

再生骨料掺配比对再生透水混凝土性能的影响

陈守开^{*1,2}, 刘新飞^{1,2}, 郭磊^{1,2}, 汪伦焰^{1,2}

(1. 华北水利水电大学 水利学院, 郑州 450045; 2. 河南省水环境治理与生态修复院士工作站, 郑州 450002)

摘要: 为研究再生骨料在透水混凝土(RPC)中的应用, 选用废弃路面素混凝土块为再生骨料来源, 设计 2 种系列, 研究再生骨料透水混凝土中再生骨料掺配问题, 即分别以粒径 9.5~19.0 mm, 再生骨料按 0%、25%、50%、75%和 100%(基准)质量替代同粒径天然骨料碎石(系列 1)和以 4.75~9.5 mm、9.5~19.0 mm 两种粒径, 再生骨料按 0:1、1:1、1:2、2:1、2:3 和 3:2 掺比(系列 2)制备 RPC, 并分析其物理、力学、透水性能及其相互关系, 得到了合理的再生骨料替代率和双粒径掺比, 在 1:1 和 2:1 掺配下能够得到较好的强度及透水性能。通过切割试块的图像化处理, 分析其孔隙分布特征和趋势, 并将平面孔隙率、等效孔径和透水系数联系起来。结果表明, 再生透水混凝土的透水能力主要取决于截面孔隙个数和面积。

关键词: 再生骨料透水混凝土; 级配调整; 替代率; 透水性; 强度; 孔隙率

中图分类号: TU528.0

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2018)06-1590-09

Influence of recycled aggregate proportion on performance of recycled pervious concrete

CHEN Shoukai^{*1,2}, LIU Xinfei^{1,2}, GUO Lei^{1,2}, WANG Lunyan^{1,2}

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. Water Environment Governance and Ecological Restoration Academician Workstation of He'nan Province, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In order to study the application of recycled aggregate in water permeable concrete, two series of researches on the recycled aggregate concrete made from waste pavement concrete were designed to study the influence of the proportion of recycled aggregates in recycled pervious concrete(RPC). That is, the recycled aggregates with particle size of 9.5~19.0 mm replaced the same size natural aggregate by 0%, 25%, 50%, 75% and 100% (standard) quality, respectively(series 1). And RPC was designed by two kinds of particle size aggregates with 4.75~9.5 mm, 9.5~19.0 mm according to the ratio of 0:1, 1:1, 1:2, 2:1, 2:3 and 3:2(series 2). With this basis, its physical, mechanical, water permeability and their relationship were analyzed, and the reasonable rate of recycled aggregate and double particle size ratio were obtained. In the 1:1 and 2:1 blending can get better strength and water permeability. The pore distribution characteristics and trends were analyzed by the image processing of the cutting test block, and the plane porosity, equivalent pore size and water permeability coefficient were correlated. The results show that the number and area of cross-section pores play a key role in the permeable capacity of recycled pervious concrete.

Keywords: recycled aggregate pervious concrete; gradation modification; substitution rate; water permeability; strength; porosity

近年来, 城市化发展不断加快, 我国每年因拆除而产生的建筑垃圾达到 1.5×10^{12} kg 以上, 可利

用率却不足 5%^[1], 全国各省市也正在完善建筑垃圾的处理和利用, 由此可见, 建筑垃圾资源化利用

收稿日期: 2017-11-17; 录用日期: 2018-01-23; 网络出版时间: 2018-02-08 16:42

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180207.003>

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51309101); 国家自然科学基金面上项目(51679092); 河南省重大科技类项目(172102210372)

通讯作者: 陈守开, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为混凝土材料试验及水工混凝土结构数值仿真 E-mail: man200177@163.com

引用格式: 陈守开, 刘新飞, 郭磊, 等. 再生骨料掺配比对再生透水混凝土性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(6): 1590-1598.

CHEN S K, LIU X F, GUO L, et al. Influence of recycled aggregate proportion on performance of recycled pervious concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(6): 1590-1598 (in Chinese).

已成为重点^[2-3]。利用固体废弃物经处理后可成为骨料进行二次利用, 这与传统的堆放、填埋相比, 不仅将建筑垃圾资源化利用, 而且还能保护环境^[4]。通过利用部分或全部再生骨料替代天然骨料, 并与水泥、水及外加剂拌制而成的透水混凝土称之为再生透水混凝土(Recycled pervious concrete, RPC), 又称再生无砂混凝土^[5]。RPC继承了普通透水混凝土的高透水性、高耐用性和高散热性, 有效缓解城市内涝和径流污染的负荷, 在北美、欧洲的人行道附近及停车场得到广泛使用^[6-9]。

Guneyisi E 等^[10]设定 0.27 和 0.32 两种水灰比, 研究了不同再生骨料替代率(25%、50%、75%和 100%)对 RPC 的影响, 并利用 OLM-ANOVA 统计方法对其性能进行了评估, 结果表明, 随着再生骨料替代率增加, RPC 强度先增大后降低, 渗透系数逐渐增大, 且相同替代率下的 RPC 透水性能随着水灰比变大而增大。Sata V 等^[11]利用混凝土构件和粘土砖两种再生骨料制备 RPC, 研究了高钙粉煤灰和 Na_2SiO_3 、 NaOH 溶液对 RPC 的影响, 当 NaOH 溶液浓度为 15%~20% 时能够提高 RPC 抗压和劈拉强度, 但低于普通透水混凝土。孙家瑛和梁山^[12]研究了 RPC 的物理力学性能和耐久性能, 指出随着骨料粒径增大, 抗压和抗折强度均降低, 透水性能增加, 路用性能良好, Sriravindrarah R 等^[13]得出了一致的结论。严捍东^[14]通过优化配合比参数, 得到抗压强度为 20 MPa 且具有良好透水性能的再生骨料透水混凝土路面砖。朱平华等^[15]研究了水灰比、聚丙烯纤维和矿渣对 RPC 在道路上的应用性能。本文通过试验和理论分析, 以 9.5~19.0 mm 再生骨料为基准, 研究质量替代率和双粒级比例对 RPC 物理、力学及透水性能的影响, 为 RPC 中再生骨料合理掺配提供参考, 并对两种不同粒径的再生骨料不同掺比进行了研究。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

