

# 沥青基隔离层层间力学特性研究

黄于娟, 黄崇伟

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2023年10月10日; 录用日期: 2023年11月20日; 发布日期: 2023年11月27日

## 摘要

基于机场刚性道面研发了一种新型隔离层材料, 以同步碎石封层和微表处(稀浆封层)组成的沥青基隔离层, 并通过室内剪切摩擦试验的方法, 探究不同温度、法向力影响下设置沥青隔离层对道面层间力学特性的影响, 以及不同类型隔离层对道面层间力学特性的影响。结果表明道面结构层间剪切摩擦特性曲线存在三个阶段, 分别为弹性阶段、弹塑性阶段、塑性阶段。设置隔离层可减小道面层间的水平约束力。温度对设置沥青基隔离层的影响较大, 法向力对层间剪切曲线在弹性阶段的影响较小, 但对塑性阶段的稳定剪力值影响较大。层间法向应力与剪应力稳定值符合典型的摩尔-库伦本构模型。

## 关键词

机场刚性道面, 沥青基隔离层, 层间力学特性

# Study on Interlayer Mechanical Properties of Asphalt Base Isolation Layer

Yujuan Huang, Chongwei Huang

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Oct. 10<sup>th</sup>, 2023; accepted: Nov. 20<sup>th</sup>, 2023; published: Nov. 27<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Based on the rigid pavement of the airport, a new type of isolation layer material was developed to synchronous asphalt base isolation layer composed of gravel sealing layer and micro-surface (slurry sealing layer). Through the indoor shear friction test, the influence of asphalt isolation layer under the influence of different temperatures and normal forces on the mechanical characteristics of the interlayer of pavement, as well as the influence of different types of isolation layer on the mechanical characteristics of the interlayer of pavement was explored. The results show

that there are three stages in the interlayer shear friction curve, which are elastic stage, elastoplastic stage and plastic stage. The separation layer can reduce the horizontal binding between the pavement layers. Temperature has great influence on the setting of asphalt base isolation layer, normal force has little influence on the interlayer shear curve in elastic stage, but has great influence on the stable shear value in plastic stage. The stability values of the interlaminar normal stress and shear stress show the characteristics of the typical Moore-Coulomb constitutive model.

## Keywords

Rigid Airport Pavement, Asphalt Base Isolation Layer, Interlayer Mechanical Properties

Copyright © 2023 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

水泥混凝土铺面结构面层与基层之间设置隔离层将会改变其层间力学性能,进而影响面层和基层的协调变形和结构受力。目前大部分国内外许多学者将推移试验和剪切试验作为层间性能的重要获取手段,对此进行了大量研究。Jeong [1]等利用推移装置,对有无隔离层等不同工况下的层间摩擦特性进行了试验,获得不同剪切次数下的层间相对滑移-摩擦力曲线结果。在机场水泥道面方面,Dulce 和 Jeffery [2]依托机场 NAPDF 现场足尺试验,利用道面面层板顶和板底测试应变,以 *IP* 表征层间结合状态的强弱。胡佳佳[3]对在基层上设置隔离层的混凝土路面结构的层间力学特性进行研究。胡凯健[4]对刚柔复合式试件进行 45°斜剪试验,进行了路面层间剪应力分析以及现场路面的检测。刘柏康[5]等依托某公路的蜡制隔离层水泥混凝土路面进行了层间力学性能分析。曹明明[6]等对复合式路面提出了层间抗剪强度的评价方法,并将成果应用实际工程。武书华[7]等利用 SST 试验机进行重复剪切试验,对层间黏结系数、剪切弹性模量、疲劳寿命进行了评价。

目前的研究主要集中在公路水泥路面领域,有关机场水泥道面的研究还很匮乏。为此,本文利用室内剪切摩擦试验的方法,探究了不同温度、法向力影响下设置沥青隔离层对机场道面层间力学特性的影响,以及不同类型隔离层对机场道面层间力学特性的影响。

