

基于复合梁疲劳试验的沥青路面层间黏结评价

徐世法¹, 郭昱涛², 李世敏³, 马春锋⁴, 高登锋⁵

(1. 北京建筑大学未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044; 2. 北京建筑大学北京市城市交通基础设施建设工程技术研究中心, 北京 100044; 3. 濮阳市公路管理局, 河南 濮阳 457600; 4. 河南省台辉高速公路建设有限公司, 河南 濮阳 457600; 5. 中国建筑土木建设有限公司, 北京 100070)

摘要 目的 评价黏层油对沥青路面疲劳寿命的影响, 确定适合北京地区沥青路面的黏层油的种类和最佳用量, 研发了一种新型的复合梁疲劳试验. 方法 选取适用于北京市常用的橡胶沥青、橡胶 SBS 复合改性沥青、SBS 改性沥青、SBS 改性乳化沥青及普通乳化沥青 5 种黏层油, 通过复合梁疲劳试验分析黏层种类、应变水平、结构层老化对疲劳寿命的影响并进行评价. 结果 使用同一种黏层油的复合梁的疲劳寿命随应变的提高而减小. 使用橡胶 SBS 复合改性沥青作为黏层油的试件疲劳寿命均最长. 复合梁疲劳寿命随黏层用量的增加呈现先增大后减小的趋势, 由此可以得到复合梁疲劳寿命最大情况下的最佳黏层用量, 即为疲劳寿命峰值黏层油用量. 结论 层间黏结效果的优劣对沥青路面结构层的疲劳寿命影响较大, 两者具有良好的相关性. 复合梁疲劳试验评价黏层的层间黏结效果是可行的.

关键词 沥青路面; 层间黏结; 复合梁疲劳试验; 耐久性评价

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Evaluation of Interlayer Bonding of Asphalt Pavement Based on Composite Beam Fatigue Test

XU Shifa¹, GUO Yutao², LI Shimin³, MA Chunfeng⁴, GAO Dengfeng⁵

(1. Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing University of City Engineering and Architecture, Beijing, China, 100044; 2. Beijing Urban Transportation Infrastructure Engineering Technology Research Center, Beijing University of City Engineering and Architecture, Beijing, China, 100044; 3. Puyang Highway Administration Bureau, Puyang China, 457600; 4. Henan Taihui Expressway Construction Co. Ltd., Puyang, China, 457600; 5. China Construction Civil Engineering Co. Ltd., Beijing, China, 100070)

Abstract: A new type of composite beam fatigue test was developed to determine the type of tack coat material suitable for asphalt pavement in Beijing and the optimal dosage and to evaluate the effect of tack coat on the fatigue life of asphalt pavement. Five kinds of tack coat materials commonly used in Beijing were selected. They are rubber asphalt, rubber SBS composite modified as-

收稿日期: 2019-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678028)

作者简介: 徐世法(1963—), 男, 教授, 博士, 主要从事道路工程方面研究.

phalt,SBS modified asphalt,SBS modified emulsified asphalt and ordinary emulsified asphalt. The fatigue test of composite beams was used to analyze the effects of the type of tack coat, strain level and fatigue of structural layer on fatigue life. The fatigue life of composite beams using the same kind of tack coat material decreases with the increase of strain. The fatigue life of composite beams with rubber SBS composite modified asphalt as the adhesive layer is the longest. The fatigue life of the composite beam increases and then decreases with the increase of the amount of the tack coat. Therefore, the optimum dosage of the tack coat can be obtained when the fatigue life of the composite beam is maximum, which is the peak amount of the tack coat of the fatigue life. The effect of interlayer bonding has a great influence on the fatigue life of asphalt pavement layer and has good correlation. The composite beam fatigue test is feasible to evaluate the interlayer bonding effect of the tack coat.

