

文章编号: 1001-4888(2024)03-0378-11

水饱和度对再生混凝土力学性能的影响 及微观机理分析*

黄灵芝^{1,2}, 王嘉欣², 司政^{1,2}, 田爽³, 任毅², 杜晓奇²

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西西安 710048; 2. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西西安 710048;
3. 河北省水利规划设计研究院有限公司, 河北石家庄 050021)

摘要: 为探究再生混凝土在水工建筑物中应用的可行性, 提升资源利用效率, 对 4 种骨料取代率下不同水饱和度的再生混凝土进行力学性能试验研究, 并结合核磁共振和电镜扫描试验对再生混凝土进行微观机理分析。结果表明: 随着骨料取代率和水饱和度的增加, 混凝土弹性模量逐渐增大, 而抗压强度、峰值应变和劈裂抗拉强度逐渐减小; 对试件横向弛豫时间(T_2 谱) 曲线进行分析发现, 骨料取代率为 0%、30%、50% 和 70% 试件内的小孔隙数量占比分别为 83%、77%、82%、84%; 通过扫描电镜观察发现, 混凝土基质密实度随再生骨料取代率增加而下降, 易被自由水渗透, 对再生混凝土的力学性能产生不利影响。本文研究成果可为再生混凝土在水工结构上的应用提供参考。

关键词: 再生骨料; 水饱和度; 单轴压缩; 劈裂抗拉; 微观机理

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-23-250

0 引言

混凝土作为建筑领域中应用最为广泛的建筑材料之一, 不仅在建筑结构的承载能力方面发挥着关键作用, 还在可持续建筑和资源利用方面具有重要意义^[1-2]。然而, 全球建筑业的快速发展不仅意味着混凝土需求量的增加, 也导致了大量的原材料开采和废弃建筑垃圾产生^[3-4], 因此, 深化对混凝土的可持续性研究已成为当务之急。但目前处理建筑垃圾仍主要采用堆放和掩埋的方式^[5-6], 造成大量环境污染和资源浪费。因此, 为了遏制自然资源的过度开采、减少建筑垃圾填埋对土地资源的浪费, 以及有效缓解建筑废弃物给生态环境带来的压力, 推动废弃混凝土的循环利用仍然是学术界关注研究的焦点课题^[7-8]。

再生骨料的使用有望降低混凝土材料对天然碎石的需求, 减少建筑行业的碎石采矿量, 并减轻环境负担^[9-10]。再生混凝土在水利建设项目中展现出了广泛的应用可能性, 以无锡锡澄运河三级航道改造工程为例, 该项目将十万立方米再生混凝土应用于构筑护岸墙体、导流设施等对强度要求较低的结构部位, 这一举措大幅削减了处理废弃混凝土产生的建筑垃圾填埋费用, 同时实现了经济效益与环保效益的有效结合^[11]。然而, 再生骨料的使用对混凝土的力学性能会产生广泛而复杂的影响^[12]。目前对再生骨料的研究主要集中在性能评估和配合比优化等方面, 很多学者将再生骨料引入到混凝土中来研究其各种性能^[13-14]。CHEN 等^[15]通过检验回弹法和超声回弹综合法估算再生混凝土强度的适用性, 改变再

* 收稿日期: 2023-11-29; 修回日期: 2024-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879217)

通信作者: 司政(1981-), 男, 教授, 博士生导师。研究方向为水工混凝土材料及结构应力分析。Email: sz123hlz@163.com

生粗骨料取代率进行试验验证,建立了以粗骨料取代率为变量的再生混凝土专用强度曲线。吴辉琴等^[16]在混凝土中掺入聚丙烯纤维,以粗骨料取代率、纤维掺量和加载速率为变量进行单轴循环压缩试验,研究各变量对其力学性能的影响,得到了循环荷载作用下聚丙烯纤维对再生混凝土的阻裂机理。张志沛等^[17]发现存在初始缺陷的再生混凝土与无缺陷的混凝土相比具有更强的渗透性,并利用服役于恶劣环境的混凝土制备再生混凝土,使其再次服役相同环境时强度会大幅下降。ZHAO等^[18]制备砖骨料芦苇秸秆混凝土,研究再生混凝土高温前后的导热系数、抗压强度和抗拉强度,建立了抗压强度-抗拉强度换算公式,并通过微观试验观察发现再生混凝土的界面过渡区处为薄弱点。

大坝、桥墩以及海洋平台等水工建筑物服役环境大多处于水下深处^[19],在静水压力作用下,尤其经过了长期的浸泡后,水会逐渐渗透到混凝土裂缝中。水饱和度作为混凝土的一个关键参数,对其性能具有显著影响,包括混凝土抗压强度和弹性模量。通过控制水饱和度,可以调整混凝土的工作性能,以满足实际工程需要,但不同的水饱和度值对混凝土性能影响较大^[20]。CORTAS等^[21]通过试验发现早龄期混凝土的力学性能很大程度上取决于骨料的水饱和度,并基于应力方法和试验评估参数,估算出相对开裂风险。HOU等^[22]通过开展水分条件对再生混凝土流变特性的影响试验,发现与普通混凝土相比,再生混凝土对流变特性的时变特征有更大影响,并建立了流变参数与经验参数之间的函数关系。黄瑶^[23]研究了干湿环境下含水率对再生混凝土性能的影响,结果表明再生混凝土的抗压强度随着含水率的增加而下降。

上述文献大多侧重于骨料掺量对再生混凝土性能的相关研究,关于水饱和度对再生混凝土性能影响的研究较少。本文深入研究了水饱和度对再生混凝土力学性能的影响,并结合核磁共振和电镜扫描试验对再生混凝土孔隙结构进行分析,所得结果可为改进混凝土的可持续性,减轻其对环境的不利影响提供参考。

