

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2022.05.042

# 透水混凝土工作性与力学性能试验研究

栗威<sup>1,2</sup>, 王兆仑<sup>1,2</sup>

(1. 河南交通职业技术学院 公路学院, 河南 郑州 450006; 2. 广西道路结构与材料重点实验室, 广西 南宁 530007)

**摘要:**为探究空隙率、水灰比等关键参数对透水混凝土性能的影响,利用抗压强度、抗折强度和流动度试验分析空隙率、水灰比、减水剂及养护龄期等参数变化对透水混凝土的工作性和力学性能的影响规律。试验结果显示:流动度指标能够评价透水混凝土的工作性,随减水剂用量的增加,流动度指标呈增加状态,且随水灰比增大,达到相同流动度时的减水剂用量也相对降低,建议流动度控制为240~250 mm;随水灰比增加,抗压强度、抗折强度呈下降趋势;随空隙率的增加,抗压强度、抗折强度也显著降低,且空隙率变化幅度对抗压、抗折强度的影响远高于水灰比的变化;随着养护龄期的增加,抗压强度、抗折强度值呈显著增加趋势;随流动度的增加,抗压强度、抗折强度均呈增加趋势,且抗折强度值增加幅度较大。

**关键词:**透水混凝土;空隙率;水灰比;工作性;力学性能

**中图分类号:** U414

**文献标志码:** A

透水混凝土作为一种特殊的路面结构,在“海绵城市”建设过程中得到了良好的推广应用,作为一种具备生态环境优势的绿色建筑材料,既可以迅速排水、降低噪音,又可降低城市热岛效应,但随着承载时间的增加,该类型路面也暴露了部分问题,如承载能力不如普通混凝土,抗冻性差,容易堵塞等。透水混凝土的力学性能、耐久性能、透水性能与混凝土内部结构具有直接相关关系。近年来,针对混凝土添加剂、胶凝材料、外掺料等方面开展了相应的研究,得出了建设性的成果。

许耀等<sup>[1]</sup>利用聚丙烯纤维(MPPF)、玄武岩纤维(BF)、仿钢纤维(ISF)对透水混凝土进行了力学抗压强度研究,提出MPPF对透水混凝土的性能改善效果最佳,并得出了MPPF的长度尺寸和最佳掺量范围;杨江超、肖力光等<sup>[2-3]</sup>通过对水泥、粉煤灰、磨细矿渣、硅灰等进行复合,研究不同配比下透水混凝土的力学性能、透水性能,得出复合胶凝材料能够有效提高抗压、抗折强度;郑木莲等<sup>[4]</sup>利用Ansys建立了三维有限元路面模型,分析了不同排水功能的透水混凝土结构的力学

\*\*\*\*\*

- [16] MONTES F, HASELBACH L. Measuring Hydraulic Conductivity in Pervious Concrete[J]. Environmental Engineering Science, 2006, 23(6): 960—969.
- [17] ALALEA Kia, HONG S, Wong, Christopher R. Clogging in Permeable Concrete: A Review[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 193: 221—233.
- [18] 肖鑫, 张肖宁. 排水沥青路面排水能力分析 & 目标空隙率确定[J]. 中外公路, 2016, 36(1): 49—53.
- [19] 郑求才, 袁迎捷, 郑竞友, 等. 不同高粘沥青对排水路面性能的影响研究[J]. 中外公路, 2008, 28(3): 148—151.
- [20] 廖卫东, 徐建明, 王奎. 排水性沥青路面在汉十高速公路养护工程中的应用[J]. 建材世界, 2011, 32(4): 29—33.

- [21] 蒋玮. 透水沥青路面材料和结构的组成设计与功能评价[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [22] TASHMAN L, WANG L, THYAGARAJAN S. Microstructure Characterization for Modeling HMA Behavior Using Imaging Technology[J]. Road Materials and Pavement Design, 2007, 8(2): 207—238.
- [23] YOU Z P, ADHIKARI S, EMIN K M. Dynamic Modulus Simulation of the Asphalt Concrete Using the X-Ray Computed Tomography Images[J]. Materials and Structures, 2009, 42(5): 617—630.
- [24] 蒋玮, 沙爱民, 肖晶, 等. 多孔沥青混合料的空隙堵塞试验研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(2): 271—275.

