

# 水泥混凝土路面横向接缝错台模型与应用

陈富强, 谈至明

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 接缝错台是水泥混凝土路面的常见结构病害, 精确预测错台演化规律对制订路面养护对策具有重要指导意义. 对国内外几种典型水泥混凝土路面横向接缝错台模型进行对比分析, 探讨了模型的演变和发展历程, 分析了模型参数不断具体化和隐性化的发展趋势. 对广西柳南高速公路的接缝错台发展规律的分析表明, 该路段错台发生发展过早过快的主要原因是接缝设计不当, 并非面板过薄和交通量增长与预计不符所致; 在接缝中设置传力杆可延缓错台的发生, 并为预防性养护的有效切入提供足够的时间, 便于预防性养护工作的合理安排与顺利开展; 同时, 指出了应用其他国家或地区的模型时所应遵循的基本原则与综合修正方法, 旨在为国内错台模型建立提供有益的参考价值, 并为水泥混凝土路面预防性养护技术的推广与发展提供坚实的理论基础.

**关键词:** 道路工程; 水泥混凝土路面; 接缝错台; 预测模型; 预防性养护

**中图分类号:** U 416.2, U 418.6

**文献标识码:** A

## Transverse Joint Faulting Models and Application of Cement Concrete Pavement

CHEN Fuqiang, TAN Zhiming

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Transverse joint faulting is a common structural disease of cement concrete pavement, and to accurately predict the development of faulting is significantly important for guiding the formulation of pavement maintenance measures. Several typical cement concrete pavement transverse joint faulting models at home and abroad are comprehensively analyzed, and both the evolution process of the models and the trend of the model parameters' embodiment and recessivation are studied. Besides, analysis of transverse joint faulting of Liu-Nan expressway in Guangxi shows that the occurrence and development of premature faulting is not mainly caused by

thin slabs and inaccuracy of traffic prediction, but poorly - designed joints; the Setting of dowel bars in the joint can slow down the development of joint faulting, thus provide enough time for the implementation of preventive maintenance and facilitate the reasonable formulation of preventive maintenance plan. Finally, both the basic principles and the integrated amendment method for the application of other countries' or regions' models are brought forth, which provides a useful reference to our models' establishment and a solid theory for popularizing and developing cement concrete pavement preventive maintenance.

**Key words:** road engineering; cement concrete pavement; joint faulting; prediction model; preventive maintenance

路面使用性能预测是预防性养护技术的核心内容, 制订经济有效的养护计划依赖于科学合理的路面使用性能预测模型的建立. 路面使用性能的预测研究在国内外开展的时间都比较短, 相对而言, 美国和加拿大在这方面做了大量而长期的工作. 1987 年, 美国战略公路研究计划 (SHRP) 首先提出路面长期性能 (LTPP) 研究计划, 到 1997 年, LTPP 已在北美地区建立了 2 200 多个试验观测路段, 并得到了广泛的国际参与, 已经有 20 多个国家正式加入了 LTPP 的国际协作; 截至 2003 年, 路面长期性能计划 (FHWA LTPP) 研究所收集的资料包括北美地区 900 个区域共 2 500 个试验路段的调查数据<sup>[1-2]</sup>. 其所建立的模型主要分为基于单项性能指标 (如错台、破碎、开裂等) 的性能模型和基于某个综合指标 (如国际平整度指数 (IRI)、现时服务指数 (PSI)、路面状况指数 (PCI) 等) 的性能模型. 模型的建立经历了由经验型向力学型或力学-经验型转变的过程, 这就使模型具有较强的适应性, 使得将模型移植到其他国家

收稿日期: 2010-09-09

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目 (20073182201-9)

第一作者: 陈富强 (1978—) 男, 工学博士, 主要研究方向为道路与铁道工程. E-mail: happylife2u@sina.com

或地区变得可能,而所需要的是调整模型参数.