## 2. 剪切摩擦试验方法

### 2.1. 试验仪器

试验仪器由固定支架、试件槽、切向力加载平面和法向加载系统组成。仪器的固定支架和试件槽由高强度钢材构成。试件槽由可移动的环形槽和固定的 U 型槽组成,允许放入直径为 150 mm 的试件,切向力加载平面受力后带动环形槽向下剪切整个试件。法向加载系统包括加载金属圆盘、压力传感器和液压传动装置。

### 2.2. 试件制取

实验室内铺设 5 cm 厚的水稳碎石,利用塑料膜覆盖并每天进行适当洒水养生。养生龄期到达 7 天后在水稳碎石上铺设隔离层结构或直接浇筑水泥混凝土。隔离层铺设完成后在模具中一次性浇筑 5 cm 的水泥混凝土,洒水养生 28 天后利用装配有直径为 150 mm 钻头的钻芯机在所铺设区域内进行钻芯,获取剪切摩擦试验所需的试件。

### 2.3. 试验参数

#### 1) 加载速率

郑毅[8]根据飞机起降时对道面的作用, 以 2.5 mm/min 的剪切速率进行了层间剪切试验。本研究考虑到整个试验时间上的可操作性, 参考已有的试验, 选取 2.5 mm/min 作为层间剪切速率。

#### 2) 测试温度

基于我国某大型机场水泥道面(面层厚度为 38 cm)面层底部及基层顶部埋设温度传感器, 取两者测试温度的均值作为层间温度。

#### 3) 法向力

调研 60 种常见飞机的机型数据, 总结得到飞机主起落架轮胎压力分布为 0.88~1.50 MPa。但水泥板刚度大, 对荷载的扩散能力强, 在试验中将法向应力设置为 0 MPa、0.3 MPa、0.5 MPa 三种情况, 探究法向应力对剪切摩擦特性的影响。

## 3. 试验结果及分析

通过室内剪切摩擦试验的方法, 探究设置隔离层后对道面层间力学特性的影响。

### 3.1. 温度影响下设置沥青基隔离层的道面层间剪切摩擦特性

选定 0℃、20℃、40℃ 三个剪切测试温度, 层间不设置法向力, 平行试件个数为 3。测试前将试件放入温度环境箱中, 在预设温度下保温 1 小时。测试时取出试件并立即进行试验。不同温度下试件测试结果关系曲线如图 1 所示。

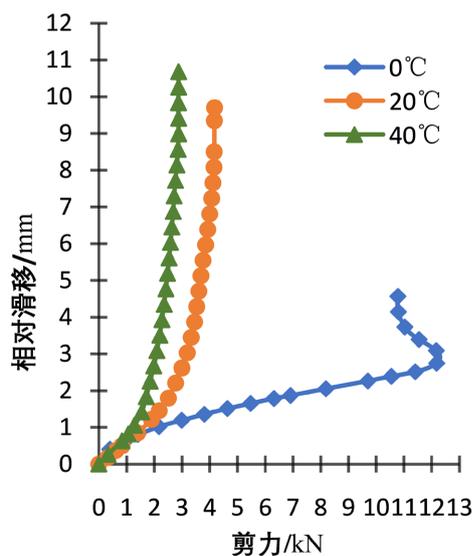


Figure 1. Relative slip-shear curves of shear friction tests at different temperatures

图 1. 不同温度下剪切摩擦试验的相对滑移 - 剪力关系曲线

从上图结果可知, 温度会影响层间相对滑移 - 剪力曲线的形状、最大剪力值以及最大剪力出现时的滑移量。在 0℃时, 曲线大致为四个阶段: 第一阶段随着相对滑移量的增加, 剪力以一定的增长率线性增大, 属于层间剪切摩擦的弹性阶段; 第二阶段随着滑移量的增加, 增长率逐渐变小, 层间剪切摩擦表现弹塑性特征, 达到抗剪强度的峰值; 第三阶段层间产生塑性破坏, 剪力值快速下降, 呈现出低温脆性的特点; 第四阶段为曲线的稳定阶段, 随着滑移量的增加剪力值不再发生变化, 相对滑移量完全由层间

