

环氧树脂和耐碱玻璃纤维改性透水混凝土性能研究

冯神赐, 朱洪威, 丁伟正

(江西理工大学 土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 透水混凝土作为一种具有蜂窝状结构的多孔隙生态型混凝土, 力学性能普遍偏低, 因此在制备过程中引入不同掺量的环氧树脂[0%、2%、4%、6% (质量分数)]和耐碱玻璃纤维[0.1%、0.2%、0.3%、0.4% (体积分数)], 表征其力学性能、透水性能和微观形貌, 研究两者协同效应。研究表明: 单掺4%环氧树脂、0.3%耐碱玻璃纤维时, 抗压强度分别达到24.03 MPa和23 MPa, 抗折强度分别达到3.43 MPa和3.93 MPa, 透水系数为3.73 mm/s和3.59 mm/s, 孔隙率为13.72%和13.37%, 复掺环氧树脂(4%)和耐碱玻璃纤维(0.3%)时, 抗压强度和抗折强度最高达27.1 MPa和4.37 MPa, 透水系数和孔隙率降低至2.42 mm/s和11.08%; SEM分析发现, 未改性透水混凝土存在大量裂痕与孔洞, 环氧树脂可形成薄膜, 减少裂痕和孔洞, 纤维能够跨接孔洞形成网状结构, 延缓裂缝扩展, 复掺时, 环氧树脂包覆纤维, 形成薄膜, 增强材料的性能和黏结性。本文的研究在于制备出一种高性能透水混凝土, 为扩大透水混凝土在工程上的实际应用以及提供借鉴和技术参考。

关键词: 环氧树脂; 耐碱玻璃纤维; 透水混凝土; 力学性能; 透水性能; 微观形貌

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)05-0014-08

doi:10.13402/j.gcjs.2025.05.056

Study on the performance of epoxy resin and alkali-resistant glass fibermodified permeable concrete

FENG Shenci, ZHU Hongwei, DING Weizheng

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

Abstract: As a kind of porous ecological concrete with honeycomb structure, permeable concrete has low mechanical properties, different amounts of epoxy resin [0%, 2%, 4%, 6% (mass fraction)] and alkali-resistant glass fiber [0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4% (volume fraction)] are introduced into the preparation of permeable concrete, and their mechanical properties, permeability and micromorphology are characterized to study the synergistic effect of the two. Research shows that when 4% epoxy resin and 0.3% alkali-resistant glass fiber are added alone, the compressive strength reaches 24.03 MPa and 23 MPa respectively, the flexural strength reaches 3.43 MPa and 3.93 MPa respectively, the permeability is 3.73 mm/s and 3.59 mm/s, and the porosity is 13.72% and 13.37%. When epoxy resin (4%) and alkali-resistant glass fiber (0.3%) are added together, the compressive strength and flexural strength reach a maximum of 27.1 MPa and 4.37 MPa, and the permeability and porosity are reduced to 2.42 mm/s and 11.08%; SEM analysis found that there are a large number of cracks and holes in the unmodified permeable concrete. Epoxy resin can form a thin film to reduce cracks and holes. Fibers can bridge the holes to form a network structure and delay the expansion of cracks. When compounded, epoxy resin coats the fibers to form a thin film, enhancing the performance and cohesiveness of the material. The purpose of this paper is to prepare a high-performance permeable concrete, which can provide reference and technical reference for expanding the practical

收稿日期: 2024-05-31

作者简介: 冯神赐(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的研究。

application of permeable concrete in engineering.

Key words: epoxy resin; alkali-resistant fiberglass; permeable concrete; mechanical properties; water permeability; microstructure

近年来, 随我国城市化的快速推进, 传统城市发展模式下的混凝土路面及沥青路面等硬化路面的普及, 使人们交通出行更加便捷, 促进社会的经济发展。但是, 由于城市化建设过程中大量采用硬化路面, 已经逐步覆盖城市形成近乎不透水的地表, 对自然水循环的正常运行造成严重阻碍, 在雨天会出现路面雨水堆积现象, 容易造成城市内涝、交通崩溃和设施毁坏等一系列问题。透水混凝土作为一种由粗骨料表面包覆薄层水泥浆相互黏结而形成具有蜂窝状结构的多孔隙生态型混凝土^[1-3], 可以有效地促进地表水的渗透, 改善水循环, 有利于维持水文循环平衡, 在强降雨期间, 能吸收渗透部分雨水达到缓解雨水径流的压力, 降低城市洪涝灾害的发生几率。然而, 因透水混凝土不含细骨料而存在强度以及耐久性较低的缺点, 普遍应用于人行道, 公园等轻量级道路。因此, 近些年国内外学者对于透水混凝土的研究方向主要在于提高透水混凝土的力学性能和耐久性, 增强渗透性能^[4]。

