

碎石基层空隙率对缝隙式透水路面承载稳定性的影响*

季天一¹, 许峻伦¹, 陶竞成², 唐小军³, 刘阿兵⁴, 夏邵君⁴, 张振宇⁴

(1.南京航空航天大学民航学院, 江苏南京 210016; 2.句容市市政建设服务所, 江苏句容 212400; 3.句容市住房和城乡建设局, 江苏句容 212400; 4.中交第四公路工程局有限公司, 北京 100020)

摘要: 为探究不同碎石基层空隙率对缝隙式透水路面承载性能的影响, 以轻型荷载路面为研究对象, 通过竖向循环加载试验分析不同荷载作用次数及碎石基层空隙率下铺面竖向变形的发展趋势。结果表明, 路面的竖向变形与荷载作用次数成正相关, 与碎石基层空隙率具有良好的线性关系, 随基层空隙率的增加而增加。

关键词: 公路; 缝隙式透水路面; 碎石基层; 空隙率; 竖向变形

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)06-0055-04

缝隙式透水路面是海绵城市建设中常用透水铺装之一, 主要由面层、找平层、基层和路基组成。其面层主要由砼路面砖及砖体间的接缝组成, 通过在接缝内填充散粒状材料实现路面的透水功能, 一般接缝面积占铺装总面积的 5%~15%, 整个路面结构具有承载力高、耐久性好、维护方便等优点。级配碎石柔性基层具有空隙率高、透水性好等优点, 是缝隙式透水铺装常用基层类型, 但与刚性和半刚性基层材料相比其强度较低、刚度较小, 在荷载作用下极易产生竖向永久变形, 影响路面的承载稳定性。目前对粒料类柔性基层永久竖向变形的研究大多集中在荷载作用次数和大小及材料的物理性能对变形的影响方面, 很少针对碎石空隙率变化进行试验研究。在缝隙式透水路面结构中, 基层不仅是重要的承重层, 更是主要的蓄水和储水层, 而碎石基层的空隙率是影响路面储水能力的关键指标, 也直接影响路面的承载性能。该文以适用于轻型荷载的缝隙式透水路面为研究对象, 以路面竖向位移为指标, 通过室内竖向循环加载试验研究不同碎石基层空隙率对路面承载稳定性的影响, 探究碎石基层的受力特点和承载机理。

1 试验设计

1.1 试验模型制备

试验采用的缝隙式透水路面结构模型见图 1。碎石采用玄武岩, 找平层及填缝材料采用 2.36~4.75 mm 单粒径碎石。

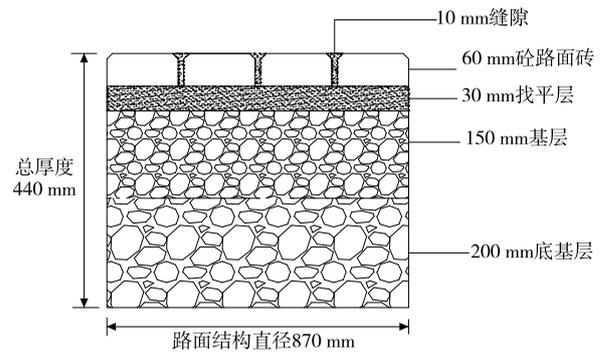


图 1 缝隙式透水路面结构模型

模型试件制作时, 先在模具内铺设底基层, 按其厚度分 3 层将碎石装入试验模具中, 每层装入后用 HCD90 型振动冲击夯振动压实, 压实度在 95% 以上; 之后进行下一次装填并再次压实, 直至达到底基层设计厚度, 并按同样的方法依次铺设基层及找平层; 铺设完找平层后, 用水准尺检查是否整平, 随后按人字式铺设方式铺设砼路面砖, 并预留 10 mm 缝隙; 最后将填缝材料填充到缝隙中, 完成路面模型试件铺装。

1.2 试验设计与方法

为研究不同碎石基层空隙率在荷载作用下对缝隙式透水路面承载稳定性的影响, 试验设计 15%、20%、25%、30% 和 35% 5 种空隙率, 每种空隙率的碎石分别由 3 种级配组成(见表 1)。

通过伺服作动器对路面结构施加竖向循环荷载, 模拟车辆对缝隙式透水路面的荷载作用, 并以路面的竖向永久变形为指标评价路面的承载稳定性,

* 基金项目: 2019 年度江苏省建设系统科技项目(指导类编号 121)