的塑性变形组成。在 20℃ 和 40℃ 时, 曲线大致分为三个阶段: 第一阶段随着相对滑移量的增加, 剪力线性增长, 属于层间剪切摩擦的弹性阶段; 第二阶段剪力的增长率逐渐降低, 并趋于零, 层间呈现出弹塑性特征; 第三阶段剪力达到稳定不变的状态, 层间相对滑移量完全由塑性变形组成。

通过以上分析并对试验中得到的曲线进行总结与简化。由此得到图 2 所示的无法向应力条件下设置沥青基隔离层的道面结构层间两种典型相对滑移 - 剪力曲线形式。

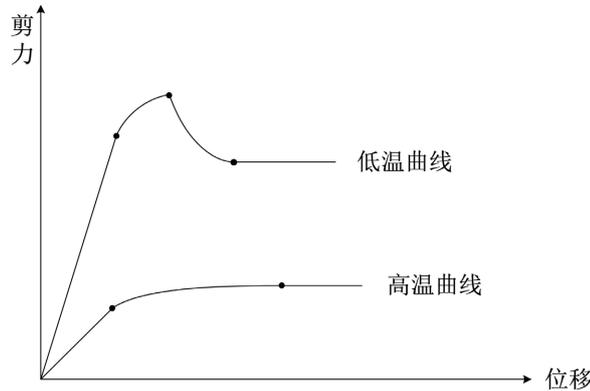


Figure 2. The typical relation curve between interlayer shear displacement and shear force of asphalt base isolation layer is set under the influence of temperature

图 2. 温度影响下设置沥青基隔离层的层间剪切位移与剪力的典型关系曲线形式

### 3.2. 法向力影响下设置沥青基隔离层的道面层间剪切摩擦特性

在常温状态(20℃)下, 法向应力取 0 MPa、0.3 MPa、0.5 MPa, 每组试验平行试件个数为 3 个。不同法向应力条件下每组试验中试件的层间相对滑移 - 剪力曲线测试结果如图 3 所示。

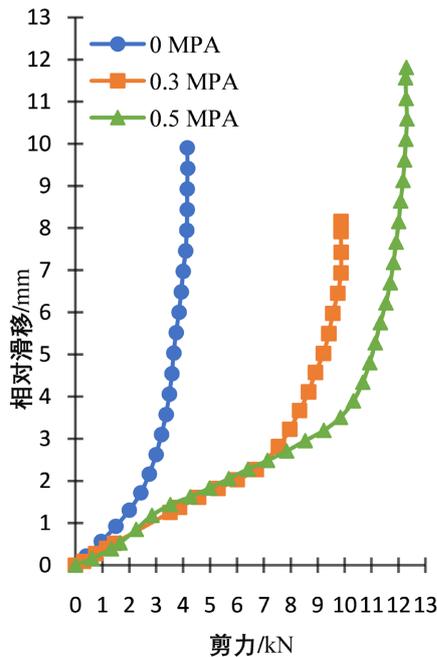


Figure 3. The relative slip-shear relation curve of interlayer shear friction test of asphalt base isolation layer under different normal forces

图 3. 不同法向力下设置沥青基隔离层的层间剪切摩擦试验的相对滑移 - 剪力关系曲线

从上图中的试验结果可知, 在试验条件下, 曲线有无塑性破坏点与温度有关, 与法向应力无关, 沥青基材料的低温脆性导致了曲线峰值的出现; 法向应力对线弹性阶段的曲线增长速率影响不明显; 法向应力对剪力最大值及到达剪力最大值时的层间相对滑移量有明显的影响。