收稿日期: 2022-05-26(修改稿)

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(编号: 222102320443); 河南省教育厅高等学校重点科研项目(编号: 23A580005); 河南省交通运输厅项目(编号: [2018]3); 青年骨干教师项目(编号: 2020QIV006); 2022年度河南交通职业技术学院校级项目(编号: 2022-ZDXM-008)

作者简介: 栗威, 男, 硕士, 工程师. E-mail: liwe11254@126.com

响应,针对不同类型的路面结构提出了相应的设计参数;谭燕等<sup>[5-8]</sup>对透水混凝土易阻塞问题开展了研究,分析骨料粒径、水灰比及静压时间等对透水性能影响,并对透水混凝土阻塞清洗方式进行了探讨,提出了不同清洗方式的适用性。

综上所述,该文通过优化选择合适的原材料,首先分析透水混凝土的工作性变化,研究改变水灰比、空隙率及养护龄期等参数对力学抗压性能、抗折性能的影响,并进一步分析流动度指标与二者的相关关系,旨在提出合理的性能控制参数。

1 试验方案

1.1 原材料

透水混凝土一般由粗骨料形成骨架,水泥、细集料、掺合料及添加剂等形成胶结料包裹在集料表面形成具有一定强度的骨架-空隙结构,对混凝土的性能要求较高,尤其配合比设计,调制范围小,原材料控制严格。

(1) 水泥。试验选择实体工程中常用的普通硅酸盐水泥 P. O42. 5 级,相关技术指标符合规范要求。

(2) 增强剂。采用透水混凝土增强剂 SBT®-PRC (I),其技术指标见表 1。

表 1 SBT®-PRC(I)性能指标

细度(0.15 mm 筛余)/%	含水量/%	总碱含量(Na <sub>2</sub> O+0.658K <sub>2</sub> O)/%	需水量比/%
4.8	1.0	2.3	86

(3) 减水剂。选择萘系高效减水剂,型号为 SNF-C/PNS-C。

(4) 集料。粗骨料采用质地坚硬、耐久、洁净、密实,粒径不大于 25 mm 的碎石,不规则的外型有利于相互接触形成嵌挤结构,以单粒级配和间断级配为宜。粗、细集料的技术指标分别见表 2、3,分别满足 GB/T 14685—2011《建设用卵石、碎石》要求。

表 2 粗骨料(花岗岩)性能指标

表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	含泥量/%	压碎值/%	针片状含量/%	堆积空隙率/%
2 625	0.53	8.8	5.1	43.0

表 3 细集料(中砂)性能指标

表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	含泥量/%	吸水率/%	含水率/%	细度模数	级配
2 645	2.4	2.70	0.24	2.2	良好

1.2 试验方案

透水混凝土的制备与普通混凝土存在显著的差异,搅拌、成型及养护过程均有所不同。研究采用集料表面包裹法制备透水混凝土,一般采用单卧轴搅拌机,首先将集料与 50% 的水在搅拌机中拌和 30 s,促使集料表面充分清洗、湿润;然后加入水泥、增强剂搅拌 30 s;最后将剩余的水、减水剂加入,充分搅拌 120 s 形成成品。

透水混凝土性能主要体现在工作性、抗压性能和抗折性能方面,研究分析不同水灰比、空隙率变化对上述基本性能的影响,确定透水混凝土满足良好性能条件下的基本配置参数。

(1) 配合比设计

透水混凝土配合比参照 CJJ/T 135—2009《透水水泥混凝土路面技术规程》中体积法进行设计,基本步骤如下:依据目标空隙率确定集料类型及粒径大小,然后结合骨料的性能指标确定单位体积骨料用量,并计算胶凝浆体用量,最后参考工程经验已采用的水胶比确定单位体积水泥用量和用水量,配合比设计结果见表 4。

