

文章编号:1007-9629(2021)03-0483-09

基于力学性能的吸附砂浆界限含量分析

王 震, 王新杰, 朱平华, 刘少峰

(常州大学 土木工程系, 江苏 常州 213164)

摘要: 基于再生粗骨料吸附砂浆定量分析及文献数据, 研究吸附砂浆含量变化与再生粗骨料物理性能之间的关系, 以及再生粗骨料取代率为 100% 的再生混凝土在不同吸附砂浆含量下的力学性能演化规律; 以吸附砂浆含量为自变量、力学性能为因变量、目标强度为限值, 利用数学方法确定吸附砂浆界限含量。研究发现: 随着吸附砂浆含量的增加, 再生粗骨料的物理性能逐渐下降; 再生混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量随吸附砂浆含量的增加而出现不同程度的降低, 吸附砂浆含量对再生混凝土劈裂抗拉强度的影响要大于对其抗压强度的影响, 弹性模量受吸附砂浆含量影响, 试验结果波动较大; 经过数值拟合后, 再生混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度与吸附砂浆含量呈二次函数关系, 弹性模量与吸附砂浆含量的关系符合 Boltzmann 公式。基于拟合结果, 确定满足 C40 再生混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度及弹性模量的吸附砂浆界限含量分别为 45%、43% 和 39%。

关键词: 再生混凝土; 再生粗骨料; 吸附砂浆; 力学性能; 界限含量

中图分类号: TU528.79

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2021.03.006

Limit Content Analysis of Adhesion Mortar Based on Mechanical Properties

WANG Zhen, WANG Xinjie, ZHU Pinghua, LIU Shaofeng

(Department of Civil Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: Based on quantitative analysis of adhesion mortar on recycled coarse aggregate and literature data, the relationship between its content change and physical properties of recycled coarse aggregate were studied. The rule of mechanical properties of concrete with 100% recycled coarse aggregate and different adhesion mortar content was determined. Taking the adhesion mortar content as independent variable, the mechanical properties as dependent variable and the target strength as the limit value, the limit content was determined by mathematical method. It is found that the physical properties of recycled coarse aggregate decreases with the increase of adhesion mortar content. The compressive strength, splitting tensile strength and elastic modulus of recycled coarse aggregate concrete decrease with the increase of adhesion mortar content. The effect of adhesion mortar content on splitting tensile strength is greater than that of compressive strength. The elastic modulus fluctuates greatly under the influence of mortar content. After numerical fitting, the relationships between compressive strength, splitting tensile strength and adhesion mortar content are quadratic. The relationship between elastic modulus and adhesion mortar content are accorded with Boltzmann formula. Based on the fitting results, it is determined that the limit contents of adhesion mortar satisfying compressive strength, splitting tensile strength and elastic modulus of C40 recy-

收稿日期:2019-12-19; 修订日期:2020-02-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278073, 51878081, 52078068); 硅酸盐建筑材料国家重点实验室(武汉理工大学)开放基金(SYSJJ2020-14); 常州市重点研发计划(应用基础研究)项目(CJ20200079)

第一作者:王 震(1997—), 男, 江苏徐州人, 常州大学硕士生。E-mail: cczuwangzhen@126.com

通讯作者:王新杰(1978—), 男, 安徽淮北人, 常州大学副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: wangxinjie@cczu.edu.cn

clcd coarse aggregate concrete are 45%, 43% and 39% respectively.

Key words: recycled aggregate concrete; recycled coarse aggregate; adhesion mortar; mechanical property; limit content

再生粗骨料(RCA)与天然粗骨料(NCA)的根本区别是其表面存在大量的吸附砂浆. 由于吸附砂浆本身具有孔隙率高、吸水率大等缺点, 因此会对再生混凝土(RAC)的力学性能和耐久性产生较强的负面影响^[1].

肖建庄等^[2]指出, RAC与普通混凝土(NAC)的强度发展规律大致相同, 但总体上 RAC 的抗压强度略低于 NAC, 降幅在 30% 左右. Thomas 等^[3]和崔正龙等^[4]则在试验中观察到了 RAC 的抗压强度略大于 NAC 的现象, 这种情形的出现建立在骨料表面砂浆含量较少的基础上. 郭樟根等^[5]观察到 RAC 的劈裂抗拉破坏形态与 NAC 相似, 且受拉破坏面相同; 随着骨料表面旧砂浆含量的增加, RAC 的强度降低. Pacheco 等^[6]认为, 由于再生骨料表面砂浆的存在改善了界面过渡区(ITZ), RAC 的劈裂抗拉强度大于 NAC. Duan 等^[7]认为, 再生骨料周围的砂浆使其表面粗糙, 摩擦系数增大, 与水泥砂浆结合后增大了界面之间的摩擦力, 改善了连接性能, 补偿了骨料自身缺陷所带来的强度降低的影响, 提高了 RAC 的强度.

对于 RAC 的弹性模量, 杜江涛^[8]发现其在很大程度上取决于所用骨料的强度. Thomas 等^[9]通过研究发现, RAC 的弹性模量会随着 RCA 取代率的增大而减少, 100% RCA 的再生混凝土弹性模量降幅最大(31%~39%). 杜文^[10]认为, 砂浆内部的微裂缝降低了 RAC 的弹性模量, 砂浆含量的增加增大了 RAC 内部微裂缝出现的概率. 但 Arundeb 等^[11]发现, 即使是同一强度等级的 RAC, 其弹性模量也大不相同, 甚至是低强度的 RAC 也有很大的弹性模量.

