

混凝土桥面板构造深度对铺装层间性能的影响

赵正峰¹, 张瑞杰², 戴苏春³, 常迅夫⁴

(1. 洛阳市公路事业发展中心 洛界高速公路管理处, 河南 洛阳 471000;

2. 洛阳市交通工程质量鉴定站, 河南 洛阳 471000;

3. 洛阳市公路事业发展中心 养护科, 河南 洛阳 471000;

4. 河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要:通过构造深度指标对水泥混凝土桥面板表面粗糙度进行表征, 研究构造深度对桥面铺装层间性能的影响规律。室内设计4种构造深度(0、0.4、0.8、1.2 mm)的混凝土板, 并通过上述混凝土板制备桥面铺装结构复合试件, 测得几种复合试件的拉拔强度、剪切强度、横向渗水系数及抗疲劳特性。结果表明, 受黏结材料类型影响, 构造深度增大对层间拉拔强度影响各异; 在一定范围内, 增大桥面板构造深度能够提高铺装层间抗剪稳定性, 但会对层间横向渗水和疲劳特性产生不利影响。

关键词:构造深度; 拉拔强度; 抗剪强度; 层间横向渗水; 疲劳特性

中图分类号: U443 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2022)03-0066-07

0 引言

近年来, 交通运输行业加快建设交通强国目标, 中国中西部地区的基建投资景气度较高, 桥跨结构在路网全线的占比越来越高。2020年末, 全国公路桥梁达91.28万座, 桥梁里程达6 628.55万延米, 比上年末分别增加3.45万座和565.1万延米, 桥梁里程占公路里程比例逐年提高^[1]。

我国公路桥梁多为水泥混凝土桥梁, 桥面铺装结构由沥青铺装层、防水黏结层和水泥混凝土桥面板组成。根据对多条高速公路早期破坏状况的调查可知, 桥面面层早期损坏常见病害形式有推移、松散、泛白等, 究其原因在于混凝土调平层与沥青铺装层之间的接触状态不佳^[2], 层间结构作为桥面铺装的薄弱区域, 对铺装层间稳定性具有重要影响。研究人员通过拉毛、刻槽、喷砂等方式对室内制备的混凝土板进行表面处理, 或通过凿毛、抛丸、铣刨等方式对混凝土桥面进行粗糙化处理, 研究混凝土板表面状态对桥面铺装层间性能的影响, 发现通过采用性能优异的防水黏结层材料, 提高混凝土桥面板的粗糙度或构造深度能够提高桥面板与沥青铺装层之间的抗剪强度^[3-5]。然而, 上述研究先通过相应工艺处理混凝土表面, 再进行试验表征来评估表面构造状态的影响规律, 不具有人为可控性, 如果能够通过前置量化处理工艺, 制备定量构造深度的混凝土板, 再进行相关试验, 能更有效地发现相应的变化规律。

通过模具成型法对混凝土板表面构造深度量化模拟, 研究了不同表面构造深度对桥面铺装层间抗拉拔强度、抗剪切强度、层间横向渗水和抗疲劳特性的影响规律, 为桥面铺装调平层混凝土表面构造深度量化控制提供一定依据。

1 试验材料

结合河南省混凝土桥常见铺装形式, 进行相关试件的制备和材料选取。桥面铺装下面层为AC-20沥青混合料, 防水黏结层选择热喷SBS改性沥青同步碎石封层、水性环氧沥青和高黏乳化沥青, 调平层为

收稿日期: 2022-05-13 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20220130

基金项目: 洛阳市新产品新技术新工艺研发项目(2101061B)

作者简介: 赵正峰(1977—), 男, 高级工程师, 研究方向为道路桥梁工程。E-mail: 1320222179@qq.com

赵正峰, 张瑞杰, 戴苏春, 等. 混凝土桥面板构造深度对铺装层间性能的影响[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2022, 35(3): 66-72.

