

再生骨料透水混凝土配合比优化研究

余志辉¹ 张光磊² 刘文化² 夏涛¹ 张勇¹

1.纳思同(江苏)高科技发展有限公司,江苏 无锡 214000

2.江南大学 纤维工程与装备技术学院,江苏 无锡 214000

[摘要]本文通过正交试验法,探究水胶比(A)、减水剂掺量(B)、增稠剂掺量(C)和缓凝剂掺量(D)对RAPC性能的影响。结果表明:(1)力学性能最优配比为A=0.15、B=1.4%、C=0.3%、D=0.4%,其中减水剂影响最显著;(2)渗透性能最优配比为A=0.14、B=1.6%、C=0.3%、D=0.5%,增稠剂起主导作用;(3)设计孔隙率=20%时,透水系数可保持1.5 mm/s以上且满足C20强度要求。研究为RAPC的工程应用提供了配比优化依据。

[关键词]再生骨料透水混凝土;正交试验;配合比优化

DOI: 10.33142/ucp.v2i4.17314

中图分类号: TU528

文献标识码: A

Optimization of Mixing Proportion of Recycled Aggregate Pervious Concrete

YU Zhihui¹, ZHANG Guanglei², LIU Wenhua², XIA Tao¹, ZHANG Yong¹

1. Leistung (Jiangsu) High-tech Development Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu, 214000, China

2. School of Fiber Engineering and Equipment Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu, 214000, China

Abstract: In this paper, the effects of water-cement ratio (A), water reducer dosing (B), thickener dosing (C) and retarder dosing (D) on the performance of RAPC were investigated by orthogonal test method. The results show that: (1) The optimal ratio of mechanical properties is A=0.15, B=1.4%, C=0.3%, D=0.4%, in which the effect of water reducing agent is the most significant; (2) The optimal ratio of permeability properties is A=0.14, B=1.6%, C=0.3%, D=0.5%, with the thickening agent playing a dominant role; (3) When the designed porosity is 20%, the permeability coefficient can be maintained above 1.5 mm/s and meet the C20 strength requirements. The study provides a basis for ratio optimization for the engineering application of RAPC.

Keywords: recycled aggregate pervious concrete; orthogonal test; mixing proportion optimization

引言

再生骨料透水混凝土(Recycled aggregate permeable concrete, RAPC)作为一种区别于传统混凝土材料的新型绿色建筑材料,透水混凝土由于其独特的透气透水性,已然受到国内外学者的普遍关注,其独特的孔隙-骨架结构十分贴合“海绵城市”的核心理念,在助推海绵城市建设方面和促进建筑垃圾循环利用起到的积极效用^[1]。在RAPC的研究中,学者们主要从配合比设计方法、制备工艺和性能提升等方面来着手研究,通过不同计算方法和不同参数来优化配合比设计方法、改良制备工艺流程,研究再生骨料替代率、改性再生骨料等因素对性能的影响。例如,夏群等^[2]探究了成型压力和振动时间对抗压强度和透水系数的影响,结果表明成型压力越大抗压强度越高但透水系数降低,而振动时间增加抗压强度先升后降,透水系数持续下降。韩云婷等^[3]针对再生骨料透水混凝土特点,采用水泥裹石法和人工锤捣成型工艺,使强度和透水性能协调较好,并通过正交试验分析,确定了各因素对强度和透水系数影响的主次顺序。除了成型工艺的探索,学者们还从再生骨料粒径和替代比例等方面研究其对RAPC性能的影响。于函^[4]研究发现,随着再生骨料取代率从0%

提高至100%,RAPC的抗折强度逐步下降。当再生骨料取代率为0%时,RAPC的抗折强度为4.84MPa,而当取代率达到100%时,抗折强度降至3.73MPa。胶凝材料的不同也会在一定程度上影响RAPC的力学性能。陈守开等^[5]研究了粉煤灰和硅粉部分替代水泥对RAPC性能的影响,制备出了同配比条件下性能优于采用天然骨料的透水混凝土试件,研究结果表明粉煤灰可以提高RAPC的抗压强度但会削弱其渗透性能,硅粉对RAPC的性能可以起到一定程度的提高。

