文章编号:1005-0523(2017)05-0001-06

立转式开启桥桥面铺装力学性能研究

孟令国[1],于昌权[2],尹 龙[3],祝争艳[1]

(1.江苏现代路桥有限责任公司,江苏 南京 210049;2.江苏省海安县交通运输局,江苏 海安 226600;
3.河海大学道路与铁道工程研究所,江苏 南京 210098)

摘要:利用带有环境箱的直剪试验装置,测试并研究了不同温度下的复合试件层间抗剪切性能,绘制试件在受剪过程中的剪应力与位移曲线,根据曲线计算分析层间抗剪强度以及层间剪切模量,利用抗剪强度与层间剪切模量评价不同温度工况下的复合试件层间力学性能。借助有限单元法建立开启桥数值分析模型,计算不同模量下开启桥层间剪应力,定义危险系数,综合分析层间力学性能。研究表明:温度越高层间剪切模量越低,抗剪强度越小,层间危险系数越高,建议高温天气减小开启速度。变速开启状态下层间最大剪应力均大于匀速开启状态下层间最大剪应力,建议在设计阶段采用变速开启方案模拟研究开启桥铺装层层间力学性能。

关键词:立转式开启桥;桥面铺装;剪切强度;剪切模量;变速开启

中图分类号:U443.33 **文献标志码**:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.05.001

开启桥桥面铺装处于复杂的应力与应变之中,当沥青混凝土铺装层与钢桥面板层间界面粘附力过小,剪应力超过铺装粘结层的剪切强度时,就会发生剪切破坏,目前主要通过剪切试验来评价桥面铺装的抗剪性能。钢桥面铺装实际工作环境温度范围为-20~70 ℃[1],沥青混凝土是一种温度敏感性材料,其力学性能会随着钢桥面铺装层温度的变化而发生明显变化[2]。本文利用带有环境箱的室内直剪试验仪器(SCIS),对不同温度环境下的钢桥面铺装复合试件进行层间抗剪性能研究,最后将试验结果与数值模拟结果进行对比分析,为开启桥铺装层的设计研究提供参考。

1 室内SCIS试验介绍

开启桥在开启过程中,当铺装层层间剪切强度小于层间剪应力时,铺装层层间界面的剪应力将导致上下界面发生相对滑动,即相对位移。这种相对位移的大小和方向与桥面结构、材料类型、外荷载类型等因素密切相关,是一个较复杂的力学模型[3-4]。

直接剪切试验是采用库伦定律为原理的一种试验方法,剪切面摩擦力与面上的法向压力成正比。将不同温度湿度环境下的试件,在相同的法向压力下,沿固定的剪切面直接施加剪力,使得试件破坏,得到其破坏时的剪应力,剪应力与剪切面积的比值即为抗剪强度。

考虑以上因素,本文采用直接剪切试验,作为评价在温湿耦合作用下铺装结构层间抗剪性能的试验方法,其原理如图1所示,按照公式(1)计算。

$$\tau=F/A \tag{1}$$

式中:τ为抗剪强度,MPa;F为对铺装结构施加的剪力,N;A为试件底面积,mm^2;σ为对铺装结构施加的正应力,MPa。

采用如图2所示的SCIS进行室内剪切试验,试件夹具将试件的混凝土部分固定在试件夹具内,试件的

收稿日期:2017-04-01

作者简介:孟令国(1974—),男,高级工程师,研究方向为道路工程养护。
通讯作者:于昌权(1990—),男,硕士研究生,研究方向为桥面铺装。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