C40 水泥混凝土,调平层混凝土表面构造深度设置为 0、0.4、0.8、1.2 mm。

1.1 沥青铺装层

桥面沥青铺装层为 AC-20 沥青混合料,油石比为 4.2,各档碎石级配及混合料合成级配如表 1 所示。

表 1 AC-20 沥青混合料配合比 %

矿料	掺配比例/%	通过筛孔的质量百分率											
		26.5 mm	19.0 mm	16.0 mm	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
5# 碎石	20	100.0	58.2	8.5	1.4	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
4# 碎石	23	100.0	100.0	92.6	66.4	15.2	11.6	9.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
3# 碎石	19	100.0	100.0	100.0	100.0	92.8	8.9	7.7	6.0	5.0	2.1	2.1	2.1
2# 碎石	10	100.0	100.0	100.0	100.0	99.9	81.4	7.9	3.3	2.7	1.9	1.9	1.9
1# 碎石	25	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.7	85.0	53.2	41.5	18.1	10.8	7.7
矿粉	3	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	98.7	80.5
合成级配		100.0	91.6	80.0	72.6	59.2	40.5	28.8	18.2	15.0	8.5	6.7	5.4

1.2 调平层混凝土

C40 水泥混凝土,水泥为 P.O 42.5 级普通硅酸盐水泥,配合比为水:水泥:砂:碎石=0.4:1:2.21:2.71,聚羧酸减水剂掺量为 0.5%。水泥指标如表 2 所示。

表 2 水泥性能指标

烧失量/%	不溶物含量/%	SO ₃ 含量/%	MgO 含量/%	氯离子含量/%
3.01	2.07	2.76	2.94	0.05

1.3 防水黏结层

防水黏结层所用材料满足《路桥用水性沥青基防水涂料》(JT/T 535—2015)、《道桥用防水涂料》(JC/T 975—2005)等相关标准要求。SBS 改性沥青洒布量为 1.4 kg/m²,水性环氧沥青洒布量为 1.0 kg/m²,高黏乳化沥青洒布量为 0.8 kg/m²,洒布效果如图 1 所示,材料性能指标如表 3~表 5 所示。

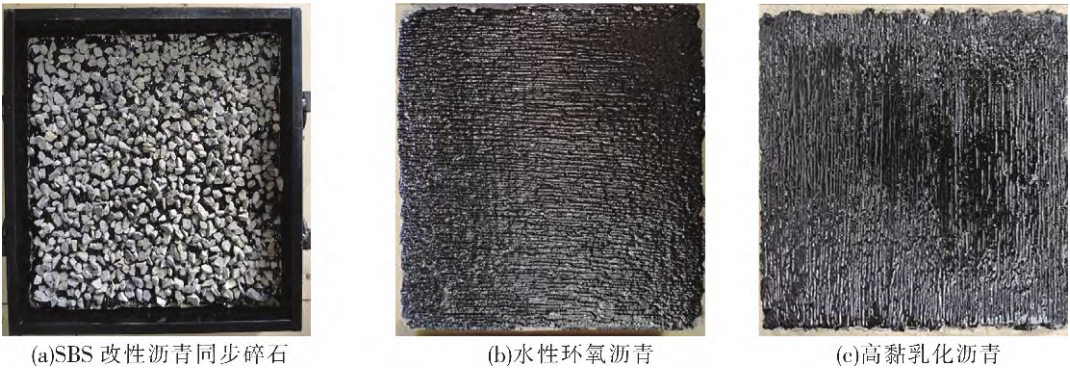


图 1 3 种防水黏结层材料洒布效果

表 3 SBS 改性沥青性能指标

针入度/dmm	软化点/℃	延度(5℃)/cm	弹性恢复/%	动力黏度(135℃)/(Pa·s)
54	84	34	96	2.5

表 4 水性环氧沥青性能指标

外观	固体含量/%	不透水性	低温柔性	耐热性
黑褐色均匀液体	53	0.3 MPa, 30 min 不渗水	-25℃无裂纹、断裂	160℃不流淌

表 5 高黏乳化沥青性能指标

外观	固体含量/%	耐热度	低温柔度	断裂伸长率/%
黑褐色均匀液体	61	160 ℃ 无流淌、滑动、滴落	-25 ℃ 无裂纹	1 541

2 表面构造量化处理

在 30 cm×30 cm 车辙板模具中倾入融化的石蜡,待自然冷却硬化后脱模,用钢刷在蜡板表面拉毛处理,根据相关规范方法测其表面构造深度^[6]。通过不断拉毛、测试、修正,使蜡板表面构造深度满足方案需求。将已知构造深度的蜡板重新放入车辙板模具中,调制环氧树脂注入装有蜡板的车辙板模具中,待完全固化后脱模如图 2(a)所示。将特定构造深度的环氧树脂模板置入车辙板模具中,浇筑 C40 混凝土,养护 7 d 后脱模,即可得到与蜡板表面构造相同的水泥混凝土板,如图 2(b)所示,混凝土养生 30 d 备用。

