

废旧橡胶颗粒再生骨料透水混凝土抗压强度和透水性能正交试验研究

Orthogonal experimental study on compressive strength and water permeability of recycled aggregate permeable concrete with waste rubber particles

秦金洲¹ 梁晓晖²

(1南通市建设工程质量监督站; 2南通市建筑科学研究院有限公司, 江苏 南通 226001)

摘要: 废旧橡胶颗粒再生骨料透水混凝土是一种新型绿色环保建筑材料。采用体积法设计再生骨料透水混凝土的配合比, 完成9组不同配比28d抗压强度、透水系数及连续孔隙率试验, 通过正交试验方法, 考察成型锤击次数、废旧橡胶颗粒细度和增强剂掺量对再生骨料透水混凝土抗压强度、透水性能的影响。

关键词: 透水混凝土; 正交分析法; 抗压强度; 透水系数

Abstract: Recycled aggregate permeable concrete with waste rubber particles is a new green building material. The volume method is adopted to design the mix proportion of recycled aggregate permeable concrete, and 9 groups of 28d compressive strength, permeability coefficient and continuous porosity tests with different proportions are completed. The effects of molding hammering times, waste rubber particle fineness and reinforcement content on the compressive strength and permeability of recycled aggregate permeable concrete are investigated by orthogonal test method.

Keywords: pervious concrete; orthogonal analysis; compressive strength; permeable coefficient

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 1003-8965(2021)05-0055-04

0 引言

再生骨料透水混凝土是以水泥为胶结材料, 再生骨料取代率在30%以上, 由一系列连通的孔隙和混凝土实体部分骨架组成的具备透气、透水性多孔结构的混凝土^[1]。从材料组成上看, 再生骨料透水混凝土主要由单粒级再生骨料为粗骨料, 使用强度等级为42.5以上的水泥, 少量或不掺细骨料, 辅以一定量的添加剂, 加水进行搅拌、养护形成, 具有一定强度和透气、透水性能及环保特征。其通常用于路面工程, 如城镇街道、小区道路、小型停车场和景观路面等, 不仅可满足路用混凝土物理力学性能要求, 还能满足环境生态方面的透水性要求, 减少路面积水, 维持地下水资源平衡^[2-9]。本文通过正交试验设计, 研究成型锤击次数、废旧橡胶颗粒细度和增强剂掺量对再生骨料透水混凝土抗压强度和透水系数的影响。

1 试验

1.1 基准配合比

再生透水混凝土与传统混凝土的配合比设计不同。本文主要采用以控制目标孔隙率为主的体积法计算配合比。基准配合比如下: 水胶比0.32、骨胶比2.4、目标孔隙率15%、橡胶颗粒掺量为3%。

1.2 影响因素

1.2.1 成型锤击次数

透水混凝土尤其是再生粗骨料透水混凝土在受压过程中主要是骨料之间的作用, 大部分是点对点接触, 夹有少量的面接触, 因此, 如果振捣不充分或过密实, 会对再生透水混凝土后期透水性和抗压性能有极大影响。

国内外研究发现, 采用重锤夯击, 通过一定的下落高度和次数控制成型, 既能有效增加混凝土浆料的密实度, 还能保障一定的空隙率^[2]。本研究采用4.5kg夯锤, 下落高度为45cm的锤击装置, 选用锤击次数为6次、12次和18次三个水平。



图1 抗压试件成型图

1.2.2 废旧橡胶颗粒细度

橡胶颗粒是一种疏水性弹性材料, 作为透水混凝土的填充料存在其内部, 水泥浆均匀包裹在橡胶颗粒表面, 形成包裹层, 促进了骨料与水泥浆料界面的粘结, 有助于提高混凝土强度, 但是, 如果橡胶颗粒过大或过小, 会影响混凝土

基金项目: 江苏省建设系统科技项目(2018ZD068)

第一作者: 秦金洲(1964-), 江苏南通人, 高级工程师。

通讯作者: 梁晓晖(1980-), 江苏南通人, 高级工程师。

土内部的连续孔隙率,导致透水系数产生较大变化。因此,本研究选用的废旧橡胶颗粒粒径的三个水平分别为:粒径2–5mm、粒径2–5mm和0.15–0.30mm各50%(重量比)、粒径0.15–0.30mm。

