

基于多元固废制备透水混凝土及其性能研究

黄俊杰, 朱洪威

(江西理工大学 土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要:为探究钢渣、锂渣和粉煤灰固废材料对透水混凝土性能的影响,在透水混凝土中掺入钢渣、锂渣和粉煤灰3种固废材料,并设计五因素四水平正交试验。通过极差分析法研究目标孔隙率、水胶比、钢渣掺量、锂渣掺量和粉煤灰掺量对透水混凝土力学性能和透水性能的影响,同时对其微观形貌进行分析。结果表明:影响透水混凝土力学性能和透水性能的主要因素为目标孔隙率、水胶比和锂渣掺量,次要因素为钢渣掺量和粉煤灰掺量。根据功效系数法得出的最优配合比:目标孔隙率为21%,水胶比为0.3,钢渣掺量为0,锂渣掺量为10%,粉煤灰掺量为15%。在此条件下,透水混凝土的最大抗压强度为28.8 MPa,最大抗折强度为4.7 MPa,最大透水系数为9.1 mm/s。SEM分析显示,未掺固废材料的透水混凝土整体结构较为疏松;适量掺入固废材料可促进水化反应,从而改善透水混凝土的宏观性能。

关键词:透水混凝土; 锂渣; 钢渣; 粉煤灰; 微观结构; 正交试验

中图分类号:TD926.4

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)08-0026-08

doi:10.13402/j.gcjs.2025.08.098

Research on preparation of permeable concrete based on multiple solid wastes and its properties

HUANG Junjie, ZHU Hongwei

(School of Civil Engineering and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: In order to explore the effects of steel slag, lithium slag and fly ash solid waste materials on the properties of permeable concrete, three solid waste materials including steel slag, lithium slag and fly ash, are added to the permeable concrete, and a five-factor and four-level orthogonal test is designed. The effects of target porosity, water-cement ratio, steel slag content, lithium slag content and fly ash content on the mechanical properties and permeability performance of permeable concrete are studied by range difference analysis, and its microscopic morphology is analyzed. The results show that the main factors affecting the mechanical properties and permeability performance of permeable concrete are target porosity, water-cement ratio and lithium slag content, while the secondary factors are steel slag content and fly ash content. The optimal mix ratio obtained according to the efficacy coefficient method: the target porosity is 21%, the water-cement ratio is 0.3, the steel slag content is 0, the lithium slag content is 10%, and the fly ash content is 15%. Under these conditions, the maximum compressive strength of permeable concrete is 28.8 MPa, the maximum flexural strength is 4.7 MPa, and the maximum permeability coefficient is 9.1 mm/s. SEM analysis shows that the overall structure of permeable concrete without solid waste material is relatively loose. Appropriate incorporation of solid waste materials can promote hydration reactions, thereby improving the macroscopic properties of permeable concrete.

Key words: permeable concrete; lithium slag; steel slag; fly ash; microstructure; orthogonal test

收稿日期: 2024-12-28

作者简介: 黄俊杰(2000—),男,硕士研究生,从事道路工程方面的研究。

通信作者: 朱洪威(1977—),男,副教授,从事道路工程、隧道结构的耐久性等方面研究。

近年来,随着全球城市化和工业化的加速发展,固体废弃物的产生和处理逐渐成为亟待解决的环保问题。推动大宗固体废弃物的资源化利用已成为我国可持续发展战略中的关键一环^[1-3]。由于这类废弃物数量巨大、影响广泛且具有显著的潜在利用价值,其资源化利用备受关注。通过使用固废材料部分替代水泥制备透水混凝土,不仅能够增强城市吸收、储存和渗透雨水的能力^[4-6],还能实现废物资源化利用,提高大宗固废的利用率。

已有学者在固废材料制备透水混凝土的应用方面进行了深入研究,并取得了丰硕成果。石丽云^[7]发现,粉煤灰的掺入虽然降低了透水混凝土的早期抗压强度,但对后期强度影响不大,粉煤灰在体系中主要起到填充作用;张延年等^[8]研究发现,将锂渣、自燃煤矸石和钢渣以4:1:1的比例替代30%水泥时,28 d抗压强度达到51.98 MPa,超过纯水泥对照组;张银松等^[9]研究表明,复掺钢渣粉和玄武岩纤维可以显著提升透水混凝土的抗压强度、抗折强度和韧性,同时优化孔隙结构,增强透水性能;韦祝等^[10]研究发现,当粉煤灰掺量≤15%时,其对透水混凝土的早期和后期抗压强度均有积极促进作用,并且粉煤灰的增加显著提升了其耐磨性,尤其是在掺量为15%时,磨坑长度最小;黄嘉祺等^[11]利用工业尾气中的高浓度CO₂激活钢渣中的活性成分,成功制备了具有高早强、低碱度特性的碳激活钢渣透水混凝土。研究表明,当水灰比为0.27、磷石膏掺量为15%时,其强度可达到23.7 MPa。

