

# Research Progress and Prospect of Flexible Pavement Mechanics

Jiale LIANG

Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China

**Abstract:** Pavement mechanics is the theoretical basis for the analysis and design of pavement structure. This paper mainly summarizes the research progress of pavement mechanics at home and abroad, and makes a brief evaluation of the existing research. At the same time, Finally, the factors and points that should be considered in the process of flexible pavement mechanics are put forward in order to achieve the purpose of optimizing the analysis method and get more accurate results. At the same time, the necessary research and prospect are carried out, To promote the formation of a complete theoretical system of road mechanics analysis.

**Keywords:** Flexible pavement; Pavement mechanics; Analytical model; Prospect

## 柔性路面力学的研究进展及展望

梁佳乐

重庆交通大学, 重庆, 中国, 400074

**摘要:** 路面力学是进行路面结构性能分析和设计的理论基础, 本文主要对国内外关于路面力学的研究进展进行了详细归纳, 并对现有研究做了简要的评价; 同时, 归纳总结了用于柔性路面力学分析的几类主要模型; 最后, 提出了在柔性路面力学计算过程中应该必要考虑的因素和要点, 以实现优化分析方法并得到更精确结果的目的, 同时进行了必要的研究展望, 以促使形成一套完善的路面力学分析理论体系。

**关键词:** 柔性路面; 路面力学; 分析模型; 展望

### 1 引言

路面设计与分析的理论基础是路面力学, 它重点阐释的是如何有效综合既有的弹性力学、材料力学和粘弹性力学等领域知识来解决路面体系内的应力和位移, 并进一步验算路面强度<sup>[1]</sup>。由于路面具有较为复杂的结构组成, 一般情况下为层状结构支承在无限深的地基上, 再结合材料的非弹性质, 当求解其内力是往往会面对繁琐的数学或力学难题。解决的常规办法是采取适当的假设, 进一步优化路面体系的力学模型, 使结果更加精确, 最后进行必要的实验验证, 使理论和实践相辅相成。

### 2 路面力学的国内外研究进展

#### 2.1 国外研究进展

路面主要受到的是连续不断的荷载, 同时路面具有多种材料性能, 水泥混凝土路面可以看成线弹性

体, 其它材料诸如高温下的沥青混凝土大多具有粘性、弹性和塑性, 和各向不均一性。所以, 对路面体系的系统分析是一个艰难的过程。建立一种关于路面体系的力学模型, 是科学有效地解决实际问题的途径, 但若是仅仅建立一个丰富综合的力学模型以分析路面体系的内力, 难免会产生过于复杂以至于没有精确解的情形, 但若像早期全部采用经验法, 又难免粗略和有一定局限。

十九世纪中期, 一些力学理论在路面体系中的作用已初见成效, 如赫兹在 1884 年提出的液体支承板, 布辛尼斯克在 1885 年提出的半空间弹性课题, 这些理论在五十年代有着广泛的推广和认可。在数学和弹性力学持续发展的带动下, 到 21 世纪 40-50 年代, 路面力学理论的步伐迈出了一大步, 较为突出的有 1938 年霍格 (A.H.AHogg) 做出的弹性地基上无限大板的解, 1945 年 B.M.Bumrister 对双层和多层体系应力和位移计算的理论解, 这些理论的出现极大的促进了柔性和刚性路面设计的进程<sup>[2]</sup>。

近年来, 不仅是弹性多层体系的发展, 粘弹性体系的研究、非轴对称课题的研究, 以及采用有限元技术(有限元、有限条、有限环)处理层状体系板、非线性弹性材料都取得了一定程度上的进展。

