

# 正交异性钢桥面铺装层疲劳开裂试验的改进研究

赵岩荆<sup>1,2</sup> 杨宁<sup>1</sup> 蒋玲<sup>1</sup>

1. 南京交通职业技术学院, 南京 211188

2. 东南大学, 土木工程学院, 南京 210096

**摘要:**为克服现有疲劳开裂试验无法真实模拟正交异性钢桥面铺装层实际工作状态的缺陷,作者以法国LCPC试验为基础,提出了新型铺装层疲劳开裂试验的基本构型。利用有限元方法建立该基本构型的三维有限元模型,分析了在室内试验条件下荷载加载位置、荷载作用面积、复合梁钢板厚度、铺装层试件厚度等参数对铺装层试件力学响应的影响。在力学分析结果上进行验证性试验,最终确定试验构型的各项参数,建立新型铺装层疲劳开裂试验方法。该试验方法能够真实模拟出钢桥面铺装层的实际力学响应,提升了设备加载效率,并能够充分利用现有UTM-25设备进行试验,对于钢桥面铺装层的设计、评价、选择,以及开裂机理的深入研究工作,提供科学有效的试验手段。

**关键词:**钢桥面铺装层;疲劳开裂试验;三维有限元方法;开裂机理;

中图分类号:U443.33

文献标识码:A

文章编号:1672-4747(2015)04-0061-07

DOI:10.3969/j.issn.1672-4747.2015.04.009

## Improvement of Fatigue Cracking Test for

## Orthotropic Steel Bridge Deck Surfacing

ZHAO Yan-jing<sup>1,2</sup> YANG Ning<sup>1</sup> JIANG Ling<sup>1</sup>

1. Nanjing Communication Institute of Technology, Nanjing 211188, China

2. School of Civil Engineering, Southeast University,  
Nanjing 210096, China

**Abstract:** In order to overcome the disadvantage that the current fatigue cracking test can not reflect the practical condition of orthotropic steel bridge deck (OSBD) surfacing actually, one basic model of new improved fatigue cracking test was proposed based on French LCPC test. By using the finite element method, a three dimensional model was built for this

收稿日期:2015-02-05.

基金项目:中国博士后科学基金(2015M571644);南京交通职业技术学院科研项目(JY1401)。

作者简介:赵岩荆(1983-),男,江苏宜兴人,东南大学博士后,从事钢桥面铺装研究工作。

basic test model. The loading positions, loading areas, steel plate thickness and surfacing specimen thickness were considered in evaluating the effects on the specimen mechanical responses. Verification tests were performed to determine all the test parameters based on mechanical analysis. Finally, one new improved OSBD surfacing fatigue cracking test was founded. This test can simulate the practical mechanical responses in actual deck surfacing and enhance the loading efficiency. This test can be carried out on UTM-25 and is very helpful for OSBD surfacing design, evaluation, choice, and a scientific test method is provided for further research on OSBD surfacing cracking characteristics.

Key words: Orthotropic steel bridge deck surfacing, fatigue cracking test, the three dimensional finite element method, cracking characteristics

## 0 引言

正交异性钢桥面板铺装层疲劳特性的研究工作一直以来都是钢桥面铺装层材料与结构研究的难点与热点。进行钢桥面铺装层的疲劳特性研究,前提是必须建立科学的疲劳开裂试验方法。通过确定合理的边界条件、施加适当的动态荷载,能够准确的模拟出铺装层在实际使用过程中的受力状态,从而对过程中铺装层疲劳性能的衰减、疲劳破坏的扩展进行跟踪观测。国内外学者已针对铺装层的疲劳性能开展了大量的研究,相继提出了一系列室内试验方法,如大型环道/直道试验<sup>[1-2]</sup>、四点弯曲疲劳寿命

试验、三点加载复合梁疲劳试验<sup>[3-6]</sup>,还有一些其他类型的复合梁模型,如丹麦模型<sup>[7]</sup>、德国模型等。但这些方法一方面无法模拟出合理的铺装层结构边界条件,另一方面所施加的试验荷载与实际车辆荷载之间缺乏明确的映射关系,造成试件的受力状况与实际铺装层不符,疲劳试验结果与铺装层实际疲劳性能表现相关性较差。法国 LCPC 实验室 Laurent ARNAUD<sup>[9]</sup>, Bernnard<sup>[10]</sup>, François Olard<sup>[11]</sup>等研究人员提出了一种五点弯曲试验,如图 1 所示。利用试验装置下部结构三点支撑模拟加劲肋作用,利用上部加载装置模拟车辆双轮荷载,从而在实验室环境下最大限度的模拟出铺装层的受力状况。

