

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2017.02.025

# 考虑冲刷脱空的水泥路面接缝错台预估研究<sup>①</sup>

李晶晶<sup>1,2</sup>, 张 擎<sup>1</sup>

1. 长安大学 公路学院, 西安 710064; 2. 陕西交通职业技术学院 公路工程系, 西安 710018

**摘要:** 针对目前水泥混凝土路面错台预估存在的不足, 通过现场调查发现无论设置传力杆与否, 错台量与脱空高度均存在良好的相关关系, 并在试验室内修筑基层脱空的水泥路面结构, 分析行车荷载与冲刷量的关系, 试验表明: 二灰稳定碎石基层和水泥稳定碎石基层的冲刷量均随着轴重的增加呈指数增大. 最后建立两种不同基层类型的考虑冲刷脱空的水泥混凝土路面接缝错台预估模型, 并通过柳南路对不设传力杆的二灰稳定碎石基层错台模型进行验证, 结果表明模型具有很好的应用性.

**关键词:** 道路工程; 水泥混凝土路面; 错台; 冲刷脱空; 模拟试验

**中图分类号:** U416.216

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9868(2017)02-0159-06

错台是影响水泥路面服务能力的主要危害之一, 如果不及时处治, 随着车辆荷载的反复冲击作用, 会导致整个路面板的开裂, 降低行车舒适性和安全性. 国内外许多道路工作者对此进行了大量的研究工作<sup>[1-5]</sup>, AASHTO 2002 文献中针对 SHRP P-020、RPPR、ACPA、NAPCOM、LTPP 和 PaveSpec 3.0 接缝错台预估模型进行比较分析, 发现错台的很大诱因来自于板底冲刷脱空, 尤其是我国半刚性基层普遍使用的情况下, 错台的形成更是如此<sup>[6-8]</sup>, 但我国目前尚未建立起错台预估模型, 仅对脱空形成机理和分级标准进行了研究. 因此, 有必要对考虑冲刷脱空的水泥路面接缝错台进行预估研究, 建立错台模型, 预测错台发展变化规律, 对水泥混凝土路面结构设计和制订路面养护对策具有重要指导意义.

## 1 数据采集与分析

### 1.1 错台量数据采集及处理

错台量是指水泥混凝土路面相邻接缝或裂缝间的相对高差值<sup>[3]</sup>. 路面平整度随着错台量的增大而增大, 相应的板底冲刷脱空也就越严重. 选取广西地区的二灰稳定碎石类 and 水泥稳定碎石类两种基层进行错台量调查, 检测仪器为数显胎纹仪, 结合现场车辆行驶的轮迹分布情况, 选择的 3 个测量位置分别是距离板边 50 cm 和 170 cm 两点和离路中心 50 cm 的点, 如图 1 所示. 错台量有正负之分, 车辆的驶入方向板比驶出方向板高时为正, 反之为负, 如图 2 所示.

用平均错台量作为测试路段错台的评价指标, 其计算公式如下:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n x}{N} \quad (1)$$

① 收稿日期: 2014-11-23

基金项目: 浙江省交通运输厅科研项目(2014H38); 陕西省教育科学“十二五”规划项目(SGH14093).

作者简介: 李晶晶(1985-), 女, 湖北随州人, 讲师, 博士研究生, 主要从事路面材料与结构研究.

式中:  $F$  为平均错台量, mm;  $x$  为错台量, mm;  $N$  为接缝个数.