## 2.2 国内研究进展

自 1962 年起, 我国为开展柔性路面设计方法的研究, 着眼于收集和学习国外多年来在路面力学计算方面的论文。1964 年, 同济大学公路工程研究所在中国科学院计算技术研究所的配合下, 对双层和三层弹性体系在圆形均布垂直荷载下的应力和位移进行了较全面的计算, 并于 1975 年付印发表。随后, 又开展了水平荷载作用下的应力和位移计算, 以便再通过迭加原理求出在垂直和水平荷载整体作用下的应力和位移值<sup>[3]</sup>。这些年, 以我国道路工程方面的科学家邓学钧、姚祖康、郭大智为代表的研究学者们取得了很多卓越的成绩。

## 2.3 对国内外研究进展的评价

(1) 沥青材料其实是粘弹性材料, 而现今国内路面实际设计分析中只涉及到路面材料的弹性性质。一个重要原因是在国内考虑各种性质的路面分析、设计尚处于萌芽阶段。需要健全此体系, 使路面设计方法进一步全面;

(2) 现在常见的路面力学模型通常为二维, 很少有涉及到三维的研究。二维模型只有对轴对称荷载情况下路面的应力和应变具有可靠的分析, 但是非轴对称待载的情形只有三维模型适用, 所以三维模型是今后研究的方向和趋势;

(3) 现在广泛应用的路面分析、设计软件主要以结构化程序设计理论为基础, 面向对象的设计与分析思想已经逐渐推广。面向对象的设计与分析思想以其数据封装性好、移植性好以及完美的人机交互界面而备受关注, 如果也采用面向对象的思想编写其内核会达到事半功倍的效果;

(4) 由于微机的广泛应用, 也推进了有限元法在某些弹性理论问题的应用, 再加上有限元法概念清晰、易懂好学, 适用性广泛, 很适合求解一般繁琐的路面力学问题, 例如非轴对称路面力学模型的分析;

(5) 70 年代至今, 该领域很多研究学者的研究焦点放在以材料的粘弹性或流变性质为核心的路面的设计上。因为高温下的沥青路面材料在载荷作用下具

有明显的应变滞后和应力松弛现象。所以, 考虑时间和温度两方面影响, 对沥青面层的高温季节的稳定性验算有积极的作用, 例如 SHELL 设计法, AI 设计法等, 对于我国的柔性路面设计尚未涉及到该方面。

## 3 柔性路面力学模型

通常情况下, 柔性路面的力学模型分为静力平衡原理、弹性半空间理论及层状体系理论三种<sup>[4]</sup>。

### 3.1 静力平衡原理

古典柔性路面设计方法主要以静力平衡为理论基础, 是 Downs 于 1933 年通过麻省公式分析得到的。可进一步分为集中荷载平衡原理和均布荷载平衡原理。

### 3.2 弹性半空间理论

在现实的路面力学分析中, 通常将柔性或刚性路面的土基均认为是弹性半空间体。对于柔性路面的力学分析, 也经常将其结构看成弹性半空间体, 可采用弹性半空间理论分析路面结构受到荷载后的应力和位移。

### 3.3 多层体系理论

柔性路面由多层路面结构材料组成, 因此层状体系模型适用于柔性路面分析和设计, 然而, 繁琐的数学公式和计算过程严重阻碍了工程中多层理论的施用。经过研究学者的努力, 三层体系板轴与层界面交点的垂直应力及径向应力一览表被提出, 极大加快了柔性路面设计的研究步伐<sup>[5]</sup>。之后, 相应的解析式进一步展开到适用于参数更大的范围。

### 3.4 模型评价

(1) 弹性半空间理论也存在某些限制, 通常体现在经弹性半空间理论所得到的数值方向的理论值, 即路面力学中所要表达的弯沉值与实际通过 FWD 仪器所测试得到的大量真实的弯沉值相比大多较小, 同时存在着一些误差;

(2) 因为多层体系理论假设最下层为向下无限深的半无限体, 其不足之处是它假设面层在水平方向无长度限制, 故只局限于板中受荷状态, 要有效解决这一不足, 多种路面结构和荷载的选择不失可行性。