1 试验材料及方案

1.1 试验材料

试验采用盾石牌 P. O42.5 型号普通硅酸盐水泥作为胶凝材料,粗骨料由天然骨料和再生骨料两部分组成,其中再生骨料由废弃混凝土梁破碎得到,其粒径为 5mm~20mm。粗骨料的技术指标见表 1;细骨料为渭河出产的天然河沙,细度模数为 2.45,考虑其含水量较高,试验前进行了烘干处理。试验过程中采用高效减水剂来降低混凝土的用水量,减水剂掺量为水泥质量的 1.1%;拌合水为自来水。

1.2 试件制备

为探究再生骨料取代率对混凝土力学性能的影响,本文采取等体积替代原则,设计并制备了 4 种不同骨料取代率的再生混凝土试件,取代率分别为 0%、30%、50%和 70%,将未使用再生骨料的试件(取代率为 0%)设置为对照组。由表 1 可知,再生骨料的吸水性明显高于天然骨料,为确保每组试件水灰比一致,计算了不同配合比试件所需的附加水用量,具体配合比见表 2。

表 1 粗骨料的技术指标

Tab. 1 Technical specifications of coarse aggregate

材料	表观密度 (kg/m ³)	堆积密度 (kg/m ³)	含泥量/%	吸水率/%	压碎值/%	粒径/mm
天然骨料	2802.35	1442.84	0.22	2	13.3	5~20
再生骨料	2549.11	1244.12	0.31	4	14.2	5~20

为制备不同水饱和度的再生混凝土,将标准养护 28d 后的试件进行烘干处理,每间隔 6h 对试件称重测量,直至试件质量近乎不发生改变,此时试件已达到充分干燥的状态^[24],试件质量随烘干时间变化如图 1 所示。之后对试件进行饱水,当连续 3 次测量的试件质量差值小于 0.5g 时,认为试件已经达到完全饱和状态,将试件质量随饱水时间变化关系绘制于图 2 中,从图中可以看出,两者呈二次函数曲线关系。不同时刻混凝土的水饱和度可由式(1)计算得到。

$$\omega_r = \frac{m - m_d}{m_w - m_d} \times 100\% \quad (1)$$

式中： ω_r 为试件水饱和度； m_d 和 m_w 分别为干燥状态和饱和状态下试件质量； m 为饱水过程中任一时刻试件质量。

表2 再生混凝土配合比设计

Tab. 2 Mixture design of recycled aggregate concrete

试件编号	再生骨料取代率/%	水泥/(kg/m ³)	水/(kg/m ³)	砂/(kg/m ³)	天然骨料/(kg/m ³)	再生骨料/(kg/m ³)	附加水/(kg/m ³)	减水剂/%
NA	0	400	160	605.95	1194	0	0	1.1
RA30	30	400	160	605.95	836	358	14.32	1.1
RA50	50	400	160	605.95	597	597	23.88	1.1
RA70	70	400	160	605.95	358	836	33.44	1.1

注：表中不同试件的配合比各不相同；NA代表天然骨料；RA代表再生骨料；30、50和70代表再生骨料取代率分别为30%、50%和70%的再生混凝土。

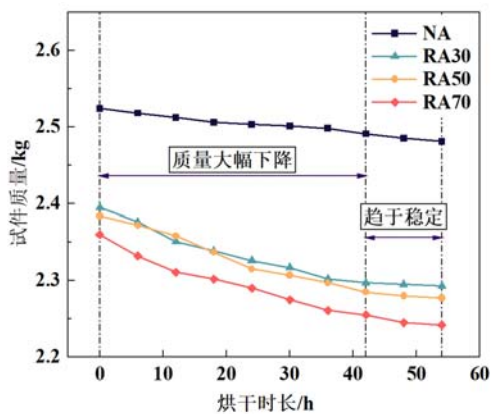


图1 烘干过程试件质量变化图

Fig. 1 Changes in specimen quality during drying

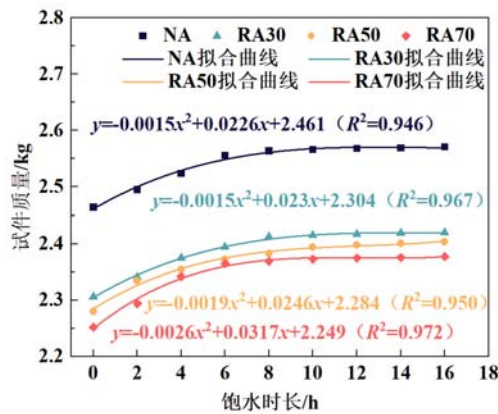


图2 饱水过程试件质量变化图

Fig. 2 Changes in specimen quality during saturation

1.3 试验方案

1.3.1 工作性能

依据相关规范^[25]对再生混凝土工作性能进行研究,分析再生骨料取代率对混凝土坍落度的影响。具体步骤如下:将试样分3次装入到坍落筒中,每次装入桶高的三分之一,同时用钢棒插捣密实,每层插捣25次,最终装样完成后桶内混凝土高度恰好与桶口高度齐平。在5s~10s内将坍落筒提起并测量试样最高点与桶高的距离,高度差即为坍落度值。

1.3.2 力学试验

依据规范^[26]对不同骨料取代率和水饱和度的再生混凝土开展力学性能试验。将制备好的尺寸为100mm×100mm×100mm的试件经烘干饱水后放在万能伺服液压力试验机的试验台上加载,加载速率为10⁻⁶m/s。分析不同再生骨料取代率和水饱和度对混凝土单轴压缩破坏形态、应力-应变曲线、弹性模量、峰值应变以及劈裂抗拉强度等性能的影响。

1.3.3 微观试验

通过核磁共振仪和扫描电镜研究再生混凝土微观结构。核磁试验采用钻芯得到直径为75mm、高为100mm的圆柱体试件,真空饱水后,用以得出试件的孔隙率、孔径分布等信息。收集力学试验后表面平整且直径不超过5mm的碎块,清洗完成后利用扫描电镜观察试件孔隙、混凝土基体和新老砂浆界面过渡区。

