

桥面铺装长效性防水黏结层评价指标研究综述

陶福德¹, 李虎¹, 吴本兵¹, 高艳龙², 陈 鋈¹, 罗运豪¹, 蔡正松¹, 任明扬¹, 何 杰³, 闫东波³

(1. 贵州路桥集团有限公司, 贵州 贵阳 550001; 2. 四川高速公路建设开发集团有限公司, 四川 成都 610047;

3. 重庆鹏方路面工程技术研究院有限公司, 重庆市 400026)

摘 要: 针对桥面铺装防水黏结层长效性评价方法的问题, 结合防水黏结层失效机理及其影响因素, 对现阶段防水性能、黏结性能及耐久性的常用测试方法进行了归纳与比较, 分析了不同试验方法的适用性与局限性。在此基础上, 构建了由“长期防水能力”和“界面黏结耐久性”构成的长效性评价框架, 提出涵盖耐水损伤、抗疲劳渗水、黏结耐久及环境耦合等多维度评价指标与试验方法。研究表明, 在水-温度-荷载等耦合条件下开展加速耐久性试验与寿命预测, 是长寿命桥面铺装体系研究的重要方向, 可为防水黏结层材料研发与结构设计提供参考依据。

关键词: 桥面铺装; 防水黏结层; 长效性评价; 长期防水性能; 界面黏结耐久性

中图分类号: U443.33; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0043-04

Overview of Evaluation Indicators for Long-term Waterproof Bonding Layer of Bridge Deck Pavement

TAO Fude¹, LI Hu¹, WU Benbing¹, GAO Yanlong², CHEN Jun¹, LUO Yunhao¹, CAI Zhengsong¹,
REN Mingyang¹, HE Jie³, YAN Dongbo³

(1. Guizhou Road and Bridge Group Co., Ltd., Guiyang 550001, China; 2. Sichuan Expressway Construction and Development Group Co., Ltd., Chengdu 610047, China; 3. Chongqing Pengfang Pavement Engineering Technology Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400026, China)

Abstract: Regarding the issue of the long-term performance evaluation method for the waterproof bonding layer of bridge deck pavement, combined with the failure mechanisms and its influencing factors of waterproof bonding layer, the common testing methods for waterproof performance, bonding performance and durability at the present stage are summarized and compared to analyze the applicability and limitations of different test methods. On this basis, a long-term performance evaluation framework composed of "long-term waterproof capacity" and "interface bonding durability" is constructed, and the multi-dimensional evaluation indicators and test methods covering water damage resistance, fatigue water seepage resistance, bonding durability and environmental coupling are proposed. The results show that the implementation of accelerated durability tests and life predictions under coupled conditions such as water, temperature and load is an important direction in the research of long-life bridge deck pavement systems, which can provide a reference for material development and structural design of waterproof bonding layer.

Keywords: bridge deck pavement; waterproof bonding layer; long-term performance evaluation; long-term waterproofing performance; interfacial bonding durability

0 引 言

近年来,随着桥梁数量和服役年限的增加,桥面铺装早期损坏问题日益突出。工程调查表明,渗水、唧浆、层间滑移和界面脱空等病害发生频率高、危害

显著,其中相当一部分与防水黏结层性能不足密切相关。防水黏结层作为连接铺装层与桥面板的关键界面,既承担防水功能,又提供必要的界面黏结力,是桥面铺装体系中的薄弱环节^[1],防水能力或黏结性能一旦衰减,将产生水分侵入和界面滑移,进而导致多种桥面病害。

随着“长寿命沥青路面”理念的提出^[2],行业对桥面铺装体系的使用年限提出更高要求,结构设计不仅关注初期性能,更注重材料与界面在全寿命周期内的长期有效性。在这一背景下,其中防水黏结

收稿日期: 2026-01-21

作者简介: 陶福德(1983—), 男, 学士, 工程师, 从事项目施工生产管理工作。

通信作者: 高艳龙(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事道路与铁道工程管理工作。电子信箱: hellogao@163.com

