

加速加载条件下双层排水路面性能演变规律

李棋伦

(广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东 广州 510060)

摘要: 为研究排水路面性能, 设计了两种双层排水路面结构(OGFC-10+OGFC-13与OGFC-13+OGFC-20), 系统研究了其在不同温度加速加载条件下的抗滑性能、排水性能、车辙发展及细观结构演变规律。结果表明: 单层OGFC-13与两种双层排水路面结构(OGFC-10+OGFC-13、OGFC-13+OGFC-20)在加载初期(0~3万次)抗滑性能与渗透系数均迅速衰减, 随后趋于稳定; 双层结构(OGFC-13+OGFC-20)表现出最优的综合性能, 其抗滑性能、抗车辙能力与排水能力均优于单层及其他双层结构; 细观CT分析进一步揭示了混合料内部空隙的演变机制, 包括压密、蠕变与局部破坏三阶段。

关键词: 双层排水路面; OGFC; CT; 细观结构; 排水性能

中图分类号: U414; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)03-0074-04

Performance Evolution Law of Double-Layer Drainage Pavement under Accelerated Loading Conditions

LI Qilun

(Guangzhou Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510060, China)

Abstract: To study the performance of permeable pavement, two types of double-layer permeable pavement structure (OGFC-10+OGFC-13 and OGFC-13+OGFC-20) are designed, and the skid resistance, drainage performance, rutting development and meso-structural evolution law of the both are systematically studied under the different temperature accelerated loading conditions. The results indicate that the skid resistance and permeability coefficient of single-layer OGFC-13 and the two double-layer (OGFC-10+OGFC-13 and OGFC-13+OGFC-20) permeable pavement structures decay rapidly during the initial loading stage (0-30,000 cycles), and then stabilizing. The double-layer structure (OGFC-13+OGFC-20) demonstrates the best overall performance, and its skid resistance, rutting resistance and drainage capacity are better than the single-layer and other double-layer structures. The meso-CT analysis further reveals the evolution mechanism of internal voids in the mixture, including three stages of compaction, creep and localized failure.

Keywords: double-layer permeable pavement; OGFC; CT; mesostructure; drainage performance

0 引言

多孔沥青混合料具有优良的排水性能, 但在使用2~3年后易因灰尘、碎石等堵塞物导致排水性能显著下降^[1]。因此, 荷兰综合考虑了降噪、排水及防堵塞需求, 在1990年设计施工了上层4~8 mm/下层11~16 mm粒径集料双层排水路面。研究表明, 与密级配路面相比, 该结构降噪可达6 dB(A), 且排水时间较单层结构减少37%^[2-7], 具有良好的排水、高温抗车辙、抗滑性能^[8-10]。

本文采用两种双层排水路面结构进行加速加载试验, 全面研究分析了其细观结构、排水性能及抗滑

性能等演变特征。

1 双层排水路面混合料设计

本文采用轮碾成型机制备混合料试件。轮碾成型机的荷载模式与成型过程更接近路面实际服役状态, 同时也可以通过控制试件终碾高度精准控制混合料的空隙率^[11-13]。本文分次成型10 cm OGFC-13(1)、4 cm OGFC-10+6 cm OGFC-13(2)、4 cm OGFC-13(1)+6 cm OGFC-20试件进行下一步研究。

1.1 级配设计

四种混合料的级配曲线见表1。

最佳沥青用量下多孔沥青混合料路用性能检测结果见表2。

检测结果表明, 本文所设计的多孔沥青混合料形成稳定的骨架-空隙结构, 大空隙率, 高温抗车辙

收稿日期: 2025-09-15

作者简介: 李棋伦(1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事路桥设计及相关工作。

表 1 四种多孔沥青混合料的级配(通过率/%，OGFC-13(1)用于单层结构，OGFC-13(2)用于双层 OGFC-10+OGFC-13 结构)

