【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

桥面铺装不同防水黏层的工程适用性

刘梦梅, 韩 森, 杨 赫, 吴晓明

长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西西安 710064

摘 要: 桥面铺装防水黏层易发生水平层间渗水和积水等现象, 进而造成层间黏结性能降低. 通过电子计算机断层扫描、黏层水平渗水试验、层间剪切及拉拔试验, 对工程中常用的5种桥面黏层(改性乳化沥青、4.75同步碎石、9.5同步碎石、5 mm 沥青混凝土(5 mm asphalt concrete, AC-5)和稀浆封层)的工程适用性进行研究. 基于数字图像处理技术, 量化层间空隙分布状态, 并分析各防水黏层孔隙分布特性与抗渗水、黏结性能的关系. 研究表明, 黏层的空隙分布状况与其渗水、积水及黏结特性紧密相关, 层间空隙越丰富, 越易渗水, 黏层的黏结性能越低. 在5种典型黏层中, AC-5的力学性能最优, 改性乳化沥青的防水效果最佳.

关键词: 桥梁工程; 防水黏层; 数字图像处理; 水平抗渗性能; 黏结性能; 工程适用性

中图分类号: U443.33 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/SP.J.1249.2020.01103

The applicability of different waterproof adhesive interlayer for bridge deck pavement

LIU Mengmei, HAN Sen, YANG He, and WU Xiaoming

Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education,
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi Province, P. R. China

Abstract: Waterproof adhesive interlayer of the bridge deck pavement is prone to horizontal interlayer water seepage and ponding, which results in the degradation of interlayer bonding performance. In this paper, the CT scanning techniques, interlayer permeability tests, shear tests and pullout tests are used to comprehensively analyze the engineering applicability of five kinds of waterproof adhesive interlayer (modified emulsified asphalt, 4.75 synchronous surface dressing, 9.5 synchronous surface dressing, 5 mm asphalt concrete (AC-5) and slurry seal) commonly used in engineering. Based on the digital image processing technology, we quantize the interlayer pore distribution and analyze the relationship between the pore distribution characteristics of each waterproof adhesive layer and its impermeability or bond performance. The results show that the distribution of pores in the waterproof adhesive interlayer is closely related to the seepage, water accumulation and bonding properties. The more the pores are, the easier it is for water to seepage through interlayer, the lower the bonding performance of the bonding layer. Among the five typical waterproof adhesive interlayers, AC-5 has the best mechanical properties, while the modified emulsified asphalt has the best waterproof effect.

Key words: bridge engineering; waterproof adhesive interlayer; digital image processing; lateral anti-permeability performance; bonding performance; engineering applicability

Received: 2019-04-01; **Accepted:** 2019-09-12

Foundation: National Natural Science Foundation of China (51578076); Fundamental Research Funds for the Central Universities (300102219207)

Corresponding author: Professor HAN Sen. E-mail: hyram_hs@chd.edu.cn

Citation: LIU Mengmei, HAN Sen, YANG He, et al. The applicability of different waterproof adhesive interlayer for bridge deck pavement [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(1): 103-110. (in Chinese)

防水黏层是桥面铺装体系的重要结构之一,起黏结及防水作用,保证了桥面结构的整体性,并确保桥梁在使用期限内免受水损害^[1-5].大量实体工程和相关文献均表明,黏层后期常出现层间积水现象,严重威胁层间的黏结性能,导致桥面黏层防水和抗剪功能失效^[6-9].桥面铺装的诸多病害均与防水黏层性能紧密相关^[10-11].当水分通过裂缝或压实不足的道路边缘,渗入到防水黏层,在层间集聚、流动,会形成局部冒水现象,引发更严重的病害^[12].水分在层间流动,也致使防水黏层的黏结性能和耐久性能减弱.层间水引发的病害被称为隐性病害^[1],该病害在初期从桥面表面往往难以识别,长此以往,层间积水加剧,造成结构性病害^[1,10].

数字图像处理技术具有突出的直观表现能力,能够准确、客观地反映路面材料的性能,在路面检测及路面结构领域应用广泛^[13-17].针对目前国内桥面铺装防水黏层材料繁多、结构组合各异、性能良莠不齐和设计规范不完善等问题,图像处理技术提供了一种数字化、系统化的研究方法.因此,基于数字图像处理技术,进行不同防水黏层的层间空隙分布与渗水、积水、黏结性能的相关关系研究,对分析桥面铺装层间防水与黏结特性具有重要的现实意义.