层耐久性成为关键控制环节。然而,现有评价多基于黏结强度、剪切强度及初始防水性能等短期指标^[3-5]。虽然这些指标能够反映材料的初期性能,但难以反映材料在长期荷载、温度循环、水损伤及老化作用下的性能稳定性^[6],现有研究中关于防水黏结层“长效性”的评价指标和方法较少,同时,缺乏系统性的长期耐久性指标体系。

因此,本文在系统梳理现有评价方法的基础上,综合分析防水黏结层的短期与长期性能,构建反映界面耐久性、防水保持能力及性能演化特征的综合评价指标体系。

1 防水黏结层材料的失效机理分析

1.1 水损害

水的渗入对防水黏结层性能具有重要影响,在多雨多雪地区,沥青路面结构没有排水层,渗入的积水无法及时排出,导致防水黏结层长时间处于浸水状态,其黏附作用会产生衰减,特别是在微裂缝、施工接缝或界面空隙位置,水分更易进入并积聚,使沥青与矿料间的界面能降低,形成早期的微弱剥离^[7-8]。同时,水分渗入防水黏结层后会对水泥混凝土板造成巨大影响,当桥面结构在车辆荷载作用下产生周期性振动时,封闭水分会形成压力水,促使细颗粒被重复抽吸而上移,导致“唧浆”病害^[9],该过程不仅破坏黏结层连续性,也会加速界面脱空,形成恶性循环。

1.2 剪切疲劳破坏

重载超载和反复荷载会造成防水黏结层界面剪切疲劳破坏,桥梁铺装常受频繁的制动、加速以及横向荷载影响,界面发生周期性滑移,虽然单次滑移量很小,但在反复作用下会造成界面黏结力逐步衰减,导致滑移累积、微损伤扩展与最终的界面疲劳破坏^[10-12]。研究表明,界面疲劳破坏形式^[13]分为两种:一种是沥青层内部由累积损伤形成的疲劳裂纹,裂缝从上向下扩展使防水黏结层断裂;另一种是在剪切荷载下在防水黏结层产生疲劳损伤,并向上扩展至沥青层造成推移。

1.3 温度和老化

不同材料的热膨胀系数存在差异,沥青层与混凝土板在温度变化下产生不一致的收缩-膨胀变形,高温环境下沥青基黏结材料软化,抗变形能力下降,使界面更容易产生滑移,低温条件下,沥青材料脆性增加,当结构温差或荷载应力超过界面承载极

限时,形成细微裂缝^[14]。裂缝一旦与水损害耦合,形成疲劳-水损害复合破坏模式。

防水黏结层材料自身老化也会影响其性能^[15],在长期热、氧及紫外辐射作用下,特别是沥青基类的黏结材料会发生氧化反应,使其刚度增加、延度降低、韧性下降,导致界面更易在荷载下发生脆性破坏,同时,湿热循环会加速黏结层内部水分扩散与氧化反应,造成防水黏结层进一步失效。

2 现有防水黏结层材料性能评价方法

2.1 防水性能评价方法

防水黏结层材料必须具备良好的防水性能,能够有效防止桥面唧浆和层间剥离,现有防水性能评价主要关注材料在短期条件下的渗水阻隔能力^[16-17],即通过渗透试验或压力水试验测试黏结层是否能够有效阻断水分。常用的方法包括渗透系数试验、压力水密封试验以及模拟桥面漏水工况的试验。杨赫^[18]通过室内制备多种防水黏结层复合板试件,采用CT扫描与三维重建技术,研究了水压力、界面类型及压实工艺对防水层横向渗水性能的影响。刘桂花^[19]认为防水性试验多基于材料的初始状态,难以反映施工后的真实性能,通过模拟热沥青混合料铺筑与碾压,结合防水层损伤特征与不透水试验,对其抗施工损伤性及碾压后防水性能进行了综合评价。

压力水密封试验通过施加一定水压判断防水黏结层是否渗漏,更接近钢桥面铺装的实际受水状态。王笃喜^[20]通过模拟动水压力与桥面板开裂工况,利用自制装置系统评价了多种黏结层材料的抗渗水能力。曹超飞^[21]针对实际工程中唧浆病害,结合室内动水与渗水试验,分析了路表渗水、防水层失效及层间泥浆分布特征。赵毅^[22]基于Boit渗流固结理论建立铺装体系有限元模型,分析不同因素条件下渗透系数与孔隙水压力的分布规律。

