

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.02.020

# 温度—荷载耦合作用下水泥混凝土桥面 防水黏结层剪应力分析

季节<sup>1,2</sup>, 李昊隆<sup>1</sup>, 董阳<sup>1</sup>, 于海臣<sup>3</sup>, 杨跃琴<sup>1</sup>, 李鹏飞<sup>3</sup>(1 北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京市 100044; 2. 北京未来城市设计高精尖创新中心;  
3. 北京国道通公路设计研究院股份有限公司)

**摘要:** 为了分析水泥混凝土桥面防水黏结层在温度—荷载耦合作用下剪应力的变化, 应用 Abaqus 软件建立桥面铺装体系有限元模型, 沿纵桥向布置车道荷载以确定最不利荷位, 并计算防水黏结层在最不利荷位处受不同荷载大小、铺装层厚度及模量等参数变化下的剪应力, 分析剪应力在温度—荷载耦合作用下的变化规律。计算结果表明: 最不利荷位出现在桥梁跨中处, 最大剪应力产生在梁端支座处; 防水黏结层剪应力随铺装层厚度的增加而降低, 当铺装层厚度为 8~12 cm 时, 其值下降较为缓慢; 相对于温度, 防水黏结层剪应力对荷载的变化更为敏感, 在高温和重载耦合作用时, 85% 桥面在服役期间防水黏结层剪应力值远远大于现行规范的规定值, 这是桥面铺装层体系容易出现早期病害的主要原因之一。

**关键词:** 温度—荷载耦合; 有限元; 最不利荷位; 防水黏结层; 剪应力

水泥混凝土桥面板+沥青桥面铺装体系中, 铺装层与桥面板的物理性能存在明显的差异, 这种“一刚一柔”的组合形式使得铺装体系内部剪应力大, 容易产生剪切变形; 层间结合处黏结性差, 容易产生水平向的相对位移; 水分下渗导致面层松散。防水黏结层位于两层之间, 具有增强上、下层黏结、防止水分下渗的作用, 因此, 黏结层的性能很大程度上影响了桥面铺装层体系的寿命和性能表现。近年来, 随着重载车辆数量的增多以及超载、超重现象的常态化, 桥面铺装体系在使用初期即产生面层推挤、拥包和车辙等病害。目前, 国内外在桥面铺装体系的设计理论、材料选择和评价方法等方面仍没有统一的标准, 各国多以经验为主导对各层材料的性能作出规定。防水黏结层材料的抗剪性能不足是造成防水黏结层失效、导致桥面铺装体系初期病害的主要原因。如何设计、开发符合重载交通的防水黏结层材料受到广泛的关注。中国水泥混凝土桥面铺装层厚度的变化范围较大, 因而对抗剪性能的要求不尽相同, JC/T 975—2005《道桥用防水涂料》和 JT/T 535—2015《路桥用水性沥青基防水涂料》中规

定的抗剪强度标准值已不适应目前的重载交通需求, 也不适用于现在种类繁多、材料复杂的防水黏结层。因此, 为开发适用于重载交通的新型防水黏结层材料, 防止桥面铺装体系发生早期破坏, 确定抗剪强度新标准值非常必要。

Mazzotta F 等利用废旧橡胶颗粒制作橡胶垫和 SBS 改性沥青作为新型水泥混凝土桥面防水黏结层, 测试其在常温下最大拉拔强度和剪切强度分别为 0.5 MPa 和 0.18 MPa, 满足规范要求; Canestrari F 等对 1 400 个试样进行室内剪切试验、双剪切试验以及扭矩试验, 研究了试验温度、加载速度以及试样龄期等参数对路面层间剪切强度的影响, 结果显示随着温度的升高, 沥青路面层间剪应力不断减小; Mohammad LN 等采用有限元方法研究了黏结层界面剪切特性对面层荷载的响应, 发现路面厚度越薄, 黏结层材料种类和用量对层间剪切特性影响越明显; Liu 等利用室内力学试验、温度监测和有限元分析法, 发现混凝土桥面铺装体系的层间抗剪强度和拉拔强度随温度的升高而显著降低, 防水黏结层材料的安全系数(强度/应力)随荷载与