本文以透水混凝土为研究对象,采用正交试验方法,系统分析了钢渣、锂渣和粉煤灰掺量对透水混凝土力学性能和透水性能的影响规律。同时,借助扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)对其微观结构进行观察与分析。在兼顾混凝土强度和透水性能需求的基础上,旨

在探索出最优的配合比方案,以促进矿物掺合料在透水混凝土中的广泛应用。

1 试验概况

1.1 原材料

选用P·O42.5水泥,其比表面积为331 m²/kg,密度为3.1 g/cm³;粗骨料选用粒径为5~10 mm的玄武岩碎石;减水剂选用聚羧酸高效减水剂,其掺量为胶凝材料质量的1.2%,减水率范围为18%~25%。固废材料包括锂渣、钢渣和粉煤灰。锂渣选用灵寿县某矿产品加工厂生产的锂渣粉,比表面积为550 m²/kg,28 d强度活性指数为85%;钢渣选用石家庄某新材料科技公司生产的钢渣粉,比表面积为500 m²/kg,28 d强度活性指数为80%;粉煤灰同样来自灵寿县某矿产品加工厂的I级粉煤灰。三者的主要化学成分如表1所示。试验用水为普通自来水。

表1 各固废材料主要的化学成分组成(质量分数) %

原料名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
锂渣	55.45	22.84	0.14	0.06
钢渣	19.10	6.10	22.10	40.60
粉煤灰	56.20	24.70	5.10	5.60

1.2 正交试验配合比设计

通过查阅相关规范并结合现有研究成果,采用五因素四水平的正交试验设计方法^[12-13],试验的影响因素包括目标孔隙率(A)、水胶比(B)、钢渣掺量(C)、锂渣掺量(D)和粉煤灰掺量(E)。各因素的具体水平如表2所示,具体的试验配合比设计如表3所示。

1.3 透水混凝土试块的制作

制备透水混凝土时使用SJD60型单卧轴式搅拌机,并采用二次投料法。试验中,抗压试件和抗折试件分别采用尺寸为100 mm×100 mm×100 mm和100 mm×100 mm×400 mm的钢模,每组各3块。

表2 各因素具体水平

水平	目标孔隙率(A)/%	水胶比(B)	钢渣掺量(C)/%	锂渣掺量(D)/%	粉煤灰掺量(E)/%
1	15	0.26	0	0	0
2	18	0.28	5	10	5
3	21	0.30	10	20	10
4	24	0.32	15	30	15

表 3 透水混凝土的正交试验设计及配合比

编号	目标孔隙率(A)/%	水胶比(B)	钢渣掺量(C)/%	锂渣掺量(D)/%	粉煤灰掺量(E)/%	钢渣/(kg·m ⁻³)	锂渣/(kg·m ⁻³)	粉煤灰/(kg·m ⁻³)	水泥/(kg·m ⁻³)	粗骨料/(kg·m ⁻³)	水/(kg·m ⁻³)	减水剂/(kg·m ⁻³)
1 [#]	15	0.26	0	0	0	0	0	0	535.51	1 484.70	139.23	6.43
2 [#]	15	0.28	5	10	5	25.89	51.77	25.89	414.19	1 484.70	144.97	6.21
3 [#]	15	0.30	10	20	10	50.11	100.22	50.11	300.67	1 484.70	150.33	6.01
4 [#]	15	0.32	15	30	15	72.83	145.65	72.83	194.2	1 484.70	155.36	5.83
5 [#]	18	0.26	5	20	15	24.20	96.80	72.60	290.41	1 484.70	125.85	5.81
6 [#]	18	0.28	0	30	10	0	140.39	46.79	280.77	1 484.70	131.03	5.62
7 [#]	18	0.30	15	0	5	67.94	0	22.65	362.34	1 484.70	135.88	5.44
8 [#]	18	0.32	10	10	0	43.28	43.28	0	346.26	1 484.70	138.50	5.19
9 [#]	21	0.26	10	30	5	43.25	129.76	21.63	238.05	1 484.70	112.46	5.19
10 [#]	21	0.28	15	20	0	62.73	83.63	0	271.81	1 484.70	117.09	5.02
11 [#]	21	0.30	0	10	15	0	40.47	60.71	303.55	1 484.70	121.42	4.86
12 [#]	21	0.32	5	0	10	19.61	0	39.21	333.32	1 484.70	125.49	4.71
13 [#]	24	0.26	15	10	10	57.15	38.10	38.10	247.67	1 484.70	99.07	4.57
14 [#]	24	0.28	10	0	15	36.84	0	55.26	276.29	1 484.70	103.15	4.42
15 [#]	24	0.28	5	30	0	17.83	106.97	0	231.76	1 484.70	106.97	4.28
16 [#]	24	0.32	0	20	5	0	69.09	17.27	259.01	1 484.70	110.54	4.15