表1 基层碎石的级配

试验编号	设计空隙率/%	实测空隙率/%	下列筛孔(mm)的通过率/%								
			31.5	26.5	19.0	16.0	13.2	9.50	4.75	2.36	1.18
P15-1		14.0	100	94	70	62	57	53	27	17	15
P15-2	15	14.9	100	90	61	50	43	39	29	20	18
P15-3		16.9	100	97	86	72	61	35	18	12	8
P20-1		17.8	100	87	67	58	50	38	27	19	13
P20-2	20	20.8	100	97	93	87	80	70	40	23	16
P20-3		21.5	100	100	100	95	89	80	50	30	21
P25-1		25.9	100	100	90	64	50	41	18	0	0
P25-2	25	26.1	100	100	91	73	55	42	20	0	0
P25-3		26.5	100	100	88	60	42	25	12	0	0
P30-1		30.3	100	100	86	57	42	23	13	0	0
P30-2	30	30.8	100	100	80	68	60	45	13	0	0
P30-3		31.7	100	100	85	—	50	35	10	2	0
P35-1		35.1	100	100	85	70	65	35	5	0	0
P35-2	35	35.8	100	100	80	42	32	20	10	0	0
P35-3		36.2	100	100	70	—	35	20	7	0	0

试验方法见图2。根据《城市道路:透水人行道铺设》,轻型荷载透水路面采用汽车标准轴载 Bzz40,试验过程中所加循环荷载采用余弦波形,上限为 40

kN,下限取上限的 1/10 即 4 kN,荷载频率为 1 次/s,重复加载 5 000 次,由位移传感器实时采集每次荷载作用下路面的竖向位移。



(a) 试验模具



(b) 加载过程



(c) 位移传感器布置

图2 竖向循环加载试验

2 试验结果与分析

2.1 荷载作用次数与铺面竖向变形的关系

不同空隙率时碎石基层铺面竖向变形与荷载作用次数的关系见图3~7。从图3~7可看出:虽然每组碎石基层的空隙率不同,但铺面结构的竖向变形发展趋势相同。缝隙式透水路面的竖向变形随着荷载作用次数的增加而增加,在荷载作用初期,路面竖向变形量增长速率较高,随后增加速度逐渐降低。荷载作用次数从 100 次增加到 500 次时,竖向变形量的平均增长率为 30%;荷载作用次数由 500 次增加到 1 000 次时,变形量的平均增长率为 25%。荷载作用次数达到 3 000 次时,铺面的竖向变形曲线出现拐点,随着荷载作用次数的增加,竖向变形的增

长率显著减小,每千次荷载作用次数,路面竖向变形的增长率稳定在 2%~3%。荷载作用次数达到 5 000 次时,竖向变形增长率在 1% 以内,变形增量不超过 0.1 mm,铺面结构达到稳定状态。

