

# 水泥混凝土路面错台分级方法

唐伯明<sup>1</sup>, 马国民<sup>1,2</sup>, 谈至明<sup>3</sup>

(1. 重庆交通大学 山区道路建设与维护技术教育部工程研究中心, 重庆 400074;

2. 广西交通投资集团有限公司, 广西 南宁 530028; 3. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 结合重庆市水泥混凝土路面错台病害评价标准确定实例提出了一种基于路面行驶质量水平的错台量分级方法. 首先选择2个典型的水泥混凝土路段, 详细检测选定路段的错台量和局部平整度值(LRI); 通过数值分析建立错台量与局部平整度指标之间的相关关系模型; 最终由局部平整度与行驶质量水平间的关系建立基于行驶质量水平的错台量分级标准.

**关键词:** 道路工程; 水泥混凝土路面; 错台; 局部平整度; 评价标准

**中图分类号:** U416.216

**文献标识码:** A

## Faulting Evaluation Criteria of Cement Concrete Pavement

TANG Boming<sup>1</sup>, MA Guomin<sup>1,2</sup>, TAN Zhiming<sup>3</sup>

(1. Laboratory of Construction and Maintenance of Mountain Road, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Guangxi Communications Investment Group Co., Ltd., Nanning 530028, China; 3. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Based on a case study of the joint faulting evaluation criteria in Chongqing, a new method was proposed for rating the joint faulting with a consideration of the level of ride quality. Two representative cement concrete pavement sections were chosen, then the joint faulting values and localized roughness index (LRI) of those pavement sections were detected. The relationship between joint faulting and LRI was revealed by the regression analysis. Then the joint faulting evaluation criteria were obtained based on the relationship between localized roughness and ride quality.

**Key words:** road engineering; cement concrete pavement; joint faulting; localized roughness index; evaluation criteria

错台是水泥混凝土路面最主要的病害之一, 其存在会显著降低路面使用性能、加速路面结构性破坏、增加道路使用成本等<sup>[1-2]</sup>. 因此有必要对水泥混凝土路面错台进行合理的分级, 进而提出每个错台水平对应的处治措施. 但是目前国内外已有错台量的评价标准具有较大的主观性和差异性, 如表1.

表1 部分区域和地区的错台量分级标准

Tab.1 Regional evaluation criteria for joint faulting

区域/部门	mm		
	小	中	大
华盛顿州交通局	3~6	6~12	>12
DRT <sup>TM</sup> 系统	<6	6~13	>13
大都会交通运输委员会(MTC)	10~13	13~25	>25
密歇根交通委员会	<6	6~19	>19

因此有必要根据不同地区水泥混凝土路面实际结构和使用环境等制定相应的分级标准. 通过检测重庆地区2段典型路段的错台量和局部平整度指标建立错台量和局部平整度的相关关系模型, 并结合局部平整度指标的分级标准确定出错台量的分级标准. 验证结果表明所确定的标准符合实际路面情况. 该方法简单易行, 适用于我国实际情况.

## 1 局部平整度指标与错台量

### 1.1 局部平整度指标

路面平整度是路面使用性能评价的一个重要指标, 它直接反映了路面行驶的舒适性及安全性, 是一个涉及人、车、路三方面的指标. 但是目前国内外普遍采用的国际平整度指标(IRI)算法中仅利用路面波中波长大于0.39 m、小于98.40 m之间的部分来计算IRI<sup>[3-8]</sup>, 而类似于错台、桥头搭板的跳动及坑槽等病害对应的路面波则在滤波过程中被滤除, 所以用国际平整度指标来评价这些病害是不合理的. 限

于国际平整度指标本身存在的局限性,国内外学者尝试着去寻找能够有效评价该类病害的方法和指标, Louisiana 州的 Mark Martinez 等的研究表明可以用局部平整度来对该类病害进行评价并用局部平整度指标(the local roughness index)评价该类病害引起的不平度<sup>[9]</sup>.即用加速度传感器检测选定路段的垂直加速度信号随行驶里程的变化谱,然后确定各个错台在该谱中的具体位置,最后截取每个错台位置对应的 1.5m 范围内的加速度信号进行方差的平方计算,方差平方计算公式如式(1)所示.每个位置对应的方差平方计算结果即为该位置处错台

