

防水粘结层对水泥混凝土桥面铺装层间稳定性的影响分析

郭晓春¹, 杨永富², 高祥起^{1,3}, 隋修斌^{1,3}, 刘守庆¹

¹山东高速宁梁高速公路有限公司, 山东 泰安

²山东省交通科学研究院, 山东 济南

³山东高速泰安发展有限公司, 山东 泰安

收稿日期: 2022年5月25日; 录用日期: 2022年6月17日; 发布日期: 2022年6月24日

摘要

分析水泥混凝土桥面防水层参数对层间稳定性的影响, 采用有限单元法, 建立模型, 选取防水层厚度和模量两个参数, 分别研究其对防水层与铺装层剪应力和防水层与桥面板间应力的影响。研究表明, 相对防水层与桥面板或铺装层间的应力, 防水层参数的变化对防水层与桥面板间的应力较为敏感。其中, 防水层模量对防水层与上、下层间的应力影响较大, 最大影响幅度达70%。

关键词

防水层, 厚度, 模量, 层间稳定性, 有限单元, 层间应力

Analysis of the Influence of Waterproof Bond Layer on the Stability of Cement Concrete Bridge Deck

Xiaochun Guo¹, Yongfu Yang², Xiangqi Gao^{1,3}, Xiubin Sui^{1,3}, Shouqing Liu¹

¹Shandong Ningliang Expressway Co. LTD., Tai'an Shandong

²Shandong Transportation Institute, Ji'nan Shandong

³Shandong Hi-Speed Tai'an Development CO., LTD., Tai'an Shandong

Received: May 25th, 2022; accepted: Jun. 17th, 2022; published: Jun. 24th, 2022

Abstract

In order to analyze the influence of parameters of waterproof layer of cement concrete bridge deck on interlayer stability, the finite element method was used to establish a model, and the thickness

文章引用: 郭晓春, 杨永富, 高祥起, 隋修斌, 刘守庆. 防水粘结层对水泥混凝土桥面铺装层间稳定性的影响分析[J]. 材料科学, 2022, 12(6): 600-608. DOI: 10.12677/ms.2022.126065

and modulus of waterproof layer were selected to study their influence on shear stress between waterproof layer and pavement layer and stress measurement between waterproof layer and bridge deck. The analysis shows that the modulus of waterproof layer has a great influence on the stress between layers, and the stress between waterproof layer and bridge deck is relatively sensitive.

Keywords

The Waterproof Layer, Thickness, Modulus, Interlayer Stability, Finite Element, The Stress between the Layers

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水凝混凝土桥面铺装层与桥面板之间的粘结破坏是桥面铺装早期病害的常见类型，其中常见的表现为铺装层脱空和层间剪应力破坏[1] [2]等。层间剪应力是影响桥面铺装结构层间相互作用的重要指标之一，直接关系到层间剪应力的大小。如果铺装层与桥面板之间的抗剪切能力较小，在行车动荷载的作用下，铺装层将会由于剪切破坏，在桥面板与铺装层之间产生相对滑动，严重的在层间出现脱空现象。同时，在行车过程中，由于桥面板与铺装层间变形随从性的差异，在铺装层与桥面板之间会有法向拉应力的存在，当该应力达到一定程度时，就会导致铺装层与桥面板的分离。

优异的层间粘结性能，不但表现为较优良的层间抗拉能力，而且具备较大的层间抗剪能力，能够无缝传递铺装层上承受的荷载，增加桥面铺装层的耐久性，进而提高桥梁整体耐久性。防水层作为桥面铺装结构中的重要结构层，对层间粘结的影响不容忽视。本研究采用有限元法，假定防水层材料在不同厚度和不同模量情况下，研究分析其对桥面铺装结构层间应力的影响，理论分析防水层对桥面铺装结构的层间稳定性的影响。

