

文章编号: 1673-9469 (2018) 01-0071-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.01.016

基于三维离散元法的钢桥面铺装层间剪切模拟

徐恭圣, 刘云, 于昌权
(河海大学道路与铁道工程研究所, 南京 210098)

摘要: 为了研究钢桥面铺装层间剪切破坏行为, 采用离散元方法, 建立钢桥面铺装复合结构试件的三维数值模型; 通过 DSR 试验, 获得沥青砂浆 30℃ 和 60℃ 条件下的 Burgers 模型参数, 并计算得到沥青砂浆的细观参数作为离散元模型的输入参数; 通过数值模拟分析了 30℃ 和 60℃ 条件下的钢桥面铺装层间剪切行为, 与室内剪切试验结果进行对比, 并且分析钢桥面铺装层间粘结失效情况和裂缝发展情况。研究结果表明, 离散元数值模型能够较好地模拟铺装体系复合结构层间剪切行为; 在虚拟剪切过程中, 集料单元与钢板单元之间的粘结最先开始失效, 随着剪切位移的逐渐增大, 裂缝沿着钢板和沥青铺装层界面不断发展, 最终贯穿整个界面。粘结失效集中在钢板与沥青铺装层界面之间, 沥青铺装层内部单元之间没有粘结失效。

关键词: 钢桥面铺装; 三维离散元方法; 抗剪强度; 破坏机理

中图分类号: U443.33

文献标识码: A

Shear test simulation of steel deck pavement based on three-dimension discrete element method

XU Gongsheng, LIU Yun, YU Changquan

(Hohai University Road and Railway Engineering Research Institute¹, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the steel bridge pavement shear failure behavior, the 3D discrete element model of steel deck pavement composite structure was established by using discrete element method. The meso parameters of asphalt mortar under 30℃ and 60℃ were calculated by using the Burgers model parameters obtained by DSR test. The interlaminar shear behavior of steel deck pavement under 30℃ and 60℃ was simulated and compared with the results of laboratory shear tests. The bond failure between the steel deck pavement and the crack development is analyzed. The results show that the interlaminar shear behavior is simulated well by using the discrete element method. The cracks appear when the bonding between the aggregate unit and the steel plate unit begins to fail, and develop gradually along the interlayer with increasing shear displacement, and finally run through the interface between the steel plate and the pavement. The integrity of the pavement is basically maintained because the bonding failure mainly lies between the steel plate and the pavement layer and there is no bonding failure between the units in the pavement.

Key words: steel deck pavement; three-dimension discrete element method; shear strength; failure mechanism

在钢桥面铺装体系复合结构中, 沥青混凝土铺装层与钢桥面板通过粘结层紧密相连, 共同承载与变形。在车辆荷载及环境条件的作用下, 当铺装层与钢桥面板之间的抗剪强度不能满足受力要求时,

就会发生层间剪切破坏, 甚至出现脱层现象。数值模拟是研究钢桥面铺装体系复合结构力学行为的重要方法, 其中有限单元法是常用的一种方法。但是, 沥青混凝土桥面铺装层可视为由沥青胶浆、集

收稿日期: 2017-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (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: 徐恭圣 (1992-), 男, 安徽滁州人, 硕士研究生, 从事桥面铺装方面的研究。

料及空隙组成的三相复合材料,使用有限单元法无法准确模拟其内部结构特征,也不能很好地解释其细观剪切破坏的机理。离散单元法凭借其能够处理应力不连续、大变形等方面问题的优势,在道路材料领域的应用越来越广泛^[1-6]。本文利用离散元程序PFC3D,建立了室内钢桥面铺装体系复合结构试件的三维离散元模型,通过与室内试验进行对比分析,验证了模型的可靠性,并且分析了集料模量和剪切速率对钢桥面铺装层间抗剪强度的影响,同时对钢桥面铺装层间细观剪切破坏机理进行了分析。

1 钢桥面铺装体系复合结构三维离散元模型

1.1 模型的建立

采用离散单元相互重叠算法,颗粒单元的半径取1 mm,按表1中的级配建立沥青混凝土铺装层三维离散元模型^[7],宏观尺寸为95 mm×95 mm×50 mm,作为粘结层的环氧沥青在与沥青铺装层底部混合固化后形成整体^[8],并且粘结层厚度很小,所以建模时不再单独建立粘结层单元,钢板则由5层50×50个的均匀排列的球单元构成,宏观尺寸为95 mm×95 mm×10 mm,如图1所示。