2.2 黏结性能评价方法

技术规范^[23-24]明确要求对铺装组合结构进行界面黏结与剪切性能测试。拉拔试验^[25]是应用最广泛的静态界面黏结评价方法,通过施加垂直拉力直至破坏,以最大拉力计算层间拉拔强度,其原理直观、操作简便,适用于材料筛选及施工质量检测^[26],因此被广泛应用于室内材料筛选与现场施工质量检测。但该方法难以反映铺装层在车辆荷载作用下的实际受力状态,相比之下,剪切试验更能表征界面抗滑移能力。剪切试验^[27-32]可分为直剪、压剪与斜剪三类,

直剪试验反映界面纯剪抗力,压剪试验考虑剪切与法向应力的共同作用,斜剪试验则模拟剪切与拉压受力状态,实际应用需根据研究目的选取。

拉拔试验主要评价界面抗拉黏结能力,适用于材料初选与施工质量控制,但难以反映桥面铺装服役中的抗滑移性能。剪切类试验更符合实际受力状态,其中直剪、压剪和斜剪分别对应纯剪、压剪耦合及复合受力工况。

3 长效性防水黏结层长效评价指标体系

3.1 缺乏关于长效性评价指标

目前,对防水黏结层的性能研究和评价方法主要针对其初始或短期性能,而对其在车辆荷载、环境等因素共同作用下的长期性能与有效寿命周期关注不足。防水黏结层性能是与温度、界面状态及荷载共同耦合^[33-34],具有多机制影响特征;因此,本文研究初步提出一种防水黏结层长效性评价框架。

3.2 长期防水性评价

长期防水性表示防水黏结层在服役期内阻断水分渗入并延缓渗水通道形成的能力,研究表明,其防水性能会在高温软化、膜厚削弱、刺破损伤及老化作用下产生衰减^[35-36]。因此,本文研究建议从耐水与耐腐蚀介质性能和抗疲劳渗水性能两个方面对长期防水性进行评价。耐水与耐腐蚀介质性能可通过长期浸水、盐溶液侵蚀或冻融循环后不透水性能保持率作为检测指标,用以反映防水层在潮湿等环境下的性能稳定性。抗疲劳渗水性能则通过模拟“泵吸”效应,在带裂缝试件上施加高频动水压力循环,监测渗水压力或渗流量变化。

3.3 界面黏结耐久性评价

界面黏结性降低是防水黏结层失效的主要原因之一,车辆荷载反复剪切、水分渗入及温度变化均会加速该过程。传统剪切试验主要反映初始性能,难以评价其耐久性。本文认为,应以单因素及多因素耦合作用下黏结性能的变化作为界面黏结耐久性的核心评价指标。单因素影响下的黏结性评价方法主要包括长期老化后黏结性能、耐水损害黏结性能、疲劳黏结性能。已有研究分别从荷载^[37]和温度作用^[38]角度分析了黏结层综合性能变化。

单因素试验难以模拟桥面铺装实际环境,需要引入水、温度、荷载等多因素耦合试验,以更真实地反映界面黏结性能随时间的降低规律。在高温多雨地区,可采用“水-温”耦合模式,通过水浸、高低温循

环或冻融作用模拟桥面在降雨、日晒及季节温差下的黏结性下降过程^[39]。在重载交通条件下,可通过“水-荷载”耦合试验模拟车辆推移效应,分析二者对疲劳寿命的交互影响^[40]。若要建立更加接近实际的耐久性评价体系,需进一步发展多因素耦合加速加载研究方法,包括“水-热-荷载”耦合或通过在同一装置内叠加紫外辐射、湿度、温度、水压和循环荷载等多种作用,如综合耦合多功能试验的典型参数为温度循环-20~60℃;动水压力0.2~0.5 MPa;荷载频率5~10 Hz,具体方法见表1、图1。防水黏结层寿命可通过建立加速老化时间等效关系与性能衰减模型,预测其达到失效阈值的寿命。