Key words: asphalt pavement; interlayer bonding; composite beam fatigue test; durability evaluation

北京市沥青路面通车使用约5年之后,沥青路面出现了一定程度的开裂及车辙现象,其中开裂更为严重.通过对路面取芯分析得知,大量路段上面层与中面层层间黏结失效,出现脱离现象^[1-5].这表明目前我国公路工程施工相关规程对路面层间黏结力的技术要求仍不够完善.层间黏结力的丧失引发的开裂愈发普遍.虽然国内外研究人员围绕层间黏结对沥青路面寿命的影响进行了一些研究^[6-14],但主要集中于对层间黏结性能的评价,并没有研究层间黏结性能对路面整体结构的作用.笔者选取北京市常用的5种黏层油,设计复合梁疲劳试验,分析黏层种类、应变水平、结构层老化对疲劳寿命的影响并进行评价,确定了黏层最佳用量.

1 原材料选用及其性能检测

试验选用北京市常用的5种黏层沥青,按照《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)进行测试,测试结果如表1~表5所示.

表 1 橡胶 SBS 复合改性沥青技术指标
Table 1 Technical index of rubber SBS composite modified asphalt

指标来源	黏度/ (Pa·s)	延度 5℃/ cm	软化点/ ℃	针入度/ 0.1mm
试验值	1.81	18.2	72.1	49
规范要求	1.0~5.0	≥10	≥65	30~70

表 2 橡胶沥青技术指标
Table 2 Technical index of rubber asphalt

指标来源	黏度/ (Pa·s)	延度/ cm	软化点/ ℃	针入度/ 0.1mm
试验值	2.76	19.2	73.5	46.5
规范要求	2~4	>10	>65	40~60

表 3 普通乳化沥青技术指标
Table 3 Technical index of emulsified asphalt

指标来源	固含量/ %	针入度/ 0.1mm	软化点/ ℃	延度/ cm
试验值	63.7	81	60.1	29
规范要求	≥60	40~120	≥60	≥20

表 4 改性乳化沥青技术指标
Table 4 Technical index of modified emulsified asphalt

指标来源	固含量/ %	针入度/ 0.1mm	软化点/ ℃	延度/ cm
试验值	61.2	88	62.5	35
规范要求	≥60	40~120	≥60	≥20

表 5 SBS 改性沥青技术指标
Table 5 Technical index of SBS modified asphalt

指标来源	黏度/ (Pa·s)	延度/ cm	软化点/ ℃	针入度/ 0.1mm
试验值	2.15	52.6	75.0	70
规范要求	2~4	≥30	≥75	60~80

2 复合梁疲劳试验方案设计

2.1 复合梁试件组成

在现有标准疲劳梁的基础上进行加工形成复合梁试件,两种疲劳梁试件的不同在于

复合梁试件通过黏层油对上下层进行黏结而分层成型,再按照标准疲劳试验的试件进行切割.为了简化制备和试验步骤,试验先对混合料和黏层油进行短期老化,然后再成型试件并切割,最后放入 85℃ 的环境下进行温度老化 5d,然后再进行疲劳性能试验.复合梁疲劳试件结构图和应变加载示意图如图 1、图 2 所示.

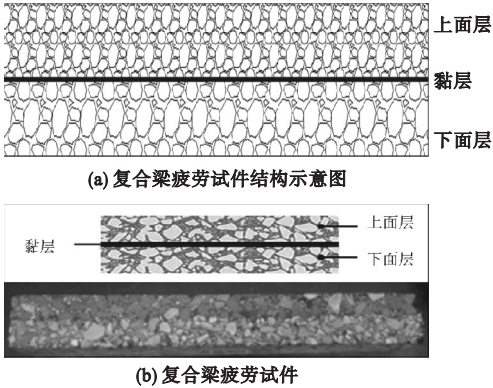


图1 复合梁疲劳试件结构图

Fig.1 Structure diagram of composite beam

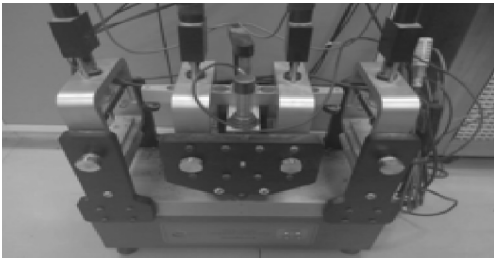


图2 复合梁四点疲劳应变加载示意图

Fig.2 Four-point fatigue strain loading diagram of composite beam

2.2 确定试验条件

2.2.1 选择应力、应变加载方式

应变及应力控制是疲劳试验的两种主要方法.在相同的初始条件情况下,应变控制相比于应力控制的循环次数多,同时断裂破坏是梁的普遍破坏形式^[15-17],应用应变控制的模式时,在试验过程中疲劳梁试件的弯曲程度是由应变程体现出的,沥青路面的疲劳寿命随着变形程度的增大而减小.经过总结前期试验,在控制应变模式下,整体数据表征该试验

具有低离散程度、高精度的优点.