目前, 有关吸附砂浆对混凝土力学性能方面的研究大多集中于定性方面, 而以吸附砂浆含量为量化分析指标, 探究其与 RAC 性能间演化规律的研究却鲜有报道, 使得 RAC 的应用具有一定的不确定性. 若吸附砂浆含量过大, 则 RAC 难以达到预设性能. 在中国旧城改造步伐加快的背景下, 将有大量再生资源产生以供应用. 若能以量化方法表征 RAC 在不同力学性能下骨料吸附砂浆含量的最高值, 将有效减少城市建设对自然资源的依赖, 推进再生资源的合理应用. 因此, 本文以吸附砂浆含量为指标, 探究 RCA 取代率为 100% 的

再生混凝土力学性能演化规律并分析其作用机制, 之后通过数学方法界定 RAC 在不同力学性能下的吸附砂浆含量阈值. 研究成果对减少骨料资源的二次浪费和促进再生粗骨料的工程应用具有一定价值.

1 试验

1.1 试验材料

天然粗骨料为石灰石碎石, 粒径为 4.75~20 mm, 级配良好; 再生粗骨料由某废旧道路混凝土破碎而来, 粒径为 4.75~20 mm; 天然砂为常州河砂(中砂), 细度模数 2.4; 水泥采用 P·O 52.5 普通硅酸盐水泥, 矿物掺和料为硅灰; 减水剂使用聚羧酸高性能减水剂, 减水率(质量分数, 本文涉及的减水率、含量等均为质量分数)为 20%; 拌和水为洁净自来水.

1.2 试验方法

再生混凝土力学性能依据 GB 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》测定, 再生粗骨料表观密度、吸水率和压碎值按 GB/T 14685—2011《建设用卵石、碎石》测定.

RCA 吸附砂浆含量主要通过剥除骨料表面砂浆进行测定, 剥除方法主要有微波加热法、酸浸侵蚀法、超声波清洗法、机械研磨法等^[12]. 本试验 RCA 吸附砂浆的去除采用微波加热法, 此方法操作简易, 结果精确度高, 原理是骨料与砂浆的热衰减系数和膨胀系数不同.

1.3 配合比及试件设计

本试验采用全算法进行配合比设计, 此方法是由陈建奎等^[13]针对混凝土强度提升所提出的创新设计方法. 该方法能充分发挥混凝土中各材料的性能, 提高混凝土性能, 使用范围广泛. 由于 RCA 表面存在吸附砂浆, 搅拌再生混凝土时所需水量增加, 因此, 应按照 Thomas 等^[3]和邓寿昌等^[14]提出的建议, 在搅拌过程中通过添加附加用水来保证有效水灰比的恒定. 混凝土配合比见表 1.

混凝土目标强度等级为 C40, 搅拌工艺采用 Tam 等^[15]提出的两阶段搅拌工艺; 试件尺寸分别为 100 mm×100 mm×100 mm 和 100 mm×100 mm×400 mm. 混凝土成型后, 拆模取出试件, 然后将试件放入标准养护室内进行养护, 28 d 后取出, 待测.

表 1 再生混凝土配合比							
Table 1 Mix proportion of recycled aggregate concrete kg/m ³							
Sample code	Cement	Sand	Water	Silica fume	Superplasticizer	RCA	NCA
NAC	396.00	752.90	189.06	44.00	2.20	0	975.80
RAC1	396.00	683.77	252.00	44.00	2.20	875.80	
RAC2	396.00	663.00	218.00	44.00	2.20	937.00	
RAC3	396.00	740.51	232.00	44.00	2.20	841.90	
RAC4	396.00	711.10	221.00	44.00	2.20	912.78	
RAC5	396.00	747.00	223.00	44.00	2.20	861.30	

2 试验结果及分析

2.1 再生粗骨料物理性能

再生粗骨料的物理性能试验结果见表 2。由表 2 可知:与 NCA 相比,RCA 的表观密度降幅为

表 2 再生粗骨料的物理性能						
Table 2 Physical properties of recycled coarse aggregate						
Sample code	Coarse aggregate type	Apparent density/(kg · m ⁻³)	Bulk density/(kg · m ⁻³)	Water absorption (by mass)/%	Crushing value (by mass)/%	Adhesion mortar content(by mass)/%
NAC	NCA	2 667	1 480	1.30	9.10	0
RAC1	RCA1	2 235	1 298	5.49	14.30	43.89
RAC2	RCA2	2 345	1 381	4.71	13.15	38.60
RAC3	RCA3	2 273	1 272	4.93	14.55	41.25
RAC4	RCA4	2 392	1 365	4.40	12.75	39.55
RAC5	RCA5	2 341	1 305	3.63	12.25	34.90

图 1 为 RCA 吸水率随时间的变化图。由图 1 可知,RCA 吸水率随着时间发展逐渐增大,最终趋于定值。在前期,RCA 吸水很快,其吸水率在 2.5 h 内就达到了饱和吸水率的 65%;之后骨料吸水逐渐放缓,最终在 28 h 时达到吸水饱和。这是由于吸附砂浆的存在以及骨料内部微裂缝的发展导致 RCA 吸水饱和时间变长、吸水率增大,因此,本次试验 RCA 吸水饱和时间以 30 h 为准。由图 1 还可知,RCA5 因吸附砂浆最少,所以吸水率最低。