量对应的局部平整度指标(LRI).

$$L_{RI} = \left[ \left( \sum (x - \bar{x})^2 \right) / (N - 1) \right]^2 \quad (1)$$

式中: $L_{RI}$ 为局部平整度, $m^4 \cdot s^{-8}$ ;  $x$ 为每个采样点的加速度值, $m \cdot s^{-2}$ ;  $\bar{x}$ 为截取区间内加速度信号的样本均值  $m \cdot s^{-2}$ ;  $N$ 为参与计算的加速度值个数.

Louisiana 州交通局通过评分小组实际乘坐舒适感得出的局部平整度分级标准如表 2 所示.表 2 的分级标准是评分小组通过乘坐车辆驶过实际路面时的舒适感来建立的,所以该标准能与路面的实际行驶性能相吻合.

表 2 局部平整度分级标准

Tab.2 Evaluation criteria of the LRI

( $m^4 \cdot s^{-8}$ )

舒适	不舒适	能忍受	不能忍受	不安全
0~1 035.7	1 035.7~5 178.6	5 178.6~25 893.0	25 893.0~129 465.0	>129 465.0

用式(1)计算的局部平整度指标的量纲是随机变量  $x$  量纲的 4 次方,物理意义不明确,方次较高且较为复杂.为便于实际应用,有必要对其进行简化.由概率论与数理统计学中知方差描述的是随机变量在其数学期望附近的分散程度,其量纲是随机变量量纲的平方,不便于实际应用,所以引入标准差的概念,即方差的算术平方根.方差和标准差的计算原理是一致的,因此采用标准差作为局部平整度指标来进行研究,新的局部平整度公式如式(2):

$$L_{RI} = \sqrt{\left[ \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right] \cdot (N - 1)^{-1}} \quad (2)$$

式中: $L_{RI}$ 为修整后的局部平整度指标, $m \cdot s^{-2}$ ;  $x_i$ 为每个采样点的加速度值, $m \cdot s^{-2}$ .

结合式(2)和国内路面使用性能分级指标的表述习惯,将表 2 中的局部平整度进行转换后得到的局部平整度分级标准如表 3 所示.

表 3 转换后的局部平整度分级标准

Tab.3 The grading standards for local roughness index after transformation

( $m \cdot s^{-2}$ )

优	良	中	次	差
<6	6~9	9~13	13~19	>19

## 1.2 错台量

水泥混凝土路面相邻板间的相对高差定义为错台量.当车辆的驶入板比驶出板高时规定为正,反之则为负<sup>[10]</sup>.如图 1.

不同国家和地区错台病害的检测方法不一致.典型的检测方法有 2 种:一种是手工法,即用手工检测的方法检测错台量,例如美国 Georgia DOT 和 LTPP(long-term pavement performance program)都

用手工错台仪(the georgia faultmeter)来检测错台量;另一种是利用错台的存在会显著影响路面平整度的特性,通过检测平整度指标(IRI)来间接测试错台量.不同规范和指南中对错台测量位置的规定也不一致,例如 AASHTO(American Association of State Highway and Transportation)规定错台的检测位置是接缝前后纵向距离为 300 mm 的两点的高差;而 LTPP 指南的检测位置是距离行车道边线 300~800 mm 范围的接缝上某一位置处混凝土板的相对高差<sup>[11]</sup>.

