

大空隙排水沥青混合料骨架参数对堵塞性能研究

宣 恒¹, 孟 和², 张 志², 王宏文², 卢天喜³, 叶云涛⁴

- (1. 北京市政路桥股份有限公司, 北京 100071;
2. 国家石油天然气管网集团有限公司建设项目管理分公司, 廊坊 065000;
3. 焦作大学 土木建筑工程学院, 焦作 454000; 4. 雄安雄创数字技术有限公司, 雄安 071700)

摘 要:为解决大空隙排水沥青混合料骨架结构稳定性不足、抗堵塞性能难以精准调控的问题,以粗集料嵌挤咬合为核心,选用公称最大粒径、CA 比值、目标空隙率等关键参数,基于多因素变量控制思路,构建起骨架结构参数设计体系,结合 CT 扫描技术开展骨架结构与抗堵塞性能的试验分析及参数优化研究。结果表明:CA 比值控制在 0.35~0.55 时可形成稳定嵌挤骨架,其中 0.45 时其抗堵塞性能最优,完全堵塞需用堵塞物 2.8 kg/m²;公称最大粒径与目标空隙率均与 VCAratio 呈正相关,二者增大能够显著降低渗透系数衰减率;堵塞物细颗粒占比越高,抗堵塞性能越差,占比从 30%增至 70%时,渗透系数衰减率增加 7.7%。最终确定最优骨架结构参数组合为公称最大粒径 16 mm、CA 比值 0.45、目标空隙率 21%、最佳沥青用量 3.4%、沥青膜厚度 14.5 μm,其抗堵塞性能优良且骨架稳定。综合来看,该参数组合可为大空隙排水沥青混合料的工程设计与性能调控提供可靠参考。

关键词: 沥青混合料; 骨架结构参数; 抗堵塞性能; CA 比值; 公称最大粒径; 目标空隙率

中图分类号: U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 04-0044-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.04.007

Effect of Skeleton Parameters on Clogging Performance of Porous Asphalt Mixture

XUAN Heng¹, MENG He², ZHANG Zhi², WANG Hongwen², LU Tianxi³, YE Yuntao⁴

- (1. Beijing Municipal Road & Bridge Co., Ltd., Beijing 100071, China;
2. Project Management Branch, National Oil and Gas Pipeline Network Group Co., Ltd.,
Langfang 065000, China;
3. School of Civil Engineering and Architecture, Jiaozuo University, Jiaozuo 454000, China;
4. Xiong'an Xiongchuang Digital Technology Co., Ltd., Xiong'an 071700, China)

Abstract: To address the problems of insufficient skeleton structure stability and difficulty in precise regulation of anti-clogging performance of large-void drainage asphalt mixture, this study takes the interlocking effect of coarse aggregates as the core. Key parameters including nominal maximum aggregate size, CA ratio and target voidage are selected. A design system for skeleton

项目来源: 2023 年度河南省高等学校重点科研项目计划支持 (项目编号: 23B560022)。

作者简介: 宣 恒 (1987—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 公路与桥梁施工。

通信作者: 叶云涛 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 工程管理。

收稿日期: 2026-03-18

structure parameters is established based on the multi-factor variable control method. Combined with CT scanning technology, empirical analysis and parameter optimization are conducted on the skeleton structure and anti-clogging performance. The results show that a stable interlocking skeleton can be formed when the CA ratio ranges from 0.35 to 0.55, and the optimal anti-clogging performance is achieved at a CA ratio of 0.45, with the mass of clogging material reaching 2.8 kg/m^2 for complete clogging. Both the nominal maximum aggregate size and target voidage are positively correlated with VCA ratio, and their increase can remarkably reduce the attenuation rate of permeability coefficient. A higher proportion of fine particles in clogging materials leads to poorer anti-clogging performance; when the proportion rises from 30% to 70%, the attenuation rate of permeability coefficient increases by 7.7%. The optimal combination of skeleton structure parameters is determined as follows: nominal maximum aggregate size of 16 mm, CA ratio of 0.45, target voidage of 21%, optimal asphalt content of 3.4% and asphalt film thickness of $14.5 \mu\text{m}$. The corresponding mixture possesses excellent anti-clogging performance and stable skeleton structure. Overall, this parameter combination can provide a reliable reference for the engineering design and performance regulation of large-void drainage asphalt mixture.