工程中常用的桥面铺装防水黏层材料主要有卷材类、涂抹类、封层类和细质沥青混凝土类等^[18].近年来,防水黏结层的研究侧重于对桥面铺装的组合结构和新材料的研发,而对评价方法的研究则不全面.龚饶斌等^[19]将桥面铺装各层化零为整,基于港珠澳大桥,研究了桥面铺装的抗拉性能.目前研究仅考虑力学性能,而忽视了防水黏层的防水性能.本研究选用工程中典型的 5 种桥面铺装防水黏层(改性乳化沥青、4.75 同步碎石、9.5 同步碎石、5 mm 沥青混凝土(5 mm asphalt concrete, AC-5)和稀浆封层),利用数字图像处理技术,分析层间的空隙分布特征,并结合层间水平渗水试验、剪切试验及拉拔试验,对黏层的渗水、积水及黏结性能进行工程适用性分析.

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

为研究桥面铺装黏层的防水及黏结特性,根据不同结构层的需要,分别选用以下原材料.20 mm 沥青混凝土(20 mm asphalt concrete, AC-20)中面层:SBS 改性沥青、石灰岩集料和石灰岩矿粉.水

泥混凝土桥面板:C42.5 普通硅酸盐水泥、石灰岩集料、河砂和水.5 种防水黏层为:① 改性乳化沥青防水黏层:SBS 改性乳化沥青;② 4.75 同步碎石防水黏层:SBS 改性沥青和 4.75 mm 粒径石灰岩集料;③ 9.5 同步碎石防水黏层:SBS 改性沥青和 9.5 mm 粒径石灰岩集料;④ AC-5 防水黏层:克炼 70#基质沥青、石灰岩集料和石灰岩矿粉;⑤ 稀浆封层防水黏层:SBS 改性乳化沥青、石灰岩集料和石灰岩矿粉.上述防水黏层的胶结料性能如表 1.

表 1 黏层胶结料性能

Table 1 Properties of asphalt binder in interlayer

胶结料类型	测试指标	测试结果	规范要求
SBS 改性沥青	针入度 $\times 10(25\text{ }^{\circ}\text{C}, 100\text{ g}, 5\text{ s})/\text{mm}$	88	80 ~ 100
	针入度指数	0.95	≥ -0.8
	延度($5\text{ }^{\circ}\text{C}$)/m	50.2	≥ 40
	软化点/ $^{\circ}\text{C}$	56.5	≥ 50
	运动黏度($135\text{ }^{\circ}\text{C}$)/(Pa·s)	1.81	≤ 3
SBS 改性乳化沥青	筛上剩余量比例(1.18 mm)/%	0.04	≤ 0.1
	残留物质量分数/%	52.44	≥ 50
	残留物针入度 $\times 10(25\text{ }^{\circ}\text{C}, 100\text{ g}, 5\text{ s})/\text{mm}$	72	40 ~ 120
	软化点/ $^{\circ}\text{C}$	61.5	≥ 50
	延度($5\text{ }^{\circ}\text{C}$)/cm	45.4	≥ 20
克炼 70# 基质沥青	贮存 1 d 稳定性	0.17	≤ 1
	贮存 5 d 稳定性	0.36	≤ 5
	针入度 $\times 10(25\text{ }^{\circ}\text{C}, 100\text{ g}, 5\text{ s})/\text{mm}$	63	60 ~ 80
	延度($10\text{ }^{\circ}\text{C}$)/m	> 100	≥ 20
	软化点/ $^{\circ}\text{C}$	50	≥ 46
	动力黏度($60\text{ }^{\circ}\text{C}$)/(Pa·s)	266.5	≥ 180

1.2 试件制备

为模拟工程中桥面铺装的结构类型,在实验室制备“AC-20 中面层 + 防水黏结层 + 水泥混凝土板”复合板试件.水泥混凝土底板尺寸为 $30\text{ cm} \times$

30 cm × 5 cm, 并对其表面进行拉毛处理, 平均构造深度约为 0.9 mm, 用于模拟桥面板. 分别对 SBS 改性乳化沥青、4.75 同步碎石、9.5 同步碎石、AC-5 和稀浆封层等防水黏层的防水及黏结特性展开研究. 其中, SBS 改性乳化沥青的撒布量为 1.0 kg/m²; 4.75 同步碎石和 9.5 同步碎石沥青的撒布量统一为 1.0 kg/m²; 碎石用量分别为 4 kg/m² 和 6 kg/m²; 碎石覆盖率均为 70% ~ 75%. AC-5 与稀浆封层混合料的级配如图 1, 摊铺厚度约为 10 mm. 其中, AC-5 的油石比为 6.6%, 稀浆封层的油石比为 7.2%. 将已撒布黏层的水泥混凝土板置于 30 cm × 30 cm × 10 cm 的试模中, 量取中面层高度剩余量, 以此计算 AC-20 混合料用量, 将其碾压在试模中形成复合板.