2 试验结果与分析

2.1 工作性能

图3展示了不同再生骨料取代率下,再生混凝土坍落度变化规律,再生混凝土的坍落度随着骨料取代率的增加呈现出逐渐降低的趋势。对比NA试件,RA30、RA50和RA70试件的坍落度分别降低了8mm、15mm和21mm,当再生骨料取代率为70%时,坍落度为169mm,降低了11.05%。由相关文献可知^[27-29],再生混凝土坍落度为150mm~200mm,因此本文的再生混凝土坍落度满足工作性能要求。坍落度降低的原因是再生骨料破碎时可能内部存在裂纹或是表面附着旧砂浆使得再生混凝土吸水率增大,在搅拌机中加水难以使再生骨料达到饱和状态。

2.2 单轴压缩试验

2.2.1 应力-应变曲线

图4为不同再生骨料取代率下饱水试件的应力-应变曲线。由图可以看出应力-应变曲线分为3个阶段^[30]:线弹性阶段,应力与应变呈现线性相关,即随着应变的增大,应力也随之增大;紧接着,应力-应变之间的线性关系被破坏,随着应变的增大,应力先缓慢升至临界点(峰值应力),之后缓慢下降,此阶段为屈服阶段;最后,试件进入破坏阶段,开始卸载,应力随着应变的增大急速下降。

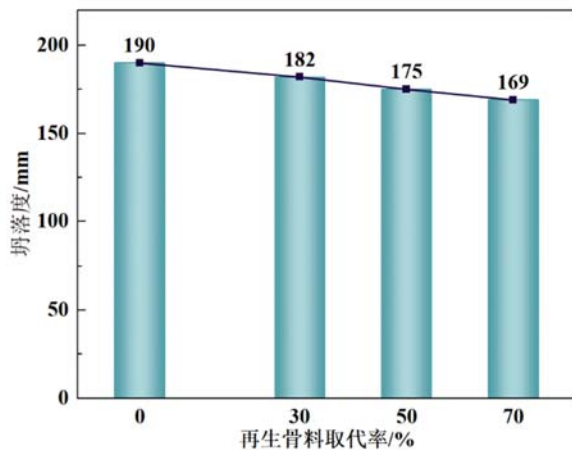


图3 再生混凝土坍落度变化图

Fig. 3 Slump change of recycled aggregate concrete

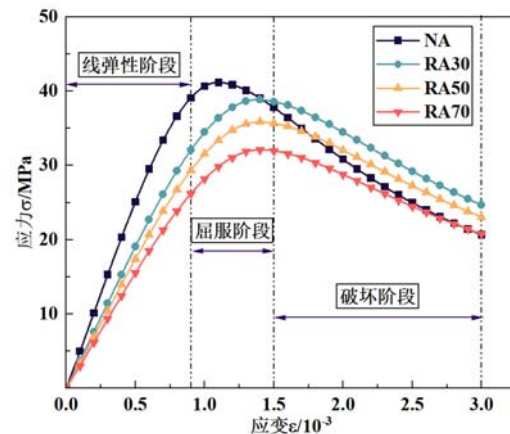


图4 再生饱水混凝土的应力-应变关系曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of water-saturated recycled aggregates concrete

由图4还可以看出,当水饱和度为100%时,峰值应变随着骨料取代率的增加逐渐增大,而弹性模量和峰值应力则逐渐降低,弹性模量逐渐下降可能与孔隙率有关。旧水泥砂浆与再生骨料一同拌入至新水泥砂浆时,与新水泥砂浆结晶相互作用,促进接触界面处水化产物紧密连接,导致紧密的界面过渡区产生。然而,随着再生骨料掺入混凝土比例的增大,混凝土内部孔隙数量逐渐增多,降低了混凝土的致密程度,再生骨料原有的微裂隙和较高的孔隙率会限制混凝土弹性模量的提高。当骨料取代率从0%增加到30%、从30%增加到50%、从50%增加到70%时,试件弹性模量分别降低了19.98%、4.46%、5.13%。当骨料取代率提高时,混凝土内部的孔隙和微裂纹数量相应增加,峰值应力下降速度增大。

由图5可以看出,再生混凝土的弹性模量随着水饱和度的增加逐渐增大,而峰值应力和峰值应变则逐渐减小。在屈服阶段达到峰值应力以后,试件产生宏观裂缝,应力-应变曲线进入破坏阶段,此时破坏阶段近似为线性变化。这是因为当自由水渗入试件内部孔隙时,会迅速布满这些孔隙,鉴于水的压缩性极低,因此在试件出现宏观裂缝之前,孔隙内部的水分几乎不会发生变形。当试件承受的荷载达到峰值应力阶段时,孔隙内的水分伴随混凝土孔隙的变形在试件内部流动,此时破坏阶段的应力-应变关系近似为线性。

随着再生骨料取代率和水饱和度的增大,混凝土峰值应变和峰值应力逐渐减小,且这种现象会随着骨料取代率的提高愈加显著。其原因是在外部荷载作用下,试件内部孔隙与裂缝内的水分形成了孔隙水压力^[31],加剧了混凝土内部裂纹的扩张,当加载速率较小时,试件破坏速度较慢,水分可以沿裂缝扩展路径充分迁移,因此会增加裂缝扩展时的孔隙水压力。随着水饱和度的增加,裂缝所承受的孔隙水压力增大,从而加快了试件的破坏过程,导致混凝土所能达到的峰值应变减小。