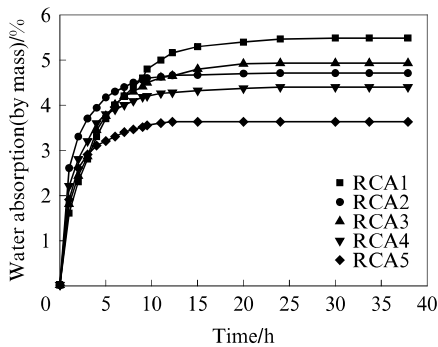


图 1 不同品质再生粗骨料吸水率随时间变化关系
Fig. 1 Relationship between water absorption of different recycled coarse aggregate and time

10.3%~16.2%,堆积密度降幅为 6.7%~14.1%;吸水率增加了约 2~4 倍,压碎值增加了 34.6%~57.1%。这主要是因为再生粗骨料表面存在着基体混凝土的老砂浆,而老砂浆具有较低的密度和较高的孔隙率;此外,骨料破碎时不可避免地对自身产生破坏,形成内部微裂缝,增加骨料孔隙率,加之骨料自身呈扁平状,容器内骨料堆积并不均匀,出现大量空隙,这些都会降低 RCA 的表观密度和堆积密度,提高 RCA 的吸水率和压碎值。Kisku 等^[16]认为,吸附砂浆的存在使 RAC 内部创建了一个更轻的系统,增加了 RAC 的吸收能力,减少了其相对密度。Yongjae 等^[17]首次采用背散射电子成像对再生粗骨料吸附砂浆的孔隙率进行了评价,发现吸附砂浆的孔隙率是骨料相对密度、吸水率、黏结强度发展的主要控制因素。

2.2 吸附砂浆含量与 RCA 表观密度、吸水率和压碎值的关系

为使再生粗骨料吸附砂浆含量与其表观密度、吸水率和压碎值的拟合关系更加准确,除本试验数据外,又引用了文献[4、7-8、18-21]的再生骨料特性数据。由于来源数据的单一性,在数据拟合时将所有文献数据作为同一系列的点。由下述可知,拟合公式的相关性良好。

图 2 为根据本试验数据、文献数据所作的吸附砂浆含量与 RCA 表观密度、吸水率和压碎值的关系图。由图 2 可知,RCA 吸水率和压碎值高于吸附砂浆含量为 0% 的 NCA,且随着吸附砂浆含量的增加呈增大趋势,其表观密度则相反。这是由于吸附砂浆具有多孔性、疏松性等缺点,随着吸附砂浆含量的增大,砂浆占骨料比例增大,砂浆作用开始凸显^[22];另外,随着砂浆体积的增大,其内部出现微裂缝和孔隙的概率随之增加,这都导致了 RCA 表观密度降低、吸水率增加。除此之外,吸附砂浆的强度较低,在加载时易被压碎成粉末,RCA 的压碎值因而增加。