筛孔尺寸/mm	OGFC-10	OGFC-13(1)	OGFC-13(2)	OGFC-20
26.5	—	—	—	100
19.0	—	—	—	96
16.0	—	100	100	90
13.2	100	95	94	68
9.5	95	70	64	42
4.75	55	22	15	16
2.36	15	14	12	13
1.18	10	13	10	9
0.6	8	9	8	7
0.3	6	6	6	6
0.15	6	6	4.5	5
0.075	4	4	3.8	4

表 2 多孔沥青混合料性能检测结果

混合料	OGFC-10	OGFC-13(1)	OGFC-13(2)	OGFC-20
空隙率/%	18.5	18.8	22.2	22.5
析漏损失率/%	0.19	0.21	0.18	0.2
飞散损失率/%	14.8	13.4	17.1	17.3
稳定度/kN	4.43	4.73	4.54	4.7
动稳定度/(次·mm ⁻¹)	4 617	4 938	5 201	5 592
残留稳定度/%	88.7	89.3	86.3	86.7
残留强度比/%	84.9	83.4	84.2	82.1

能力强。

1.2 小型加速加载试验(MMLS3)

本文采用 MMLS3 设备进行加速加载试验，条件如下：

- (1)试件尺寸：300 mm×200 mm×100 mm(从车辙板切割)。
- (2)荷载：0.7 MPa(单轴双轮胎压)。
- (3)加载速率：5 000 r/h。
- (4)温度：常温(20 ℃)、高温(60 ℃)。
- (5)加载次数：0 次、1 万次、3 万次、8 万次、13 万次、20 万次。

2 加速加载条件下抗滑性能演变规律

加速加载条件下的摆值(BPN)衰减见表 3。

规律分析：

- (1)衰减阶段：三种结构的抗滑摆值均呈现“初期快速衰减-后期稳定”的规律。前 3 万次加载内摆值降幅达 20% ~ 28%。
- (2)结构差异：双层 OGFC(10+13)衰减最快，因上层 OGFC-10 粗集料含量低、构造深度小；单层 OGFC-13 与双层 OGFC(13+20)抗滑性能更优且稳定。

表 3 加速加载条件下摆值(BPN)演变结果

加载次数/万次	常温(25 ℃)			高温(60 ℃)		
	单层 13	双层 13+20	双层 10+13	单层 13	双层 13+20	双层 10+13
0	105	107	96	106	104	93
1	85	85	78	78	79	68
3	81	80	72	75	76	61
8	77	75	70	73	73	58
13	76	75	67	69	70	55
20	76	75	66	67	69	55

(3)温度影响：高温下胶浆流变加剧，集料迁移更快，摆值衰减更显著，但即便在 60 ℃下，三种结构 20 万次加载后摆值 BPN 仍达 55 ~ 69，高于普通密级配路面(40 ~ 50 BPN)。

3 加速加载条件下车辙深度发展

常温(25 ℃)下，OGFC 骨架-空隙结构抗变形能力强，试件未产生明显车辙(深度<0.2 mm)，故后文仅分析高温(60 ℃)下车辙发展、排水性能及细观结构演变规律(见表 4)。高温加载过程中，混合料出现明显车辙，表现为轮迹带集料下陷、棱角磨光、表面平滑化。

表 4 加速加载条件下排水路面车辙深度发展(60 ℃)

加载次数/万次	车辙深度/mm		
	双层(13+20)	单层(13)	双层(10+13)
0	0	0	0
1	0.58	0.57	0.65
3	0.89	0.92	0.97
8	1.04	1.15	1.19
13	1.18	1.24	1.32
20	1.44	1.56	1.61