具体步骤：首先，将称量好的骨料与 30% ~ 50% (质量分数) 的水混合，搅拌 30 s；然后，加入称量好的水泥与固废材料，搅拌均匀后继续搅拌 60 s；最后，加入剩余的水和减水剂，搅拌 180 s。将新拌制的透水混凝土分 3 次倒入钢模，每层浇筑后，用捣棒捣 30 次。完成浇筑后，使用抹刀对混凝土表面进行平整处理，并覆盖塑料膜对试件进行密封养护。脱模操作在 24 h 后进行，随后将试件转移至标准养护箱，在温度 (20 ± 2) °C 和相对湿度 ≥ 95% 的标准环境下养护 28 d。

1.4 透水混凝土各项性能测试方法

(1) 抗压强度：严格参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019) 的相关规定，使用全自动混凝土压力试验机完成测试。

(2) 抗折强度：严格参照 GB/T 50081—2019 的相关规定，使用型号为 Series DBZ - 300 kN 的混凝土断裂试验机完成测试。

(3) 有效孔隙率：严格参照《透水混凝土路面应用技术规程》(DB33/T 1153—2018) 的规定进行测试。

(4) 透水系数：依据文献 [14]，采用变水头法计算透水混凝土的透水系数。

2 结果与讨论

2.1 正交试验结果与数据分析

透水混凝土的有效孔隙率、抗压强度、抗折强度及透水系数的试验数据如表 4 所示，极差分析的结果如表 5 所示。由表 4、5 可知：透水混凝土的抗压强度最大值为 28.8 MPa，对应的透水系数和有效孔隙率分别为 2.7 mm/s 和 11.3%；而抗折强度的最大值为 4.7 MPa，对应的透水系数和有效孔隙率同样为 2.7 mm/s 和 11.3%。透水系数的数值均满足 DB33/T 1153—2018 标准中要求的大于 0.5 mm/s 的条件。影响抗压强度和抗折强度的各因素重要性排序：目标孔隙率 > 水胶比 > 锂渣掺量 > 粉煤灰掺量 > 钢渣掺量。影响透水系数和有效孔隙率的各因素重要性排序与力学性能结果大致相同，但钢渣掺量的影响大于粉煤灰掺量。

2.2 抗压强度极差分析

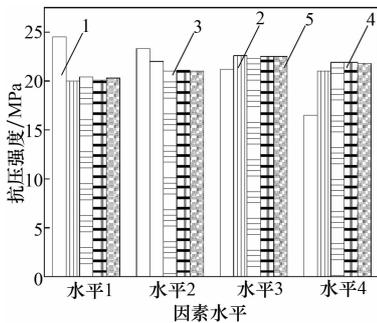
图 1 为各因素对透水混凝土抗压强度的影响。由图 1 可知：目标孔隙率对抗压强度的极差为 8.0。当孔隙率为 15% 时，抗压强度达到最高值，为 24.5 MPa；而当孔隙率增加至 24% 时，抗压强度降至最低值，仅为 16.5 MPa，下降幅度达 32.7%。

表4 正交试验结果

编号	目标孔隙率(A)/%	有效孔隙率(B)/%	抗压强度(C)/MPa	抗折强度(D)/MPa	透水系数(E)/(mm·s ⁻¹)
1 [#]	15	16.2	19.7	3.6	5.6
2 [#]	15	12.9	23.9	4.2	2.9
3 [#]	15	12.7	28.8	4.7	2.7
4 [#]	15	13.1	25.4	3.5	2.2
5 [#]	18	15.8	23.1	3.7	4.7
6 [#]	18	17.3	24.5	3.6	4.9
7 [#]	18	16.9	23.3	3.5	5.1
8 [#]	18	15.2	22.4	3.2	4.3
9 [#]	21	18.2	20.9	3.3	6.2
10 [#]	21	18.6	22.3	3.4	6.8
11 [#]	21	19.1	21.5	3.5	7.0
12 [#]	21	17.0	20.2	3.0	6.2
13 [#]	24	23.4	16.4	2.9	8.7
14 [#]	24	23.7	17.1	2.7	9.1
15 [#]	24	22.1	16.7	2.8	8.1
16 [#]	24	20.2	15.8	2.6	7.8

