D 点处, 骨料出现断裂, 部分试件出现小范围的裂缝宽度回缩现象。曲线进入第三阶段。由于断裂骨料表面粗糙度较小, 这一阶段位移迅速增长, 裂缝宽度增长缓慢。

由图 4 (c) 可知, NA30 与 NA17、NA23 的裂缝宽度 - 位移曲线略有不同, 曲线初始阶段与 X 轴

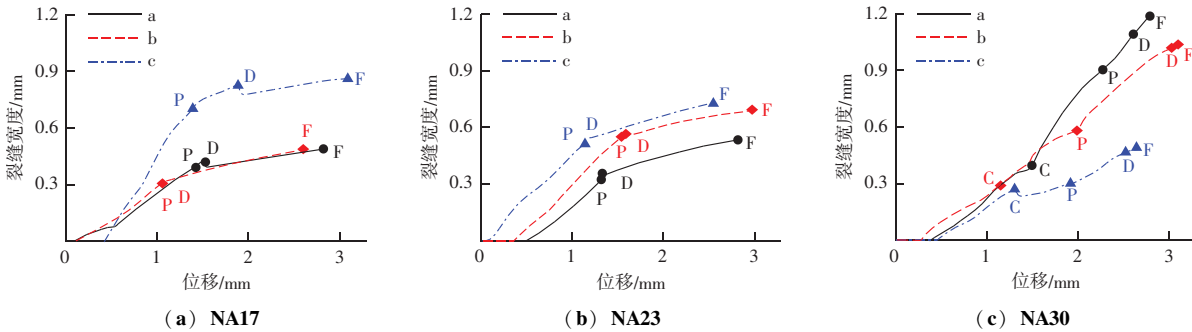


图 4 裂缝宽度 - 位移曲线
Fig. 4 Crack width - displacement curve

平行, 试件未开裂, 裂缝宽度为 0。随后曲线随位移增加呈现线性近似上升段, 且斜率不发生变化。NA30 与 NA17、NA23 的主要区别是 NA30 骨料未发生断裂。因此随着剪切位移的增长, 裂缝宽度持续增长。

3.2 裂缝发展过程

在上述分析中, 试件都有 P 和 D 两个明显特征点。曲线大致呈现三个阶段: 0-P 上升阶段, P-D 下降阶段, D-F 回升或近似平稳阶段。每组选取一个代表性的试件, 对这些特征点进行裂缝发展过程分析。

NA17-a 试件峰值荷载 P 点时裂缝发展如图 5 (a) 所示, 两侧砂浆黏结破坏, 骨料上下边缘处局部区域发生断裂。试件低谷荷载 D 点时裂缝发展如图 5 (b) 所示, 观察到骨料有近似贯穿的裂缝, 砂浆裂纹也较为清晰。终止 F 点时裂缝发展如图 5 (c) 所示, 骨料呈现贯穿劈裂状态, 且砂浆挤压处裂缝明显。

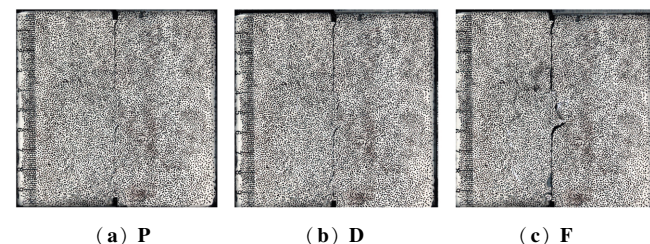


图 5 NA17-a 的裂缝发展过程

Fig. 5 Fracture development process of NA17-a

NA23-a 试件峰值荷载 P 点时裂缝发展如图 6 (a) 所示, 新老砂浆黏结破坏, 观察到此时试件内骨料完好, 裂缝只分布在新旧砂浆界面及骨料与砂浆接触区域与加载方向呈 45° 方向上。试件低谷荷载 D 点时裂缝发展如图 6 (b) 所示, 观察到试件的黏结面的接缝在扩大, 可发现骨料有细微裂缝产生, 新旧砂浆界面和骨料与砂浆界面沿 45° 方向上裂缝扩展更明显。终止 F 点时裂缝发展如图 6 (c) 所示, 骨料呈现贯穿劈裂状态, 砂浆与骨料接触处裂缝明显。

