

文章编号:1005-0523(2020)02-0105-06

# 基于离散-连续耦合的钢桥面铺装剪切模拟

王伟伟<sup>1</sup>, 刘云<sup>1</sup>, 徐恭圣<sup>2</sup>

(1. 河海大学道路与铁道工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430014)

**摘要:**层间剪切破坏是钢桥面铺装主要病害之一, 为了对钢桥面铺装复合结构层间剪切行为进行研究, 基于三维离散-连续耦合方法建立了钢桥面铺装复合结构仿真模型, 分析得出 30 °C 条件下钢桥面铺装层间剪切破坏行为的变化规律, 分析剪切速率对钢桥面铺装层间剪切受力状态的影响。研究结果表明过高或过低的行车速度对钢桥面铺装层都不利。对比分析离散-连续模型与离散元模型模拟结果发现, 离散-连续模型计算结果更加符合实际情况。

**关键词:**钢桥面铺装; 离散-连续耦合; 层间剪切行为; PFC; FLAC

中图分类号: U443.33 文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.02.014

钢桥面铺装直接铺设在正交异性钢桥面板上, 受力较为复杂。在通车状态下, 铺装层不断承受着车辆荷载的剪切作用。当钢桥面铺装的剪切强度不能满足受力要求时, 就会发生铺装层剪切破坏, 甚至会发生脱层现象, 所以对钢桥面铺装复合结构层间剪切行为的研究至关重要。目前研究铺装结构力学性能的方法主要分为两大类: 一类是室内试验, 一类是数值模拟。数值模拟又主要是有限元法和离散元法。有限元法因其运算速度快与处理宏观弹性变形的优势被运用的较多<sup>[1-2]</sup>, 但不能准确体现铺装层细观破坏机理。离散元法因其可以处理应力不连续、大变形等问题, 在道路材料领域运用的较为广泛<sup>[3-6]</sup>, 但在钢桥面铺装服役期间, 钢板应视为各向同性的线弹性材料, 沥青混凝土铺装层又具有多相复合材料的细观特征。所以在分析铺装层间剪切破坏机理与过程时将这两种方法耦合, 可以使模拟结果更加符合工程实际。利用 PFC、FLAC 软件, 基于离散-连续耦合方法建立钢桥面铺装复合结构仿真模型, 模拟钢桥面铺装层间剪切受力状态, 与室内试验进行对比验证, 分析剪切速率对剪切过程的影响, 并与现有离散元模型结果进行对比分析。

## 1 钢桥面铺装复合结构试件三维离散-连续模型

考虑到钢桥面铺装复合结构的材料特性, 钢板视为各向同性的线弹性材料, 沥青混凝土试件内部变形具有细观非均匀性。利用 PFC3D 离散元软件建立沥青混凝土铺装层模型, 利用 FLAC3D 建立钢桥面板连续模型。

沥青铺装层三维离散元模型的尺寸为 100 mm×100 mm×50 mm。本模型利用 PFC 中半径为 1 mm 的球单元生成沥青砂浆部分, 在尺寸空间内指定位置生成具有级配特征的粗集料单元, 再随机删除一定数量的沥青砂浆单元形成空隙, 约束沥青铺装层模型在  $y$  与  $z$  方向的变形以及在  $x$  方向的转动, 最终形成具有级配特征、空隙率为 4% 的沥青铺装层三维离散模型。

接触上的本构模型主要包含 3 个部分: 刚度模型、滑动模型和粘结模型<sup>[7]</sup>。由于沥青混凝土铺装层材料属于多相复合材料, 几种不同材料之间的相互作用各有差异, 所以本模型选取了 4 种接触本构模型, 并进行叠加以更加准确地模拟实际剪切行为。接触本构模型的选取如表 1 所示。

收稿日期: 2019-08-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51308193); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2015B21514)

作者简介: 王伟伟(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为桥面铺装。

表1 接触本构模型的选取  
Tab.1 Selection of contact constitutive model

接触类型	接触模型
粗集料内部单元之间的接触	接触刚度模型+接触粘结模型
相邻粗集料单元之间的接触	接触刚度模型+滑动模型
沥青砂浆内部单元之间的接触	Burgers 模型+接触粘结模型
沥青砂浆单元与粗集料单元之间的接触	Burgers 模型+接触粘结模型