## 4 柔性路面力学计算中的必要考虑

由于路面力学主要用来定量研究路面变形、应力及破坏规律。如路面弯沉、各层底部的最大应变、应力以及抗变形能力指标一回弹模量。由于路面材料、结构及受载方式的复杂性,因此部分指标难以明显求得,故需要切实把握柔性路面力学中的相关因素考虑。

(1) 反映路基路面材料力学性能的本构模型及其参数的选取。通常接触到的本构模型有线性及非线性弹性模型、弹塑性模型以及粘弹性模型等。每个模型都与一组本构参数相对应。模型的选取及其参数的选择都要由实际问题进行确定;

(2) 路面结构的几何模拟。路面除分层外,还有很多需要完善的地方,如人为和非人为的各种形式的裂缝或层间常存在的节理。如何更精确的模拟这些缺陷是需要完善的方面;

(3) 物理过程本身性质的分析。如加卸载过程分析,是静载、动载还是周期载荷。需结合具体的路面变形与损害,对部分问题进行相应的分析;

(4) 路面的变形和应力分布与路基情况紧密相关。路基土的刚度与强度比路面材料的低很多,最好用非线性弹性模型或弹塑性模型来模拟车载作用下路基的变形,最常用的非线性弹性模型是 Duncan-Chang 模型。

## 5 展望

(1) 在数学和力学持续发展的驱动下,加之高效率计算机的应用,更加完善的力学模型将被研究出,以进一步使理论与实践相呼应,然而不管是有限元解或解析解,其各自所得的结果难免会有一定程度的误差,仍需要根据实测值作出必要的修正;

(2) 在细观层次上建立数值模型,对柔性路面力学进行试验研究和数值模拟,有效综合连续介质力学、损伤力学与计算力学,并利用细观力学方法,使路面微观结构与宏观力学特性相契合;

(3) 在实践中,可以发现像土体和沥青类材料具有明显的非线性变形状态。当采用了线性弹性力学后,必然通过试验纳入各种修正和附加系数,即使这样,还往往克服不了种种矛盾。因此,进一步研究非线性弹性力学在路面设计中的应用是今后的研究方向;

(4) 目前发展较为完善的线弹性断裂力学较适用于脆性破坏的材料和结构。对于水泥混凝土路面及各种半刚性基层路面的破坏,以及沥青混凝土面层纯融季节的加载折裂和冬季缩裂,特别是多次重复下的疲劳破坏,如果采用断裂力学理论,将会得到新的解释和结果。

## 6 结论

在路面力学长时间的发展进程中,尽管某种程度上来看有所收获,但仍有不少问题需要进一步深入探索。路面力学计算之前应有效将复杂的实际问题合理简化,并确定与之适应的几何模型,此外,所建几何模型的恰当与否与计算精度密切联系。同时运用适当的数学理论与有关的模型进行综合,以起到模型优化的目的。路面力学的把握作为路面设计的重要基础,需要我们投入更多的精力和时间持续不断地进行开拓和挖掘,以形成一套完全成熟的路面力学理论。

## References (参考文献)

- [1] 朱孔源.车辆—柔性路面力学相互作用系统的研究[D]. 中国农业大学, 2002.
- [2] 朱耀庭.半刚性基层沥青路面粘弹性有限元分析[D]. 南京林业大学, 2008.
- [3] 李冬发.半刚性路面动态荷载响应的分析研究[D]. 湖南大学, 2009.
- [4] 吕惠卿.水泥混凝土路面力学性能研究综述[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2005(6):64-67.
- [5] 朱孔源.车辆—路面相互作用系统的研究现状和展望[J]. 西安公路交通大学学报, 2001(2):9-12.



**Subscriptions and Individual Articles:**

<b>User</b>	<b>Hard copy:</b>
Institutional:	800 (HKD/year)
Individual:	500 (HKD/year)
Individual Article:	20 (HKD)