表 4 透水混凝土基准配合比设计

目标空隙率/%	水灰比	配合比/(kg·m <sup>-3</sup> )		
		集料用量	水泥用量	水
15	0.25		520	130
	0.30	1 530	485	146
	0.35		460	161
20	0.25		450	113
	0.30	1 530	415	125
	0.35		385	135
25	0.25		370	93
	0.30	1 530	335	101
	0.35		316	111

(2) 流动度试验

透水混凝土的工作性关乎施工的难易程度与工程质量,良好的工作性是透水混凝土基本要求之一。该文结合文献[9—10]的经验成果,提出采用水泥浆体流动度作为透水混凝土工作性评价指标。

(3) 强度试验

试验采用 40 mm×40 mm×160 mm 试件,养护龄期 3 d、7 d、28 d,试验步骤依据 GB/T 50081—2002《普通混凝土强度测试方法标准》,首先进行抗折强度

试验,随后进行抗压强度试验。

2 试验结果与分析

2.1 透水混凝土水泥浆体工作性试验分析

研究显示:JIS—A116《日本水泥混凝土路面施工指南》中稠度的评价方法涉及了不同水灰比指标下透水混凝土工作性分布 A~E 共 5 个等级。该文提出采用 3 个水灰比(0.25、0.30、0.35),通过调整减水剂的用量改变浆体流动度,以此来分析不同水灰比下透水混凝土工作性,试验结果见图 1。

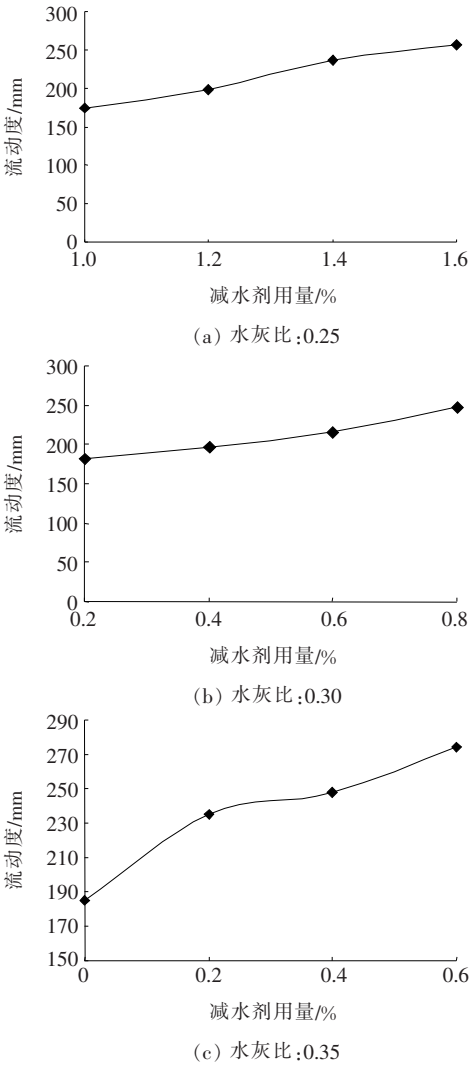


图 1 减水剂用量对水泥浆体流动度影响规律

由图 1 可知:

(1) 相同水灰比下,随减水剂用量增加,浆体流动度呈增加趋势,且不同水灰比条件下,减水剂对流动度指标的影响也存在较大差异。说明减水剂的添加,水

泥浆体更加稀,流动性显著增加,且水灰比越大,减水剂对浆体流动度改善效果越显著。

(2) 随水灰比的增大,达到相同流动度时的减水剂用量也相对降低。根据 CJJ/T 135—2009《透水水泥混凝土路面技术规程》中拌和物和易性的描述及实体工程经验,透水混凝土拌和物工作性良好的表现为:新拌混凝土表面光亮,手抓成团,有微浆析出。试验过程中发现浆体流动度为 240~250 mm 时,透水混凝土的工作性符合上述要求,且成型操作过程中不易出现泌水严重、不易捣实现象,即工作性达到最佳,3 个不同水灰比下,减水剂用量分别为 1.5%、0.8% 和 0.4%。