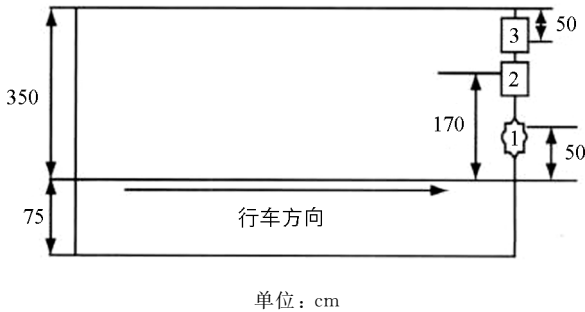


图 1 错台量测量位置平面分布

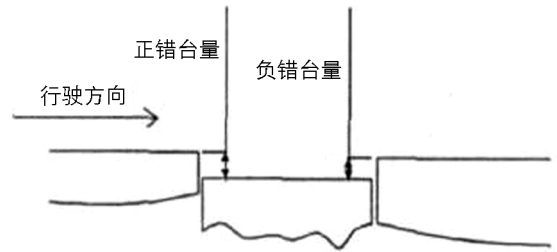


图 2 错台量正负规定

## 1.2 脱空高度数据采集及处理

针对不同基层类型, 利用 JN-150 标准车和贝克曼梁检测板角、板边弯沉. 要求是测试车后轴位于横缝边缘, 车轮最外侧距纵缝边缘 10 cm; 测板角弯沉仪支架放置在路肩, 测头放在角隅; 测板边弯沉测头放在左侧两轮中间, 每 50 m 或 10 块路面板进行一次测量. 根据调查路面弯沉检测结果, 依据《公路水泥混凝土路面养护技术规范》(JTJ 073. 1-2001)<sup>[9]</sup> 以及沥青混凝土加铺改造工程经验, 采用板角弯沉单点值大于 0.14 mm 判定为面板脱空. 为了测得脱空处的脱空高度, 借助换板的机会或钻芯取样的方式, 通过水准仪来测得基层顶部高程和脱空底面高程, 两者的差值即为脱空高度.

用平均脱空高度作为测试路段脱空的评价指标, 其计算公式如下:

$$H_v = \frac{\sum_{i=1}^n y}{M} \quad (2)$$

式中:  $H_v$  为平均脱空高度, mm;  $y$  为脱空高度, mm;  $M$  为脱空个数.

## 1.3 错台量与脱空高度分析

在调查广西地区水泥混凝土路面错台量与脱空高度资料时, 采用前述方法进行数据采集和处理, 发现无论是二灰稳定碎石类基层还是水泥稳定碎石类基层, 错台量与脱空高度都存在着很好的相关关系.

### 1.3.1 无传力杆时

未设传力杆时, 二灰稳定碎石基层和水泥稳定碎石基层的错台量与脱空高度调查资料如图 3 所示. 分析可知: 脱空高度处于同一水平时, 二灰稳定碎石基层错台量要比水泥稳定碎石基层大 10%~20%, 这说明水泥稳定碎石基层的抗冲刷性能较二灰稳定碎石基层好; 平均错台量均随着平均脱空高度的增加呈乘幂关系增大, 对两者进行拟合, 其回归公式为

二灰稳定碎石基层:

$$F = 0.5188 H_v^{0.9587} \quad (3)$$

水泥稳定碎石基层:

$$F = 0.4722 H_v^{0.9659} \quad (4)$$

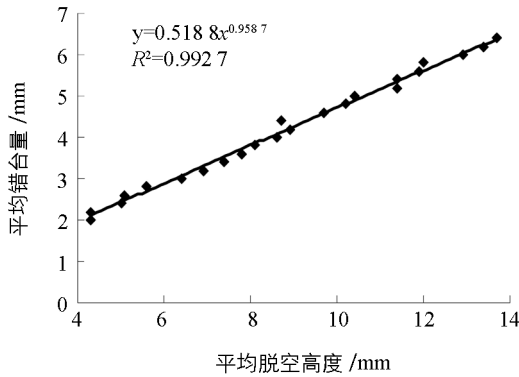
### 1.3.2 设传力杆时

在调研过程中未找到二灰稳定碎石基层上加设传力杆的水泥混凝土路面, 因此需分析水泥稳定碎石基层上加设传力杆的水泥路面错台与脱空情况, 其关系见图 4.

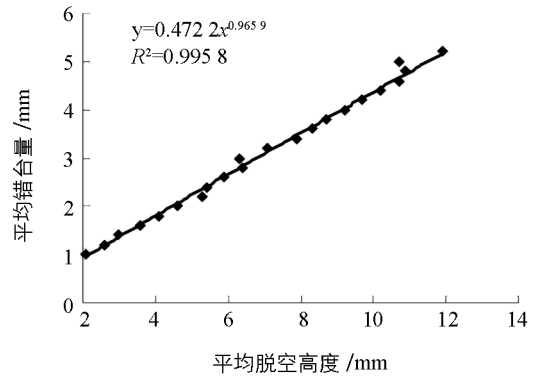
分析图 4 可知: 虽然水泥稳定碎石基层上设传力杆的水泥面板仍然会出现脱空及错台现象, 但其程度均比未设传力杆时大大降低, 设传力杆时最大脱空高度仅为 4.3 mm, 最大错台量为 3.0 mm, 未设传力杆时最大脱空高度为 11.9 mm, 最大错台量为 5.2 mm, 而且基本上没有出现断板现象, 这充分说明传力杆