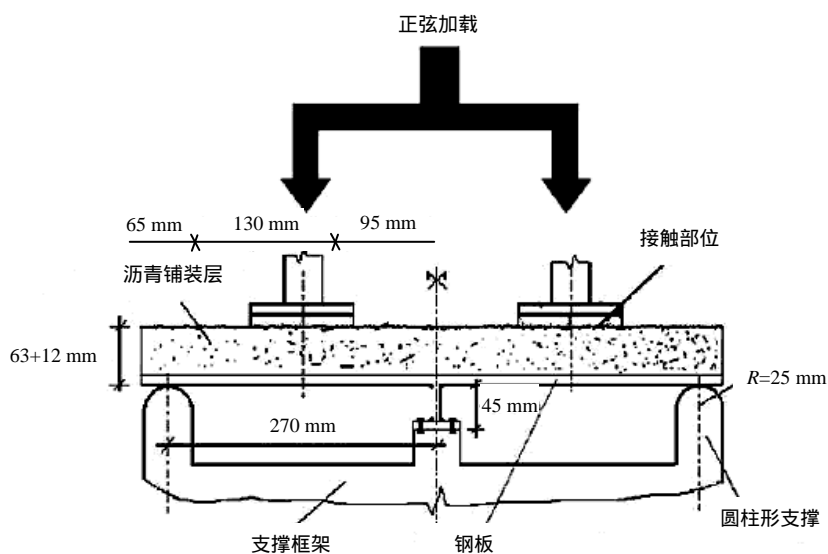


图 1 法国 LCPC 钢桥面铺装疲劳开裂模拟试验

Fig.1 French LCPC fatigue cracking simulation test for orthotropic steel bridge deck surfacing

该模型简单可靠，边界条件与桥面环境相似，受力路径更清晰，试验更简便可靠。但该试验方法依然存在以下缺点，影响了该方法的实用性。

(1) 由于试验模型完全取自实际钢桥面及铺装结构，导致试验荷载偏大，加载效率低下。动态荷载峰值通常需要在 35 kN 以上。如此大的动态荷载对加载设备要求较高，并且对加载设备使用寿命产生了影响；

(2) LCPC 试验中试件尺寸太大，超出了国内路面材料动态荷载试验中最为广泛应用的加载设备：UTM-25 的环境箱的尺寸限制，影响了其推广应用；

因此，鉴于 LCPC 的优缺点，有必要在 LCPC 试验的基础上，保留其固有优点，通过改进措施克服其不利缺陷，提出一种新型的铺装层疲劳开裂试验方法。

## 1 LCPC 试验模型的改进

### 1.1 试件尺寸的改进

LCPC 试验中试件的平面尺寸为 580 mm (长) × 200 mm (宽)，超过了现有设备 UTM-25 环境试验

箱内的最大长度限制 440 mm。因此将试件长度缩减为 440 mm。同时，为了尽可能保持试件的长宽比，将试件的宽度缩减为 150 mm，使得试件能够被应用于 UTM-25 加载环境温度箱中。

### 1.2 边界条件的改变

由图 1 可以看出，LCPC 试验通过试件中心两侧加载，从而在试件中央表面处形成负弯矩，模拟实际铺装层力学响应。但下部三个支点中的两侧两个支点由于完全固定于工作平台之上，加大了铺装层-钢板复合梁结构的底部支撑，导致试验过程中需要巨大的加载力才能在试件中央产生足够的负弯矩效应。因此，本文对 LCPC 试验进行了改进，去除了底部两侧支点，仅保留中央支撑以形成铺装层负弯矩效应。加大了复合梁试件的柔度，使得无需施加额外的荷载做功并能够模拟出铺装层的力学响应。为了保证动态荷载作用过程中试件的平衡，在两侧设置只能受拉不能受压的锚链。改进后的疲劳开裂模拟试验基本构型如图 2 所示：