1.2.3 掺加剂

常用掺加剂有粉煤灰、矿粉和硅灰等,可起到提高混凝土力学性能的作用^[3–4]。本研究选用普通透水混凝土用增强剂,其主要成分是二氧化硅,作用是通过聚合物在水泥中的交联来大幅提高骨料中点与点之间的粘结强度,改善透水混凝土的和易性,提升透水性能。本研究采用掺量(以水泥用量为基准)1.0%、1.5%和2%三个水平。

1.3 试验方案

本研究共选用三个影响因素,每个因素选用三个水平,采用正交表L9(3³),见表1所示。

表1 正交试验方案表

试验号	A (锤击次数)	B (橡胶颗粒细度)	C (SR增强剂掺量)
1	6次	粗(3%)	1.0%
2	6次	粗+细(各1.5%)	1.5%
3	6次	细(3%)	2.0%
4	12次	粗(3%)	1.5%
5	12次	粗+细(各1.5%)	2.0%
6	12次	细(3%)	1.0%
7	18次	粗(3%)	2.0%
8	18次	粗+细(各1.5%)	1.0%
9	18次	细(3%)	1.5%

1.4 原材料

1)水泥:南通海螺生产的强度等级52.5级普通硅酸盐水泥。

2)再生粗骨料:南通天德建筑可再生资源有限公司生产的再生骨料。试验前对再生骨料进行清洗和筛分处理,选取粒径10–16mm的再生骨料,如图2。



(a)粗洗 (b)精洗+筛分

图2 清洗、筛分骨料

3)废旧橡胶颗粒:选用江苏宏腾新材料有限公司生产的粒径2–5mm和0.15–0.30mm两种规格的废旧橡胶颗粒,表观密度分别为1148kg/m³、785kg/m³,含水率均为1%。

4)掺加剂:采用南京佳境生态景观工程技术有限公司生产的活性二氧化硅,即SR增强剂。

1.5 仪器和性能测试

1)抗压强度试验主要使用TYA–2000A压力试验机,试验方法按照GB/T 50081–2019《混凝土力学性能试验方法标准》执行。

2)透水系数试验主要根据CJJ/T 135–2009《透水水泥

混凝土路面技术规程》附录A规定进行,自行设计制造简易透水系数测试装置,见图3。

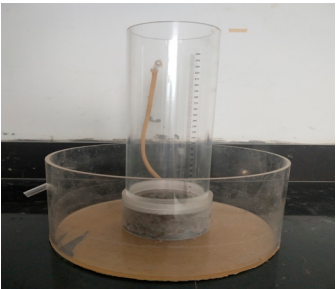


图3 自制透水装置图

3)连续孔隙率主要测试设备为电热干燥箱和浸水天平。试验方法按照CJJ/T 253–2016《再生骨料透水混凝土应用技术规程》^[10]附录A进行。

2 数据直观分析

2.1 抗压强度

采用正交试验极差分析法对再生骨料透水混凝土28d抗压强度进行直观分析,结果如表5。

表2 正交试验28d抗压强度极差分析表

试验组号	锤击次数 A	橡胶颗粒细度 B	SR增强剂掺量 C	28d 抗压强度 (MPa)
1	6	粗(3%)	1.0%	19.4
2	6	粗+细(各1.5%)	1.5%	20.4
3	6	细(3%)	2.0%	18.2
4	12	粗(3%)	1.5%	17.3
5	12	粗+细(各1.5%)	2.0%	23.7
6	12	细(3%)	1.0%	23.9
7	18	粗(3%)	2.0%	16.1
8	18	粗+细(各1.5%)	1.0%	18.8
9	18	细(3%)	1.5%	24.0
K _{1j}	57.6	52.4	61.7	
K _{2j}	64.9	62.9	62	
K _{3j}	59.2	66.4	58	
K _{1j}	19.2	17.5	20.6	
K _{2j}	21.6	21.0	20.7	
K _{3j}	19.7	22.1	19.3	
R _j	2.4	4.7	1.3	