国内从 20 世纪 80 年代开始大力发展水泥混凝土路面,如今,90 年代前后完成的水泥混凝土路面面临着维修、改建或重建的问题,养护维修任务巨大.总的来说,我国对水泥混凝土路面养护和维修的研究重点主要集中在路面维修工艺和维修材料上,对路面性能和养护策略的研究则较少.本文通过分析横向接缝错台模型,探究路面错台的发展规律,以便为国内在该方面的研究提供参考借鉴.

1 模型概况

1.1 性能预测模型的沿革

性能模型的建立大体上经历了由经验型向力学型或力学-经验型,由静态到动态的转变过程.在基于单项指标的性能模型方面,先后有 Simpson 等人对 LTPP 中一般路段研究(GPS)的数据进行了初步分析,建立了美国公路战略研究计划(SHRP-020)模型;Wu. C. L 等人建立了美国混凝土铺面协会(ACPA)模型,该模型是一个力学-经验型模型;Yu. H. T 等人建立了刚性路面性能与修复计划(FHWA RPPR)模型;Owusu- Antwi 等人在 FHWA 的国家路面成本模型(NAPCOM)研究中,也建立了力学-经验型模型;L. Titus. Glover 等人则对 FHWA NAPCOM 的模型进行了重新标定;Hoerner 等人于 1999 年和 2000 年分别在 SHRP P-020 ,FHWA RPPR,ACPA, NAPCOM 和 LTPP 等模型的基础上,建立了基于性

能的 PRS(performance-related specification)模型,该模型为美国 Pav espec 3.0 中的默认模型.在基于综合指标的模型方面,Simpson 等人在对 LTPP GPS 数据的早期分析中,提出了 IRI 模型(SHRP P-020),Titus- Glover 等人在 FHWA LTPP 数据分析项目中建立了 IRI 模型,Hoerner 等人建立了 IRI 模型并被纳入到 Pav eSpec 2.0 和 Pav eSpec 3.0 中<sup>[3-9]</sup>.此外,部分州建立了自己的性能预测模型.S. Labi 和 K. Sinha 认为以往建模方法都是基于路面结构、交通荷载和环境的静态方法,于是提出了基于交通荷载、环境气候以及维修费用的动态模型,即考虑维修费用的动态影响,改变传统的采用累计值来表示路面历史(经历)的方法,根据时间跨度的不同加强了交通、气候以及维修行为对路面性能的影响<sup>[10]</sup>.

在国内,唐伯明等人依据对浙江省一些路段的历年监测资料建立了疲劳开裂模型,断板率模型以及 PCI 模型<sup>[11]</sup>.毕艳祥、姚祖康等人利用上海市道路设施管理系统两年的数据积累,通过专家调查回归得出路面经验寿命<sup>[12]</sup>.同济大学孙立军等人提出了路面衰变标准方程<sup>[13]</sup>.台湾地区李英豪等人利用 LTPP 数据库,按照 Pav eSpec 3.0 软件的模式,根据横向接缝错台、横向开裂、横向接缝破碎以及平整度指标构建了路面性能预测模型<sup>[14-15]</sup>.

1.2 错台模型的综合分析

几种主要错台模型的特征及精度见表 1.

表 1 错台模型主要特征及精度  
Tab.1 Main character and precision of models

模型名称	美国公路战略研究计划	刚性路面性能与修复计划	美国混凝土铺面协会	美国国家路面成本模型	路面长期性能计划	基于性能标准模型(2.0)	基于性能标准模型(3.0)
型式	经验型	经验型	力学-经验型	力学-经验型	力学-经验型	力学-经验型	力学-经验型
主要特征	引入累计标准轴载作用次数参数	引入超宽车道的影响项	引入 Miner 线性损伤概念	引入板角处弹性形变势能差(DE)的概念			
显式参数	1. 累计轴次 2. 板长 3. 静态地基反应模量 4. 路龄 5. 边缘支撑情况 6. 传力杆尺寸	1. 累计轴次 2. 容许承载力 3. 板长 4. 冰冻指数 5. 降雨量 6. 基层类型 7. 超宽车道	1. 腐蚀损伤 2. 降雨量 3. 板长	1. 损伤因子 2. 基层类型 3. 排水系数 4. 冰冻指数	1. 损伤因子 2. 潮湿天数 3. 传力杆尺寸 4. 排水系数 5. 基层类型	1. 损伤因子 2. 高温天数 3. 潮湿天数 4. 基层类型	1. 损伤因子 2. 高温天数 3. 降雨量
统计分析	N = 59 R <sup>2</sup> = 0.53 S = 0.70 mm	N = 146 R <sup>2</sup> = 0.60 S = 0.56 mm		N = 101 R <sup>2</sup> = 0.52 S = 0.80 mm	N = 120 R <sup>2</sup> = 0.56 S = 0.80 mm	N = 391 R <sup>2</sup> = 0.50 S = 0.89 mm	N = 511 R <sup>2</sup> = 0.56 S = 0.74 mm