表1 防水黏结层长效性评价方法

效果	评价指标	指标参数	试验方法	评价功能
耐水损伤	不透水性保持	老化后渗透系数、冻融后渗透系数、盐水浸泡后渗水量	长期浸水、冻融循环、盐腐蚀浸泡、压力水试验	浸水与腐蚀环境下防水层性能
	抗疲劳渗水	动水压力循环下渗水量变化	泵吸模拟试验、裂缝渗水模型	裂缝处水-荷载作用下的长期防水寿命
黏结耐久	老化黏结保持率	热氧老化后剪切强度保持率	RTFOT/PAV后剪切试验	长期热氧作用下的黏结衰减
	水损害黏结保持率	浸水后拉拔强度、剪切强度	浸水后剪切/拉拔	浸水环境下黏结性变化
	剪切疲劳性能	剪切疲劳寿命	剪切疲劳试验	重复荷载下界面抗推移能力
环境耦合	多耦合条件性能	温湿度/水压/荷载叠加的黏结性	综合耦合多功能试验	真实模拟桥面长期服役环境

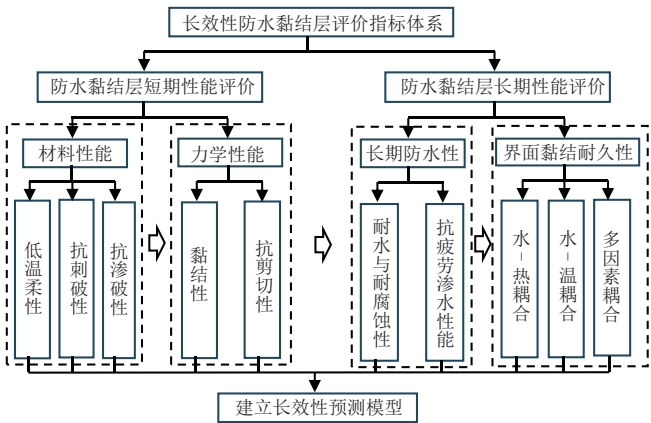


图1 长效性防水黏结层评价体系

4 结 语

目前针对防水黏结层在长期环境下的耐久性研究仍较不足,尚未形成系统的长效性评价体系。本文在综述防水黏结层失效机理与性能评价方法的基础上,从长期防水性能与界面黏结耐久性来构建防

水黏结层长效性评价框架,在实际工程条件下,应重点关注材料抗渗水能力、界面黏结保持性及多因素耦合作用下的疲劳衰减特征。以建立更符合桥梁工程实际的综合耐久性评价体系。

参考文献:

- [1] 李霖,闫瑾.江西水泥混凝土桥面防水粘结层力学分析与性能研究[J].交通标准化,2014,42(22):62-65;69.
- [2] 吴中,周玥,程志强.长寿命沥青路面应用研究进展与展望[J].上海公路,2025(1):30-35.
- [3] 邓欢.裕溪河特大桥排水性桥面铺装设计及耐久性评价[D].南京:东南大学,2019.
- [4] 池善庆.钢箱梁桥面防水粘结层最佳材料配比设计与性能评价研究[J].福建建设科技,2024(2):93-96.
- [5] 吕欣芃.聚氨酯类钢桥面铺装防水粘结层剪切破坏性能研究[D].北京:北京建筑大学,2022.
- [6] 宁晓辉.重载沥青在高速公路桥面防水层耐久性应用[J].价值工程,2025,44(11):101-103.
- [7] 何中楠.长期浸水对沥青和集料-沥青界面性能损伤的试验研究[J].中外公路,2012,32(2):268-270.
- [8] 王端宜,司徒坚文,聂文.高温多雨地区钢桥面铺装脱粘病害成因试验研究[J].桥梁建设,2025,55(5):34-40.
- [9] 刘学成,郑霜杰,赵炎炎.湿热地区水泥混凝土路面板底脱空的影响因素分析[J].中国公路,2017(1):124-125.
- [10] 王琴.疲劳荷载作用下FRP-混凝土界面性能退化模型研究[D].天津:河北工业大学,2023.
- [11] 王笑风,宋国瑞,杨博,等.典型防水粘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;137.
- [12] 张锋,李梦琪,王天宇,等.水泥混凝土桥面复合防水粘结层的性能[J].哈尔滨工业大学学报,2020,52(3):26-32.
- [13] 董自亮.车辆荷载作用下压型钢板-混凝土组合桥面板受力特性和疲劳性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [14] 王之毓.基-面层间胶粉改性沥青粘结层黏附特性分析[D].呼和浩特:内蒙古工业大学,2021.
- [15] 戴文斌,王笑风,李豪.防水粘结层材料复合件耐久性性能评价[J].新型建筑材料,2023,50(3):143-146.
- [16] 魏鹏克.动水压力作用下沥青混凝土路面破坏研究[D].重庆:重庆交通大学,2013.
- [17] 王文涛.多因素耦合动态孔隙水压力对沥青路面破坏的影响研究[D].北京:北京科技大学,2020.
- [18] 杨赫.混凝土桥面沥青铺装防水粘结层特性研究[D].西安:长安