- (1)快速压密期(0 ~ 3 万次)：车辙深度增速达 0.30 ~ 0.32 mm/万次，主要因混合料内部松散空隙被快速压实，骨架结构初步形成。
 - (2)缓慢蠕变期(3 万 ~ 13 万次)：车辙深度增速降至 0.03 ~ 0.04 mm/万次，此时骨架结构进入稳定嵌挤状态，仅沥青胶浆发生少量蠕变变形。
 - (3)破坏加速期(13 万次后)：车辙深度增速回升至 0.06 ~ 0.07 mm/万次，因长期高温加载导致骨架结构松散、变形，集料发生位移与翻转。
- 对比分析不同试件车辙深度的变化，双层 OGFC(13+20)的车辙深度最小，单层 OGFC-13 次之，而双层 OGFC(10+13)的车辙深度最大，表明下层 OGFC-20 粗集料形成的稳定骨架，可有效抑制整体结构变形。

4 加速加载条件下排水性能演变规律

本文结合渗透原理,钻取不同加载次数下的100 mm 混合料芯样,通过常水头渗水仪检测芯样的渗透系数。试验结果见表5、图3。

表5 加速加载条件下排水路面渗透系数测试结果(60 ℃)

加载次数/万次	渗透系数/(cm·s ⁻¹)		
	单层(13)	双层(13+20)	双层(10+13)
0	0.328	0.387	0.323
1	0.295	0.364	0.289
3	0.271	0.32	0.251
8	0.255	0.295	0.244
13	0.244	0.279	0.228
20	0.246	0.292	0.223

(1)三种结构渗透系数均呈现“初期急剧衰减—中期缓慢衰减—后期稳定”的规律。0~3万次加载内渗透系数降幅达17%~22%,因空隙被压密,导致通水通道变窄;3万~13万次降幅降至8%~10%,此时空隙结构趋于稳定;13万次后,渗透系数基本稳定,甚至略有回升[如双层OGFC(13+20)从13万次的0.279 cm/s升至20万次的0.292 cm/s],主要原因是长期高温荷载条件下,加之缺少侧向约束,结构发生松散变形,混合料内部空隙率增大。

(2)双层OGFC(13+20)排水能力始终最优,20万次加载时渗透系数仍达0.292 cm/s,是双层OGFC(10+13)(0.223 cm/s)的1.31倍,因下层OGFC-20大粒径集料形成更粗的空隙通道(平均空隙直径>3 mm),通水阻力小。

双层OGFC(10+13)排水能力最弱,且衰减最快,主要原因是上层OGFC-10厚度达4 cm,承担了大部分荷载变形,空隙率下降速度快,限制了积水下渗速度。

5 加速加载条件下细观结构演变规律

本文对试件进行CT扫描,获取混合料内部灰度图像,并通过数字图像处理技术提取图像特征。数字图像处理过程如图1所示。处理前后图像如图2所示。

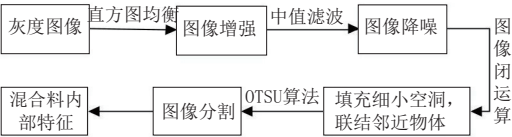


图1 数字图像处理过程

混合料内部明显存在集料、空隙与胶浆的三相结构。集料间通过相互嵌锁构成整体骨架,胶浆包裹于集料表面,未被填充部分则为内部空隙。

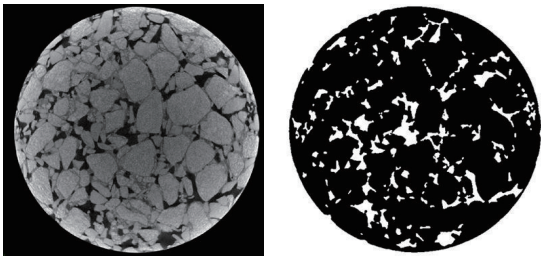


图2 处理前后图像

5.1 加速加载条件下空隙率演变

本文在高温(60 ℃)条件下对试件进行加速加载试验,并在加载次数为0、1万、3万、8万、13万、20万次时对试件进行抽芯,按0.2 mm 间隔,自试件底部向上进行扫描,分析3种混合料结构的空隙率变化,结果如图3至图5所示,试件平均空隙率结果如图6所示。