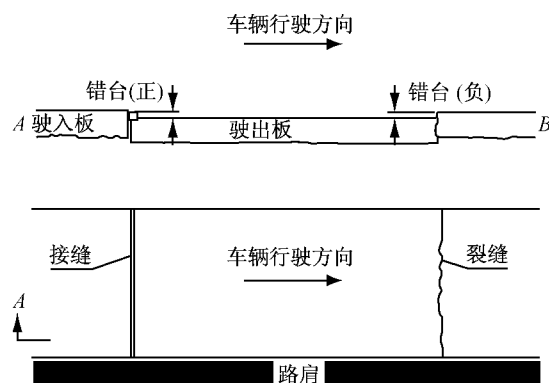


图 1 错台量正负的规定

Fig. 1 The definition of the positive and negative for faulting values

## 2 错台量评价标准确定方法及实例

在重庆地区选择典型路段测量局部平整度指标和错台量,建立二者的相关关系;再通过局部平整度与路面服务水平之间的关系推导出错台量与路面服

务水平之间的关系,从而建立符合各地实际情况的错台量分级标准。

## 2.1 检测路段简介

省道 S104 重庆市巴南区南彭南湖桥(K29+300)至碑垭(K47+900),全长 18.6 km,路基宽度 8.50 m,路面宽度 7.00 m,路肩宽度  $2 \times 0.75$  m。荷载等级为公路-II,设计行车速度为  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,设计标准轴载为 BZZ-100,交通等级为特重交通。在该路段上选择 2 段长度都为 1 km 的路段进行检测,第 1 段是 K43+000~K44+000,标记为 1 号测试路段,该段上错台病害较严重且存在错台的位置也较为集中;第 2 段是 K46+000~K47+000,标记为 2 号测试路段,该路段除了错台病害以外,断板、唧泥等病害也较为普遍。

## 2.2 错台量与局部平整度数据采集和处理

### 2.2.1 测试路段标记和路面病害调研

用油漆在测试路段的每块板和起终点上做标记,为了能使后续工作重复利用该标记,所作的标记应远离轮迹带且要准确、清晰和规范,如图 2。



图2 测试路段起终点的标记

Fig.2 Marking the starting points and the end points for the represent sections

影响水泥混凝土路面平整度的因素除了错台以外,还有坑槽、麻面以及接缝的碎裂等,所以在分析错台量对局部平整度的影响过程中,完全剔除其他因素对局部平整度的影响是得出准确可靠的结论的重要条件之一,所以准确、客观地对路面上各种病害进行调研就显得尤为重要。本研究在对路面病害进行调研时,考虑到选定的测试路段总长度较短,因此用数码相机连续拍摄每块板的路面表面状况,同时用钢卷尺准确测量每块板的长度和各种病害的大小。

### 2.2.2 错台量的检测

数显胎纹仪具有测试精度高( $0.001 \text{ mm}$ )、测试方便、本身体积和质量小、不用目读以及可以离开测试点后再读数等优点,所以首创性的应用量程为 25 cm 的数显胎纹仪检测错台量。经结合测试路段现场

车辆行驶的轮迹分布情况,选择的测量位置分别为距离板边 50 cm 和 170 cm 两点 and 离路中心 50 cm 的一点,测试点平面分布如图 3 所示。



图3 错台量测试点位置平面分布(单位:cm)

Fig.3 The test positions for the faulting values(units:cm)

由于篇幅限制,只列出 1 号测试路段的部分错台量检测数据,如表 4 所示。

表4 1号测试路段的部分错台量

Tab.4 Parts of joint faulting for section 1 test

序号	板号位置		错台量/mm		
	驶入板	驶出板	测点 1	测点 2	测点 3
1	10	11	2.2	4.0	0
2	13	14	0	4.4	0
3	14	15	-7.5	-4.8	0
4	17	18	2.4	6.7	0
5	18	19	2.0	0	0
6	20	21	3.8	6.4	0
7	21	22	8.9	5.0	0
8	32	33	4.5	3.8	2.8
9	34	35	4.7	4.3	3.5
10	35	36	0	8.7	5.6