1.2 离散元细观力学参数的选取

钢桥面铺装复合结构离散元模型涉及到沥青砂

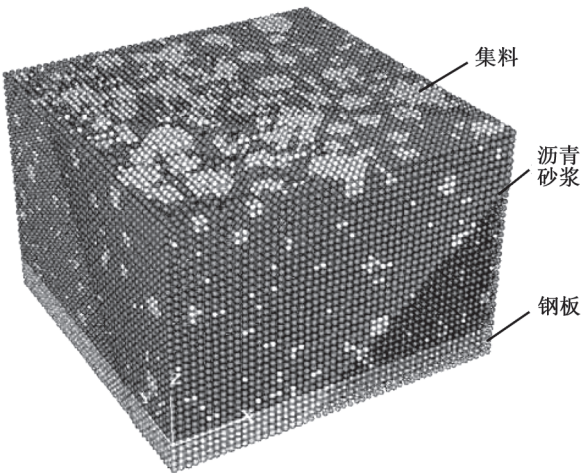


图1 钢桥面铺装复合结构试件模型图
Fig.1 Model diagram of composite structure of steel bridge deck pavement

浆内部单元、集料内部单元、集料单元与砂浆单元、集料单元与钢板单元以及砂浆单元与钢板单元的接触与粘结问题,以PFC3D中的线弹性刚度模型模拟集料内部单元、集料单元与钢板单元以及砂浆单元与钢板单元之间的接触状态,以Burgers模型表征沥青砂浆间单元的粘弹性接触。由于PFC3D中材料性能的输入是细观参数,因此对于规则排列的单元可以由宏观力学参数推导得到细观参数^[7]。

对于线弹性模型,采用下式确定细观结构内部单元线弹性刚度作为PFC3D内部参数的输入:

$$E=\frac{k_n}{4R}$$
(1)

式中: k_n 为单元的法向接触刚度; R 为单元的半径; E 为材料宏观模量。

关于Burgers模型内参数的确定,Liu等^[9]建立了模型内各元件细观参数与宏观参数的关系:

$$K_{mm}=E_1L$$
(2)

$$C_{mm}=\eta_1L$$
(3)

$$K_{kn}=E_2L$$
(4)

$$C_{kn}=\eta_2L$$
(5)

式中: L 为沥青混合料离散元模型内部相邻单元的半径之和; E_1 、 η_1 分别为Maxwell内弹簧的劲度和黏壶的粘度; E_2 、 η_2 分别为Kelvin内弹簧的劲度和黏壶的粘度; K_{mm} 、 C_{mm} 分别为Maxwell内弹簧的细观劲度和黏壶的细观粘度; K_{kn} 、 C_{kn} 分别为Maxwell内弹簧的细观劲度和黏壶的细观粘度。

根据DSR试验,得到30℃和60℃条件下沥青砂浆的Burgers模型参数,如表2。

把粒径大于2.36 mm的部分作为集料,小于2.36 mm的部分作为沥青砂。对于集料的模量,按照You^[10]的研究成果,取55.5 GPa,则根据公式(1)可以算出集料离散单元的法向接触刚度为 2.22×10^9 N/m,切向接触刚度为 1.11×10^9 N/m;钢板颗粒单元的模量取555 GPa。

2 剪切试验模拟

2.1 室内剪切试验

采用Steel-concrete Interface Shear(SCIS)剪切试

表1 集料级配
Tab.1 Gradation of the aggregate blend

筛孔尺寸/mm	13.2	9.5	4.75	2.36	1.16	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100	92	71	39	22.5	17	12.5	8.5	6

表 2 30℃ 和 60℃ 时的 Burgers 模型参数
Tab.2 Parameters in Burger's model at 30 and 60℃

温度 /℃	E_1 /MPa	η_1 /MPa·s	E_2 /MPa	η_2 /MPa·s
30	28.10	7466.5	21.53	259.68
60	9.65	6460.94	12.70	72.10

验仪^[11]测试铺装体系复合结构试件的剪切强度。采用与虚拟复合试件相同的级配，每种温度条件下制备三组试件，制作完成后对完全固化的 30℃ 和 60℃ 温度条件下的复合结构试件分别进行层间剪切试验，剪切速率为 50 mm/min，考虑最不利条件下层间剪切情况，竖向荷载取 0 MPa。图 2 为试验复合试件的剪切破坏形态。由图 2 可以看出，复合结构试件破坏界面发生在钢板和沥青铺装层之间，沥青铺装层几乎没有破损，基本保持其完整性。