表5 正交试验极差分析

指标	抗压强度/MPa					抗折强度/MPa					透水系数/(mm·s ⁻¹)					有效孔隙率/%				
	目标孔隙率(A)/%	水胶比(B)	钢渣掺量(C)/%	锂渣掺量(D)/%	粉煤灰掺量(E)/%	目标孔隙率(A)/%	水胶比(B)	钢渣掺量(C)/%	锂渣掺量(D)/%	粉煤灰掺量(E)/%	目标孔隙率(A)/%	水胶比(B)	钢渣掺量(C)/%	锂渣掺量(D)/%	粉煤灰掺量(E)/%	目标孔隙率(A)/%	水胶比(B)	钢渣掺量(C)/%	锂渣掺量(D)/%	粉煤灰掺量(E)/%
水平1	24.5	20.0	20.4	20.1	20.3	4.0	3.4	3.3	3.2	3.3	3.4	6.3	6.3	6.5	6.2	13.7	18.4	18.2	18.5	18.0
水平2	23.3	22.0	21.0	21.1	21.0	3.5	3.5	3.4	3.5	3.4	4.8	5.9	5.5	5.7	5.5	16.3	18.1	17.0	17.7	17.1
水平3	21.2	22.6	22.3	22.5	22.5	3.3	3.6	3.5	3.6	3.6	6.6	5.7	5.6	5.5	5.6	18.2	17.7	17.5	16.8	17.6
水平4	16.5	21.0	21.9	21.9	21.8	2.8	3.1	3.3	3.3	3.4	8.4	5.1	5.7	5.4	5.8	22.4	16.4	18.0	17.7	17.9
极差	8.0	2.6	1.9	2.4	2.2	1.3	0.6	0.2	0.4	0.3	5.1	1.2	0.9	1.1	0.7	8.6	2.0	1.3	1.6	1.0



1—目标孔隙率; 2—水胶比; 3—钢渣掺量; 4—锂渣掺量; 5—粉煤灰掺量。

图1 各因素对透水混凝土抗压强度的影响

由此可见,目标孔隙率对抗压强度的影响最为显著,且随着孔隙率的增加,抗压强度呈现出线性

下降的趋势。这是因为密实度与抗压强度呈正相关关系,随着孔隙率的增大,混凝土的密实度降低,骨料之间的黏结力和界面性能减弱,从而导致裂缝更容易扩展,最终使抗压强度降低。

水胶比对抗压强度的极差为2.6。当水胶比为0.26时,抗压强度为20 MPa;而当水胶比增至0.30时,抗压强度上升至22.6 MPa,增幅达13%。当水胶比范围为0.26~0.28时,抗压强度随着水泥水化程度及流动性的增强而逐渐增加。然而,当水胶比达到0.30时,抗压强度达到峰值。若水胶比过高,水泥将过度水化,水泥浆会在底部堆积,从而使上层的水泥浆流动性增加,进而导致强度下降。

锂渣掺量对抗压强度的极差为 2.4。当锂渣掺量为 20% 时, 抗压强度达到最高值 22.5 MPa, 较基准提升了 11.9%。锂渣作为一种掺合料, 其细小颗粒能够有效填充粗骨料之间的空隙, 发挥微填充作用, 从而改善透水混凝土的密实性并减少孔隙率, 进而增强其抗压强度。经过 28 d 的养护, 锂渣中的 SiO_2 和 Al_2O_3 与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生化学反应, 生成水化硅酸钙(C-S-H)和水化铝酸钙(C-A-H)凝胶。这些凝胶不仅有助于填充混凝土中的空隙, 提升其密实度, 还能进一步增强混凝土的微观结构稳定性和力学性能。然而, 随着锂渣掺量的增加, 水泥中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的消耗量也随之增加。由于水泥含量减少, 水泥的水化速率变慢, 锂渣的二次水化反应减缓, 从而限制了抗压强度的进一步提升。

粉煤灰掺量对抗压强度的极差为 2.2。当粉煤灰掺量为 10% 时, 抗压强度达到峰值 22.5 MPa, 较基准提升了 10.8%。水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与粉煤灰中的 SiO_2 和 Al_2O_3 反应产生的二次水化产物能够促进胶凝材料的硬化, 从而提高透水混凝土的强度。然而, 当粉煤灰掺量超过 10% 时, 过多的粉煤灰颗粒间可能发生团聚现象, 形成较大的无效孔隙, 降低透水混凝土的强度。