2.2.2 加载频率与加载波形

相比疲劳寿命受波形作用效果不显著,加载频率却对疲劳寿命有着很大的影响^[18].车辆荷载下的实际波形与正弦波形相仿,由此文中的加载波形即选择为无间歇的半正弦波,试验温度应采用 15℃,加载频率与行驶速率直接相关,偏正弦加载模式,在频率是 10 Hz 的情况下,行驶速率则为 60 ~ 65 km/h.荷载频率采用 10 Hz 是可行的.

2.2.3 疲劳破坏的判断标准

当试验开始循环次数为 50 次时,相应的劲度模量为初始值,当疲劳荷载继续循环加载,劲度模量持续衰减,当衰减至初始值的 1/2 时,认为试件已经疲劳破坏.因为试验的单一变量仅为黏层油,故影响计算劲度模量值的唯一因素为黏层种类,因此可对黏层种类这一变量进行评价.

2.3 方案设计

优良的层间黏结状态是保证沥青路面结构层拥有良好抗疲劳性能和路用性能的重要因素.为了进一步研究黏结性能和疲劳层疲劳寿命的关系,对不同黏结层状态加载不同荷载作用,模拟分析各条件下的路面结构疲劳性能.试验分析具体从以下 3 方面:①整体结构老化对复合梁疲劳试件抗疲劳性能的影响;②黏层油材料种类对复合梁疲劳试件抗疲劳性能的影响;③荷载水平与复合梁疲劳试件抗疲劳性能的关系.

3 复合梁疲劳试验结果分析

3.1 黏层种类对疲劳寿命的影响

选择不同黏层种类的最佳用量,制备复合梁试件.进行疲劳试验,试验中的应变参数分别设置为 $\varepsilon = 0.0004$ 、 $\varepsilon = 0.0006$ 和 $\varepsilon = 0.0008$.为了保证试验的可用性及可靠性,在同一种微应变下对同一种复合梁进行 4 次及以上的平行试验,并且保证每组试验有不少少于 3 个有效数据.不同材料 3 种应变下疲劳

寿命如表6 所示.

表 6 不同材料 3 种应变下疲劳寿命

Table 6 Fatigue life of three strains of different materials

黏层种类	疲劳寿命/次		
	$\varepsilon=0.0004$	$\varepsilon=0.0006$	$\varepsilon=0.0008$
橡胶 SBS 复合改性沥青	62 121	31 044	10 987
橡胶沥青	52 238	26 113	9 793
SBS 改性沥青	50 231	27 903	9 258
SBS 改性乳化沥青	42 526	22 751	7 892
普通乳化沥青	33 983	17 931	6 781

由表 6 可知,采用同种黏层油的试件随应变水平的提高其疲劳寿命减小.通过对比得知橡胶 SBS 复合改性沥青黏层复合梁试件的疲劳寿命最长.

复合梁是一种层状复合结构,层间黏结效果的优劣对其寿命长短有着重要影响,除此之外,混合料的性能也是主要的影响因素.试件疲劳寿命的相对差值随应变水平的提高不断缩小.在此应力水平作用下,层间黏结效果对疲劳寿命的影响比混合料性能的应更显著.因此在试验进行中,层间黏结效果对于疲劳寿命来说影响更大.同时试验结果表明,疲劳寿命会随着黏层效果的提升而延长.因此,选用 $\varepsilon=0.0004$ 的应变水平评价层间黏结效果.复合梁的变形程度随着应变水平的提高不断增加,疲劳寿命受到混合料性能的影响逐渐明显.因此,在较大的应变水平作用下,不同黏层的复合梁之间的疲劳寿命差值减小.