通过上述步骤,即可实现调平层混凝土表面构造深度的量化处理,得到特定构造深度的混凝土板。在混凝土板表面涂布防水黏结层材料,置入车辙板模具,并摊铺 AC-20 沥青混合料,经压实、切割,即可得到不同层间结构的复合试件,如图 2(c)所示。

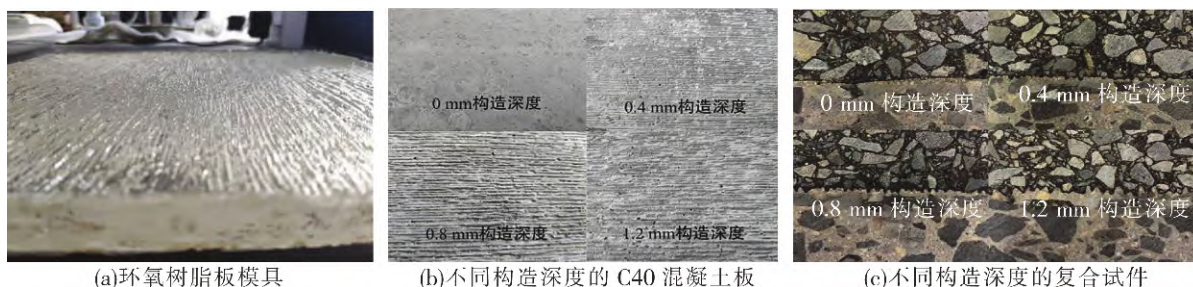


图 2 表面构造深度量化处理过程

3 结果与讨论

3.1 构造深度对 Pull-off 强度的影响

沥青铺装层与混凝土桥面板两者材料和性质差异较大,为保证桥梁上部结构的良好协同变形能力,使一刚一柔两结构层形成整体受力,防水黏结层需具有良好的黏结性能^[7-8]。Pull-off 拉拔试验通过施加拉拔力测量发生破坏时的拉应力值,定量地表征界面黏结强度,拉拔试验示意图如图 3 所示,试验结果如图 4 所示。

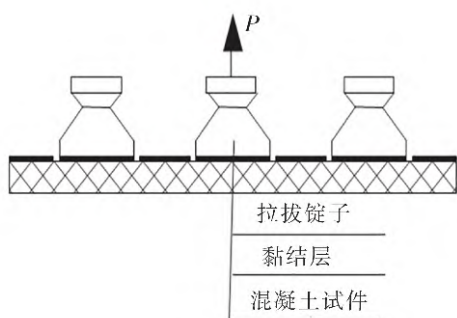


图 3 Pull-off 黏结强度测试

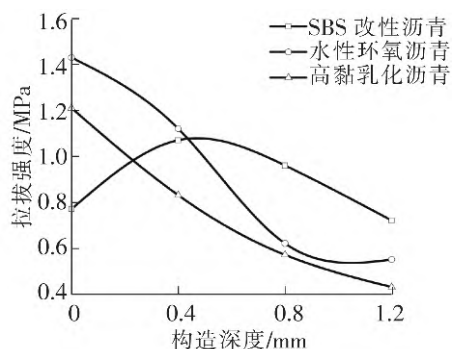


图 4 拉拔强度与构造深度的关系

由图 4 对比发现,不同构造深度对防水黏结材料的拉拔强度大致产生 2 种变化规律。以热熔型 SBS 改性沥青为例,随着构造深度的增加,拉拔强度呈现先增后减的变化趋势。随着混凝土表面粗糙度增加,黏结界面由单一的平面向波纹状粗糙界面过渡,层间黏结面积相对增加,黏结强度增大。随着构造继续增大,黏结材料集中分布于构造凹槽内,层间未形成均匀连续涂膜,使整体黏结强度降低。