唐永鑫等^[5]研究环氧树脂和长余辉发光材料对透水混凝土的力学性能、微观形貌和发光性能的影响, 发现环氧树脂质量分数为 4% 时, 抗压强度和抗折强度提升效果最佳, 裂缝和气孔显著减少, 发光效果良好。张巨松等^[6]研究环氧树脂、骨胶比和矿物掺合料对透水混凝土力学性能和耐久性的影响, 发现掺入环氧树脂能有效减少透水混凝土开裂, 骨胶比为 3.9 时性能最佳, 硅灰、减水剂和矿物掺合料复合掺入显著提高了抗压强度。柏青松等^[7]研究玻璃纤维长度与掺量对混凝土

性能的影响, 结果表明, 适量且适当长度的玻璃纤维可显著提升抗压强度, 但随玻璃纤维掺量增加, 混凝土流动性逐渐降低。

本文通过引入环氧树脂和耐碱玻璃纤维, 制备一系列环氧树脂和耐碱玻璃纤维单掺及复掺下的透水混凝土试件, 研究环氧树脂和耐碱玻璃纤维对透水混凝土力学性能、透水性能、孔隙率和微观形貌上的影响, 以期制备出性能优异和适用范围更广泛的透水混凝土。

1 原材料及实验方法

1.1 实验原材料

环氧树脂为深圳某公司生产的水性环氧树脂 F0704 型和水性环氧固化剂 F0705 型, 具体各项指标如表 1 所示; 耐碱玻璃纤维为安徽某公司生产的 12 mm 耐碱玻璃纤维短切丝, 具体各项指标如表 2 所示; 水泥为江西某公司生产的 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥, 具体物理性能指标如表 3 所示; 粗骨料选用粒径为 5 ~ 10 mm 的玄武岩碎石, 孔隙率为 45.2%, 表观密度为 2 534 kg/m³, 堆积密度为 1 389 kg/m³; 聚羧酸减水剂的掺量为 0.8% (占水泥质量的百分比), 减水率为 18% ~ 25%; 硅灰为上海某公司生产的实验用高活性硅灰, $w(\text{SiO}_2) \geq 98\%$; 水为自来水。

1.2 透水混凝土配合比设计

严格遵守《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T 135—2009)要求, 采用体积法计算透水混凝土配合比, 设定水胶比 0.3, 硅灰和减水剂掺量分别为 8% 和 0.8%。

表 1 环氧树脂的各项指标

种类	环氧当量/ (g·mol ⁻¹)	活泼氢当量/ (g·mol ⁻¹)	固含量/%	黏度/ (MPa·s)	pH 值	比重
环氧树脂	400 ~ 800	—	50 ± 3	< 1 000	2 ~ 7	1.01 ~ 1.08
环氧固化剂	—	260 ± 60	44 ± 2	> 2 000	8 ~ 11	1.00 ~ 1.08

表 2 耐碱玻璃纤维的各项指标

单丝直径/μm	弹性模量/GPa	密度/(g·cm ⁻³)	抗拉强度/MPa	极限延伸率/%
15	72	2.7	1 760	3.5

表 3 水泥的物理性能指标

比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	凝结时间/min		抗压强度/MPa		弯拉强度/MPa	
		初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
332	3.1	211	332	25.65	0.3	5.4	7.9

首先,通过改变环氧树脂和耐碱玻璃纤维的掺量,制备一系列不同含量环氧树脂 [0%、2%、4%、6% (质量分数)] 透水混凝土和耐碱玻璃纤维 [0.1%、0.2%、0.3%、0.4% (体积分数)] 透水混凝土,配合比如表 4、5 所示,对两者透水混凝土力学性能、透水性能、孔隙率和微观形貌进行表征。其次,在此研究基础上,选取环氧树脂(2%、4%)和耐碱玻璃纤维(0.2%、0.3%)两组较优配合比进行复掺试验,配合比如表 6 所示,进一步研究两者协同作用下对透水混凝土性能的影响。