2.3 吸附砂浆含量对 RAC 抗压强度的影响

NAC 与 RAC 的典型受压破坏形态见图 3。由

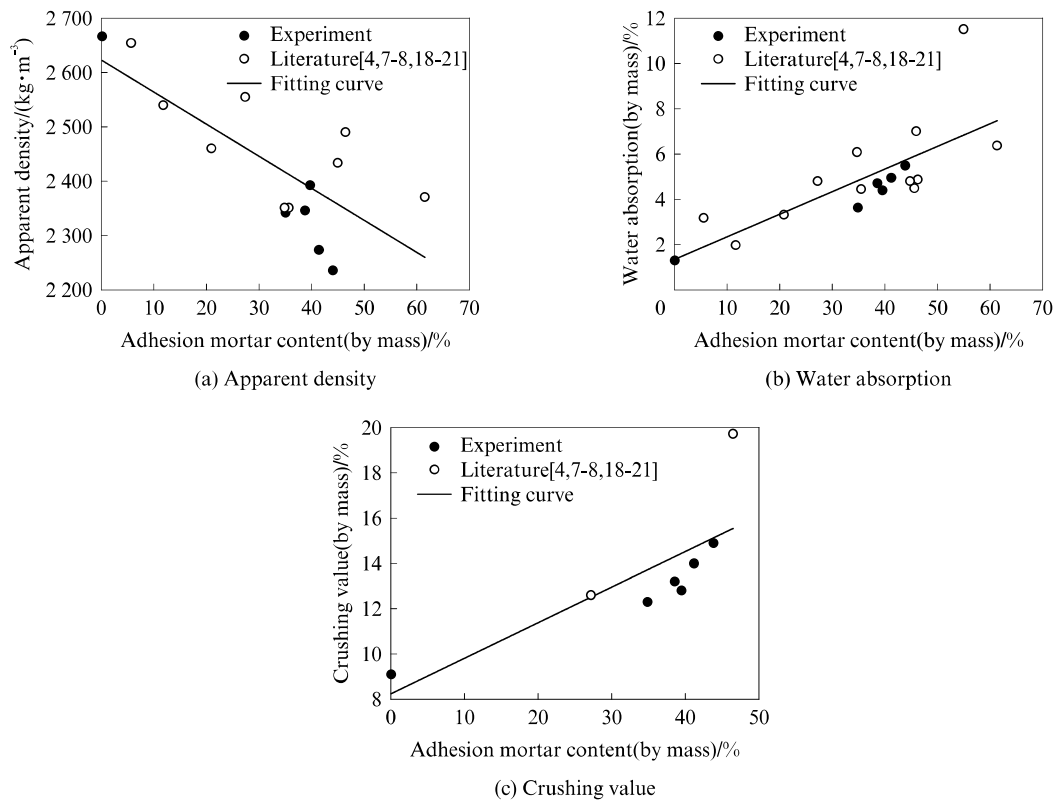


图2 RCA特征值随吸附砂浆含量变化关系

Fig. 2 Relationship between characteristic of RCA and adhesion mortar content

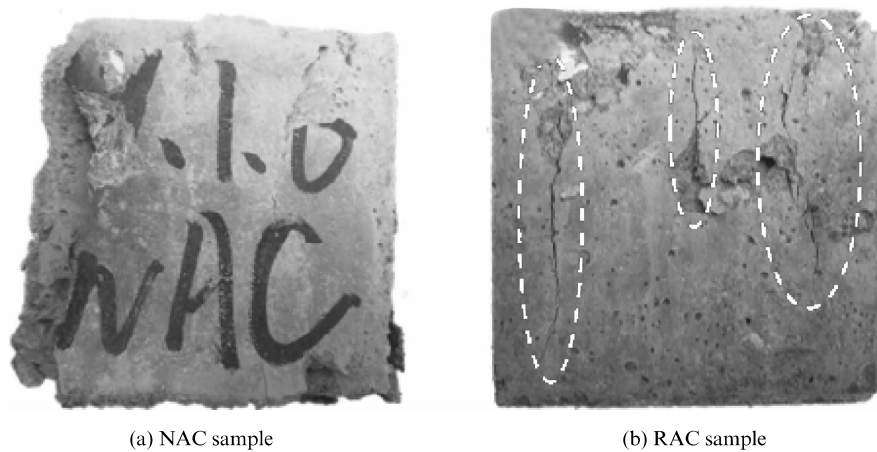


图3 NAC和RAC试件的典型受压破坏形态

Fig. 3 Typical failure patterns of NAC and RAC samples under compression

图3可见,2种破坏形态存在差异.加载前期,2类试件上下侧面都出现裂缝,然后向中部斜向发展;随着荷载的增大,试件边缘处开始破碎并逐渐剥落,最终失效. RAC试件强度失效后仍能保持一定的完整性,这主要是因为其内部RCA粗糙的外表增加了各组分之间的摩擦力^[23],使其不会破碎,并且仍然可以承受压力.这与NAC破坏形态存在差异.

吸附砂浆含量与RAC抗压强度的关系见图4,其结果已乘以相应的折减系数.由图4可知,RAC抗压强度普遍低于NAC.随着吸附砂浆含量的增大,RAC抗压强度呈逐渐减小的趋势.其中,当吸附砂浆含量为55%时,RAC抗压强度下降最大,降幅约57%;当吸附砂浆含量在27%左右时,RAC与NAC的抗压强度差异不大,可视为相等.

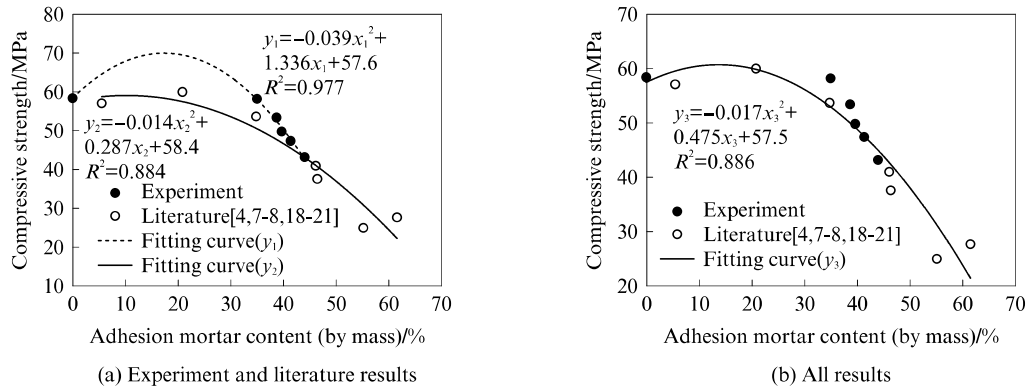


图4 吸附砂浆含量与RAC抗压强度的关系

Fig. 4 Relationship between adhesion mortar content and compressive strength of RAC

相较NAC而言,RAC抗压强度较低,这是因为吸附砂浆的存在导致RAC表观密度降低,从而使其抗压强度下降^[24]。如Lotfi等^[25]指出的那样,吸附砂浆的存在影响了骨料与新砂浆的界面反应,使骨料内部的界面过渡区(ITZ)遭到削弱。随着吸附砂浆含量的增加,RCA低密度、大孔隙率、低强度等特性被放大,对混凝土的劣化作用逐渐变强,直至其强度失效。此外,RAC抗压强度变化曲线比较可靠,与RCA特性变化曲线不同。主要原因是再生混凝土的抗压强度由骨料、砂浆及新旧界面状况决定。其中,再生粗骨料因素突出,其自身状况(如残余砂浆、吸水率等)对RAC的影响至关重要。以抗压强度为自变量,吸附砂浆含量为因变量,分别对本文试验数据、文献数据和所有数据进行拟合,得到拟合公式(1)~(3)。

$$y_1 = -0.039x_1^2 + 1.336x_1 + 57.6, \\ x_1 \in [0\%, 45\%], R^2 = 0.977 \quad (1)$$

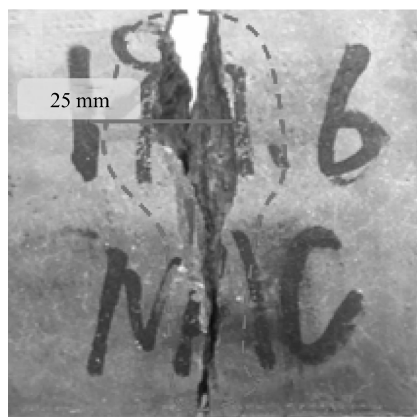
$$y_2 = -0.014x_2^2 + 0.287x_2 + 58.4, \\ x_2 \in [5\%, 62\%], R^2 = 0.884 \quad (2)$$

$$y_3 = -0.017x_3^2 + 0.475x_3 + 57.5, \\ x_3 \in [0\%, 62\%], R^2 = 0.886 \quad (3)$$