2. 分析模型的建立

2.1. 模型的基本假设

沥青混合料被认为是一种非线性粘弹性材料，目前对黏弹塑性分析层状问题，主要以力学方法和数学模拟方法为主，在对相关指标求解时，两种方法均存在一定的难度。而沥青混合料在短时荷载情况下同低温状态相似，均表现为弹性。所以研究在建立模型时将沥青混合料简化为弹性材料。混凝土梁体以箱型梁桥为例[3] [4] [5]。为了有效计算桥面铺装层复杂的受力情况，在建立针对混凝土桥梁的桥面铺装分析模型时，进行了以下假设：

- 1) 假设桥面铺装层、梁体均是各向同性的、完全弹性、连续的；
- 2) 将桥面板连同防水层、沥青铺装看作是一个连续受力、无滑移现象、一同承受上部荷载的整体结构；
- 3) 忽略各种因素引起的桥梁震动模型计算的影响。

2.2. 荷载选取与边界条件

- 1) 车辆荷载

参照《公路桥涵设计通用规范》(JTC D60-2015)，车辆荷载采用公路-I级汽车荷载，其技术指标参见

《公路桥涵设计通用规范》(JTC D60-2015)表 4.3.1-3。在有限元分析时,为简化计算过程,采用规范中后轴车轮接地形式,且将车辆荷载简化为矩形均布荷载,荷载布设如图 1 和图 2 所示。

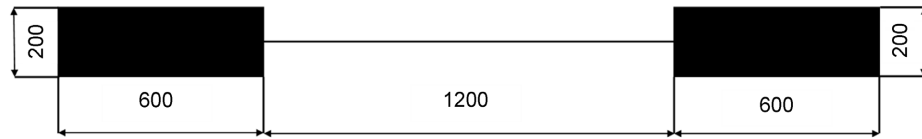


Figure 1. Schematic diagram of load distribution (mm)

图 1. 荷载布设示意图(单位: mm)

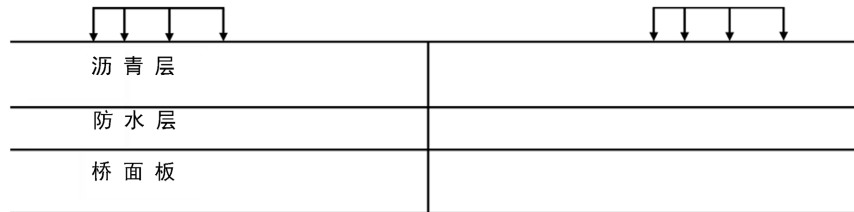


Figure 2. Diagram of load along longitudinal direction

图 2. 沿纵向荷载示意图

2) 边界条件

有限元模型一端将 UX、UY、UZ 三个方向均进行约束,另一端对 UY 方向进行约束,形成简支边界条件。

2.3. 有限单元的选择

模型建立选用单箱单室型截面,设定混凝土桥面长 25 m,宽 12 m,箱梁顶板厚 0.35 m,腹板厚 0.45 m,如图 3 所示。

按照以上假设和布载方案,混凝土桥梁桥面铺装在进行分析时,显现出较为突出的局部效应,通过有限元软件建立实体模型[6] [7],如图 4 所示,分别选择三维实体单元 SOLID45 和三维薄膜单元分别模拟梁体和桥面铺装层及防水层。