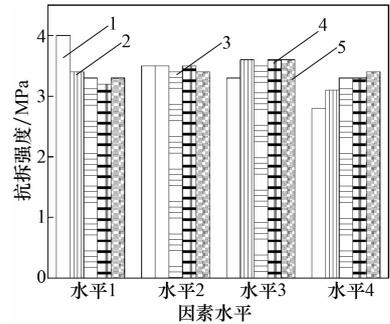
钢渣掺量对抗压强度的极差为 1.9。当钢渣掺量为 10% 时, 透水混凝土的抗压强度达到最大值 22.3 MPa, 较对照组提高了 8.5%。钢渣粉能够填充试件内部空隙, 提高密实度, 增强内部黏结力, 从而提高抗破坏能力。然而, 过量的钢渣粉会减少水泥的用量, 导致强度下降。

综合分析表明, 影响抗压强度的因素按影响程度排列依次: 目标孔隙率 > 水胶比 > 锂渣掺量 > 粉煤灰掺量 > 钢渣掺量。结合抗压强度的表现, 最佳的透水混凝土配比为: 目标孔隙率为 15%, 水胶比为 0.30, 钢渣掺量为 10%, 锂渣掺量为 20%, 粉煤灰掺量为 10%。

2.3 抗折强度极差分析

图 2 为各因素对透水混凝土抗折强度的影响。由图 2 可知: 透水混凝土的抗压强度与抗折强度呈现出相似的变化规律, 二者具有较强的正相关性。综合考虑影响抗折强度的各项因素, 透水混凝土的最佳配

合比为: 目标孔隙率为 15%, 水胶比为 0.30, 钢渣掺量为 10%, 锂渣掺量为 20%, 粉煤灰掺量为 10%。

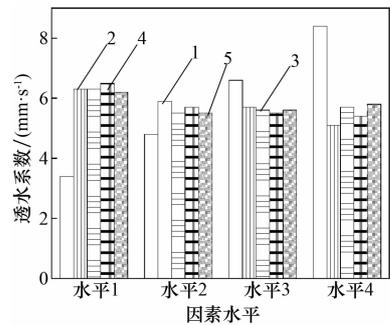


1—目标孔隙率; 2—水胶比; 3—钢渣掺量; 4—锂渣掺量; 5—粉煤灰掺量。

图 2 各因素对透水混凝土抗折强度的影响

2.4 透水系数极差分析

图 3 为各因素对透水混凝土透水性能的影响。由图 3 可知: 目标孔隙率对透水系数的极差为 5.1。随着目标孔隙率的增加, 试块内部的孔隙数量增多, 孔隙间的连通性增强, 水流路径更加畅通, 从而有效提升了透水系数。当目标孔隙率达到 24% 时, 透水系数达到最大值 8.4 mm/s, 相较于孔隙率为 15% 的试块, 透水系数提高了 147%。



1—目标孔隙率; 2—水胶比; 3—钢渣掺量; 4—锂渣掺量; 5—粉煤灰掺量。

图 3 各因素对透水混凝土透水性能的影响

水胶比对透水系数的极差为 1.2。当水胶比从 0.26 提高到 0.32 时, 透水系数从 6.3 mm/s 下降至 5.1 mm/s, 下降幅度为 19%。这一变化反映了水泥的水化程度及其浆体流动性对混凝土孔隙结构的影响。当水胶比低于 0.28 时, 水泥未能完全水化, 孔隙率较高, 因此透水性较好; 当水胶比范围为 0.28~0.30 时, 水泥水化充分, 水泥浆体流动性增强, 从而提高了混凝土的密实度, 导致透水系数降低; 当水胶比超过 0.3 时, 水泥浆体体积较大, 底部的水泥浆积聚, 连通孔隙减少, 进

一步降低了透水系数。

锂渣掺量对透水混凝土透水系数的极差为1.5。随着锂渣掺量的增加,透水系数降低。锂渣的密度比水泥小,在等质量替代水泥时,掺有锂渣的水泥浆体积比未掺锂渣的基准组大。随着锂渣掺量的增加,水泥浆体积增大,孔隙率减少,从而导致透水系数下降。

钢渣掺量对透水混凝土透水系数的极差为0.9。透水系数随钢渣掺量的变化呈先降后升的趋势。当钢渣掺量为5%时,透水系数最低,为5.5 mm/s,较基准组下降了14.3%。在0~5%掺量区间内,钢渣能够填充孔隙,减少连通孔隙,从而降低透水系数。当钢渣掺量超过5%后,过量的钢渣减少了水泥含量,降低了浆体流动性并减弱了骨料间的黏结力,最终导致透水系数回升。