水: 自来水; 水泥: P. C 42.5 复合硅酸盐水

泥, 河南丰博天瑞水泥有限公司, 28 天抗压和劈拉强度为 49.6 MPa 和 8.6 MPa; 天然粗骨料(Natural coarse aggregate, NCA): 粒径为 9.5~19.0 mm 的碎石, 主要指标如表 1 所示, 各项指标满足标准 GB/T 25177—2010^[16]和 JGJ/T 240—2011^[17]; 再生粗骨料(Recycled coarse aggregate, RCA): 选用废弃路面素混凝土块, 经人工锤石并采用 Y132S-4 型颚式破碎机(上海德中电机有限公司)破碎, 后筛选出粒径为 9.5~19.0 mm 和 4.75~9.5 mm 两种粒级的 RCA^[18-19], 再生骨料的物理特性见表 1, 制备流程见图 1。粒径为 9.5~19.0 mm 的 RCA 的表观密度和堆积密度比 NCA 低, 含水率和压碎指标高于 NCA, 其中 10 min 和 24 h 吸水率是 NCA 的 4 倍以上, 与现有研究一致^[20]。由于再生骨料经破碎筛分得到, 表面并未有太多的杂质, 只有一层稳定的水泥砂浆, 因此 RCA 的含泥量比 NCA 略低, 但坚固性不如 NCA。再生骨料的各项性能指标符合标准 CJJ/T 253—2016^[21]要求, 可以用作 RPC 的制备。

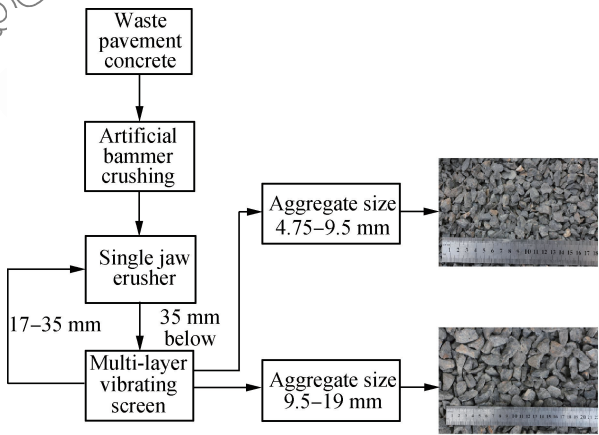


图 1 再生粗骨料(RCA)制备流程

Fig. 1 Recycled coarse aggregate (RCA) preparation process

1.2 配合比

为研究再生骨料替代率和双粒级对 RPC 性能的影响, 试验设计两个系列, 配合比见表 2。两个系列均以水灰比 0.3、再生骨料粒径 9.5~

表 1 混凝土中再生粗骨料(RCA)和天然粗骨料(NCA)基本性能

Table 1 Basic properties of recycled coarse aggregate (RCA) and natural coarse aggregate (NCA)

Type of aggregate	Nominal size/mm	Apparent density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Amount of mud/%	Dense bulk density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Water content/%	10 min or 24 h water absorption/%	Crushing index/%
NCA	9.5—19.0	2 727	0.78	1 599	0.20	0.13—0.20	9.53
RCA	9.5—19.0	2 609	0.18	1 381	4.23	0.60—0.95	15.54
RCA	4.75—9.5	2 559	0.25	1 230	2.53	3.73—4.20	22.70

表 2 再生透水混凝土(RPC)配合比
Table 2 Mix proportions of recycled pervious concrete (RPC)

Name	Sample code	Replacement rate/%	Fine and coarse aggregate mass ratio	Mix proportion/(kg·m ⁻³)				Water
				Cement	RCA		NCA	
					4.75—9.5 mm	9.5—19.0 mm	9.5—19.0 mm	
Series1	RPC0	0	0 : 1	327.59	—	0	1 474.14	98.28
	RPC25	25	0 : 1	327.59	—	368.53	1 105.60	98.28
	RPC50	50	0 : 1	327.59	—	737.07	737.07	98.28
	RPC75	75	0 : 1	327.59	—	1 105.60	368.53	98.28
Standard	RPC-st	100	0 : 1	327.59	—	1 474.14	—	98.28
Series2	RPC 1-1	100	1 : 1	327.59	737.07	737.07	—	98.28
	RPC 1-2	100	1 : 2	327.59	491.38	982.76	—	98.28
	RPC 2-1	100	2 : 1	327.59	982.76	491.38	—	98.28
	RPC 2-3	100	2 : 3	327.59	589.66	884.48	—	98.28
	RPC 3-2	100	3 : 2	327.59	884.48	589.66	—	98.28

Notes: RCA—Recycled coarse aggregate; NCA—Natural coarse aggregate.