以冷施工型水性环氧沥青和高黏乳化沥青为例,随构造深度增加,拉拔强度呈递减趋势。在 0 mm 构造深度下,两者拉拔强度高于热熔 SBS 沥青,主要是由于常温下具有良好的流动性和渗透性,能够渗入基层表面开孔和连通孔,经破乳固化后,在黏结表面形成类似于铆钉的效果。由于两者洒布量较小,随着构造深度增大,流动状态的黏结材料更易集中堆积在表面构造凹槽及缝隙内,在层间无法形成连续的薄膜,上下基面黏结面积及效果不佳,导致拉拔强度持续降低。

3.2 构造深度对剪切性能的影响

相关研究表明,桥面调平层表面构造使桥面板与沥青铺装层具有良好的嵌挤作用,表面构造纹理提供的层间摩擦阻力是影响桥面铺装抗剪稳定性的重要因素^[9-10]。行车荷载作用会对桥面铺装产生剪切应力,若抗剪稳定性不足,则会沿行车方向产生推移、裂缝等病害,如图 5 所示。为研究构造深度对铺装层间剪切强度的影响,对不同层间结构的复合试件进行剪切试验,试验结果如图 6 所示。

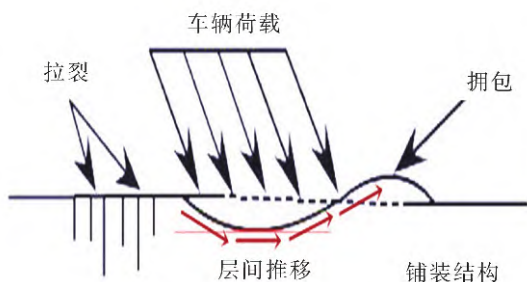


图5 剪切病害形成示意图

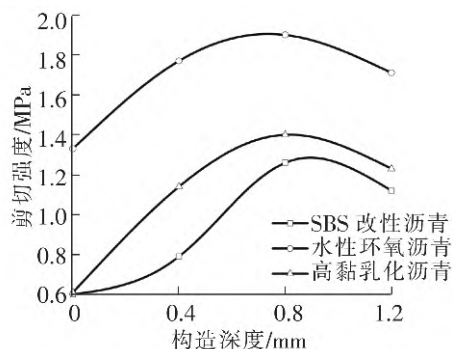


图6 剪切强度与构造深度的关系

由图 6 可知,在调平层构造深度为 0 mm 的情况下,水性环氧沥青的抗剪强度最大为 1.33 MPa,其他 2 种防水黏结层抗剪强度较低。0 mm 构造深度下,抗剪强度主要由黏结层材料自身内聚强度提供,水性环氧沥青固化后内部形成热固性交联结构,因此抗剪切强度高。

随着粗糙度增加,碎石嵌入混凝土构造凹槽,起到增强层间摩阻的作用,层间抗剪稳定性提高。继续增大表面构造,黏结材料无法形成连续薄膜,破坏黏结层涂料整体性。此外,构造深度增加使混凝土表面波形梳齿状构造过薄,抗剪强度降低,在剪切荷载作用时,自身发生破坏导致摩阻和嵌锁效果变差。根据试验结果,对抗剪强度指标而言,桥面板表面构造深度不宜过高,以 0.8 mm 为宜。

3.3 构造深度对层间渗水的影响

在桥面铺装服役过程中,压实的沥青铺装层能够有效阻止水分下渗,铺装层水损病害多是由于水分在层间横向迁移导致,行车荷载作用下产生的动水冲刷引起桥面铺装出现松散、泛白等早期病害^[11-12]。常规垂直渗水试验无法真实反映渗水对桥面铺装层间性能的影响,使用层间横向渗水装置研究构造深度对铺装层层间渗水性能的影响,横向渗水示意图如图 7 所示,构造深度对层间横向渗水程度的影响结果如图 8 所示。