Key words: asphalt mixture; skeleton structure parameter; anti-clogging performance; CA ratio; nominal maximum aggregate size; target void ratio

0 引言

随着海绵城市建设工作的推进,大空隙排水沥青混合料作为一种环保型筑路材料,凭借良好的透水、抗滑特性,能够有效缓解城市内涝问题、改善路面行车安全,还兼具显著的社会、环境与生态效益,在道路工程以及市政工程当中得到了广泛应用^[1]。然而,其内部的连通空隙容易被砂石等杂质填充,进而产生堵塞问题,导致透水功能出现衰减,缩短路面服役寿命,成为制约其推广应用的主要瓶颈^[2]。骨架结构作为大空隙排水沥青混合料的核心部分,其参数设计会直接决定空隙连通性、结构稳定性以及抗堵塞性能^[3]。

国内众多学者围绕大空隙排水沥青混合料的骨架结构与抗堵塞性能开展了大量研究工作。在骨架结构设计及优化方面,严兵等^[4]运用离散元法构建集料堆积模型,研究发现粒径大于 4.75 mm 的粗集料对骨架稳定性有着显著影响;王勋等^[5]开发出沥青混合料细观结构分析系统,确定平均配位数、骨架率等可作为骨架细观评价指标,同时给出了相应的设计标准;彩雷洲等^[6]研究表明,随着压实次数的增加,粗集料接触点与平均配位数会先上升后下降,过度压实会对骨架结构造成破坏;吴文亮等^[7-8]基于 X-ray CT 和离散元法,探究了级配离析对骨架力学性能的影响,指出 4.75~9.5 mm 档集料是骨架

的关键粒径,粗集料离析会显著降低混合料的抗压强度。在抗堵塞性能及相关影响因素研究方面,刘丽等^[9]通过室内模拟试验发现,堵塞初期渗水系数与连通空隙率呈现出良好的线性关系;王若宇^[10]采用旋转压实法成型试件,证实空隙率越高,混合料的抗堵塞性能及清理恢复效果越好;贡梁良等^[11]研究表明,空隙率的增大可提升抗堵塞能力,推荐 22% 作为设计空隙率,高压冲刷为最优清洗方式;秦旻等^[12]发现细砂的堵塞效果最为显著,0.15~0.6 mm 颗粒是堵塞的关键粒径,15 MPa 高压水冲可使透水性能恢复至初始状态的 80%~90%;张皓东^[13]提出 CAVF2.0 设计方法,发现空隙率 20% 时抗车辙性能最优,堵塞现象主要集中在表层 16 mm 处;朱旭伟等^[14]指出,空隙率和公称最大粒径越大,抗堵塞性能就越好,0.15~2.36 mm 颗粒是 PAC-13 的堵塞敏感粒径;蒋娅娜^[15]通过灰色关联分析,优选出公称最大粒径 13 mm、目标空隙率 21% 的最优 PAC 级配,实现了抗堵塞与路用性能的平衡。

综上,现有研究已明确骨架结构、空隙率、堵塞物特性等因素对混合料性能的影响,但多数研究都聚焦于单一参数或单一性能,对骨架结构多参数(即公称最大粒径、CA 比值等)协同作用下的抗堵塞性能研究尚不充分,而且缺乏对骨架参数与抗堵塞性能的量化关联分析,尚未形成兼顾结构稳定性与抗堵塞性能的系统骨架参数设计方法。基于此,

材料科学

以大空隙排水沥青混合料为研究对象，确定骨架结构的核心设计参数，采用多因素变量设计思路，开展骨架结构参数的设计与优化工作；通过室内试验，探究各参数及堵塞物特性对骨架结构与抗堵塞性能的影响，结合 CT 扫描揭示细观空隙结构与抗堵塞性能的关联，最终优化得到兼顾抗堵塞性能与结构稳定性的最优骨架结构参数组合，为大空隙排水沥青混合料的设计与工程应用提供科学依据。