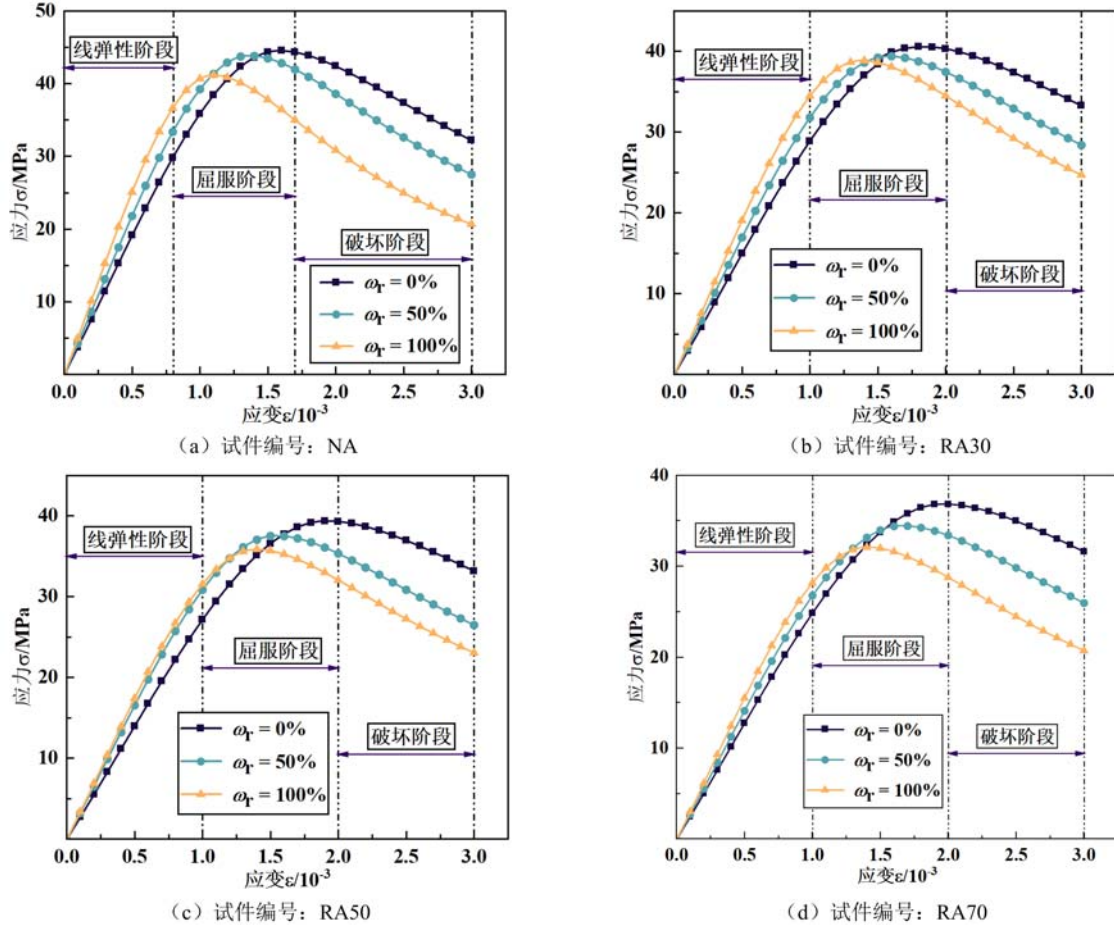


图5 再生混凝土的应力-应变关系曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of recycled aggregate concrete

2.2.2 抗压强度

图6展示了不同再生骨料取代率和水饱和度与再生混凝土抗压强度之间的关系,由图6可以看出,相较于NA混凝土,水饱和度为0%时,RA30、RA50、RA70的抗压强度分别下降了8.89%、11.57%和17.23%;水饱和度为50%时,RA30、RA50、RA70的抗压强度分别下降了10.19%、14.39%和21.39%;水饱和度为70%时,RA30、RA50、RA70的抗压强度分别下降了9.81%、12.95%和21.98%。在不同再生骨料取代率下,混凝土的抗压强度均随着水饱和度增加而降低。当水饱和度从0%增至50%和从50%增至100%时,NA混凝土试件的抗压强度分别降低了1.5%和6.11%,RA30混凝土试件的抗压强度分别降低了2.91%和5.71%,RA50混凝土抗压强度分别降低了4.65%和4.53%,RA70混凝土抗压强度分别降低了6.46%和6.82%。

当水饱和度为0%时,在压力作用下,试件内部孔隙被压缩,但不会引起试件明显的结构性损伤,强度最大。当水饱和度为50%时,试件内部自由水可压缩性较低,试件抗压强度次之;当水饱和度为100%时,混凝土内部裂缝受外部荷载作用持续增大,自由水随之流动,从而加剧裂缝的迅速蔓延,试件强度最小。其原因可能是在压缩状态下,试件内部的自由水起到了水力劈裂的作用,对裂缝的扩展起到了促进的作用,从而降低了混凝土强度(图7)。随着裂缝的扩展,孔隙水压力逐渐降低,自由水会向其

他位置移动。

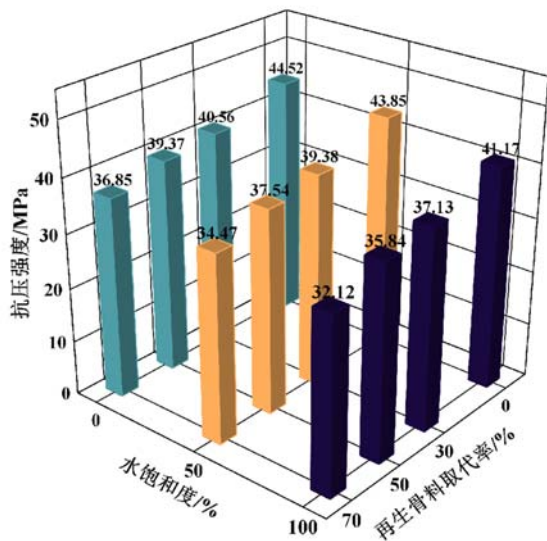


图 6 水饱和度对再生混凝土抗压强度的影响

Fig. 6 Effect of water saturation on the compressive strength of recycled aggregate concrete