通过室内试验并借鉴现有的研究成果<sup>[8]</sup>确定了模型的细观参数,粗集料单元之间的细观参数如表2所示。

表2 粗集料单元细观参数  
Tab.2 Mesoscopic parameters of coarse aggregate units

法向刚度/(N/m)	切向刚度/(N/m)	法向粘结力/N	切向粘结力/N	摩擦系数	颗粒密度/(kg/m <sup>3</sup> )
1.1×10 <sup>8</sup>	4.4×10 <sup>7</sup>	1×10 <sup>3</sup>	1×10 <sup>3</sup>	0.5	3×10 <sup>3</sup>

根据 Liu 等<sup>[9]</sup>建立的 Burgers 模型内部细观参数与宏观参数的关系公式,推算得出 Burgers 模型的细观参数,如表3所示。

表3 30℃下 Burgers 模型细观参数  
Tab.3 Mesoscopic parameters of Burgers model at 30℃

$K_{nd}/$ (MPa·mm)	$C_{nd}/$ (MPa·mm)	$K_{kt}/$ (MPa·mm)	$C_{kt}/$ (MPa·mm)	$K_{ks}/$ (MPa·mm·s)	$C_{ks}/$ (MPa·mm·s)	$K_{ls}/$ (MPa·mm·s)	$C_{ls}/$ (MPa·mm·s)
56.20	14 933	22.48	5 973.2	43.06	519.36	17.22	207.74

完成铺装层离散元部分建模后,还需在铺装层底部加铺一层颗粒。这组颗粒位于铺装层底部与钢桥面板的耦合界面区域,用于将铺装层离散元区域和钢桥面板连续元区域对应起来,即一个离散元颗粒对应一个连续元节点,使两部分可以进行力与位移数据的传递,二者同步力与位移状态,固定与连续元节点对应的颗粒在  $y$  和  $z$  方向的平动与转动以及在  $x$  方向的转动。

利用 FLAC3D 软件建立钢桥面板连续模型,模型尺寸为 100 mm×100 mm×10 mm。钢桥面板部分建模较为简单,在与沥青铺装层对应的位置建立模型,划分网格,建立边界条件,约束模型在  $y$  与  $z$  方向的变形位移,只允许其在  $x$  方向产生变形,再约束住  $x=0$  平面上所有节点在  $x$  方向上的变形,完成钢桥面板连续模型建模。

将钢桥面板连续模型与沥青铺装层三维离散元模型组合起来即得钢桥面铺装复合结构试件三维离散-连续模型,如图1所示。

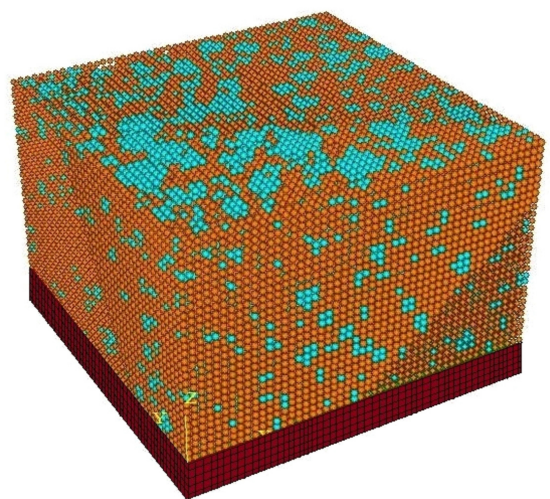


图1 钢桥面铺装复合结构试件三维离散-连续模型  
Fig.1 Three-dimensional discrete-continuous model for composite structure specimens of steel bridge deck pavement

### 2 虚拟试验结果验证与分析

在所建立的钢桥面铺装复合结构试件三维离散-连续模型的加载方式上,通过赋予加载墙体一定的速度,使其沿着  $x$  轴负方向对铺装层施加剪切荷载。同时通过建立约束墙体以固定铺装层侧面的位移。为了与室内试验进行对比验证,本次施加的剪切速率为 50 mm/min。