1 沥青混合料骨架结构参数设计

1.1 骨架结构设计与核心参数确定

大空隙排水沥青混合料的骨架结构设计以“粗集料嵌挤咬合、细集料适度填充、空隙连通贯通”作为核心原则，重点对粗集料级配、骨架密实度、空隙结构参数三大类指标进行控制，同时兼顾排水功能以及结构稳定性。设计确定的核心参数包括：粗集料公称最大粒径（NMPS）、粗集料骨架间隙率（VCAratio）、粗集料级配控制参数（CA 比值）、目标空隙率（V_v）、沥青膜厚度（δ），并运用多因素变量设计思路，分别探究各参数对骨架结构与抗堵塞性能产生的影响。

表 2 优化后的骨架结构参数方案
Table 2 Optimized skeleton structure parameter scheme

方案编号	公称最大粒径/mm	CA 比值	目标空隙率/%	VCAratio/%	最佳沥青用量/%	沥青膜厚度/μm
方案 1	13.2	0.40	20	42	3.6	15.2
方案 2	16.0	0.45	21	45	3.4	14.5
方案 3	19.0	0.50	22	47	3.2	13.8

2 抗堵塞性能试验设计

2.1 试验材料与试件制备

试验所用粗集料为玄武岩碎石，其压碎值 ≤18%，针片状含量 ≤12%，细集料采用机制砂，棱角性 ≥32，沥青采用 SBS 改性沥青，60 ℃ 动力黏度 ≥18 000 Pa·s，矿粉则选用石灰岩矿粉。试件制备工作采用旋转压实法，试件尺寸为 φ100 mm×100 mm，每组试验方案均制备 6 个试件，其中 3 个用于堵塞试验，3 个作为空白对照组。然后将其置于标准养护环境中养护 24 h，待试件强度达到稳定状态后，进行抗堵塞性能试验。

2.2 抗堵塞性能试验方法

采用“模拟堵塞-渗水测试”循环法进行抗堵塞

1.2 骨架结构参数设计

粗集料是骨架结构的核心部分，其级配会直接决定骨架的嵌挤效果及空隙连通性。此次运用“骨架嵌挤级配设计法”，将 CA 比值作为粗集料级配的控制指标， $PCS=0.22\times NMPS$ ，为粗集料形成骨架的临界分界尺寸，PCS 以下的集料为细集料，不参与骨架嵌挤，仅起填充作用。

结合试验研究来看，当 CA 比值控制在 0.35 ~ 0.55 之间时，粗集料可形成稳定的嵌挤骨架，同时预留出足够的连通空隙。设计选取 NMPS 为 13.2、16、19 mm 三种规格，具体级配设计参数见表 1。

表 1 公称最大粒径的粗集料级配控制参数
Table 1 Control parameters of coarse aggregate gradation with same nominal maximum particle size

公称最大粒径/mm	CA 比值	目标空隙率/%
13.2	0.35~0.45	18~22
16.0	0.40~0.50	19~23
19.0	0.45~0.55	20~24

1.3 骨架结构参数优化结果

鉴于上述设计方法，通过单因素变量试验，分别对公称最大粒径、CA 比值、目标空隙率三个核心参数进行调整，优化完成后确定出三组最优骨架结构参数方案，具体见表 2。

性能试验，模拟实际路面的堵塞过程。选用两种不同粒径的石英砂作为堵塞物，分别是细颗粒堵塞物（粒径范围 0.075~0.15 mm）和中颗粒堵塞物（粒径范围 0.15~0.30 mm），两种堵塞物按 1：1 的质量比进行混合，以此模拟实际路面的堵塞物组成情况。