19.0 mm(单粒级)和 100% 替代的透水混凝土为基准。系列 1 对再生骨料粒径 9.5~19.0 mm 按质量以 0%、25%、50%、75% 和 100%(基准)替代天然骨料。系列 2 包含再生骨料两种粒径 4.75~9.5 mm(细粒级)和 9.5~19.0 mm(粗粒级)按照 1 : 1、1 : 2、2 : 1、2 : 3 和 3 : 2 的掺量比例配置。

1.3 试验方法

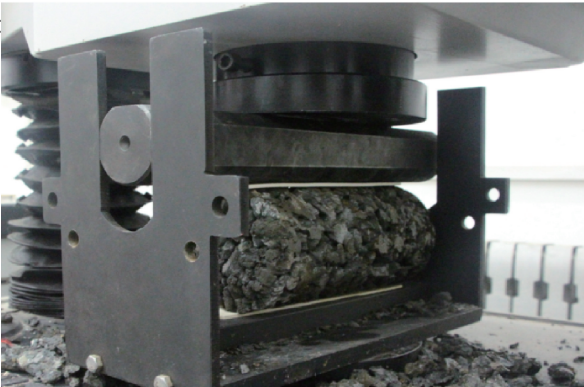
试件尺寸包括尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体和尺寸为 Φ100 mm×200 mm 的圆柱体,前者用于测试孔隙率和透水性能,后者用于测试抗压强度和劈拉强度。试件采用 SJD60 型单卧轴强制式混凝土搅拌机(上海东星建材有限公司)拌制,两次装料振动台振实,试件成型 1 天后脱模并放入标准养护室养护至 28 天。

孔隙率及透水性能试验参照标准 CJJ/T 253—2016^[21]。透水系数通过自制透水装置(图 2),采用 200 mm 固定水头法进行试验,试验前对试块四面采用水泥抹面密封。每组 3 个试件,每个试件测 3

次,取平均值作为该组的透水系数。强度试验(图 3)依据标准 ASTM C39/C39M—2010^[22],由 WAW-1000 型微机控制电液伺服万能试验机(上海华龙测试仪器股份有限公司)完成,每组 3 个试件,取其平均值作为该组试件强度的代表值。



(a) Compressive strength test



(b) Splitting tensile strength test

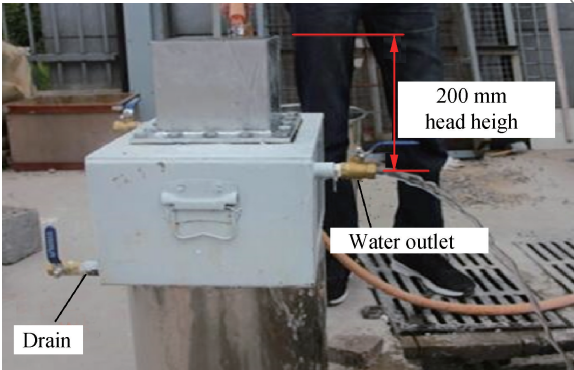


图 2 透水装置

Fig. 2 Permeable device

图 3 RPC 抗压与劈裂抗拉强度试验
Fig. 3 Compression and splitting tensile strength test of RPC

2 结果与分析

2.1 再生骨料替代率对 RPC 性能的影响

2.1.1 RPC 强度和密度

图 4 和图 5 分别为系列 1 RPC 抗压、劈裂抗拉强度和密度与替代率的关系。由图 4 可知, 采用适量 RCA 替代 NCA 能使透水混凝土的强度提高, 这与当前已有研究一致^[20, 23], 如 25% 替代率时, 透水混凝土的抗压强度、劈拉强度和密度由无替代时的 6.24 MPa、1.60 MPa 和 1 863 kg/m³ 提高至 8.85 MPa、1.85 MPa 和 1 912 kg/m³, 这与 Cai H Y 等^[24]、Güneyisi E 等^[10] 和肖建庄等^[25] 的研究成果一致。产生这一现象的主要原因是, (1) 由于 RPC 中 RCA 吸水率大而导致水灰比下降, 并且吸水储水量大, 待到混凝土水化时在外界压力作用下逐渐释放, 使混凝土充分水化而提高其自身强度^[26-27]; (2) 与普通透水混凝土相比, 再生骨料与新拌水泥浆之间具有更好的咬合力和相容性, 且彼此存在发生化

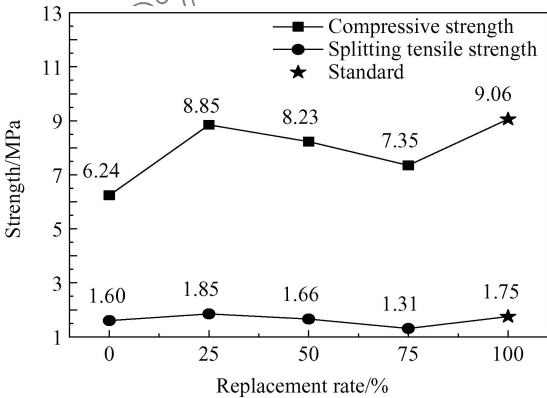


图 4 系列 1 RPC 抗压、劈裂抗拉强度与替代率的关系

Fig. 4 Relationship between compression,

splitting tensile strength and replacement rate of series 1 RPC

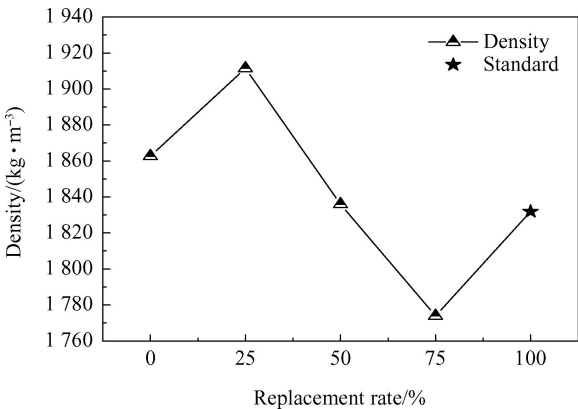


图 5 系列 1 RPC 密度与替代率的关系

Fig. 5 Relationship between density and

replacment rate of series1 RPC

学反应的可能, 这使 RCA 和水泥浆之间的结合面得到加强, 变得更密实, 能达到更好的填充效果, 并能形成更稳定的受力骨架。此外, 再生骨料表面附着粗糙的砂浆所产生的内摩擦力也较大, 因此再生骨料适量取代天然骨料能够提高 RPC 强度。