2.2 透水混凝土抗压强度试验分析

试验采用水泥浆体流动度为 240 mm 的条件下成型透水混凝土试件,在不同水灰比、空隙率条件下,分别测试养护龄期 3 d、7 d 和 28 d 的抗压强度,试验结果见图 2。

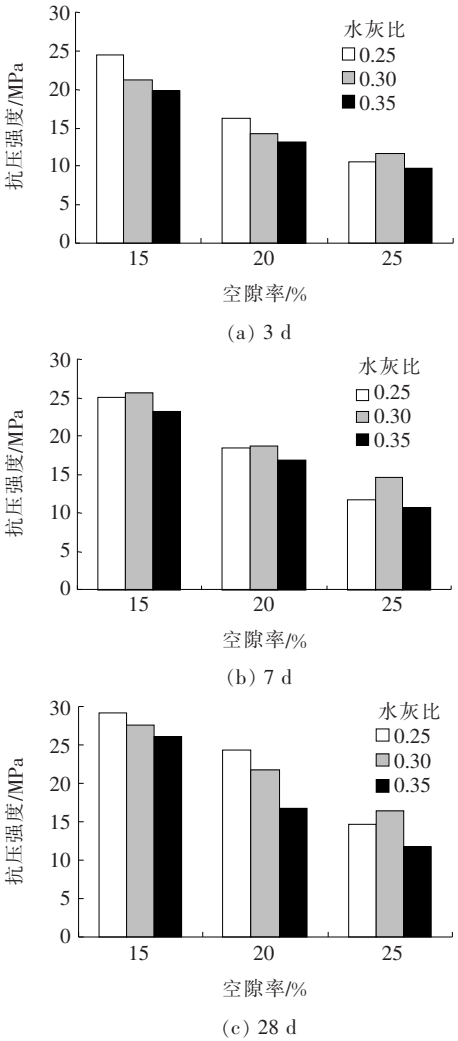


图 2 水灰比、空隙率对抗压强度影响规律

由图2可知:

(1) 水灰比、空隙率指标的变化对混凝土抗压强度有显著影响,随水灰比增加,抗压强度基本呈下降趋势;随空隙率的增加,抗压强度显著降低,且空隙率变化幅度对抗压强度的影响远高于水灰比。说明透水混凝土受水灰比变化影响与普通混凝土的影响变化规律相符合,但对空隙率指标的变化更为敏感,有效控制透水混凝土的空隙率指标是保证混凝土质量的关键措施之一。

(2) 空隙率对抗压强度的影响基本不随养护龄期而变化,而水灰比对抗压强度的影响,在养护龄期7 d时影响程度最小,养护龄期28 d时影响程度最大。因此,对透水混凝土水灰比指标的确定,采用养护龄期28 d的试件较为合适,以降低差异性。结合水泥混凝土强度发展规律可知:水灰比越小,混凝土的力学强度值越大,对于透水混凝土强度变化规律也同样适用。同时,对于大空隙率的混凝土,主要由于内部密实度的降低导致了强度下降,在配合比设计过程中,满足排水量要求的前提下,进一步控制水灰比、空隙率,保证足够的水泥浆体裹覆粗集料,且粗集料能够有效形成内部密实骨架结构。

(3) 随着养护龄期的增加,透水混凝土抗压强度值呈增加趋势,这与普通混凝土强度—龄期变化规律一致,但抗压强度增加幅度较大,早期强度形成较快,远高于普通混凝土。这主要因为透水混凝土内部存在大量的空隙,养护过程中水分、空气能够快速进入内部,加速了水泥的水化反应,有效提升了强度发展。