试验采用自制的渗透系数测试装置，具体的试验步骤如下：采用常水头法测试空白试件的初始渗透系数 K_0 ；试件表面均匀撒布堵塞物，堵塞物撒布量分别按 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 kg/m² 分级施加，每级撒布完成后，采用人工模拟降雨的方式（降雨量控制为 10 mm/h），持续 30 min，让堵塞物能够充分渗透到试件内部的空隙当中；测试每级堵塞物施加后的渗透系数 K_i ，计算出渗透系数衰减率 η ；重复步骤 2~3 的操作，直至渗透系数衰减率达到 80%时停止试验，

此时视为试件完全堵塞。

2.3 试验变量设计

为探究骨架结构参数对混合料抗堵塞性能的影响，采用多因素变量开展试验，选取 4 个核心变量

(公称最大粒径、CA 比值、目标空隙率、堵塞物粒径组成)，每个变量设置 3 组平行试件。试验以表 2 中方案 2 的优化参数作为基准参数。骨架结构参数中的单因素变量具体情况见表 3。

表 3 骨架结构单因素变量
Table 3 Single factor variables of skeleton structure

公称最大粒径/mm	CA 比值	目标空隙率/%	堵塞物细颗粒占比/%
13.2、16.0、19.0	0.35、0.40、0.45、0.50、0.55	18、19、20、21、22、23、24	30、50、70

3 结果与分析

3.1 参数对骨架结构与抗堵塞性能影响分析

3.1.1 公称最大粒径

固定 CA 比值、目标空隙率、最佳沥青用量分别为 0.45、21%、3.4%，改变公称最大粒径为 13.2、16、19 mm，探究其对骨架间隙率（VCAratio）以及抗堵塞性能的影响，试验结果如图 1 所示。随着公称最大粒径的不断增大，VCAratio 呈现出线性递增的趋势，当公称最大粒径达到 19 mm 时，VCAratio 从 42.0% 增大至 47.0%，增幅达到 11.9%。并且随着公称最大粒径的增大，渗透系数衰减率呈现出显著的下降趋势，当公称最大粒径从 13.2 mm 增大至 19 mm 时，施加 3.0 kg/m² 堵塞物后的渗透系数衰减率从 78.5% 下降到 52.8%，降幅为 32.7%。

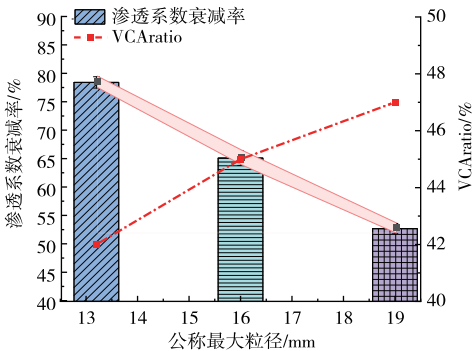


图 1 公称最大粒径与 VCAratio、渗透系数衰减率关系
Fig.1 Relationship between nominal maximum particle size, VCA ratio and permeability coefficient attenuation rate

3.1.2 CA 比值

固定公称最大粒径、目标空隙率、最佳沥青用量分别为 16 mm、21%、3.4%，改变 CA 比值 (0.35、0.40、0.45、0.50、0.55)，探究其对 VCAratio 以及抗堵塞性能的影响，结果如图 2 所示。随着 CA 比值的不断增大，VCAratio 呈现出线性递增的趋势，当 CA

比值从 0.35 增大到 0.55 时，VCAratio 从 40.2% 增大至 49.8%，增幅达到 23.9%。完全堵塞所需的堵塞物用量会随着 CA 比值的增大呈现出先增大后减小的趋势，当 CA 比值为 0.45 时，完全堵塞所需的堵塞物用量达到最大值 (2.8 kg/m²)，此时混合料的抗堵塞性能最优；当 CA 比值小于 0.45 时，随着 CA 比值的增大，完全堵塞所需的堵塞物用量会逐渐增大，抗堵塞性能也会逐渐提升；当 CA 比值大于 0.45 时，随着 CA 比值的增大，完全堵塞所需的堵塞物用量逐渐减小，抗堵塞性能也逐渐下降。