1.3 试件制备

试验采用三次投料法,使用 SJD60 单卧轴强制式搅拌机。此方法能够增强胶凝材料的分散性和水化程度,提高骨料和浆体界面的密实度,增强透水混凝土的结构的整体性,并且能保证其良好的透水性能,从而提高透水混凝土的综合性能。三次投料法的材料投放顺序如图 1 所示。

1.4 试件成型与养护

本文实验试件制作采取手工振捣法,抗压试

件采用尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm 立方体模具,抗折试件采用尺寸为 100 mm × 100 mm × 400 mm 长方体模具,每个模具分 3 次注入透水混凝土拌合料,每次浇筑的透水混凝土集料不得超过模具高度的 1/2,每层先从贴近模具壁的四周开始环绕振捣,逐渐靠近中心,再从中心扩散至四周,每层需振捣平整,成型面用捣棒滚压平整,再通过抹刀检平。

试件成型后,在模具的表面覆盖保鲜膜密封养护 24 h,等试件具有一定强度后进行脱模,将试件放入养护箱,在 20 ℃,95% 湿度条件下养护 28 d,最终得到透水混凝土试件。

1.5 透水混凝土性能测试及形貌表征

1.5.1 力学性能测试

严格遵守《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420—2020)要求,抗压强度测试时,将养护完成的透水混凝土抗压试件成型时的顶面朝上,放置在全自动混凝土压力试验机上进行抗压强度测试,加载速率为 0.5 MPa/s,每组 3 个透水混凝土试件,测试 3 次,测得的抗压强度值需



图 1 透水混凝土三次投料法

表 4 环氧树脂透水混凝土配合比

编号	环氧树 脂/%	环氧固化 剂/%	水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粗骨料/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	硅灰/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	用水量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	减水剂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水胶比
1	0	0	454.50	1361.22	36.36	136.35	4.09	0.3
2	2	1	454.50	1361.22	36.36	136.35	4.09	0.3
3	4	2	454.50	1361.22	36.36	136.35	4.09	0.3
4	6	3	454.50	1361.22	36.36	136.35	4.09	0.3

表 5 耐碱玻璃纤维透水混凝土配合比

编号	耐碱玻璃 纤维/%	水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粗骨料/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	硅灰/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	用水量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	减水剂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水胶比
1	0.1	454.50	1361.22	36.36	136.35	4.09	0.3
2	0.2	454.50	1361.22	36.36	136.35	4.09	0.3
3	0.3	454.50	1361.22	36.36	136.35	4.09	0.3
4	0.4	454.50	1361.22	36.36	136.35	4.09	0.3

表 6 耐碱玻璃纤维—环氧树脂透水混凝土配合比

编号	环氧树脂/ 脂/%	耐碱玻璃 纤维/%	水泥/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	粗骨料/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	硅灰/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	用水量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	减水剂/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	水胶比
1	2	0.2	454.50	1361.22	36.36	136.35	4.09	0.3
2	2	0.3	454.50	1361.22	36.36	136.35	4.09	0.3
3	4	0.2	454.50	1361.22	36.36	136.35	4.09	0.3
4	4	0.3	454.50	1361.22	36.36	136.35	4.09	0.3

乘以强度折减系数(0.95), 取 3 个测值的平均值为最终结果。抗折强度测试时, 将养护完成的透水混凝土抗折试件置于混凝土失效试验机的两支座上方, 使得试件的几何中心线与加载装置保存同一垂线, 加载速率为 0.05 MPa/s, 直至试样明显被破坏后停止, 每组测试 3 个试件, 取 3 个测值的平均值为最终结果。

1.5.2 透水性能测试

采用变水头法测定透水系数, 参考 YANG 等^[10]自主研发的透水系数测定仪并进行优化, 自制透水仪器设备如图 2 所示。使用防水的密封胶泥将透水混凝土试件与量筒接触处的缝隙密封严实, 外部缠绕防水胶带, 确保水流在试件上下单向渗透。通过往量筒加入水量达到 220 mm 刻度线以上, 等到水位线接触刻度线开始计时, 直到水位线达到 20 mm 刻度线时停止计时, 记录时间 t , 每组两个试件, 测试 2 次取平均值, 透水系数按照公式(1)计算:

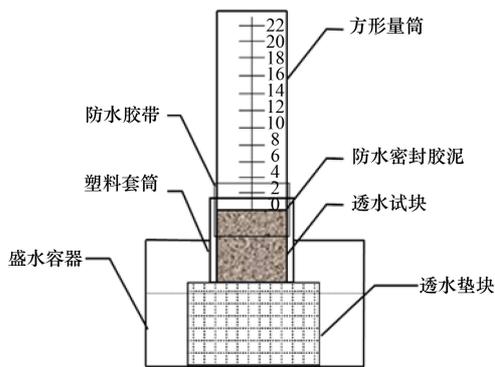


图 2 透水仪器示意图

$$K = \frac{Q}{At} \quad (1)$$

式中: K 为透水系数, mm/s ; t 为透水时间, s ; Q 为试块在 t 时间内的透水量, mm^3 ; A 为试块的上表面积, mm^2 。

1.5.3 有效孔隙率测试

严格遵守《透水水泥混凝土路面技术规程》

(CJJ/T 135—2009) 的规范对透水混凝土试件进行测试。将养护完成的试件放入 $(100 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的烘干箱中烘至恒重, 取出试件放在干燥环境下冷却至室温, 称量其干重 m_1 , 用直尺测量出试件的尺寸并计算出体积 V , 将试件浸泡在水中, 测得试件水中质量 m_2 , 孔隙率计算公式如下式(2)计算:

$$P_e = \left(1 - \frac{m_1 - m_2}{\rho V}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中: P_e 为孔隙率, %; m_1 为试件干重, g ; m_2 为试件在水中的质量, g ; ρ 为水的密度, g/cm^3 ; V 为试件体积, cm^3 。

1.5.4 SEM 分析

采用江西理工大学分析测试中心的场发射扫描电子显微镜(MLA650F 型), 观察并分析透水混凝土试件的断面微观区域形貌。

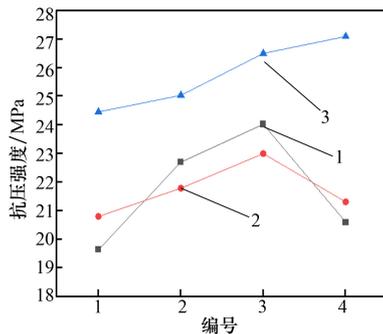
2 结果与讨论

2.1 透水混凝土的力学性能分析

对试件命名, 环氧树脂透水混凝土(ER-PC), 耐碱玻璃纤维透水混凝土(AR-PC), 耐碱玻璃纤维-环氧树脂透水混凝土(AER-PC)。

图 3 为 ER-PC、AR-PC 和 AER-PC 这 3 种透水混凝土的抗压强度图。从图 3 可看出, 随环氧树脂和耐碱玻璃纤维掺量的递增, ER-PC 和 AR-PC 的抗压强度均呈现先升后降的趋势。在环氧树脂掺量为 4% (质量分数)、耐碱玻璃纤维掺量为 0.3% (体积分数) 时, ER-PC 和 AR-PC 的抗压强度均达到最大值, 分别为 24.03、23 MPa, 与未改性的透水混凝土相比, 抗压强度分别提高了 22.35% 和 17.11%; 在环氧树脂掺量为 6%、耐碱玻璃纤维掺量为 0.4% 时, ER-PC 和 AR-PC 的抗压强度均大幅度降低。在环氧树脂与耐碱玻璃纤维复合掺入透水混凝土时, AER-PC 的抗

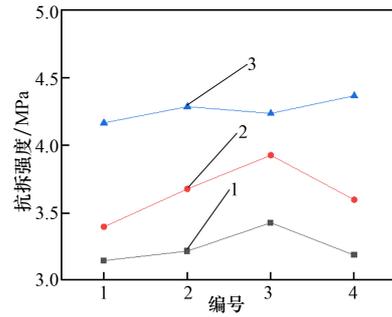
压强度普遍比 ER-PC 和 AR-PC 的抗压强度更高, 呈上升趋势, 在复掺 4% 环氧树脂和 0.3% 耐碱玻璃纤维时, AER-PC 的抗压强度达到最大值为 27.1 MPa, 与未改性的透水混凝土相比, 提升幅度达到最大值 37.98%。从折线斜率分析, 第一段线与第三段线接近平行, 第二段线的斜率更大, 说明环氧树脂和耐碱玻璃纤维协同作用时, 选定某一变量不变的前提下, 环氧树脂掺量的增加对 AER-PC 的抗压强度增强效果更加明显。