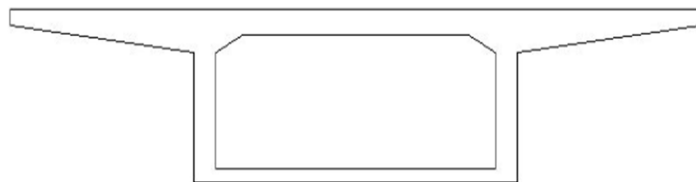


Figure 3. Section of single box and single chamber beam

图 3. 单箱单室梁截面

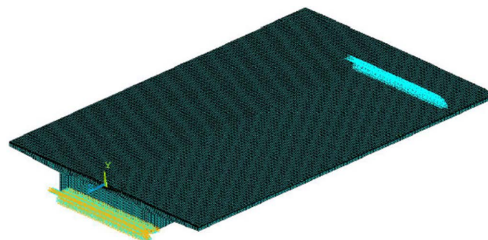


Figure 4. Finite element models and constraints

图 4. 有限单元模型及约束

3. 防水粘结层对层间稳定性的影响

经过道路工作者大量研究和对桥面铺装层病害的调查,逐步意识到桥面铺装层破坏的一个最主要因素是水[8]。当铺装层在各种因素作用下发生裂缝、坑槽等病害后,水从病害位置进入桥面铺装结构内,进一步渗入桥面板,导致桥梁结构内的钢筋锈蚀,引起混凝土的膨胀、松散等病害,严重影响桥梁运营安全。因此,在桥面铺装结构设计时,均会在桥面铺装与桥面板之间加设一层防水层,以此防止水分对梁体的损害,同时防水层增强了铺装层与桥面板之间的粘结作用。但由于防水层材料的特殊性及其施工因素的影响。无论从设计还是从施工角度,防水粘结层均是桥面铺装结构中薄弱层,最主要的表现形式就是防水层的剪切破坏[9] [10] [11] [12]。

3.1. 防水粘结层厚度对层间应力的影响

在桥面铺装总厚度检验时防水层厚度往往是可以忽略不计的,但防水层实际是有一定厚度的,只是厚度一般小于5 mm。模型分析时设定防水层厚度为1 mm、3 mm、5 mm,计算防水层与其上下结构层间的拉拔力和剪切力。防水层厚度变化对铺装层与防水层间应力的影响如表1、图5、图6所示。

由表1、图5可以看出随防水层厚度的增大,沥青铺装层与防水层之间的拉拔力增大,但变化幅度较小,增加幅度仅为0.55%。由图6可以看出,随防水层厚度增加,铺装层与防水层之间纵桥向剪应力增大,而横桥向剪应力则减小,且变化幅度不同,相对拉拔力变化幅度较大,分别为4.7%和11.0%。

Table 1. Influence of waterproof layer thickness on stress between pavement layer and waterproof layer

表 1. 防水层厚度对铺装层与防水层间应力的影响

防水层厚度(mm)	1	3	5
σ_y^1 (MPa)	0.1462	0.1465	0.1470
τ_{xy}^1 (MPa)	0.1233	0.1266	0.1290
τ_{yz}^1 (MPa)	-0.2972	-0.2826	-0.2646

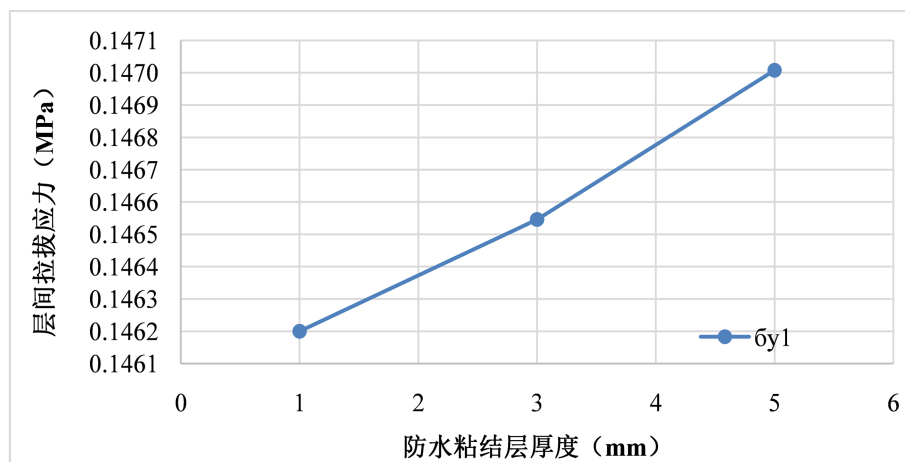


Figure 5. Influence curve of waterproof layer thickness on pull-out force between pavement layer and waterproof layer

