

引用本文:肖建庄,蓝启彬,张青天,等.组合再生混凝土及其衍生结构的应用及展望[J].建筑科学与工程学报,2023,40(1):1-13.
XIAO Jianzhuang, LAN Qibin, ZHANG Qingtian, et al. Application and prospect of composite recycled concrete and its derived structures[J].
Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(1): 1-13.

DOI:10.19815/j.jace.2022.04050

组合再生混凝土及其衍生结构的应用及展望

肖建庄^{1,2}, 蓝启彬¹, 张青天¹, 张凯建¹, 罗素蓉¹

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要:为扩大再生混凝土的应用范围,充分发挥其经济与低碳效益,对组合再生混凝土及其衍生结构的应用进行了分析与梳理,总结了再生骨料和再生混凝土的特性,剖析了组合再生混凝土存在的问题并对未来研究进行了展望。结果表明:再生混凝土相比普通混凝土存在着强度低、弹性模量小的特点,仅依靠再生混凝土往往较难满足结构各个部位的力学性能及功能需求;通过组合再生混凝土的形式将再生混凝土与其他混凝土在构件、结构上组合,或将再生骨料与其他骨料进行组合,将满足性能要求的混凝土放在特定部位上,既环保也能充分发挥各混凝土的优势;不同混凝土间的界面剪切强度对组合再生混凝土结构的性能有着重要影响,剪切强度受到界面粗糙度、黏结剂、混凝土强度等多种因素的影响,提高界面粗糙度可以有效提高组合再生混凝土及其衍生结构的整体性和安全性;组合再生混凝土与BIM、3D打印、装配式建筑和智能材料的结合,可在实现绿色建造的同时保证结构性能。

关键词:再生混凝土;组合再生混凝土;组合层次;界面性能;新型工艺

中图分类号:TU973.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2023)01-0001-13

Application and prospect of composite recycled concrete and its derived structures

XIAO Jianzhuang^{1,2}, LAN Qibin¹, ZHANG Qingtian¹, ZHANG Kaijian¹, LUO Surong¹

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, Fujian, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to expand the application range of recycled concrete and fully realize its economic and low-carbon benefits, the application of composite recycled concrete and its derivative structures were analyzed and sorted, and the characteristics of recycled aggregate and recycled concrete were summarized. The problems of composite recycled concrete were analyzed and the future research was prospected. The results show that recycled concrete has the characteristics of low strength and small elastic modulus compared with ordinary concrete. It is often difficult to meet the mechanical properties and functional requirements of various parts of the structure by relying on recycled concrete itself. Through the forms of composite recycled concrete, recycled concrete is combined with other concrete in the form of components and structures, or the recycled aggregate is combined with other aggregates. Concrete that meets the

收稿日期:2022-04-15

基金项目:国家自然科学基金项目(52078358, 52008304, 52078139);福建省中青年教育科研项目(科技类)(JAT210040)

作者简介:肖建庄(1968-),男,工学博士,教授,博士生导师, E-mail: jzx@tongji.edu.cn。

performance requirements can be placed on specific parts, which is not only environmentally friendly but also can give full play to the respective advantages. The interfacial shear strength between different concretes has an important influence on the performance of composite recycled concrete structures. The shear strength is affected by many factors such as interfacial roughness, binder and concrete strength. Increasing the interfacial roughness can effectively improve the integrity and safety of composite recycled concrete and its derivative structures. The combinations of composite recycled concrete with BIM, 3D printing, prefabricated buildings and smart materials can achieve green construction while ensuring structural performance.

Key words: recycled concrete; composite recycled concrete; combination level; interface property; new technique

0 引言

近年来,中国房屋及基础设施建设发展迅猛,与此同时每年排放的建筑垃圾 $15.5 \times 10^8 \sim 24 \times 10^8$ t,未处理的存量垃圾超过 200×10^8 t,2020 年中国新建房屋面积创历史新高,达 149.5×10^8 m²,据估算^[1],每拆除 1×10^4 m² 建筑,会产生建筑垃圾 $0.7 \times 10^8 \sim 1.2 \times 10^8$ t,因此,排放量逐年递增的建筑垃圾如何处理是目前面临的重大问题。面对该问题,再生混凝土技术是有效的解决方式之一,既可以有效消纳建筑垃圾,也有利于缓解资源短缺形势。再生混凝土是指将废弃混凝土通过破碎、筛分、清洗和分级之后,按一定比例和级配混合形成再生骨料,再将再生骨料部分或全部替代天然骨料所制成的混凝土^[2]。近年来,再生混凝土的研究趋于成熟,研究结果表明^[3-5],由于再生骨料较高的堆积空隙率和压碎指标,使用再生骨料替代天然骨料后,再生混凝土的立方体抗压强度、棱柱体抗压强度及弹性模量均小于普通混凝土,抗弯强度、抗折强度也有不同程度的降低,且存在流动性不足、混凝土内部缺陷较多易产生集中应力等问题。

为优化混凝土结构的性能,肖建庄等^[6]提出了“组合混凝土”的概念,其基本思想是通过在不同层次上(材料、构件、结构)组合不同种类的混凝土,对混凝土材料以及结构进行优化设计,从而提升其安全性、适用性和耐久性。将再生混凝土应用至“组合

混凝土”中,可利用骨料、混凝土之间的组合效应改善再生混凝土的性能,进一步为再生混凝土结构可持续性设计提供新的思路,这样的组合可称为“组合再生混凝土”。本文从组合再生混凝土的不同组合层次、界面影响因素进行阐述。

1 再生混凝土性能特点

1.1 再生骨料

再生骨料根据其粒径大小可分为再生粗骨料(4.75~31.5 mm)和再生细骨料(不大于 4.75 mm),在加工过程中会附带产生再生粉料。表 1 为再生骨料和天然骨料性能对比^[7-13]。可以发现,再生骨料相比天然骨料堆积空隙率高 7%~14.1%,密度低 2.8%~15.6%,压碎值高 6.2%~14.5%,吸水率高 1.73%~4.7%。这是因为与天然骨料相比,再生骨料表面附着有疏松多孔的老砂浆,且再生骨料所属的原混凝土已经历多年的碳化、物理挤压、化学腐蚀、温差变化等作用。此外,破碎工艺的不同也会对其内部结构带来影响,形成微裂缝。通过对比再生粉料与砖瓦黏土、粉煤灰的化学成分可知,砖瓦黏土中 SiO₂ 含量(质量分数)最高为 65.12%,粉煤灰中 Al₂O₃ 含量最高为 33.51%,而 CaO 和 MgO 等成分高于粉煤灰,这些物质有助于水泥水化产物的二次水化反应,提高再生粉料的反应活性^[14]。

1.2 再生混凝土力学性能

再生混凝土的力学性能受再生骨料的品质、取

表 1 再生骨料与天然骨料性能对比^[7-13]

Table 1 Comparison of properties between recycled aggregate and natural aggregate^[7-13]

骨料种类	松堆空隙率/%	紧堆空隙率/%	松散堆积密度/(kg·m ⁻³)	紧密堆积密度/(kg·m ⁻³)	表观密度/(kg·m ⁻³)	压碎值/%	含水量/%	含泥量/%	24 h 吸水率/%
天然骨料	39.50~45.86	28.3~33.0	1 444~1 610	1 679~1 782	2 660~2 765	5.2~5.6	0.09~0.20	0.22~0.60	0.60~0.82
再生骨料	45.00~54.41	40.0~42.1	1 179~1 405	1 362~1 530	2 350~2 586	11.8~19.7	2.10~3.10	0.88~2.50	2.55~9.62