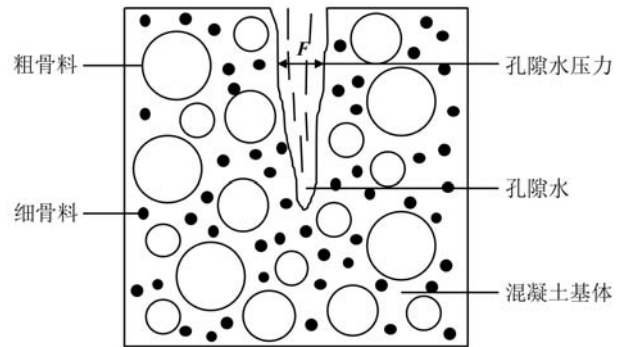


图 7 单轴压缩孔隙水蔓延示意图

Fig. 7 Schematic of uniaxial compression pore water spreading

2.2.3 压缩破坏形态

再生骨料取代率对试件压缩破坏形态具有较大影响。由图 8 可以看出，混凝土裂缝数量随着骨料取代率增加而增多，并出现纵横交错的现象，由此产生了网状贯通裂缝。再生混凝土相较于普通混凝土，在外力作用下的抗压性能较弱，特别是在试件含水的情况下，这种差异更为显著。随着水饱和度的增加，试件顶部裂缝数量逐渐增多，同时裂缝会伴随加载过程逐渐扩散并相互贯穿。试件开始破坏时，随着水饱和度增加，试件表面砂浆剥落更加严重。当试件完全失效时，水饱和度较高的试件产生的碎块更多，轻触时会产生小粒径碎渣。因此，再生混凝土在承受荷载时，水饱和度增加会导致试件破坏程度加剧，承载能力迅速下降，自由水对其力学性能的不利影响尤为突出。

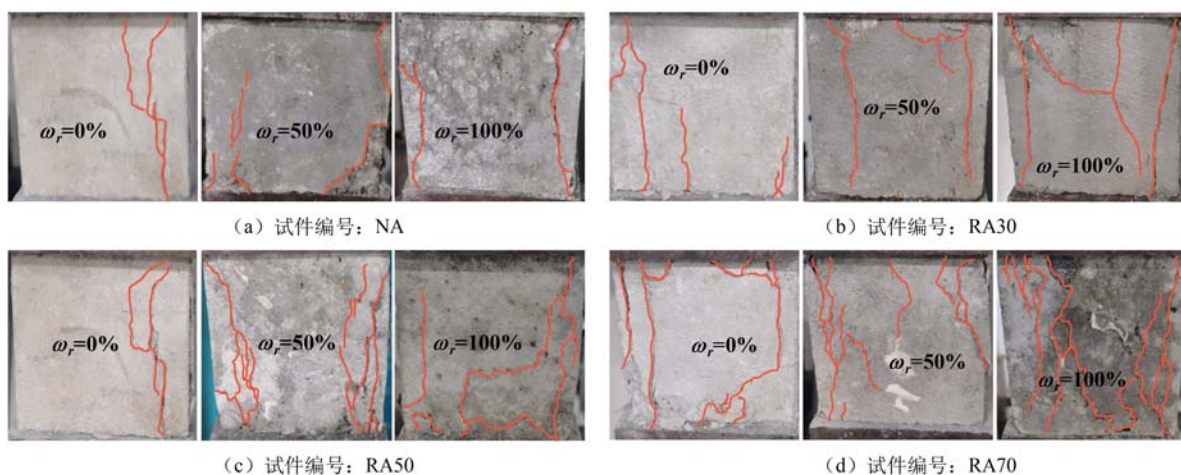


图 8 试件单轴压缩破坏形态

Fig. 8 Uniaxial compression damage pattern of specimen

2.3 劈裂抗拉试验

由图 9 可知，试件劈裂抗拉强度随着再生骨料取代率的增加而逐渐减小。当水饱和度为 0% 时，RA30、RA50 和 RA70 试件劈裂抗拉强度相较于 NA 分别下降了 16.0%、19.8% 和 24.7%。其因是再

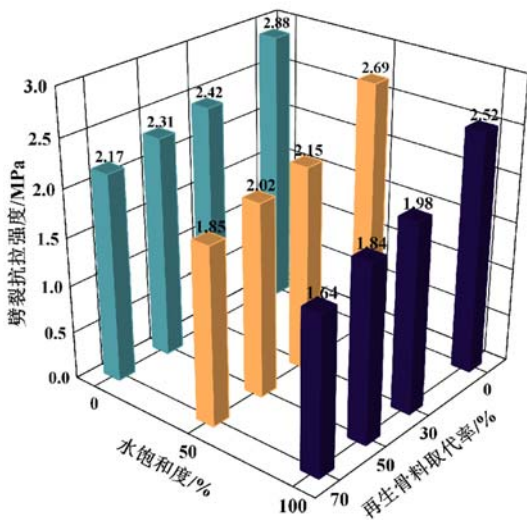


图9 水饱和度对再生混凝土劈裂抗拉强度的影响
Fig.9 Effect of water saturation on splitting tensile strength of recycled aggregate concrete

验时,再生混凝土内部固有缺陷会增加试件破坏时的薄弱面,在压力作用下再生混凝土内部缺陷会进一步增多,而试件内部自由水扮演了润滑剂的角色,从而降低了试件的劈裂抗拉强度。