图1 AC-5 和稀浆封层混合料级配

Fig. 1 The gradation of AC-5 and slurry seal

对 5 种复合板进行钻芯, 获得直径为 10 cm、高度为 10 cm 的柱形复合试件, 用于计算机断层 (computed tomography, CT) 扫描及剪切、拉拔试验, 并对复合板进行切割, 获得 14 cm × 14 cm × 10 cm 复合试件块, 用于层间渗水实验. 每组进行 3 次平行试验, 计算平均值.

1.3 试验方案

本研究采用 YXLON Y. CT Modula 扫描仪对柱形复合试件进行扫描, 精度可达 10 μm, 自上而下扫描 60 mm, 因此涵盖了黏层区间. 利用 Matlab 软件对采集的黏层 CT 图像进行数字图像处理, 获取黏层空隙率和空隙等效圆直径等指标, 用于分析桥面铺装黏层的防水及黏结性能. 本研究采用最大类间方差法对图像进行分割处理, 经大量阈值分析, 发现阈值约为 93 时效果最好, 可以获取良好的空隙分割图像, 同时减少运算时间. CT 扫描过程如图 2. 其中, 0 ~ 20 mm 为 AC-20 表面区域; 20 ~ 40 mm 为 AC-20 中部区域; 40 ~ 60 mm 涵盖所有黏层

区域及黏层与上下板件的过渡区域. 本研究重点分析桥面铺装薄弱区域——黏层及其过渡区域 (40 ~ 60 mm).

图2 柱形复合试件及 CT 扫描方向示意

Fig. 2 Cylindrical composite specimen and scanning direction of CT

层间水平渗水试验采用长安大学自主研发的 ST-1 层间渗水仪进行测试, 试验仪器及原理如图 3^[20]. 为保证水是通过层间空隙发生渗流, 而非通过 AC-20 中面层、水泥板或复合试件与层间渗水模拟箱之间的间隙流出, 需对其进行蜡封处理. 渗水仪水头高度为 40 cm, 量筒的量程为 500 mL, 每隔 5 min 读数, 试验持续 30 min. 剪切和拉拔试验用于评价黏层的黏结性能, 剪切试验选用 HS-S I 型直剪仪^[14], 仪器的竖向应力设置为 0.2 MPa, 剪切速率

(a) ST-1 层间渗水

(b) 水平层间渗水原理

图3 ST-1 层间渗水仪及其渗水试验原理^[20]

Fig. 3 ST-1 type interlayer seepage tester and its seepage test principle^[20]

为 20 mm/min. 拉拔试验采用 LGZ-1 型拉拔仪^[14], 拉拔速率为 5 mm/min. 黏结性能试验示意图如图 4.

为分析浸水和冻融条件下的层间黏结性能, 分别对试件进行如下预处理: ① 25 ℃ 通风放置 72 h;

② 25 ℃ 水浴箱中浸水 72 h; ③ 25 ℃ 水浴箱中浸水 24 h. 然后置于 -18 ℃ 冰柜中冷藏 24 h, 最后于 25 ℃ 通风处放置 24 h, 确保内部结冰完全融化^[21].

图 4 黏结性能试验原理

Fig. 4 Principles of adhesive performance tests

2 结果与分析

2.1 防水黏结层数字图像处理分析

如图 5, 对采集间隔为 0.5 mm 的 CT 扫描图像进行数字图像处理, 获取黏层的空隙率 n 和空隙等效圆直径 D . 空隙率为通过 Matlab 软件获取每张图像所有空隙对应的像素点数, 并根据式(1)计算而得. 由于层间空隙结构和形状各异, 无规则, 为了直观分析黏层空隙分布特性, 采用空隙等效圆直径评价黏层空隙的尺寸大小和分布比例. 空隙等效圆

直径为与实际空隙面积相等的标准圆的直径, 如式(2). 空隙率和空隙等效圆直径能够量化层间空隙分布状况, 分析不同黏层材料渗水、积水与黏层空隙特性的关系.

$$n = \frac{m^2 \times 25.4^2}{\pi \times R^2 \times p^2} \quad (1)$$

$$D = 2 \times \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (2)$$

其中, m 为数字图像中空隙对应的总像素点数; R 为被扫描试件的实际半径, 50 mm; p 为图像的分辨率; S 为 CT 图像中单个空隙的实际面积.