注:含水量、含泥量为质量分数。

代率、掺合料和水灰比的影响,与普通混凝土相比,再生混凝土的抗压强度、抗拉强度及抗折强度较低。研究表明^[3,15-16],再生混凝土抗压强度、抗拉强度分别较普通混凝土低 20%~30%和 10%~20%;当再生粗骨料取代率为 30%、70%、100%时,其抗压强度都低于普通混凝土,但在取代率为 50%时可能会出现相反的情况;再生混凝土的立方体抗拉强度、劈裂抗拉强度和抗折强度随立方体抗压强度的增加而增加^[17],相关关系可总结为式(1)~(3)。与普通混凝土相比,再生混凝土弹性模量降低,峰值应变增大;在取代率较低时,其泊松比与普通混凝土相差不大,其值随着取代率的增加而降低。已有学者^[18-21]的研究表明,再生骨料的存在会使再生混凝土的弹性模量低于普通混凝土,其弹性模量相比普通混凝土低 18.2%~24.6%^[18]。再生骨料的存在会使再生混凝土的峰值应变高于普通混凝土^[22],当再生骨料取代率大于 30%时,泊松比略微下降。

$$f_t = 0.395 f_{cu}^{0.55} \quad (1)$$

$$f_{t,sp} = 0.19 f_{cu}^{0.75} \quad (2)$$

$$f_t = 0.68 \sqrt{f_{cu}} \quad (3)$$

式中: f_t 为单轴抗拉强度; $f_{t,sp}$ 为劈裂抗拉强度; f_t 为抗折强度; f_{cu} 为立方体抗压强度。

1.3 再生混凝土耐久性能

再生混凝土的耐久性能研究包括抗碳化性能、抗冻性能、抗氯离子渗透性能、抗硫酸盐渗透性能等^[23]。多数研究^[24-25]表明,随着再生粗骨料取代率提高,混凝土碳化深度增加,再生粗骨料取代率大于 70%时,碳化深度有所下降。陈德玉等^[26-27]研究发现,300 次冻融循环后再生骨料会降低再生混凝土的抗冻性能,当橡胶粉掺量(质量分数)为 5%和 10%,取代率在 50%以下和 75%时,其抗冻性能有一定提升。Kou 等^[28-31]认为再生混凝土的抗氯离子渗透性能低于普通混凝土,添加粉煤灰等矿物掺合料可以提高其抗氯离子渗透性能,粉煤灰的最佳掺量(质量分数)为 10%~20%,提高水灰比对抗氯离子渗透性能不利。Azevedo 等^[32]研究表明,再生混凝土的抗硫酸盐侵蚀等能力低于普通混凝土,使用 15%粉煤灰和 15%偏高岭土替代水泥,可提高其抗硫酸盐侵蚀能力。肖建庄等^[33]发现再生混凝土在 28 d 内收缩变形较大,荷载下的徐变在 60 d 内较大。崔正龙等^[34-35]研究了再生混凝土的透气性能和耐磨性能,发现再生粗骨料取代率对透气性能的影响小于再生细骨料,再生粗骨料取代率小于 40%时对磨损性能影响较小,高于 40%后,磨损量随着再

生粗骨料取代率的提高而显著增加。

整体而言,原生混凝土服役期的受荷损伤、环境作用以及再生骨料加工时受到的物理挤压等因素,使再生骨料表观密度、堆积密度等呈现不同程度的下降。再生混凝土由于受到再生骨料的影响,其抗压强度、抗折强度与耐久性能等低于同水灰比下的普通混凝土。可见,若将再生混凝土单独用于结构中,可能在一些结构部位处难以达到设计要求,例如,在一些关键节点部位,会出现承载力、变形能力不满足的问题。因此,若将再生混凝土与其他混凝土进行不同层面的组合设计,可达到取长补短的效果。

2 组合再生混凝土

再生骨料相对天然骨料存在的缺陷、再生混凝土相对普通混凝土性能上的不足,均会使其应用受到一定限制。而通过再生骨料与其他骨料的组合、再生混凝土与其他混凝土的组合、再生混凝土构件和其他混凝土构件的组合,可利用组合的优势来弥补再生混凝土的不足。

2.1 骨料层面组合

再生骨料的性能缺陷,可通过骨料层面的组合来弥补,部分骨料取代的再生混凝土即为最基本的组合形式,例如,再生骨料取代率为 30%的再生混凝土抗压强度高于取代率为 100%的再生混凝土^[3]。蓝文武等^[36]通过采用人工砂取代率为 0%、30%、50%、70%、100%的试验,将人工砂与再生粗骨料结合,发现人工砂再生混凝土梁剪切变形性能和破坏形态与人工砂普通混凝土梁基本一致。邢丽等^[37]认为海水、海砂中的盐分结晶及水化产物可以填充孔隙。而将海水、海砂与再生骨料组合制备为海水海砂再生骨料混凝土后,其 7 d 立方体抗压强度高于一般再生混凝土的 10%~20%^[38]。海水海砂中的 Cl^- 和 SO_4^{2-} 水化后生产钙矾石和 F 盐等膨胀类物质,可以起到填充孔隙和修复界面过渡区缺陷的作用,进而起到一定强化作用。

吴波等^[39]通过研究再生混凝土块体与新混凝土组成的再生混合混凝土发现:使用块体(特征尺寸为 50~400 mm)相比使用再生骨料制备混凝土,其能耗可降低 40%~60%,水泥用量减少 30%;当再生混合块体取代率低于 33%时,对再生混合混凝土柱的轴压、初始刚度和延性系数的影响可忽略不计,其受压破坏过程未出现明显裂纹聚集和应力集中现象。蔡敏伟等^[40-42]对再生块体混凝土的单轴受压性

能、疲劳性能以及不同温度下的力学性能开展了研究,结果发现:抗压强度分别为 26.7 MPa 和 45 MPa 的旧混凝土块体与新混凝土结合良好,当取代率从 0% 提升至 30% 时,立方体抗压强度下降 20.1%;当新旧混凝土强度相差不大且取代率不高时,其强度性能和普通混凝土基本一致,疲劳性能相比普通混凝土无明显降低,经过高温后,再生块体混凝土的抗压强度与普通混凝土亦无明显差异。熊焱等^[43]进行了再生块体混凝土剪力墙的抗震性能研究,结果发现,掺再生混凝土块的剪力墙破坏位移角大于 1/50,位移延性系数为 5.40~5.91,当再生混凝土块和新浇筑混凝土的抗压强度相差不大时,满足规范要求,再生混凝土块取代率为 20% 的剪力墙抗震性能与普通混凝土剪力墙基本一致。高林等^[44]采用大粒径再生骨料(5~100 mm)制备再生混凝土,结果发现,通过调整级配可使再生混凝土满足跟普通混凝土一样的性能要求,减少破碎工序,从而降低再生混凝土制作成本。

综上,骨料层面的组合在减少天然资源使用的同时,可以实现再生混凝土的性能优化,同时降低生产成本。骨料的组合可改善再生混凝土界面过渡区和孔结构分布,将再生骨料与金属骨料、浮石、河卵石等特殊骨料进行组合,可在后续研究中尝试。

2.2 构件层面组合

将再生混凝土与其他混凝土在不同部位上组合,可对柱、梁、板等构件进行性能优化设计。

对于柱构件,其内部区域受到外部的保护作用且受力相对较小,因此,柱内部的混凝土强度要求可低于柱外部,可将性能较低的混凝土材料用于柱内部,将高性能的混凝土材料用于柱外部,不仅契合柱的受力特点还能显示各混凝土优势。采用这一设计思路,Xiao 等^[45]制备了再生骨料混凝土半预制柱[表 2(a)],研究了不同再生骨料取代率(0%、100%)、施工顺序和柱芯尺寸对柱抗震性能的影响,结果发现,外部预制再生混凝土柱和内部预制再生混凝土的峰值荷载分别高于普通混凝土柱 15.1% 和 5.7%,其破坏模式与普通混凝土柱相似,具有良好的抗震性能。Zhang 等^[46-47]对海水海砂再生混凝土整体柱和组合柱进行了研究,发现海水海砂再生混凝土柱的峰值荷载相比一般再生混凝土高约 17%;采用普通混凝土外壳和海水海砂再生混凝土内芯的组合柱,其承载力为海水海砂再生混凝土柱的 0.9 倍~1.8 倍,采用 ECC(engineered cementitious composite)外壳的组合柱承载力最高可达整