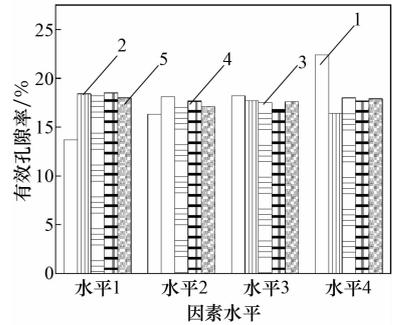
粉煤灰掺量对透水混凝土透水系数的极差为0.7。随着粉煤灰掺量的增加,透水系数呈现先下降后上升的趋势。当粉煤灰掺量为5%时,透水系数最低,为5.5 mm/s,较基准组降低了11.3%。水泥水化过程中产生的Ca(OH)₂与粉煤灰中的SiO₂和Al₂O₃反应生成水化硅酸钙和水化铝酸钙凝胶,这些产物能够有效填充孔隙,进而降低孔隙率和透水系数。然而,当粉煤灰掺量超过5%时,二次水化产物达到饱和,过多的粉煤灰会覆盖在骨料表面,从而降低黏结力和密实度,最终导致透水系数回升。

综上所述,透水系数受各因素的影响程度依次:目标孔隙率>水胶比>锂渣掺量>钢渣掺量>粉煤灰掺量。综合考虑透水系数的影响,透水混凝土的最佳配合比组合为目标孔隙率为24%,水胶比为0.26,钢渣掺量为0,锂渣掺量为0,粉煤灰掺量为0。

2.5 有效孔隙率极差分析

图4为各因素对透水混凝土抗折强度的影响。由图4可知:透水混凝土的有效孔隙率与透水系数之间呈现出显著的正相关关系。随着有效孔隙率的增加,孔隙间的连通性得到改善,水流路径变得更加通畅,从而提高了透水系数。有效孔隙率对透水性具有至关重要的影响:孔隙数量的增加不仅提升了水的流动性,还缩短了水分在混凝土中的滞留时间,进一步增强了透水性能。综合考虑有效孔

隙率的影响因素,透水混凝土的最佳配合比为目标孔隙率为24%,水胶比为0.26,钢渣掺量为0,锂渣掺量为0,粉煤灰掺量为0。



1—目标孔隙率;2—水胶比;3—钢渣掺量;4—锂渣掺量;5—粉煤灰掺量。

图4 各因素对透水混凝土有效孔隙率的影响

2.6 功效系数法分析

在透水混凝土领域,功效系数法是一种常用的综合评估多目标优化指标的方法^[15],被广泛用于透水混凝土的性能优化中。其基本公式:

$$K_{ij} = \gamma_{ij} / \gamma_{\max} \quad (1)$$

$$K_i = \sqrt[n]{(K_{i1} \times K_{i2} \times \dots \times K_{in})} \quad (2)$$

式中: K_{ij} 为第*i*组试验第*j*个指标的功效系数; γ_{ij} 为第*i*组试验第*j*个指标的实际测量值; γ_{\max} 为16组试验中第*j*个指标的最大测量值; K_i 为第*i*组试验的综合功效系数; n 为被分析指标的数量。

综合分析透水混凝土的抗压性能和透水性能,结果如表6所示。由表6可知:11#的 K_i 值最大,为0.75,因此11#的综合性能最佳。透水混凝土最佳配合比组合为目标孔隙率为21%,水胶比为0.3,钢渣掺量为0,锂渣掺量为10%,粉煤灰掺量为15%。

2.7 SEM分析

图5为1#、15#、11#和4#透水混凝土断面的SEM分析结果,其中图5(a)为对照组,未添加任何矿物掺合料的透水混凝土。由图5可知:基体中孔隙较多,结构呈现较大的松散性。水泥浆体未能有效填充骨料之间的空隙,且二次水化反应不充分,导致混凝土密实度较低。这种微观结构特征会降低透水混凝土的力学性能和耐久性。图5(b)为添加了5%钢渣和30%锂渣的透水混凝土。扫描结果表明,钢渣和锂渣与骨料表面黏结良好,有效填充了孔隙并改善了水泥基体的微观结构。锂渣的