### 2.3 透水混凝土抗折强度试验分析

不同养护龄期下,3种不同空隙率、水灰比的透水混凝土试件的抗折试验结果见图3。

由图3可知:

(1) 透水混凝土的抗折强度受水灰比、空隙率影响变化规律与抗压强度相接近,均随水灰比、空隙率的增加而呈下降趋势。由此可见,抗折强度受空隙率的影响也高于水灰比的影响。整体上分析,水灰比变化对抗折强度的影响程度高于抗压强度,而空隙率对二者的影响差别不大。

(2) 在空隙率为25%时,水灰比对抗折强度的影响存在相应的变化,即水灰比为0.30时,抗折强度值最大。这主要由于混凝土内部空隙率过大,水灰比为0.25时,水泥浆体不足够裹覆集料,集料间的黏聚力降低;随着水灰比的增加,混凝土内部水泥浆体充足,拌和物工作性达到最佳,黏聚力提高,其抗折强度也随之提

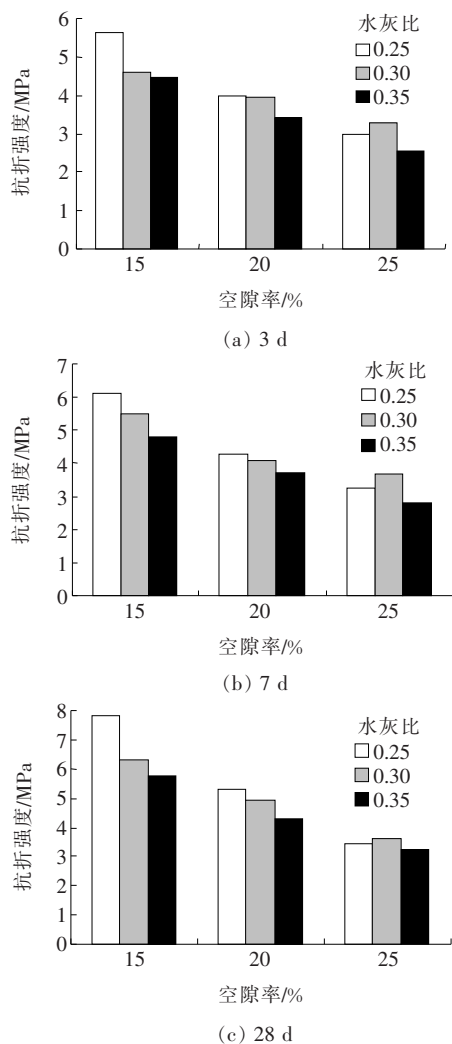


图3 水灰比、空隙率对抗折强度影响规律

高。但当水灰比超过0.30时,水泥浆太稀,对集料的裹覆能力下降,导致黏结强度下降。

### 2.4 透水混凝土工作性与力学性能关系分析

为进一步分析透水混凝土工作性对后期路面质量的影响规律,该文建立了流动度指标与抗压强度、抗折强度的关系模型,尝试研究不同空隙率条件下,流动度与抗压强度、抗折强度的关系,试验结果见图4。

由图4可知:

(1) 随水泥浆体流动度的增加,混凝土拌和物的工作性改善,抗压强度、抗折强度均明显得到改善。说明适当提高流动度指标能够良好地改善其力学性能,尤其对透水混凝土抗折性能的改善效果更明显。透水混凝土的强度源于粗集料的骨架结构与水泥浆体的胶结作用,良好的混凝土拌和物需具备最佳的黏聚力,水泥浆体流动度增加可提高拌和物的流动性及密实度,提高了集料之间的黏结面积,进一步提高强度。