控制脱空与错台效果显著. 对脱空高度与错台量进行回归, 得到公式如下:

$$F = 0.5115H_v^{1.2188} \quad (5)$$



(a) 二灰稳定碎石基层



(b) 水泥稳定碎石基层

图 3 无传力杆时平均脱空高度与平均错台量关系

## 2 错台量发展变化规律

### 2.1 建立任意轴载下冲刷脱空预估模型

#### 2.1.1 分析轴载与冲刷量的关系

为了在室内试验模拟脱空的路面结构行车荷载与冲刷量的关系, 修筑水泥稳定碎石基层和二灰碎石基层试验路面, 面板几何尺寸为  $80 \times 70 \times 9$  cm, 基层几何尺寸为  $100 \times 90 \times 20$  cm, 脱空位置设置在基层中部, 且尺寸为  $15 \times 15 \times 5$  cm. 用质量 4 kg 的轮胎从高 0.5 m 处垂直下落到脱空处面板上加加载, 利用埋在脱空处的 CYB100 型高精度压力传感器测得对应的动水压力, 试验路面结构及传感器布置见图 5, 同时收集水样以及分离出固体颗粒, 用精度为 0.000 1 g 的分析天平进行称量, 得到对应的轴载与冲刷量间的关系(图 6).

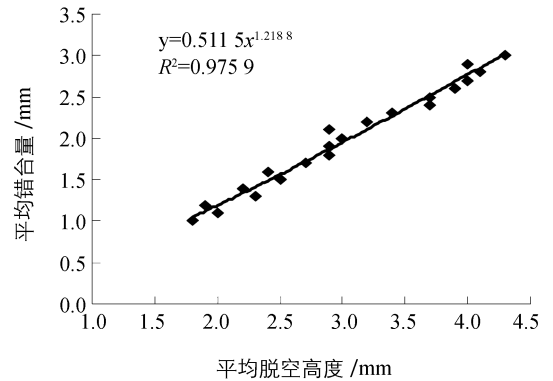


图 4 水泥稳定碎石基层设传力杆时  
平均脱空高度与平均错台量关系

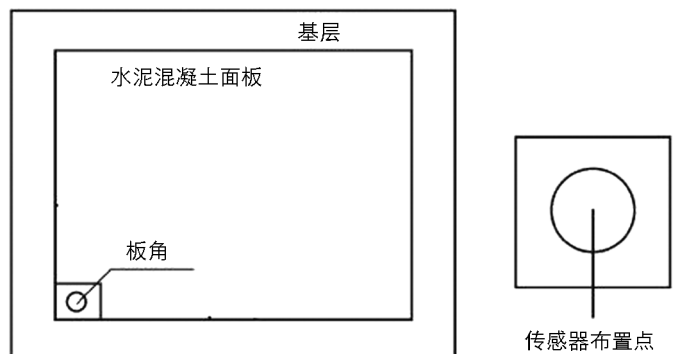


图 5 试验路面结构及传感器布置点

分析图 6 可知: 无论是二灰稳定碎石基层还是水泥稳定碎石基层, 冲刷量均随着轴载的增加而不断增大, 这是因为随着轴载的增加, 脱空区域的水产生的动水压力也就增大, 对基层的冲刷也就越严重. 进一步分析可知, 同等荷载水平下, 二灰稳定碎石基层的冲刷量比水泥稳定碎石基层的冲刷量要大 10%~12%, 这与前述调研结果一致. 对两者进行拟合, 其回归公式如下:

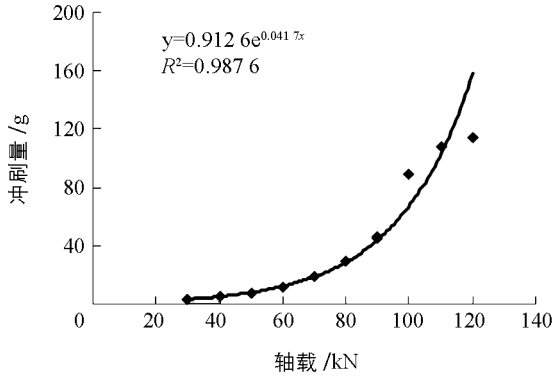
二灰稳定碎石基层:

$$V_c = 0.9126e^{0.0417P} \quad (6)$$

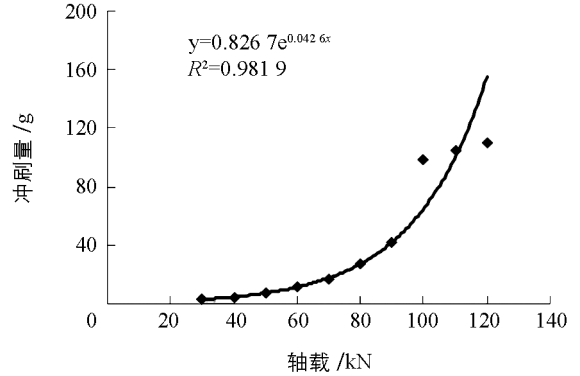
水泥稳定碎石基层:

$$V_c = 0.8267e^{0.0426P} \quad (7)$$

式中:  $V_c$  为冲刷量, g;  $P$  为轴载, kN.