当继续增加替代水平, 强度逐渐降低, 如 50% 和 75% 替代率抗压强度降至 8.23 MPa 和 7.35 MPa。当透水混凝土完全采用再生骨料(100%替代率)时, 抗压强度性能优于 25% 替代率, 达到 9.06 MPa, 但劈拉强度较低(1.75 MPa)。同时, 强度这一变化规律与密度保持一致。由此可见, 透水混凝土的强度并不是由骨料强度所决定(若是由骨料强度决定, 理论上应呈现替代率越高, 强度越低的规律^[28]), 还应结合孔隙特征和密实度等来综合考虑。图 6 为系列 1 RPC 孔隙率和透水系数与替代率的关系。通过分析不同替代水平下的孔隙率、强度与密度的关系发现, 25% 替代率时透水混凝土孔隙率比无替代(0%)、50% 和 75% 替代率小且密度最大, 而 100% 替代率时孔隙率最小且密度也呈现增加的趋势, 反映出试件孔隙率小、密实度高和抗压强度提高的现象。

再生骨料在制备过程中会由于外力造成损伤, 尤其表面老的水泥砂浆会出现许多细微裂缝, 致使骨料硬度较低, 但另一方面再生骨料表面残留有水泥浆且表面相对粗糙, 使在成型和后期养护过程中与水能更大程度地发生水化反应, 骨料与水泥基之间的黏结也更牢固, 黏聚力提高。因此, 100% 替代水平下透水混凝土内部骨料和水泥基之间能够形成相对稳定的骨架, 其黏结强度更高。

2.1.2 RPC 透水系数和孔隙率

在不同再生骨料替代水平下, 密度随着孔隙率的降低而增大, 密度和孔隙率之间的关系符合一般规律。由图 6 可知, 在不同再生骨料替代水平下, 透水系数变化各不相同, 即 0%~25% 替代水平时透水系数增大, 替代率 25% 时达到最大值, 为 4.4 mm/s, 25%~50% 时透水系数减小, 50%~75% 时增大, 75%~100% 时则又减小, 100% 时最小, 为 3.28 mm/s, 整体上随 RCA 含量增加而减小, 但实际数值相差不大。这是由于决定透水混凝土透水性能的主要因素是有效孔隙率, 而再生骨料掺量并不能决定透水混凝土的透水性能^[23], 换言之, 本文实测 25% 替代率的透水系数最大是由于该掺量下试件所包含的有效孔隙率较高所致(尽管其孔

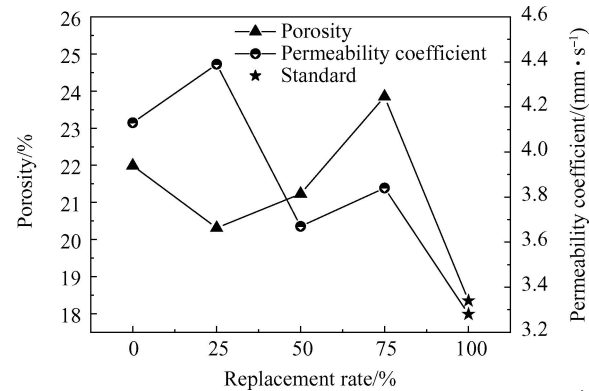


图 6 系列 1 RPC 孔隙率和透水系数与替代率的关系
Fig. 6 Relationship between porosity, permeability coefficient and replacement rate of series 1 RPC

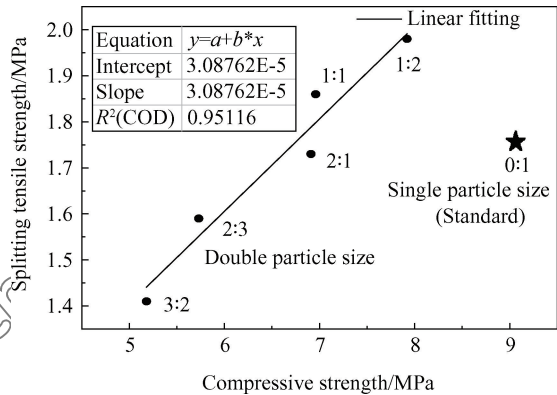


图 8 系列 2 RPC 抗压强度与劈拉强度线性关系
Fig. 8 Linear relationship between compressive strength and splitting tensile strength of series 2 RPC

隙率相对不大), 已有试验成果^[23]也证明了这一点。

2.2 双粒级对 RPC 性能的影响

2.2.1 RPC 密度、抗压强度和劈拉强度

图 7 为系列 2 RPC 强度、密度与级配的关系, 可知, 在不同再生骨料替代水平下, 双粒级 RPC 抗压强度小于单粒级, 即全部采用 9.5~19.0 mm 再生骨料的透水混凝土抗压强度最大, 为 9.06 MPa。在调整粒级后, 随着 4.75~9.5 mm 再生骨料增加, 试件抗压和劈拉强度呈现减小、增大反复的变化规律, 并与其密度对应。双粒级比例 1:2 时抗压和劈裂抗拉强度最大, 分别为 7.92 MPa 和 1.98 MPa, 相比单粒级(基准), 抗压强度下降 13%, 劈拉强度增加 13%。此外, 掺配比例为 1:1 和 2:1 时的强度比 2:3 和 3:2 高约 20%~35%。不考虑其他因素, 两种粒级含量对强度的影响主要取决于密实度, 密度越大强度也越高, 比例在 1:2、1:1 和 2:1 时有利于保证 RPC 的强度。另外, 由图 8 中双粒级 RPC 劈拉强度随抗压强度线