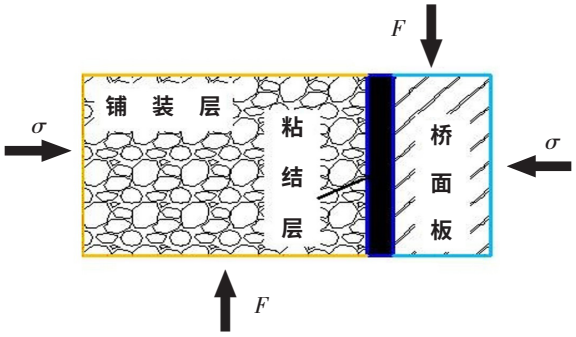

图1 剪切试验原理示意
Fig.1 Shear test principle schematic diagram

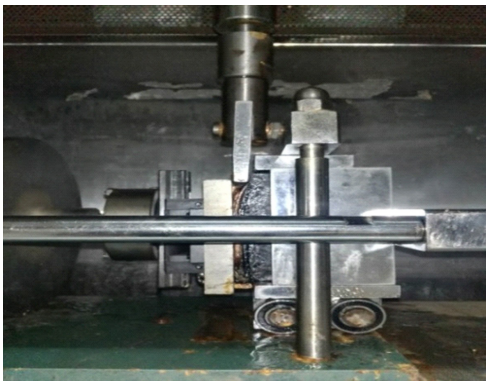

图2 室内SCIS装置
Fig.2 Indoor SCIS device

钢板部分在试件夹具外，试件界面与试件夹具边缘在同一竖直面上，通过千斤顶在试件界面施加正应力，本文研究时根据路面标准轴载100 kN时的轮胎按地压力为0.7 MPa，因此在复合试件界面上施加特定正应力0.7 MPa来模拟实际工况，利用多功能材料试验系统UTM25控制竖向荷载，以1 mm/min加载速率将竖向荷载直接作用在钢板上，利用UTM系统记录下不同剪力对应的剪切位移大小，继续剪切直到试件破坏，停止试验。

2 开启桥铺装结构体系复合试件制备

复合试件制备包括3个主要步骤：涂抹粘结层、摊铺环氧沥青混合料轮碾成型立方体复合试件、脱模养护。按照模具尺寸制作钢板（界面面积A=9 025 mm^2），经过工艺加工在其表面覆盖环氧富锌漆作为模拟实际钢桥面板防腐层试验温度选取30 ℃与60 ℃。

按照以下方法制作钢桥面铺装体系复合试件：

① 将钢桥面板试件表面清理干净，装入特制得车辙板模具中，放入烘箱中进行养护，如图3所示。② 粘结层选取环氧沥青粘结剂，取出钢桥面板，将粘结层均匀摊铺在钢桥面板表面，粘结层摊铺量0.68±0.05 L·m^{-2}，如图4所示。③ 选用AC-13型环氧沥青混合料，其配合比如表1所示，其最佳油石比如表2所示。将沥青混合料摊铺在车辙板上，利用轮碾成型车辙板（如图5所示），随后将成型好的车辙板放入120℃烘箱内，固化后拆模，将得到的复合试件放入预设温度的环境箱中养护，最终得到“铺装层+粘结层+钢块”钢桥面铺装复合试件，如图6所示。

表1 AC-13矿料级配范围及设计级配曲线
Tab.1 AC-13 mineral aggregate grading range and design grading curve

孔径/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配	100.0	100	93.7	61.2	43.5	33.1	22.5	16.2	10.4	5.3
上限	100	100	100	75	58	44	32	23	16	8
下限	100	100	90	45	30	20	13	9	6	4

表2 AC-13最佳油石比（6.5%）
Tab.2 The AC-13 optimum proportion (6.5%)

油石比/%	试件密度/(g/cm^3)	最大理论/(g/cm^3)	空隙率VV/%	间隙率VMA/%	饱和度VFA/%	稳定度/kN	流值/mm
6.5	2.533	2.655	4.6	14.71	68.9	16.42	35.1

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

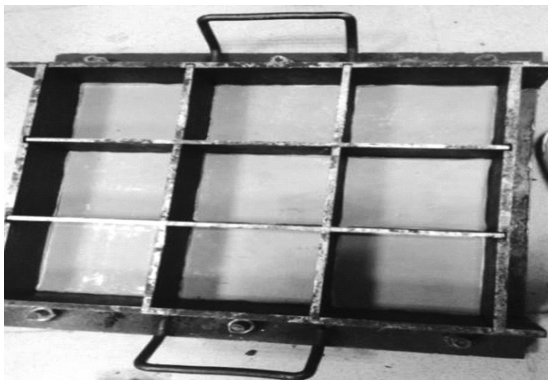

图 3　钢桥面板装模
Fig.3　Steel bridge panel mold

图 4　环氧沥青粘结层
Fig.4　Epoxy asphalt binder layer

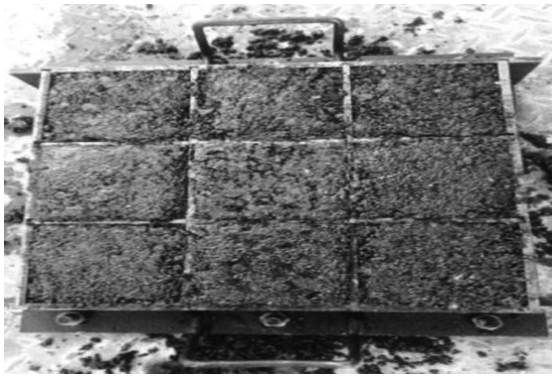

图 5　成型车辙板
Fig.5　Rutting plate

图 6　钢桥面铺装复合试件
Fig.6　Composite specimen of steel deck plate pavement

3　试验结果讨论与分析

在利用SCIS 对复合试件进行剪切试验时,调节 SCIS 所在环境箱温度与复合试件养生温度一致。经过实验测试分析,得到 30 ℃与 60 ℃复合试件剪切结果如图 7 与图 8 所示。