根据模型监测的力与位移数据以及室内直剪试验数据绘制了虚拟试验与室内试验的剪切位移曲线图,如图 2 所示。可以看出,虚拟试验与室内试验的剪切应力-剪切位移变化规律相似,整个剪切过程可以分为 4 个阶段即初始阶段、稳定增长阶段、破坏阶段和残余应力阶段。在初始阶段虚拟试验的初始剪应力明显高于室内试验,这是由于在虚拟试验中,我们使用加载墙体施加剪切荷载,在墙体与铺装层颗粒接触的瞬间,由于与墙体接触的颗粒数量较多,颗粒给墙体较大的接触反力,反映在曲线上使初始剪应力较大。稳定增长阶段、破坏阶段两者的走势基本一致。在残余应力阶段,虚拟试验的剪切位移大于室内试验值。由于在室内试验中施加了 0.7 MPa 法向应力,而虚拟试验中的法向应力是通过层间粘结强度参数来反应的,当层间粘结完全失效后,法向应力的效果也将消失,所以虚拟试验结果较大。综上所述,在整个剪切过程中,虚拟试验与室内试验具有较好的一致性,所以钢桥面铺装复合结构试件三维离散-连续模型与实际情况较为相符,可以利用所建模型对钢桥面铺装层间剪切破坏进行模拟分析。

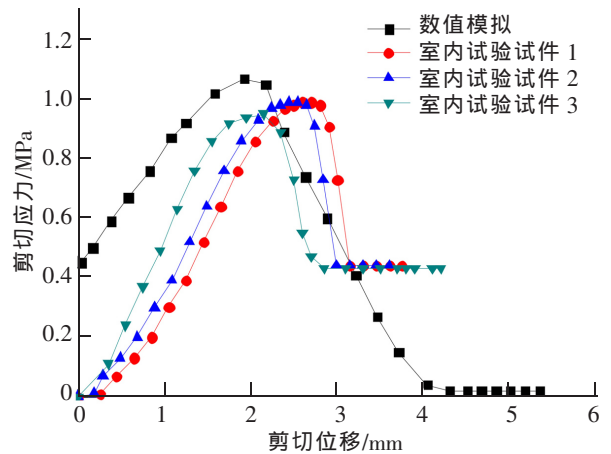


图 2 30 °C 温度下虚拟试验与室内试验剪切位移曲线  
Fig.2 Shear displacement curves of virtual test and laboratory test at 30 °C

### 3 离散-连续模型与离散元模型模拟结果对比分析

根据工程实际,利用已建立的钢桥面铺装复合结构试件三维离散-连续模型进行剪切速率为 20,30,40,50,60 mm/min 的虚拟剪切试验,所得到的剪切位移曲线如图 3 所示。将其与已有离散元模型结果<sup>[10]</sup>对比,剪切破坏时的层间相对位移值如表 4 所示,抗剪强度曲线如图 4 所示。初始层间剪应力曲线如图 5 所示,不同剪切速率下残余应力值如表 5 所示。