综上,大多数研究是针对RAPC的制备工艺、再生骨料自身参数、胶凝材料组成等方面进行优化,而水胶比、外加剂掺量鲜有系统性研究。本文以水胶比、减水剂掺量、增稠剂掺量和缓凝剂掺量四个因素作为影响再生骨料透水混凝土基体的因素,基于正交试验法,探索各因素对再生骨料透水混凝土性能的影响。

1 实验

1.1 原材料

再生骨料取自江苏锡城建环科技发展有限公司,P·O 42.5水泥(产自山东青岛,一级粉煤灰(产自河南四通)、SF96级硅灰(产自河南郑州)、S105级高炉矿渣(产自

山东蟠龙山)以及石英砂(100~120目,产自河南郑州)。为了使浆体包裹骨料更加均匀,试验选用聚羧酸高性能减水剂来保证新拌浆体具有良好的工作性能。由于 RAPC 的新拌混合料与空气接触面积大,在成型时流动性丧失过快,加入葡萄糖酸钠作为缓凝剂来保证试件成形顺利。为了提高浆体与骨料之间的黏结性能,加入羟丙基甲基纤维素(Hypromellose, HPMC)作为增稠剂来提高浆体的黏聚性。

1.2 试验方案

本文以水胶比 A、减水剂掺量 B、增稠剂掺量 C 和缓凝剂掺量 D 四个因素作为影响透水混凝土基体的因素,每个因素取三个不同水平,即选择 $L_9(3^4)$ 进行正交试验设计,正交试验因素水平表如表 1 所示。正交试验表见表 2,根据表 2 的正交试验表计算得到的再生骨料透水混凝土基体配合比(不含再生骨料)如表 3 所示,设计孔隙率为 20%。

表 1 正交试验因素水平表 $L_9(3^4)$

影响因素	水平 1	水平 2	水平 3
水胶比 A	0.14	0.15	0.16
减水剂掺量 B	1.4%	1.5%	1.6%
增稠剂掺量 C	0.3‰	0.4‰	0.5‰
缓凝剂掺量 D	0.3‰	0.4‰	0.5‰

表 2 正交试验表 $L_9(3^4)$

组号	水胶比	减水剂掺量	增稠剂掺量	缓凝剂掺量
1	0.14 (1)	1.4% (1)	0.3‰ (1)	0.3‰ (1)
2	0.14 (1)	1.5% (2)	0.4‰ (2)	0.4‰ (2)
3	0.14 (1)	1.6% (3)	0.5‰ (3)	0.5‰ (3)
4	0.15 (2)	1.4% (1)	0.4‰ (2)	0.5‰ (3)
5	0.15 (2)	1.5% (2)	0.5‰ (3)	0.3‰ (1)
6	0.15 (2)	1.6% (3)	0.3‰ (1)	0.4‰ (2)
7	0.16 (3)	1.4% (1)	0.5‰ (3)	0.4‰ (2)
8	0.16 (3)	1.5% (2)	0.3‰ (1)	0.5‰ (3)
9	0.16 (3)	1.6% (3)	0.4‰ (2)	0.3‰ (1)

表 3 基体配合比 (kg/m^3)

试验号	水泥	硅灰	矿粉	粉煤灰	石英砂	水	减水剂	增稠剂	缓凝剂
1	917.3	262.1	590.0	65.6	183.6	256.9	25.69	0.55	0.55
2	917.3	262.1	590.0	65.6	183.6	256.9	27.52	0.73	0.73
3	917.3	262.1	590.0	65.6	183.6	256.9	29.36	0.92	0.92
4	900.4	257.2	579.2	64.2	180.2	270.2	25.21	0.72	0.9
5	900.4	257.2	579.2	64.2	180.2	270.2	27.02	0.9	0.54
6	900.4	257.2	579.2	64.2	180.2	270.2	28.82	0.54	0.72
7	883.9	252.6	568.6	63.1	177.0	282.9	24.75	0.88	0.71
8	883.9	252.6	568.6	63.1	177.0	282.9	26.52	0.53	0.88
9	883.9	252.6	568.6	63.1	177.0	282.9	28.29	0.71	0.53

1.3 试验方法

力学性能测试:(1)抗压强度试验:根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[6]进行测试,试件尺寸为 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 100\text{mm}$,仪器选用量程为 300kN 的万能试验机,加载速率为 $0.3\text{MPa}/\text{s}$,每组试验测试 6 个试件,最后结果取平均值。(2)抗折强度试验:根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[6]进行测试,试件尺寸为 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 400\text{mm}$,仪器选用量程为 60kN 的电液伺服压力试验机,加载速率为 $0.03\text{MPa}/\text{s}$,每组试验测试 6 个试件,最后结果取平均值。

