

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.03.008

界面水对沥青复合小梁疲劳性能的影响

杜健欢^{1,2}, 艾长发^{1,2}, 黄超^{1,2}, 郭玉金^{1,2}, 蒋运兵³

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 道路工程四川省重点实验室, 四川 成都 610031;
3. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610081)

摘要:为探讨界面水对沥青铺面使用性能产生的影响,拟采用含有层间界面的复合沥青小梁为试验对象,并以四点弯曲小梁试验为主,直接剪切试验为辅的试验方法,分别以层间洒水量和试件浸水天数为影响因素,模拟施工和使用中铺面渗水情况,测定其在不同试验条件下,复合小梁的抗剪强度及疲劳性能。通过复合小梁纵剖面激光扫描,分析了不同界面水来源状态下的复合小梁水损害机理。试验结果表明:(1)浸水天数对复合小梁的层间抗剪强度影响要大于层间洒水量对其的影响;(2)在相同试验条件下,随着层间洒水量或浸水天数的增加,复合小梁的疲劳寿命对数衰减率呈现增加趋势,但增加趋势有所不同。其中,浸泡达到一定天数后其增加趋势明显变缓;(3)复合小梁试件弯曲刚度模量的损失随层间洒水量的增加呈非线性增加,但损失量不超过10%;而随试件浸水天数的增加,其损失量也逐渐增大,最大达到31%,在浸水5 d后,其损失量趋于稳定;(4)复合小梁纵剖面激光扫描显示,层间洒水使复合小梁在层间界面出现细小的空隙,而试件浸水后在界面上层混合料内部出现大面积的集料剥离,故浸水导致复合小梁性能下降更严重。

关键词:道路工程;疲劳性能;四点弯曲试验;直剪试验;沥青复合小梁;界面水

中图分类号: U416.217

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2019)03-0049-06

Influence of Interfacial Water on Fatigue Performance of Composite Asphalt Beam

DU Jian-huan^{1,2}, AI Chang-fa^{1,2}, HUANG Chao^{1,2}, GUO Yu-jin^{1,2}, JIANG Yun-bing³

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China;

2. Sichuan Provincial Key Laboratory of Highway Engineering, Chengdu Sichuan 610031, China;

3. Sinohydro Seventh Bureau Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610081, China)

Abstract: In order to investigate the influence of interface water on the performance of asphalt pavement, the composite asphalt beam which has interlayer is used to carry out the four-point bending beam test and the direct shear test. The water seepage in pavement during road construction and service is simulated considering the influence of interlayer water sprinkle and the number of days of water immersion on the specimen, and the shear strength and fatigue performance of the composite asphalt beam under different conditions are measured. By laser scanning on the longitudinal profile of the composite beam, the water damage mechanism of composite beam under different interface water sources is analyzed. The test result shows that (1) the influence of immersion days on the interlayer shear strength of composite beam is greater than that of interlayer water sprinkle; (2) under the same test condition, the logarithmic decay rate of fatigue life increased with the rise of the interlayer water sprinkle or the number of days of water immersion, however, the increase trend is different, where the increase trend after immersion for a certain number of days obviously slowed down; (3) with the increase of the interlayer water sprinkle, the bending stiffness modulus loss of the composite beam increased nonlinearly, and the loss is less than 10%; (4) with the increase of water

收稿日期: 2017-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378438); 成都市交通科技项目(JHFDD-JSFW-001)

作者简介: 杜健欢(1992-), 男, 四川成都人, 博士研究生. (jianhuandu@my.swjtu.edu.cn)

immersion days, the bending stiffness modulus loss increased gradually, reaching 31%, but it became stable after 5 days; (4) the laser scanning shows that the interlayer sprinkling makes the composite beam appeared small gap in the interface, and the specimen appeared a large area of peeled aggregate inside the upper interface of the mixture after specimen soaked, therefore, the damage of the composite beam caused by immersion is more serious.