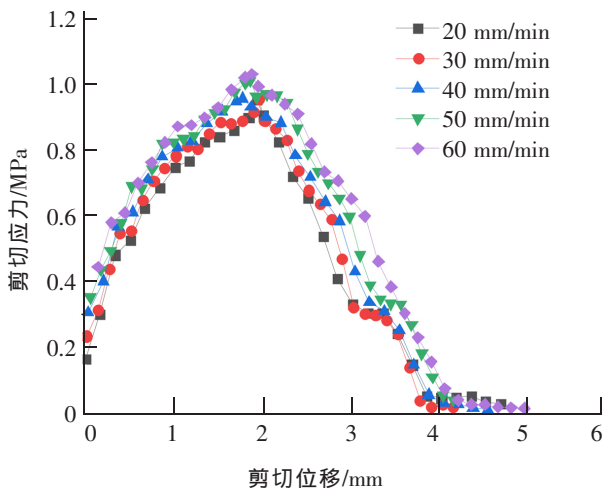


图 3 不同剪切速率下的剪切位移曲线

Fig.3 Shear displacement curves at different shear rates

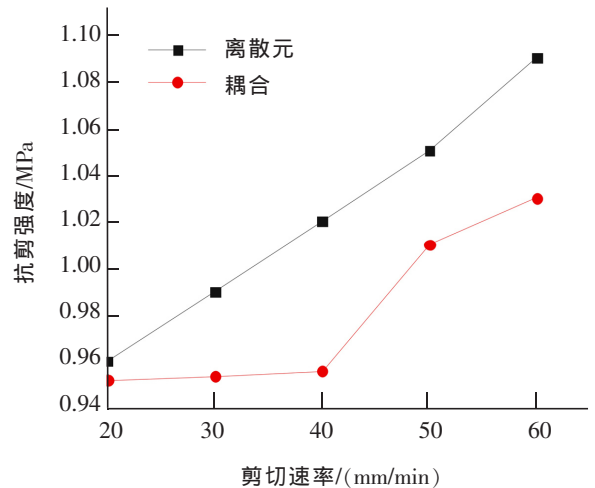


图 4 不同剪切速率下的层间抗剪强度曲线

Fig.4 Interlaminar shear strength curves at different shear rates

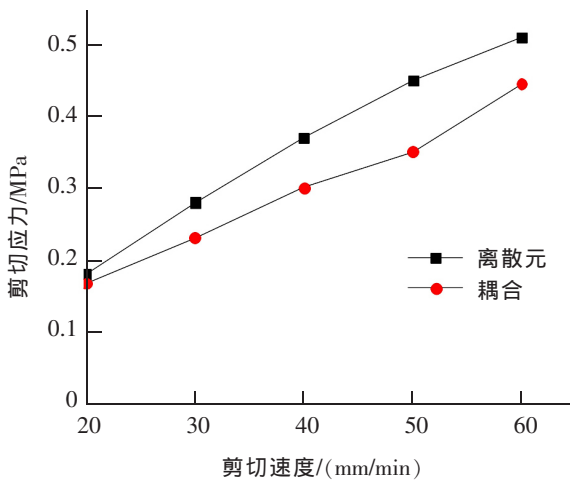


图5 不同剪切速率下初始层间剪应力曲线

Fig.5 Initial interlaminar shear stress curves at different shear rates

表4 不同剪切速率下剪切破坏时的层间相对位移值  
Tab.4 Inter-layer relative displacement values during shear failure at different shear rates

剪切速率/ (mm/min)	耦合模型剪切破坏 时层间相对位移/mm	离散元模型剪切破 坏时层间相对位移/ mm
20	1.93	1.77
30	1.96	1.73
40	1.78	1.76
50	1.86	1.92
60	1.88	1.85

由表4、图4可以得出以下结论:①剪切速率越大,层间抗剪强度越大。说明行车速度越大对桥面铺装层越有利,可以更大限度地发挥铺装层材料的力学性能。②不同剪切速率下耦合模型所得抗剪强度均小于离散元模型所得强度,发生剪切破坏时的层间相对位移基本都大于离散元模型所得位移,分析原因:离散元模型中钢板部分固定不变,在剪切过程的4个阶段内都不会产生变形。耦合模型中建立了钢桥面板连续模型,在初始阶段、稳定增长阶段,当粘结层逐渐失效的同时,钢板在剪切方向上也产生了位移,故耦合模型所得抗剪强度要小于离散元模型,产生破坏时的位移基本都大于离散元模型所得位移。

由表5看出随着剪切速率的变化,试件最终的残余应力变化很小,基本保持恒定,说明剪切速率对于试件的残余应力影响不大。同时耦合模型与离散元模型所得残余应力相差不大,原因在于:当层间剪应力由峰值降至残余应力时,层间粘结急剧失效,沥青铺装层与钢桥面板已经脱层,不再作为一个整体受力,此时层间剪应力完全由层间摩擦系数决定,两种模型的层间摩擦系数是相同的,所以这一阶段两种模拟结果基本一致。

由图5可以看出,①随着剪切速率的增大初始层间剪应力也随之增大。离散元模型中,当剪切速率从20 mm/min增加到60 mm/min,初始剪应力增加了180%。耦合模型中,当剪切速率从20 mm/min增加到60 mm/min,初始剪应力增加了166%。说明剪切速率对于初始层间剪应力的影响较大。②不同剪切速率下,耦合模型所产生的初始层间剪应力均小于离散元模型。分析原因:耦合模型建立时,为了将PFC中颗粒的数据传递到FLAC钢板上,在离散元区域的耦合界面区域建立了一组与钢桥面板连续元节点对应的颗粒,加载墙体的位置未变,这层颗粒使相邻颗粒的接触力发生了变化,导致加载墙体与直接接触的颗粒所产生的接触力变小,初始层间剪应力减小。