图 5. 防水层厚度对铺装层与防水层间拉拔力的影响曲线

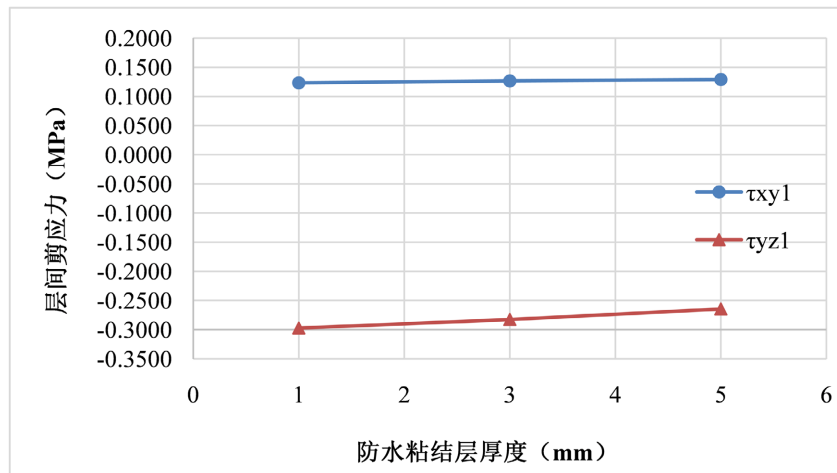


Figure 6. Influence curve of waterproof layer thickness on shear stress between pavement layer and waterproof layer
图 6. 防水层厚度对铺装层与防水层层间剪应力的影响曲线

防水层厚度变化对防水层与桥面板间应力的影响如表 2、图 7、图 8 所示。

Table 2. Influence of waterproof layer thickness on stress between waterproof layer and bridge deck
表 2. 防水层厚度对防水层与桥面板间的应力影响

防水层厚度(mm)	1	3	5
σ_y^2 (MPa)	0.0237	0.0215	0.0172
τ_{xy}^2 (MPa)	0.0890	0.0929	0.0939
τ_{yz}^2 (MPa)	-0.1715	-0.1707	-0.1602

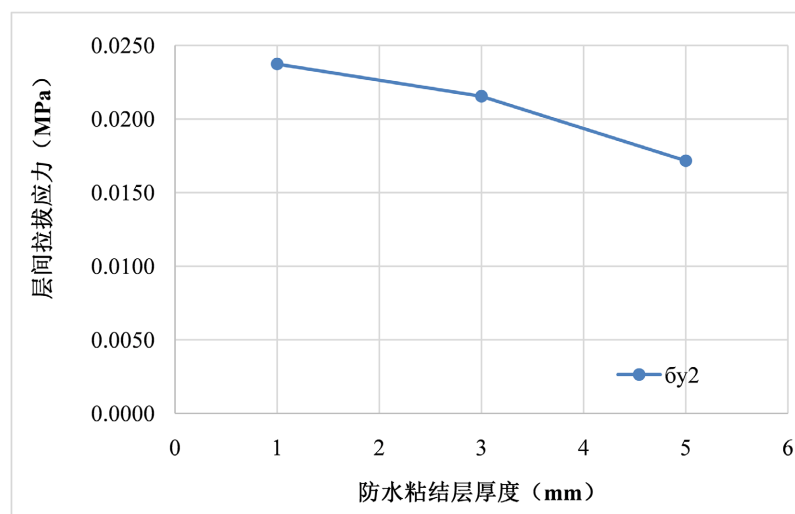


Figure 7. Influence curve of waterproofing layer thickness change on drawing stress between waterproofing layer and bridge deck layer

图 7. 防水层厚度变化对防水层与桥面板层间拉拔应力的影响曲线

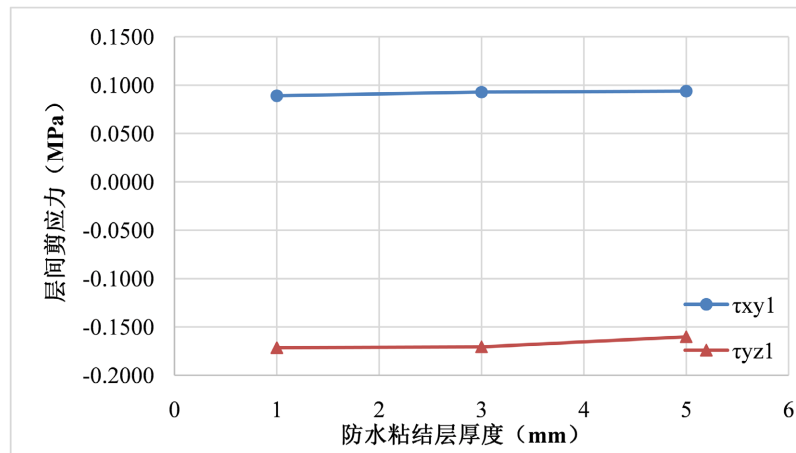


Figure 8. Influence curve of waterproof layer thickness change on shear stress between waterproof layer and bridge deck layer