2.4 微观分析

图10显示了再生混凝土的核磁共振 T_2 谱曲线。由图10可以看出,NA、RA30、RA50和RA70的 T_2 谱曲线均出现了3个波峰,与相关文献规律相符^[32],混凝土内部孔径分布连续且跨越多个数量级。 T_2 值越大,孔径就越大,不同学者采用的孔径尺寸划分方法略有不同^[33],本文将再生混凝土的孔隙划分为3类:小孔($0\sim 0.1\mu\text{m}$)、中孔($0.1\mu\text{m}\sim 2.6\mu\text{m}$)和大孔($>2.6\mu\text{m}$)^[34]。RA70、RA50和NA试件最大波峰所对应的 T_2 都位于 $0.1\text{ms}\sim 14.65\text{ms}$,RA30试件的 T_2 为 $0.1\text{ms}\sim 22.22\text{ms}$ 。最大波峰所围成的面积随着骨料取代率增加而逐渐增大,故小孔数量增加。不同配合比试件小孔数量排序为 $\text{RA70}>\text{RA50}>\text{RA30}>\text{NA}$ 。在中间波峰时,NA、RA50和RA70对应的 T_2 为 $14.65\text{ms}\sim 333.13\text{ms}$,RA30试件为 $22.22\text{ms}\sim 471.38\text{ms}$,中孔的数量为 $\text{RA30}>\text{RA70}>\text{RA50}>\text{NA}$ 试件。RA70、RA50和NA试件所对应最小波峰所对应的 T_2 为 $333.13\text{ms}\sim 10000\text{ms}$,RA30试件为 $471.38\text{ms}\sim 10000\text{ms}$,大孔数量由大到小为 $\text{RA50}>\text{RA70}>\text{RA30}>\text{NA}$ 试件。根据图11总峰面积可知,试件内孔隙数量由大到小为 $\text{RA70}>\text{RA50}>\text{RA30}>\text{NA}$,再生骨料取代率越大,试件内部孔隙数量越多。根据峰值所占面积分析,第一峰面积显著超越其他2个峰,这意味着试件中的小孔占有所有孔隙比例之首位,NA、RA30、RA50、RA70试件分别为83%、77%、82%和84%。

通过扫描电镜对NA、RA30、RA50和RA70试件进行观测。由图12可见,当NA试件放大7500倍时,试件结构表现出良好的密实性,孔洞数量较少,随着再生骨料取代率的增大,混凝土基质呈现出逐渐松散的特征,孔洞明显增多,使得水分容易蔓延至混凝土内部。试件在压力作用下,孔隙中的水分能够起到“楔子”的作用,增加了混凝土内部的孔洞数量。图12(c)为RA50电镜扫描图,由该图可以看

生骨料在经受破碎、筛选分类的过程中受损,致使其内部出现大量的小孔和裂缝,因此混凝土初始缺陷随着骨料取代率增加而逐渐增多,降低了再生混凝土的劈裂抗拉强度。当再生骨料取代率相同时,劈裂抗拉强度随着水饱和度的增大而逐渐减小。当水饱和度为50%时,NA、RA30、RA50和RA70试件劈裂抗拉强度相较于水饱和度为0%分别下降了6.6%、11.2%、12.6%和14.8%;当水饱和度为100%时,NA、RA30、RA50和RA70试件劈裂抗拉强度相较于水饱和度为0%分别下降了12.5%、18.2%、20.3%和24.4%。随着再生骨料取代率的增大,劈裂抗拉强度的减少比例呈现出上升趋势。这一现象主要是因为再生骨料相较于天然骨料在性能上存在明显不足,从而使得再生混凝土的吸水能力明显高于NA,在开展劈裂抗拉试

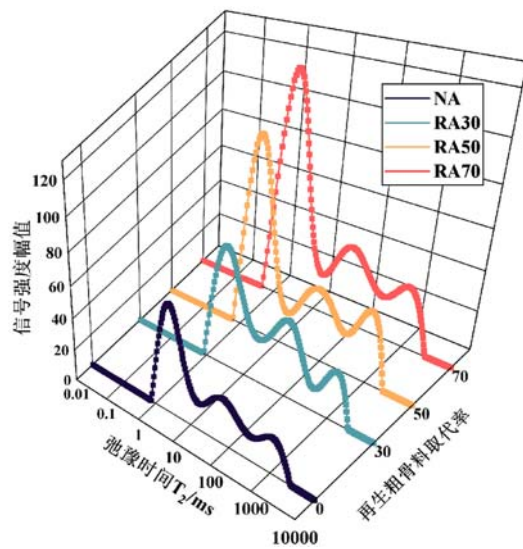


图10 试件 T_2 曲线图
Fig.10 T_2 curves of the specimen

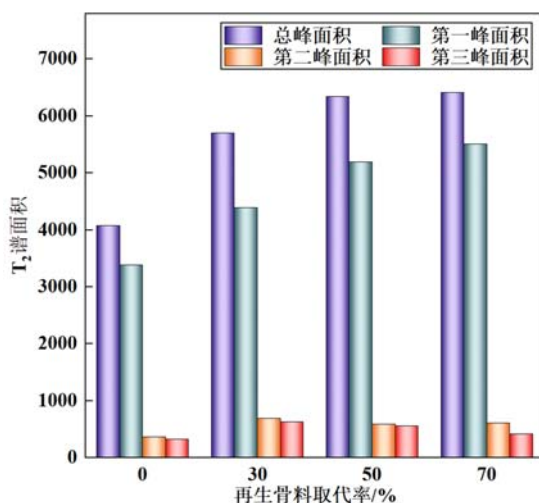
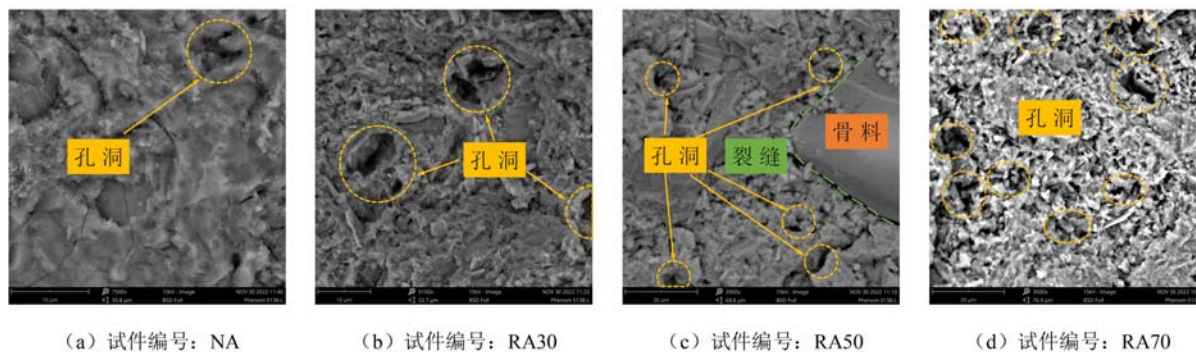