(a) 二灰稳定碎石基层



(b) 水泥稳定碎石基层

图 6 轴载与冲刷量的关系

### 2.1.2 建立任意轴载下冲刷脱空模型

根据冲刷总量相等原则,可以推导达到同等冲刷量条件下,任意轴载所需要的作用次数与标准轴载冲刷次数的关系,即:

$$V_c N = V_e N_e \quad (8)$$

式中:  $V_c$  为任意轴载下的冲刷量, g;  $N$  为任意轴载的冲刷次数;  $V_e$  为标准荷载下的冲刷量, g;  $N_e$  为标准荷载的冲刷次数.

由于  $V_e = 100$ ,可以得到:

二灰稳定碎石基层:

$$N_e = 0.9126 \times 10^{-2} e^{0.0417P} N \quad (9)$$

水泥稳定碎石基层:

$$N_e = 0.8267 \times 10^{-2} e^{0.0426P} N \quad (10)$$

将上式代入参考文献[7]中的冲刷脱空模型,即可得到不同荷载下的冲刷预估模型,见表 1.

表 1 不同荷载作用下的冲刷预估模型

基层类型	模 型
二灰稳定碎石	$l_0 = \frac{3}{10000} k_c \cdot k_d \cdot 0.9126 \times 10^{-2} e^{0.0417P} N \cdot \frac{1}{\lambda}$ $l = l_0 \cdot \sqrt[3]{1 + \frac{3}{10000} k_c \cdot k_d \cdot 0.9126 \times 10^{-2} e^{0.0417P} N \cdot \frac{1}{\lambda \cdot l_0}}$
水泥稳定碎石	$l_0 = \frac{3}{10000} k_c \cdot k_d \cdot 0.8267 \times 10^{-2} e^{0.0426P} N \cdot \frac{1}{\lambda}$ $l = l_0 \cdot \sqrt[3]{1 + \frac{3}{10000} k_c \cdot k_d \cdot 0.8267 \times 10^{-2} e^{0.0426P} N \cdot \frac{1}{\lambda \cdot l_0}}$

注:  $l_0$  为首次荷载作用后脱空半径, m;  $l$  为冲刷后脱空半径, m;  $\lambda$  为脱空高度与脱空半径之比;  $N$  为任意轴载冲刷次数, 次;  $P$  为轴载, kN;  $k_d$  为降水天气修正系数;  $k_c$  为基层材料抗冲刷系数,  $m^3/m^2 \cdot$  万次.

## 2.2 建立考虑冲刷脱空的错台预估模型

由于  $H_v = 1\ 000 \lambda \cdot l$ , 因此得到无传荷及有传荷时的错台模型, 见表 2.

表 2 考虑冲刷脱空的水泥路面接缝错台预估模型

类别	基层类型	模 型
无传力杆	二灰稳定碎石	$F = 0.518\ 8H_v^{0.958\ 7} = 0.518\ 8(1\ 000\lambda l)^{0.958\ 7} = 390.03(\lambda l)^{0.958\ 7}$
	水泥稳定碎石	$F = 0.472\ 2H_v^{0.965\ 9} = 0.472\ 2(1\ 000\lambda l)^{0.965\ 9} = 373.10(\lambda l)^{0.965\ 9}$
有传力杆	水泥稳定碎石	$F = 0.5115H_v^{1.218\ 8} = 0.5115(1\ 000\lambda l)^{1.218\ 8} = 2.337 \times 10^3 (\lambda l)^{1.218\ 8}$

注: 有传力杆时需将传荷系数的影响考虑进去, 换算成受力板实际承受的荷载.