图 8. 防水层厚度变化对防水层与桥面板层间剪应力的影响曲线

由表 2、图 7 可以看出防水层与桥面板之间的层间拉拔力随防水层厚度增加而减小，且减小幅度较大，达 27.7%；由图 8 发现随防水层厚度增加，防水层与桥面板之间的剪应力变化规律同防水层与铺装层之间剪应力变化，表现为纵桥向剪应力增加，横桥向剪应力减小，变化幅度分别为 5.4%、6.6%。

综上所述，防水层厚度对防水层与桥面板之间的拉拔力和防水层与上下结构层间的剪应力影响较大，对防水层与铺装层间的拉拔力几乎没有影响。层间纵桥向剪应力随防水层厚度增加而增加，层间拉拔力和横桥向剪应力随防水层厚度增加而减小，由此可见，应根据不同情况综合考虑层间拉拔力与剪应力的关系，合理选择防水层厚度。

3.2. 防水层模量对层间应力的影响

桥面防水层材料包括乳化沥青类、防水卷材类、防水涂料类、热沥青类等，每种大类下又有分为多种类型[13]，每种类型材料均有不同，其材料模量从几兆帕到几百兆帕，相差甚大，研究采用 10 MPa、25 MPa、50 MPa、100 MPa、150 MPa 等五个不同模量值，分析防水层模量变化对防水层与上下结构层间应力的影响。防水层模量变化对铺装层与防水层间应力的影响如表 3、图 9、图 10 所示。

Table 3. Influence of waterproof layer modulus on stress between pavement layer and waterproof layer

表 3. 防水层模量对铺装层与防水层层间应力的影响

防水层模量(MPa)	10	25	50	100	150
σ_y^1 (MPa)	0.1325	0.1291	0.1268	0.1233	0.1212
τ_{xy}^1 (MPa)	0.1165	0.1055	0.1036	0.1039	0.1072
τ_{yz}^1 (MPa)	-0.2268	-0.2280	-0.2364	-0.2507	-0.2555

由表 3、图 9 可以看出，随防水层模量增加，铺装层与防水层间拉拔力下降，降幅为 8.6%，由图 10 发现，随防水层模量增加，纵桥向剪应力先减小后增大，防水层模量为 100 MPa 时，纵桥向剪应力最小；横桥向剪应力随模量增加而增加，上升幅度达 12.7%。由此可见，防水层模量并非越大越好，对不同桥梁，防水层模量存在最佳值。

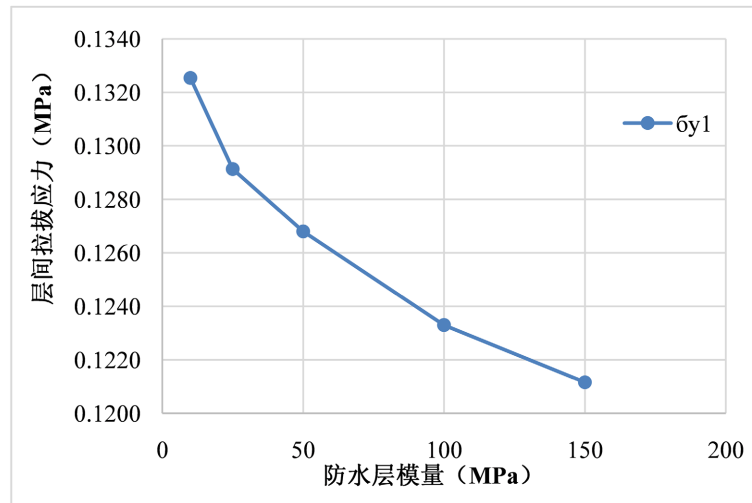


Figure 9. Influence of modulus change of waterproof layer on pull-out stress between pavement layer and waterproof layer
图 9. 防水层模量变化对铺装层与防水层层间拉拔应力影响