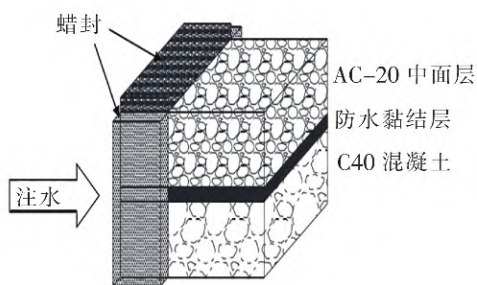


图7 层间横向渗水示意图

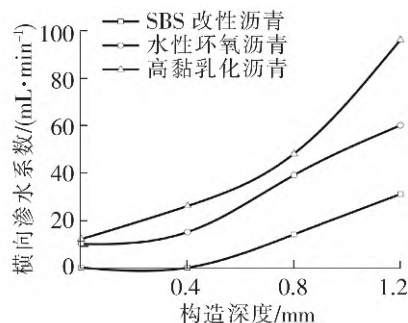


图8 层间横向渗水与构造深度关系

由图 8 可知,随着调平层表面构造深度增大,层间横向渗水系数存在增大趋势。SBS 改性沥青洒布

量较多,受到热沥青混合料碾压后会熔融流动,充分黏结沥青层与调平层,封闭层间连通空隙,在一定构造深度下基本不存在层间渗水。但随着构造深度的增加,防水黏结材料在一定的洒布量情况下,层间渗水通道增加,导致层间出现横向渗水。构造深度相同,水性环氧沥青与高黏乳化沥青的层间横向渗水表现不佳,较少的洒布量导致桥面铺装 2 层结构未充分黏结,存在较多连通空隙,层间横向渗水系数较大。因此,在构造深度一定的情况下,适当增大防水黏结材料洒布量能够封闭层间横向渗水通道,减少横向渗水的发生。

3.4 构造深度对疲劳特性的影响

混凝土桥面铺装层在行车荷载作用下容易产生疲劳破坏,即铺装层与调平层间黏结力丧失,出现脱层现象。桥面板水泥混凝土和铺装层沥青混合料 2 种材料性质差异较大,两者变形不协调时将产生较大的弯拉应变,桥面铺装层在长周期疲劳作用下,容易产生推移、脱层、裂缝等病害^[13-14]。使用 UTM-30 多功能路面材料动态测试系统及四点弯曲疲劳试验模块,对小梁复合试件进行 5 万次疲劳作用,复合试件疲劳特性如图 9 所示。

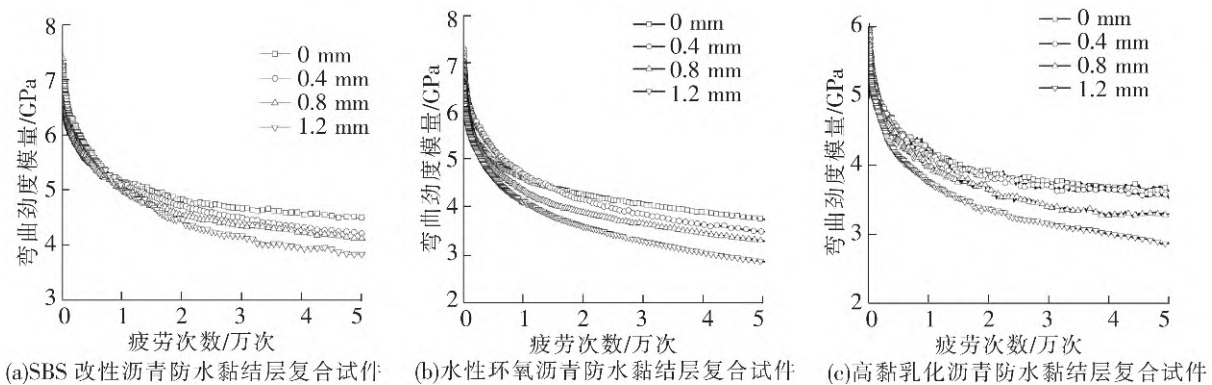


图 9 不同防水黏结层复合试件疲劳特性

由图 9 可知,随着周期荷载作用次数的增加,铺装层复合试件弯曲劲度模量逐渐降低,表明复合试件的耐疲劳寿命逐渐降低。在交变荷载作用下,试件内部微裂纹产生和发展,导致整体受力特性衰减,最终发生疲劳破坏。对于相同防水黏结层复合试件,构造深度增加,弯曲劲度模量衰减越快,残余弯曲劲度模量减少,表明构造深度对铺装层复合试件耐疲劳寿命具有不利影响。构造深度增加,复合试件内部缺陷增多,在荷载作用下,加速试件的疲劳破坏。