渗透性能测试:(1)透水系数:依据《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T 135—2009)^[7]所规范的方法测试,试件的尺寸为 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 100\text{mm}$ 。(2)连通孔隙率:按照《再生骨料透水混凝土应用技术规程》(CJJ/T 253—2016)^[8]规定进行测试。

2 结果与讨论

2.1 力学性能

再生骨料透水混凝土 28d 抗压强度和抗折强度试验结果如图 1 所示。表 4 为各因素对再生骨料透水混凝土抗压强度的正交极差分析结果,可以看出,各因素对再生骨料透水混凝土的 28d 抗压强度的影响程度的主次顺序为: $B>C>A>D$ 。对比各因素对未改性再生骨料组的抗压强度的极差值,水胶比、减水剂掺量和增稠剂掺量对其的影响程度要远远超过缓凝剂掺量对其的影响程度。根据表 3 的极差分析试验研究范围之内最优水平组合为: $A_2B_1C_1D_2$,即试验的最优组合为:水胶比为 0.15,减水剂掺量为 1.4%,增稠剂掺量为 0.3‰,缓凝剂掺量为 0.4‰。

表 5 为各因素对再生骨料透水混凝土 28d 抗折强度的正交极差分析结果,可以看出,各因素对再生骨料透水混凝土 28d 抗折强度的影响程度的主次顺序为: $B=C>A>D$,这与各因素对抗压强度的影响结果不同。以抗折强度为评判所得的最优水平与抗压强度所得相同,这是因为抗折强度和抗压强度表现有明显的相关性。根据表 4 的极差分析试验研究范围之内最优水平组合为: $A_2B_1C_1D_2$,即试验的最优组合为:水胶比为 0.15,减水剂掺量为 1.4%,增稠剂掺量为 0.3‰,缓凝剂掺量为 0.4‰。

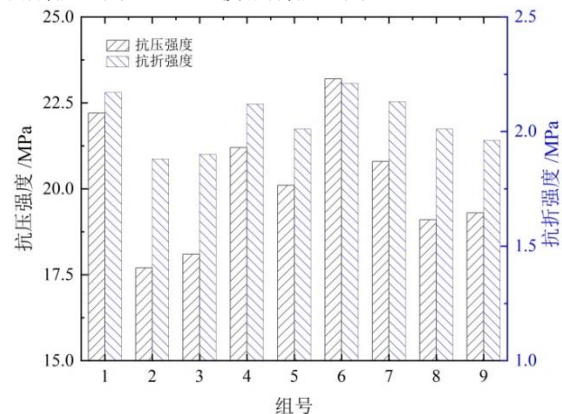


图 1 再生骨料透水混凝土抗压和抗折强度试验结果

表 4 抗压强度正交试验分析

试验号	水胶比 A	减水剂掺量 B	增稠剂掺量 C	缓凝剂掺量 D
K1	58.00	64.20	64.50	61.60
K2	64.50	56.90	59.70	61.70
K3	59.20	60.60	57.50	58.40
k1	19.33	21.40	21.50	20.53
k2	21.50	18.97	19.90	20.57
k3	19.73	20.20	19.17	19.47
极差	2.17	2.43	2.33	1.10
主次顺序	减水剂掺量>增稠剂掺量>水胶比>缓凝剂掺量			
优水平	A ₂	B ₁	C ₁	D ₂
最优组合	A ₂ B ₁ C ₁ D ₂			

表 5 抗折强度正交试验分析

试验号	水胶比 A	减水剂掺量 B	增稠剂掺量 C	缓凝剂掺量 D
K1	5.95	6.42	6.39	6.14
K2	6.34	5.90	6.13	6.22
K3	6.10	6.07	5.87	6.03
k1	1.98	2.14	2.13	2.05
k2	2.11	1.97	2.04	2.07
k3	2.03	2.02	1.96	2.01
极差	0.13	0.17	0.17	0.06
主次顺序	减水剂掺量>增稠剂掺量>水胶比>缓凝剂掺量			
优水平	A ₂	B ₁	C ₁	D ₂
最优组合	A ₂ B ₁ C ₁ D ₂			