图 5 数字图像处理过程

Fig. 5 Digital image processing

不同黏层的空隙率如图 6. 由图 6 可知, 不同防水黏结层空隙率沿试件高度范围自上而下变化一致, 呈先增大后减小趋势, 但不同类型黏层空隙率

的峰值和突增范围各异. 其中, 空隙率峰值由大到小排序为: 4.75 同步碎石 > 9.5 同步碎石 > 改性乳化沥青 > AC-5 > 稀浆封层, 同步碎石的空隙率显著

高于其他 3 种黏层。究其原因，撒布的碎石为单一粒径石料，不能形成嵌挤密实结构，石料间的空隙率大；且石料表面没有裹覆沥青，当 AC-20 铺装黏层上时，只有少量的流动沥青与碎石表面黏结，远不能填补碎石间的空隙。除此之外，发现 4.75 同步碎石防水层空隙率突增拐点约为 4.5 mm，且 9.5 同步碎石防水层空隙率突增拐点约为 9.0 mm，两者的变化拐点均与各自撒布同步碎石的粒径大小相适应，说明碎石粒径大小直接决定了黏层空隙率突增范围的量级，该规律与层间的防水性能和黏结性能紧密相关。

表 2 为不同防水层层间空隙等效圆直径分布情况。由表 2 可知，不同防水层层间空隙等效圆直径 (D) 的分布规律有相似之处。其中， $D < 1\text{ mm}$ 的空隙数量最多，均占空隙总数量 59% 以上； $1\text{ mm} < D \leq 2\text{ mm}$ 区域空隙数量比例次之，约为 20%；各防水黏层 90% 以上的空隙等效圆直径小于 3 mm。除此之外，发现 4.75 同步碎石、9.5 同步碎石和改

性乳化沥青存在空隙等效圆直径大于 6 mm 的孔隙，但 AC-5 和稀浆封层大尺寸空隙缺失。根据工程经验可知，同步碎石防水层为单粒径石料分布，所以石料间空隙较大，而稀浆封层和 AC-5 为密实级配混合料，石料粒径偏细，且稀浆封层在后期养生过程中，乳化沥青破乳，水分蒸发，导致稀浆封层和 AC-5 内部存在较多的微小空隙。

图 6 不同黏层空隙率

Fig. 6 Porosity of different interlayers

表 2 不同防水层层间空隙等效圆直径分布情况

Table 2 Distribution of equivalent circle diameter between different waterproof layers

D/mm	空隙数量及比例									
	4.75 同步碎石		9.5 同步碎石		AC-5		改性乳化沥青		稀浆封层	
	数量	比例/%	数量	比例/%	数量	比例/%	数量	比例/%	数量	比例/%
$D \leq 1$	1 328	59.3	1 903	62.6	4 569	72.8	1 953	67.0	2 243	75.5
$1 < D \leq 2$	541	24.2	603	19.8	1 424	22.7	651	22.3	572	19.3
$2 < D \leq 3$	195	8.7	259	8.5	215	3.4	180	6.2	108	3.6
$3 < D \leq 4$	80	3.6	116	3.8	47	0.7	64	2.2	43	1.4
$4 < D \leq 5$	40	1.8	69	2.3	13	0.2	27	0.9	5	0.2
$5 < D \leq 6$	29	1.3	28	0.9	4	0.1	19	0.7	0	0
$6 < D \leq 7$	10	0.4	28	0.9	2	0	8	0.3	0	0
$7 < D \leq 8$	5	0.2	16	0.5	0	0	4	0.1	0	0
$8 < D \leq 9$	3	0.1	7	0.2	0	0	2	0.1	0	0
$9 < D \leq 10$	2	0.1	3	0.1	0	0	0	0.0	0	0
$D > 10$	7	0.3	7	0.2	0	0	5	0.2	0	0
总计	2 240	100	3 039	100	6 274	100	2 913	100	2 971	100