### 2.2.3 局部平整度的检测

用 ITS 智能交通检测车检测垂直加速度随行驶里程变化的数据,该检测车的主要组成结构如图 4 所示。该检测车主要由 OES 非接触式车速仪、cw98 存储式智能五轮仪、加速度传感器(KISTLER)以及智能模块数据采集系统(CRONOS PL)等测试元件组装而成。该检测车最大优点是各个传感器能同步检测,测得的数据也能同步输出。为了尽可能提高检测信号的分辨率,采集信号的时间间隔选用 1 ms。另外,选用 30, 40, 50 及  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  四个速度对每个测试路段进行检测,每个速度重复检测一次。

为了使检测得的数据具有可移植性和避免车辆悬挂系统的性能衰减给研究结果带来的影响,将加速度传感器安装在悬挂系统以下的车辆前轴上。也为了准确定位测试路段的起终点,进而易于找到错台位置对应的加速度信号突变位置,检测时在测试路段的起点和终点处各放一块高为 30cm 的木板。每个路段以不同车速或同一车速反复进行检测时车辆

的行驶轨迹应尽可能重合。

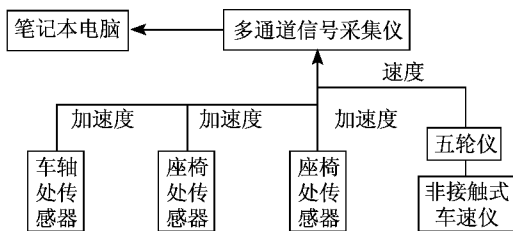


图 4 检测车的主要组成部分

Fig.4 Main testing components of the inspected vans

## 2.2.4 数据处理

用 IMC 公司开发的 Famos 软件处理加速度数据。某速度条件下其中一条测试路段的加速度信号随行驶距离的分布如图 5 所示,将测得的路面波进行滤波,以剔除路面波中的高频成分,从而使加速度信号的突变情况更为明显,在 FAMOS 中可选用 SMO3 命令直接实现滤波过程。

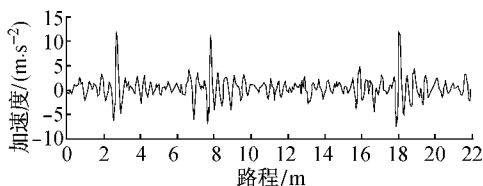


图 5 加速度随路程的变化

Fig.5 Change of acceleration with the mileage

为了使得到的结果更为可靠,从测得的错台数据中排除接缝附近具有其他病害的路面板,经筛选后得到满足条件的接缝有 28 个。选定了有待分析的接缝后可以进行局部平整度的计算,具体计算方法:首先确定每个错台在加速度信号随里程变化谱中的具体位置,然后截取该位置对应的 1.5 m 长度范围内的加速度信号数据进行局部平整度指标计算,由于篇幅限制只列出部分计算结果,如表 5。

## 2.3 建立错台量评价标准

### 2.3.1 建立错台量与局部平整度相关关系模型

从表 5 可见,错台量与局部平整度之间有很好的相关关系,在同一速度条件下,错台量越大,局部平整度越大,如图 6a。车辆速度对平整度的影响也非常明显,对于同一错台量而言,当车辆行驶速度越大时局部平整度也越大。如错台量为 6.7 mm 时局部平整度随车辆行驶速度的变化如图 6b。

从图 6b 可以得知,车辆的行驶速度与局部平整度具有明显的相关性,但错台量是一客观存在的量,其评价指标的大小不应随车速变化而变化,因此应该对该指标进行标准化。采用的方法是将存在错台量的道路的设计速度代入表 5 中每个错台量对应的

回归方程中,用该速度对应的局部平整度指标来评价错台量引起的平整度<sup>[9]</sup>。例如, S104 的设计速度为  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , 因此检测车辆用  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的检测速度行驶是合理可靠的,所以将该设计速度代入表 5 中每个错台量对应的回归方程中进行标准化。例如,当错台量为 5.5 mm 时对应的回归方程为  $y = 1.374 5e^{0.029 1x}$ , 当  $x = 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时,得到的局部平整度指标为  $7.85 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。同理,将  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  代入各个错台量对应的回归模型后得到 28 个接缝对应的局部平整度指标。