注:N 为样本数;R 为相关系数;S 为方差.

1.3 基层参数的不断细化

通过对水泥混凝土路面错台状况进行广泛调

查,发现基层材料的抗冲刷能力与唧泥、错台等息息相关,基层类型会对路面接缝错台产生重要影响,基

层参数是重要的影响因子.从 SHRP P-020 模型只考虑基层的地基反应模量,未对基层类型进行明确的划分,到后来对基层进行详细而严格的划分,可以

看出,人们已经认识到了基层对错台影响的重要程度.水泥混凝土路面基层类型分类见表 2.

表 2 水泥混凝土路面基层类型分类

Tab.2 Classifications of base type for Portland cement concrete pavement

模型名称	美国公路战略研究计划	刚性路面性能与修复计划	美国混凝土铺面协会	美国国家路面成本模型	路面长期性能计划	基于性能标准模型(3.0)
基层类型	未分类	1. 稳定类; 2. 非稳定类	1. 未处治类; 2. 稳定类	1. 腐蚀性; 2. 非腐蚀性	1. 未处治类; 2. ATB 基层; 3. CTB 基层; 4. 贫混凝土	1. 8% 贫混凝土;6% 沥青混凝土或透水层; 2. 5% 水泥处治粒料;4% 沥青处治粒料; 3. 3.5% 厂拌水泥处治粒料;3% 沥青处治粒料; 4. 2.5% 水泥处治土; 5. 非处治粒料基层; 6. 不设基层

注:ATB 基层为沥青处置基层;CTB 基层为水泥处置基层.

### 1.4 模型参数的隐性化

从经验型模型向力学-经验型模型转变的过程中,经验型中的模型参数多为一些非力学参数,而且常常以显式参数的形式直接出现在模型方程中,方程显得冗长混乱,导致关键点不突出.而力学-经验型由于引入了一些力学因子(如损伤因子、腐蚀损伤等),而把很多非力学参数作为隐式参数,使最终的模型型式简单,重点突出.

## 2 错台模型的优选与修正

### 2.1 模型的优选

从最初的经验型模型,到后来的力学-经验型模型,由于积累的数据越来越多,而且路面结构的力学分析越来越接近路面损害的力学行为过程,尽管相关系数似乎差别不大,但是由于数据量的不同,同样导致了计算结果存在很大的差异.总体而言,FHWA NAPCOM 的错台预测量最大,而 ACPA 的错台量最小,PaveSpec 2.0 和 PaveSpec 3.0 所建立的模型数据量都很大,精度也较高,预测结果较为接近.

通过对上述模型进行对比分析,认为 PaveSpec 3.0 模型由于其建立的过程较为严密,考虑的因素较为全面,而且用于统计分析的数据量大,模型的适用性较好,在工程实践中经适当修正后可加以应用.

### 2.2 模型的修正

在水泥混凝土路面性能预测上,国内的研究缺乏系统性和连续性,模型的通用性受到一定的限制.相对而言,美国、加拿大等国家在这方面研究则较为系统,积累了较多的调查资料.LTPP 甚至将所积累的数据建成数据库,并发布在互联网上,以方便其他国家和地区参考使用,同时将其他国家和地区的数

据吸收进来,不断完善数据库,使得模型的通用性大为增强,很多普遍适用的规律都直接为其他国家和地区所采用.然而,由于自然环境、交通、材料和施工等原因引起的地区差异,也会使模型的适用性受到限制.