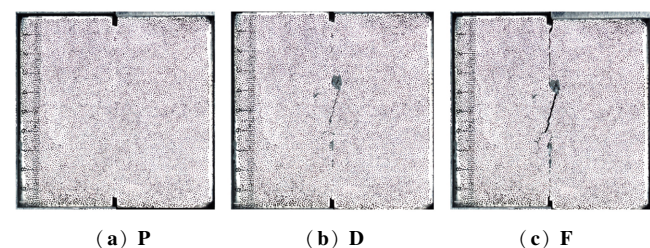


图 6 NA23-a 的裂缝发展过程

Fig. 6 Fracture development process of NA23-a

NA30-a 试件峰值荷载 P 点时, 裂缝发展如图 7 (a) 所示, 观察到试件内砂浆与骨料黏结破坏明显, 此时的裂缝主要分布在新砂浆与旧砂浆接触面和旧砂浆与骨料接触界面, 试件内黏结破坏裂缝十分明显。试件低谷荷载 D 点时, 裂缝发展如图 7 (b) 所示, 观察到沿剪切面方向骨料与砂浆界面下方砂浆内部出现新裂缝, 砂浆内裂缝与加载方向呈近似 30° 。终止 F 点时, 裂缝发展如图 7 (c) 所示, 骨料呈现完整状态, 有明显的新生砂浆裂缝出现在骨料与砂浆接触的左下方 $30^\circ \sim 45^\circ$ 区间, 试件中部向砂浆左右两侧有水平向裂缝延伸。

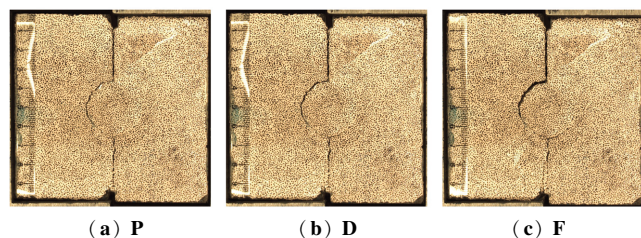


图 7 NA30-a 的裂缝发展过程

Fig. 7 Fracture development process of NA30-a

3.3 应变场分析

如图 8 (a) 所示, 试件达到峰值荷载 P 点时。试件的切应变集中在骨料内部右下侧边缘及骨料与砂浆黏结下部接触面, 试件中骨料开始断裂, 骨料左右两边与砂浆接触面承受反方向的切应变。如图 8 (b) 所示, 试件达到低谷荷载 D 点时, 骨料内部集中切应变区域在变小, 此时骨料内部断裂裂缝扩展, 切应变集中在骨料右下边缘及骨料与砂浆下部接触面, 承受反方向的切应变集中区域有扩展, 主要分布在骨料与砂浆接触区左右两侧和上部的砂浆。如图 8 (c) 所示, 在试件结束记录 F 点时, 试件切应变集中在裂缝两侧相互咬合的区域, 呈点状趋势, 承受反方向切应变分布于以骨料为圆心的与加载方向呈 135° 方向砂浆处。三个阶段应力状态因骨料断裂发生明显的改变。

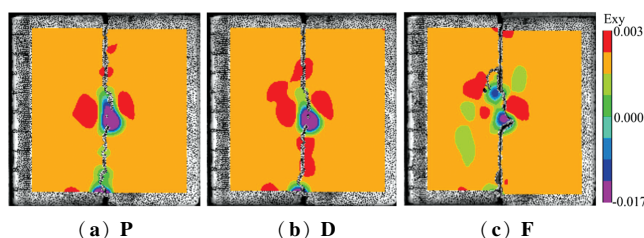


图 8 NA17-a 的 Exy 应变分布

Fig. 8 Exy strain distribution of NA17-a

材料科学

如图 9 (a) 所示, 试件达到峰值荷载 P 点时, 试件切应变集中在骨料与砂浆黏结的左上侧和右下侧接触面, 骨料没有断裂情况, 新老砂浆黏结面开裂明显。如图 9 (b) 所示, 试件达到低谷荷载 D 点时, 切应变分布未发生明显变化。两个时期中, 骨料内部存在沿加载方法剪应变近似为 0 的区域, 同时, 骨料左右两侧存在反方向切应变集中区。如图 9 (c) 所示, 在试件结束记录 F 点时, 骨料发生劈裂, 切应力重分布, 试件切应变集中在裂缝两侧相互咬合的区域。

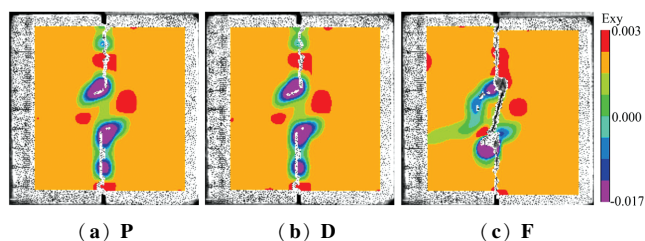


图 9 NA23-a 的 Exy 应变分布
Fig. 9 Exy strain distribution of NA23-a

如图 10 (a) 所示, 试件达到峰值荷载 P 点时。试件上下新旧砂浆、左侧砂浆与右下方部分砂浆与骨料黏结失效, 试件切应变集中在骨料与砂浆右下方接触面。如图 10 (b) 所示, 试件达到低谷荷载 D 点时, 试件切应变集中在右下方骨料与砂浆未完全黏结失效的接触区域, 左下方骨料与砂浆咬合作用区出现切应变集中区。如图 10 (c) 所示, 在试件结束记录 F 点时, 试件内部切应变沿右下方骨料砂浆接触区域向砂浆内部右上方扩展引起斜向砂浆内部裂缝, 下方砂浆挤压区域切应变增大。试件的内部骨料不发生断裂, 骨料咬合作用明显。随着荷载增加, 骨料与砂浆黏结逐渐失效, 同时伴随着砂浆内部裂缝扩展。