性变化关系可知, 其中配比为 3:2 时抗压强度和劈拉强度最小, 分别仅为 1:2 时的 65.6% 和 72.5%。

2.2.2 RPC 透水系数和孔隙率

图 9 为系列 2 RPC 孔隙率、透水系数与级配的关系。可知, 双粒级 RPC 孔隙率随着细粒级 (4.75~9.5 mm) 再生骨料所占比例的增加而增大, 由于两种粒级不同掺量比例的 RPC 密实性对孔隙率也有一定的影响, 总体上孔隙随密度的减小而增大。再生骨料构成了 RPC 的结构骨架, 颗粒级配对透水性能起着决定性因素^[29], 就双粒级再生骨料来说, 同等体积下的 RPC 试块, 再生骨料粒径越小, 其比表面积越大, 所形成的骨料颗粒之间接触点数量多, 也会减少水泥对骨料的包裹, 造成孔隙增大。通过对几种不同掺比下的比表面积理论计算^[30], 比表面积随着细粒级再生骨料所占比例的增加而增大。掺比为 2:1 时最大为 0.313, 1:2 时最小为 0.28。根据粗骨料间断级配原理^[29], 相邻两级粒径之比为 6 时, 直径小的一级骨料正好填充

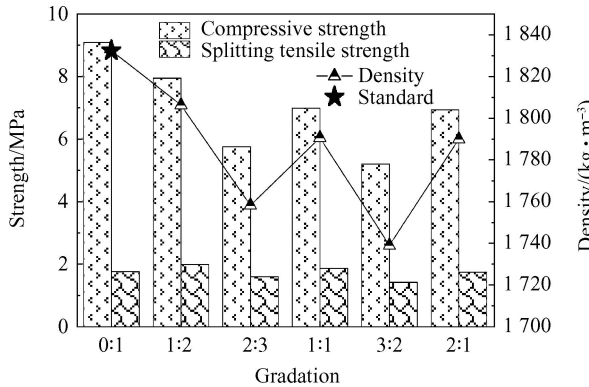


图 7 系列 2 RPC 强度、密度与级配的关系
Fig. 7 Relationship between strength, density and gradation of series 2 RPC

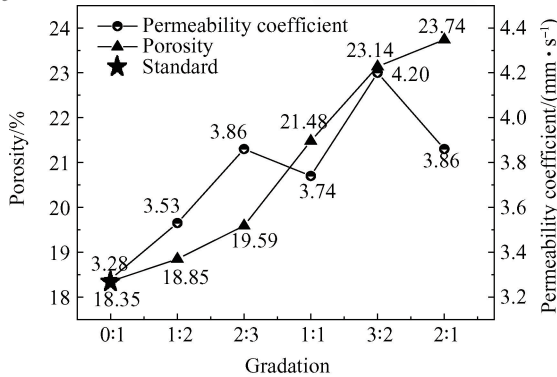


图 9 系列 2 RPC 孔隙率、透水系数与级配的关系
Fig. 9 Relationship between porosity, permeability coefficient and gradation of series 2 RPC

大一级骨料的空隙, 本试验采用4.75~9.5 mm 和 9.5~19.0 mm 两种粒径再生骨料连续级配, 相邻两级粒径之比为 2, 两种再生骨料粒径相差不大, 而只有相邻两级再生骨料粒径比大时, 才能使骨料之间十分靠近, 得到相对较小的孔隙率, 因此直径小的骨料并不能很好地填充大一级骨料的空隙, 并且测定 4.75~9.5 mm 和 9.5~19.0 mm 两种粒径再生骨料的形状指数^[31]分别为 0.173 和 0.247, 由此可见两种粒级的再生骨料的颗粒形状都比较接近针片状, 9.5~19.0 mm 粒径的再生骨料颗粒形状优于 4.75~9.5 mm 粒径的再生骨料颗粒形状, 说明了两种粒级的再生骨料结合并不密实, 会出现较多的孔隙, 再加上再生骨料表面附着的水泥砂浆在破碎时会出现裂纹, 存在着细小的孔隙, 参照“可蒸发水含量法”^[32-33]和孔隙率试验方法, 对细粒级和粗粒级两种再生骨料自身孔隙率测定, 分别为 28% 和 3%, 由此可见 4.75~9.5 mm 骨料的孔隙率远大于 9.5~19.0 mm 粒径的骨料, 因此孔隙率会随着细粒级的增多而增大。