Key words: road engineering; fatigue performance; four-point bending test; direct shear test; composite asphalt beam; interface water

0 引言

随着沥青路面愈来愈广泛的使用,其疲劳破坏现象作为沥青路面的主要破坏方式之一,得到了广泛的关注^[1-2]。根据沥青路面实际使用情况发现,沥青路面在多雨地区极容易发生掉粒、松散、坑槽等破坏现象^[3-5]。在早期的研究中,国内外学者提出了车辆荷载与水产生的动水压力作用是沥青路面初期疲劳破坏的重要影响因素之一^[6-7],并采取基于水温耦合条件的室内试验对沥青混合料的水稳定性进行了相关研究^[8-9]。但是,水对沥青路面疲劳性能的影响,其机理较为复杂,应从多个角度出发方能更好地对其机理进行阐述。在试验方法方面,文献[10]通过改变沥青路面的排水条件研究荷载、水和温度共同作用下,沥青路面在疲劳破坏过程中的动力响应。文献[11]采用间接拉伸疲劳试验,以冻融循环为试验方法模拟湿热地区沥青路面的水-温作用,得到了在不同水-温条件作用下沥青混合料的疲劳曲线和疲劳方程。文献[12]参考以往的研究成果,以间接拉伸疲劳试验为基础,开发了模拟沥青路面受荷载、水、温度共同作用的室内试验设备以及试验方法,并凭此研究了不同材料组成在动水作用下,材料的抗疲劳性能。文献[13]提出动水压力模拟试验方法能够用于评价量混凝土的抗水损害性能。文献[14-15]则采用OSU车辙

试验为试验方法,研究了水在沥青路面疲劳破坏初期对沥青路面产生永久变形的影响。在路面结构方面,文献[16-17]讨论研究了水对半刚性基层沥青路面在疲劳破坏早期时的影响,并提出了相应的防治措施。水和车辆荷载对沥青路面疲劳性能的影响不仅仅只存在早期破坏过程中,而是贯穿了沥青路面发生疲劳破坏的整个过程,尤其是界面水的存在,必然消弱层间黏结,降低结构整体性,从而影响到结构的疲劳性能,但以上研究尚未就此开展研究。为此,本研究针对不同界面水存在的情形,在进行直剪试验的基础上,进一步采用四点弯曲疲劳试验,测试复合小梁的疲劳寿命,分析其弯曲劲度模量衰减趋势,并辅以激光扫描,以分析其水损害机理,为沥青铺装结构层间抗水损害工程对策的提出提供试验支撑。

1 试验材料及试验方案

1.1 试验材料

本研究采用新型骨架密实型防水混合料SMAP-5和骨架密实型混合料SMA-13制备复合小梁,以模拟钢桥面沥青铺装结构,其层间黏层油选取SBS改性乳化沥青。集料采用玄武岩碎石,矿粉选用石灰石矿粉,纤维采用木质素纤维,沥青采用自主研发的高黏弹改性沥青。两种混合料级配组成详见表1,其相应的体积参数详见表2。

表1 各混合料级配

Tab.1 Gradations of mixtures

筛空尺寸/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
通过率/%	SMAP-5	100	100	100	97	46	38	30	22	17	12
	SMA-13	100	95	64	26.5	19	17.5	16.5	14	13	10.5

表2 复合小梁组合方式及其体积参数

Tab.2 Combination mode and volume parameters of composite beam

混合料类型	混合料体积参数	
	2.36 mm 以上粗集料含量/%	孔隙率/%
上层 SMA-13	80	3.57
下层 SMAP-5	54	0.73

1.2 试验方案

以四点弯曲疲劳试验为主要试验方法。试验温度考虑到沥青混合料发生疲劳破坏时,其温度主要集中在13~15℃之间^[18]。因此,试验温度选取15℃。为了提高试验效率,节约机时,试验采取应变水平为1 250 $\mu\epsilon$,并且不对荷载加载设置间歇时间。

对于复合小梁试件的成型, 采取先用 $400\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 车辙板模具制作下层厚度为 50 mm 的车辙板, 待完全冷却之后, 再将下层车辙板放入 $400\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的车辙板模具之中, 均匀涂抹黏层油, 待黏层油完全固化之后, 制作上层厚度为 50 mm 的车辙板以成型总厚度为 100 mm 的复合车辙板。待成型的复合车辙板完全冷却后, 采用切割机对其进行切割。切割的小梁试件尺寸为 $380\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 。