表 6 正交试验结果综合分析

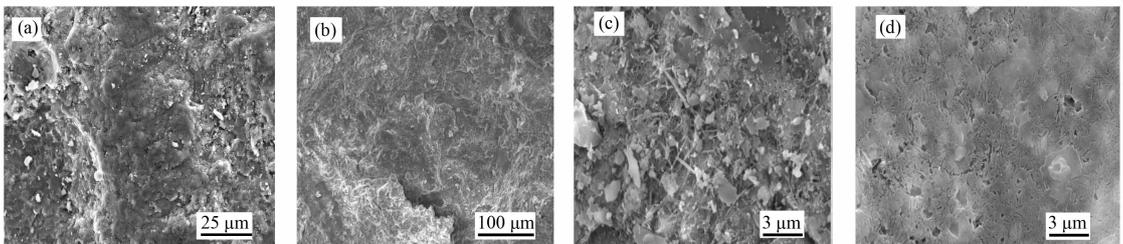
编号	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	透水系数/(mm·s ⁻¹)	K_{11}	K_{12}	K_{13}	K_i
1 [#]	19.7	3.6	5.6	0.68	0.77	0.62	0.69
2 [#]	23.9	4.2	2.9	0.83	0.85	0.32	0.62
3 [#]	28.8	4.7	2.7	1.00	1.00	0.30	0.67
4 [#]	25.4	3.5	2.2	0.88	0.71	0.24	0.54
5 [#]	23.1	3.7	4.7	0.80	0.75	0.52	0.69
6 [#]	24.5	3.6	4.9	0.85	0.73	0.54	0.71
7 [#]	23.3	3.5	5.1	0.81	0.81	0.56	0.70
8 [#]	22.4	3.2	4.3	0.78	0.69	0.47	0.63
9 [#]	20.9	3.3	6.2	0.73	0.67	0.68	0.70
10 [#]	22.3	3.4	6.8	0.77	0.75	0.75	0.75
11 [#]	21.5	3.5	7.0	0.75	0.73	0.77	0.75
12 [#]	20.2	3.0	6.2	0.70	0.65	0.68	0.67
13 [#]	16.4	2.9	8.7	0.57	0.58	0.96	0.70
14 [#]	17.1	2.7	9.1	0.59	0.54	1.00	0.70
15 [#]	16.7	2.8	8.1	0.58	0.60	0.89	0.67
16 [#]	15.8	2.6	7.8	0.55	0.56	0.86	0.64

火山灰效应显著促进了硅酸三钙的水化反应,生成了大量水化硅酸钙和水化铝酸钙凝胶,进一步填补了基体中的微小孔隙,增强了混凝土的密实度。钢渣中的矿物成分,如硅酸盐和铝酸盐,也能与水泥中的水化产物发生反应,优化了混凝土微观结构并提高了强度。图 5(c)为添加了 15% 粉煤灰和 10% 锂渣的透水混凝土。在该组样本中,基体表面显现出较多的针棒状钙矾石,这些矿物相的形成表明水化过程中的硫酸盐反应对微观结构有积极影响。随着水化反应的推进,水泥中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与掺合料中的矿物成分发生二次水化反应,生成了大量的水化硅酸钙和水化铝酸钙,这些产物有效消耗了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,降低了水泥基体中的游离氢氧化钙含量,促进了结构的致密化。此外,粉煤灰和锂渣的协同效应显著增强了混凝土的微观结构稳定性。图 5(d)为添加了 15% 钢渣、30% 锂渣和 15% 粉煤灰的

透水混凝土。在三掺条件下,透水混凝土基体表面存在细小裂缝和气孔,但水化硅酸钙和水化铝酸钙凝胶在基体表面均匀分布。此外,粉煤灰、钢渣和锂渣的微集料填充效应加强了水泥浆与粗骨料之间的黏结力,从而改善了透水混凝土的宏观力学性能。综上所述,钢渣、锂渣和粉煤灰的协同作用有效改善了透水混凝土的密实度和力学性能,促进了水化反应并形成了致密的微观结构,从而增强了整体性能。

3 结 论

(1) 目标孔隙率、水胶比和锂渣掺量是影响透水混凝土的抗压强度、抗折强度及透水性能的主要因素,而钢渣和粉煤灰的影响相对较小。适量掺入锂渣、钢渣和粉煤灰能显著增强透水混凝土的抗压强度,但可能会导致其透水性和有效孔隙率有所下降。



编号: (a) 1[#]; (b) 15[#]; (c) 11[#]; (d) 4[#]

图 5 不同掺料下透水混凝土的断面 SEM 分析

(2) 在降雨量较大且排水要求较高的地区, 透水混凝土的最佳配合比: 目标孔隙率为 24%、水胶比为 0.28, 钢渣掺量为 10%、锂渣掺量为 10%、粉煤灰掺量为 15%; 当对透水混凝土路面有较高承载能力要求时, 最佳配合比: 目标孔隙率为 15%、水胶比为 0.3, 钢渣掺量为 10%、锂渣掺量为 20%、粉煤灰掺量为 10%; 从固废替代效率的角度考虑, 最佳配合比: 目标孔隙率为 15%、水胶比为 0.32, 钢渣掺量为 15%、锂渣掺量为 30%、粉煤灰掺量为 15%。