图 11 试件 T₂ 谱面积图

Fig. 11 T₂ spectrum area of the specimen

出,骨料与砂浆之间存在明显的裂缝,表明两者之间的界面过渡区黏结性较差。若试件中存在自由水,则加载时自由水填充裂缝,减少了混凝土颗粒间的摩擦力,从而减弱表面能,加速试件的破坏。



(a) 试件编号: NA

(b) 试件编号: RA30

(c) 试件编号: RA50

(d) 试件编号: RA70

图 12 再生混凝土电镜扫描(SEM)图

Fig. 12 Scanning electron microscope (SEM) image of recycled aggregate concrete

3 结论

本文通过制备 4 种再生骨料取代率和 3 种水饱和度的混凝土试件,研究了骨料取代率对混凝土工作性能和力学性能的影响,并通过核磁共振和扫描电镜对再生混凝土内部孔隙和裂缝进行定量分析,得出的主要结论如下:

(1) 随着再生骨料取代率增大,混凝土的坍落度逐渐下降,RA70 坍落度下降最多,相较于 NA 试件下降了 21mm。

(2) 随着再生骨料取代率和水饱和度的增大,弹性模量逐渐增大,抗压强度、峰值应变和劈裂抗拉强度逐渐减小。在实际工程应用时,考虑将骨料取代率为 30%的再生混凝土投入到水工边墙、渠道设施以及非主体结构的大体积混凝土中,这些结构对混凝土强度要求不高,掺入再生骨料不影响其使用。

(3) 随着再生骨料取代率增加,试件孔隙率逐渐增大。且小孔数量在混凝土内部占比最大,当再生骨料取代率为 0%、30%、50%和 70%时,混凝土内部小孔数量分别占比 83%、77%、82%和 84%。

参考文献:

[1] 牛海成,高锦龙,张耀宗,等.方钢管高强再生混凝土叠合柱轴压性能试验研究[J].实验力学,2022,37(6):921-932 (NIU Haicheng, GAO Jinlong, ZHANG Yaorong, et al. Experimental study on axial compression

- behavior of high-strength recycled concrete-filled square steel tube reinforced concrete columns[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2022, 37(6):921–932 (in Chinese))
- [2] 何锦涛, 雷冬, 高子淇, 等. 混凝土界面过渡区力学性能测试方法研究进展[J]. *实验力学*, 2022, 37(6):805–820 (HE Jintao, LEI Dong, GAO Ziqi, et al. Research progress on mechanical properties testing methods of interfacial transition zone in concrete[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2022, 37(6): 805 – 820 (in Chinese))
- [3] KATERUSHA D. Attitude towards sustainability, study contents and the use of recycled concrete in building construction-case study Germany and Switzerland[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 289:125688.
- [4] WANG X F, YANG X S, REN J, et al. A novel treatment method for recycled aggregate and the mechanical properties of recycled aggregate concrete[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 10:1389–1401.
- [5] 王琼, 於林锋, 方倩倩, 等. 国内外建筑垃圾综合利用现状和国内发展建议[J]. *粉煤灰*, 2014, 26(4):19–21 (WANG Qiong, YU Linfeng, FANG Qianqian, et al. Summary of the state-of-the-arts of foreign and domestic comprehensive utilization of construction wastes and their development[J]. *Coal Ash*, 2014, 26(4):19–21 (in Chinese))
- [6] GUO K, MIAO H, LIU L, et al. Effect of graphene oxide on chloride penetration resistance of recycled concrete [J]. *Nanotechnology Reviews*, 2019, 8(1):681–689.
- [7] DING T, XIAO J Z, VIVIAN T W Y. A closed-loop life cycle assessment of recycled aggregate concrete utilization in China[J]. *Waste Management*, 2016, 56:367–375.
- [8] CHEN W W, SHAO Z S, WEI W, et al. Properties of concrete incorporating microwave treated coarse aggregate: an experimental study[J]. *Structures*, 2021, 33:693–702.
- [9] 王国林, 祁尚远, 李聚义, 等. 再生粗骨料混凝土力学性能试验研究[J]. *混凝土*, 2020(3):168–171 (WANG Guolin, QI Shangyuan, LI Juyi, et al. Experimental investigation on mechanical properties of recycled aggregate concrete[J]. *Concrete*, 2020(3):168–171 (in Chinese))
- [10] XIE J, ZHANG H, DUAN L, et al. Effect of nano metakaolin on compressive strength of recycled concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 256:119393.
- [11] 刘震宇, 秦鸿根, 刘冠国, 等. 再生混凝土力学性能提升技术与应用[J]. *水利水电科技进展*, 2017, 37(1):90–94 (LIU Zhenyu, QIN Honggen, LIU Guanguo, et al. Technique for improvement of mechanical properties of recycled concrete and its application[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2017, 37(1):90–94 (in Chinese))
- [12] 寇世聪, 潘智生. 不同强度混凝土制造的再生骨料对高性能混凝土力学性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2012, 40(1):7–11 (KOU Shicong, PAN Zhisheng. Effect of quality of parent concrete on the mechanical properties of high performance recycled aggregate concrete[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2012, 40(1):7–11 (in Chinese))
- [13] ABDULMATIN A, TANGCHIRAPAT W, JATURAPITAKKUL C. Environmentally friendly interlocking concrete paving block containing new cementing material and recycled concrete aggregate[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2019, 23(12):1467–1484.
- [14] LI B, LING T C, YU J G, et al. Cement pastes modified with recycled glass and supplementary cementitious materials: properties at the ambient and high temperatures[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 241:118155.
- [15] CHEN J, SU Y W, LEI T, et al. Study on strength estimating of recycled concrete based on rebound method and ultrasonic-rebound combined method[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 1269(243-249):5470–5474.
- [16] 吴辉琴, 朱真, 陈宇良, 等. 循环荷载作用下聚丙烯纤维再生混凝土受压性能试验研究[J]. *实验力学*, 2023, 38(5):645–654 (WU Huiqin, ZHU Zhen, CHEN Yuliang, et al. Experimental study on the compressive performance of recycled polypropylene fiber concrete under cyclic loading[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2023, 38(5):645–654 (in Chinese))
- [17] 张志沛, 朱文清, 李可飞, 等. 不同初始缺陷再生混凝土渗透性能及其强度试验研究[J]. *混凝土*, 2022(11):23–26, 31 (ZHANG Zhipai, ZHU Wenqing, LI Kefei, et al. Experimental research on permeability and strength of recycled concrete with different initial defects[J]. *Concrete*, 2022(11):23–26, 31 (in Chinese))