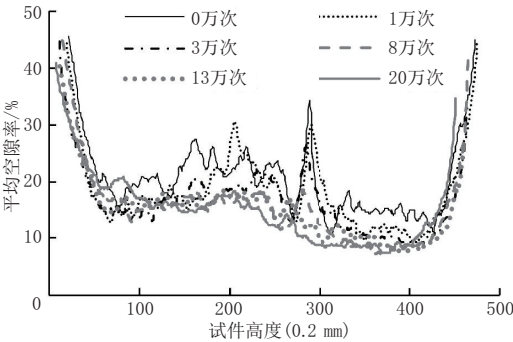


图3 双层OGFC(10+13)纵向空隙率变化

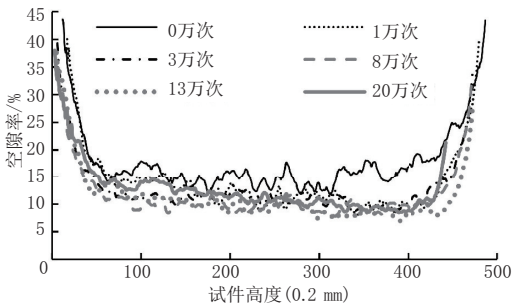


图4 单层OGFC-13纵向空隙率变化

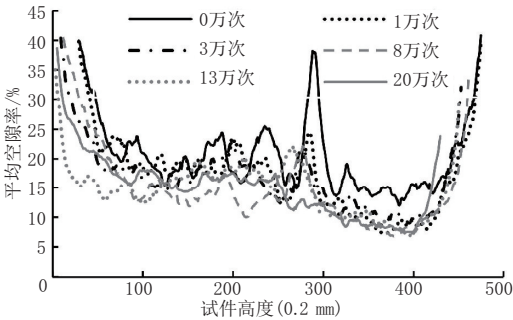


图5 双层OGFC(13+20)纵向空隙率变化

5.2 空隙率演变三阶段规律

(1)压密阶段OGFC(0~3万次):各结构空隙率快速下降,双层OGFC(10+13)上层空隙率降幅最大,因荷载快速压实松散空隙,试件高度减小2%~3%。

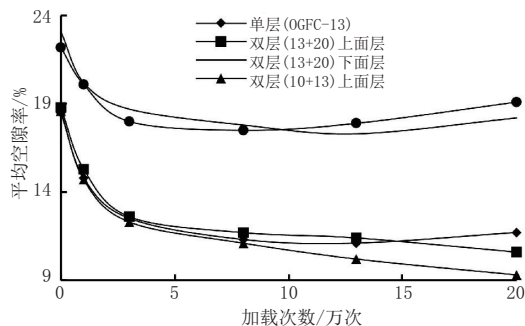


图6 试件平均空隙率变化

(2)蠕变阶段(3万~13万次):空隙率缓慢下降,降幅仅2%~3%,此时集料形成稳定嵌挤骨架,仅胶浆蠕变导致少量空隙闭合。

(3)局部破坏阶段(13万次后):上层空隙率继续下降[如双层OGFC(10+13)上层从16.8%降至16.2%],但下层空隙率略有回升[如双层OGFC(13+20)下层从22.5%升至23.1%],在长期高温加载条件下,加之侧向约束不足,集料发生松散、变形,导致空隙率范围增大。

5.3 层间差异特征

(1)所有双层结构的上层空隙率下降速度均快于下层,如双层OGFC(13+20)上层20万次空隙率较初始值降低18%,而下层仅降低10%,因上层直接承受轮载,变形更显著。

(2)双层OGFC(10+13)上层(OGFC-10)空隙率下降最快,20万次加载后较初始值降低25%,因OGFC-10抗永久变形能力弱,且厚度偏大(4 cm),承担了60%以上的荷载变形。混合料级配越大则高温抗车辙能力更强。