1—ER-PC; 2—AR-PC; 3—AER-PC。

图 3 透水混凝土的抗压强度

图 4 为 ER-PC、AR-PC 和 AER-PC 这三种透水混凝土的抗折强度图。从图 4 可看出, 随环氧树脂和耐碱玻璃纤维掺量的递增, ER-PC 和 AR-PC 的抗折强度呈现先升后降的趋势, 在环氧树脂掺量为 4%、耐碱玻璃纤维掺量为 0.3% 时, ER-PC 和 AR-PC 的抗折强度达到最大值, 分别为 3.43、3.93 MPa, 与未改性透水混凝土相比, 抗折强度分别提高 8.89% 和 24.76%; 在环氧树脂掺量为 6%、耐碱玻璃纤维掺量为 0.4% 时, ER-PC 和 AR-PC 的抗折强度均大幅度降低。在环氧树脂与耐碱玻璃纤维复合掺入透水混凝土时, AER-PC 的抗折强度普遍比 ER-PC 和 AR-PC 的抗折强度更高, 曲线呈现波纹型缓慢上升, 在复掺 4% 环氧树脂和 0.3% 耐碱玻璃纤维时, AER-PC 的抗折强度达到最大值 4.37 MPa, 与未改性透水混凝土相比, 提升幅度达到最大值 38.73%。从折线斜率分析, 第一段线与第三段线接近平行, 第二段线的斜率更小, 说明环氧树脂和耐碱玻璃纤维协同作用时, 选定某一变量为定值的前提下, 耐碱玻璃纤维掺量的增加对 AER-PC 的抗折强度增强效果更加明显。



1—ER-PC; 2—AR-PC; 3—AER-PC。

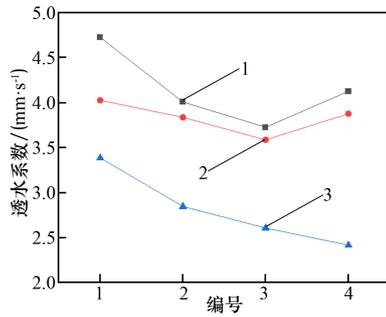
图 4 透水混凝土的抗折强度

由图 3、4 可知, 环氧树脂和耐碱玻璃纤维的适量掺入可以显著提高透水混凝土的抗压强度和抗折强度, 随环氧树脂的质量分数和耐碱玻璃纤维体积分数的递增, ER-PC 和 AR-PC 的抗压强度与抗折强度均出现明显的先升后降趋势。分析原因得出: 适量的环氧树脂可以增加透水混凝土的浆体黏度, 增强骨料之间的黏结力, 提高透水混凝土整体性和密实度, 并且小部分环氧树脂会填充透水混凝土的孔隙与孔洞, 增强透水混凝土框架结构的紧密性从而提升透水混凝土的力学性能; 过量的环氧树脂会导致骨料与水泥浆体结合时, 中间会产生一层环氧树脂薄膜, 降低骨料与泥浆的结合效果, 使骨料在水化过程中更容易脱离, 降低了透水混凝土的整体强度; 此外, 过量的环氧树脂会使泥浆过于浓稠, 降低浆体对骨料的包裹效果, 产生气孔, 影响透水混凝土结构的致密性, 从而降低透水混凝土的强度。

耐碱玻璃纤维因含 ZrO_2 , 保证纤维韧性的同时, 增大其弹性模量和刚度, 分散性更加优秀, 在碱性环境下也能保持良好的性能, 适量的掺入耐碱玻璃纤维可以有效增强透水混凝土的性能。纤维在透水混凝土内部主要呈现三维乱向分布, 与骨料和水泥浆之间搭接, 跨接孔隙与孔洞, 产生加筋和桥联作用, 抑制裂缝的产生和进一步扩伸, 在透水混凝土受荷载时, 能有效承担部分应力, 约束透水混凝土的内部变形, 从而提高了力学性能。过量的掺入耐碱玻璃纤维会导致纤维间出现结团, 大量水泥浆体与纤维团黏结产生压力集中现象, 导致透水混凝土试件在受荷载时, 破坏首先发生在纤维结团的薄弱面。