从表2可见,三个影响因素对28d抗压强度影响顺序是:橡胶颗粒细度>锤击次数>SR增强剂掺量。

结合28d抗压强度K值关系趋势图(图4)可知,随橡胶颗粒细度变小,强度也随之增加,细度水平3即0.15–0.30mm时,强度最高,原因是在再生透水混凝土中掺加橡胶颗粒相当于掺加了细集料,改善了混凝土拌合料的和易性和流动性,使得水泥能更有效包裹骨料,致使混凝土制品的强度增加。

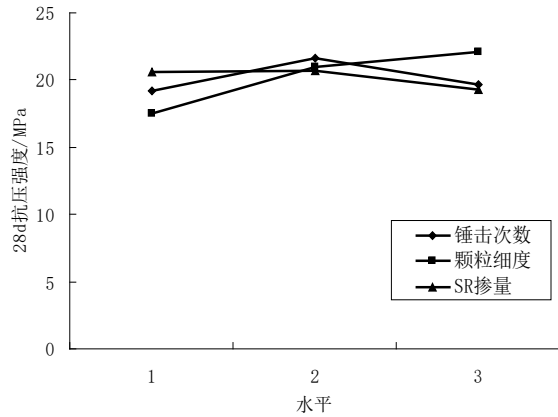


图4 28d抗压强度K值的关系趋势图

图5是橡胶颗粒再生骨料透水混凝土SEM分析结果,由图5可以看出,水泥浆体比较致密,水泥颗粒已基本水化形成大量的水化物。此微观结构与抗压强度发展规律吻合。

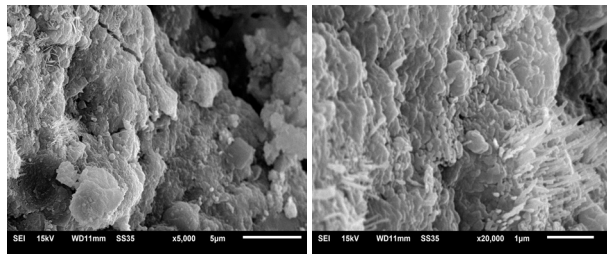


图5 橡胶颗粒再生骨料透水混凝土SEM图

从图4可见,随着锤击次数的增加,橡胶再生骨料透水混凝土的抗压强度先增大后减小,在水平2时强度最高,这是因为随着锤击次数的增加,混凝土内部结构更加密实,从而导致强度增高,但是锤击次数过多时,由于拌合料中的水泥尚未完全硬化,重锤直接影响再生混凝土内部结构,导致混凝土强度降低。添加SR增强剂后,也是在水平2时强度最高,抗压强度呈先增大后减小的趋势,这是由SR增强剂本身性能特点及再生透水混凝土内部结构特点决定的,SR增强剂能提高再生透水混凝土拌合物的流动性,使其中的水泥流动性增强,能更有效、均匀地覆盖在再生骨料周围,形成水泥包裹层,而当增强剂过量时,水泥的流动性偏大,以致于大部分沉底或封边,导致整个结构的不均匀而引起强度降低。

通过比较分析可以得到各因素的最优水平,橡胶颗粒细度取水平3,即0.15~0.30mm,锤击次数和SR增强剂掺量均取水平2,分别为12次和1.5%,即抗压强度最优配方案为A₂B₃C₂。

2.2 透水系数

透水系数结果如表3所示。在表3中, 'K_{1j}', 'K_{2j}', 'K_{3j}' 分别表示三个因素在水平1~3情况下的透水系数,用以反映锤击次数、橡胶颗粒细度和增强剂掺量的不同水平对再生透水混凝土透水系数的影响。用极差R值来反映因素的水平变化对透水系数的影响程度,即橡胶颗粒细度>SR增强剂掺量>锤击次数。