试件破坏时的裂缝数量,裂缝产生的时间对于实际工程具有重大意义,所以下面利用耦合模型分析钢桥面铺装复合结构试件层间裂缝发展情况。层间裂缝随剪切位移发展曲线如图6所示,裂缝数量如表6所示。

表5 不同剪切速率下残余应力

Tab.5 Residual stresses at different shear rates

剪切速率/ (mm/min)	耦合模型残余应力/ MPa	离散元模型残余应 力/MPa
20	0.02	0.02
30	0.03	0.02
40	0.04	0.02
50	0.02	0.02
60	0.16	0.03



表 6 不同剪切速率下裂缝数量  
Tab.6 Number of fractures at different shear rates

剪切速率/ (mm/min)	耦合模拟 裂缝数量	离散元模拟 裂缝数量
20	2 450	2 500
30	2 420	2 496
40	2 453	2 497
50	2 463	2 498
60	2 544	2 548

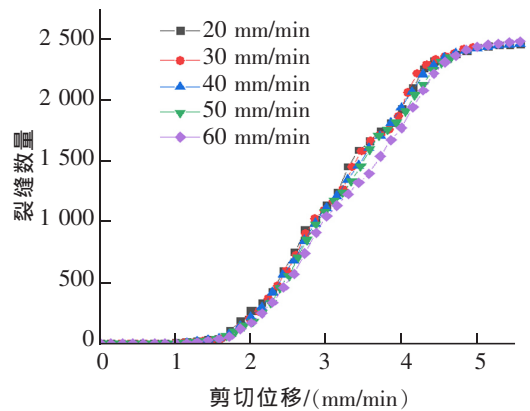


图 6 不同剪切速率下层间裂缝随剪切位移发展曲线  
Fig.6 Development curves of fractures in the lower layer at different shear rates along with shear displacement

由图 6、表 6 看出剪切速率对于最终的裂缝数量,以及裂缝贯穿时对应的层间剪切位移影响很小,曲线基本重合,所以行车速度对于铺装层最终的破坏程度影响不大。同时耦合模拟与离散元模拟得出的裂缝数量相差不多,所以两种模拟在试件最终的破坏形态上基本吻合。

层间裂缝随时间发展曲线、不同剪切速率下第一条裂缝产生时间曲线如图 7,图 8 所示。

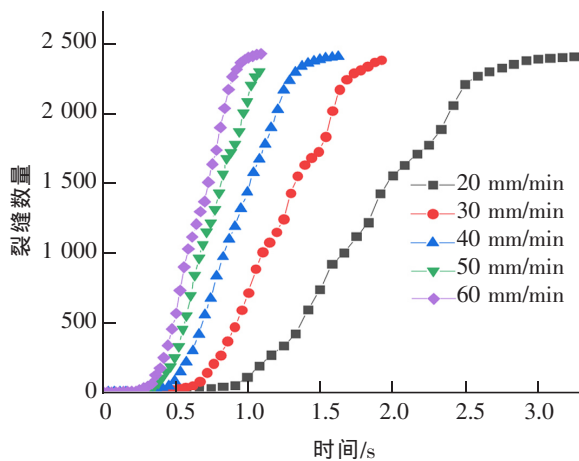


图 7 不同剪切速率下层间裂缝随时间发展曲线  
Fig.7 Development curves of fractures in the lower layer at different shear rates over time

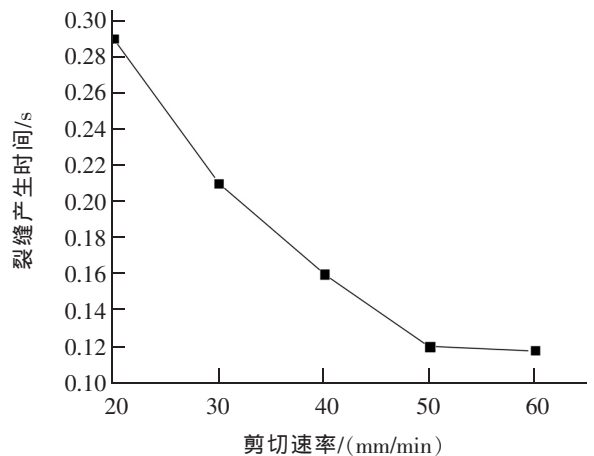


图 8 不同剪切速率下第一条裂缝产生时间曲线  
Fig.8 Time curve of the first crack generation at different shear rates