## 3 接缝错台模型的计算与工程应用

### 3.1 模型的计算流程

错台模型的计算流程见图 1,其中虚型方框为隐性参数的计算过程.可以看出,隐性参数的计算占了很大一部分,而最终的错台模型只涉及到三个显性参数,即高温天数,降雨量和损伤累积.

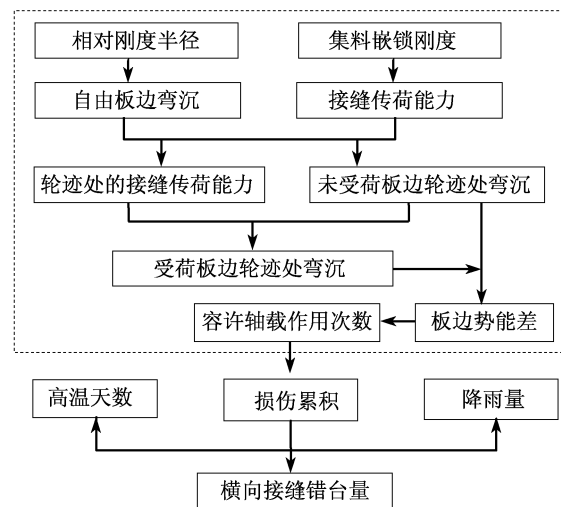


图 1 错台模型的计算流程

Fig.1 Procedure of transverse joint faulting prediction model

### 3.2 接缝错台的计算

如图 1 所示,整个模型所涉及的参数较多,计算

步骤也较复杂,错台量的计算表达式为<sup>[9]</sup>

$$F_t = D_A^{0.275} (0.174 1 - 0.000 991 D_{90} + 0.001 08 P_R) \quad (1)$$

式中:  $F_t$  为横向接缝错台平均值;  $D_A$  为损伤因子;  $D_{90}$  为年温度高于 90 °F (32 °C) 的天数;  $P_R$  为平均降雨量。

容许轴载作用次数  $N$  采用下式计算<sup>[9]</sup>:

$$\log N = 0.785 983 - \log E_R - 0.929 91 \times (1 + 0.40 P_E (1 - D)) \times \log(D_E (1 - 1.432 D_d + 0.513 D_d^2)) \quad (2)$$

式中:  $N$  为容许累计标准轴载作用次数 (ESAL), 以百万计;  $E_R$  为基层抗腐蚀因子;  $P_E$  为基层渗透性;  $D$  为模型参数;  $D_E$  为板角处形变势能差;  $D_d$  为传力杆的直径。

板角处形变势能差  $D_E$  由下式得出<sup>[9]</sup>:

$$D_E = \frac{1}{2} k (w_L^2 - w_{UL}^2) = \frac{1}{2} k (w_L + w_{UL})(w_L - w_{UL}) \quad (3)$$

式中:  $w_L$  和  $w_{UL}$  分别为轮迹处受荷板弯沉和未受荷板弯沉;  $k$  为地基动态反应模量。

### 3.3 工程应用与分析

#### 3.3.1 工程概况

柳州至南宁高速公路路基宽度为 28 m, 行车道宽 3.75 m, 超车道宽 4.25 m, 路面板长为 5 m, 缩缝为不设传力杆的假缝型式, 双向四车道, 全封闭, 全立交, 设计行车速度为 120 km · h<sup>-1</sup>。

##### 3.3.1.1 路面结构型式及力学参数

柳王路的路面型式及其力学参数见表 3。

表 3 路面结构型式及力学参数

Tab.3 Pavement structure and mechanics parameters

结构层次	路面材料	厚度/cm	模量/MPa
面层	水泥混凝土	24	3.0 × 10 <sup>4</sup>
基层	二灰稳定碎石	20	500
底基层	级配碎石	16~20	110~150
土基			30~36