收稿日期: 2020—03—12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51778038); 北京市自然科学基金委—北京市教委联合资助项目(编号: KZ201910016017); 长江学者和创新团队发展计划资助项目(编号: IRT—17R06); 市属高校基本科研业务费项目(编号: ZC); 重大重点科研支撑专项(编号: ZC05); 科研创新团队建设计划项目(编号: X18259)

作者简介: 季节, 女, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: jijie@bucea.edu.cn

温度梯度的增加而显著减小;Xu 等建立三维有限元模型分析了车辆荷载、环境温度以及铺装层厚度等因素对桥面防水黏结层层间剪应力的影响,发现层间剪切强度随车辆荷载法向压力的增加而线性增大,随温度和铺装层厚度的增加而显著减小;顾兴宇等利用有限元分析认为铺装层厚度和水平荷载对防水黏结层的剪应力影响更为显著,通过变剪切角试验发现随着温度和剪切角的增大,层间剪应力不断减小;万晨光等利用 Ansys 有限元分析发现最不利节点的剪应力与压应力的线性方程,确定了最大剪应力节点集合,研究了接地压强、车辆行驶状态和铺装层厚度对层间剪切状态的敏感性,但其仅考虑了车辆荷载而未涉及桥面铺装在服役期间环境因素对防水黏结层剪应力的影响。

综上,在计算桥面防水黏结层剪应力以及确定影响剪应力的因素方面,国内外研究者多集中于荷载、温度、铺装层厚度等因素对防水黏结层力学性能的影响,而很少研究荷载分布位置、铺装层模量变化等对剪应力大小的影响;另外,研究者们大多重视车辆荷载单一因素对防水黏结层剪应力大小的影响,很少考虑在多因素耦合作用下的防水黏结层层间剪应力变化,也未给出明确的推荐值。

基于此,该文拟将水泥混凝土桥面铺装体系作为整体建立有限元模型,考虑荷载大小及分布位置、铺装层厚度及模量变化等因素,依托 2016 年北京顺密路上、下行超限车辆的轴载调查数据,探究重载交通、温度等多因素耦合作用对防水黏结层剪应力的影响,确定温度—荷载耦合作用下防水黏结层所能承受的最大剪应力,以此为开发重载交通条件下新型防水黏结层材料提供理论依据。

## 1 有限元模型的建立

采用 Abaqus 软件建立一跨径 20 m 的 4 片式 T 形梁桥,双向车道,桥面净宽为 10 m+2×0.5 m 的防撞护栏,水泥混凝土桥桥面铺装体系的三维有限元模型如图 1 所示。假设桥面板为刚性半空间无限体,各层材料为均匀、连续和各向同性的弹性材料;防水黏结层厚度相较于其他铺装层的厚度较小,在建模过程中不单独考虑,忽略其厚度以及各部件自重。模型边界条件为桥梁两端完全固结,约束 X、Y、Z 3 个方向的自由度。桥面铺装层结构在静力状态下各层之间均无相对位移,桥面板和铺装层均处于无裂缝状态,因此层间结合采用绑定连接。

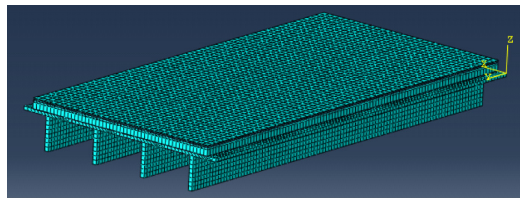


图 1 有限元模型示意图

桥面铺装结构层分别为 AC—13 沥青上面层、AC—16 沥青下面层、水泥混凝土调平层和 C40 水泥混凝土桥面板。考虑不同类型材料差异并结合实际测试值,模型各结构层材料计算参数取值如表 1 所示。

表 1 各结构层材料参数

层位	模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	厚度/cm
AC—13 沥青上面层	1 700	0.3	4
AC—16 沥青下面层	1 500	0.3	6
水泥混凝土调平层	30 000	0.2	10
C40 水泥混凝土桥面板	35 000	0.2	30

该文有限元模型计算中的车辆荷载,采用 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》中规定的标准车辆后轮单轴轴载 140 kN,荷载样式如图 2 所示。