浇海水海砂再生混凝土柱的 2 倍,组合柱构造形式也如表 2(a)所示。Robalo 等^[48]将超高性能混凝土与再生混凝土进行了组合使用。

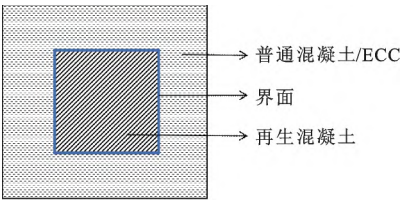
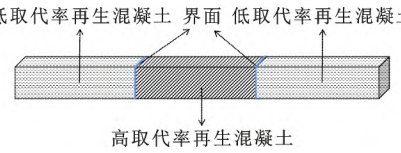
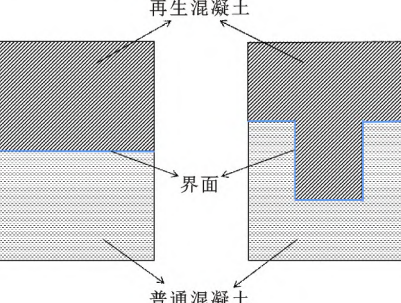
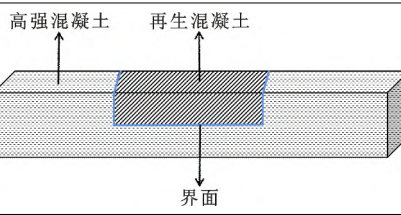
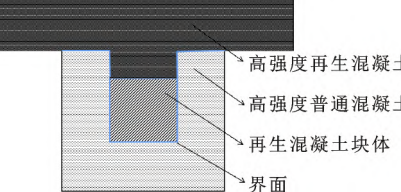
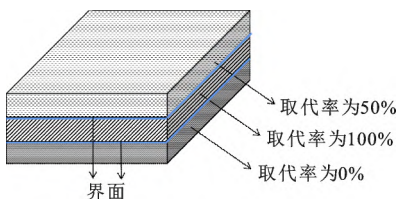
根据梁的受力特点,可有两种设计方式,一种是在梁纵向的不同部位进行组合[表 2(b)],在弯矩控制段采用取代率较大的再生混凝土,在剪力控制段采用取代率较小的再生混凝土,并用振捣棒在分界面进行振捣^[6]。另一种组成方式是截面上下的组合形式,在梁横截面的受拉区和受压区浇筑不同种类的混凝土,Xiao 等^[49]提出了再生混凝土叠合梁[表 2(c)],进行剪切试验时,剪跨比为 3.0 的 C 型和 U 型叠合梁与整浇梁一样承载性能良好,当荷载加载到 60 kN 时出现第一条裂缝,斜剪切裂缝在荷载为 160 kN 时出现,350 kN 时梁完全破坏,叠合梁未发生对承载力和变形不利的影响。Lapko 等^[50]设计出一种组合梁,该组合梁以再生混凝土为基础,将高强混凝土(抗压强度为 100 MPa)设置在构件的受压区中心部分[表 2(d)],组合梁相比整浇再生混凝土梁抗弯强度高出 20%~36%,挠度降低 20%~40%,具有更高的刚度和抗弯能力。Fahmy 等^[51]设计了组合 T 型梁,梁腹板分为外预制 U 型部分和腹板核心部分,外预制 U 型部分都采用高强度普通混凝土,腹板核心部分分别采用普通强度再生混凝土、高强度再生混凝土和普通强度再生混凝土砌块,梁翼缘部分采用高强度普通混凝土;两种组合梁,一种为腹板核心采用 C50 再生混凝土,翼缘采用 C50 普通混凝土;另一种腹板核心采用 C25 再生混凝土块,翼缘采用 C50 再生混凝土[表 2(e)],其抗弯强度分别高于一般梁 11.4% 和 9.8%,屈服荷载分别高于参考梁 20% 和 13.5%,延性比低于参考梁 10%~55%,采用普通强度再生混凝土块体填充具有与参考梁相同的变形能力。在抗压强度方面,不同组合梁与参考梁相近。

板的组合方式也可分为两种,一种是截面上下组合不同种类混凝土,另一种是平面上不同位置的组合。基于板的受力特点,平面上不同位置的板有较强的关联性,而且不同位置板的受力并没有显著差异,所以这方面的研究意义不大。而对截面而言,上下采用的材料不同,其受力有着明显的差异,具体分为受拉区、受压区以及中性轴区域,可根据不同区域的特点,相应采用不同种类的混凝土。在板截面上下组合不同的混凝土,既可以组合不同种类的混凝土,也可以组合同一种类不同物质掺量的混凝土。Xiao 等^[52]通过在截面上设置不同再生骨料取代率

(0%、50%、100%)制备了再生骨料混凝土梯度板[表 2(f)],发现再生混凝土梯度板与普通混凝土板的弯曲变形性能相似,其弯曲性能和弯曲刚度随着配筋率的提高而增强,在配筋率为 0.70%和 0.98%时,梯度板的承载能力良好,与普通混凝土相近。

表 2 柱、梁、板构件组合形式

Table 2 Combination forms of column, beam and slab

组合构件	编号	组合方式
柱	(a) ^[45]	
	(b) ^[6]	
	(c) ^[49]	
梁	(d) ^[50]	
	(e) ^[51]	
	(f) ^[53]	

2.3 结构层面组合

结构中不同部位的构件有着不同的性能要求。对于框架结构、框架-剪力墙结构,梁柱之间节点的性能对框架整体性能影响很大。上海市建筑示范楼

采用预制再生混凝土框架结构^[54],该楼框架柱在工厂预制,柱的纵向钢筋采用灌浆套筒技术连接,框架梁和框架都是复合形式,楼的整体预制率超过 70%,研究发现预制再生混凝土框架结构耗能能力良好,与预制普通混凝土框架结构具有相同侧移机理和抗坍塌能力,抗地震性能也无显著差异,为预制再生混凝土框架在实际工程中的应用提供了依据。

Marthong 等^[55]设计了再生混凝土与微膨胀混凝土(微膨胀混凝土是一种高强度混凝土,通过波特兰水泥、级配骨料、填料和外加剂组成的干粉与水结合生成,流动度大且收缩小,可用于混凝土的修复)的组合梁柱节点(图 1),开展了节点的抗震性能研究,参照组节点区域采用普通混凝土,节点区域采用微膨胀混凝土 30%和 100%(质量分数)取代普通混凝土的梁柱结构相比参照组刚度分别降低 8%和 15%,节点区域采用再生混凝土 30%和 100%(质量分数)取代普通混凝土的梁柱结构相比参照组刚度分别降低 30%和 42%,组合梁柱节点的耗能能力是一般再生混凝土梁柱节点的 1.39 倍~1.47 倍,极限荷载和延性均有显著提升。Ding 等^[56]根据解构设计(design for deconstruction, DfD)方法,设计了可拆装连接构造(图 2),并开展了 DfD 梁柱框架节点的抗震性能研究,结果发现其位移延性相比整体构件降低 10%,所有节点在 1.5%位移比下具有相近的耗能能力,DfD 梁柱框架节点可满足抗震要求。