3.2 应变水平与疲劳寿命的关系

疲劳特性是沥青混合料材料抵抗不间断的应力、应变或应力、应变同时作用的能力特性,无论采用何种试验方式,都会采用疲劳寿命表征疲劳特性.将控制应力或应变的条件下试件达到失效标准后荷载的作用次数作为表征疲劳寿命的指标,可以只从数值上对疲劳特性进行评价,简单清晰,但是缺点在于独立的数据无法综合的归纳疲劳性能与材料性能之间的影响关系,因此笔者通过数学方法

将其归纳为疲劳模型,可以帮助研究疲劳寿命影响规律.通过数据归纳,可得到疲劳寿命与材料性能之间影响关系的关系式:

$$\lg N_f = k - n \lg \varepsilon .$$

(1)

式中: N_f 为临界破坏点荷载次数; ε 为梁 1/3 处最大挠度应变; k 为回归常数.

根据式 (1) 对试验结果进行回归处理,其中, $Y = \lg N_f$,令 $X = \lg \varepsilon$,可得到疲劳寿命与应变水平的方程如表 7 所示.根据回归方程可以直观地比较各种材料制成的试件对应变水平的敏感程度.从表 7 中可得,各疲劳方程的斜率值没有较大的差异,故应变水平对各类黏结材料影响较小.即该试验条件下,应变水平对 SBS 改性沥青黏层复合梁影响最大.

表 7 疲劳寿命与应变水平的回归方程

Table 7 Regression equation of fatigue life and strain level

黏层种类	疲劳方程
橡胶 SBS 复合改性沥青	$Y = -2.380\ 8X + 11.016$
橡胶沥青	$Y = -2.363\ 4X + 10.903$
SBS 改性沥青	$Y = -2.403\ 2X + 10.990$
SBS 改性乳化沥青	$Y = -2.385\ 1X + 10.857$
普通乳化沥青	$Y = -2.284\ 3X + 10.527$

3.3 结构层老化对疲劳寿命的影响

沥青路面在使用过程中的结构层老化也是对沥青路面疲劳性能的影响因素之一,为了研究结构层老化对疲劳寿命的影响,采用整体老化的方式准备试验试件.试验结果如表 8 所示.

表 8 老化对试件疲劳寿命的影响

Table 8 Effect of aging on fatigue life of composite beams

黏层种类	疲劳寿命/次	
	未老化	长期老化
橡胶 SBS 复合改性沥青	31 021	5 731
橡胶沥青	24 931	3 694
SBS 改性沥青	27 310	4 498
SBS 改性乳化沥青	22 187	3 698
普通乳化沥青	17 931	2 895

由表 8 可以看出,各类沥青材料试件经长期老化之后疲劳寿命衰减严重.经过长期老化后使用橡胶 SBS 复合改性沥青作为黏

层油的试件相较于其他材料,依旧是疲劳寿命最高的,比最低的高出 98% 以上。

3.4 黏层油最佳用量的确定

工程中常采用传统的剪切及拉拔试验粗略得出黏层油的最佳用量,但是该方法的参考因素不全面,可能会出现较大误差,笔者建立复合梁疲劳寿命与黏层油的用量之间的影响关系,可以从趋势上选择黏层油的最佳用量,还可与试验结论相结合,综合考虑最佳黏层油用量。

以橡胶 SBS 复合改性沥青为例,试验确定 4 组黏层油用量为 0.6 kg/m²、1.2 kg/m²、1.8 kg/m²、2.4 kg/m²,然后制作复合梁疲劳试件,应变水平 $\varepsilon = 0.0004$,加载频率为 10 Hz,试验所得疲劳寿命与黏层油用量的关系如图 3 所示。

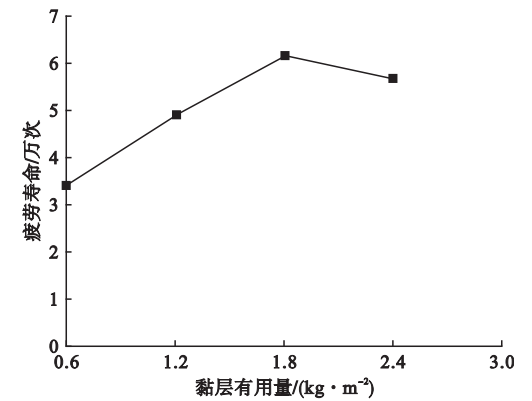


图 3 疲劳寿命与黏层油用量的关系
Fig. 3 Relationship between fatigue life and the amount of tack coat