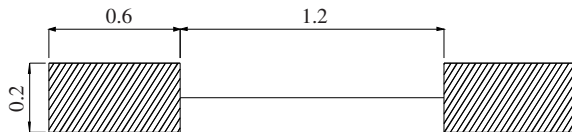


图 2 荷载样式(单位:m)

对于双车道桥面铺装体系而言,左、右两车道的力学性能关于纵桥向中线对称,因此该文在一跨简支梁桥的半幅布置荷载,即可确定最不利荷载位置。

## 2 结果与讨论

### 2.1 最不利荷位

利用 Abaqus 软件沿纵桥向在一跨简支梁桥面布置车道荷载来确定最不利荷位。现有文献[24—27]多采用在桥面板上选取有限个荷位点来计算分析桥面铺装层间力学性能,最终确定最不利荷载位置。

该文先在纵桥向沿车道中心,在一跨桥梁范围内均匀布置 5 个标准车轮载来确定车道荷载中的集中荷载位置,如图 3 所示。每次只在一个荷载位置布置轮载,在计算过程中采用沥青层上面层层底剪应力表示铺装层间的剪应力;采用水泥混凝土桥面板顶面剪应力表示防水黏结层的剪应力。表 2 为计算得到的每个

标准荷载下铺装层间剪应力和防水黏结层剪应力。

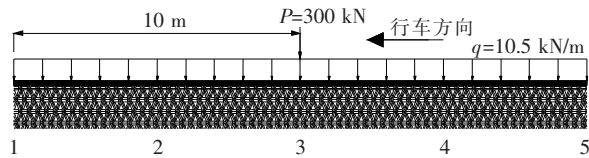


图 3 纵桥向荷载布置

表 2 纵桥向不同荷载位置剪应力

荷载位置	防水黏结层剪应力/MPa		铺装层剪应力/MPa	
	$\tau_{1zx}$	$\tau_{1zy}$	$\tau_{2zx}$	$\tau_{2zy}$
1	0.423	0.141	0.079	0.042
2	0.276	0.320	0.066	0.110
3	0.361	0.741	0.073	0.149
4	0.276	0.320	0.066	0.110
5	0.423	0.141	0.079	0.042

注： $\tau_{zx}$  为层间横向剪应力， $\tau_{zy}$  为层间纵向剪应力。

由表 2 可知：任意荷载位置上，防水黏结层处无论是横向剪应力还是纵向剪应力均远大于铺装层剪应力；防水黏结层处纵向剪应力远大于横向剪应力。在对称荷位位置，防水黏结层剪应力和铺装层剪应力分别相等。在荷位 3 时，防水黏结层剪应力和铺装层间的纵向剪应力分别达到各自的最大值 0.741 MPa 和 0.149 MPa，且两者相差近 5 倍，主要是由于沥青铺装层和混凝土桥面板模量相差达 20 倍，使得桥面受荷时应力集中于防水黏结层处，造成防水黏结层处纵向剪应力较大。由此可见，防水黏结层纵向剪应力应作为确定最不利荷位的控制指标，荷位 3 处是布置集中荷载的位置，即集中荷载的位置在桥梁跨中处。

沿纵桥向布置车道荷载，如图 4 所示。集中荷载大小为 300 kN，将其转换为线荷载布置在荷位 3 的轮轴中心线上，线长 3.75 m；线荷载大小为 10.5 kN/m，将其转换为面荷载布置于车道，面积大小为 3.75 m×20 m。表 3 为计算该标准车道荷载下铺装层间和防水黏结层剪应力。

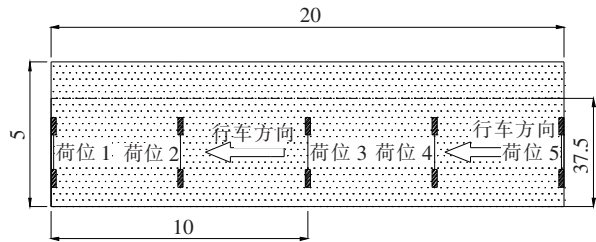
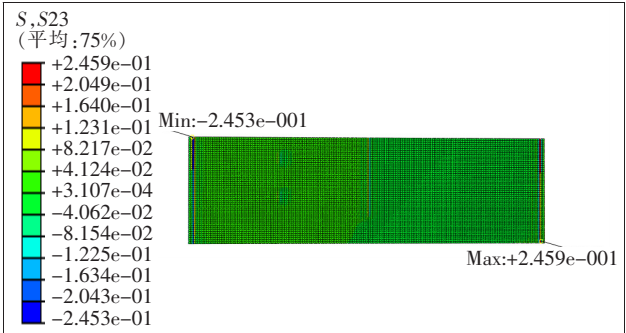