2.2 防水黏结层渗水及层间积水特性分析

为了研究 5 种不同类型防水层的水平抗渗水性能，本研究进行了层间渗水试验，每隔 5 min 分别记录各层间渗水量，结果如表 3。由表 3 可见，9.5 同步碎石防水层前 5 min 的渗水量最大，其次为 4.75 同步碎石防水层，而稀浆封层和改性乳化沥青

防水层几乎不渗水，说明同步碎石层间抗渗水性能较差。这与上述层间图像分析结果一致，同步碎石层间的空隙率大，空隙尺寸也较大，在层间形成连通空隙的概率高，易发生水平层间渗水、积水。

AC-5 初期渗水量较小，但随着渗水时间延长，渗水量显著上升，20 min 后，稀浆封层也出现了渗

水的现象. 究其原因, 主要是由于 AC-5 与稀浆封层空隙直径较小, 都为微空隙, 水分在空隙间流动时受毛细作用, 流动速度较慢, 后期易发生渗水问题. 工程中常用的 5 种防水黏结层中, 乳化沥青防水层的抗渗水性能最好, 未出现渗水现象. 但在实际工程中, 单层的乳化沥青黏层油易受施工车辆影响, 防水作用易被破坏.

表 3 不同防水黏结层渗水试验结果
Table 3 Seepage test results of different waterproof interlayers

渗水时间/min	渗水量/mL				
	4.75 同步碎石	9.5 同步碎石	稀浆封层	AC-5	改性乳化沥青
5	45	59	0	25	0
10	92	119	0	44	0
15	141	173	0	76	0
20	178	221	11	105	0
25	212	260	23	133	0
30	240	295	32	148	0

2.3 防水黏结层黏结特性分析

2.3.1 剪切试验结果

本研究对 5 种黏层材料分别进行浸水和冻融预处理, 采用剪切试验, 以此模拟汽车在路面行驶时, 对路面产生的横向剪切力, 造成推移等病害, 结果如图 7. 由图 7 可见: ① 5 种黏层抗剪强度的大小顺序为: AC-5 > 改性乳化沥青 > 稀浆封层 > 4.75 同步碎石 > 9.5 同步碎石. 其中, AC-5 沥青砂的抗剪切强度最大, 这是因为 AC-5 为热拌沥青混合料, 能较好地保留胶结料的黏结性能, 且 AC-5 级配偏细, 内部形成密实结构, 能够有效抵抗剪切力. 而同步碎石防水层由于石料表面没有裹覆沥青, 上层底面与碎石之间的胶结沥青膜有限, 导致上下层的黏结性能大大降低. 在外推力作用下, 碎石层成为薄弱面, 发生剪切破坏. 改性乳化沥青保留了 SBS 的串联结构, 通过聚苯乙烯嵌段聚集, 形成稳固的三维微观结构, 分散在沥青中, 聚苯乙烯末端赋予材料足够的强度. ② 在防水黏结层浸水处理条件下, 9.5 同步碎石、4.5 同步碎石、AC-5 和稀浆封层的抗剪强度分别降低 23.2%、21.7%、19.5% 和 16.9%, 而改性乳化沥青仅减少 9.0%. 这主要是由于集料亲水性能强, 尤其是酸性集料. 被水长期浸泡的过程中, 沥青膜与集料相互分离,

图 7 不同黏层浸水和冻融条件下抗剪强度

Fig. 7 Shear strength of different interlayers under soaking and freezing-thawing condition

减小了铺装层层间的黏结性能. 另外, 综合上述渗水试验结果, 碎石防水层空隙率较大, 而 AC-5 与稀浆封层内部存在大量的微空隙, 后期发生轻微层间渗水, 水分残留在铺装层之间, 充当了润滑剂的作用, 减小了层间的摩擦阻力, 造成层间抗剪能力下降. 渗水试验结果已表明改性乳化沥青防水层防水性能优异, 所以浸水条件下, 改性乳化沥青防水层的黏结强度受水的影响较小. ③冻融对不同防水黏结层的剪切强度均有不利影响. 黏层内部存在空隙, 温度降低时, 层间聚集的空隙水结冰, 体积变大, 对空隙产生膨胀压力, 导致黏层抗剪强度损失. 在实际工程中, 若层间存在积水问题, 在冬季早晚大温差环境下, 易产生冻融破坏, 加之车辆荷载反复作用, 对黏层耐久性造成潜在威胁.