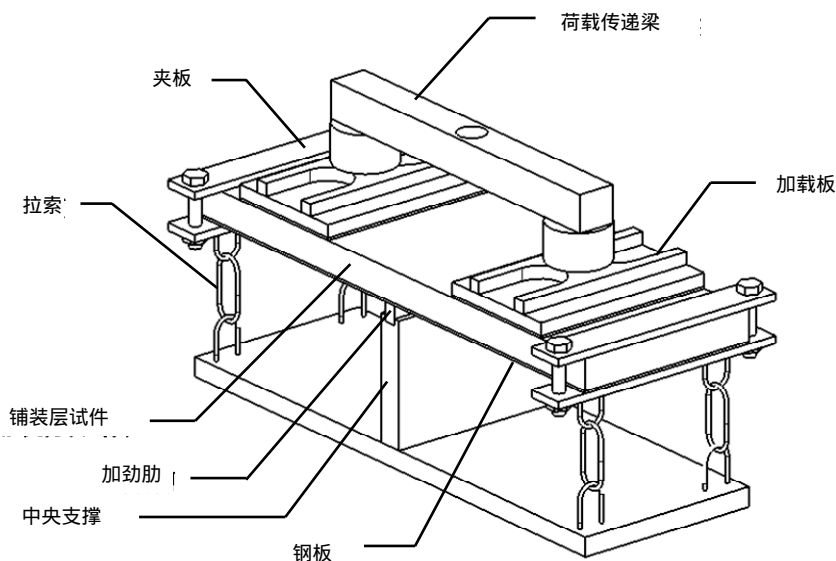


图 2 改进型钢桥面铺装疲劳开裂模拟试验

Fig.2 Improved fatigue cracking simulation test for orthotropic steel bridge deck surfacing

## 2 改进型疲劳开裂试验参数影响性分析

图2显示了疲劳开裂试验基本构型,诸如荷载作用位置、荷载作用面积、钢板厚度的影响,铺装层试件厚度的影响等试验参数还需要确定,最终形成明确的铺装层疲劳开裂试验方法。为此,首先建立铺装层复合梁试件三维有限元模型,如图3所示。利用ABAQUS软件进行各种试验参数对铺装层力学响应的影

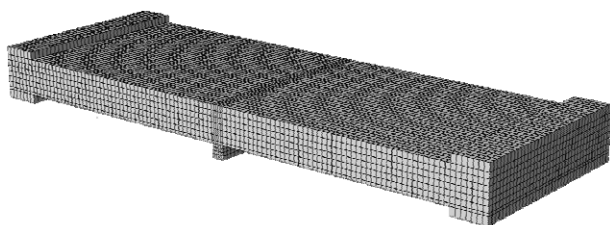


图3 铺装层复合梁试件三维有限元模型

Fig.3 Three dimensional finite element model for orthotropic steel bridge deck surfacing specimen

为保证计算精度,图3中模型采用三维二十节点减缩积分单元C3D20R进行建模。底座则视为刚体,计算中不予以考虑。

如不作特殊说明,则计算过程中的材料参数按表1中所示默认值取值:

表1 计算模型材料参数

Tab.1 The material properties in the calculation model

材料	模量/MPa	泊松比	厚度/mm
沥青混凝土	2 500	0.35	25
钢板	210 000	0.28	6

在默认情况下,荷载总大小取4 kN。荷载采用均布荷载,荷载的尺寸及作用位置如图4所示。默认情况下, $d_1$ 取120 mm, $d_2$ 取100 mm。荷载沿试

件宽度方向的尺寸与试件宽度一致,为150 mm。

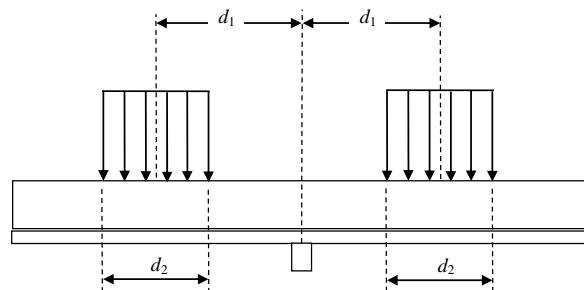


图4 均布荷载尺寸及作用位置

Fig.4 Dimensional and position of uniform distributed load

计算采用铺装层试件表面最大弯拉应力为指标。考察不同因素对铺装层表面最大拉应力的影响。

### 2.1 荷载作用位置影响

考察荷载中心距离试件中心的距离,即图4中 $d_1$ 的大小对铺装层力学响应的影响。根据试件尺寸与荷载尺寸, $d_1$ 的范围可以取[50 mm, 140 mm]之间。因此,每隔10 mm进行一次计算,分析荷载作用位置对铺装层力学响应的影响。如图5所示:

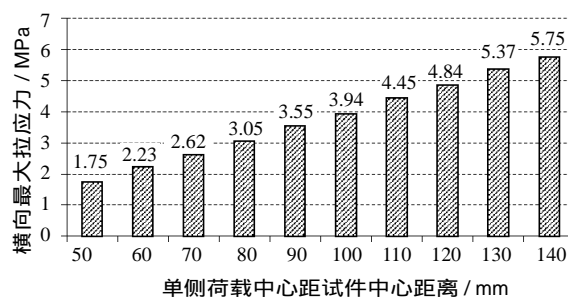


图5 不同荷载位置条件下的最大横向拉应力

Fig.5 Maximum tensile stresses under different loading positions

由图5可以看出,铺装层试件最大横向拉应力与荷载作用位置 $d_1$ 呈线性相关关系。荷载对铺装层中央加劲肋处的力矩随着 $d_1$ 的增长而增大,导

致表面最大拉应力随之增长。因此,在条件可能的情况下,应当将荷载作用位置尽可能远离试件中心,以便能够以较小荷载达到铺装层试件表面所需应力应变响应。

## 2.2 荷载作用面积的影响

考虑总荷载保持 4 kN 不变而荷载面积变化的影响。由于总荷载不变,均布荷载在沿试件宽度方向的尺寸与试件宽度保持一致,为 150 mm,因此只需考虑荷载宽度  $d_2$  变化。荷载宽度越大,荷载作用面积越大,荷载集度也就越小,反之亦然。计算结果如图 6 所示:

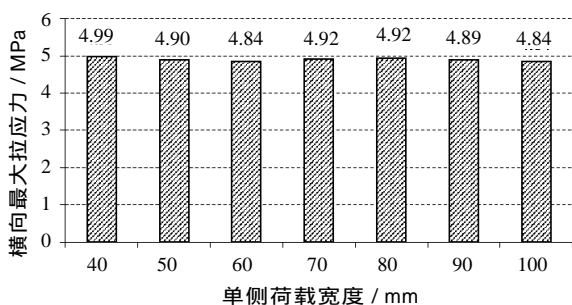


图 6 不同荷载宽度条件下的最大横向拉应力

Fig.6 Maximum tensile stresses with different loading widths

图 6 显示了总荷载不变,荷载宽度  $d_2$  变化条件下的试件最大横向拉应力变化规律。由图可知,由于总荷载不变,铺装层试件的最大横向拉应力变化也非常小,基本处于同一水平。在试验设计确定试验参数时,可以忽略荷载作用面积对试件最大横向拉应力的影响。

## 2.3 钢板厚度的影响

法国 LCPC 试验中铺装层试件下部粘结的钢板厚度同样参照实际钢桥面板厚度设置,通常选择厚度为 14 mm 的钢板。但在实际试验过程中,所需关注的仅仅是铺装层表面的应力应变,大量加载力的做功均消耗于使钢板产生弯曲挠度的过程中,荷载

能量被大量浪费,加载力的有效利用率很低,同时对设备的加载水平提出了很高的要求,对设备的使用寿命也极为不利。针对这一缺陷,在能够充分体现铺装层-钢板复合结构力学特性的基础上,本文拟通过削减钢板厚度,使得加载力的效率得以提高,并降低试验对加载设备的苛刻要求。计算中选用了四种钢板厚度,分别为 2 mm、4 mm、6 mm 以及 8 mm,计算结果如图 7 所示。