图 4 车道荷载布置(单位:m)

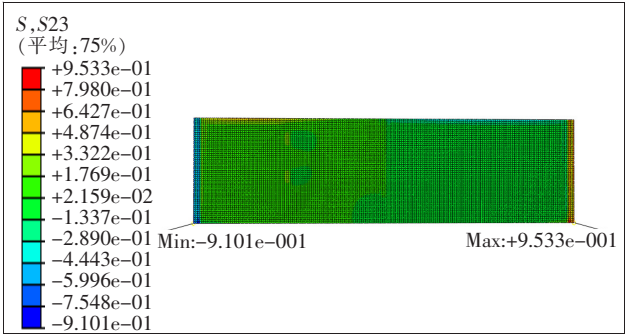
表 3 铺装层间剪应力和防水黏结层剪应力 MPa

剪应力位置	$\tau_{zx}$	$\tau_{zy}$
铺装层间	0.102	0.246
防水黏结层	0.323	0.953

由表 3 可知：铺装层和防水黏结层的纵向剪应力大于其横向剪应力。相对于铺装层的纵向剪应力，防水黏结层的纵向剪应力是其 3.9 倍，结合横桥向不同方向上的剪应力分布，设计防水黏结层时应该重点考虑其纵向剪应力。施工荷载后，纵向剪应力变化云图见图 5。



(a) 铺装层纵向剪应力



(b) 防水黏结层纵向剪应力

图 5 纵向剪应力变化云图(单位:MPa)

由图 5 可知：在施加车道荷载后，铺装层和防水黏结层的最大纵向剪应力均发生在梁端支座处，即混凝土桥最不利荷位在桥梁跨中处，最大剪应力产生于梁端支座处。

2.2 荷载大小

图 6 为 2016 年北京顺密路 1 年内所有超限车辆最大轴载出现的频率。

从图 6 可知：最大轴载为 140~150 kN 的车辆占比接近 70%，车辆数最多；最大轴载 160~170 kN 的占比超过 10%，车辆数次之。根据轴载换算公式，可计算出相应的荷载分别为 1.0 MPa 和 1.2 MPa。



2.3 铺装层厚度

在最不利荷位处施加标准荷载,通过变换铺装层厚度分析其对铺装层及防水黏结层剪应力的影响。表 4 为不同铺装层厚度组合,各层最大剪应力计算结果如图 7 所示。

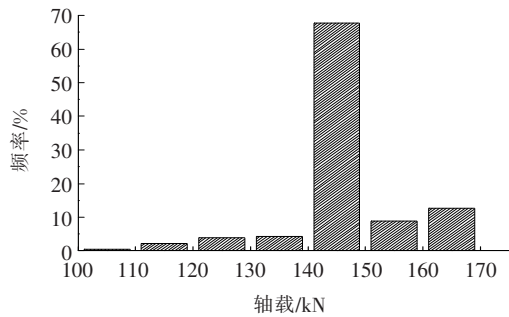


图 6 2016 年北京顺密路超限车辆轴载谱

表 4 沥青混凝土铺装层不同厚度组合

铺装层厚度组合方式	AC—13 铺装上面层厚度/cm	AC—16 铺装下面层厚度/cm	铺装层总厚度/cm
a	3	4	7
b	3	5	8
c	4	5	9
d	4	6	10
e	5	6	11
f	5	7	12
g	6	7	14