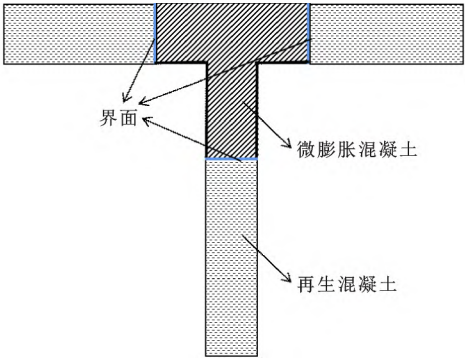


图 1 节点区域使用微膨胀混凝土的再生混凝土梁柱节点
Fig. 1 Recycled concrete beam-column joint with micro-expansive concrete in joint area

综上所述,在柱、梁和板等构件的设计中,将再生混凝土与其他混凝土进行组合,在特定部位使用具有特定功能的混凝土以发挥其性能特点,可充分利用材料达到资源节约的目的,同时能提高组合再生混凝土构件的受压、受弯及抗震等性能,形成工业化生产后将具有良好的经济与生态效益。在设计中,结构不同部位具有不同的性能要求,柱主要承担

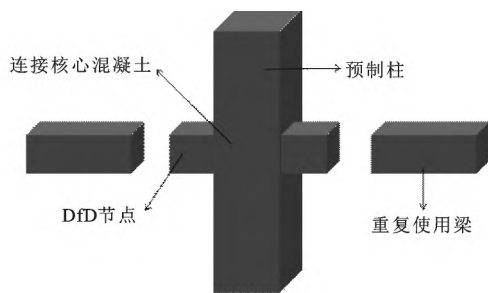


图2 DfD梁柱框架节点连接示意图

Fig. 2 Connection diagram of DfD beam and column frame joints

轴向压力,梁和板主要承担弯矩、剪力,节点部位起到连接不同构件的重要作用,需根据构件的力学性能和功能需求选取恰当的混凝土,充分发挥再生混凝土和其他混凝土的各自优势。

3 组合再生混凝土界面性能

组合再生混凝土的性能很大程度上受到再生混凝土与其他混凝土界面性能的影响,改善界面的黏结抗剪性能可更好地发挥组合再生混凝土的作用,其界面可从再生混凝土界面过渡区和混凝土与混凝土间界面性能两方面展开阐述。

3.1 再生混凝土界面过渡区

混凝土中骨料边缘存在一定区域,该区域浆体的性能与远离该区域浆体的性能存在显著不同,称为混凝土界面过渡区,再生混凝土内部新/旧界面过渡区如图3所示,其性能受到再生骨料品质、原生混凝土强度以及搅拌方式等影响。

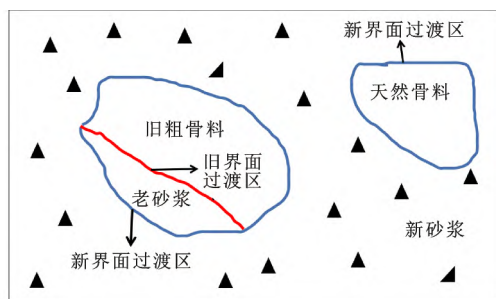


图3 再生混凝土微观结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of microstructure of recycled concrete

张玉栋等^[57]研究发现再生混凝土的界面过渡区相比普通混凝土更疏松、存在孔洞或者微裂缝,主要是由于再生骨料表面附着的老砂浆以及破碎过程中产生的缺陷造成的。王继娜等^[58]通过对比原生混凝土强度为C30、C50、C80的再生混凝土与普通混凝土的强度以及微观结构发现,龄期为3d时,其

水化不完全,原生混凝土强度越高吸水率越大,而原生强度为C30、C50、C80的再生混凝土结构完整性逐渐下降;在28d时,其水化完全,原生混凝土强度越大,其砂浆层强度越高,表面附着砂浆越多,其与新砂浆层黏结越紧密,随着原生混凝土强度的提升,其微观结构更加密实。李文贵等^[59]使用纳米压痕和扫描电镜观察再生混凝土界面过渡区,采用二次搅拌工艺时,C—S—H凝胶体积分数为68%,大于普通搅拌的55%,二次搅拌工艺使界面过渡区更加致密,孔隙率和弹性模量离散性降低。宫尧尧等^[60-62]研究发现,对于氯离子溶液浸泡后的再生混凝土,其旧界面过渡区的显微硬度从100~150 MPa降至35~45 MPa,新界面过渡区的显微硬度降低10~20 MPa,在硫酸根离子溶液中浸泡后,显微硬度也会降低,掺入硅灰对再生骨料进行裹浆可提升界面过渡区的抗渗透性能。当再生骨料和其他骨料组合时,其形成的界面过渡区体系以及孔结构分布均会产生差异,进而产生性能上的差异。

3.2 混凝土与混凝土间界面

3.2.1 界面测试方法

混凝土与混凝土间的界面性能对组合混凝土性能有着重要影响,可通过多种不同的方法测定混凝土间的界面黏结性能,目前已有学者开展了准静态和动态下的黏结性能试验研究。Ray等^[63]通过一种直接剪切试件对双层复合混凝土界面性能进行表征,试验测得普通混凝土与高性能混凝土界面强度在1.5~2.9 MPa之间,满足加拿大标准协会要求(大于0.9 MPa),验证了普通混凝土与高性能混凝土满足实现界面剪切强度要求,试件形状如图4(a)所示。Santos等^[64]通过双面剪切试验认为,混凝土间界面的影响因素主要为表面粗糙度、黏合剂种类、强度最低混凝土的强度,试件形状如图4(b)所示。Figueira等^[65]在直接剪切的基础上对试件形式进行改造,试件由同一种混凝土分3个时间进行浇筑[图4(c)],通过循环推拉试验对不同时间浇筑混凝土间界面的剪切性能进行分析,使用液压试验机的球形座对试件界面施加轴向荷载,将变压传感器安置在试件的界面测量滑移,用公式(4)进行剪力计算,界面断开后的试件再分别进行单调荷载剪切试验。Ceia等^[66]通过直接剪切对图4(d)试件进行试验,研究不同粗糙度下界面抗剪强度的变化,界面粗糙度对抗剪强度有提升作用。

$$\tau = \frac{F}{Lb} \quad (4)$$

式中: τ 为剪应力; F 为施加荷载; L 为界面长度; b 为界面宽度。

Hu等^[67]进行了动态黏结性能研究,采用霍普金森压杆对斜剪试件施加动态压缩荷载,结果显示:应变率从 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 提升至 9.91 s^{-1} 时,界面黏结强度显著提高;当应变率从 9.91 s^{-1} 提高到 21.63 s^{-1} 时,试件吸收能量更多,但破坏更严重;试件龄期增大或者新旧混凝土龄期差增大也会使黏结强度增大;试件倾角 30° 比倾角 40° 更容易失效,测试试件如图4(e)所示。Frenzel等^[68]通过施加位移控制荷载,直至试件发生破坏,测量界面的抗剪强度,试件为五层[图4(f)],试件3种组合分别为:覆盖层为结构轻混凝土,核心层为次轻混凝土;覆盖层为普通混凝土,核心层为次轻混凝土和泡沫混凝土。使用垂直引伸计和水平引伸计测量试件上下区域的垂直偏转和应变,通过荷载分配板和三角形钢条将力传到试件上边缘,以使试件产生 $0.005 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度施加位移控制荷载,直至试件发生破坏。