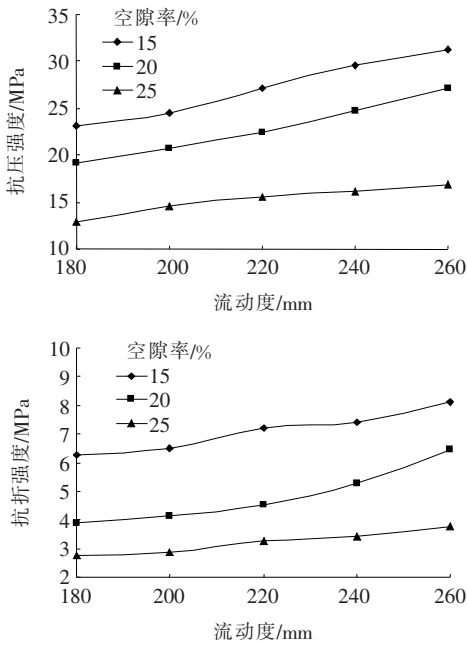


图 4 流动度与抗压强度、抗折强度关系  
(水灰比:0.25,养护龄期:28 d)

(2) 从不同空隙率的试验数据发现流动度与抗压强度、抗折强度的关系也存在一定的变化,在空隙率为 20%时,流动度为 260 mm 时力学性能改善幅度最大,抗压强度、抗折强度值分别提高了 41.1%、65.6%。

### 3 结论

(1) 随减水剂用量增加,水泥浆体流动度指标呈增加状态,且不同水灰比下,减水剂对流动度指标的影响也存在相应差异。随水灰比增加,达到相同流动度时减水剂用量也相对降低,推荐透水混凝土浆体流动度为 240~250 mm。

(2) 空隙率、水灰比均对透水混凝土的抗压强度、抗折强度存在显著影响,随水灰比和空隙率增加,抗压强度、抗折强度均呈下降趋势,且空隙率变化对抗压、

抗折强度的影响远高于水灰比。

(3) 透水混凝土的早期强度形成规律与普通混凝土不同,随着养护龄期的延长,抗压强度、抗折强度值呈显著增加趋势。空隙率 20%,水灰比 0.3 的 3 d 龄期强度达到了 28 d 强度的 65.6%,7 d 龄期达到了 86.2%。在空隙率 25%时,水灰比对抗折强度的影响存在凹曲线变化,即水灰比 0.3 时,抗折强度值最大。

(4) 流动度与抗压强度、抗折强度具备良好的发展关系,随流动度的增加,抗压强度、抗折强度均呈增加趋势,且抗折强度值增加幅度较大。

### 参考文献:

- [1] 许耀,吴庆,史文浩,等.不同短切纤维对高强透水混凝土性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2019(10):40-43.
- [2] 杨江超,方从启,董文燕,等.胶结层对透水混凝土性能影响研究[J].混凝土,2019(7):11-14.
- [3] 肖力光,林侠.复合胶凝体系对透水混凝土强度的影响[J].混凝土,2019(7):74-75,78.
- [4] 郑木莲,邓朝显,梁行行,等.海绵城市透水水泥混凝土路面结构力学响应分析[J].路基工程,2019(2):71-77.
- [5] 黄美燕.硫酸盐腐蚀对透水混凝土抗压强度及透水性能的影响[J].新型建筑材料,2019,46(2):40-44.
- [6] 周玉玲,明廷臻,万美南.透水混凝土强度及透水性能影响因素研究[J].中国测试,2021,47(10):155-160.
- [7] 谭燕,易晨光,胡安迪,等.透水混凝土路面堵塞及透水性能恢复试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2 480-2 490.
- [8] 易晨光,谭燕,张维维,等.透水混凝土的透水性能试验研究[J].混凝土,2021(1):110-114.
- [9] 董雨明,韩森,郝培文.路用多孔水泥混凝土配合比设计方法研究[J].中外公路,2004,24(1):86-89.
- [10] 荀永宁,冯泽慧,巫广义,等.纳米 SiO<sub>2</sub> 与粉煤灰的增强效应对透水混凝土性能的影响[J].南京工业大学学报(自然科学版),2019,41(4):450-455.