2.2 混凝土的透水性能分析

图 5 为 ER-PC、AR-PC 和 AER-PC 这 3



1—ER-PC; 2—AR-PC; 3—AER-PC。

图 5 透水混凝土的透水系数

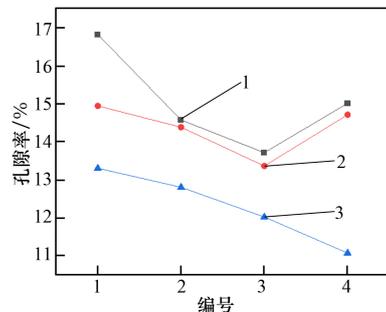
种透水混凝土的透水系数图。

由图 5 可知, 透水混凝土的透水系数均随环氧树脂和耐碱玻璃纤维的掺量增加而呈现先降后升的趋势。在环氧树脂掺量为 4% (质量分数)、耐碱玻璃纤维掺量为 0.3% (体积分数) 时, ER-PC 和 AR-PC 的透水系数达到最低值, 分别为 3.73、3.59 mm/s, AER-PC 的透水系数随着环氧树脂和耐碱玻璃纤维复掺含量的递增而不断下降。

分析原因可知: 适量的环氧树脂会填充透水混凝土的部分孔隙与孔洞, 阻碍水的流通, 并且能增强骨料与水泥浆体的黏结, 从而使透水混凝土的整体结构更加密实, 透水系数因此降低; 当环氧树脂掺量过高, 会形成局部团聚现象, 并吸水膨胀, 形成大量气泡, 导致透水系数升高。适量的纤维能有效填充透水混凝土内部的孔隙, 阻碍水的流通, 同时水泥浆体与部分横跨孔洞的纤维黏结导致堵塞, 会进一步导致透水系数的降低, 过量的纤维会发生结团现象, 阻碍浆体与骨料间的流动胶结, 使得透水系数上升。

2.3 透水混凝土的孔隙率分析

图 6 为 ER-PC、AR-PC 和 AER-PC 这 3 种透水混凝土的孔隙率图。



1—ER-PC; 2—AR-PC; 3—AER-PC。

图 6 透水混凝土的孔隙率

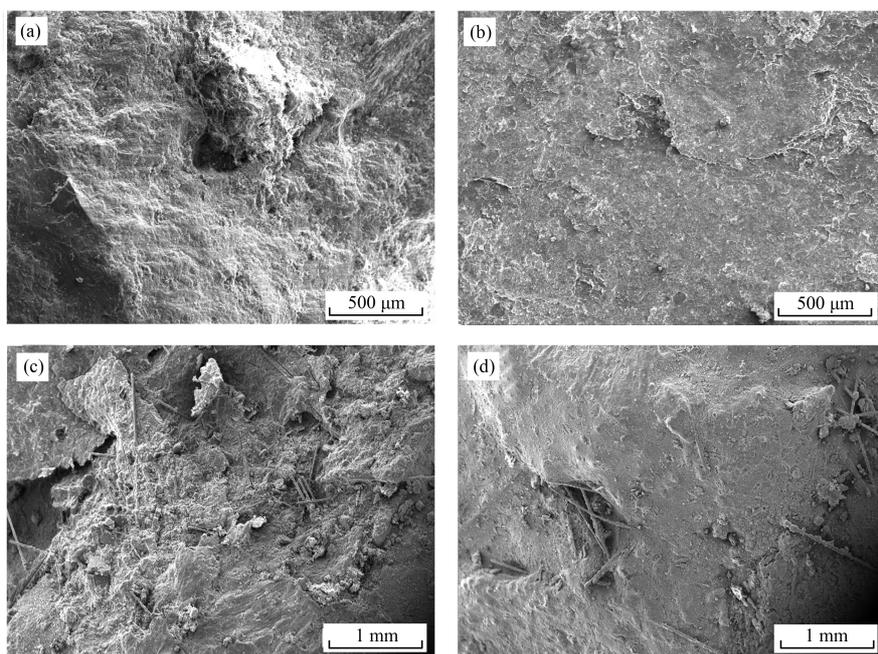
由图 6 可知: 透水混凝土的孔隙率随环氧树脂和耐碱玻璃纤维的掺量增加而呈现先降后升的趋势。在环氧树脂掺量为 4% (质量分数)、耐碱玻璃纤维掺量为 0.3% (体积分数) 时, ER-PC 和 AR-PC 的孔隙率达到最低值, 分别为 13.72% 和 13.37%; AER-PC 的孔隙率随着环氧树脂和耐碱玻璃纤维复掺含量的递增而不断下降。分析原因可知: 掺入适量环氧树脂, 透水混凝土的孔隙被环氧树脂占据, 透水混凝土的结构变得更加密实, 致使孔隙率降低; 掺入过量的环氧树脂时, 骨料受到环氧树脂的覆盖, 水泥砂浆也因含有大量的环氧树脂致使与骨料结合不充分, 在硬化后出现脱落现象, 导致孔隙过多, 孔隙率下降。耐碱玻璃纤维为柔性纤维, 在透水混凝土内部呈三维乱向分布, 适量的掺入能填充透水混凝土部分孔隙通道, 从而降低孔隙率, 当纤维掺量过高, 会发生团聚现象, 增大孔隙率。