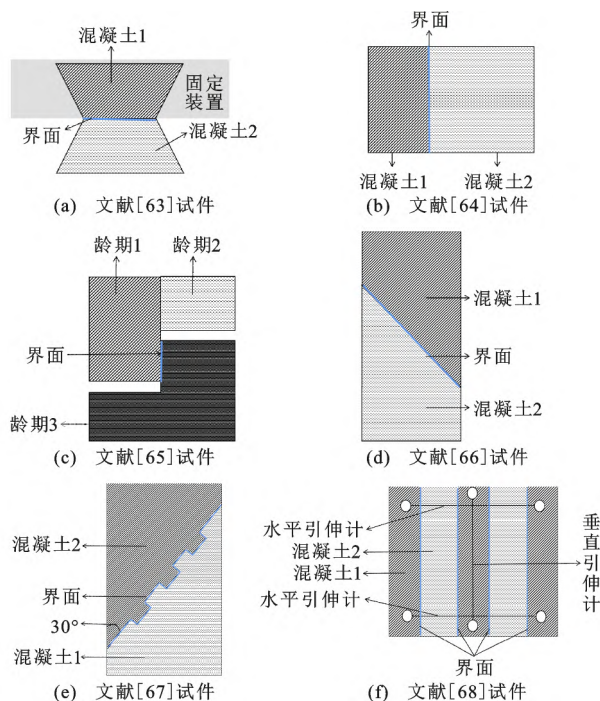


图4 剪切试件形状^[63-68]

Fig. 4 Shape of shear specimen^[63-68]

3.2.2 界面影响因素

混凝土与混凝土间界面性能的影响因素很多,主要影响因素有截面的粗糙程度、黏合剂性能、混凝土龄期、混凝土的强度、骨料特性。

Frenzel等^[68]综合变形和剪力来研究界面粗糙度对黏结强度影响,用引伸计测量试件上下区域垂直偏转和变形,用公式(5)计算出剪力,综合变形和

剪力来评估界面抗剪性能。覆盖层为结构轻混凝土,核心层为次轻混凝土,覆盖层为普通混凝土,核心层为次轻混凝土,在这两种组合下界面为光滑时的平均极限剪切应力分别为 0.69 、 0.66 MPa ,粗糙界面下分别为 0.69 、 0.73 MPa ,凹陷界面失效荷载比光滑界面和粗糙界面两者平均值高出 16% ,与Ceia等^[66]认为随着粗糙度增加,界面抗剪强度增加的结论基本一致。次轻混凝土与结构轻混凝土的黏合效果最好,普通混凝土与泡沫混凝土组合的界面由于泡沫混凝土的表面光滑使组合界面强度较低。

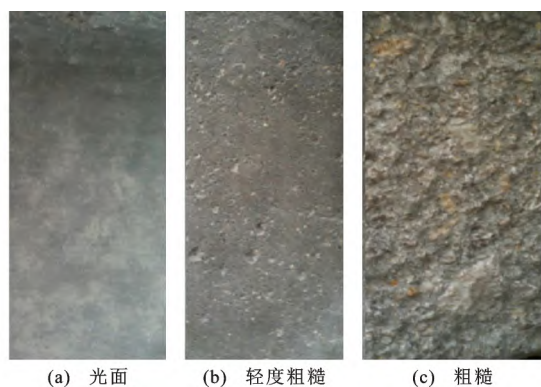
$$\tau_m = \frac{F}{2A} \quad (5)$$

式中: τ_m 为平均剪应力; A 为界面面积。

Robalo等^[48]试验发现胶黏剂失效是超高耐久性混凝土和低水泥再生混凝土(水泥用量减少)界面破坏的主要原因。Santos等^[69]探究发现,当旧混凝土层与新混凝土层的浇筑时间间隔增大,收缩会变大,收缩产生的压缩应力会抵消剪切试验时试件界面上的拉伸应力,因此随着收缩的增加,试件的抗剪黏结强度会提高。叶果^[70]研究发现,新混凝土和旧混凝土的强度等级越高,界面的抗剪性能越强。

再生骨料对再生混凝土的影响也会对界面性能产生作用。Ceia等^[66]研究再生混凝土和普通混凝土界面的黏结强度,用钢刷将界面打造成轻度粗糙,用针枪将界面打造成粗糙,界面情况见图5。3种界面抗剪强度平均值分别为 5.90 、 7.00 、 10.31 MPa ,随着再生骨料取代率提高,3种界面抗剪强度最高分别降低 121% 、 136% 和 161% ,再生骨料对界面粗糙程度更高的试件抗剪强度降低效果更明显。Robalo等^[48]研究了超高性能混凝土与再生混凝土间的界面性能,构件形式与Ceia等^[66]采用的构件形式相同,结果显示当提高界面粗糙度时,混凝土界面抗剪强度可提高至 40% ,超高耐久性混凝土的抗剪强度随着黏合剂强度的增加而增加,增加界面的粗糙度和黏结剂强度对抗剪强度很重要。目前混凝土界面的研究短龄期居多,其长龄期性能以及耐久性是今后研究的方向之一^[71]。

再生混凝土中的界面过渡区相比普通混凝土存在更多缺陷,并受到原生混凝土强度、搅拌工艺等因素的影响,在材料组合时,需将界面过渡区的性能考虑在其中。另外,混凝土与混凝土间的界面性能是不同混凝土间能够共同作用的基础,其界面黏结强度会影响组合再生混凝土结构的整体性。针对界面的准静态和动态测试发现,混凝土间界面性能主要

图5 不同粗糙情况界面^[66]Fig. 5 Different roughness of interface^[66]

受界面粗糙度、黏合剂种类、混凝土强度的影响,且随着应变率提高会出现黏结强度提高的现象。总结现有试验结果,提高界面粗糙度是提高界面剪切性能的有效措施,提高混凝土强度等级也可以提高界面剪切性能。在组合再生混凝土结构中,为保证界面具有足够的黏结力,应从提高界面粗糙度、提高胶黏剂性能和混凝土强度等级等方面入手,从而保证组合再生混凝土结构具有良好的性能。

4 组合再生混凝土未来展望

4.1 基于再生混凝土特点的组合优化

4.1.1 材料层面

将海砂资源和再生骨料组合应用是目前发展的方向之一。邢丽等^[37]发现海水海砂里面的盐分结晶后可以填充混凝土里面的孔隙,使混凝土强度提高。肖建庄等^[72]考虑到再生骨料堆积空隙率较高,提出将海水海砂与再生骨料结合来提高再生骨料混凝土的性能,然而其具体影响过程仍需进一步研究。将密度较低的再生骨料与密度较高的金属骨料结合、与具有改性作用的轻骨料(火山渣、粉煤灰、黏土陶粒)的结合,或者复掺不同的骨料以发挥各自的优势也是值得研究的方向。

4.1.2 构件与结构层面

目前已有的组合再生混凝土构件研究表明,再生混凝土在构件、结构层面进行组合可对其性能进行优化。在应用中,结构-功能一体化是现在设计的发展趋势,将再生混凝土放在构件的内层,各种功能性混凝土放在外层,如超高耐久性混凝土、耐火性混凝土,既能满足性能、功能需求,也能减少资源能量消耗,还可根据结构不同部位功能需求,将各混凝土设置于恰当地方,如连接节点使用性能较高的混凝土,其余部分应用再生混凝土,不同组合方式的再生

混凝土结构是需进一步研究的方向。

4.2 与新型工艺、材料的结合和优化

组合再生混凝土在浇筑施工时,由于结构的组成相对复杂,采用现场施工方式浇筑效率较低,因此需考虑与其他新型工艺结合。BIM技术、3D打印技术和装配式建筑是建筑行业新兴研究方向,可将这些技术结合起来,使之应用于组合再生混凝土施工中,通过BIM技术对结构进行完整设计和建模,包含结构分布、构件特性以及材料的各项参数,利用3D打印在成本和效率方面的竞争性,将建成的模型通过3D打印技术进行打印^[73-74],再将构件装配成组合再生混凝土结构,不仅具有绿色、循环、高效的优势,还能进一步实现建造智能化。