随着层间法向应力的增加, 剪应力稳定值近似线性增长, 符合典型的摩尔 - 库伦本构模型。

可以认为在有法向力时, 随着层间相对滑移量增加, 层间最终的剪切摩擦力由两部分组成: 沥青抗拉伸强度和与法向压力成正比的库伦摩擦力。

### 3.3. 不同类型隔离层的结构层间剪切摩擦特性

研究分析常温状态下(20℃)不设置隔离层、设置沥青砂隔离层、设置沥青基隔离层三种条件下的结构层间剪切摩擦特性, 每组试验平行试件个数为 3。无法向应力时的层间相对滑移 - 剪力关系曲线则如图 4 所示。

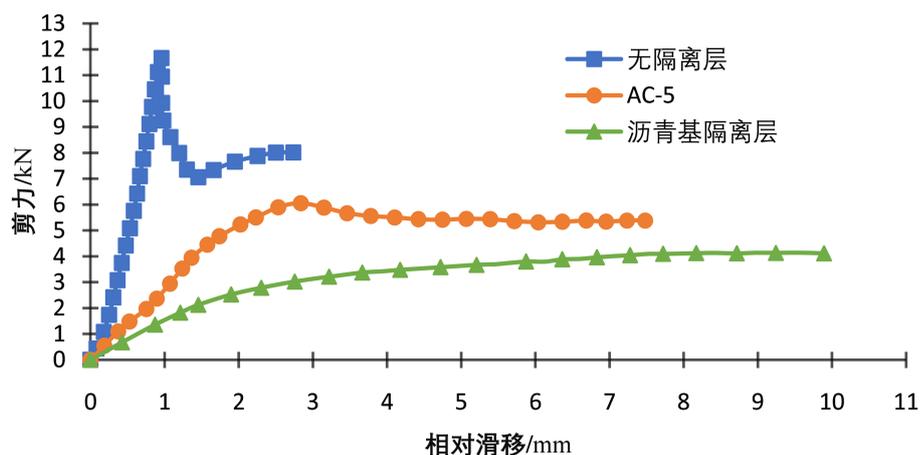
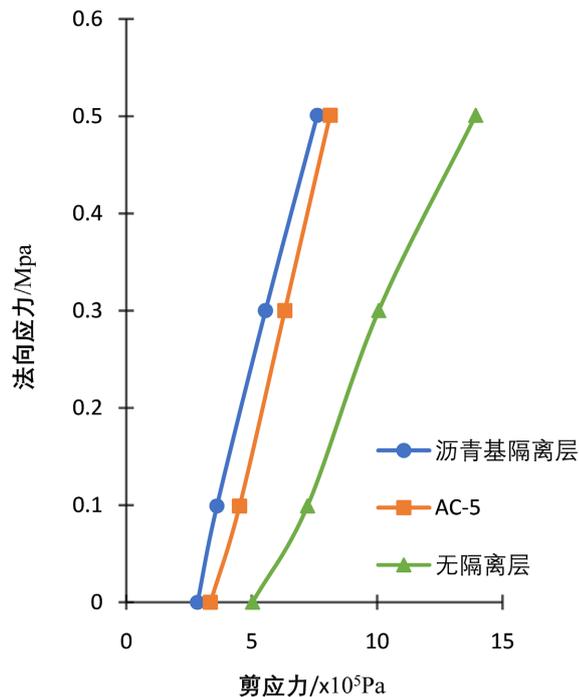


Figure 4. Relative slip-shear curve of lower layer shear test under different interlayer treatment methods  
图 4. 不同层间处理方式下层间剪切试验相对滑移 - 剪力变化曲线

从上图曲线的形态可以看出, 随着层间相对滑移量的增加, 不同条件下的层间剪切摩擦特性均呈现出弹性、弹塑性、塑性的三个发展阶段。在道面结构使用期内, 设置隔离层后的层间约束力较不设置隔离层要明显减弱, 这将有利于减小水泥混凝土面层与水稳基层之间由于不协调变形而产生的内应力。