## 2.3 错台预估模型的验证

以广西柳南高速公路为例, 水泥路面结构为 26 cm 水泥混凝土面层+20 cm 二灰稳定碎石基层+18 cm 级配碎石底基层+土基, 设计基准期为 30 年, 于 2000 年通车. 通过调查, 该地区年平均降水量为 1 900 mm, 降水多集中在 5、6 月份, 保守估计年平均降水天数取 80 天, 二灰稳定碎石抗冲刷系数取  $1.60 \times 10^{-4}$ , 脱空高度与脱空半径比值为 1:100, 设计车道使用初期日交通量标准轴次为 2 100, 5 年后错台量为 2.7 mm, 试通过预估公式计算通车 5 年后错台量以验证公式的适用性.

1) 参照规范, 计算前 5 年内累计标准轴次为 2 704 531 次, 约 270 万次;

2) 计算首个万次后脱空半径,  $l_0 = 0.006\ 8(\text{m})$ ;

3) 计算第二个万次后脱空半径,  $l_1 = 0.008\ 6(\text{m})$ ;

4) 以此类推, 计算第 270 万次后脱空半径,  $l_{270} = 0.611\ 8(\text{m})$ ;

5) 进而计算 5 年后柳南高速公路错台量,  $F = 2.90(\text{mm})$ , 这与前述调研资料基本一致, 验证了预估公式的准确度.

## 3 结 语

1) 通过调查分析广西地区水泥混凝土路面错台量与脱空高度, 发现无论何种基层类型, 平均错台量均随着平均脱空高度的增加呈乘幂关系增大, 且对于水泥稳定碎石基层而言, 设传力杆路面的错台量要比不设传力杆的降低 20%~45% 左右, 这说明设置传力杆可有效控制脱空与错台.

2) 在室内修筑基层脱空的水泥混凝土路面结构, 分析不同行车荷载与冲刷量的关系, 表明冲刷量与轴重呈指数关系, 二灰稳定碎石基层的冲刷量比水泥稳定碎石基层的冲刷量大 10%~12%, 并建立任意轴载下冲刷脱空模型.

3) 建立不同基层类型考虑冲刷脱空的水泥混凝土路面错台预估模型, 通过对广西柳南高速公路实例进行分析, 表明理论计算的错台量与实际错台量的偏差 1 mm 以内, 预估模型的精度很高.

## 参考文献:

- [1] 中交公路规划设计有限公司. 公路水泥混凝土路面设计规范: JTG D40-2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [2] 陈富强, 谈至明. 水泥混凝土路面横向接缝错台模型与应用 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(1): 74-79.
- [3] 唐伯明, 马国民, 谈至明. 水泥混凝土路面错台分级方法 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 62-67.
- [4] 王威娜. 基于 LTPP 数据的水泥混凝土路面错台影响因素与预测模型研究 [D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [5] WU C L, MACK J W, OKAMOTO P A, et al. Prediction of Faulting of Joints in Concrete Pavements, Volume 2 [C]// Proceedings of the International Conference on Concrete Pavement Design. Lafayette: Purdue University, 1993: 53-70.
- [6] 张 擎. 考虑冲刷脱空的水泥混凝土路面设计研究 [D]. 西安: 长安大学, 2009.

- [7] 廉向东, 付其林, 陈拴发, 等. 基于板底脱空的水泥混凝土路面动水压力试验研究 [J]. 武汉理工大学学报(自然科学版), 2011, 33(5): 100—103.
- [8] 盛燕萍, 李海滨, 陈拴发. 基于抗冲刷性能的半刚性基层材料组成设计方法 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, 33(3): 19—23.
- [9] 江苏省交通厅公路局. 公路水泥混凝土路面养护技术规范: JTJ 073. 1-2001 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

## Study on Faulting of Concrete Pavement Considering Erosion and Void

LI Jing-jing<sup>1,2</sup>, ZHANG Qing<sup>1</sup>

1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Department of Highway Engineering, Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an 710018, China

**Abstract:** Taking into account the shortcomings of current concrete pavement faulting prediction, a field investigation was carried out, in which it was found that erosion height and faulting were well correlated whether the dowel bar was present or not. Then, an indoor concrete pavement structure was built in the test, and the relationship between load and erosion value was analyzed. It was shown that the erosion value of both the lime stabilized macadam base and the cement stabilized macadam base increased exponentially with the enlargement of the axle load. Finally, a cement concrete pavement faulting prediction model for the two different base types considering erosion and void was established. The faulting model of lime stabilized macadam base with no dowel bar was verified on the Liu-Nan Road, and the result showed that the model had good applicability.

**Key words:** road engineering; cement concrete pavement; faulting of slab ends; base erosion and void; simulation test

责任编辑 汤振金