表 5 局部平整度计算结果

Tab.5 The results of the localized roughness

错台量/ mm	测试速度/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	局部平整度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	指数回归	$R^2$
4.6	30	3.85	$y = 1.134 6e^{0.035 6x}$	0.853 6
	30	4.15		
	40	4.99		
	40	6.38		
	50	6.73		
	60	7.56		
6.5	30	4.02	$y = 1.985 9e^{0.025 7x}$	0.810 8
	30	4.00		
	40	7.68		
	50	7.74		
	60	8.83		
5.5	30	3.45	$y = 1.374 5e^{0.029 1x}$	0.978 7
	30	3.22		
	50	5.41		
	60	8.30		
6.7	30	3.16	$y = 1.134 6e^{0.035 6x}$	0.968 9
	30	3.46		
	40	4.24		
	40	5.19		
	60	9.61		

注:  $y$  为局部平整度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ;  $x$  为车辆行驶速度,  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $R$  为相关系数。

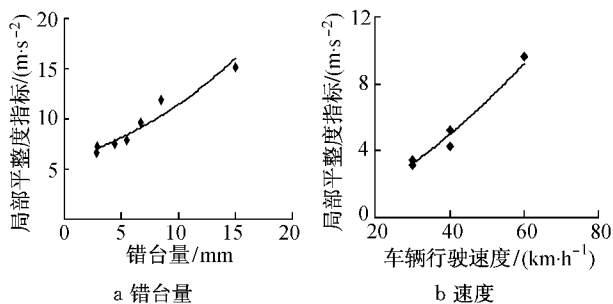


图 6 局部平整度随错台量和速度的变化

Fig.6 The LRI changes with the slab faulting and the riding speed

将错台量和对应的局部平整度数据进行回归分析,结果如图 7 所示,得到的回归模型如式(3)。

$$y = 3.266 f^{0.604} \quad n = 28, R^2 = 0.84 \quad (3)$$

式中:  $f$  为错台量, mm;  $n$  为错台量个数. 相关系数  $R$  能够反映 2 个变量间的相关关系, 当  $|R| > 0.8$  时, 2 个变量间有很好的相关关系; 当  $|R| < 0.3$  时, 相关关系不好<sup>[12]</sup>. 式(3)表明错台量与局部平整度之间相关系数  $R > 0.8$ , 所以二者之间具有很好的相关关系.

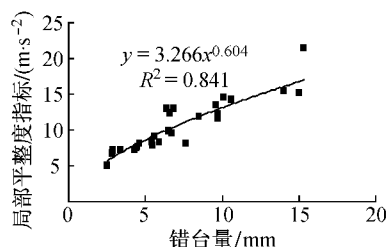


图7 错台量与局部平整度指标的相关关系

Fig. 7 Correlation of joint faulting and local roughness index

### 2.3.2 模型的验证

为了验证模型式(3)的有效性, 选择 2 个试验路段中测点 3 处错台量对应的加速度传感器测得的加速度信号进行分析, 从 2 个测试路段上测点 3 处的错台量值中选择满足条件的接缝, 并计算检测速度为  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时每个测点的局部平整度指标值, 然后将计算得的局部平整度值代入模型式(3)中, 进而反算出对应的错台量值(理论错台量), 最后将通过局部平整度指标反算得的理论错台量与实测得的错台量进行求差比较, 具体数值如表 6 所示.