由图 9 可知, 单粒级(基准)孔隙率最小, 为 18.5%, 双粒级 RPC 为 2:1 时最大, 为 23.1%, 是最小孔隙率的 1.3 倍。与不同替代水平透水混凝土相同, 双粒级 RPC 透水性也取决于试件连通孔隙(有效孔隙)的数量和特征^[23, 34], 并与其密度和孔隙率变化相匹配, 其中密度小、孔隙率大时, 透水系数大, 如比例 3:2 的透水系数最大, 为 4.2 mm/s; 密度大、孔隙率小时, 透水系数也小, 如单粒级(基准)、比例 1:2 时透水系数较小。但比例在 1:1 和 2:1 时, 与其前后(比例为 2:3 和 3:2)透水系数相比, 并未随细粒级再生骨料的增加或减小而升高或降低。这是由于按 2:3 或 3:2 掺配成形后的试块密实度减小, 出现了更多的有效孔隙, 使 RPC 孔隙率提高, 同时增大了过水面透过的水量, 透水系数也随之增加, 但当两种骨料按 1:1 或 2:1 掺配时, 细粒级的再生骨料则又会阻挡部分连通孔隙, 形成更多的半封闭孔隙或封闭孔隙, 从而减小了有效连通孔隙^[34], 造成透水系数降低的现象。

为进一步解释这一现象, 对不同配比的试块进行切割, 并对切割后的试块表面进行灰度化处理, 如图 10 所示。图中白色区域代表孔隙, 灰色区域代表骨料和浆体。通过计算白色区域面积, 换算成等效直径的圆, 取其直径作为等效孔径^[35]。图 11 为按

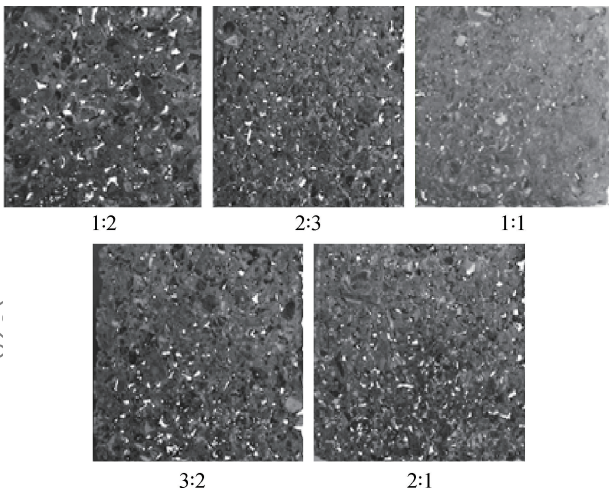


图 10 双粒级 RPC 截面图像灰度化处理
Fig. 10 Gray level processing of double particle size RPC section images

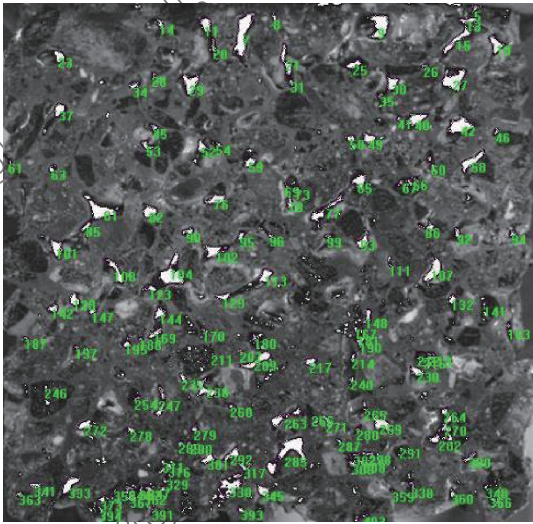


图 11 双粒级为 1:2 的 RPC 截面孔隙分布
Fig. 11 Cross section pore distribution of double particle size of 1:2 RPC

1:2 掺配的双粒级 RPC 截面孔隙分布情况(以此为例, 其他掺配比类似)。截面孔隙的大小分布不均, 图上所标数字为此区域孔隙面积(单位为像素), 通过单位换算, 进一步计算出平面孔隙率, 结果见表 3。可以看出, 平面孔隙率随细粒级的增加而增大, 同时截面孔隙面积也相应的增加, 这与实测孔隙率的趋势一致。虽然孔隙率增大, 但是在 1:1 和 2:1 掺配时透水系数减小, 在试件内部真实连通孔隙不确定的情况下, 结合孔隙的个数、截面孔隙面积和等效孔径分析: 在 1:1 时, 孔隙率和平面孔隙率虽然没有降低, 但孔隙个数较 2:3 减少了 18.3%, 平均等效孔径相差不大, 而透水系数

表 3 系列 2 RPC 平面孔隙率和等效孔径
Table 3 Plane porosity and equivalent aperture of series 2 RPC

Fine and coarse aggregate ratio mass	Number of pore	Cross section pore area/mm ²	Plane porosity/%	Equivalent aperture/mm			≤Number(fraction) of pores in the average pore size
				Maximum	Minimum	Average	
1 : 2	148	788.89	3.51	7.73	0.99	2.55	92(62.0%)
2 : 3	284	985.55	4.38	6.46	0.85	1.94	183(64.4%)
1 : 1	232	999.51	4.44	7.34	1.03	2.20	150(64.7%)
3 : 2	316	1 001.14	4.45	6.64	0.84	3.17	285(90.2%)
2 : 1	582	1 414.01	6.28	6.95	0.65	1.66	386(66.3%)

主要取决于孔隙大小和孔隙个数，因此孔隙大小变化不大时，孔隙个数就成了关键因素，因此在掺配比例 1 : 1 的透水系数比 2 : 3 的小。在 20 MPa 时，孔隙个数和平面孔隙面积都达到最大值，但是平均等效孔径只有 1.66 mm，在系列 2 中为最低，而且此级配细粒级最多，密实性好，使连通孔隙减少，透水系数比 3 : 2 有较大程度减小。

就透水性而言，掺加 4.75~9.5 mm 再生骨料(细级料)能够提高 RPC 的透水系数，其中掺配比为 2 : 1 的双粒级 RPC 能够在较高强度的基础上，保证良好的透水性。