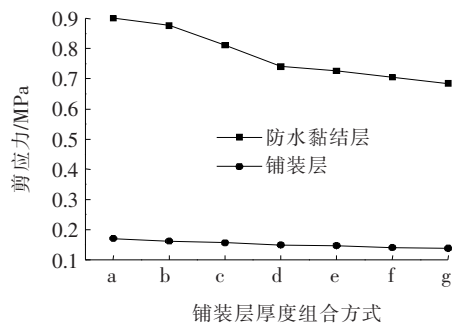


图 7 不同铺装层厚度下防水黏结层和铺装层间最大剪应力

从图 7 可知:随着铺装层厚度的增加,防水黏结层最大剪应力和铺装层最大剪应力逐渐减小;铺装层厚度由 7 cm 增加至 14 cm 时,防水黏结层和铺装层最大剪应力分别减小了 24.0%和 19.0%;铺装层厚度由 7 cm 增加至 10 cm 时,防水黏结层和铺装层最大剪应力分别下降 17.7%和 12.6%;铺装层厚度由 10 cm 增加至 14 cm 时,防水黏结层和铺装层最大剪应力分别下降 7.6%和 7.3%。随着铺装层厚度的增加,防水黏结

层最大剪应力先快速下降再缓慢下降。

在同一铺装层厚度下,防水黏结层处最大剪应力远大于铺装层间最大剪应力,因此,防水黏结层是混凝土桥最易发生剪切破坏的层位。

2.4 铺装层模量

沥青混合料模量受环境温度变化的影响很大,图 8 为 AC—13 和 AC—16 沥青混合料在 0~60 ℃ 的抗压回弹模量变化曲线。

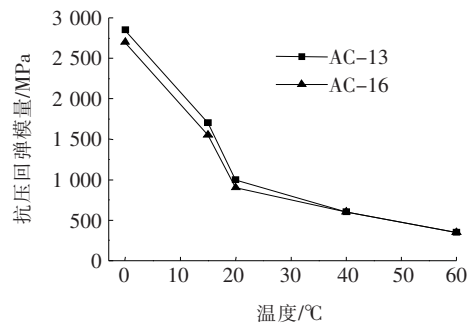


图 8 沥青混合料模量随温度变化

由图 8 可知:在 0~60 ℃,AC—13 的抗压回弹模量略高于 AC—16,且两者的抗压回弹模量均随温度的升高而下降。在 0~40 ℃,AC—13 和 AC—16 的抗压回弹模量下降迅速,分别下降了 78.9%和 77.8%,在 40~60 ℃,两者抗压回弹模量的下降速率趋于平缓,基本保持一致,均下降了 41.7%。

2.5 温度—荷载耦合作用下防水黏结层剪应力

依据第三强度理论,当桥面防水黏结层在荷载作用下产生的剪应力达到了防水黏结层材料的剪切强度时,防水黏结层就会出现破坏。利用表 1 的材料参数,采用上层 4 cm+下层 6 cm 的铺装层厚度,铺装层上面层模量采用 0~60 ℃ 下 AC—13 沥青混合料的抗压回弹模量(2 850~350 MPa),下面层模量采用 0~60 ℃ 下 AC—16 沥青混合料的抗压回弹模量(2 700~350 MPa),在最不利荷位处施加 0.7~2.0 MPa 的荷载,计算防水黏结层处在最不利荷位下不同温度和荷载耦合作用下的剪切强度(图 9)。

由图 9 可知:

(1) 防水黏结层处剪应力随温度或荷载的增大而线性增加。相同荷载条件下,铺装层温度每升高 15 ℃,防水黏结层处剪应力则平均增加 0.013 MPa;相同温度条件下,荷载每增加 1.0 MPa,防水黏结层处剪应力则平均增加 0.86 MPa。相对而言,荷载对桥面防水黏结层剪应力的影响要显著于温度,故在桥面服役期间应严格控制超限超载车辆。

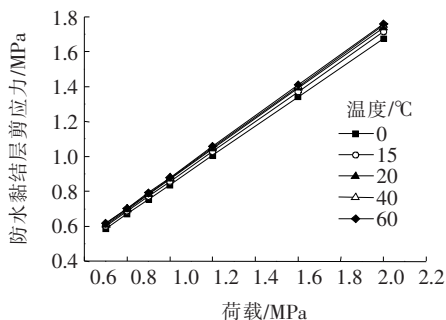


图9 温度—荷载耦合作用下防水黏结层剪应力

(2) 温度越高、荷载越大,防水黏结层的剪应力也随之增大,防水黏结层铺装体系越容易产生剪切破坏。如在 60 °C, 2.0 MPa 耦合作用下,防水黏结层处的剪应力高达 1.76 MPa,是 0 °C, 0.7 MPa 耦合作用下剪应力值的 3 倍。因此,在实际设计和材料选择中需要综合考虑温度和荷载对防水黏结层剪应力的耦合作用。