本次试验制备的RAC目标抗压强度为40 MPa,将因变量 $y=40$ 分别代入式(1)~(3),解得 $x_1=-11\%$ (舍去)或 45% ; $x_2=-27\%$ (舍去)或 47% ; $x_3=-21\%$ (舍去)或 47% 。综上所述,当吸附砂浆含量为 $0\% \sim 45\%$ 时,RAC的抗压强度大于40 MPa;当吸附砂浆含量大于 45% 时,根据拟合公式,RAC抗压强度无法达到目标强度。基于C40再生混凝土的目标强度,建议的吸附砂浆界限含量为 45% 。

2.4 吸附砂浆含量对RAC劈裂抗拉强度的影响

NAC与RAC试件的典型劈裂抗拉破坏形态见图5。由图5可见,2种破坏形态相似。加载前期,2类试件正面都先出现1条细微的裂缝;随着荷载的增加,裂缝逐渐发展扩大;最后,随着“砰”的一声,裂缝贯穿截面,试件被破坏。由于吸附砂浆的摩擦阻力,RAC裂缝宽度小于NAC。



(a) NAC sample



(b) RAC sample

图5 NAC和RAC试件的典型劈裂抗拉破坏形态图

Fig. 5 Typical failure patterns of NAC and RAC samples under splitting tensile

吸附砂浆含量与 RAC 劈裂抗拉强度的关系见图 6, 其结果已乘以相应的折减系数. 由图 6 可知: RAC 劈裂抗拉强度小于 NAC; 随着吸附砂浆含量的增大,

RAC 劈裂抗拉强度呈逐渐减小的趋势, 吸附砂浆含量为 45% 时降幅最大, 约为 60%. 与抗压强度相比, 同区间内 RAC 劈裂抗拉强度的降幅较大.

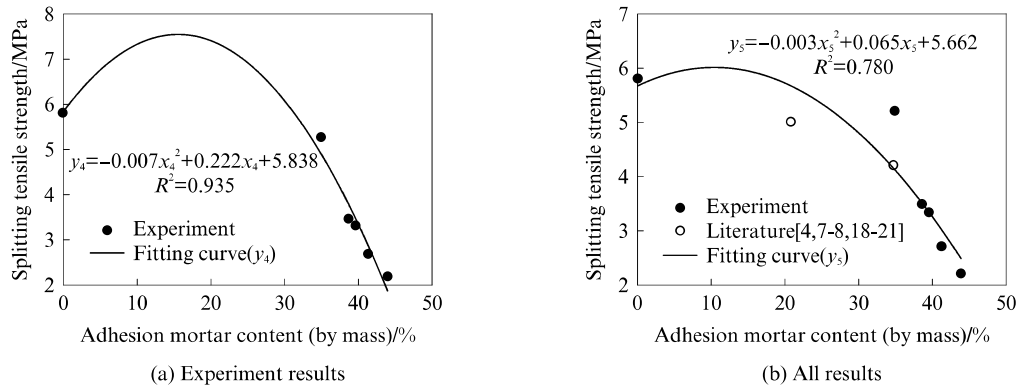


图 6 吸附砂浆含量与 RAC 劈裂抗拉强度的关系

Fig. 6 Relationship between adhesion mortar content and splitting tensile strength of RAC

由试件劈裂抗拉破坏特征可知, 试件破坏时主要是骨料与砂浆分离, 即 ITZ 破坏, 骨料本身并未发生破坏. Pacheco 等^[6]认为, 混凝土劈裂抗拉强度主要取决于 ITZ 的质量. Kho 等^[26]和 Monalisa 等^[27]发现, 吸附砂浆的存在使得混凝土内部存在 2 种 ITZ. RAC 劈裂破坏时, 主要是新界面(骨料-新砂浆)和旧界面(骨料-吸附砂浆)的破坏, 而旧界面由于承受外力作用, 内部存在微裂缝和疏松孔洞, 界面黏结强度变弱, 断裂能减小, 所以旧界面在再生混凝土劈裂抗拉破坏过程中起控制作用. 当吸附砂浆含量增加时, 会进一步降低 RAC 劈裂抗拉强度. 分别对试验数据和所有数据进行拟合(因文献数据较少, 故图 6(a)不对文献数据进行拟合), 拟合公式如下:

$$y_4 = -0.007x_4^2 + 0.222x_4 + 5.838, \\ x_4 \in [0\%, 45\%], R^2 = 0.935 \quad (4)$$

$$y_5 = -0.003x_5^2 + 0.065x_5 + 5.662, \\ x_5 \in [0\%, 45\%], R^2 = 0.780 \quad (5)$$

由此可见, 针对所有数据进行拟合得到的拟合公式相关系数出现下降. 将 C40 混凝土的抗拉强度标准值按照过镇海^[28]建议的转换关系换算成劈裂抗拉强度为 2.37 MPa. 吸附砂浆含量的区间为 $[0\%, 45\%]$, 将因变量 $y = 2.37$ 代入式(4)、(5), 解得 $x_4 = -12\%$ (舍去)或 43% ; $x_5 = -24\%$ (舍去)或 46% . 因此, 当吸附砂浆含量为 $0\% \sim 43\%$ 时, RAC 劈裂抗拉强度符合要求; 当吸附砂浆含量大于 43% 时, RAC 劈裂抗拉强度预计无法达到要求. 基于 C40 再生混凝土的目标劈裂抗拉强度, 建议的吸附砂浆界限含量为 43% .