表3 正交试验透水系数直观分析表

试验组号	锤击次数 A	橡胶颗粒组成 B	SR增强剂掺量 C	透水系数 (mm/s)
1	6	粗(3%)	1.0%	1.35
2	6	粗+细(各1.5%)	1.5%	1.09
3	6	细(3%)	2.0%	1.42
4	12	粗(3%)	1.5%	1.61
5	12	粗+细(各1.5%)	2.0%	0.93
6	12	细(3%)	1.0%	0.79
7	18	粗(3%)	2.0%	1.84
8	18	粗+细(各1.5%)	1.0%	1.2
9	18	细(3%)	1.5%	0.72
K _{1j}	3.86	4.8	3.34	
K _{2j}	3.33	3.22	3.42	
K _{3j}	3.76	2.93	4.19	
'K _{1j}	1.29	1.60	1.11	
'K _{2j}	1.11	1.07	1.14	
'K _{3j}	1.25	0.98	1.40	
R _j	0.18	0.62	0.28	

从透水系数K值的关系趋势图(图6)可见,B、C因素对橡胶颗粒再生透水混凝土的透水系数的影响规律大致相同,即随着水平1~3变化,透水系数呈先减小后增大趋势,而A因素在水平1~3变化过程中,透水系数一直在减小,且在2~3水平时变化趋势减缓。

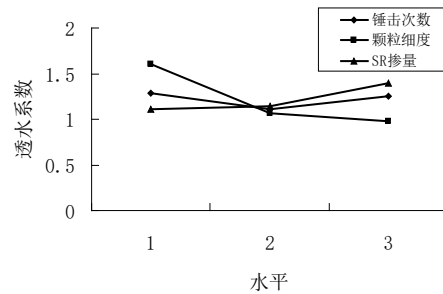


图6 透水系数K值的关系趋势图

经分析,选取最优配方案A₁B₁C₃,即锤击次数6次,粗橡胶颗粒(2~5mm)和2%掺量的SR增强剂。

2.3 目标孔隙率与连续孔隙率

由连续孔隙率数值与目标孔隙率关系(图7)可以发现,所有9组试验的目标孔隙率与实测的连续孔隙率较为接近,均在15%附近波动,且相似性较好,说明本研究采用的橡胶再生骨料透水混凝土配合比和成型工艺较为适宜。

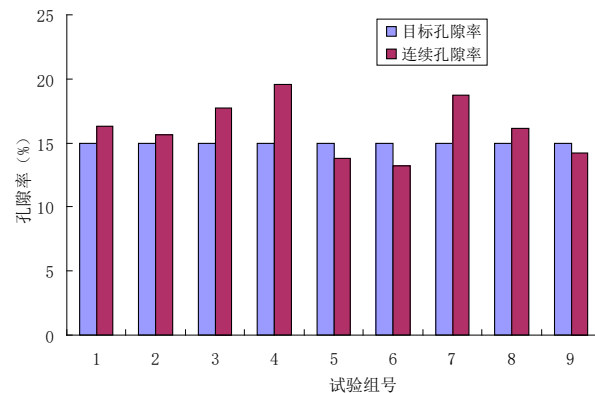


图7 目标孔隙率与连续孔隙率关系图

3 方差分析

上述直观分析通俗、简单,然而并未把由于因素水平的改变造成的试验结果波动与试验误差造成的结果波动区分开来。对影响考核指标即抗压强度值和透水系数的各因素的重要程度,没有给出明确的数量估计,更未提供用于考察、辨别因素的影响是否显著的标准。为此选用方差分析进行弥补,见表4、表5。

表4 抗压强度结果方差分析表

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	显著性 a		
					F _{0.90}	F _{0.95}	F _{0.99}
锤击次数 A	9.82	2	4.91	0.36			
橡胶颗粒细度 B	35.39	2	17.69	1.32			
SR 增强剂掺量 C	3.31	2	1.65	0.12			
误差	26.90	2	13.45				
总和	75.41	8					

表5 透水系数结果方差分析表

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	显著性 a		
					F _{0.90}	F _{0.95}	F _{0.99}
锤击次数 A	0.05	2	0.03	0.21			
橡胶颗粒细度 B	0.68	2	0.34	2.65			
SR 增强剂掺量 C	0.15	2	0.07	0.58			
误差	0.25	2	0.13				
总和	1.13	8					