(3) JC/T 975—2005《道桥用防水涂料》中规定 50 °C 时防水黏结层材料的剪切强度不小于 0.2 MPa,而通过实际交通荷载的调查,再结合温度的耦合作用,计算出在 85% 桥面服役期间防水黏结层剪应力值均远远大于现行规范的规定值,这也是桥面铺装层体系容易出现早期病害的原因之一。

### 3 结论

该文依托 2016 年北京顺密路超限车辆的轴载调查数据,研究分析了荷载分布位置及大小、铺装层厚度及模量变化等对防水黏结层剪应力的影响规律,得出以下结论:

(1) 混凝土桥防水黏结层最不利荷位出现在桥梁跨中处,最大剪应力出现在梁端支座处。

(2) 通过在混凝土桥最不利荷位处施加荷载发现,防水黏结层剪应力随铺装层厚度的增加而逐渐减小,但当铺装层厚度为 8~12 cm 时,防水黏结层最大剪应力减小幅度比较缓慢。

(3) 在 0~60 °C 时,对铺装层厚度为 10 cm 的最不利荷位处施加荷载发现,荷载对防水黏结层剪应力的影响尤为显著,防水黏结层的剪应力会随温度或荷载的升高而线性增加,在高温和重载耦合作用下,防水黏结层剪应力远远大于现行规范的技术要求,说明现行规范的技术标准难以满足现有的交通和环境要求,这也是桥面铺装层体系容易出现早期病害的原因之一。

### 参考文献:

- [1] 万晨光,申爱琴,郭寅川,等. 混凝土桥桥面铺装层间结构剪切行为[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2019(1).
- [2] 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).
- [3] 万晨光,申爱琴,郭寅川. 桥面铺装调平层与沥青面层层间剪切行为[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017(7).
- [4] 魏柱,周志刚,邓长清,等. 不同水泥混凝土桥面沥青铺装防水黏结层性能分析[J]. 公路, 2018(9).
- [5] Pasetto M, Giacomello G. Experimental Analysis of Waterproofing Polymeric Pavements for Concrete Bridge Decks[J]. International Journal on Pavement Engineering & Asphalt Technology, 2014, 15(1): 51—67.
- [6] 姚坤. 防水粘结层对混凝土桥桥面铺装受力的影响分析[D]. 长安大学硕士学位论文, 2018.
- [7] 刘云,于新,戴忧华,等. 混凝土箱梁桥铺装防水粘结层力学性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012(1).
- [8] Liu H F, Zheng J L, Qian G P, et al. Investigation into Shear Experiment on Interface between Asphalt Pavement and Concrete Bridge Deck[J]. Advanced Materials Research, 2011, 197—198: 1 435—1 442.
- [9] 张争奇,陶晶,张思桐. 桥面铺装环氧沥青防水粘结层性能试验与评价[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011(4).
- [10] 刘黎萍,胡晓,孙立军,等. 基于抗剪性能的混凝土桥沥青铺装设计方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013(1).
- [11] Liu X, Zhou C, Feng D, et al. Experimental Study on Interlayer Shear Properties of ERS Pavement System for Long-Span Steel Bridges[J]. Construction and Building Materials, 2017, 143: 198—209.
- [12] Meng Guo, Yiqiu Tan, Linbing Wang, et al. Study on Water Permeability, Shear and Pull-Off Performance of Waterproof Bonding Layer for Highway Bridge[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2018, 11(4): 396—400.
- [13] 石龙海. 温度对沥青混凝土桥面铺装抗剪强度的影响分析[D]. 东北林业大学硕士学位论文, 2011.
- [14] 万晨光,申爱琴,薛翠真,等. 层间接触状态对桥面铺装结构力学响应的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016(9).
- [15] 曹明明,黄晚清,陆阳,等. 复合式路面层间剪切性能试验和评价方法[J]. 公路交通科技, 2018(4).
- [16] 李萍,念腾飞,张雅莉,等. 基于斜剪试验的水泥砼桥面沥青铺装层抗剪切性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2015(11).