表6 理论与实测错台量

Tab.6 The theoretical and test faulting values

编号	局部平整度指标 $L_{RI}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	理论错台量/ mm	实际错台量/ mm	理论与设计 偏差值/mm
1	7.30	3.79	2.80	0.99
2	7.22	3.72	3.50	0.22
3	4.29	1.57	2.00	-0.43
4	7.81	4.23	4.80	-0.57
5	7.92	4.33	5.10	-0.77
6	7.98	4.39	5.20	-0.81
7	7.66	4.10	3.90	0.20
8	7.51	3.97	3.00	0.97
9	4.69	1.82	2.50	-0.68
10	11.56	8.11	8.60	-0.49
11	11.97	8.58	9.00	-0.42
12	14.17	11.35	9.80	1.55
13	6.70	3.29	2.80	0.49
14	4.07	1.44	1.70	-0.26
15	7.17	3.67	2.90	0.77

从表 6 中可以看出, 除了编号 12 处的理论错台量与实际错台量的偏差大于 1mm 以外, 其他编号处的理论错台量与实际测得的错台量的偏差都在

1mm 以内. 目前常用错台量检测仪的测量误差一般也在 1mm 左右, 所以式(3)是有效的.

### 2.4 建立错台量的分级标准

结合表 3 和式(3)进行计算后可得到所选典型路段的错台量分级标准. 如表 7 所示.

表7 错台量与路面服务水平间的关系

Tab.7 The relationship between the joint faulting values and ride quality

等级	错台量/mm	等级	错台量/mm
优	0~3	次	11~19
良	3~5	差	>20
中	6~10		

在表 7 的错台量分级标准确定过程中, 只考虑了行驶质量水平, 没有考虑道路等级、道路的养护资金、养护水平等其他因素, 而且所采集的数据样本数量不是很多. 各地在采用这种方法时, 可进一步细化考虑, 对整个路网内不同等级的道路进行分组, 检测得到各种等级道路上的错台量和局部平整度指标, 然后按同样的方法建立与实际道路状况相吻合的错台量分级标准.

## 3 结语

结合重庆市水泥混凝土路面错台病害评价标准确定实例, 提出了一种基于路面行驶质量水平的错台量分级方法: 选择典型的水泥混凝土路面, 检测并计算出各测试路段的错台量和局部平整度, 然后通过回归分析建立错台量与局部平整度之间的相关关系模型, 最终由局部平整度与行驶质量水平的关系建立基于行驶质量水平的错台量分级标准. 由于这种方法是根据实际路面调查数据而建立的评价标准, 所以较符合实际情况. 这种方法简单易行, 对其他地区错台量评价指标的制定具有较好的借鉴意义. 但是本次研究所用的数据量有限, 且研究的路段只局限于重庆市内典型的二级公路路段, 至于采用其他地区和其他等级的公路上采集的数据进行分析时是否也能得出同样的结论, 在这方面有必要做进一步的研究.

### 参考文献:

- [1] 赵茂才, 张怀志, 高伟. 旧水泥混凝土路面错台对沥青加铺层产生反射裂缝的影响分析[J]. 公路交通科技, 2008, 25(3): 8. ZHAO Maocai, ZHANG Huazhi, GAO Wei. Analysis on reflection crack of faulting in ac overlay over deteriorated concrete

- pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(3): 8.
- [2] 杨庆国, 易志坚, 刘占芳. 水泥混凝土路面错台机理研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2008, 27(5): 712.  
YANG Qingguo, YI Zhijian, LIU Zhanfang. Faulting mechanism of cement concrete slab[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2008, 27(5): 712.
- [3] 周晓青, 孙斌, 陈长, 等. 路面行驶质量水平评价标准方法研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(2): 213.  
ZHOU Xiaqing, SUN Bin, CHEN Chang, et al. Method research on evaluation standard of pavement ride quality[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(2): 213.
- [4] Janoff Michael S. Pavement roughness and rideability[R]. [s. l.]. National Cooperative Highway Research Program, 1985.
- [5] Janoff M S. Pavement roughness and rideability field evaluation [R]. [s. l.]: National Cooperative Highway Research Program, 1988.
- [6] Sayers M W. On the calculation of international roughness index from longitudinal road profile [J]. Transportation Research Record, 1995, 1501: 1.
- [7] Gillespie D Thomas, Sayers W Michael, Segel Leonard. Calibration of response-type road roughness measuring systems [R]. Washington D C: National Cooperative Highway Research Program, 1980.
- [8] Sayers W Michael, Gillespie D Thomas, Paterson D William. Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements[R]. [s. l.]: World Bank Technical, 1986.
- [9] Mark Martinez, Zhang Zhongjie. A new approach to indexing localized roughness of pavement [C/CD] // TRB 2010 Annual Meeting. Washinton D C: [s. n.], 2010.
- [10] Olga Selezneva, Jiang Jane, Tayabji D Shiraz. Preliminary evaluation and analysis of LTPP faulting data-final report[R]. [s. l.]: U. S. Dept of Transportation, Turner-Fairbank Highway Research Center, 2000.
- [11] Miller S John, Bellinger Y William. Distress identification manual for the long-term pavement performance program[R]. [s. l.]: Federal Highway Administration.
- [12] XUE Wei. SPSS statistical analysis method and its application [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.