切割经疲劳作用的小梁复合试件,并在标准条件下进行抗剪强度测试,评价经疲劳作用后,残余抗剪强度与构造深度的关系,结果如图 10 所示。

由图 10 可知,黏结层复合件经疲劳作用后,随着构造深度的增加,同一防水黏结层的衰减程度增大。其中,SBS 改性沥青抗剪强度依次衰减 5.6%、9.9%、14.0%、19.6%;水性环氧沥青抗剪强度依次衰减 14.3%、19.6%、25.0%、42.0%;高黏乳化沥青依次衰减 10.4%、18.7%、21.6%、45.2%。在防水黏结材料用量一定的情况下,构造深度增加,使单位面积黏附的防水黏结层减少,导致层间柔性协调能力变低,抗疲劳性能降低。此外,弯曲振动作用导致混凝土板表面构造梳齿破损,进而导致嵌锁作用降低,抗剪强度衰减。

SBS 改性沥青防水黏结层初始强度相对较低,经疲劳作用后,强度衰减速率较慢,是由于 SBS 改性沥青洒布量较高,且热塑性弹性体聚合物赋予材料良好的弹塑性和耐久性。高黏改性乳化沥青和水性环氧沥青洒布量相对较少,且水性环氧固化后抗挠曲变形

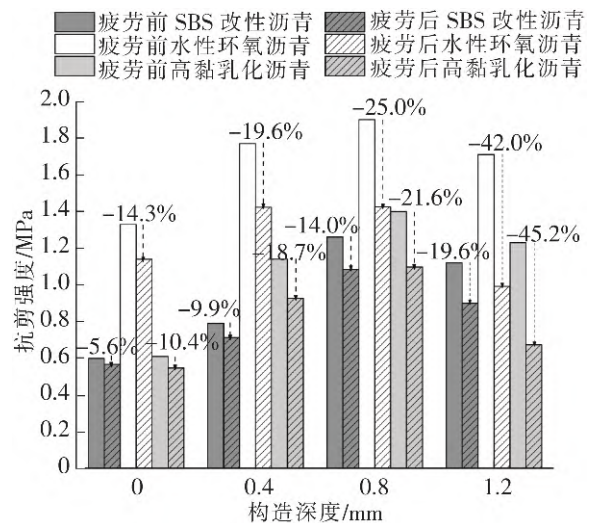


图 10 残余抗剪强度与构造深度的关系

能力减弱,抗疲劳性能降低较快。

4 结论

(1)构造深度对拉拔黏结强度的影响需考虑黏结层材料类型:洒布量较多的热熔型沥青,构造深度适当增加有利于提高其黏结强度;洒布量较少的冷施工型沥青,不适于较大的桥面板构造深度。

(2)构造深度增大对铺装层间抗剪强度具有积极的影响。表面构造深度为 0.8 mm,提供的层间摩阻能够保证铺装层间具有良好的抗剪切性能,但过大的构造深度会造成混凝土表面强度降低,进而对抗剪强度产生不利影响。

(3)构造深度增大导致层间横向渗水系数增加,铺装层间具有较多连通孔隙,会对层间稳定性产生不利影响。在调平层表面构造深度确定的情况下,宜增加黏结材料的洒布量,可减少层间渗水通道的产生。

(4)由于桥梁的使用特性,桥面铺装受典型高周期疲劳荷载作用,易产生疲劳破坏,经疲劳试验作用后,铺装层间抗剪强度降低,且构造深度越大,衰减程度越大。3种防水黏结材料中,热塑性弹性体 SBS 改性的沥青材料受周期荷载作用后,抗剪强度衰减较慢,具有较好的耐疲劳特性。

(5)综合考虑构造深度对上述指标的影响及实际施工需求,在构造深度为 0.8 mm 的情况下,洒布量较多的热熔型 SBS 改性沥青材料能够兼顾各指标的平衡,表现出较好的适用性。