- [18] ZHAO Y Y, LU X T, LIU X, et al. Effect of reed straw on the performance of recycled brick aggregate concrete and evaluation of economic benefits[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411:134205.
- [19] HUANG Y Y, YU Z Y, DING Q, et al. A study of the saturation levels of concrete at different depths on the downstream zone of a dam under low-temperature conditions[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17:e01689.
- [20] 张帅康. 不同饱和度混凝土三向受压动态力学性能数值仿真研究[D]. 宜昌:三峡大学, 2022 (ZHANG Shuaikang. Numerical simulation research on dynamic mechanical properties of concrete with different saturation under three-dimensional compression[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2022 (in Chinese))
- [21] CORTAS R, ROZIÈRE E, STAQUET S, et al. Effect of the water saturation of aggregates on the shrinkage induced cracking risk of concrete at early age[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2014, 50:1–9.
- [22] HOU S D, DUAN Z H, XIAO J Z, et al. Effect of moisture condition and brick content in recycled coarse aggregate on rheological properties of fresh concrete[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 35:102075.
- [23] 黄瑶. 干湿环境下含水率对再生混凝土性能影响研究[J]. *居业*, 2022(8):71–73 (HUANG Yao. Study on the influence of moisture content on the performance of recycled concrete in wet and dry environment[J]. *Create Living*, 2022(8):71–73 (in Chinese))
- [24] ARAGONCILLO A M, CLEARY D, THAYASIVAM U, et al. Water sorptivity prediction model for concrete with all coarse recycled concrete aggregates[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 394:132128.
- [25] 普通混凝土拌合物性能试验方法标准: GB/T 50080—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016 (Standard for test methods of properties of ordinary concrete mixes; GB/T 50080—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016 (in Chinese))
- [26] 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019 (Standard for test methods for physical and mechanical properties; GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019 (in Chinese))
- [27] DU X Q, LI Y L, SI Z, et al. Effects of basalt fiber and polyvinyl alcohol fiber on the properties of recycled aggregate concrete and optimization of fiber contents[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 340:127646.
- [28] 胡鹏飞. C30超缓凝混凝土的研究应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2020 (HU Pengfei. Research and application of C30 ultra-retarded concrete[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020 (in Chinese))
- [29] 毛宁, 金超, 刘铁, 等. 废弃混凝土作骨料及掺合料对混凝土性能的影响[J]. *混凝土与水泥制品*, 2023(11):98–102 (MAO Ning, JIN Chao, LIU Tie, et al. Effect of waste concrete as aggregates and admixtures on performance of concrete[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2023(11):98–102 (in Chinese))
- [30] DU X Q, LI Y L, SI Z, et al. Damage process of roller-compacted concrete based on combined action of freeze-thaw and triaxial compression[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2022, 34(9):04022198.
- [31] JIA Y, ZHAO X L, BIAN H B, et al. Numerical modelling the influence of water content on the mechanical behaviour of concrete under high confining pressures[J]. *Mechanics Research Communications*, 2022, 119:103819.
- [32] 薛维培, 刘晓媛, 姚直书, 等. 不同损伤源对玄武岩纤维增强混凝土孔隙结构变化特征的影响[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(9):2285–2293 (XUE Weipei, LIU Xiaoyuan, YAO Zhishu, et al. Effects of different damage sources on pore structure change characteristics of basalt fiber reinforced concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(9):2285–2293 (in Chinese))
- [33] OLTULU M, ŞAHİN R. Pore structure analysis of hardened cement mortars containing silica fume and different nano-powders[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 53:658–664.
- [34] GE X N, HU X, SHI C J. The effect of different types of class F fly ashes on the mechanical properties of geopolymers cured at ambient environment[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 130:104528.

Effect of water saturation on mechanical properties of recycled concrete and micro-mechanism analysis

HUANG Lingzhi^{1,2}, WANG Jiabin², SI Zheng^{1,2}, TIAN Shuang³, REN Yi², DU Xiaoqi²

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 2. Institute of Water Resources and Hydropower, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 3. Hebei Water Resources Planning and Design and Research Institute, Shijiazhuang 050021, Hebei, China)

Abstract: In order to explore the feasibility of recycled concrete application in hydraulic buildings and improve the efficiency of resource utilization, the mechanical properties of recycled aggregate concrete with different water saturation degrees under four aggregate substitution rates were experimentally investigated. The micro-mechanism of recycled concrete was analyzed by combining nuclear magnetic resonance and electron microscope scanning tests. The results show that the modulus of elasticity of recycled concrete gradually increase with the raise of aggregate substitution rate and water saturation degree. The compressive strength, peak strain and split tensile strength gradually decrease. The analysis of T_2 spectrum curve of the specimen find that the number of small pores in the specimen with 0%, 30%, 50% and 70% aggregate replacement rate accounted for 83%, 77%, 82% and 84%, respectively. It is found by scanning electron microscope that the density of concrete matrix decrease with the increase of regenerated aggregate substitution rate. The concrete matrix is easily permeated by free water, which will affect the mechanical properties of the recycled concrete. The research results can provide reference for the application of recycled concrete in hydraulic structures.

Keywords: recycled aggregate; water saturation; uniaxial compression; split tensile; microscopic mechanism