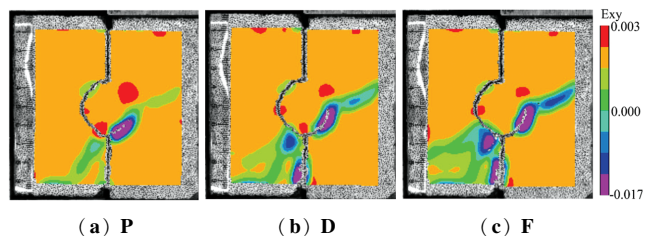


图 10 NA30-a 的 Exy 应变分布
Fig. 10 Exy strain distribution image of NA30-a

4 结论

(1) 三种不同骨料粒径的模型骨料混凝土试件

荷载-位移曲线均近似呈现: 上升、下降和回升或平稳三个阶段。

(2) 试验表明模型骨料试件峰值荷载随着模型骨料粒径的增大而增大, 其增长幅度随着模型骨料粒径的增长而减缓; 模型骨料试件峰值荷载对应的剪切滑移随着模型骨料粒径的增大而增大, 其增长幅度随着模型骨料粒径的增长而上升。

(3) 不同粒径试件呈现差异化剪力传递特征: 偏小粒径, 骨料发生断裂, 骨料裂缝间机械咬合与摩擦作用传递剪力; 偏大粒径, 骨料保持完整, 骨料与砂浆间机械咬合与摩擦作用传递剪力; 中等粒径, 表现出过渡性破坏模式。

(4) 切应力分布与骨料断裂有关。试件中骨料断裂后, 试件内切应变集中在骨料裂缝两侧相互咬合的区域; 试件骨料未断裂, 试件切应变集中在砂浆与骨料的黏结区域及骨料与砂浆发生咬合作用区域。应变集中区的分布特征与骨料断裂程度具有显著相关性, 验证了不同粒径条件下剪力传递机制的差异性。

参 考 文 献

- [1] 管品武, 王博, 徐泽晶. 钢筋混凝土构件抗剪承载力分析方法比较 [J]. 世界地震工程, 2002 (3): 95-101.
- [2] 熊二刚, 祖坤, 胡勤斌, 等. 无腹筋混凝土受弯构件基于力学分析的受剪计算 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2022, 50 (11): 115-124, 132.
- [3] 李杰, 任晓丹. 混凝土随机损伤力学研究进展 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35 (4): 20-29.
- [4] SHAH S P, WINTER G. Inelastic behavior and fracture of concrete [J]. ACI Special Publication, 1968, 20: 5-28.
- [5] 肖建庄, 袁俊强, 李龙. 模型再生混凝土单轴受压动态力学特性试验 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35 (3): 201-207.
- [6] 李文贵, 肖建庄, 袁俊强. 模型再生混凝土单轴受压应力分布特征 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2012, 40 (6): 906-913.
- [7] FENWICK R C, PAULAY T. Mechanisms of shear resistance of concrete beams [J]. Journal of the Structural Division, 1968, 94 (10): 2325-2350.
- [8] MUTTONI A, RUIZ M F. Shear Strength of Members without Transverse Reinforcement as Function of Critical Shear Crack Width [J]. ACI Structural Journal, 2008, 105 (2): 163-172.
- [9] CAVAGNIS F, RUIZ M F, MUTTONI A. An analysis of the shear-transfer actions in reinforced concrete members (下转第 23 页)

参 考 文 献

- [1] RIEKSTINS A, BAUMANIS J, BARBARS J. Laboratory investigation of crumb rubber in dense graded asphalt by wet and dry processes [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 292: 123459.
- [2] KAKAR M R, MIKHAILENKO P, PIAO Z, et al. Analysis of waste polyethylene (PE) and its by-products in asphalt binder [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 280: 122492.
- [3] 汪海年, 郑文华, 尤占平, 等. 聚合物改性剂和石油沥青相容性评价方法研究进展 [J]. *交通运输工程学报*, 2023, 23 (1): 8-26.
- [4] 刘少鹏, 黄卫东, 纪淑贞. PE 对沥青及沥青混合料性能影响研究 [J]. *公路工程*, 2016, 41 (1): 28-32.
- [5] 史绍松, 李传强, 凌天清, 等. 不同熔点的废旧 PE 裂解蜡温拌沥青性能研究 [J]. *化工新型材料*, 2022, 50 (10): 275-280.
- [6] 吴正光, 王彤, 程壮, 等. 废旧 PE 改性沥青混合料路用性能试验研究 [J]. *公路*, 2017, 62 (11): 235-238.
- [7] 汪海年, 徐宁, 陈玉, 等. 生物油再生老化沥青材料研究进展 [J]. *中国公路学报*, 2023, 36 (5): 1-20.
- [8] SONIBARE K, RUCKER G, ZHANG L Q. Molecular dynamics simulation on vegetable oil modified model asphalt [J].