2.2 虚拟剪切试验

利用钢桥面铺装体系复合结构试件的三维离散元模型，模拟 30℃ 和 60℃ 条件下的钢桥面铺装室内层间剪切试验。采用墙体对虚拟试件施加剪切力，通过控制墙体的速度来达到对虚拟试件进行剪切的效果，墙体速度取 50 mm/min，竖向荷载取 0 MPa。虚拟剪切时，固定模型中组成钢板的所有单元颗粒，通过加载墙体对铺装层施加一个剪切荷载，如图 3 所示。加载时并没有完全按照室内试验通过加载板对钢板施加荷载来实现剪切，而是通过对铺装层施加荷载来实现剪切，主要考虑两个方面因素：一是将钢板完全固定可以很好地体现钢板刚度大、连续性好的材料特性；二是考虑相互作用原理，对钢板施加荷载和对铺装层施加荷载的效果是相同的。剪切破坏后模型图如 4 所示，由图 4 可以看出，在墙体的加载作用下，虚拟复合试件层间发生了剪切破坏，破坏界面发生在钢板和沥青铺装层之间，剪切

过程中铺装层始终保持较好的完整性。

2.3 室内试验与虚拟试验结果对比分析

室内剪切试验的数据利用多功能材料试验系统 UTM 进行采集，并经过计算处理绘制出剪切应力与剪切位移的关系曲线；虚拟剪切实验定义加载墙体的受力和位移为层间剪切荷载和剪切位移，通过监测加载墙体的受力和位移并经过计算处理绘制出剪切应力与剪切位移的关系曲线。将模拟结果与实验结果进行比较，如图 5 和图 6 所示。

由图 5、图 6 可以看出，30℃ 和 60℃ 条件下，虚拟剪切试验得到的抗剪强度分别为 1.14 和 0.7 MPa，对应的剪切位移分别为 1.5 和 2.7 mm，与室内实验结果基本相同，并且试验得到的应力 - 位移曲线与模拟得到的应力 - 位移曲线的走势基本一致，说明所建立的钢桥面铺装复合试件三维离散元模型能够较好地模拟铺装体系层间剪切行为。同时还可以看

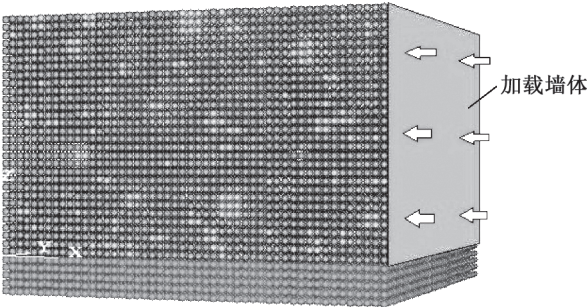


图 3 钢桥面铺装复合结构试件加载图
Fig.3 Loading diagram of composite structure of steel deck pavement

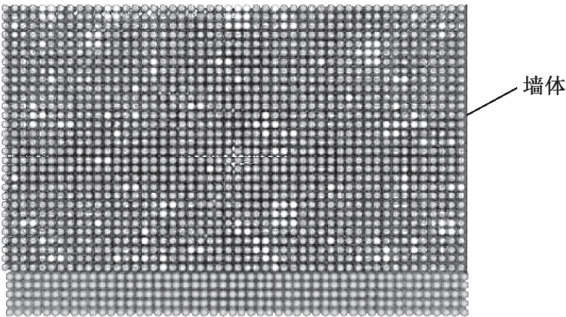


图 4 剪切破坏后钢桥面铺装复合结构试件模型图
Fig.4 Model of composite structure of steel deck pavement after shear failure