再生骨料由于堆积空隙率高、密度低、压碎指标大等特性,导致相关构件性能较差,而且不同的组合再生混凝土结构工作性能仍有许多未知,可将智能材料与组合再生混凝土进行结合。智能材料具有仿生性、传感功能、自诊断、修复、调节的特性,如光导纤维通过信号传播发现混凝土结构变化;形状记忆芯片可以保障材料的稳定性,有效降低恢复的难度。两者结合可及时发现组合再生结构潜在的问题和风险,确保结构的安全性和稳定性。

4.3 存在不足和研究方向

(1)目前组合再生混凝土结构的研究较少,在现有研究基础上,需要根据再生骨料和再生混凝土的特点,在材料、构件以及结构层面,构想出可以减少再生混凝土应用风险的组合方式,以扩大再生混凝土的应用途径。

(2)再生骨料的使用可以减少对天然砂石资源的开采,而组合再生混凝土结构在保证结构安全性和功能要求基础上,可合理利用再生骨料,并提高所有材料的利用率,若形成规模化生产,将对环境保护起到重要作用。

(3)组合再生混凝土结构目前主要停留在研究阶段,还没有实际工程案例;组合混凝土界面粗糙程度的表征、黏结剂种类和强度以及它们如何影响混凝土与混凝土之间的界面性能需要深入研究。

(4)在结合再生骨料特性的基础上,深入研究再生混凝土在骨料、构件、结构上不同的组合,探索出新的组合方式;与BIM技术、3D打印技术、智能材料结合,在绿色建造的同时保证结构性能。

5 结 语

本文总结了再生混凝土的性能特点,从骨料、构

件和结构层面阐述了现有组合再生混凝土相关研究,探讨了组合界面的影响因素及其对性能的影响,提出了未来发展展望,具体结论如下:

(1)再生骨料相比天然骨料,空隙率高 7%~14.1%,密度低 2.8%~15.6%,压碎值高 6.2%~14.5%,吸水率高 1.73%~4.7%;再生混凝土的抗压强度、抗拉强度相比普通混凝土分别低 20%~30%和 10%~20%,抗折强度、抗碳化性能等均一定程度低于普通混凝土,可通过与其他混凝土组合使用的方式,提高再生混凝土的应用效率。

(2)再生混凝土与其他混凝土组合设计,可优化其强度和工作性能等,海水海砂再生混凝土 7 d 立方体抗压强度高于再生混凝土 10%~20%;外部预制再生混凝土柱和内部预制再生混凝土柱的承载力分别高于普通混凝土柱 15.1%和 5.7%,再生混凝土与高强混凝土组合梁相比整浇再生混凝土梁挠度降低 20%~40%;组合梁柱节点的耗能能力是一般再生混凝土梁柱节点的 1.39 倍~1.47 倍。

(3)组合再生混凝土的界面性能对组合构件和结构的性能有着重要影响,界面性能受表面粗糙度、黏合剂、混凝土龄期、混凝土强度和骨料特性的影响,凹陷界面失效荷载比光滑界面和粗糙界面两者平均值高出 16%;提高界面粗糙度时,混凝土界面抗剪强度可提高至 40%,可见界面粗糙度是影响界面抗剪强度的最重要因素。

(4)组合再生混凝土从研究到运用于实际工程还需在建造方式上进行创新,与 BIM 技术、3D 打印技术、装配式建筑和智能材料的结合是具有生态环境价值的研究方向。

参考文献:

References:

- [1] 曹元辉,王胜杰,王 勇,等.我国建筑垃圾综合利用现状及未来发展趋势[J].中国建材,2021,70(9):118-121.
CAO Yuanhui, WANG Shengjie, WANG Yong, et al. Present situation and future development trend of comprehensive utilization of construction waste in China[J]. China Building Materials, 2021, 70(9): 118-121.
- [2] 肖建庄.再生混凝土[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.
XIAO Jianzhuang. Recycled concrete[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [3] 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 Zhenping, et al. Study on compressive strength of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(12): 1558-1561.
- [4] 肖建庄,沈宏波,黄运标.再生混凝土柱受压性能试验[J].结构工程师,2006,22(6):73-77.
XIAO Jianzhuang, SHEN Hongbo, HUANG Yunbiao. Test on compression performance of recycled concrete columns[J]. Structural Engineers, 2006, 22(6): 73-77.
- [5] 刘 坚,吴城斌.再生混凝土发展现状及性能研究[J].混凝土,2018(6):148-150.
LIU Jian, WU Chengbin. Development status and performance research of recycled concrete[J]. Concrete, 2018(6): 148-150.
- [6] 肖建庄,张青天,余江滔,等.混凝土结构的新发展——组合混凝土结构[J].同济大学学报(自然科学版),2018,46(2):147-155.
XIAO Jianzhuang, ZHANG Qingtian, YU Jiangtao, et al. A novel development of concrete structures: composite concrete structures[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(2): 147-155.
- [7] 池 漪.再生骨料混凝土高强高性能化途径及其性能研究[D].长沙:中南大学,2007.
CHI Yi. Research on high strength and performance of recycled aggregate concrete[D]. Changsha: Central South University, 2007.
- [8] LAU HIU HOONG J D, LUX J, MAHIEUX P Y, et al. Determination of the composition of recycled aggregates using a deep learning-based image analysis[J]. Automation in Construction, 2020, 116: 103204.
- [9] 张锋剑,朱丽华,王浩楠,等.强化再生骨料混凝土柱抗震性能研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2022,54(1):1-10.
ZHANG Fengjian, ZHU Lihua, WANG Haonan, et al. Experimental study on seismic behavior of enhanced recycled aggregate concrete columns[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2022, 54(1): 1-10.
- [10] 杨承谓,曹 伟,赵若宇,等.再生骨料在路缘石中的应用研究[J].山东理工大学学报(自然科学版),2022,36(4):59-64.
YANG Chengxue, CAO Wei, ZHAO Ruoyu, et al. Research on the application of recycled aggregates in curbstone[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 36(4):