当层间出现塑性破坏后, 无隔离层的剪力值明显回落, 曲线中出现峰值, 且峰值对应的相对滑移量较小。这是因为在开始阶段, 层间的约束力由水泥基材料的化学胶结力提供, 一旦剪切力超过其破坏强度, 层间便发生脆性破坏; 当损失化学胶结力后, 这时层间的约束力由粗糙破碎界面上的集料嵌锁摩擦力提供。此时沥青基隔离层时层间约束力小于 AC-5 隔离层, 一方面因为沥青基隔离层乳化沥青作为粘结剂, 在常温下破乳形成的粘结力不及 AC-5 中热沥青; 另一方面, 沥青基隔离层上表层的微表处相比于沥青砂, 集料更细, 表面构造更小, 面层的水泥浆下渗到表面空隙中的量更少, 产生的粘结力以及界面嵌锁摩擦力也更小。

绘制无隔离层、设置沥青基隔离层、设置 AC-5 隔离层时层间剪切试验稳定阶段法向应力与剪力的关系曲线, 如图 5 所示。可以看出: 无隔离层、设置沥青基隔离层或 AC-5 隔离层情况下, 当层间剪力随着相对滑移量的增大达到稳定值后, 稳定剪应力值与法向应力均呈现近似线性的相关关系, 符合典型的摩尔 - 库伦本构模型。当层间达到塑性阶段后, 设置隔离层的层间水平约束力由沥青粘结力和库伦摩擦力组成, 无隔离层的层间水平约束力由粗糙界面上集料的嵌锁作用和库伦摩擦力组成。



**Figure 5.** The relationship curves of the stability value of the normal stress-shear stress between layers under different inter-layer treatments

**图 5.** 不同层间处理方式下的层间法向应力 - 剪应力稳定值关系曲线

#### 4. 结论

1) 道面结构层间剪切摩擦特性曲线可分为弹性、弹塑性、塑性三个阶段。设置隔离层可减小道面层间的水平约束力, 层间的水平约束作用大小排序为: 无隔离层 > AC-5 > 沥青基隔离层。

2) 温度是影响设置沥青基隔离层水泥道面层间特性的重要因素, 低温时层间剪切曲线存在峰值, 高温时无峰值出现。

3) 法向力对层间剪切曲线在弹性阶段的发展规律影响较小, 但对塑性阶段的稳定剪力值影响较大。塑性阶段层间呈现出库伦摩擦特性, 法向力越大, 稳定剪力值也越大。

4) 层间法向应力与剪应力稳定值符合典型的摩尔 - 库伦本构模型。

#### 参考文献

- [1] Jeong, J.H., Park, J.Y., Lim, J.S., *et al.* (2014) Testing and Modelling of Friction Characteristics between Concrete Slab and Subbase Layers. *Road Materials & Pavement Design*, **15**, 114-130. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.863161>
- [2] Rufino, D. and Roesler, J. (2006) Effect of Slab-Base Interaction on Measured Concrete Pavement Responses. *Journal of Transportation Engineering*, **132**, 425-434. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2006\)132:5\(425\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:5(425))
- [3] 胡佳佳. 混凝土路面结构层间力学特性研究[J]. 科学技术创新, 2022(24): 121-124.
- [4] 胡凯健. 刚柔复合式路面层间抗剪性能分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- [5] 刘柏康, 钟雨乔, 钟永刚, 等. 半刚性基层上设置隔离层的路面结构层间力学分析[J]. 公路, 2016, 61(12): 41-47.
- [6] 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, 35(4): 40-48.
- [7] 武书华, 陈华鑫, 张久鹏, 等. 半刚性基层沥青路面层间界面力学特性与黏结状态的试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(2): 406-412.
- [8] 郑毅. 机场复合道面的层间力学行为及表征[D]: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2016.