试件切割成型之后, 立刻擦干进行编号, 并将小梁试件放置空气中晾干至恒重, 空气相对湿度保证小于 80% 。为防止温度过高对小梁试件尤其是黏层油产生影响, 其储存温度应控制在 $15 \sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。同时, 为了防止试件因自重产生弯曲变形, 储存时试件应当处于完全支撑状态, 并保证支撑物表面平整而干净。

对于沥青铺装层间界面水损害影响的研究, 以室内试验层间洒水量和试件浸水天数两种影响因素来模拟实际工况。

(1) 模拟路面施工时的水损害影响

在工程实践中, 特别在雨季施工季节, 由于工期紧等因素, 难免会出现有表面雨水尚存的情况下进行热拌沥青混合料摊铺。室内试验中采取在层间界面用喷壶洒水方式进行模拟, 即: 在下层沥青混合料成型待完全冷却之后, 均匀涂抹黏层油, 在黏层油完全固化之后, 喷洒一定量的水, 喷洒量分别取 $0, 0.1, 0.2, 0.3\text{ kg/m}^2$ 。随后, 成型上层车辙板。

(2) 模拟路面实际使用过程中的水损害影响

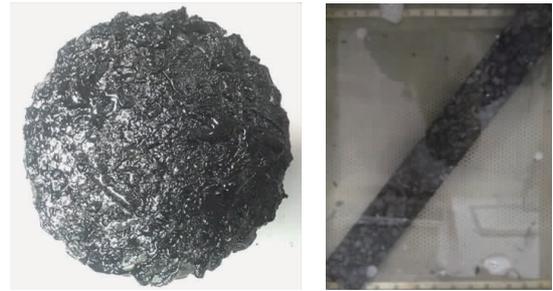
在铺面使用过程中对于渗入结构内部的水分, 室内试验中采取浸水方式进行模拟, 即: 将复合小梁试件放在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水中, 分别浸水 $3, 5, 7\text{ d}$ 。取出后立即在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下进行四点弯曲疲劳试验。如图 1 (a)~(b) 所示。

每种试验条件下, 平行试验试件根数为 6 根。对试验结果进行弃差处理, 且保证有效试验试件根数不少于 3 根。试验加载装置见图 1 (c)。

2 试验结果分析

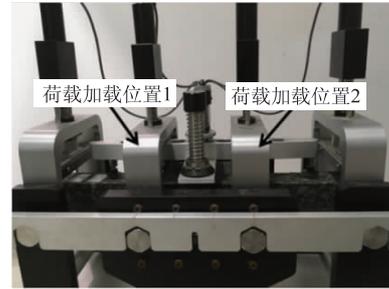
2.1 水对层间抗剪强度的影响

根据上述试验方案, 对马歇尔试件进行不同预处理试验条件下的抗剪强度测试。其测试结果如表 3 所示。



(a) 层间洒水

(b) 试件浸水



(c) 四点弯曲装置

图 1 试验条件与加载装置

Fig. 1 Test conditions and test equipment

表 3 直剪试验结果

Tab. 3 Result of direct shear test

层间状态	直剪应力/kN	直剪强度/MPa
施工中 (层间洒水)	0 kg/m^2	12.64
	0.1 kg/m^2	12.48
	0.2 kg/m^2	12.32
	0.3 kg/m^2	11.91
使用中 (试件浸水)	3 d	12.40
	5 d	11.99
	7 d	11.43