注: 水泥混凝土的设计强度为 5.0 MPa; 1 cm 厚的封层施工时变更取消。

##### 3.3.1.2 交通量状况

柳南路原设计的标准轴载累计作用次数为 7 514 455 次<sup>[16]</sup>。工程项目建设初期, 预计柳南高速公路的交通增长率为: “九五”期间在 11.5% ~

15.0% 之间, 2001—2010 年间在 8.3% ~ 10.0% 之间, 2011—2020 年在 5.7% ~ 8% 之间<sup>[17]</sup>。然而, 实际的交通量状况与预计相差较大。柳王路自建成通车以来, 交通量逐年增加, 2000—2003 年交通量平均增长率为 6.23%。2004 年比 2003 年增长 18.08%, 2005 年比 2004 年增长 17.87%, 高于广西全区高速公路的平均增长率 13.4%。

#### 3.3.1.3 气候状况

高速公路沿线地区年平均气温为 18.6 ~ 20.3 °C, 极端最高气温为 40.0 °C, 极端最低气温为 -10.0 °C, 年平均降水量为 1 500 ~ 2 000 mm, 属多雨区。

#### 3.3.2 接缝错台预测及分析

根据柳南高速公路柳王段的路面参数, 对横向接缝错台进行了预测, 其结果见图 2 中的①号曲线。《公路技术状况评定标准 (JTG H- p20—2007)》规定, 错台指的是接缝两边出现的高差大于 5 mm 的损坏, 当高差小于 10 mm 时为轻微错台, 而高差大于 10 mm 时为重度错台。不难看出, 该路段在通车后的第 3 年 (2001 年) 就已达到了轻度错台状况 (5.41 mm), 之后的 4 年时间里, 错台逐年快速发展, 2005 年达到 7.19 mm, 若按广西区高速路的平均增长率水平推算, 2012 年将达到重度错台的状况 (10.04 mm)。历年的路面接缝错台记录反映了这一点 (国内错台统计以发生大于 5 mm 的错台的板的长度计), 2001 年之前几乎没有大于 5 mm 的错台, 而在 2002 年一年之间错台长度即从 360 m 迅速增加到 3 452 m, 至 2005 年猛增到了 45 202 m, 养护部门不得不对部分严重路段进行沥青层加铺改造, 但错台的总长度在不到一年的时间内就已超过了原来的长度。

#### 3.3.3 接缝错台控制与讨论

错台预测曲线显示 (图 2), 路面板厚并不是控制错台的主要因素, 路面厚度从原结构的 24 cm 增长到 28 cm, 错台量以及错台的发展趋势并没有得到有效的缓和 (如②号线), 但是, 如果按照《公路水泥混凝土路面设计规范 (JTG D40—2002)》进行接缝设计, 错台的发展则明显慢得多 (如③和④号线)。此外, 通车初期交通量过大, 也是导致后来错台发展迅猛的主要原因之一, 这从通车后的第 3 年的错台量比较大可以得到证实。因此, 造成柳南高速公路过早出现较为严重错台 (通车后第 7 年达到 7.19 mm) 的原因, 主要在于接缝 (缩缝) 的结构设计不合理。如果最初即采用 24 cm 板厚 + 30 mm 传力杆的缩缝组

合形式(③号线)或规范规定的其他组合型式,即使在原有的重交通量条件下,路面接缝出现轻微错台(5.02 mm)的时间也至少要到2018年(2005年之后按照广西全区的交通量年平均增长率13.4%来推

算),而不会像原有结构型式下在通车才3年的时间内错台量就已达到了5.41 mm,2012年左右将迅速发展到了重度错台状态,不仅大大增加了养护工作量,而且造成了大量维修资金的浪费。