- 59-64.
- [11] 刘俊辉,刘炳岳,欧思华,等. 纳米二氧化硅对再生骨料混凝土性能影响的研究[J]. 材料研究与应用, 2022,16(2):228-233.
LIU Junhui,LIU Bingyue,OU Sihua,et al. Effects of nano silica additions on properties of recycled aggregate concrete[J]. Materials Research and Application, 2022,16(2):228-233.
- [12] 韩 怡,陈 怡,蒋明霞. 一种再生骨料混凝土的性能分析与评价[J]. 居舍,2022(11):43-44,70.
HAN Yi,CHEN Yi,JIANG Mingxia. Analysis and evaluation of performance of recycled aggregate concrete[J]. Housing,2022(11):43-44,70.
- [13] 陈建国,李若愚,余晓彬,等. 聚合物对再生骨料植生混凝土抗压强度及 pH 值的影响研究[J]. 混凝土, 2022(2):46-50,59.
CHEN Jianguo,LI Ruoyu,SHE Xiaobin,et al. Effect of polymer on compressive strength and pH value of recycled aggregate planting concrete [J]. Concrete, 2022(2):46-50,59.
- [14] 马 郁,张 敬,谢小元. 建筑垃圾再生粉料的基本性能试验研究[J]. 建筑科学,2017,33(1):41-43.
MA Yu,ZHANG Jing,XIE Xiaoyuan. Experimental study on the basic properties of construction waste recycled powder[J]. Building Science, 2017,33(1):41-43.
- [15] 贾艳东,李 苓,刘晓华,等. 不同粒径再生骨料混凝土性能试验分析[J]. 交通科技与经济,2009,11(5):59-61,92.
JIA Yandong,LI Ling,LIU Xiaohua,et al. Experimental study on properties of different size recycled aggregate concrete [J]. Technology & Economy in Areas of Communications,2009,11(5):59-61,92.
- [16] 刘亚萍,陈忠范. 再生混凝土的基本力学性能和应用研究[J]. 混凝土,2009(12):43-45.
LIU Yaping,CHEN Zhongfan. Research of application and basic mechanical properties on recycled concrete[J]. Concrete,2009(12):43-45.
- [17] 李旭平. 再生混凝土基本力学性能研究(Ⅱ)[J]. 建筑材料学报,2007,10(6):699-704.
LI Xuping. Study on mechanical properties of recycled aggregate concrete(Ⅱ)[J]. Journal of Building Materials,2007,10(6):699-704.
- [18] 金 莉. 再生混凝土力学性能试验研究[J]. 新型建筑材料,2006,33(7):11-13.
JIN Li. Experimental study on mechanical properties of recycled concrete [J]. New Building Materials, 2006,33(7):11-13.
- [19] 芦静夫. 再生混凝土基本力学性能及微观机理研究[D]. 南宁:广西大学,2013.
LU Jingfu. Experimental study on the basic behaviour and microstructure of recycled concrete[D]. Nanning: Guangxi University,2013.
- [20] 周静海,何海进,孟宪宏,等. 再生混凝土基本力学性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2010,26(3):464-468.
ZHOU Jinghai,HE Haijin,MENG Xianhong,et al. Basic mechanical properties of recycled concrete experimental study [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science),2010,26(3):464-468.
- [21] 李 婷. 再生骨料缺陷对再生混凝土力学性能影响的研究[D]. 北京:北京交通大学,2013.
LI Ting. Influence of defects in recycled aggregate on mechanical properties of recycled aggregate concrete [D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2013.
- [22] 陈宗平,周春恒,陈宇良,等. 再生卵石骨料混凝土力学性能及其应力-应变本构关系[J]. 应用基础与工程科学学报,2014,22(4):763-774.
CHEN Zongping,ZHOU Chunheng,CHEN Yuliang,et al. Mechanical property and strain-stress constitutive relationship of recycled pebble aggregate concrete [J]. Journal of Basic Science and Engineering,2014,22(4):763-774.
- [23] 申 健,牛荻涛,王 艳,等. 再生混凝土耐久性能研究进展[J]. 材料导报,2016,30(3):89-94,100.
SHEN Jian,NIU Ditao,WANG Yan,et al. Durability research status of recycled aggregate concrete[J]. Materials Reports,2016,30(3):89-94,100.
- [24] SILVA R V,NEVES R,DE BRITO J,et al. Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete[J]. Cement and concrete composites,2015,62:22-32.
- [25] 雷 斌,肖建庄. 再生混凝土抗碳化性能的研究[J]. 建筑材料学报,2008,11(5):605-611.
LEI Bin,XIAO Jianzhuang. Research on carbonation resistance of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials,2008,11(5):605-611.
- [26] 陈德玉,刘来宝,严 云,等. 不同因素对再生骨料混凝土抗冻性的影响[J]. 武汉理工大学学报,2011,33(5):54-58.
CHEN Deyu,LIU Laibao,YAN Yun,et al. Effect of different factors on frost resistance of recycled aggregate concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology,2011,33(5):54-58.
- [27] 杨洪生,王 帅,赵庆新. 橡胶粉改性再生骨料混凝土抗冻性研究[J]. 土木建筑与环境工程,2012,34(增1):130-134.

- YANG Hongsheng, WANG Shuai, ZHAO Qingxin. Rubber powder modified frost resistance of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(S1): 130-134.
- [28] KOU S C, POON C S. Long-term Mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash[J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 37: 12-19.
- [29] 杜 婷, 李惠强, 郭太平, 等. 再生骨料混凝土的抗氯离子渗透性试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(5): 33-36.
- DU Ting, LI Huiqiang, GUO Taiping, et al. Test study on the resistance of chloride ion penetration of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(5): 33-36.
- [30] 上官玉明, 毛高峰, 郑玉春, 等. 再生粗骨料混凝土抗氯离子渗透性能的研究[J]. 青岛理工大学学报, 2009, 30(4): 154-158.
- SHANGGUAN Yuming, MAO Gaofeng, ZHENG Yuchun, et al. Research on resistance to penetration of chloride ions into recycled coarse aggregate concrete[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2009, 30(4): 154-158.
- [31] 叶 腾, 徐毅慧, 张 锦. C25 再生骨料混凝土抗氯离子渗透性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(12): 3261-3264.
- YE Teng, XU Yihui, ZHANG Jin. Experimental study of chloride penetration resistance performance of C25 recycled aggregate concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(12): 3261-3264.
- [32] AZEVEDO F, PACHECO-TORGAL F, JESUS C, et al. Properties and durability of HPC with tyre rubber wastes[J]. Construction and Building Materials, 2012, 34: 186-191.
- [33] 肖建庄, 许向东, 范玉辉. 再生混凝土收缩徐变试验及徐变神经网络预测[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(5): 752-757.
- XIAO Jianzhuang, XU Xiangdong, FAN Yuhui. Shrinkage and creep of recycled aggregate concrete and their prediction by ANN method[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(5): 752-757.
- [34] 崔正龙, 童华彬, 路沙沙, 等. 再生粗、细骨料对混凝土透气性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(1): 143-146.
- CUI Zhenglong, TONG Huabin, LU Shasha, et al. Effect of recycled coarse and fine aggregate on air permeability of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(1): 143-146.
- [35] 杨 宁, 赵美霞. 再生骨料混凝土路面耐磨性的研究[J]. 建筑科学, 2011, 27(7): 74-77, 69.
- YANG Ning, ZHAO Meixia. Research on abrasion resistance of recycled aggregate concrete by response surface methodology[J]. Building Science, 2011, 27(7): 74-77, 69.
- [36] 蓝文武, 甘静艳, 孙 鹏, 等. 人工砂再生混凝土剪切性能试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2013, 38(4): 975-981.
- LAN Wenwu, GAN Jingyan, SUN Peng, et al. Experimental study on shear behavior of recycled concrete with artificial sand[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2013, 38(4): 975-981.
- [37] 邢 丽, 薛瑞丰, 曹 喜. 海砂海水混凝土性能研究[J]. 混凝土, 2015(11): 137-141.
- XING Li, XUE Ruifeng, CAO Xi. Performance of concrete with sea sand and sea water[J]. Concrete, 2015(11): 137-141.
- [38] XIAO J Z, ZHANG Q T, ZHANG P, et al. Mechanical behavior of concrete using seawater and sea-sand with recycled coarse aggregates[J]. Structural Concrete, 2019, 20(5): 1631-1643.
- [39] 吴 波, 计明明, 赵新宇. 再生混合混凝土及其组合构件的研究现状[J]. 工程力学, 2016, 33(1): 1-10.
- WU Bo, JI Mingming, ZHAO Xinyu. State-of-the-art of recycled mixed concrete (RMC) and composite structural members made of RMC[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(1): 1-10.
- [40] 蔡敏伟, 王卫华, 董毓利, 等. 再生块体混凝土的单轴受压试验[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2020, 41(1): 19-25.
- CAI Minwei, WANG Weihua, DONG Yu-li, et al. Experiment on uniaxial compression of compound concrete made of demolished concrete lumps and fresh concrete[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2020, 41(1): 19-25.
- [41] 金和卯. 再生块体混凝土的疲劳性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- JIN Hemao. Study on fatigue behaviors of recycled lump concrete[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [42] 余 勇. 再生块体混凝土常温及高温后力学性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- YU Yong. Mechanical properties of compound concrete containing demolished concrete lumps at room temperature and after fire exposure[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.