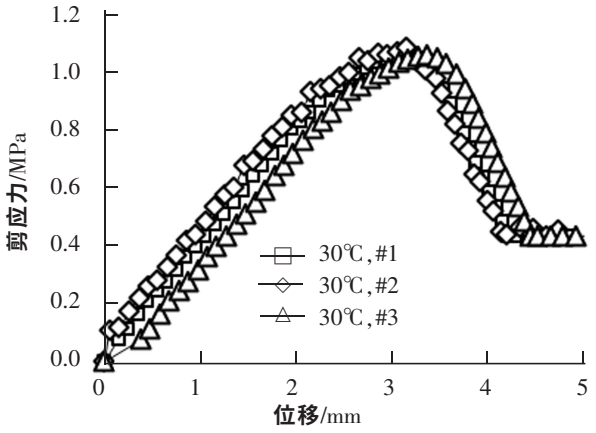

图 7　30 ℃条件下剪应力与位移曲线
Fig.7　Shear stress and displacement curve under 30℃

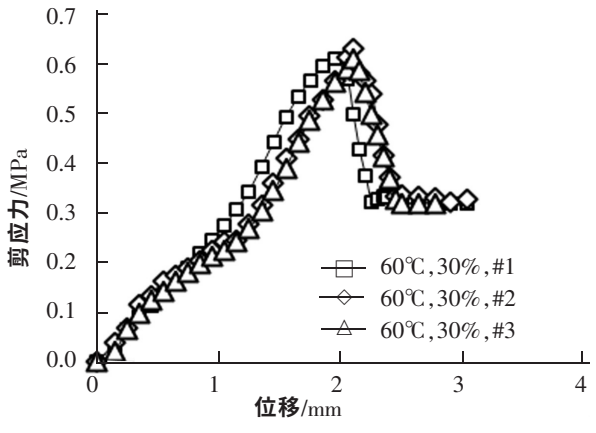

图 8　60 ℃条件下剪应力与位移曲线
Fig.8　Shear stress and displacement curve under 60℃

经过图 7 分析可见,30 ℃环境下层间抗剪强度平均值为 1.09 MPa,残余剪应力均值为 0.4 MPa,最大剪切位移均值为 2.7 mm。分析图 8 可见,在 60 ℃条件下层间抗剪强度平均值为 0.63 MPa,残余剪应力为

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

0.29 MPa，最大剪切位移均值为2.3 mm。对比分析30℃与60℃剪切结果，随着温度的升高，层间抗剪强度降低，最大剪切位移减小，残余剪应力减小。定义剪切模量为K，剪切应力最大变化量为$\Delta\tau$，最大剪切位移变化量为$\Delta\delta$，具体关系如公式(2)所示。根据公式(2)计算不同温度下的层间剪切模量以及对应量的变异系数C.V(Coefficient of Variation)，分析结果如表3所示。

$$K=\Delta\tau/\Delta\delta \tag{2}$$

表3 不同温度条件下的层间剪应力分析

Tab.3 Interlayer shear stress analysis under different temperatures

温度/℃	试件编号	$\Delta\tau$/MPa	K/(MPa/mm)	$C.V$/%	τ_r/MPa	$C.V$/%
30	1	1.10	0.43	3.4	0.42	3.5
	2	1.09	0.40		0.39	
	3	1.10	0.39		0.39	
60	1	0.63	0.26	2.1	0.31	5.8
	2	0.63	0.28		0.30	
	3	0.66	0.27		0.27	

结合表3分析，剪切模量与残余应力数据均比较稳定，当温度由30 ℃升高到60 ℃时，层间抗剪强度降低了42%，剪切模量降低了34%，残余应力降低了27%，随着温度的升高层间抗剪强度降低，粘结层剪切模量也随之而减小。

4 数值模拟研究

利用有限元软件ADINA建立正交异性钢桥面板铺装体系复合结构1/2模型如图9所示，根据已有研究内容的计算参数[5-7]，模型参数如表4所示，基本假设与已有研究相同[8]，阻尼常数α=0.034，β=0.002 9，阻尼系数比为0.01[9]。开启方案如表5所示，铺装厚度选取50 mm，计算170 s开启时间内变速开启与匀速开启两种状态下的铺装层层间剪应力。