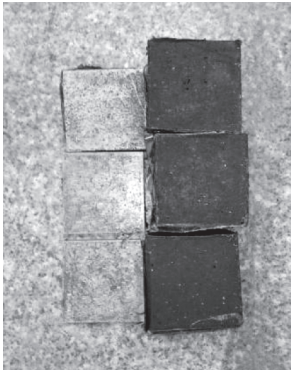


图 2 剪切破坏形态
Fig.2 Shear failure morphology

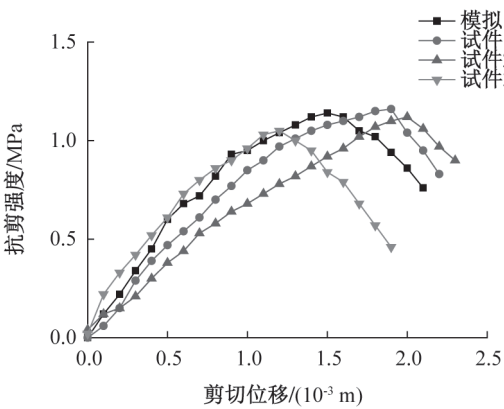


图 5 30℃条件下试验与模拟结果比较
Fig.5 Comparison of test and simulation at 30℃

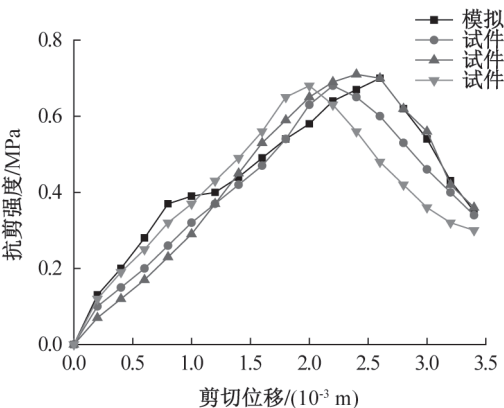


图 6 60℃条件下试验与模拟结果比较
Fig.6 Comparison of test and simulation at 60℃

出，温度越高，抗剪强度越小，剪切破坏时对应的剪切位移越大。

3 层间细观剪切破坏机理

为了研究钢桥面铺装层间剪切破坏机理，图 7 给出了 30℃时不同层间剪切位移对应的层间裂缝发展情况，由图 7 可以看出，随着剪切荷载的持续施加，在钢板与沥青铺装层界面左端（加载一侧）产生裂缝，并沿着界面逐渐向右端发展，当剪切位移为 1.5 mm 时，裂缝贯穿整个界面，试件发生剪切破坏。

对于整个模型，按照失效位置的不同，分为沥青砂浆单元与钢板界面位置的粘结失效、集料与钢板界面位置的粘结失效、沥青砂浆内单元之间的粘结失效和砂浆与集料截面位置粘结失效四类，采用 PFC 分别采集了这四类粘结失效的数量^[12]，如图 8 所示。

由图 8 可以看出，在虚拟剪切试验过程中，集料单元与钢板单元之间的粘结失效最先发生，当集料单元与钢板单元之间的粘结失效数量达到 23 时，沥青砂浆单元与钢板单元之间也开始出现粘结失效。随着剪切位移的逐渐增大，钢板和沥青铺装层界面的粘结失效数量近似呈线性增长，裂缝沿着界面不

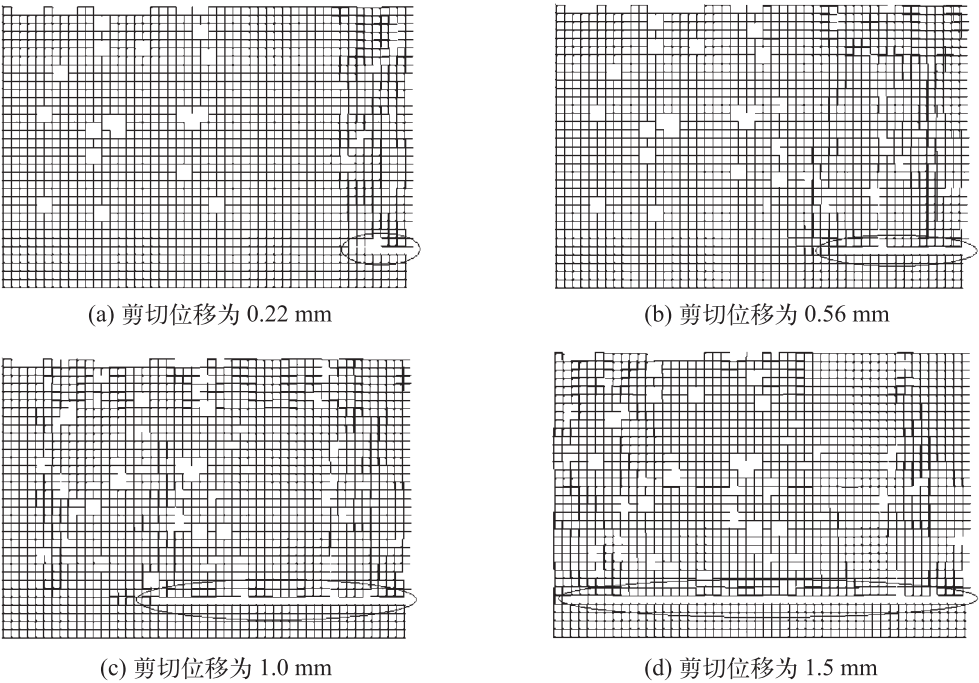


图 7 不同层间剪切位移对应的层间裂缝情况
Fig.7 The interlaminar fracture at different shear displacement