3 结 论

本文以废弃路面素混凝土块为再生骨料来源、以全部由单粒级 9.5~19.0 mm 再生骨料替代天然骨料制备的透水混凝土为基准，研究了再生透水混凝土(Recycled pervious concrete, RPC)中再生骨料掺配问题，得出的主要结论如下。

(1) 在再生骨料替代天然骨料方面，不考虑完全替代情形(基准)时，再生骨料 25% 替代水平的透水混凝土抗压强度、劈拉强度及透水性能均较好，分别为 8.85 MPa、1.85 MPa 和 4.4 mm/s，且与基准相比，只有抗压强度略低(基准抗压强度 9.06 MPa)。

(2) 在双粒级掺比方面，随着细粒级(4.75~9.5 mm)再生骨料的增加，RPC 抗压和劈拉强度先减小后增大，细骨料与粗骨料粒级掺比为 1 : 2 时抗压和劈裂抗拉强度最大，分别为 7.92 MPa 和 1.98 MPa，但透水系数最低；透水系数则是按 3 : 2 掺比时最大，为 4.2 mm/s，但强度最低。综合来看，两种粒级按 1 : 1 或 2 : 1 进行掺配能够同时得到较好的强度及透水性能。

(3) 决定 RPC 透水性能的主要因素是有效孔隙率，双粒级可提高 RPC 透水系数约 7%~28%。通过观察试块截面图像，双粒级 RPC 截面孔洞的

大小分布不均，整体呈现正态分布的趋势，平面孔隙率、孔隙个数和截面孔隙面积随 4.75~9.5 mm 再生骨料(细级料)的增加而提高，其中截面孔隙个数和面积对 RPC 的透水能力起到关键作用。

参考文献：

[1] 余荣华. 建筑垃圾再生路有多长[N]. 人民日报, 2016-04-08(006).
YU R H. How long is the construction waste recycling road [N]. People's Daily, 2016-04-08(006) (in Chinese).
[2] 李浩, 翟宝辉. 中国建筑垃圾资源化产业发展研究[J]. 城市发展研究, 2015, 22(3): 119-124.
LI H, ZHAI B H. Policy research on promoting recycling construction waste in China [J]. Urban Development Research, 2015, 22(3): 119-124 (in Chinese).
[3] 左亚. 中国建筑垃圾资源化利用的现状研究及建议[D]. 北京: 北京建筑大学, 2015: 16-45.
ZUO Y. Research of Chinese construction waste resource utilization and recommendations[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2015: 16-45 (in Chinese).
[4] 孙金坤, 欧连军, 马海萍, 等. 建筑垃圾资源化处理工艺改进研究[J]. 环境工程, 2016, 34(12): 103-107.
SUN J K, OU X J, MA H P et al. Research on the improvement of construction waste recovery process[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(12): 103-107 (in Chinese).
[5] 张松涛, 贾欣悦, 宋卓, 等. 无砂再生透水混凝土配合比设计[J]. 混凝土与水泥制品, 2016(12): 6-12.
ZHANG S T, JIA X Y, SONG Z, et al. Mix proportion design of sand free recycled pervious concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2016(12): 6-12 (in Chinese).
[6] 李秋实, 何东坡. 天然与再生集料透水混凝土对比试验[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(1): 89-94.
LI Q S, HE D P. Comparative study of porous concretes using natural and recycled aggregates[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(1): 89-94 (in Chinese).
[7] HUANG B, WU H, SHU X, et al. Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete[J]. Construction & Building Materials, 2010, 24(5):