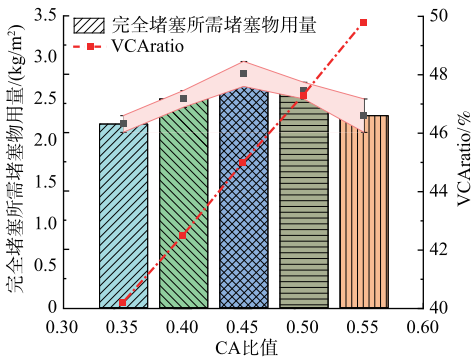


图 2 CA 比对骨架结构与抗堵塞性能的影响
Fig.2 Influence of CA ratio on skeleton structure and anti-clogging performance

3.1.3 目标空隙率

固定公称最大粒径、CA 比值、最佳沥青用量分别为 16 mm、0.45、3.4%，改变目标空隙率 (18%、19%、20%、21%、22%、23%、24%)，探究其对 VCAratio 以及抗堵塞性能的影响，如图 3 所示。随着目标空隙率的不断增大，VCAratio 呈现出线性递增的趋势，当目标空隙率从 18% 增大到 24% 时，VCAratio 从 41.5% 增大至 48.8%，增幅达到 17.6%。原因在于，目标空隙率越大，混合料中预留的空隙就越多，粗集料骨架嵌挤之后剩余的间隙也会更大，从而导致 VCAratio 增大，两者呈现出正相关关系。随着目

材料科学

标空隙率的增大, 渗透系数衰减率呈现出显著的下降趋势, 当目标空隙率从 18% 增大至 24% 时, 施加 2.0 kg/m² 堵塞物后的渗透系数衰减率从 72.3% 下降到 50.5%, 降幅为 30.1%。

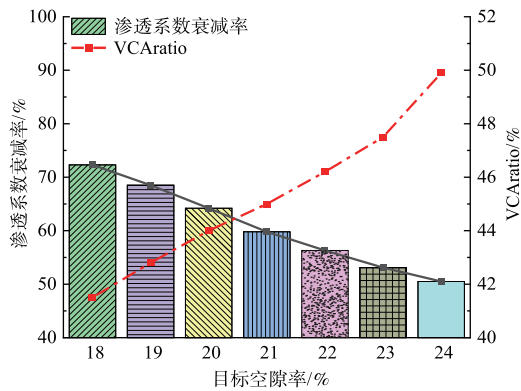


图 3 目标空隙率对骨架结构与抗堵塞性能的影响
Fig. 3 Influence of target void ratio on skeleton structure and anti-clogging performance

3.1.4 堵塞物粒径组成

固定公称最大粒径、CA 比值、目标空隙率、最佳沥青用量分别为 16 mm、0.45、21% 和 3.4%, 改变堵塞物的粒径组成 (细颗粒占比为 30%、50%、70%), 探究其对渗透系数衰减规律的影响, 如图 4 所示。不管细颗粒占比多少, 随着堵塞物用量的增加, 渗透系数衰减率均呈现单调递增的趋势, 并且增长速率会逐渐加快; 当堵塞物用量达到 3.0 kg/m² 时, 渗透系数衰减率均超过 85%, 试件已接近完全堵塞。但不同细颗粒占比的堵塞物, 对渗透系数衰减的影响存在显著差异: 细颗粒占比越高, 渗透系数衰减率越大, 试件的抗堵塞性能也越差; 当细颗

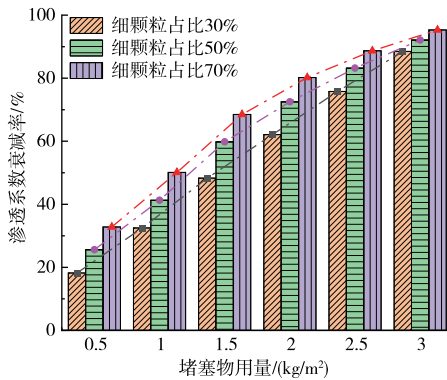


图 4 堵塞物粒径组成对渗透系数衰减规律的影响
Fig. 4 Influence of clogging particle size composition on permeability coefficient attenuation law