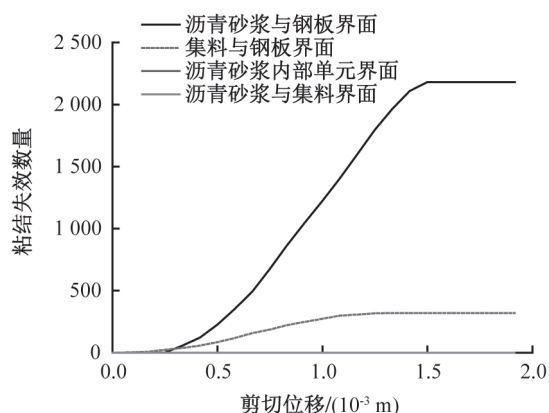


图8 不同位置粘结失效数量

Fig.8 Number of adhesive failures in different positions

断发展,当剪切位移达到 1.2 mm 时,集料单元与钢板单元之间的粘结失效数量达到最大,当剪切位移达到 1.5 mm 时,沥青砂浆单元与钢板单元之间的粘结失效数量达到最大,此时沥青铺装层与钢板界面之间的粘结全部失效,裂缝彻底贯穿钢板与铺装层界面,铺装层与钢板之间完全脱开,发生剪切破坏,而铺装层内部单元之间自始至终都没有出现粘结失效,铺装层基本保持完整性。

4 结论

1) 模拟结果与试验结果基本一致,建立的钢桥面铺装三维离散元模型试件能较好地模拟铺装体系复合结构层间剪切行为。

2) 三维离散元法可以较好地模拟钢桥面层间剪切破坏时裂纹的产生和发展,虚拟剪切过程中,集料单元与钢板单元之间的粘结最先开始失效,裂缝由此产生,并沿着钢板和沥青铺装层界面不断发展并最终贯穿整个钢板与铺装层界面。粘结失效集中在钢板与铺装层之间的单元之间,铺装层内部单元之间没有粘结失效,铺装层基本保持完整性,与室内试验结果的破坏特性基本相同。

参考文献:

[1]ENAD M, EYAD M, SOHEIL N. Discrete Element

Analysis of the Influences of Aggregate Properties and Internal Structure on Fracture in Asphalt Mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(1): 10-20.

[2]陈渊召,李振霞.基于离散元法的橡胶颗粒沥青混合料细观结构分析[J].哈尔滨工业大学学报,2013, 45(4): 116-121.

[3]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): 64-67.

[4]张德育,黄晓明,高英.沥青混合料三维离散元虚拟单轴蠕变试验[J].华南理工大学学报:自然科学版, 2012, 40(7): 16-19.

[5]周基,田琼,芮勇勤,等.基于数字图像的沥青混合料离散元几何建模方法[J].土木建筑与环境工程, 2012, 34(1): 136-139.

[6]田莉,刘玉,王秉刚.沥青混合料三维离散元模型及其重构技术[J].长安大学学报:自然科学版, 2007, 27(4): 24-27.

[7]陈俊,黄晓明.基于三维离散元法的沥青混合料断裂过程模拟[J].华南理工大学学报:自然科学版, 2012, 40(7): 21-26.

[8]姚波,张于晔,李方超.钢桥面与环氧沥青铺装界面剪切特性[J].中国公路学报,2017, 30(3): 132-138.

[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]YOU Z P. Development of a micromechanical modeling approach to predict asphalt mixture stiffness using the discrete element method [D]. Urbana-Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2003.

[11]YAO Bo, LI Fangchao, WANG Xiao, et al. Evaluation of the shear characteristics of steel-asphalt interface by a direct shear test method[J]. International journal of Adhesions, 2016, 68: 70-79.

[12]韩海峰,田小革,李新伟,等.混合集料中颗粒间接触应力的离散元法分析[J].交通科学与工程,2016, 32(1): 33-37.

(责任编辑 王利君)