2.2 渗透性能

图 2 为再生骨料透水混凝土孔隙率和透水系数测试结果。表 6 为各因素对再生骨料透水混凝土孔隙率的正交极差分析结果，可以看出，各因素对再生骨料透水混凝土孔隙率的影响程度的主次顺序为：C>A>B>D。对比各因素对再生骨料透水混凝土孔隙率的极差值，增稠剂掺量的影响程度要远远超过其他因素的影响程度，而减水剂掺量和水胶比对孔隙率的影响也要远超前于缓凝剂掺量。根据表 6 的极差分析，以孔隙率为评判标准时，生骨料透水混凝土在试验研究范围之内最优水平组合为：A₁B₃C₁D₃，即试验的最优组合为：水胶比为 0.14，减水剂掺量为 1.6%，增稠剂掺量为 0.3%，缓凝剂掺量为 0.5%。

表 7 为各因素对再生骨料透水混凝土透水系数的正交极差分析结果，可以看出，各因素对再生骨料透水混凝土透水系数的影响程度的主次顺序为：C>A>B>D。对比各因素对再生骨料透水混凝土透水系数的极差值，增稠剂掺量对其的影响程度要同样远远超过其他因素对其的影响程度，而减水剂掺量和水胶比对孔隙率的影响也要远超前于缓凝剂掺量对其的影响。根据表 7 的极差分析，以透水系数为评判标准时，再生骨料透水混凝土在试验研究范围之内最优水平组合为：A₁B₃C₁D₃，即试验的最优组合为：

水胶比为 0.14，减水剂掺量为 1.6%，增稠剂掺量为 0.3%，缓凝剂掺量为 0.5%，这与孔隙率的极差分析结果相同。

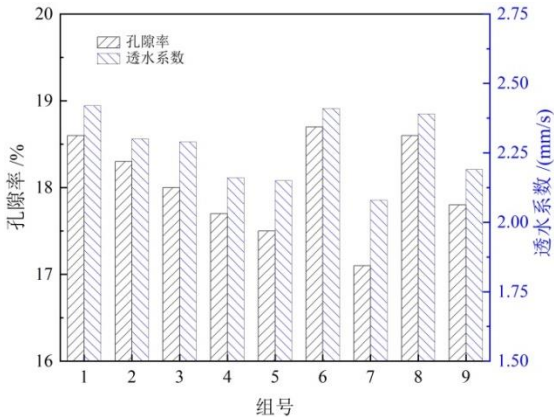


图 2 再生骨料透水混凝土孔隙率和透水系数测试结果

表 6 孔隙率正交试验分析

试验号	水胶比 A	减水剂掺量 B	增稠剂掺量 C	缓凝剂掺量 D
K1	54.90	53.40	55.90	53.90
K2	53.90	54.40	52.60	54.10
K3	53.50	54.50	53.80	54.30
k1	18.30	17.80	18.63	17.97
k2	17.97	18.13	17.53	18.03
k3	17.83	18.17	17.93	18.10
极差	0.47	0.37	1.10	0.13
主次顺序	增稠剂掺量>水胶比>减水剂掺量>缓凝剂掺量			
优水平	A ₁	B ₃	C ₁	D ₃
最优组合	A ₁ B ₃ C ₁ D ₃			

表 7 透水系数正交试验分析

试验号	水胶比 A	减水剂掺量 B	增稠剂掺量 C	缓凝剂掺量 D
K1	7.01	6.66	7.22	6.76
K2	6.72	6.84	6.52	6.79
K3	6.66	6.89	6.65	6.84
k1	2.34	2.22	2.41	2.25
k2	2.24	2.28	2.17	2.26
k3	2.22	2.30	2.22	2.28
极差	0.12	0.08	0.23	0.03
主次顺序	增稠剂掺量>水胶比>减水剂掺量>缓凝剂掺量			
优水平	A ₁	B ₃	C ₁	D ₃
最优组合	A ₁ B ₃ C ₁ D ₃			

2.3 配合比优化验证

根据 2.1 节试验结果，以力学性能最优水平配合比（A₂B₁C₁D₂）为基准，设计不同孔隙率来验证配合比的性能。各设计孔隙率再生骨料透水混凝土的力学性能和渗透性能的结果见图 3 所示。由图 3(a)可知，随着设计孔隙率的降低，各组抗压强度和抗折强度的差异不大，说明 A₂B₁C₁D₂ 的组合可以达到力学性能的最优水平。随着设