从表4、表5可以看出,所选三个因素对橡胶颗粒再生混凝土的抗压强度和透水系数不是显著影响因素。对于抗压强度,各因素的影响顺序为:橡胶颗粒细度>锤击次数>SR增强剂掺量,对于透水系数,各因素的影响顺序为:橡胶颗粒细度>SR增强剂掺量>锤击次数。由此可见,橡胶颗粒细度是影响废旧橡胶颗粒再生骨料透水混凝土抗压强度和透水性能的主要因素,这与极差分析的结果一致,说明本试验选取的最优配合比方案是合理的。

4 结论

1) 根据正交试验方法设计了9组不同配合比的透水混凝土,研究了三种因素,即锤击次数、橡胶颗粒细度和SR增强剂掺量对材料抗压强度,透水系数的影响顺序,其中,橡胶颗粒细度对两种性能的影响最大,为主要影响因素,锤

击次数对抗压强度影响次之,SR增强剂掺量对抗压强度影响最弱,而对于透水系数的影响,SR增强剂掺量次之,锤击次数最弱。

2) 在本试验条件和各水平范围内,综合材料28d抗压强度和透水系数性能,依照CJJ/T 253-2016规定的透水水泥混凝土面层的透水性能指标(透水系数 $\geq 0.5\text{mm/s}$,连续孔隙率 $\geq 10\%$),9组试验的透水性能均符合规范,所以选择最优配比时以抗压强度为主要参数,最终选取的最优配合比方案为A₂B₃C₂。

3) 在本试验条件下,废旧橡胶颗粒再生骨料透水混凝土的最优配合比方案为:水胶比0.32、骨胶比2.4、目标孔隙率15%、橡胶颗粒掺量为3%、锤击次数12次、橡胶颗粒细度0.15-0.30mm、SR增强剂掺量为1.5%。再生粗骨料性能差异较大,配合比方案可在此基础上根据骨料性能适当调整。

参考文献

- [1] 宋中南,石云兴. 透水混凝土及其应用技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [2] 黄庆亮. 肥效缓释型多孔生态混凝土的制备与性能研究[D]. 济南:济南大学,2016.
- [3] 解伟,范程程,陈爱玖,等. 再生橡胶透水混凝土基本性能试验研究[J]. 混凝土,2017(5):134-136.
- [4] 李子成,张爱菊,隋修志,等. 透水混凝土界面增强增韧效应研究[J]. 硅酸盐通报,2017,36(2):747-752.
- [5] 薛如政,刘京红,苗建伟. 再生骨料透水混凝土性能的研究[J]. 河北农业大学学报,2017(4):128-133.
- [6] 吴田木,潘睿钊,郑广涛. 市政道路透水混凝土强度的影响因素试验研究[J]. 福建建材,2016(10):19-20.
- [7] 蔡基伟. 再生骨料在透水混凝土应用中需要注意的关键问题[J]. 商品混凝土,2018(10):1-2.
- [8] 任艺楠,朱亚光,张楸雨. 再生骨料透水混凝土力学性能和透水性能的试验研究[J]. 低温建筑技术,2019(10):16-18.
- [9] LU J X, YAN X, et al. Sustainable design of pervious concrete using waste glass and recycled concrete aggregate[J]. Journal of cleaner production, 2019,(11):1102-1112.
- [10] CJJ/T 253-2016,再生骨料透水混凝土应用技术规程[S].

(上接第122页)

用[J]. 华北理工大学学报(自然科学版),2021,43(01):86-93.

[7] 白杨,裘敏浩. 装配式建筑施工安全管理关键措施分析[J]. 建材发展导向,2020,18(24):77-78.

[8] 张净霞. 高职(交通土建类)学生装配式建筑职业技能与工匠精神融合研究[J]. 中国建设信息化,2020(23):66-67.

[9] 朱黎炜,张译木. 装配式下趣味组合在建筑设计中的应用[J]. 智能城市,2020,6(23):33-34.

[10] 李儒光,肖洪吉,卢雪松,等. 装配式建筑发展及提升策略[J]. 黄冈师范学院学报,2020,40(06):56-61.

[11] 袁波宏,张建霞. BIM在预制装配式智慧化机房中的应用[J]. 工程建设与设计,2020(23):157-158.

[12] 张杨子,汪宏飞,倪顺年. BIM技术在预制装配式安装工程中的应用——以吉安会展中心为例[J]. 工程技术研究,2020,5(23):36-37.