2.3.2 拉拔试验结果

按照桥面沥青铺装层受力状况看, 层间剪切作用显著. 但黏结层受各向外力耦合作用, 除了汽车行驶方向的水平剪切力, 在轮胎挤压作用下层间积水处还易产生孔隙水压力. 因此, 本研究采用浸水和冻融条件下的拉拔实验来评价黏层的竖向黏结性能, 作为防水黏层力学性能辅助评价指标.

由图 8 可知, 同步碎石的拉拔强度与上述剪切强度表现一致, 均相对较小. 而稀浆封层的竖向拉力小于水平剪切力. 因为, 稀浆封层受级配调控, 混合料内部形成嵌挤结构, 当受到水平推力时, 除了胶结料间的黏附力, 还有集料提供的咬合摩阻力, 所以抗剪强度相对较好. 竖向拉力主要取决于胶结料与集料的黏结性能, 稀浆封层的胶结料采用

乳化沥青,其黏结强度低于热沥青;且稀浆封层为细级配混合料,比表面积较大,所以沥青膜较薄,黏结性较差;加之乳化沥青破乳过程会产生水和空隙,因此,稀浆封层竖向黏结性能降低。综上所述可见,SBS改性乳化沥青防水黏层的抗渗水与黏结性能均相对较好,是一种比较适宜的桥面铺装黏层。但施工中,其受施工车辆影响,黏层作用易被破坏。

图8 不同黏层浸水和冻融条件下抗拉强度

Fig. 8 Pullout strength of different interlayers under soaking and freezing-thawing condition

3 结 论

1) 通过数字图像处理技术、黏层水平渗水试验、层间剪切及拉拔试验,对工程中常用的桥面防水黏结层进行工程适用性分析,完善了桥面铺装防水层的评价方法,提出了黏结层空隙特性(孔隙率、空隙等效圆直径)、防水性能(渗水系数)和力学性能(剪切强度为主,拉拔强度为辅)等综合评价指标。

2) 通过CT扫描获取层间图像,基于数字图像分析技术,量化了层间空隙分布状况。试验结果显示:同步碎石空隙率最高,空隙尺寸较大,改性乳化沥青黏层空隙率次之,AC-5和稀浆封层空隙率较低,且内部存在空隙大部分为微空隙。

3) 除SBS改性乳化沥青外,其余常用桥面防水黏层均发生了层间渗水现象,具有层间积水的潜在威胁,影响黏层的黏结性能。其中,同步碎石的渗水量最大,AC-5与稀浆封层次之,改性乳化沥青几乎不渗水。

4) 5种典型黏层抗剪强度排序为:AC-5 > 改

性乳化沥青 > 稀浆封层 > 4.75同步碎石 > 9.5同步碎石。桥面防水黏层黏结性能受温湿环境变化的影响显著。同步碎石、AC-5和稀浆封层在浸水、冻融条件下,抗剪、抗拉强度降低显著。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578076);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102219207)

作者简介:刘梦梅(1993—),长安大学博士研究生。研究方向:路基路面工程。E-mail: highway.lmm@chd.edu.cn

引文:刘梦梅,韩森,杨赫,等.桥面铺装不同防水黏层的工程适用性[J].深圳大学学报理工版,2020,37(1):103-110.

参考文献 / References:

- [1] 黄晓明. 水泥混凝土桥面沥青铺装层技术研究现状综述[J]. 交通运输工程学报, 2014(1): 1-10.
HUANG Xiaoming. Research status summary of asphalt pavement technology on concrete bridge decks [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014(1): 1-10. (in Chinese)
- [2] 郭鑫森. 水泥混凝土桥铺装层防水黏结材料性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
GUO Xinmiao. Study on materials performance of the waterproof and cohesive layer's of concrete bridge deck [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese)
- [3] WANG Linbing, HOU Yue, ZHANG Lei, et al. A combined static-and-dynamics mechanics analysis on the bridge deck pavement [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 166: 209-220.
- [4] 张宏君, 李振霞, 王选仓, 等. FYT涂膜类防水黏结材料路用性能[J]. 交通运输工程学报, 2009(3): 34-38.
ZHANG Hongjun, LI Zhenxia, WANG Xuancang, et al. Pavement performance of FYT waterproof [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009(3): 34-38. (in Chinese)
- [5] HASIBA K. Development of a testing approach for tack coat application rate at pavement layer interfaces [J]. Radiology, 2012, 237(1): 57-66.
- [6] HOU D, HAN M, MUHAMMAD Y, et al. Performance evaluation of modified asphalt based trackless tack coat materials [J]. Construction & Building Materials, 2018, 165: 385-394.
- [7] XIU L, ZHOU C, FENG D, et al. Experimental study on interlayer shear properties of ERS pavement system for long-span steel bridges [J]. Construction & Building Materials, 2017, 143: 198-209.
- [8] CHEN F, MA R, SHENG X J. Study and application on