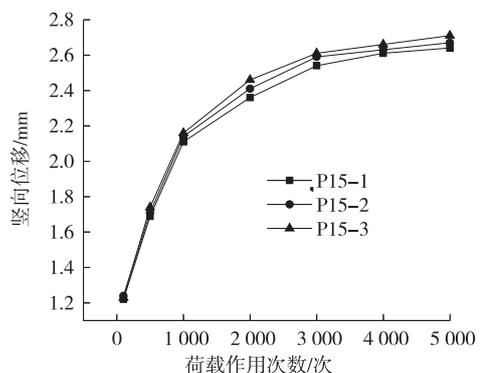


图3 空隙率 15% 时加载次数与竖向位移的关系

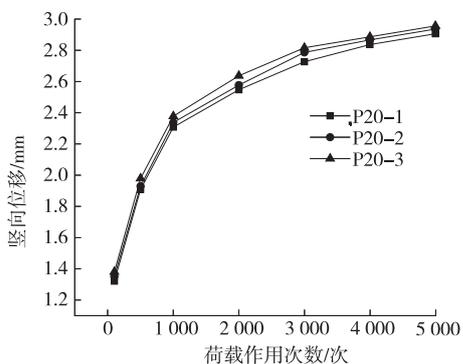


图 4 空隙率 20%时加载次数与竖向位移的关系

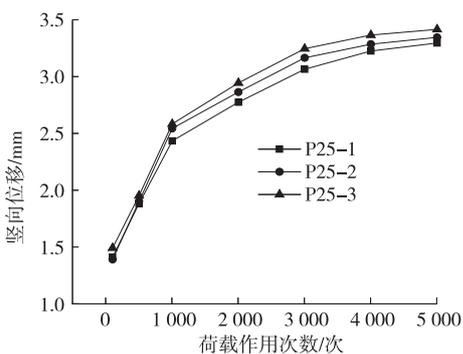


图 5 空隙率 25%时加载次数与竖向位移的关系

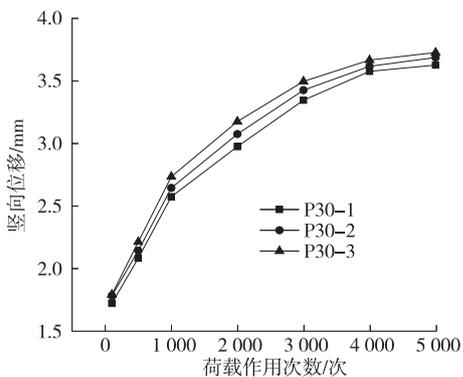


图 6 空隙率 30%时加载次数与竖向位移的关系

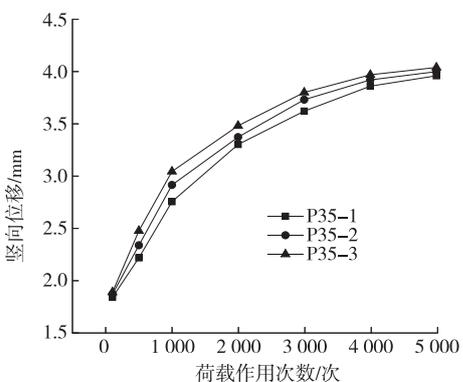


图 7 空隙率 35%时加载次数与竖向位移的关系

存在一定的压实空间,故在荷载作用初期,路面的竖向变形急剧增加。随着荷载次数的增加,竖向变形的增长速度逐渐减小,表明路面结构层逐渐密实,整个铺面结构逐渐趋于稳定。作用次数继续增大时,铺面的竖向变形增长量已很小,缝隙式透水路面结构已形成稳定的结构层,面层的“拱效应”也已形成,在控制最大载荷不变的情况下,继续增加荷载作用次数对路面结构的影响已微乎其微。可见,实际施工过程中保证粒料类结构层一定的压实度及填缝材料的密实度是重中之重。此外,前期车辆荷载的反复作用使铺面进一步压实,路面砖的位置调整,与填缝材料的嵌挤作用增加,铺面结构的整体性进一步增强,可认为缝隙式透水路面初期变形是使整个路面结构形成稳定状态所必须的。

2.2 基层空隙率与铺面竖向变形的关系

不同基层空隙率与铺面竖向变形的关系见图 8。由图 8 可知:随着基层空隙率的增大,缝隙式透水路面的竖向变形增加。基层空隙率分别为 15%、20%、35%时,铺面的平均竖向变形分别为 2.67、3.06 和 4.02 mm,且碎石基层的空隙率越小,竖向变形曲线的拐点位置越靠前。表明空隙率越小,路面越容易达到稳定状态。可见,碎石基层空隙率对缝隙式透水路面的承载性能有较大影响,在满足一定储水能力的前提下,采用空隙率较小的级配碎石能显著降低铺面的竖向变形,提高路面的承载稳定性。

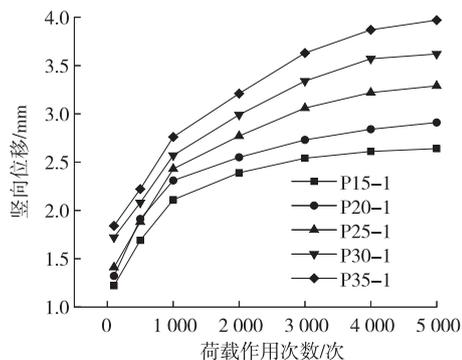


图 8 不同基层空隙率与竖向变形的关系

碎石基层的强度主要由集料形成的骨架结构提供,骨架结构的强弱主要与集料的自身强度及集料间的摩擦阻力和嵌挤力有关。根据 Fuller 最大密度曲线理论及近年来常用的逐级填充理论,当粗骨料形成紧密密挤的骨架结构且含有适量的细集料填充骨架中的间隙时,所形成的骨架密实结构空隙率最小,密实度最大。空隙率越小,集料之间接触点越多,从而能形成良好的嵌挤作用,提供较好的抗变形