由表 3 可以看出, 施工中降雨造成的水损害会使复合试件层间抗剪强度下降, 其下降范围为 $1.28\% \sim 5.77\%$, 使用中降雨造成的水损害对复合试件层间抗剪强度造成的降低范围在 $1.92\% \sim 9.62\%$ 。这说明界面水的存在会导致层间抗剪强度降低, 且使用中的降雨影响比施工中的降雨影响更大。这是由于在上层混合料铺筑过程中, 层间水分会因为受热而蒸发, 使得界面处上层混合料温度降低, 致使上、下层沥青混合料整体性降低, 从而导致其抗剪强度下降; 对于铺装完成的复合结构, 在车辆的荷载作用下, 层间间隙存在的水会产生动水压力, 从而对界面具有剥离作用, 同时水分渗透到层间界面, 由于黏层油不具有亲水性, 而导致层间黏结力减弱, 两因素的共同作用使得复合结构沥青混合料整体性降低, 而导致其抗剪强度下降更明显。

2.2 水对复合小梁疲劳寿命的影响

根据上述方案,对试验试件进行相应的预处理之后,进行四点弯曲疲劳试验。其试验结果如表4所示。

表4 疲劳试验结果

Tab. 4 Result of fatigue test

试验条件	疲劳寿命 N_f	疲劳寿命对数 $\lg N_f$
未作预处理(层间无水,干燥)	62 451	4.80
层间洒水	0.1 kg/m ²	4.74
	0.2 kg/m ²	4.64
	0.3 kg/m ²	4.58
试件浸水	3 d	4.70
	5 d	4.59
	7 d	4.56

根据表4可以得到,与层间界面干燥的复合小梁疲劳寿命相比较,层间洒水和试件浸水都会对复合小梁的疲劳寿命产生影响。为探讨层间洒水量与浸水天数对复合小梁疲劳寿命的影响程度,以疲劳寿命对数衰减率为判断,其结果如图2所示。

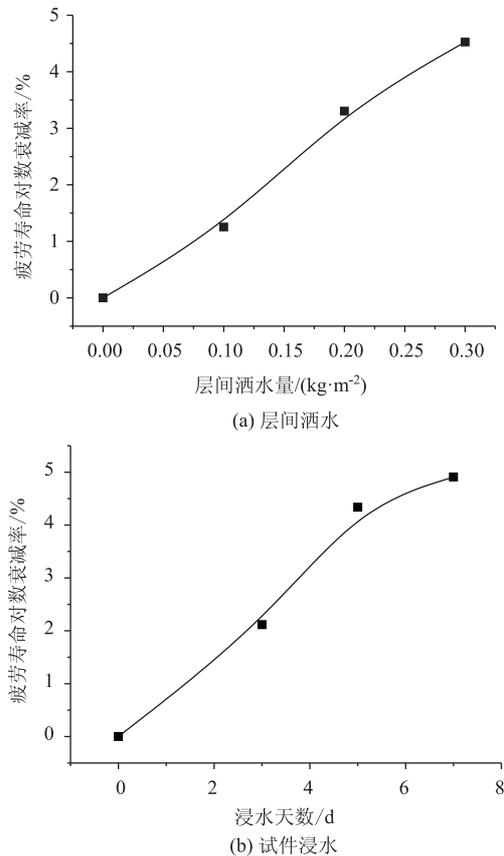


图2 疲劳寿命对数衰减率

Fig. 2 Logarithmic decay rate of fatigue life

从图2可以看出,在层间洒水量影响下,复合小梁的疲劳寿命对数衰减率呈增加趋势,而在浸水天数影响下,复合小梁的疲劳寿命对数衰减率虽呈

增加趋势,但在浸泡一定天数后,其增加趋势变缓。造成这种现象的原因可能是,当混合料空隙被渗水充满后,在车辆荷载作用下,混合料间隙产生的动水压力达到一定极限,造成其疲劳寿命衰减率会趋于稳定;而在施工铺筑过程中,层间界面含有的水分越多,对上、下层沥青混合料的黏结阻碍作用就越大,同时,层间界面含有的水分越多,会造成铺装温度下降越快,使上、下层沥青混合料不能有效地黏结在一起,造成其疲劳寿命衰减率会不断增加。

2.3 水对复合小梁弯曲劲度模量的影响

根据上述试验结果可以发现,水对复合小梁的疲劳寿命会产生较大的影响,其影响程度跟水的来源方式有关。在以上两种界面水的来源方式下,复合试件的弯曲劲度模量损失量变化结果如图3所示。