(3) 基于功效系数法, 11[#]试块的 K_a 值最大, 达到 0.75, 因此其综合性能最优。该组试块的配合比: 目标孔隙率为 21%, 水胶比为 0.3, 钢渣掺量为 0%, 锂渣掺量为 10%, 粉煤灰掺量为 15%。

(4) 通过 SEM 分析发现, 未添加掺合料的透水混凝土孔隙率较高, 结构松散, 力学性能较差。而添加钢渣、锂渣和粉煤灰等固废材料后, 能有效填充孔隙, 并与水泥中的水化产物发生反应, 从而优化混凝土微观结构并提高其强度。

参考文献:

[1] 包永鹏. 工业固废资源化综合利用的策略与实践[J]. 选煤技术, 2024, 52(3): 9-16.

[2] 王晓青. 基于海绵城市理念的城市道路优化设计[J]. 大众标准化, 2024(22): 74-76.

[3] 黄金龙, 李景芳. 透水混凝土路面铺装的发展现状[J/OL]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(33): 64-66. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Y2E-z2Sa5COspDDF45NdkIVOpJ6cAW2NDtF6WR6Ax6NcDUSIAD3DamNxdDvgfY9W9RKNx9LylRS0zNJTT EIN5WO-4qFzUIvsFZzFFa-ykMGApc2FGaJ5RNzRu>

ZmoH8X6YrZi2pA4f2MeWRBEOyC8JWITRLSZwVgxtM8rFG-PU3cFo4dUQLqEIA = = &uniplatform = NZKPT & language = CHS.

[4] 蒙华良, 黄禧, 陈阳, 等. 工业固废制备低碳胶凝材料的研究进展[J]. 水泥工程, 2023(5): 75-78; 94.

[5] 林永权, 邓恺, 张宾. 几种典型高钙工业固废固碳技术研究现状及发展趋势[J]. 中国水泥, 2024(10): 49-53.

[6] 李梦娟, 李博楠. 透水混凝土基层抗堵塞试验设计及微观机理观测[J]. 工程建设, 2024, 56(7): 6-9.

[7] 石丽云. 矿物掺合料对透水混凝土硬化性能及微观结构的影响[J]. 福建建材, 2023(6): 9-12.

[8] 张延年, 王众新, 李志军, 等. 复合掺合料对混凝土的改性试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2023, 39(6): 1100-1107.

[9] 张银松, 石贤增, 赵星晨, 等. 钢渣粉-玄武岩纤维对透水混凝土力学及透水性能的影响[J]. 湖北理工学院学报, 2024, 40(5): 46-50; 62.

[10] 韦祝, 付希尧, 张建, 等. 基于正交试验的再生透水混凝土路用性能研究[J]. 新型建筑材料, 2024, 51(2): 17-22.

[11] 黄嘉祺, 沈卫国, 吕振杰, 等. 碳激发钢渣生态透水混凝土的制备与研究[J]. 武汉理工大学学报, 2018, 40(3): 17-21.

[12] 丁伟正, 朱洪威, 程军旺. 基于正交试验的矿物掺合料透水混凝土性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2024(2): 6-10.

[13] 郭继东. 基于正交试验的透水混凝土强度和透水性影响研究[J]. 工程技术研究, 2023, 8(20): 99-103.

[14] YANGJ, JIANG G L. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(3): 381-386.

[15] 茅兵海. 基于正交试验设计的透水混凝土物理力学性能研究[J]. 路基工程, 2021(1): 35-40.

(上接第 25 页)

[9] 宋福春, 杨子豪, 付聿旻, 等. 基于 LSTM 神经网络和残余力向量法的结构损伤识别[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2023, 39(5): 872-879.

[10] 曹震雄, 翁顺, 李佳靖, 等. 基于时域残余力向量特征分解的结构损伤识别方法研究[J]. 振动工程学报, 2023, 36(6): 1516-1526.

[11] GUYAN R J. Reduction of stiffness and mass matrices[J]. AIAA Journal, 1965, 3(2): 380.

[12] WENG S, TIAN W, ZHU H P, et al. Dynamic condensation approach to calculation of structural responses and response sensitivities[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 88: 302-317.

[13] XIA Y, LIN RM. A new iterative order reduction (IOR) method for eigensolutions of large structures[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2004, 59(1): 153-172.