- cold blended epoxy asphalt mixture for steel bridge deck pavement [J]. *Key Engineering Materials*, 2017, 744: 190-195.
- [9] 张占军, 胡长顺, 王秉纲. 水泥混凝土桥面沥青混凝土铺装结构设计方法研究[J]. *中国公路学报*, 2001, 14(1): 56-59.
- ZHANG Zhanjun, HU Changshun, WANG Binggang. Research on the design method of asphalt concrete pavement for concrete bridge deck structure [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2001, 14(1): 56-59. (in Chinese)
- [10] 张占军. 混凝土桥桥面防水系统性能及设计方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.
- ZHANG Zhanjun. Research on performance and design method of waterproofing system on concrete bridge deck [D]. Xi'an: Chang'an University, 2004. (in Chinese)
- [11] 孙恩杰. 水泥混凝土桥面防水黏结材料的性能研究[J]. *公路*, 2007(2): 111-115.
- SUN Enjie. Research on performance and design method of concrete bridge deck waterproofing system [J]. *Highway*, 2007(2): 111-115. (in Chinese)
- [12] 裴建中. 桥面柔性防水材料技术性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2001.
- PEI Jianzhong. Study on performance of flexible waterproof material on bridge deck [D]. Xi'an: Chang'an University, 2001. (in Chinese)
- [13] FU J, YANG Y, ZHANG X, et al. Different strain distributions of cement-emulsified asphalt concrete pavement between the macro- and meso-scale [J]. *Road Materials & Pavement Design*, 2018: 1-14.
- [14] 张肖宁, 李 智, 虞将苗. 沥青混合料的体积组成及其数字图像处理技术[J]. *华南理工大学学报自然科学版*, 2002, 30(11): 113-118.
- ZHANG Xiaoning, LI Zhi, Yu Jiangmiao. Volume construction of asphalt mixture and digital image processing technology [J]. *South China University Technology Natural Science*, 2002, 30(11): 113-118. (in Chinese)
- [15] MASAD E, MUHUNTHAN B, SHASHIDHAR N, et al. Internal structure characterization of asphalt concrete using image analysis [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 1999, 13(2): 88-95.
- [16] LEE J J, SHINOZUKA M. Real-time displacement measurement of a flexible bridge using digital image processing techniques [J]. *Experimental Mechanics*, 2006, 46(1): 105-114.
- [17] CHAVEZGUTIERREZ F, MARTINEZRIOS A, TORALACOSTA D, et al. Measurement of optical fiber parameters and thermal core diffusion characteristics by digital image processing [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(15): 4331.
- [18] 王笃喜. 水泥混凝土桥面沥青混凝土铺装防水黏结层的性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- WANG Duxi. Research on waterproof and cohesive layer of concrete bridge deck asphalt pavement [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [19] 龚饶斌, 谭振宇, 吴传海, 等. 湿热条件下钢桥面铺装防水黏结体系施工质量控制[J]. *公路工程*, 2018(4): 170-175.
- GONG Yaobin, TAN Zhenyu, WU Chuanhai, et al. Construction quality control of waterproof adhesive system for steel bridge deck pavement under wet and hot conditions [J]. *Highway Engineering*, 2018(4): 170-175. (in Chinese)
- [20] LIU M, HAN S, PAN J, et al. Study on cohesion performance of waterborne epoxy resin emulsified asphalt as interlayer materials [J]. *Construction & Building Materials*, 2018, 177: 72-82.
- [21] 交通部公路科学研究所. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[M]. 北京: 人民交通出版社, 1984.
- Ministry of Communications Highway Science Research Institute. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering [M]. Beijing: People's Communication Press, 1984. (in Chinese)

【中文责编: 坪 梓; 英文责编: 之 聿】