2.4 环氧树脂透水混凝土的 SEM 分析

图 7 为透水混凝土的断面 SEM 图。从图 7(a) 中可看出, 未改性的透水混凝土的断面有明显裂痕, 并且有较多明显的孔洞, 整体疏松粗糙, 原因在于水泥浆体水化反应后的黏结力不足。从图 7(b) 中可看出, 在环氧树脂掺量为 4% (质量分数) 时, ER-PC 试件的断面被环氧树脂薄膜完整覆盖, 断面整体平整, 无明显孔洞出现, 裂痕明显减少, 有效改善了透水混凝土的微观形貌, 增强水化产物的结合力, 使透水混凝土在承受荷载时不容易出现裂痕。从图 7(c) 中可看出, 在耐碱玻璃纤维掺量为 0.3% (体积分数) 时, AR-PC 试件内部纤维分散性良好, 跨接孔隙与孔洞, 与胶凝材料水化时结合形成胶凝纤维网, 在受荷载时能共同受力, 有效阻止结构进一步开裂, 保证透水混凝土结构的整体性。从图 7(d) 中可看出, 在环氧树脂(4%)和耐碱玻璃纤维(0.3%)复掺时, 水化产物表面光滑, 环氧树脂包覆作用于耐碱玻璃纤维表面形成致密的有机聚合物薄膜, 在保证纤维性能完善的同时, 能有效增强纤维与骨料和胶凝材料之间的黏结性能, 增强力学性能。

3 结论

(1) 环氧树脂和耐碱玻璃纤维的掺入能有效增



(a) 0% 环氧树脂、0% 耐碱玻璃纤维；(b) 单掺 4% 质量分数环氧树脂；
(c) 单掺 0.3% 体积分数的耐碱玻璃纤维；(d) 复掺 4% 质量分数环氧树脂和 0.3% 体积分数的耐碱玻璃纤维。

图 7 透水混凝土的断面 SEM 图

强透水混凝土的力学性能。在环氧树脂质量分数为 4%、耐碱玻璃纤维体积分数为 0.3% 时，ER-PC 和 AR-PC 试件的抗压强度和抗折强度均达到最大值，对比未改性透水混凝土，抗压强度分别提升 22.35% 和 17.11%，抗折强度分别提升 8.89% 和 24.76%。在环氧树脂与耐碱玻璃纤维复合掺入透水混凝土时，4% 质量分数的环氧树脂和 0.3% 体积分数的耐碱玻璃纤维复掺时，协同改性的效果最佳，AER-PC 试件的抗压强度和抗折强度均达到最大值，对比未改性透水混凝土分别提升 37.98% 和 38.73%。

(2) 透水混凝土的透水系数与孔隙率具有高度关联性。在环氧树脂质量分数为 4%、耐碱玻璃纤维体积分数为 0.3% 时，ER-PC 和 AR-PC 试件的透水系数和孔隙率均达到最低值，对比未改性透水混凝土，透水系数分别降低 21.14% 和 24.1%，孔隙率分别降低 18.48% 和 20.56%。随环两者复掺含量的增加，AER-PC 试件的透水系数与孔隙率呈现大幅度下降趋势。综合分析透水混凝土试件的力学性能与透水性能，环氧树脂的最佳掺量为 4%，耐碱玻璃纤维最佳掺量为 0.3%。

(3) 通过 SEM 分析，未改性透水混凝土的断面会有明显的孔洞和裂痕；在透水混凝土中掺入

质量分数为 4% 的环氧树脂时，可以显著减少孔洞和裂痕的出现，使断面更为平整；在透水混凝土中掺入体积分数为 0.3% 的耐碱玻璃纤维时，能有效阻止结构裂缝扩伸，保证结构的整体性，提高混凝土的力学性能；在透水混凝土中复合掺入环氧树脂(质量分数 4%)和耐碱玻璃纤维(体积分数的 0.3%)时，环氧树脂对耐碱玻璃纤维起保护作用，并且增强纤维与骨料和胶凝材料之间的黏结性能，提高透水混凝土结构的完整性，增强力学性能。