由图 7、图 8 可以看出,剪切速率在时间上对钢桥面铺装层间裂缝的发展影响较大,剪切速率越大,层间剪切裂缝产生的越快,贯穿的也越快。从这个结论出发,过高的行车速度会加快破坏桥面铺装结构,对于设计车速较高的桥梁,应及时进行养护维修,以延长使用寿命。

#### 4 结论

1) 钢桥面铺装复合结构试件三维离散-连续模型可以较准确地反映钢桥面沥青铺装层剪切行为。模拟得出的抗剪强度值、剪切位移曲线走势与室内试验结果基本一致。揭示了 30 °C 温度条件下钢桥面铺装复合结构试件剪切破坏规律,整个剪切过程大致可以分为 4 个阶段即初始阶段、稳定增长阶段、破坏阶段和残余应力阶段。

2) 随着剪切速率的增大,抗剪强度值、初始层间剪应力值都随之增大,残余应力未受影响基本保持不

变,说明较高的行车速度对桥面铺装层有利;随着剪切速率的增大,铺装层裂缝产生裂缝在时间上随之变早,说明对于设计车速较高的桥梁,应及时进行养护维修,以延长使用寿命;对于钢桥面板,随着剪切速率的增大,钢桥面板最终破坏时的位移不断减小,说明过高车速也不利,应及时进行监测、维护。

3) 将离散-连续模型结果与离散元模型模拟结果进行对比分析,离散-连续模型结果更加符合工程实际。

#### 参考文献:

- [1] 彭彤,郑明新. 基于弹性薄板理论的下穿铁路框架涵顶板受力分析[J]. 华东交通大学学报,2019,36(4):39-47.
- [2] 陈梦成,刘超. 基于 CA 温度模型混凝土结构截面承载力研究[J]. 华东交通大学学报,2019,36(4):95-101.
- [3] 吴文亮,涂志先,李智. 基于离散元法离析对混合料骨架结构特征影响[J]. 广西大学学报(自然科学版),2018,43(6):2303-2310.
- [4] YAO B,LI F,CHEN J. Experiment study on the shear strength between the steel bridge deck and the asphalt overlay[J]. Journal of Testing and Evaluation,2017,45(1):313-322.
- [5] 胡光辉,徐涛,陈崇枫,等. 基于离散元法的脆性岩石细观蠕变失稳研究[J]. 工程力学,2018,35(9):26-36.
- [6] 李智,王子硕,邓志刚,等. 沥青混合料三维仿真设计及虚拟剪切试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2018,46(8):1049-1056.
- [7] 杨军,张旭,朱浩然. 沥青混合料三轴剪切试验的离散元模拟研究[J]. 建筑材料学报,2012,15(1):64-68.
- [8] 张垚. 基于 PFC3D 的沥青混合料虚拟试验研究[D]. 南京:东南大学,2015.
- [9] 黄筑强. 基于离散元法的沥青混合料剪切变形数值模拟研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2013.
- [10] 徐恭圣. 基于三维离散元法的钢桥面铺装层间剪切试验模拟[D]. 南京:河海大学,2018.

## Shear Simulation of Steel Bridge Deck Pavement Based on Discrete-Continuum Coupling

Wang Weiwei<sup>1</sup>, Liu Yun<sup>1</sup>, Xu Gongsheng<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Road and Railway Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430014, China)

**Abstract:** Interlaminar shear failure of steel bridge deck pavement is the main failure of pavement. The combined discrete-continuum model of steel bridge deck pavement composite structure was established to study the interlayer shear behavior of composite structure. The change law of interlaminar failure behavior of steel bridge deck pavement structure under the temperature of 30°C and the influence of shear rate on the shear stress between steel bridge deck and pavement were analyzed. Research results show that too high or too low driving speed is disadvantageous to the steel bridge deck pavement. Compared with the calculation results of discrete element model, the discrete-continuum model is more reasonable.

**Key words:** steel bridge deck pavement; discrete-continuum coupling; interlayer shearing behavior; PFC; FLAC