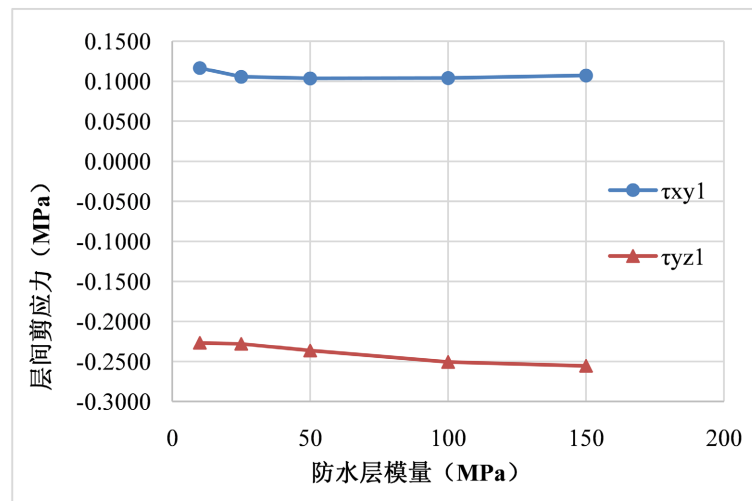


Figure 10. Influence of modulus change of waterproof layer on shear stress between pavement layer and waterproof layer
图 10. 防水层模量变化对铺装层与防水层层间剪应力影响

防水层模量变化对桥面板与防水层间应力的影响如表 4、图 11、图 12 所示。

Table 4. Influence of waterproof layer modulus on stress between pavement layer and waterproof layer
表 4. 防水层模量对铺装层与防水层层间应力的影响

防水层模量(MPa)	10	25	50	100	150
σ_y^2 (MPa)	0.0157	0.0188	0.0192	0.0200	0.0201
τ_{xy}^2 (MPa)	0.0445	0.0516	0.0643	0.0752	0.0763
τ_{yz}^2 (MPa)	-0.1117	-0.1286	-0.1326	-0.1448	-0.1499

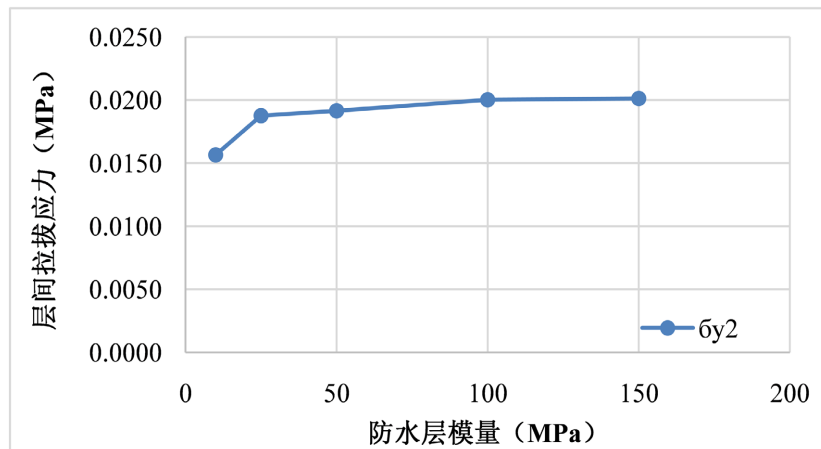


Figure 11. Influence of modulus change of waterproof layer on tensile stress between waterproof layer and bridge deck layer
图 11. 防水层模量变化对防水层与桥面板层间拉应力的影响