参考文献：

- [1] 张贤超,尹健,池漪. 透水混凝土性能研究综述[J]. 混凝土,2010(12):47-50.
- [2] BOWEN L, RUIXUE H, SONG B, et al. Mechanical performance of concrete strengthened by modified epoxy resin bonded CFRP [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2022, 36(16):1764-1780.
- [3] 唐静,赵玉婷,梁美坤,等. 防堵塞型透水制品的制备与性能研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(4):137-142.
- [4] 张朝辉,王沁芳,杨娟. 透水混凝土强度和透水性影响因素研究[J]. 混凝土,2008(3):7-9.
- [5] 唐永鑫,聂立武. 环氧树脂掺量对发光树脂透水混凝土性能的影响[J]. 应用化学,2022,39(11):1665-1671.

- [6] 张巨松,王华. 有机改性水泥基透水混凝土的性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(3):489-497.
- [7] 柏青松,汪玲,董叶顺. 玻璃纤维长度和掺量对普通混凝土力学性能的影响[J]. 河南科技,2021,40(22):78-80.
- [8] 蒋勇,牛云辉,贾陆军,等. 高强度透水混凝土实验研究[J]. 新型建筑材料,2017,44(3):16-19.
- [9] 林也坚. 增强型聚合物透水混凝土铺装的研究与应用[J]. 山西建筑,2023,49(16):111-114;129.
- [10] YANG J,JIANG G. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials [J]. Cement and Concrete Research,2003,33(3):381-386.
- [11] BRIGHT SINGH S, MURUGAN M. Effect of aggregate size on properties of polypropylene and glass fibre-reinforced pervious concrete [J]. International Journal of Pavement Engineering,2022,23(6):2034-2048.
- [12] VANDANA K, NAIDU A D, VENKATESWARLU D. An experimental development on pervious concrete by partial replacement of flyash, GGBS, silica fumes with cement by adding glass fiber [J]. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE),2019,8(9):3332-3335.
- [13] 李争,李宏亮,孙晋明. 高性能环氧树脂透水混凝土的制备及其性能研究[J]. 功能材料,2022,53(9):9231-9236.
- [14] Al-SALLAMI A H Z, MARSHDI RADI S Q, MUKHEEF A R. Effect of cement replacement by fly ash and epoxy on the properties of pervious concrete [J]. Asian Journal of Civil Engineering: Building and Housing,2020,21(1):49-58.
- [15] MORALES N C, CLAURE G, NANNI A. Flexural and durability performance of seawater-mixed glass fiber-reinforced polymer-reinforced concrete slabs[J]. ACI Structural Journal,2022,119(1):105-118.
- [16] 孙黎强. 水利工程树脂基透水混凝土性能的试验研究[J]. 水利科技与经济,2022,28(5):128-131.
- [17] 刘志艳,侯莉,李军,等. 玻璃-环氧树脂发光透水混凝土的制备及其性能[J]. 西南科技大学学报,2020,35(4):19-23;62.
- [18] 李时媛. 树脂基透水混凝土性能试验研究[J]. 水利技术监督,2022(2):197-199.
- [19] ZOU Q Q, FU B, CHEN F J, et al. Stress-strain behaviour of carbon fibre reinforced polymer-confined concrete containing macro fibres recycled from waste glass fibre reinforced polymer [J]. Advances in Structural Engineering,2024,27(7):1189-1208.
- [20] 肖良丽,纪勤敏,杜壮. 玻璃纤维增强复合材料筋混杂纤维混凝土短柱轴心受压性能的研究[J]. 工业建筑,2022,52(2):37-41;125.
- [21] 王孟言. 玻璃纤维混凝土结构特性及抗震性能研究[J]. 造纸装备及材料,2023,52(7):78-80.
- [22] 葛辉,张启志. 玻璃纤维对混凝土力学性能的影响[J]. 化学与粘合,2021,43(2):121-123;128.
- [23] 吴庆,朱袁洁,许耀,等. 基于 SEM 和 XRD 微观测试下单掺矿物掺合料透水混凝土性能分析[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版),2020,34(3):112-118.