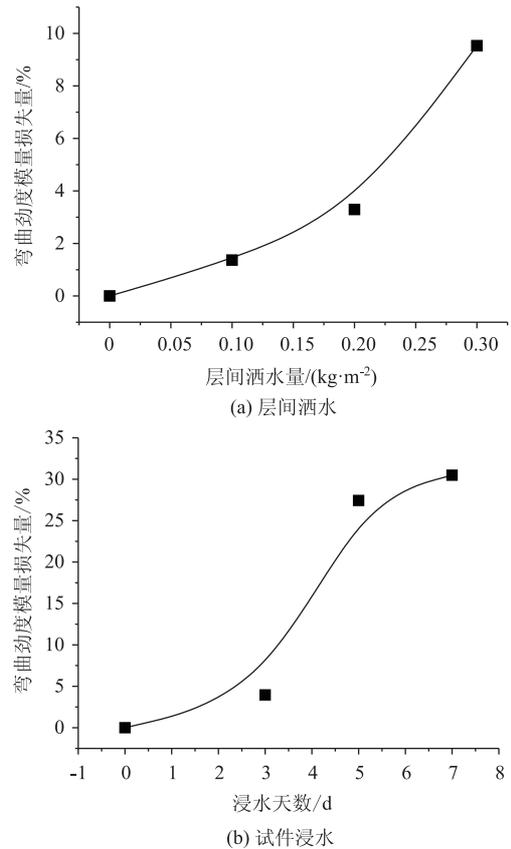


图3 弯曲劲度模量损失量

Fig. 3 Bending stiffness modulus loss

由图3可以得到,在层间洒水量影响下,复合小梁试件弯曲劲度模量的损失呈非线性增加趋势,与层间干燥的复合小梁弯曲劲度模量相比,其损失量皆控制在10%以下,说明在层间洒水影响下,复合小梁的弯曲劲度模量变化并不大;而在试件浸水状态下,随着浸水天数的增加,复合小梁的弯曲劲度模量损失量逐渐增大,最大达到31%,但浸水5 d

后会趋于稳定, 说明试件浸水对弯曲劲度模量的影响大于界面洒水。

3 水损害机理及其工程问题分析

3.1 水损害机理分析

将不同界面水来源状态下的复合小梁试件纵剖面进行激光扫描, 扫描结果如图4所示。

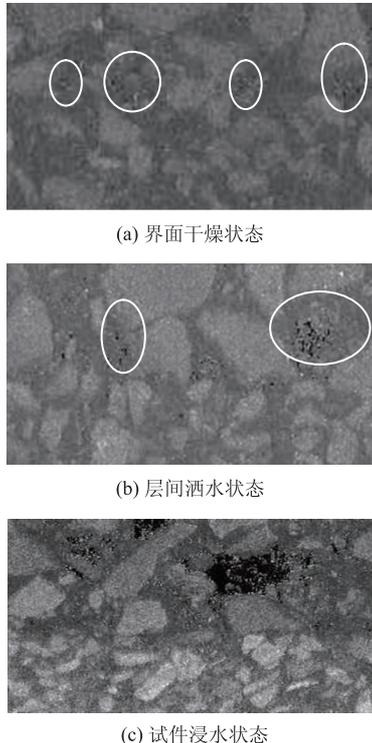


图4 复合小梁界面激光扫描

Fig. 4 Laser scanning of composite beam interface

由图4可以看出, 界面干燥时的复合小梁层间界面完好, 没有出现初试损伤情况; 在层间洒水状态下, 复合小梁在层间界面临近区域出现细小的空隙, 弱化了复合小梁层间黏结, 消弱了结构整体性, 从而造成复合小梁试件疲劳寿命缩短; 而在试件浸水状态下, 复合小梁在界面上层混合料内部出现大面积的集料剥离现象, 这种大面积的剥离必然降低混合料的强度, 从而导致复合小梁试件疲劳寿命缩短更明显。