2.5 吸附砂浆含量对 RAC 弹性模量的影响

吸附砂浆含量与 RAC 弹性模量的关系见图 7. 由图 7(a)可见, RAC 弹性模量要普遍小于 NAC. 随

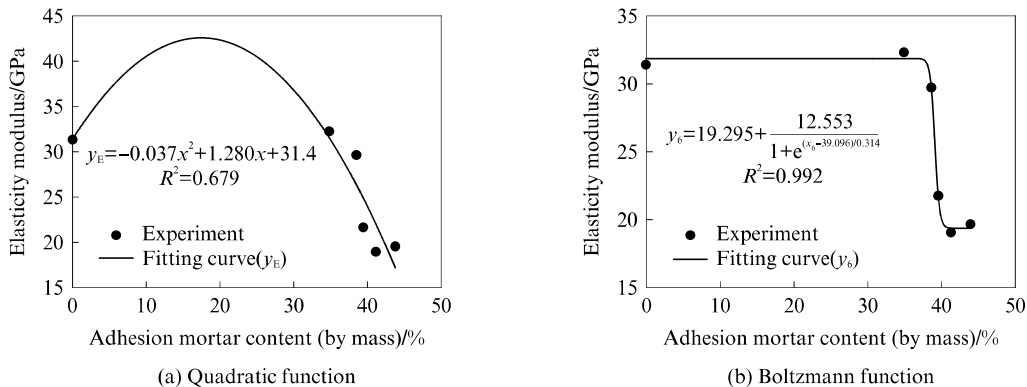


图 7 吸附砂浆含量与 RAC 弹性模量的关系

Fig. 7 Relationship between adhesion mortar content and elastic modulus of RAC

着吸附砂浆含量的增加,RAC弹性模量逐渐减小,吸附砂浆含量为44%时降幅最大,约为39.5%。这与Thomas^[9]研究中所得出的RCA取代率为100%的再生混凝土弹性模量降幅最大为39.0%的结论一致。由图7(b)可见,吸附砂浆含量为35%左右时,RAC弹性模量出现了负降幅。

相对于强度而言,RAC弹性模量的试验数据波动更大。骨料本身的低弹性模量使得混凝土整体弹性模量降低^[29-30];骨料内部及ITZ周围的微裂缝会导致骨料-砂浆这一复合体系刚度降低^[9];吸附砂浆的多孔结构会使混凝土受压时变形增大;应变速率的不同也会影响混凝土弹性模量的变化。

若针对文献数据和所有数据进行拟合,则得到的拟合公式相关系数都低于0.4。考虑到试验批次的不同和试验数据间的相关性,基于RAC弹性模量的吸附砂浆界限含量来源于本次试验数据。由于混凝土强度和弹性模量具有一定的对应性^[28],故对试验结果先进行二次函数拟合。由最终得到的拟合曲线(见图7)可以发现,采用Boltzmann拟合公式的相关系数最高,公式如下:

$$y_6 = 19.295 + \frac{12.553}{1 + e^{(x_6 - 39.096)/0.314}}, \quad x_6 \in [0\%, 45\%], R^2 = 0.992 \quad (6)$$

虽然Boltzmann拟合公式相关系数较高,但曲线水平段的变化还需通过细化吸附砂浆含量的分布得到进一步确定;而曲线下降段与强度曲线变化相似,因而由下降段确定的吸附砂浆界限含量是合理的。整体来看,该段曲线大致符合吸附砂浆含量增加、弹性模量下降的趋势。本次试验RAC弹性模量以大于试验结果中NAC的弹性模量为准,即大于31.4 GPa,与按强度确定的吸附砂浆界限含量相比,此处确定的吸附砂浆界限含量较保守。吸附砂浆含量的区间为[0%, 44%],将因变量 $y_6 = 31.4$ 代入公式(6),解得 $x_6 = 0.39$ 。因此,当吸附砂浆含量为0%~39%时,强度等级C40的RAC弹性模量符合要求;当吸附砂浆含量大于39%时,强度等级C40的RAC弹性模量无法达到要求。基于C40再生混凝土的弹性模量,建议的吸附砂浆界限含量为39%。

2.6 基于力学性能的吸附砂浆界限含量

由上述结果可知,根据抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量确定的吸附砂浆界限含量分别为45%、

43%和39%。Marta等^[18]对实验室记录和文献综述数据进行整理分析后,根据西班牙规范中的磨损值限值,确定了来自抗压强度为25 MPa母体混凝土的再生骨料吸附砂浆含量应小于44%。Duan等^[7]发现,随着再生混凝土目标强度的增大,同等材料、配合比和试验步骤的NAC和RAC的强度差值逐渐增大。Pacheco等^[6]发现,当再生混凝土被设计成比母体混凝土强度更高时,RCA的不利影响被放大。本次试验所设计的RAC目标强度为C40,强度等级较一般混凝土高,因此根据力学性能所得吸附砂浆界限含量都应低于Marta等的推荐含量。本试验基于力学性能确定的最终吸附砂浆界限含量为39%。

2.7 吸附砂浆含量对RAC力学性能影响的微观机理分析

混凝土破坏时的破裂面都经过内部的界面过渡区。为了进一步研究吸附砂浆对RAC力学性能的影响,本文从微观角度观察NAC和RAC的界面结构状况,以探究吸附砂浆对其力学性能的影响。NAC和RAC界面结构的SEM图如图8所示。