粒占比从 30% 增大到 70% 时, 施加 3.0 kg/m² 堵塞物后的渗透系数衰减率从 88.5% 增大至 95.3%, 增幅达到 7.7%。

3.2 空隙结构细观参数与抗堵塞性能的相关性分析

采用工业 CT 扫描技术, 对不同骨架结构参数的堵塞前后试件进行扫描, 提取空隙结构的细观参数 (空隙数量、平均空隙尺寸以及空隙连通率), 探究参数与抗堵塞性能的相关性, 结果如图 5 所示。可以看出, 平均空隙尺寸与完全堵塞所需的堵塞物用量呈现先增大后减小的关系, 当平均空隙尺寸为 1.4 mm 时, 完全堵塞所需的堵塞物用量达到最大值 2.8 kg/m², 此时抗堵塞性能最优; 若平均空隙尺寸小于 1.4 mm, 随着平均空隙尺寸的增大, 完全堵塞所需的堵塞物用量会逐渐增大, 抗堵塞性能也会逐渐提升; 若平均空隙尺寸大于 1.4 mm, 随着平均空隙尺寸的增大, 完全堵塞所需的堵塞物用量会逐渐减小, 抗堵塞性能也会逐渐下降。且空隙连通率与渗透系数衰减率呈现出显著的负相关关系, 当空隙连通率从 75% 增大至 95% 时, 施加 2.0 kg/m² 堵塞物后的渗透系数衰减率从 70.2% 下降至 51.8%, 降幅达到 26.2%。

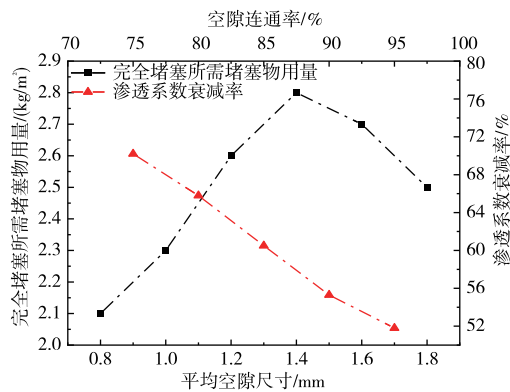


图 5 空隙结构细观参数与抗堵塞性能的相关性
Fig. 5 Correlation between meso-parameters of void structure and anti-clogging performance

3.3 抗堵塞性能优化

3.3.1 抗堵塞性能

基于上述试验分析结果, 确定最优骨架结构参数组合为: 公称最大粒径、CA 比值、目标空隙率、最佳沥青用量、沥青膜厚度分别为 16 mm、0.45、21%、3.4%、14.5 μm, 为验证该参数组合的抗堵塞

性能,开展优化验证试验,同时设置两组对比方案(方案 A: 公称最大粒径 13.2 mm、CA 比值 0.40、目标空隙率 20%; 方案 B: 公称最大粒径 19 mm、CA 比值 0.50、目标空隙率 22%), 试验结果如图 6 所示, 优化方案的渗透系数衰减率始终低于两组对比方案, 当堵塞物用量为 3.0 kg/m^2 时, 优化方案和对方案 A、B 的渗透系数衰减率分别为 92.1%、94.7% 和 89.8%; 但对比方案 B 的公称最大粒径较大, 其骨架稳定性较差, 在堵塞物用量达到 2.5 kg/m^2 时, 试件出现轻微集料脱落现象, 而优化方案无明显病害。

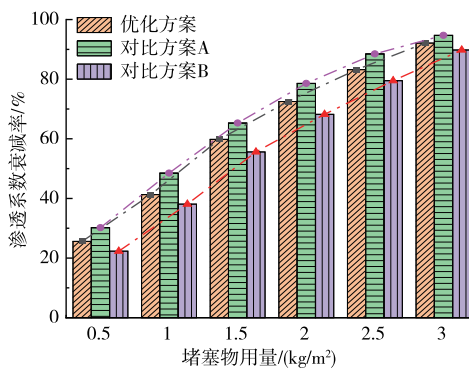


图 6 化方案与对比方案抗堵塞性能对比

Fig. 6 Comparison of anti-clogging performance between optimized scheme and contrast scheme