缝隙式透水路面铺筑完成后,各粒料类结构层

能力。空隙率逐渐增大时,骨架结构的可压缩空间增多,虽然透水性能较优但稳定性降低,碎石基层的永久变形增大。

3 竖向变形预估模型

缝隙式透水路面基层的储水量主要与级配碎石的空隙率有关,即如果材料的空隙率为30%,则理论上每100 mm的储水层可容纳30 mm的降水,每100 mm³的基层材料可储水30 mm³,从水文性能角度考虑,采用大空隙率的级配碎石基层有利于铺面的蓄水能力。但从图8来看,随着基层空隙率的增大,铺面的竖向位移增大,级配碎石的空隙率对路面承载稳定性有较大影响。

为便于在路面结构设计时通过基层材料的空隙率预估路面的整体竖向变形,评价选用的透水材料是否适合实际需求,在透水路面的水文性能及承载性能两个相矛盾的设计指标上寻找共通点,根据上述试验结果,采用SPSS软件对基层材料空隙率与铺面的竖向变形进行统计回归分析(见图9),得到如下关系式:

$$L = 0.06554P + 1.6507, R^2 = 0.98734 \quad (1)$$

式中: L 为铺面的竖向变形量(mm); P 为级配碎石基层空隙率(%)。

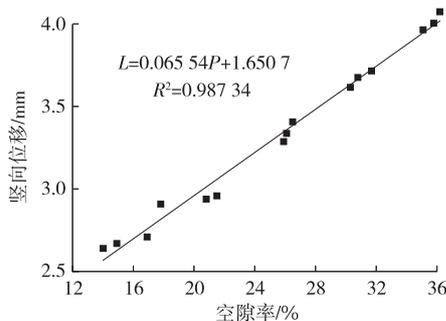


图9 空隙率与竖向变形的拟合曲线

式(1)的相关系数为0.987,拟合准确度较高,竖向位移的预测值与试验值误差较小。

4 结论

(1) 缝隙式透水路面的竖向变形随荷载作用次数的增加而增加,在加载初期变形增长较快;加载次数达到3 000次时,路面的竖向变形曲线出现拐点,变形增长速度逐渐变缓;荷载次数达到5 000次时,路面结构达到稳定状态,每加载千次,变形增量不超过0.1 mm。

(2) 缝隙式透水路面的竖向变形随碎石基层空隙率的增加而增大,基层空隙率越小,竖向变形曲线拐点位置越靠前,路面越容易达到稳定状态,路面的承载稳定性越高。

(3) 建立缝隙式透水路面的竖向变形与碎石基层空隙率之间的数学模型,模型计算值与试验结果吻合度较高。

参考文献:

- [1] 石云兴.多孔混凝土与透水性铺装[M].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [2] 崔玉忠.英国缝隙透水混凝土路面砖路面设计与施工方法概要[J].建筑砌块与砌块建筑,2016,18(1):19-31.
- [3] 涂帅.基于颗粒间相互作用的高性能级配碎石基层结构与性能研究[D].西安:长安大学,2013.
- [4] 朱陈欣.级配碎石基层永久变形特性研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2012.
- [5] British Standards Institution.Pavements constructed with clay,natural stone for concrete pavers Part 13: guide for the design of permeable pavements constructed with concrete paving blocks and flags,natural stone slabs and setts and clay pavers;BS 7533-13:2009[S].
- [6] 张磊蕾,曹可,王武祥.缝隙透水路面用接缝材料的研究[J].建筑砌块与砌块建筑,2019,15(1):15-18.
- [7] LI H, HARVEY J, JONES D. Developing a mechanistic-empirical design procedure for fully permeable pavement under heavy traffic[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2012, 2305: 83-94.
- [8] LI H, WU R. Structural performance of permeable interlocking concrete pavement under heavy traffic loading[J]. New Frontiers in Road and Airport Engineering, 2015, 18(6): 172-184.
- [9] DAVID R Smith, WILLIAM F Hunt. Structural/hydrologic design and maintenance of permeable interlocking concrete pavement[C]//Green Streets and Highways Conference 2010, 2010: 1499-1514.
- [10] 王火明.混凝土预制块路面力学行为及结构设计方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2014.
- [11] DAVID R Smith, DAVID K Hein. Development of a national asce standard for permeable interlocking concrete pavement [C]//Second Conference on Green Streets, Highways, and Development, 2013: 89-105.
- [12] DAVID J Jones, HUI Li, WU Rongzong. Full-scale structural testing of permeable interlocking concrete

(下转第64页)

后期则以热氧老化为主。

(3) 基质沥青在整个老化过程中都伴有 S=O 键的生成与分解。随着老化温度的升高, 沥青中 S=O 键的分解程度逐渐增大, 硫的氧化程度先增大后减小, 而紫外线会促进 S=O 键的分解。