参 考 文 献

- [1]交通运输部. 2020 年交通运输行业发展统计公报[R/OL]. (2021-05-19). https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202105/t20210517_3593412.html.
- [2]Chun Sanghyun, Kim Kukjoo, Greene James, et al. Evaluation of interlayer bonding condition on structural response characteristics of asphalt pavement using finite element analysis and full-scale field tests[J]. Construction and Building Materials, 2015, 96: 307-318.
- [3]黄晓明. 水泥混凝土桥面铺装铺装层技术研究现状综述[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(1): 1-10.
- [4]何文华, 区桦, 宗炜, 等. 水泥混凝土桥面板粗糙化技术研究[J]. 建材世界, 2021, 42(6): 1-10.
- [5]孔令云, 吴楚枫, 尹果果. 基于图像处理技术的混凝土表面构造仿真[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(6): 2361-2368.
- [6]北京市市政工程设计研究总院. CJJ 139—2010 城市桥梁桥面防水工程技术规程[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2010.
- [7]万晨光, 申爱琴, 郭寅川, 等. 桥面铺装混凝土调平层与沥青面层接触状态研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(2): 262-266.
- [8]陈标, 杨显平, 韩国祥. 桥面粗糙度对防水黏结层性能影响研究[J]. 公路, 2021, 66(11): 199-204.
- [9]《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 1-97.
- [10]宋国瑞, 王笑风, 杨博, 等. 水泥混凝土桥面铺装层间抗剪性能研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2021, 38(4): 431-436.
- [11]刘梦梅, 韩森, 杨赫, 等. 桥面铺装防水黏层渗水、积水分析与评价方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(3): 115-120.
- [12]郭猛. 长大纵坡桥面防水技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [13]葛文璇, 徐勋倩, 高强, 等. 基于环氧沥青黏结层的混凝土桥面薄层铺装疲劳性能研究[J]. 公路, 2012(7): 18-23.
- [14]王笑风, 宋国瑞, 杨博, 等. 典型防水黏结材料抗剪稳定性及抗疲劳性能研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(9): 125-128.

Influence of Structural Depth of Concrete Bridge Deck on Performance Between Pavement Layers

Zhao Zhengfeng¹, Zhang Ruijie², Dai Suchun³, Chang Xunfu⁴

(1. Luojie Highway Management Office of Luoyang Highway Development Center, Luoyang 471000, China;

2. Luoyang Traffic Engineering Quality Appraisal Station, Luoyang 471000, China;

3. Maintenance Department of Luoyang Highway Development Center, Luoyang 471000, China;

4. Henan Provincial Communications Planning & Design Institute Co.Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: The surface roughness of cement concrete bridge deck was characterized by structural depth index, and the influence of structural depth on the performance of bridge deck pavement was studied. Four kinds of concrete slabs with different surface structure depths (0, 0.4, 0.8, 1.2 mm) were designed indoors. The composite specimens of bridge deck pavement were prepared from the above concrete slabs. The pull-off strength, shear strength, interlaminar lateral seepage and fatigue characteristic of several composite specimens were measured. The results showed the pull-off strength varied with the increase of the structural depth due to the type of bonding materials. In a certain range, increasing the structural depth could improve the shear stability between the pavement layers, but might have adverse impact on the interlaminar lateral seepage and fatigue characteristics between the layers.

Key words: surface structure depth; pull-off strength; shear strength; interlaminar lateral seepage; fatigue characteristic

(上接第 41 页)

Analysis and Research on Hydration Heat of Reinforced Concrete Hollow Slab Bridge Precast Beams

Tang Yang¹, Wang Guowei², Wang Dawei³

(1. Countryside Highway Administration Bureau of Wufeng Tujia Autonomous County, Yichang 443413, China;

2. Jinan Jinqu Road Survey Design Research Co. Ltd., Jinan 250101, China;

3. Wenzhou Traffic Planning and Design Institute, Wenzhou 325000, China)

Abstract: With a reinforced concrete hollow slab precast beam as an example, Midas FEA was used to establish a three-dimensional solid finite element model. The calculation and analysis show that the thickness of the hollow slab precast beam is small, and the temperature rise of the internal concrete is not large. Under the condition that the temperature control measures are not taken, the concrete cracking risk of the hollow slab precast beam in areas with large changes in ambient temperature is high, and the temperature stress cannot be ignored. After taking corresponding temperature control measures such as pasting thermal insulation boards and covering with rock wool, the temperature stress of the hollow slab prefabricated beam can be completely controlled within the tensile strength range of concrete. Hollow slab precast beams are greatly affected by the ambient temperature during the curing period. Under the circumstance that the budget is sufficient, it is recommended to take measures to control the variation of the ambient temperature.

Key words: highway bridge; hollow slab; precast beam; hydration heat; finite element analysis