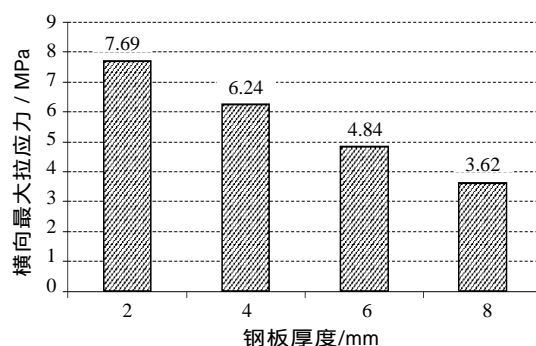


图 7 不同钢板厚度条件下的最大横向拉应力

Fig.7 Maximum tensile stress with different steel plate thickness

由图 7 的计算结果可知,铺装层力学响应受钢板厚度影响十分明显。较厚的钢板由于具有更高的刚度,增强了对铺装层试件的支承作用,降低了相同荷载作用下的试件内应力水平。通过上述计算可知,降低钢板厚度能够大幅提升荷载作用效率。但过薄的钢板将使得复合梁试件丧失钢桥面铺装特有的钢板-铺装层复合结构特性,因此,钢板厚度必须适中,通过实际试验验证确定具体尺寸。

## 2.4 铺装层厚度的影响

法国 LCPC 试验中,铺装层试件厚度同样依据实际桥面铺装厚度,一般达到 50 mm 以上,同样需要消耗大量能量使得试件产生与实际桥面铺装相同的挠度。由于铺装层最大应力应变只产生于表面处,因此可以在能够保证混合料最小摊铺厚度的前

前提下，考察降低铺装层试件的厚度对力学响应的影响。由于钢桥面铺装单层厚度一般介于 25 mm 与 35 mm 之间，因此，本文考虑三种试件厚度：25 mm、30 mm 及 35 mm。计算结果如图 8 所示。

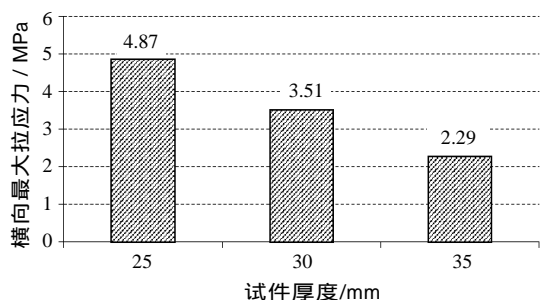


图 8 不同铺装层厚度条件下的最大横向拉应力

Fig.8 Maximum tensile stress with different surfacing specimen thickness

由图 8 可知，最大横向拉应力受到铺装层试件厚度的影响也十分显著。当试件厚度由 25 mm 增大至 35 mm 时，最大横向拉应力由 4.87 MPa 下降至 2.29 MPa，降低幅度达 53% 左右。因此，降低铺装层试件厚度同样能够提升加载设备工作效率，但试件厚度必须满足最小单层碾压摊铺厚度，以保证能够正确反映材料摊铺于实际桥面铺装时的工作性能。

### 3 改进型疲劳开裂试验参数验证

通过上述分析，基本确定了改进型疲劳开裂试验参数的确定原则：

- (1) 荷载作用位置应当尽量远离试件中心，以便提高荷载效率；
- (2) 荷载作用面积对试件铺装层力学响应的影响可以忽略不计；
- (3) 钢板与铺装层可以在正确反映铺装层工作特性的基础上减小厚度。

根据这几项原则，根据图 2 所示基本构型制作了多套试验模具，并进行验证性试验。根据验证结果，

获得以下几点结论：

(1) 荷载作用位置中心距离试件中心理论上最大距离可以达到 140 mm，但由于试件两端锚固夹板需要占据一定空间，因此，最终将图 4 中所示的  $d_1$  确定为 120 mm；

(2) 由于荷载作用面积对铺装层力学响应影响可以忽略不计，因此参照 LCPC 试验，将荷载作用宽度，即图 4 中所示的  $d_2$  确定为 100 mm；

(3) 验证试验中同样采用了 2 mm、4 mm、6 mm、8 mm 四种钢板厚度。验证结果表明 2 mm 与 4 mm 厚度的钢板由于自身刚度过小，试验过程中无法充分反映实际桥面钢板与铺装层的复合力学行为。同时较薄厚度的钢板在试件成型与试验过程中在压力作用下容易产生不可恢复的塑性变形，回弹能力较差，对钢板的可重复利用存在不利影响。综合钢板力学特性与加载效率两方面考虑，最终确定 6 mm 作为试件过程中的复合梁钢板厚度；