(3)双层OGFC(13+20)下层(OGFC-20)空隙率最稳定,20万次加载后仍保持21%以上,因大粒径集料形成的骨架抗变形能力强,有效延缓了空隙结构退化。

6 结论

(1)加速加载过程中,所有路面结构的摆值在前3万次加载内快速下降,主要因集料棱角磨光与表面压密所致。双层排水路面OGFC(13+20)较单层抗滑性能更稳定,而OGFC(10+13)因上层集料粒径小、构造浅,衰减最快。高温条件下胶浆流变加剧,混合料更容易在加载条件下发生变形,加速了抗滑性能的衰减。

(2)高温(60℃)下车辙发展显著,可分为三个阶段:快速压密期(0~3万次)、缓慢蠕变期(3万~13万次)和破坏加速期(13万次后)。双层结构OGFC(13+20)车辙深度最小,展现出更稳定的骨架

结构与抗变形能力。

(3)渗透系数在加载初期急剧下降,3万次后衰减速率减缓,13万次后趋于稳定。双层结构OGFC(13+20)始终具备最优的排水能力,其大粒径集料形成更通畅的空隙通道。上面层级配与厚度对整体排水性能影响显著。

(4)通过CT图像分析排水路面的细观结构表明,加载过程中混合料内部空隙经历“压密—蠕变—局部破坏”三阶段演变。上面层空隙率下降更为明显,下面层在后期因长期高温荷载发生松散变形。双层结构中下面层的大粒径集料有效增强了骨架稳定性,延缓了整体结构的退化。

双层排水路面结构在抗滑、抗车辙和排水方面均表现优异,适用于高交通荷载与多雨地区。

参考文献:

- [1] 许银行. 双层大孔隙沥青路面的堵塞行为特性研究[J]. 中外公路, 2009, 29(2): 79-82.
- [2] Van Bochove, G G. Twinlay, a new concept of drainage asphalt concrete [C]//IEurasphalt & Eurobitume Congress, Strasbourg, 1996(3): 12.
- [3] Van Bochove, G G. Porous asphalt (Two-layered) -optimising and testingm[C]//Proceedings of the Papers Submitted for Review at 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress, 2000: 65-73.
- [4] Hamzah M O. Characterization of the clogging behaviour of double layer porous asphalt[J]. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2005(6): 968-980.
- [5] Faghri M, Sadd M H, Goncalves E. Performance improvement of open-graded asphalt mixes[J]. University of Rhode Island Transportation Center Report URI-TC Project, 2002, 536144: 43.
- [6] Cahill T, Adams M, Marm C. Porous asphalt: The right choice for porous pavements[J]. HMAT: Hot Mix Asphalt Technology, 2003, 8(5): 26-40.
- [7] 张荣荣, 薛忠军, 王春明, 等. 橡胶沥青开级配沥青混合料路用性能及降噪效果研究[J]. 公路, 2016(9): 247-249.
- [8] 刘强, 陈明. 基于加速加载的双层排水路面抗滑性能衰减模型[J]. 城市道桥与防洪, 2019, 14(2): 78-82.
- [9] 赵芳, 李勇. 城市道路双层排水路面堵塞机理与防治措施[J]. 城市道桥与防洪, 2021, 16(1): 45-49.
- [10] 周涛, 孙磊. 高温条件下双层OGFC车辙发展预测研究[J]. 城市道桥与防洪, 2018, 13(4): 67-71.
- [11] Brown T. & Johnson L. MMLS3 在沥青路面性能模拟中的标准化应用[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(5): 04016015.
- [12] Green, R. et al. Long-term Performance of Porous Asphalt under Accelerated Traffic Loading[J]. Transportation Research Record, 2014, 2456: 89-95.
- [13] 郑华, 王鹏. 小型加速加载试验与实地路面性能关联性分析[J]. 公路交通科技, 2017, 34(6): 112-117.
- [14] 李静, 张超. X-ray CT 在沥青混合料细观结构量化中的应用进展[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(4): 123-129.
- [15] White, S. et al. Mesoscopic Void Evolution in Double-Layer Porous Asphalt Using CT Scanning[J]. Construction and Building Materials, 2020, 250: 118765.