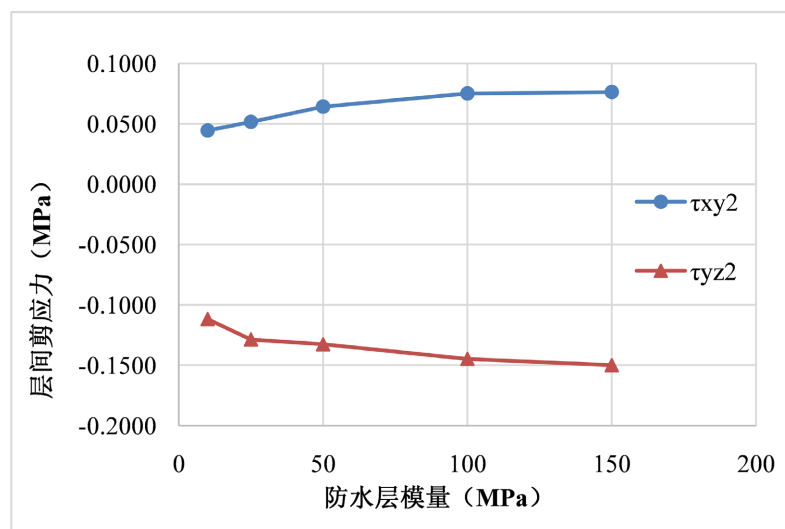


Figure 12. Influence of modulus change of waterproof layer on shear stress between waterproof layer and bridge deck layer
图 12. 防水层模量变化对防水层与桥面板层间剪应力的影响

由表 4、图 11、图 12 可以看出：随防水层模量增加，防水层与桥面板间的应力均增加，且增加幅度均较大，分别达到 28.6%、71.4% 和 34.2%，相对防水层与铺装层间应力变化幅度大得多。由此可见，防水层模量的变化对防水层与桥面板间的应力影响较大。

4. 小结

通过建立模型，计算分析不同防水层参数对防水层与上下结构层间的应力影响关系，可以看出：

- 1) 防水层材料参数变化对防水层与上下结构层间应力均有影响，相对而言，对防水层与桥面板间的应力影响较大，在进行材料选择时，应重点分析材料与桥面板间拉拔力与剪应力的关系。
- 2) 防水层厚度和模量对层间不同应力的影响规律并不相同，应根据不同情况，综合考虑防水层与上下结构层间应力关系，选择合适的防水层参数，有利于改善桥面铺装结构的稳定性。
- 3) 防水层材料模量相对防水层厚度对层间应力变化影响较大，在进行层间稳定性分析时，防水层材料模量应作为关键因素重点分析。

参考文献

- [1] 张占军, 王虎, 胡长顺, 等. 水泥混凝土桥面沥青铺装及防水层荷载弯曲应力[J]. 中国公路学报, 2014, 17(4): 37-40.
- [2] ADTM (1993) ASTM D5385-93 Standard Test Method for Hydrostatic Pressure Resistance of Waterproofing Membranes. DTM.
- [3] 于静涛. 沥青铺装与桥面板层间粘结改善技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2006.
- [4] Schiehlen, W. and Hu, B. (2003) Spectral Simulation and Shock Absorber Identification. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, **38**, 161-171. [https://doi.org/10.1016/S0020-7462\(01\)00053-1](https://doi.org/10.1016/S0020-7462(01)00053-1)
- [5] 范立础. 桥梁工程(上册) [M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [6] 张立明. *Algor, Ansys 在桥梁工程中的应用方法与实例* [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [7] 王新敏. *ANSYS 工程结构数值分析* [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [8] 胡长顺, 王秉刚. *复合式路面设计原理与施工技术* [M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [9] 王火明, 周宏伟, 魏强. 混凝土桥面防水粘结层剪应力计算分析[J]. 公路交通科技, 2011(4): 14-17, 27.
- [10] 王笑风, 张占军. 混凝土桥面铺装层层间抗拉分析[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2007, 38(1): 142-146.
- [11] 杜小平, 凌天清, 王火明, 等. 桥面铺装防水粘结层剪应力的有限元分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2010(9): 89-92.
- [12] 关昌余, 王哲人, 郭大智. 路面结构层间结合状态的研究[J]. 中国公路学报, 1989(1): 70-80.
- [13] 秦景燕, 王传辉, 江波. 水泥混凝土桥面防水材料的选择和应用分析[J]. 新型建筑材料, 2014, 41(11): 79-82.