大学,2018.

- [19] 刘桂花.混凝土桥面长效防水粘结体系的研发与性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.
- [20] 王笃喜.水泥混凝土桥面沥青混凝土铺装防水粘结层的性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2012.
- [21] 曹超飞.水泥混凝土桥面沥青铺装唧浆病害成因分析与养护处治对策研究[D].成都:西南交通大学,2023.
- [22] 赵毅.钢桥面铺装层水损害研究[D].南京:东南大学,2020.
- [23] JTG/T3364-02—2019 公路钢桥面铺装设计与施工技术规范[S].
- [24] JTG 3410—2025 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [25] 胡海波,刘刚,钱振东,等.武汉青山长江公路大桥混凝土桥面防水粘结层试验研究[J].桥梁建设,2020,50(增刊1):57-62.
- [26] 张文慧.湿热重载条件下混凝土桥梁沥青铺装防水粘结层的性能研究[D].广州:广州大学,2017.
- [27] 方桂鹏.水泥混凝土桥面防水粘结材料的制备及性能研究[D].南宁:广西大学,2024.
- [28] 季节,苑志凯,于海臣,等.水泥混凝土桥面水泥基防水粘结层材料性能评价[J].北京工业大学学报,2019,45(4):359-365.
- [29] 艾长发,刘一鸣,任东亚.基于压-直剪试验方法的沥青路面层间污染特性[J].长安大学学报(自然科学版),2023,43(5):21-29.
- [30] 邹远棋.混凝土桥面树脂-乳化沥青防水粘结材料设计与层间力学性能评价[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2023.
- [31] 张娟.水泥混凝土桥面防水粘结层性能研究[D].西安:长安大学,2008.
- [32] JC/T 975—2005 道桥用防水涂料[S].
- [33] 王延金.公路路面病害成因及养护施工技术研究[J].工程建设与设计,2025(12):163-165.
- [34] 胡飞玲,周孔.混凝土桥面铺装防水粘结层技术指标探讨[J].城市道桥与防洪,2011(7):124-126.
- [35] 夏小明.桥面铺装防水粘结层改性乳化沥青的性能研究[J].橡胶工业,2025,72(10):764-770.
- [36] 李珩.钢桥面铺装环氧沥青防水粘结层的应用研究[J].城市道桥与防洪,2015(4):180-183.
- [37] 范钟元,单浩睿,王子哈,等.聚氨酯钢桥面铺装防水粘结层剪切疲劳性能研究[J].市政技术,2024,42(5):181-186;206.
- [38] 赵正峰,褚付克,张瑞杰,等.防水粘结层不同黏结强度测试方法关联性分析[J].新型建筑材料,2022,49(6):64-68.
- [39] 司徒坚文.钢桥面铺装防水粘结层失效机制与材料优化研究[D].广州:华南理工大学,2024.
- [40] 丑志静.多种疲劳损伤行为下钢桥面铺装结构分析与优化[D].北京:北京建筑大学,2020.

(上接第39页)

- Mechanics, 44(8): 845-854.
- [14] Liu W, Yan K, Li J Q, et al. Peridynamics-based simulation of semi-circular bending (SCB) testing[J]. Construction and Building Materials, 2021, 268: 121190.

- [15] Yang S, Jiang , Leng Z, et al. Feasibility and performance of the Semi-circular Bending test in evaluating the low-temperature performance of asphalt mortar [J]. Construction and Building Materials, 2021, 269: 121305.