由图 3 可知,疲劳寿命呈现先增大后减小的变化趋势。当黏层油用量较少时,疲劳寿命较低,较少的黏层油用量不能提供足够的层间黏结效果;当黏层油用量过多时,疲劳寿命呈下降趋势,黏层油过厚,层间强度不足。试验数据表明,黏层油用量为 1.8 kg/m² 时,层间黏结疲劳寿命最佳。由试验数据分析结果,归纳得到相关表达式为

$$\lg N_f = A + B_1 X + B_2 X^2. \quad (2)$$

式中: N_f 为疲劳寿命; X 橡胶 SBS 复合改性沥青黏层用量; A 、 B_1 、 B_2 为回归系数。

按式(2)进行数值回归分析,定义 $Y = \lg N_f$, 对式(2)进行多项式回归,结果如图 4 所示。

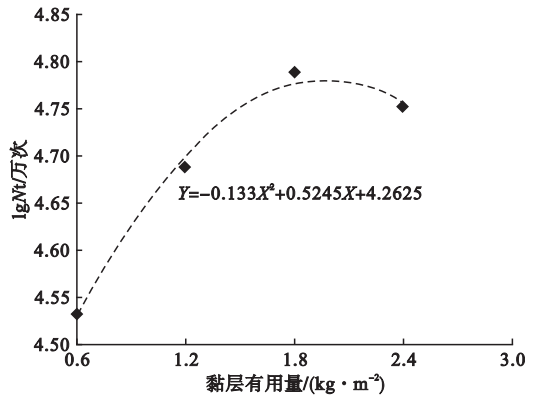


图 4 回归分析
Fig. 4 Regression analysis

由图 4 可知,黏层油最佳用量为 $Y_1 = 1.98 \text{ kg/m}^2$;在该用量下进行传统的剪切、拉拔试验,得出结果最大抗剪强度为 1.65 MPa,最大拉拔强度为 0.83 MPa,两者均满足工程使用要求,因此,笔者所提供的方法,在考虑面层复合梁疲劳性能的基础上,能够兼顾层间材料的抗剪切、拉拔性能,是一种较为全面、实用的方法。

4 结 论

(1)使用同一种黏层油的复合梁的疲劳寿命随应变的提高而减小。复合梁疲劳寿命随黏层用量的增加呈现先增大后减小的趋势,在 3 种不同应变水平下,选用橡胶 SBS 复合改性沥青的试件疲劳性能最佳。

(2)经过长期老化后使用橡胶 SBS 复合改性沥青作为黏层油的试件相较于其他材料疲劳性能最佳。

(3)层间黏结效果的优劣对沥青路面结构层的疲劳寿命影响较大,两者具有良好的相关性。笔者所提供的试验方法在考虑面层复合梁疲劳性能的基础上,能够兼顾层间材料的抗剪切、拉拔性能,是一种较为全面、实用的方法。