- [43] 熊焱,赵国伟,吴迪,等. 自密实再生块体混凝土叠合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022,43(4):114-123,133.
XIONG Yan, ZHAO Guowei, WU Di, et al. Experimental study on seismic behavior of composite shear walls filled with demolished concrete lumps and self-compacting concrete[J]. Journal of Building Structures, 2022,43(4):114-123,133.
- [44] 高林,徐国强,陈海彬,等. 大粒径再生粗骨料自密实混凝土强度试验研究[J]. 混凝土, 2013(4):49-51, 60.
GAO Lin, XU Guoqiang, CHEN Haibin, et al. Experimental studies on the strength of self-compacting concrete with large particle size of recycled coarse aggregates[J]. Concrete, 2013(4):49-51,60.
- [45] XIAO J Z, HUANG X, SHEN L M. Seismic behavior of semi-precast column with recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2012, 35:988-1001.
- [46] ZHANG Q T, XIAO J Z, ZHANG P, et al. Mechanical behaviour of seawater sea-sand recycled coarse aggregate concrete columns under axial compressive loading[J]. Construction and Building Materials, 2019,229:117050.
- [47] ZHANG Q T, XIAO J Z, ZHANG K J, et al. Mechanical behavior of seawater sea-sand recycled concrete columns confined by engineered cementitious composite under eccentric compression[J]. Journal of Building Engineering, 2022,45:103497.
- [48] ROBALO K, DO CARMO R, COSTA H, et al. Experimental study on the interface between low cement recycled aggregates concrete and ultra-high durability concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021,304:124603.
- [49] XIAO J, PHAM T, WANG P, et al. Behaviors of Semi-precast beam made of recycled aggregate concrete[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2014,23(9):692-712.
- [50] LAPKO A, GRYGO R. Improving the structural behaviour RC precast concrete beams made of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2016,22(2):234-242.
- [51] FAHMY M F M, IDRIS L K. Flexural behavior of large scale semi-precast reinforced concrete T-beams made of natural and recycled aggregate concrete[J]. Engineering Structures, 2019,198:109525.
- [52] XIAO J Z, SUN C, JIANG X H. Flexural behaviour of recycled aggregate concrete graded slabs[J]. Structural Concrete, 2015,16(2):249-261.
- [53] KHALIFA A M, MASAUD H. Structural behaviour of precast concrete sandwich panel using recycled aggregate concrete under transverse load[C]//ICACEE. Proceedings of International Conference on Advances in Civil and Environmental Engineering. Pulau Pinang, ICACEE, 2013:1-8.
- [54] XIAO J Z. Products and constructions with recycled aggregate concrete[M]// XIAO J Z. Recycled Aggregate Concrete Structures. Berlin: Springer, 2018: 569-610.
- [55] MARTHONG C, SANGMA A S, CHOUDHURY S A, et al. Structural behavior of recycled aggregate concrete beam-column connection in presence of micro concrete at joint region[J]. Structures, 2017, 11:243-251.
- [56] DING T, XIAO J Z, CHEN E C, et al. Experimental study of the seismic performance of concrete beam-column frame joints with DfD connections[J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(4): 4020031-4020036.
- [57] 张玉栋,张立群,郭强,等. 基于骨料掺配的再生混凝土界面和力学性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2018(4):99-101.
ZHANG Yudong, ZHANG Liqun, GUO Qiang, et al. Study on interface and mechanical performance of recycled concrete based adding aggregate[J]. China Concrete and Cement Products, 2018(4):99-101.
- [58] 王继娜,徐开东,李志新,等. 原生混凝土强度对再生混凝土力学性能及界面区微结构的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(1):10-14.
WANG Jina, XU Kaidong, LI Zhixin, et al. The influence of original concrete strength on mechanical properties and interface micro-structure of recycled aggregate concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2019(1):10-14.
- [59] 李文贵,肖建庄,黄靓,等. 再生混凝土界面过渡区纳观力学性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014,41(12):31-39.
LI Wengui, XIAO Jianzhuang, HUANG Liang, et al. Experimental study on mechanical properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014,41(12):31-39.
- [60] 宫尧尧,李楠,张蕾,等. 离子侵蚀对再生混凝土多重界面区(ITZ)性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(2):91-96.
GONG Yaoyao, LI Nan, ZHANG Lei, et al. Effect of

- ion erosion on interface transition zone performance of recycled concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2021(2):91-96.
- [61] 覃荷瑛,杨玉兰. 界面过渡区对再生混凝土抗氯离子渗透性能的影响[J]. 公路工程, 2016, 41(1):70-74.
QIN Heying, YANG Yulan. Influence of the interfacial transition zone on anti chloride ion permeability of recycled concrete[J]. Highway Engineering, 2016, 41(1):70-74.
- [62] 方乙涵,刘卫东,葛乃剑,等. 裹浆形式对再生混凝土性能及界面过渡区的影响分析[J]. 建筑施工, 2016, 38(11):1624-1627.
FANG Yihan, LIU Weidong, GE Naijian, et al. Impact analysis of cement mortar enveloped form on recycled concrete performance and interface transition zone[J]. Building Construction, 2016, 38(11):1624-1627.
- [63] RAY I, DAVALOS J F, LUO S W. Interface evaluations of overlay-concrete bi-layer composites by a direct shear test method[J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(3):339-347.
- [64] SANTOS D S, SANTOS P M D, DIAS-DA-COSTA D. Effect of surface preparation and bonding agent on the concrete-to-concrete interface strength[J]. Construction and Building Materials, 2012, 37:102-110.
- [65] FIGUEIRA D, SOUSA C, CALCADA R, et al. Push-off tests in the study of cyclic behavior of interfaces between concretes cast at different times[J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(1):4015101.
- [66] CEIA F, RAPOSO J, GUERRA M, et al. Shear strength of recycled aggregate concrete to natural aggregate concrete interfaces[J]. Construction and Building Materials, 2016, 109:139-145.
- [67] HU B, LI Y, LIU Y. Dynamic slant shear bond behavior between new and old concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 238:117779.
- [68] FRENZEL M, CURBACH M. Shear strength of concrete interfaces with infra-lightweight and foam concrete[J]. Structural Concrete, 2018, 19(1):269-283.
- [69] SANTOS P M D, JULIO E N B S. Factors affecting bond between new and old concrete[J]. ACI Materials Journal, 2011, 108(4):449-456.
- [70] 叶 果. 新老混凝土界面抗剪性能研究[D]. 重庆:重庆大学, 2011.
YE Guo. Study on the anti-shear behavior of bond-interface between new and old concrete[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [71] 陈子璇,肖建庄,丁 陶. 混凝土-混凝土层间界面的性能及在组合混凝土结构中的应用评述[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(7):964-974.
CHEN Zixuan, XIAO Jianzhuang, DING Tao. Review on behavior of concrete-concrete interface and its application in composite concrete structures[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(7):964-974.
- [72] 肖建庄,张 鹏,张青天,等. 海水海砂再生混凝土的基本力学性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(2):16-22.
XIAO Jianzhuang, ZHANG Peng, ZHANG Qingtian, et al. Basic mechanical properties of seawater sea-sand recycled concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(2):16-22.
- [73] 段珍华,刘一村,肖建庄,等. 混凝土建筑3D打印技术应用分析[J]. 施工技术(中英文), 2021, 50(18):15-20.
DUAN Zhenhua, LIU Yicun, XIAO Jianzhuang, et al. Practical application analysis of 3D concrete printing technology[J]. Construction Technology, 2021, 50(18):15-20.
- [74] XIAO J Z, JI G C, ZHANG Y M, et al. Large-scale 3D printing concrete technology: current status and future opportunities[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 122:104115.