3.3.2 空隙结构

同时,对优化方案堵塞前后的试件进行 CT 扫描,获取空隙结构细观参数的变化情况,结果如图 7 所示。堵塞前(堵塞物用量 0),空隙数量为 128 个、平均空隙尺寸为 1.42 mm,这两组基准数据呈水平直

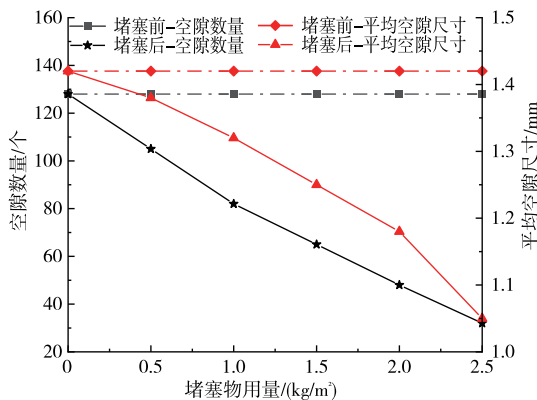


图 7 优化方案试件堵塞前后空隙结构对比

Fig. 7 Comparison of void structure of optimized specimen before and after clogging

线,体现出堵塞前的初始状态;随着堵塞物用量从 0.5 kg/m^2 逐步增加至 3.0 kg/m^2 , 堵塞后的空隙数量从 112 个递减至 32 个, 平均空隙尺寸从 1.35 mm 递减至 1.05 mm, 空隙连通率也从 90.2% 下降至 65.8%。但优化方案的空隙结构仍保持一定的连通性, 未出现完全堵塞情况, 能够维持基本的排水功能, 进一步验证了最优骨架结构参数组合的合理性和可行性。

4 结论

以“粗集料嵌挤咬合、细集料适度填充、空隙连贯通通”为核心原则, 对大空隙排水沥青混合料的骨架结构进行设计, 运用多因素变量对不同参数(公称最大粒径、CA 比值、目标空隙率)下沥青混合料试件进行抗堵塞试验, 得出以下结论:

(1) 粗集料 CA 比值控制在 0.35~0.55 范围时, 可形成稳定的嵌挤骨架, 同时还能预留出足够的连通空隙; 其中 CA 比值为 0.45 时, 混合料的抗堵塞性能达到最优, 其完全堵塞所需的堵塞物用量也达到了最大值 2.8 kg/m^2 。

(2) 公称最大粒径增大时, VCAratio 呈线性递增、渗透系数衰减率显著下降; 当公称最大粒径从 13.2 mm 增大到 19 mm 时, VCAratio 从 42.0% 提升至 47.0%, 施加 3.0 kg/m^2 堵塞物之后, 渗透系数衰减率从 78.5% 降至 52.8%。

(3) 目标空隙率与 VCAratio 呈正相关关系, 当目标空隙率从 18% 增大到 24% 时, VCAratio 从 41.5% 增大至 48.8%, 施加 2.0 kg/m^2 堵塞物之后, 渗透系数衰减率从 72.3% 降至 50.5%。

(4) 堵塞物中细颗粒占比越高, 混合料的抗堵塞性能越差; 当细颗粒占比从 30% 增大到 70% 时, 施加 3.0 kg/m^2 堵塞物之后, 渗透系数衰减率从 88.5% 提升至 95.3%。

(5) 最优的骨架结构参数组合为公称最大粒径 16 mm、CA 比值 0.45、目标空隙率 21%、最佳沥青用量 3.4%、沥青膜厚度 $14.5 \mu\text{m}$, 该方案的抗堵塞性能优良, 且骨架稳定性较好。

(下转第 55 页)