- 818-823.
- [8] SHU X, HUANG B, WU H, et al. Performance comparison of laboratory and field produced pervious concrete mixtures[J]. *Construction & Building Materials*, 2011, 25(8): 3187-3192.
- [9] BHUTTA MAR, TSURUTA K, MIRZA J. Evaluation of high-performance porous concrete properties[J]. *Construction & Building Materials*, 2012, 31(6): 67-73.
- [10] GUNEYISI E, GESOGLU M, KAREEM Q, et al. Effect of different substitution of natural aggregate by recycled aggregate on performance characteristics of pervious concrete[J]. *Materials and Structures*, 2016, 49(1): 521-536.
- [11] SATA V, WONGSA A, CHINDAPRASIRT P. Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates[J]. *Construction & Building Materials*, 2013, 42(9): 33-39.
- [12] 孙家瑛, 梁山. 再生混凝土集料透水混凝土性能研究及应用[J]. *建筑材料学报*, 2012, 35(6): 747-750.
- SUN J Y, LIANG S. Performance of recycled concrete aggregate porous cement concrete and its application[J]. *Journal of Building Materials*, 2012, 15(6): 747-750 (in Chinese).
- [13] SRIRAVINDRARAJAH R, WANG N D H, LAI J W E. Mix design for pervious recycled aggregate concrete[J]. *International Journal of Concrete Structures & Materials*, 2012, 6(4): 239-246.
- [14] 严捍东. 再生骨料混凝土配制透水路面砖[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2006, 27(1): 54-57.
- YAN H D. Pervious pavement bricks made of recycled aggregate concrete[J]. *Journal of Huqiao University(Natural Science)*, 2006, 27(1): 54-57 (in Chinese).
- [15] 朱平华, 高兴, 杨江金, 等. 路用透水型彩色再生混凝土的性能研究[J]. *混凝土*, 2013(5): 112-114.
- ZHU P H, GAO X, YANG J J, et al. Study on properties of permeable color recycled concrete[J]. *Concrete*, 2013(5): 112-114 (in Chinese).
- [16] 中华人民共和国国家标准. 混凝土用再生粗骨料: GB/T 25177—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- People's Republic of China National Standard. Recycled coarse aggregate for concrete: GB/T 25177—2010[S]. Beijing: Standard Press of China, 2010 (in Chinese).
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 再生骨料应用技术规程: JGJ/T 240—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of People's Republic of China. Technical specification for application of recycled aggregate: JGJ/T 240—2011[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2011 (in Chinese).
- [18] 郭磊, 薛志龙, 陈守开, 等. 基于预拌浓浆法的再生骨料混凝土性能试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(6): 950-955.
- GUO L, XUE Z L, CHEN S K, et al. Experimental study on the performance of recycled aggregate concrete based on pre-mixing thick cement paste method[J]. *Journal of Building Materials*, 2017, 20(6): 950-955 (in Chinese).
- [19] 陈爱玖, 王静, 马莹. 钢纤维橡胶再生混凝土的抗冻性试验[J]. *复合材料学报*, 2015, 32(4): 933-941.
- CHEN A J, WANG J, MA Y. Test of frost resistance for steel fiber rubber recycled concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32(4): 933-941 (in Chinese).
- [20] 李佳彬, 肖建庄, 孙振平. 再生粗骨料特性及其对再生混凝土性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2004, 7(4): 390-395.
- LI J B, XIAO J Z, SUN Z P. Properties of recycled coarse aggregate and its influence on recycled concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2004, 7(4): 390-395 (in Chinese).
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 再生骨料透水混凝土应用技术规程: CJJ/T 253—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of People's Republic of China. Technical specification for application of recycled aggregate pervious concrete: CJJ/T 253—2016[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2016 (in Chinese).
- [22] ASTM. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens: ASTM C39/C39M—2010[S]. Philadelphia: ASTM, 2010.
- [23] 朱金春, 杨鼎宜, 张晓欢, 等. 再生透水混凝土中再生骨料掺量问题的研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2014(10): 6-11.
- ZHU J C, YANG D Y, ZHANG X H, et al. Study on the content of recycled aggregate in recycled pervious concrete[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2014(10): 6-11 (in Chinese).
- [24] CAI H Y, ZHANG M, DANG L B. Experimental study on compressive strength of recycled aggregate concrete with different replacement ratios[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2013, 174-177: 1277-1280.
- [25] 肖建庄, 林壮斌, 朱军. 再生骨料级配混凝土抗压强度的影响[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2014, 46(4): 154-160.
- XIAO J Z, LIN Z B, ZHU J. Effects of recycled aggregates' gradation on compressive strength of concrete[J]. *Journal of Sichuan university (Engineering Science Edition)*, 2014, 46(4): 154-160 (in Chinese).
- [26] 姚宇峰, 金宝宏, 章海刚, 等. 再生粗骨料替代率对再生混凝土力学性能影响[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2016, 41(4): 1187-1193.
- YAO Y F, JIN B H, ZHANG H G, et al. Influence of replacement rate of recycled coarse aggregate on mechanical properties of recycled concrete[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2016, 41(4): 1187-1193 (in Chinese).

- [27] 陈守开, 杨晴, 刘秋常, 等. 再生骨料透水混凝土强度及透水性能试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 141-146.
CHEN S K, YANG Q, LIU Q C, et al. Experiment on strength and permeability of recycled aggregate pervious concrete[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(15): 141-146 (in Chinese).
- [28] 李九苏, 肖汉宁, 龚建清. 再生骨料水泥混凝土的级配优化试验研究[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(1): 105-110.
LI J S, XIAO H N, GONG J Q. Laboratory research on grading optimization of recycled aggregate concrete[J]. Journal Of Building Materials, 2008, 11(1): 105-110 (in Chinese).
- [29] 孟宏睿, 陈丽红, 薛丽皎. 透水混凝土的配制[J]. 建筑技术, 2005, 36(1): 29-31.
MENG H R, CHEN L H, XUE L J. Preparation of pervious concrete[J]. Architecture Technology, 2005, 36(1): 29-31 (in Chinese).
- [30] 周云麟. 混凝土骨料比表面积的测定与计算[J]. 混凝土, 1984(2): 50-53.
ZHOU Y L. Measurement and calculation of specific surface area of concrete aggregate[J]. Concrete, 1984(2): 50-53 (in Chinese).
- [31] 徐飞. 粗骨料颗粒形状评定方法的研究[J]. 扬州大学学报 (自然科学版), 2002, 5(2): 61-63.
XU F. The study on evaluating method of grains shape of coarse aggregate[J]. Journal of Yangzhou University(Natural Science Edition), 2002, 5(2): 61-63 (in Chinese).
- [32] 张剑波, 吴勇生, 孙可伟, 等. 再生骨料混凝土孔隙结构的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2011, 30(1): 239-244.
ZHANG J B, WU Y S, SUN K W, et al. Experiment and study on pore structure of recycled aggregate concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2011, 30(1): 239-244 (in Chinese).
- [33] NGALA V T, PAGE C L. Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes[J]. Cement & Concrete Research, 1997, 27(7): 995-1007.
- [34] 许燕莲, 李荣炜, 余其俊, 等. 多孔混凝土孔隙的表征及其与渗透性的关系研究[J]. 混凝土, 2009(3): 16-20.
XU Y L, LI R W, YU Q J. Pore representation and the relationship between pore and permeability of the porous concrete[J]. Concrete, 2009(3): 16-20 (in Chinese).
- [35] 蒋昌波, 刘易庄, 肖政. 多孔混凝土内部孔隙特征研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(4): 1105-1110.
JIANG C B, LIU Y Z, XIAO Z. Study on the characteristic of pore in porous concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(4): 1105-1110 (in Chinese).