Construction and Building Materials, 2021, 270: 121687.

- [9] CAO X X, CAO X J, TANG B M, et al. Investigation on possibility of waste vegetable oil rejuvenating aged asphalt [J]. *Applied Sciences*, 2018, 5: 765.
- [10] SUO Z, YAN Q, JI J, et al. The aging behavior of reclaimed asphalt mixture with vegetable oil rejuvenators [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 299: 123811.
- [11] SUO Z, CHEN H, YAN Q, et al. Laboratory performance evaluation on the recovering of aged bitumen with vegetable oil rejuvenator [J]. *Frontiers in Materials*, 2021, 8.
- [12] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [13] MA Q, GUO Z, GUO P, et al. Research on the viscosity-temperature properties and thermal stability of stabilized rubber powder modified asphalt [J]. *Sustainability*, 2021, 13 (24): 13536: 1-14.
- [14] YANG T, CHEN M, ZHOU X, et al. Evaluation of thermal-mechanical properties of bio-oil regenerated aged asphalt [J]. *Materials*, 2018, 11 (11): 2224.
- [15] 冯新军, 杨洪阳, 肖洪海, 等. 基于 SBS 结构修复的再生沥青性能及机理研究 [J]. *中外公路*, 2024, 44 (4): 56-63.

(上接第 12 页)

- without transverse reinforcement based on refined experimental measurements [J]. *Structural concrete*, 2017, 19 (1): 49-64.
- [10] HUBER P, HUBER T, KOLLEGER J. Investigation of the shear behavior of RC beams on the basis of measured crack kinematics [J]. *Engineering Structures*, 2016, 113: 41-58.
- [11] 肖建庄, 孙畅, 谢贺. 再生混凝土骨料咬合及剪力传递机理 [J]. *同济大学学报 (自然科学版)*, 2014, 42 (1): 13-18.
- [12] PETERS W H, RANSON W F. Digital Imaging Techniques in Experiment Stress Analysis [J]. *Optical Engineering*, 1982, 21 (3): 427-431.

(上接第 17 页)

- with carbonated modeled recycled concrete aggregates [J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 136: 106175.
- [5] 王娟, 李秀领, 郭强. 不同粗骨料取代率下粉煤灰再生混凝土的力学性能研究 [J]. *混凝土*, 2024 (6): 105-109.
- [6] 张玉栋, 张佳帅, 贾吉龙, 等. 粗骨料全替代再生混凝土的孔结构与力学性能分析 [J]. *硅酸盐通报*, 2024, 43 (8): 3005-3016, 3033.
- [7] SONG X B, LI C Z, CHEN D D, et al. Interfacial mechanical properties of recycled aggregate concrete reinforced by nano-materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2021 (270): 121446.
- [8] YU L Z, WU R X. Using graphene oxide to improve the properties

- [13] BELBACHIR A, ALAM S Y, MATAALLAH M, et al. Size effect on the contribution of the aggregate interlock mechanism in reinforced concrete beams without shear reinforcement [J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2020. 24 (9/10): 1363-1380.
- [14] 任会兰, 杜一宁, 宋水舟. 基于 DIC 方法研究混凝土劈裂的变形和破坏 [J]. *高压物理学报*, 2022, 36 (4): 91-100.
- [15] 刘琼, 肖建庄, 潘智生, 等. 废混凝土骨料和废砖骨料再生混凝土的模型化研究 [J]. *建筑结构学报*, 2020, 41 (12): 133-140.

of ultra-high-performance concrete with fine recycled aggregate [J]. *Construction and Building Materials*, 2020 (259): 120657.

- [9] LI W G, LONG C, TAM V W Y, et al. Effects of nano-particles on failure process and microstructural properties of recycled aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 142: 42-50.
- [10] 程子扬, 陈国夫, 屠艳平. 纳米 CaCO_3 对粉煤灰再生骨料混凝土性能及微结构的影响 [J]. *建筑材料学报*, 2023, 26 (3): 228-235.
- [11] 张正亚, 邢振贤, 龙晋豫. 建筑垃圾再生骨料混凝土配合比试验研究 [J]. *江西建材*, 2017 (24): 2, 4.