- [6] 马昆林, 孟维琦, 申景涛, 等. 再生微粉性能激活研究及应用进展 [J]. 材料导报, 2024, 38 (10): 96-108.
- [7] 王鑫, 梁栋, 王丹, 等. 机械活化和热活化对煤矸石水化活性的影响 [J]. 砖瓦, 2022, (8): 13-16.
- [8] Muesi G, Nh P, Ulsen C, et al. Mechanical activation of construction and demolition waste in order to improve its pozzolanic reactivity [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2021, 9 (9): 3416-3427.
- [9] 李述俊, 赵霄龙, 李秋义, 等. 再生微粉基本性能及活性试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38 (10): 3314-3319, 3325.
- [10] 杨琳. 再生混凝土微粉制备再生胶凝材料的研究 [D]. 江苏: 东南大学, 2016.
- [11] 楼聪, 郑朝灿, 李晓珍, 等. 再生微粉活性对水泥胶砂性能的影响 [J]. 工业建筑, 2019, 49 (10): 151-155, 199.
- [12] 张平, 古龙龙, 王琴, 等. 激发再生微粉活性的方法研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2019 (2): 90-93.
- [13] 康晓明, 李滢, 樊耀虎. 不同激发方式对再生微粉性能的影响研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38 (4): 1135-1139.
- [14] 何建恒. 废弃混凝土中砂浆组分的性能及利用研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2015.
- [15] Florea M, Ning Z, Brouwers H. Activation of liberated concrete fines and their application in mortars [J]. Construction and Building Materials, 2014, 50 (50): 1-12.
- [16] Likes L, Markandeya A, Haider M M, et al. Recycled concrete and brick powders as supplements to portland cement for more sustainable concrete [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 364: 132651.

(上接第 49 页)

参 考 文 献

- [1] 袁冻雷. 不同纤维改性透水沥青混合料水稳定性的试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (1): 52-56.
- [2] 贾丽晓, 刘永梅. 不同级配排水沥青混合料路用性能与透水性研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (2): 144-150.
- [3] 刘玉东, 蔡燕霞, 奚进, 等. 老化及浸水条件下凝灰岩沥青混合料长期水稳定性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (4): 13-18, 34.
- [4] 严兵, 姚波. 基于离散元法的多孔沥青混合料集料骨架优化研究 [J]. 公路, 2025, 70 (2): 14-21.
- [5] 王勋, 石立万, 王悦婵, 等. 基于图像的沥青混合料骨架结构设计及评价 [J]. 公路, 2023, 68 (2): 40-48.
- [6] 彩雷洲, 李刚, 李翔, 等. 压实次数对沥青混合料骨架特征影响研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30 (2): 341-350.
- [7] 吴文亮, 卢家志, 涂志先. 基于 X-ray CT 和离散元法级配离析对沥青混合料骨架结构力学性能的影响 [J]. 公路工程, 2020, 45 (1): 55-61, 97.
- [8] 吴文亮, 涂志先, 李智. 基于离散元法离析对混合料骨架结构特征影响 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2018, 43 (6): 2303-2310.
- [9] 刘丽, 姚刚, 张娟. 排水沥青混合料堵塞模拟试验与渗水性能研究 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2019, 36 (6): 39-43.
- [10] 王若宇. 透水沥青混合料堵塞及清理行为的实验研究 [D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [11] 贡梁良, 李刚, 李典, 等. 空隙堵塞状态下排水沥青混合料渗水性能衰变研究 [J]. 西部交通科技, 2024 (4): 29-33.
- [12] 秦旻, 杨小丁, 赵毅. 透水沥青混合料抗堵塞性能及功能恢复研究 [J]. 公路交通科技, 2023, 40 (10): 10-17.
- [13] 张皓东. 不同空隙率透水沥青混合料路用性能及堵塞衰变规律研究 [J]. 公路, 2022, 67 (9): 115-121.
- [14] 朱旭伟, 李波, 魏定邦, 等. 循环堵塞-清洗对多孔沥青混合料渗水性能的影响 [J]. 材料导报, 2020, 34 (20): 20040-20045.
- [15] 蒋娅娜. 透水沥青路面抗堵塞性能优化方法研究 [D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2020.