参考文献

- [1] 韩志宇. 半刚性基层沥青路面层间结合措施试验与分析评价[D]. 北京: 北京建筑大学, 2015.
(HAN Zhiyu. Test and evaluation on treatment measures of interlayers in semirigid asphalt pavement [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2015.)
- [2] 孙艳霞. 透层、粘层、封层的作用及施工工艺要求[J]. 公路, 2006(12): 197-200.
(SUN Yanxia. The role of permeable layer, adhesive layer and sealing layer and construction process requirements [J]. Highway, 2006(12): 197-200.)
- [3] 刘红坡, 艾长发, RAHMAN Ali, 等. 基于切-拉拔试验的沥青路面层间黏结性能研究[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2017, 37(3): 16-23.
(LIU Hongpo, AI Changfa, RAHMAN Ali, et al. Study on interlayer bonding properties of asphalt pavement based on cut-pull test [J]. Journal of Chang'an university (natural science edition), 2017, 37(3): 16-23.)
- [4] ROMANOSCHI S A, METCALF J B. The characterization of pavement layer interfaces [C]. Japan: International Conference on Asphalt Pavements, 2002.
- [5] 柴林林. 再生水稳基层路面反射裂缝防治的层间结合技术分析[与评价[D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.
(CHAI Linlin. Analysis and evaluation on reflection cracking prevention of interlayer for recycled cement stabilized course [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2017.)
- [6] 艾长发, 邱延峻, 毛成, 等. 考虑层间状态的沥青路面温度与荷载耦合行为分析[J]. 土木工程学报, 2007(12): 99-104.
(AI Changfa, QIU Yanjun, MAO Cheng, et al. Simulation of the temperature and load coupling effect on asphalt pavement considering interlayer conditions [J]. China civil engineering journal, 2007(12): 99-104.)
- [7] YETKIN Y, ANDRE D, ARMAGAN K. Development of a laboratory test procedure to evaluate tack coat performance [J]. Turkish journal of engineering and environmental sciences, 2005, 29(4): 195-205.
- [8] KRUNTCEVA M R, COLLOP A C. Properties of asphalt concrete layer interfaces [J]. Journal of materials in civil engineering, 2006, 18(3): 467-471.
- [9] 刘红坡. 层间接触对半刚性沥青路面力学响应的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
(LIU Hongpo. Analysis on the mechanical response of semirigid base pavement with contact model [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.)
- [10] 张志勇. 沥青路面夹层抗裂及黏结性能研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007.
(ZHANG Zhiyong. Study on crack resistance and bonding performance of asphalt pavement interlayer [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2007.)
- [11] 关昌余, 王哲人, 郭大志. 路面结构层间结合状态的研究[J]. 中国公路学报, 1989(1): 70-80.
(GUAN Changyu, WANG Zheren, GUO Dazhi. Research on the bonding state between pavement structures [J]. China journal of highway and transport, 1989(1): 70-80.)
- [12] 刘细军. 沥青混合料及路面层间抗剪特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
(LIU Xijun. Study on the shear resistance between asphalt mixture and pavement layer [D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.)
- [13] 刘靖, 张劲泉, 郝庚任. 热沥青在不同界面间的层间粘结性能分析[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(3): 34-39.
(LIU Jing, ZHANG Jinqian, HAO Gengren. Analysis of interlayer bonding performance of hot asphalt in different interfaces [J]. Journal of east China jiaotong university, 2016, 33(3): 34-39.)
- [14] 杨大田, 李聪. 级配碎石基层沥青混凝土面层的层间粘结行为[J]. 大连交通大学学报, 2016, 37(2): 61-64.
(YANG Datian, LI Cong. Interlayer bonding behavior of graded crushed stone base asphalt concrete surface layer [J]. Journal of Dalian jiaotong university, 2016, 37(2): 61-64.)
- [15] 康健. 沥青路面超薄磨耗层层间粘结强度试验分析[J]. 交通科技, 2016(2): 115-118.
(KANG Jian. Analysis of interlayer adhesive strength tests of ultra-thin wearing course asphalt pavement [J]. Transportation science & technology, 2016(2): 115-118.)
- [16] 郑洁. 层间粘结状态对沥青路面层间性能的影响研究[J]. 国防交通工程与技术, 2014, 12(4): 27-30.
(ZHENG Jie. On the influence of interlayer bonding state on the interlayer performance of asphalt pavement [J]. Journal of national defense transportation engineering and technology, 2014, 12(4): 27-30.)
- [17] 张治强, 邹静蓉, 李涛, 等. 湖南干线公路沥青路面基层层间粘结性能的研究[J]. 路基工程, 2017(3): 107-112, 169.
(ZHANG Zhiqiang, ZOU Jingrong, LI Tao, et al. Study on bonding performance of asphalt pavement base of Hunan's trunk highway [J]. Subgrade engineering, 2017(3): 107-112, 169.)
- [18] 严秋荣, 孙瑞, 孔令云, 等. 基于现场数据混凝土桥面粗糙度与层间粘结强度相关性分析[J]. 中外公路, 2016, 36(6): 63-65.
(YAN Qiurong, SUN Rui, KONG Lingyun, et al. Correlation analysis of concrete bridge deck roughness and interlayer bond strength based on field data [J]. Journal of China and foreign highway, 2016, 36(6): 63-65.)

(责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)