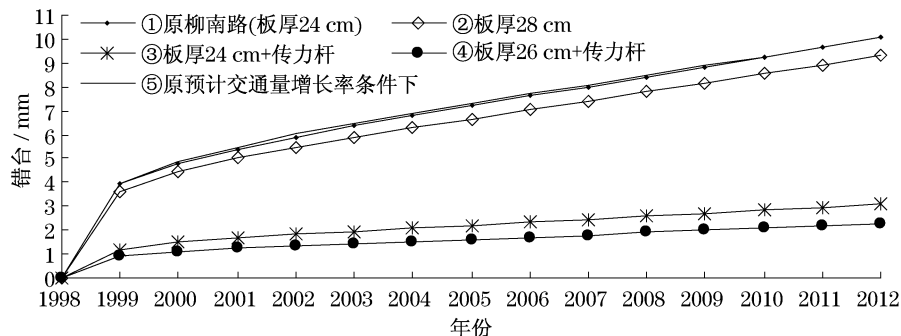


图2 原柳南高速公路路面结构及各对照结构的错台预测曲线

Fig.2 Prediction curve of Liu-Nan expressway and other alternative pavement structures

## 4 结 语

(1) 通过对典型错台模型进行综合分析,阐述了模型的发展历程及其主要发展方向.国外模型的发展历程可为今后国内进行相关的数据采集并建立相关模型提供有益的参考和借鉴.

(2) 对广西区柳南高速公路柳王段进行错台随路龄的预测分析表明,柳南路错台发展过早过快的主要因素并不是面板过薄或交通量增长与原预计不符,而是原有结构不合理.根据《公路水泥混凝土路面设计规范(JTG D40—2002)》的要求进行缩缝设计,将大大延缓错台的发生和发展.

(3) 随着对路面结构的力学行为认识的深入,错台模型将不断得到完善,与工程实践将越来越吻合,使得路面的养护工程变得更具有前瞻性、科学性,便于预防性养护工作的高效切入.

## 参考文献:

- [1] Gary E Elkins, Peter Schmalzer, Travis Thompson, et al. Long-term pavement performance information management system: pavement performance database user reference guide [R]. Washington, DC: Federal Highway Administration, 2004.
- [2] US Department of Transportation. LTPP 2004 year in review [R]. Washington, DC: Federal Highway Administration, 2005.
- [3] Simpson A L, Rauhut J B, Jordahl P R, et al. Early analysis of LTPP general pavement studies data, volume III: sensitivity analyses for selected pavement distresses [R]. Washington, DC: Strategic Highway Research Program, 1994.
- [4] Yu H T, Smith K D, Darter M I, et al. Performance of concrete

pavements, volume III: improving concrete pavement performance [R]. Washington, DC: Federal Highway Administration, 1997.

- [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] Owusu-Antwi E B, Titus-Glover L, Khazanovich L, et al. Development and calibration of mechanistic-empirical distress models for cost allocation (final report) [R]. Washington, DC: Federal Highway Administration, 1997.
- [7] Titus-Glover L, Owusu-Antwi E B, Darter M I. Design and construction of pcc pavements volume 3: improved PCC performance models [R]. Washington, DC: Federal Highway Administration, 1999.
- [8] Yu H T, Khazanovich L, Rao S P, et al. Guidelines for subsurface drainage based on performance [R]. Washington, DC: National Cooperative Highway Research Program, 1998.
- [9] Hoerner T E, Darter M I, Khazanovich H L, et al. Improved prediction model for PCC pavement performance-related specifications volume 1 (final report) [R]. Washington, DC: [s. n.], 2000.
- [10] Labi S, Sinha K. The effectiveness of maintenance and its impact on capital expenditures [R]. [S. L.]: Joint Transportation Research Program, 2003.
- [11] 唐伯明, 姚祖康, 夏瑞莲, 等. 水泥混凝土路面长期结构性能监测评价 [J]. 中国公路学报, 1996, 9(2): 20.  
TANG Boming, YAO Zukang, XIA Ruilian, et al. Long-term structural performance evaluation of cement concrete pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 1996, 9(2): 20.
- [12] 毕艳祥, 姚祖康. 特定路段路面使用性能的预测模型 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2001, 29(2): 146.  
BI Yanxiang, YAO Zukang. Prediction model of specific pavement performance [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2001, 29(2): 146.

(下转第84页)