表4 开启桥模型几何及物理参数

Tab.4 Geometrical and physical parameters of the bascule bridge

计算参数	数值	计算参数	数值
钢箱梁顶板厚度/mm	10	钢板泊松比	0.3
横隔板间距/mm	3 750	钢桥面板弹性模量/MPa	210 000
横隔板厚度/mm	10	沥青铺装层厚度/mm	30
顶板梯形加劲肋厚/mm	8	铺装层的密度/kg·m^{-3}	2 500
顶板加劲肋上口宽/mm	300	钢板密度/kg·m^{-3}	8 700
顶板加劲肋下口宽/mm	170	铺装泊松比	0.25
顶板加劲肋间距/mm	600	横向作用长度/m	0.308
顶板加劲肋高度/mm	280	纵向作用长度/m	0.25

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 5　开启桥 170 s 变速开启方案
Tab.5　Variable speed plan of bascule bridge within 170 s

开启阶段	开启时间/s	角加速度/(°·s^{-2})
加速开启	0~15	0.036 558
匀速开启	15~155	0
减速开启	155~170	−0.036 558

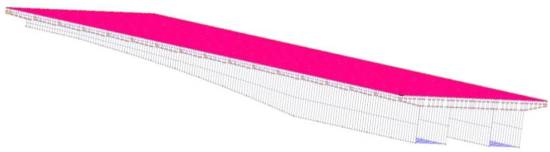

图 9　开启桥 1/2 桥模型
Fig.9　1/2 bridge model

铺装层模量选取 500 MPa 时，匀速与变速条件下计算云图如图 10 所示，铺装模量选取 500~2000 MPa[10] 匀速与变速计算结果比较，如图 11 所示。

由图 10 与图 11 可见，在匀速与变速开启过程中层间最大剪应力均出现在转轴上方位置，在变速开启过程中，加速度的存在并未造成铺装层结构产生变化随着模量的增加，层间最大剪应力均增大，模量相同时变速开启的层间最大剪应力均大于匀速开启状态层间剪应力。

定义层间危险系数 D_{pz} 为数值模拟计算值与室内试验剪切强度值的比值，$D_{pz}=\tau_s/\tau_e$，τ_s、τ_e 分别为剪应力与剪切强度，计算结果如图 12 所示。

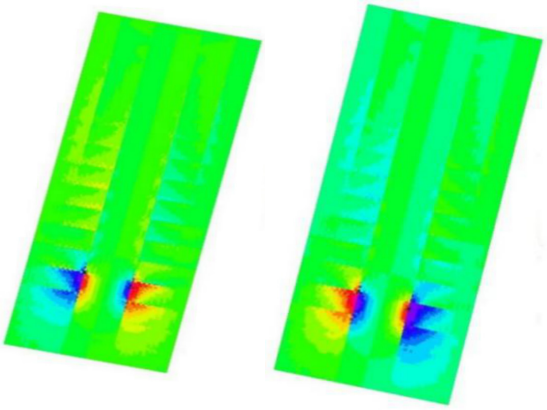

图 10　匀速开启(左)与变速开启(右)应力云图
Fig.10　Stress nephogram at uniform speed (left) and variable speed (right)

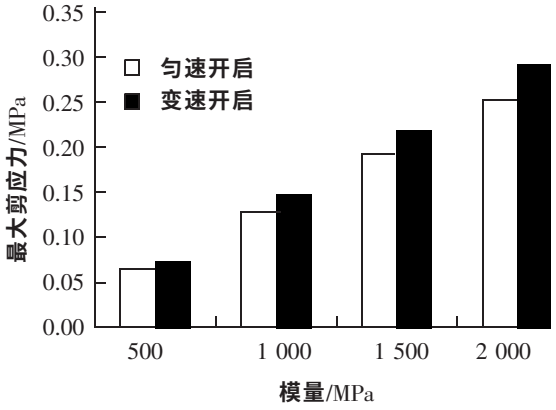

图 11　不同模量条件下铺装黏结层层间剪应力
Fig.11　Interlayer shear stress of pavement bond under different modulus

根据图 12 可见，模量由 2 000 MPa 减为 500 MPa 时，匀速开启状态下层间危险系数增加了 20%；变速开启状态下层间危险系数增加了 8.3%，随着温度的升高层间危险系数均增大。对比分析相同温时，变速工况下的层间危险系数明显高于匀速工况下层间危险系数。建议在设计模拟阶段采用变速分析开启桥铺装结构层层间应力。