(4) 铺装层试件厚度根据实际铺装层单层厚度与级配确定，但为了能够充分反映裂缝扩展过程，厚度不宜过薄，宜采用 30 mm 作为试验过程中复合梁的铺装层厚度。

根据以上力学计算与验证试验的结果，最终形成改进型正交异性钢桥面铺装层开裂疲劳试验方法。实际试验模型如图 9 所示：

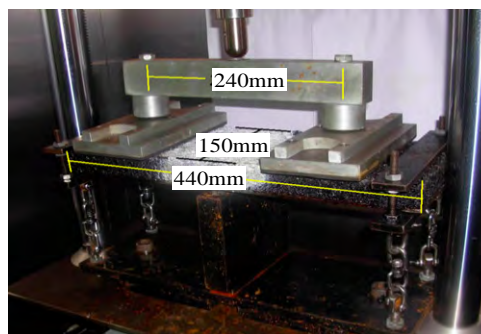


图 9 改进型铺装层疲劳开裂试验

Fig.9 Improved orthotropic steel bridge deck surfacing fatigue cracking test

## 4 主要结论

为克服法国 LCPC 钢桥面铺装层疲劳开裂试验加载效率低下,对加载设备要求苛刻等缺点,本文提出了改进型铺装层疲劳开裂试验的基本构型,利用三维有限元分析方法对试验过程中模型参数对铺装层力学响应的影响进行了研究,主要得到以下几点结论:

(1) 荷载作用位置距离试件中心的距离对试件力学响应影响显著,考虑到模型尺寸及边界条件限制,最终确定荷载作用中心距离试件中心距离为 120 mm;

(2) 施加荷载的宽度,即作用面积对铺装层力学响应影响甚微,参照法国 LCPC 试验,荷载作用宽

度确定为 100 mm;

(3) 铺装层内部应力水平与钢板厚度、铺装层试件厚度成反比。可以通过削减钢板或铺装层试件厚度提升荷载的加载效率。通过验证试验,在确保能够充分反映实际桥面铺装中钢板-铺装层复合结构工作性能的基础上,确定复合梁试件中钢板厚度为 6 mm,并建议铺装层试件厚度为 30 mm。

根据本文所确定的改进型正交异性面板钢桥面铺装层疲劳开裂试验方法,能够充分利用 UTM-25, MTS 等试验设备,以较小的加载力获得与实际钢桥面铺装中同等的应力水平,从而科学合理的模拟钢桥面铺装的实际工作状态,为钢桥面铺装的设计、评估、应用以及进一步深入研究提供了一种有效的疲劳性能评价方法。

## 参考文献

- [1] 伍波,方萍. 钢桥面铺装的有限元分析和环道模型设计[J]. 公路, 2001, 1(1): 24-27.
- [2] 张起森,李宇峙,邵腊根等. 厦门海沧大桥桥面沥青铺装层直道疲劳试验研究[J]. 中国公路学报, 2001, 14(1): 60-65.
- [3] 东南大学交通学院. 南京长江第二大桥钢桥面环氧沥青混凝土铺装技术及应用[R]. 南京: 东南大学, 2000.
- [4] 东南大学桥面铺装课题组, 江苏省长江公路大桥建设指挥部. 润扬长江公路大桥钢桥面铺装研究报告[R]. 南京: 东南大学, 2002.
- [5] 东南大学交通学院. 南京长江第三桥钢桥面铺装试验研究报告[R]. 南京: 东南大学, 2003.
- [6] Fondriest F. F. Final report on laboratory evaluation of various paving materials for orthotropic steel deck bridges [R]. Columbus Laboratories, Batelle Memorial Institute Columbus, USA, 1969.
- [7] Ylva Edwards, Pereric Westergren. Polymer modified waterproofing and pavement system for the High Coast Bridge in Sweden (research, testing and experience) [R]. Swedish National Road and Transport Research Institute, VTI Report 430A, 2001: 50-55.
- [8] 陈先华. 基于复合梁的钢桥面铺装层疲劳特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [9] Arnaud Laurent, Houel Adrien. Fatigue damage and cracking of asphalt pavement on orthotropic steel bridge deck [R]. Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C., 2006.
- [10] Bernnard Heritier, Frederic Loup, Serge Krafft. Design of a specific bituminous surfacing for the highest orthotropic steel deck bridge in the world [R]. Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C., 2005.
- [11] François Olard, Bernard Héritier, Frédéric Loup, etc. A new french standard test method for the design of surfacings on steel deck bridges [J]. Road Materials and Pavement Design, 2005, 6(4): 515-531.

(中文编辑: 吴继屏)