计孔隙率的降低,实测孔隙率和透水系数也随之降低,这是因为随着浆体体积增大,孔隙体积减少,实测孔隙率和透水系数自然随之持续下降,为了保证具有优异的渗透性能,建议再生骨料透水混凝土的设计孔隙率为 20%。

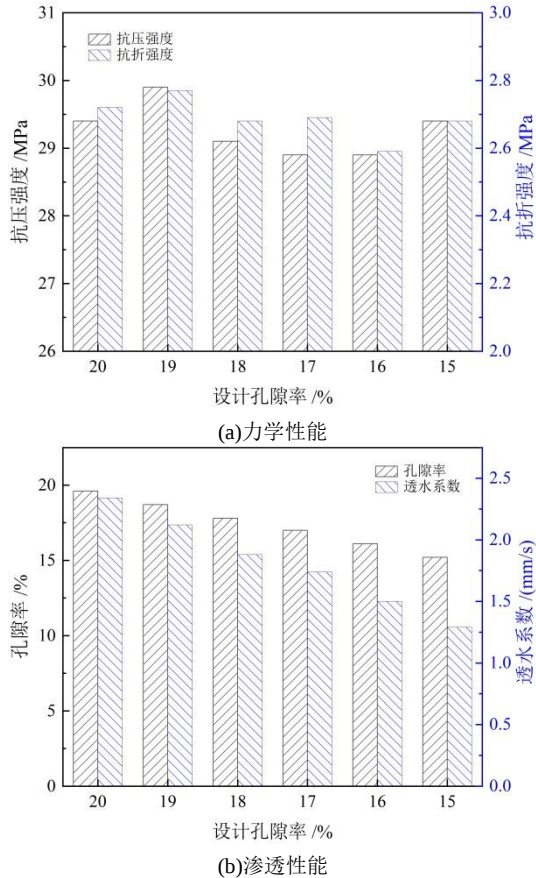


图3 不同设计孔隙率再生骨料透水混凝土

3 结论

本文通过正交试验法系统分析水胶比 A、减水剂掺量 B、增稠剂掺量 C 和缓凝剂掺量 D 四因素对再生骨料透水混凝土性能的影响,得出以下结论:

(1) 力学性能方面,各因素影响程度依次为:减水

剂掺量>增稠剂掺量>水胶比>缓凝剂掺量。最优配比组合为:水胶比 0.15,减水剂 1.4%,增稠剂 0.3%,缓凝剂 0.4%,该组合下混凝土抗压强度与抗折强度稳定,受孔隙率变化影响较小。

(2) 渗透性能方面,影响因素排序为:增稠剂掺量>水胶比>减水剂掺量>缓凝剂掺量。最优渗透性能配比为水胶比 0.14,减水剂 1.6%,增稠剂 0.3%,缓凝剂 0.5%。

(3) 孔隙率试验表明,当采用 $A_2B_1C_1D_2$ 基准配比时,随着设计孔隙率从 20%降低,实测孔隙率与透水系数呈线性下降趋势,但力学性能波动幅度小于 5%。综合考虑渗透性能要求,建议工程应用中控制设计孔隙率不低于 20%,此时透水系数可维持在 1.5mm/s 以上,同时满足 C20 强度等级要求。

【参考文献】

- [1]王连接,王开春,吴连丰,等.基于海绵城市理念的城市水系规划方法及实践[J].中国给水排水,2024,40(4):32-36.
- [2]夏群,谢飞飞,朱平华.道路用无砂透水再生骨料混凝土成型工艺研究[J].混凝土,2016(8):149-151.
- [3]韩云婷,杨利香,陈海燕.再生粗骨料透水混凝土制备工艺及配合比优化研究[J].新型建筑材料,2018,45(6):21-24.
- [4]于函.再生骨料透水混凝土性能及超声波波速与透水混凝土性能关系试验研究[D].吉林:吉林大学,2019.
- [5]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.
- [6]普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T 50081-2002[S].北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [7]透水水泥混凝土路面技术规程:CJJ/T 135-2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [8]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.

作者简介:余志辉(1998—),男,汉族,江西鹰潭人,硕士,助理工程师,主要从事混凝土和固废资源化利用等方向检测和科研工作。