参考文献:

- [1] 郑南翔, 纪小平, 侯月琴. 沥青紫外线老化后性能衰减的非线性预测[J]. 公路交通科技, 2009, 26(4): 33-36+41.
- [2] 潘晓峰, 祝鸿, 石鹏程, 等. 全气候沥青混合料中老化沥青的微观性能非线性模型[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(5): 780-785.
- [3] 赵永利, 顾凡, 黄晓明. 基于 FTIR 的 SBS 改性沥青老化特性分析[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(5): 620-623.
- [4] 王春奇, 刘展瑞, 曾令康, 等. 基于 FTIR 技术的沥青老化研究[J]. 公路与汽运, 2020(4): 58-62.
- [5] LIU Shengjie, PENG Aihong, ZHOU Shengbo, et al. Evaluation of the ageing behaviour of waste engine oil-modified asphalt binders[J]. Construction and Building Materials, 2019, 223: 394-408.
- [6] YAO H, YOU Z, LI L, et al. Rheological properties and chemical analysis of nanoclay and carbon microfibre-modified asphalt with Fourier transform infrared spectroscopy[J]. Construction and Building Materials, 2013, 38: 327-337.
- [7] 金鸣林, 杨俊和, 冯安祖, 等. 韩国 70 道路沥青老化特性分析(II): 官能团与分子结构变化[J]. 煤炭转化, 2002, 25(1): 91-96.
- [8] MOHAMMAD L N, NEGULESCU L I, WU Zhong, et al. Investigation of the use of recycled polymer modified asphalt binder in asphalt concrete pavements [C]//Asphalt Paving Technologists Proceeding of the Technical Sessions, Asphalt Paving Technology, 2003: 551-994.
- [9] GAO Ying, GU Fan, ZHAO Yongli. Thermal oxidative aging characterization of SBS modified asphalt [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Material Science Edition, 2013, 28(1): 88-92.
- [10] 徐鸥明, 韩森, 李洪军. 紫外线对沥青特征官能团和玻璃化温度的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2007, 27(2): 16-20.
- [11] 郝增恒, 张肖宁, 盛兴跃, 等. 超热老化条件下改性沥青的老化机理[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(4): 433-437.
- [12] WON Jun Woo, EDWARD Ofori-Abebresse, ARIF Chowdhury, et al. Polymer modified asphalt durability in pavements [R]. FHWA/TX-07/0-4688-1, 2007.
- [13] 刘奔, 沈菊男, 石鹏程. 老化沥青纳米尺度微观特性及其官能团性能[J]. 公路交通科技, 2016, 33(2): 6-13.
- [14] 李宁利, 赵新坡, 孙吉书, 等. 橡胶沥青老化机理研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(7): 18-22+27.
- [15] 常嵘, 王宏鑫. 沥青老化行为与老化机理研究[J]. 中国科技论文, 2020, 15(4): 420-424.
- [16] 宋家乐, 何璐, 王欣, 等. SBS 改性沥青的 RTFOT 微观老化机理[J]. 公路交通科技, 2020, 37(2): 1-7.
- [17] 唐洁琼, 马庆丰, 时敬涛, 等. 衰减全反射红外光谱法快速检测沥青性质的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(3): 672-675.
- [18] 程小栓, 李鑫, 黄慧君. 衰减全反射傅里叶红外光谱快速检测改性沥青中 SBS 含量研究[J]. 山东交通科技, 2018(5): 39-41.
- [19] LAMONTAGNE J, DUMAS P, MOUILLET V, et al. Comparison by fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of different ageing techniques: application to road bitumens[J]. Fuel, 2001, 80: 483-488.
- [20] PETERSEN J C. A review of the fundamentals of asphalt oxidation: chemical, physicochemical, physical property, and durability relationships[R]. Transportation Research Board, 2009.
- [21] JIN X, HAN R, CUI Y, et al. Fast-rate - constant-rate oxidation kinetics model for asphalt binders[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50(23): 13373-13379.
- [22] GLASER R, SCHABRON J, TURNER T, et al. Low-temperature oxidation kinetics of asphalt binders[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2013, 2370: 63-68.

收稿日期: 2021-01-23

(上接第 58 页)

pavement to develop design guidelines[C]//World Environmental and Water Resources Congress 2017, 2017.

- [13] 马士杰. 粒料基层设计方法与永久变形控制指标研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.

收稿日期: 2020-12-17