分析图8(a)、(b)可知:NAC界面虽然存在较为明显的层状氢氧化钙,使其强度略微降低,但界面分界线比较明显,两端结合非常紧密,在加载时不易被破坏;RAC中旧界面层状结构不显著,并且由于界面存在微小孔隙,大量水化硅酸钙填充其间,导致界面分界线不明显,但界面周围状态较为疏松,存在大量孔隙,加载时会在界面周围产生新的裂纹并加速新旧裂缝的发展;RAC中新界面由于骨料粗糙外表和成型时的二次水养,骨料、新砂浆间的嵌固与黏结强度增加,与NAC中的ITZ相比,其质量略微增强^[6-7]。随着吸附砂浆含量的增加,RAC界面周围的缺陷区域增加,对界面的削弱作用会逐渐超过水化物填充和骨料嵌固的增强作用,从而使其界面过渡区强度整体降低。

由图8(c)可以看出,RAC中新砂浆与NAC中砂浆的微观图相似,这说明附加用水的加入能减少RCA吸水的影响,保证水泥水化过程正常进行,不会对吸附砂浆界限含量的确定造成影响。由图8(d)可以看出,RCA周围存在着较多的裂缝,并有向中间发展的趋势。这对RAC的力学性能造成了负面影响。

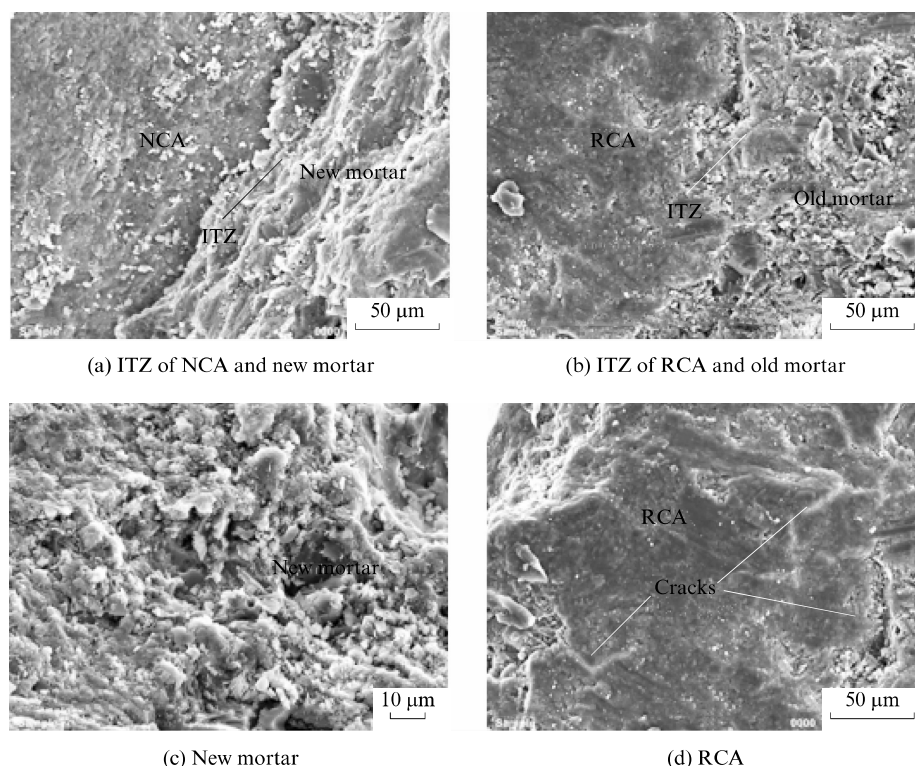


图8 NAC和RAC界面结构的SEM图

Fig. 8 SEM images of ITZ in NAC and RAC

3 结论

(1) RCA 取代率为 100% 的再生混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度随着吸附砂浆含量的增大而逐渐降低, 最大降幅分别约 57% (吸附砂浆含量 0%~62%) 和 60% (吸附砂浆含量 0%~45%); 吸附砂浆含量对再生混凝土劈裂抗拉强度的影响比抗压强度大; 吸附砂浆含量与 RAC 抗压强度、劈裂抗拉强度的拟合曲线均符合二次函数关系, 基于 C40 混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度建议的吸附砂浆界限含量分别为 45% 和 43%。

(2) RAC 弹性模量与吸附砂浆含量的拟合曲线符合 Boltzmann 公式, 与强度拟合公式存在着差异; 由 RAC 弹性模量试验数据确定的吸附砂浆界限含量为 39%。综合考虑基于 RAC 抗压强度、劈裂抗拉强度确定的吸附砂浆界限含量, 应将弹性模量作为使用再生混凝土时的主要控制因素。

(3) 吸附砂浆表面孔隙会使水化硅酸钙填充其间, 一定程度上增强了 ITZ 的强度。随着吸附砂浆含量的增加, 界面周围缺陷区域扩大, RAC 的强度逐渐下降。最终, 基于 C40 混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量, 建议的吸附砂浆界限含量为 39%。

参考文献:

- [1] GUO H, SHI C J, GUAN X M, et al. Durability of recycled aggregate concrete—A review[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 89: 251-259.
- [2] 肖建庄, 李佳彬, 孙振平, 等. 再生混凝土的抗压强度研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(12): 1558-1561.
XIAO Jianzhuang, LI Jiabin, SUN Zhenpin, et al. Study on compressive strength of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(12): 1558-1561. (in Chinese)
- [3] THOMAS C, SETIEN J, POLANCO J A, et al. Micro- and macro-porosity of dry- and saturated-state recycled aggregate concrete [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 211: 932-940.
- [4] 崔正龙, 路沙沙, 汪振双. 再生骨料特性对再生混凝土强度和碳化性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(2): 264-267.
CUI Zhenglong, LU Shasha, WANG Zhenshuang. Influence of recycled aggregate characteristics on strength and carbonization performance of recycled concrete[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(2): 264-267. (in Chinese)
- [5] 郭樟根, 陈晨, 范秉杰, 等. 再生粗骨料混凝土基本力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016(12): 94-102.
GUO Zhanggen, CHEN Chen, FAN Bingjie, et al. Experimental research on mechanical behavior of concrete made of coarse and fine recycled aggregates[J]. Journal of Building Structures, 2016(12): 94-102. (in Chinese)
- [6] PACHECO J, DE BRITO J, CHASTRE C, et al. Experimental

- investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 201:110-120.
- [7] DUAN Z H, POON C. Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars[J]. *Materials and Design*, 2014, 58:19-29.
- [8] 杜江涛. 再生混凝土单轴受力应力-应变关系试验与数值模拟[D]. 上海:同济大学, 2008.
DU Jiangtao. An experimental and numerical study on stress-strain relationship of recycled concrete under uniaxial loading [D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese)
- [9] THOMAS J, THAKKAVIL N N, WILSON P M. Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates[J]. *Journal of Building Engineering*, 2018, 19(11):349-365.
- [10] 杜文. 再生骨料混凝土力学性能与盐冻耐久性研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2013.
DU Wen. Study on mechanical properties and salt freezing-resistance of recycled aggregate concrete[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [11] ARUNDEB G, SAROJ M, SOMNATH G. Direct compression strength and elastic modulus of recycled aggregate concrete [J]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2011, 2(1):292.
- [12] XUAN D X, ZHAN B J, POON C. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2016, 65:67-74.
- [13] 陈建奎, 王栋民. 高性能混凝土(HPC)配合比设计新法—全算法[J]. *硅酸盐学报*, 2000, 28(2):194-198.
CHEN Jiankui, WANG Dongmin. High-performance concrete (HPC) mix design new method—Full calculation method[J]. *Journal of Chinese Ceramic Society*, 2000, 28(2):194-198. (in Chinese)
- [14] 邓寿昌, 罗冠祥. 再生混凝土配合比设计新方法的研究与验证实验[C]//第3届全国再生混凝土学术交流会论文集. 青岛:中国土木工程学会, 2012:168-177.
DENG Shouchang, LUO Guanxiang. Research and verification experiment on new method of mix ratio design of recycled concrete [C]//Proceedings of the Third National Recycled Concrete Academic Exchange Meeting. Qingdao: China civil engineering society, 2012:168-177. (in Chinese)
- [15] TAM V, TAM C. Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach [J]. *Journal of Materials Science*, 2007, 42(10):3592-3602.
- [16] KISKU H, JOSHI N, ANSARI H, et al. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 131:721-740.
- [17] YONGJAE K, ASAD H, MUHAMMAD U, et al. Influence of bonded mortar of recycled concrete aggregates on interfacial characteristics—Porosity assessment based on pore segmentation from backscattered electron image analysis[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 212:149-163.
- [18] MARTA S D J, PILAR A G. Study on the influence of adhesion mortar content on the properties of recycled concrete aggregate [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23:872-877.
- [19] 陈宗平, 陈宇良, 应武挡. 再生混凝土三向受压试验及强度准则[J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(1):149-155.
CHEN Zongping, CHEN Yuliang, YING Wudang. Mechanical behavior and strength criterion of recycled aggregate concrete (RAC) under triaxial compression [J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19(1):149-155. (in Chinese)
- [20] 范玉辉, 牛海成, 张向冈. 再生混凝土徐变试验及老砂浆影响机理研究[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(1):1-11.
FAN Yuhui, NIU Haicheng, ZHANG Xianggang. Study on creep test of recycled aggregate and influence mechanism of old mortar [J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(1):1-11. (in Chinese)
- [21] YANG S, LEE H. Mechanical properties of recycled aggregate concrete proportioned with modified equivalent mortar volume method for paving applications[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 136:9-17.
- [22] OLORUNSGO F T, PADAYACHEE N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes[J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(2):179-185.
- [23] KURDA R, DE BRITO J, SILVESTRE J D, et al. Influence of recycled concrete aggregates and high contents of fly ash on concrete fresh properties[J]. *Cement Concrete and Composition*, 2017, 84:198-213.
- [24] KURDA R, DE BRITO J, SILVESTRE J D. Indirect evaluation of the compressive strength of recycled aggregate concrete with high fly ash ratios [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2017, 13:204-216.
- [25] LOTFI S, DEJA J, REM P, et al. Mechanical recycling of EOL concrete into high-grade aggregates [J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2014, 87:117-125.
- [26] KHO P V, WARDA A, YIZHENG C. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production [J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2018, 133:30-49.
- [27] MONALISA B, BHATTACHARYYA S K, MINOCHA A K, et al. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete—A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 68:501-516.
- [28] 过镇海. 钢筋混凝土原理 [M]. 3 版. 北京:清华大学出版社, 2013.
GUO Zhenhai. Principles of reinforced concrete [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)
- [29] DAPENA E, ALAEJOS P, LOBET A, et al. Effect of recycled sand content on characteristic of mortars and concretes [J]. *Journal of Material and Civil Engineering*, 2011, 23(4):414.
- [30] SILVA R V, DE BRITO J, DHIR R K. Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112:2171-2186.