#### (上接第 61 页)

的 1.5 倍。可见,在防水粘结层的拉拔和剪切破坏中,刹车和超载的影响都是较为明显的。

(3)考虑动荷载作用时,拉应力峰值出现在移动荷载接近于墩顶上方对应铺装表面;剪应力峰值在行车荷载处于跨中时达到最大值。常温条件下考虑动载影响的拉应力峰值为 0.09 MPa,是考虑刹车荷载作用静载计算结果的 1.4 倍;而剪应力峰值增幅达 20%。由桥面不平度引起的随机动荷载对防水粘结层的作用力较为明显,但影响程度小于刹车超载作用。

(4)SBS 改性沥青、橡胶沥青、柔性防水涂料及 SBS 改性乳化沥青等几种材料的防水粘结层拉拔强度均满足理论分析结果要求,常温条件下橡胶沥青的安全系数达到 11.9,而高温条件下为 8.5;前 3 种防水粘结层的剪切强度均达到理论分析结果的指标要求,常温条件下橡胶沥青的安全系数达到 2.39,而高温条件下仅 1.36,说明高温条件下防水粘结层材料容易出现剪切破坏。结合理论与试验分析结果,推荐 SBS 改性沥青和橡胶沥青为水泥混凝土桥防水粘结层材料的首选。

#### 参考文献:

- [1] National Cooperative Highway Research Program. Waterproof membranes for protection of concrete bridge decks-labraroty

phase [R]. Washington D C: National Research Council, 1976.

- [2] Manning D G. Waterproofing membranes for concrete bridge decks[M]. Washington D C: National Academy Press, 1995.
- [3] Transport Research Laboratory. The adhesion of bridge deck waterproofing materials [R]. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory, 1992.
- [4] 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.  
HUANG Wei. Theory and method of deck paving design for long-span bridges[M]. Beijing: China Constr Ind Press, 2006.
- [5] 王光辉, 韦成龙, 李斌, 等. 大跨度桥梁桥面铺装温度效应仿真分析[J]. 湖南理工学院学报: 自然科学版, 2007, 20(4): 83.  
WANG Guanghui, WEI Chenglong, LI Bin, et al. The emulation analysis to the temperature effect of the bridge deck pavement of long-span bridge [J]. Journal of Hunan Institute of Science and Technology : Natural Sciences, 2007, 20(4): 83.
- [6] Xu Qinwu, Zhou Qinghua, Medina Cesar. Experimental and numerical analysis of a waterproofing adhesive layer used on concrete-bridge decks [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009, 29(5): 525.
- [7] XU Qinwu, SUN Zengzhi, WANG Hu. Laboratory Testing Material Property and FE modeling structural response of PAM-modified concrete overlay on bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2009, 14(1): 26.
- [8] 罗剑. 钢混结构混合桥桥面铺装体系受力分析——桃天门大桥钢桥面铺装力学分析[D]. 南京: 东南大学交通学院, 2004.  
LUO Jian. Research on mechanical properties of combined bridge deck surfacing-research on mechanical properties of Taoyameng Bridge deck surfacing [D]. Nanjin: School of Transportation, Southeast University, 2004.