3.2 工程问题分析

由以上试验结果可知, 两种界面水均会对沥青铺装结构使用寿命造成一定影响。从宏观角度, 浸水天数对复合试件的疲劳寿命影响更为严重; 从扫描细观角度, 浸水易造成大面积混合料的剥离, 因此危害更大。这也说明, 使用中的降雨是造成路面出现坑槽、掉粒等破坏的主要影响因素。

在铺面铺筑过程中, 应当避免降雨天施工, 同

时避免上、下层铺装材料层间界面含有大量未蒸发的水分。同时, 考虑到黏层油分子结构中含有憎水和亲水的分子结构, 应当待黏层油完全固化之后进行上层铺装材料的施工, 以保证层间具有较好的抗剪强度, 从而提高铺装结构的使用寿命。

在铺面使用过程中, 由于车辆荷载的反复作用, 混合料间隙内存在的水会产生动水压力, 并对混合料造成剥离, 尤其在南方多雨季节, 极易出现由于水损害加速疲劳破坏的产生。因此, 从材料角度出发, 可采取排水性较好的沥青混合料, 有利于混合料空隙间水分排出, 或采用骨架密实结构沥青混合料, 严格控制孔隙率在4%以内, 以减少水的渗入; 从结构角度出发, 必须采用优质黏层材料, 加强层间黏结, 降低水对界面黏结的剥离作用, 从而延长铺装结构的使用寿命。

4 结论

(1) 层间洒水对沥青复合小梁界面抗剪强度的影响要小于试件浸水的影响, 随着层间洒水量或浸水天数的增加, 均会进一步降低复合试件界面抗剪强度。

(2) 层间洒水及试件浸水均会降低沥青复合小梁的疲劳寿命, 但两种状态下的疲劳寿命对数衰减趋势有区别。洒水量增大, 复合小梁的疲劳寿命衰减率增加; 浸水天数增大, 复合小梁的疲劳寿命衰减率也增加, 但在浸泡一定天数后, 其增加趋势明显变缓。

(3) 层间洒水量对复合小梁的弯曲劲度模量影响较小, 而浸水天数对复合小梁弯曲劲度模量的影响较大, 说明使用中环境降雨是使铺面发生水损害破坏的主要原因。

(4) 复合小梁纵剖面激光扫描显示, 层间洒水致使复合小梁在层间界面出现细小的空隙, 弱化了层间黏结, 消弱了结构整体性; 而试件浸水致使复合小梁在界面上层混合料出现大面积的集料剥离现象, 导致复合小梁试件性能下降更明显。

参考文献:

References:

- [1] 赵延庆, 谭忆秋, 王国忠, 等. 黏弹性对沥青路面疲劳开裂的影响 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2010, 40 (3): 683-687.
ZHAO Yan-qing, TAN Yi-qiu, WANG Guo-zhong, et al. Effect of Viscoelasticity on Fatigue Cracking of Asphalt Pavement [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2010, 40 (3): 683-687.