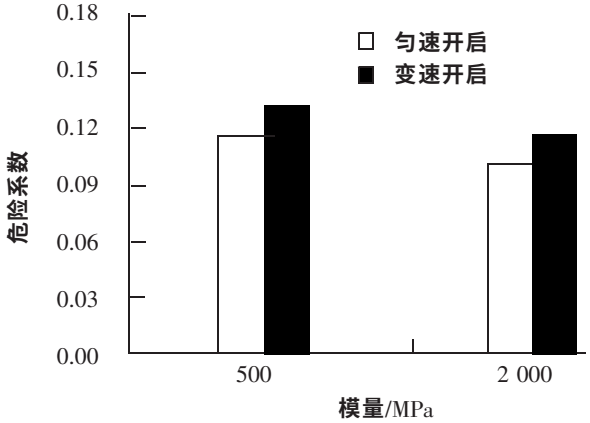

图 12　两种状态下层间危险系数
Fig.12　Interlayer danger coefficient in two states

5　结论

1）随着环境温度的升高，层间抗剪强度降低，层间剪切模量减小，建议采用抗剪强度与剪切模量共同评价层间力学性能。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2）开启桥变速开启过程中，层间剪应力大于匀速工况剪应力，结合危险系数分析，在夏季变速开启时危险系数比匀速工况危险系数高，建议高温天气时适当减小开启速度。

参考文献：

[1] 黄卫. 大跨径桥梁钢桥面铺装设计理论与方法[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2006.
[2] 袁峻，贾璐，孙立军. 变温下沥青混合料的剪切疲劳变形叠加模型[J]. 建筑材料学报，2008，11(4)：435-440.
[3] LAU C M，FWA T F，PARAMASIVAM P. Interface Shear Stress in Overlaid Concrete Pavements[J]. Journal of Transportation Engineering，1994，120(2)：163-177.
[4] CRISPINO M，FESTA B，GIANNATTASIO P，et al. Evaluation of the Interaction between the asphalt concrete layers by a new dynamic test[C]//Eight International Conference on Asphalt Pavements，1997：741-754.
[5] 张磊，钱振东，刘云. 立转式开启桥铺装结构静动响应分析[J]. 东南大学学报：自然科学版，2010，40(6)：1271-1275.
[6] 东南大学桥面铺装课题组. 天津海河响螺湾开启桥钢桥面铺装技术研究报告[B]. 南京：东南大学桥面铺装课题组，2009.
[7] CHOPRA A K. Dynamics of structures[M]. 3rd ed. Englewood Cliffs，NJ：Prentice Hall，2006.
[8] 刘云，钱振东. 立转式开启桥钢桥面铺装结构的应力状态分析[J]. 公路交通科技，2014，31(1)：55-60.
[9] 张磊. 大跨径桥梁钢桥面铺装动荷载响应研究[D]. 南京：东南大学交通学院，2007.
[10] HUANG W，QIAN Z D，CHEN G，et al. Epoxy asphalt concrete paving on the desk of long-span steel bridges[J]. Chinese Science Bulletin，2003，48(21)：2391-2394.

Study on Mechanical Properties of Bascule Bridge Deck Pavement

Meng Lingguo[1]，Yu Changquan[2]，Yin Long[3]，Zhu Zhengyan[1]

（1. Jiangsu Sundai Road & Bridge Co.，Ltd.，Nanjing 210049，China；2.Transportation Bureau of Haian in Jiangsu Province，Haian 226600，China；3. Road and Railway Engineering Research Institute，Hohai University，Nanjing 210098，China）

Abstract：The direct shear test apparatus with environmental cabinet was adopted to analyze the shear properties of specimen interlayer under different temperatures. In the process of test，the shear stress and displacement curve of specimen was drawn. Interlayer shear strength and the interlayer shear modulus were calculated by the curve. The mechanical performance of specimens under different temperatures was evaluated through the shearing strength between layers and interlayer shear modulus. The bascule bridge numerical analysis model was established by finite element method and the pavement interlayer shear stress under different modulus was calculated by the numerical analysis model. Danger coefficient was defined to analyze the mechanical properties between the layers. Researches show that when the temperature is higher，the pavement interlayer shear modulus would be lower；the interlayer shear strength would be smaller；the danger coefficient between the layers may be higher. In the case of high temperature，the opening speed should be reduced. The maximum shear stress between the layers under variable speed is larger than that at uniform speed. It is suggested that the bascule bridge deck pavement mechanics performance be studied through the method of variable opening during the design phase.

Key words：bascule bridge；bridge deck pavement；shear strength；shear modulus；variable speed

（责任编辑　王建华）

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net