- [2] 朱洪洲, 高爽, 唐伯明. 沥青混合料常应变小梁弯曲疲劳试验 [J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2009, 26 (2): 5-8.
ZHU Hong-zhou, GAO Shuang, TANG Bo-ming. Fatigue Properties of Asphalt Mixtures by Controlled-strain Testing [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2009, 26 (2): 5-8.
- [3] 杨慧光, 孙杨勇. 多雨地区沥青混凝土路面水损害防治技术分析 [J]. 公路, 2004 (11): 165-167.
YANG Hui-guang, SUN Yang-yong. Analysis of Anti-water Damage Method of Asphalt Pavements in Rainy Regions [J]. Journal of Highway, 2004 (11): 165-167.
- [4] 张志强, 余概宁, 钱国平. 广东省重载沥青路面的水损害及防治对策 [J]. 中外公路, 2004, 24 (4): 43-45.
ZHANG Zhi-qiang, YU Gai-ning, QIAN Guo-ping. Water Damage to Overloading Asphalt Pavement of Guangdong Province and Countermeasures [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2004, 24 (4): 43-45.
- [5] 高阳, 邹晓翎, 张童童. 考虑动水压力影响的沥青路面损伤机理研究综述 [J]. 中外公路, 2018, 38 (4): 59-64.
GAO Yang, ZOU Xiao-ling, ZHANG Tong-tong. Review of Researches on Damage Mechanism of Asphalt Pavement Considering Effect of Hydrodynamic Pressure [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2018, 38 (4): 59-64.
- [6] 沙庆林. 高速公路沥青路面早期破坏现象及预防 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2008: 206-216.
SHA Qing-lin. Premature Damage and Its Preservative Measures of Bituminous Pavement of Expressway [M]. Beijing: China Communications Press, 2008: 206-216.
- [7] 孙立军. 沥青路面结构行为学 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2013: 277-281.
SUN Li-jun. Asphalt Pavement Structure Behavior [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2013: 277-281.
- [8] TERREL R L, SHUTE J W. Summary Report on Water Sensitivity Report, SHRP-A/ZR89-003 [R]. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 1989.
- [9] AL-JOAIB A A. Evaluation of Water Damage on Asphalt Concrete Mixtures Using the Environment Conditioning System [D]. Ann Arbor: Oregon State University, 1993.
- [10] 董泽蛟, 曹丽萍, 谭忆秋, 等. 表面排水条件对饱水沥青路面动力响应的影响分析 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (1): 10-15.
DONG Ze-jiao, CAO Li-ping, TAN Yi-qiu, et al. Influence of Surface Drainage Conditions on Dynamic Response of Saturated Asphalt Pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (1): 10-15.
- [11] 秦旻, 梁乃兴, 陆兆峰. 水-温作用下沥青混合料疲劳性能分析 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42 (4): 1126-1132.
QIN Min, LIANG Nai-xing, LU Zhao-feng. Fatigue Property Analysis of Asphalt Mixture in Water-temperature Action [J]. Journal of Central South University: Science and Technology Edition, 2011, 42 (4): 1126-1132.
- [12] 胡斌, 张肖宁. 动水作用下沥青混合料疲劳性能变化 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48 (3): 120-124.
HU Bin, ZHANG Xiao-ning. Reduction of Asphalt Concrete Anti-fatigue Performance under Hydrodynamic Effect [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48 (3): 120-124.
- [13] 姜旺恒, 张肖宁, 李智. 沥青混凝土的动水压力模拟试验 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (10): 35-39.
JIANG Wang-heng, ZHANG Xiao-ning, LI Zhi. Simulation Test of Dynamic Water Pressure for Asphalt Pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (10): 35-39.
- [14] STEPHEN A C, MICHAEL D V. Effects of Sample Preconditioning on Asphalt Pavement Analyzer (APA) Wet Rut Depths [C] //Transportation Research Board 80th Annual Meeting. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 2001: 20-23.
- [15] 韩海峰, 吕伟民, 何桂平. 水作用下沥青混合料永久变形特性的表现形式 [J]. 中国公路学报, 2003, 16 (4): 4-8.
HAN Hai-feng, LÜ Wei-min, HE Gui-ping. Effects of Water on Permanent Deformation Potential of Hot-mix Asphalt [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16 (4): 4-8.
- [16] 沙庆林. 高速公路沥青路面的水破坏及其防治措施 [J]. 中外公路, 2000, 20 (3): 1-4.
SHA Qing-lin. Water Damage and Prevention Measures of Asphalt Pavement on Expressway [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2000, 20 (3): 1-4.
- [17] 沈金安, 李福普, 陈景. 高速公路沥青路面早期损坏分析与防治对策 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
SHEN Jin-an, LI Fu-pu, CHEN Jing. Analysis and Preventive Techniques of Premature Damage of Asphalt Pavement in Expressway [M]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [18] 王旭东, 沙爱民, 徐志鸿. 沥青路面材料动力特性与动态参数 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
WANG Xu-dong, SHA Ai-min, XU Zhi-hong. Dynamic Characteristics and Dynamic Parameters of Asphalt Pavement Material [M]. Beijing: China Communications Press, 2002.