

# 柔性路面基础动态有限元分析

刘升传, 王连俊

(北京交通大学, 北京市 100044)

**摘 要:** 该文综述了前人所作的工作内容, 并借鉴了其研究方法。详细论述了动荷载下柔性路面基础动力响应有限元分析, 分别介绍了建立路基响应计算模型的步骤、数值模拟计算、有限元模型建立、有限元网格细化研究、材料特性和本构关系及计算结果分析, 最后给出了研究结论。

**关键词:** 动力响应; 有限元分析; 本构关系

**中图分类号:** U416.221 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-7716(2007)02-0016-04

## 0 引言

路面结构的力学分析是路面设计的一项重要内容, 理论设计方法、力学模型的建立与路面动力特性分析更是处于核心的地位。目前, 世界上许多国家把路面结构简化为弹性半空间地基上的线弹性层状体系, 并采用静态方法进行求解。然而, 实际行车荷载是动荷载, 目前先进的路面无损检测设备 FWD(落锤式弯沉仪)对路面施加的也是脉冲荷载, 因此, 静态分析方法与实际路面结构的受力状态有一定的差距, 加之动态荷载作用下路面材料的行为表现也远非线弹性。基于动力学理论的路面结构分析是路面设计方法进一步发展的必由之路, 也是路面长期性能研究的关键理论问题之一。Zaghoul 和 White(1993)的 ABAQUS 分析考虑了几个柔性路面问题的现实条件, 采用了 3D 分析, 荷载模拟成动荷载<sup>[2]</sup>。W. Uddin 等(1997)采用三维有限元模型, 模拟 FWD 作用于沥青路面表面, 分析了荷载大小、加载时间等因素对路表弯沉的影响<sup>[3]</sup>。在国内, 黄晓明(1990)对路面结构在特定动荷载作用下的一般响应进行了理论分析<sup>[4]</sup>; 邓学钧等(1995)把半无限弹性层状体系在空间上离散成有限元和无限元, 得到了半波正弦荷载作用下层状体系动态反

应的理论解<sup>[5]</sup>。

本文用有限元方法, 对动荷载下柔性常规路面基础动力响应进行了分析。文中把粒状基层考虑成弹性完全塑性模型(Drucker-Prager)、路基作为弹塑性应变硬化模型(CamClay), 进行了 3D 动力有限元分析。

常规柔性路面系统见图 1。

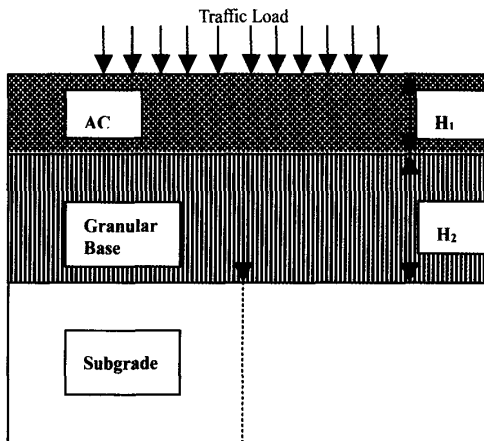


图1 常规柔性路面系统

## 1 有限元模型建立

尽管 3D 有限元分析需要相当多的计算时间, 对计算机内存的要求也很高, 但仍认为要优于 2D 有限元分析, 能更好的反映交通荷载下的复合路面系统材料的复杂特性。

(3) 实行水价改革, 抑制过度消费。

(4) 要加大计划用水特别是取用地下水的用水户的计划用水管理力度, 尤其要加大地下水保护区的计划用水力度。

(5) 加大城市污水回用、中水利用力度。

(6) 加强节水科研工作, 搞好节水技术推广。

(7) 强化取水许可管理, 严把入口关, 落实节

水“三同时”制度。

(8) 建立节水基金, 支持节水事业。建立节奖超罚的激励机制。

(9) 加强基础工作, 强化监督检查, 加大节水型社会建设力度。

(10) 进一步强化计量管理工作, 继续完善目前辽宁省实施的取水计量远程监测(控)系统建设。

收稿日期: 2006-08-30

作者简介: 刘升传(1978-), 男, 山东人, 博士, 从事路基沉降监测和变形研究工作。

由于在水平  $x$  轴和  $y$  轴几何和加载的对称性,仅采用了图 2 所示的四分之一模型。模型区域必须足够大,以避免边界误差,必须建立合理的模型维数,以使问题易于计算和存储。图 2 中模型深度为 2.5 m,这是为了保持同一个网格退化,监测路基顶部的最大垂直应变变化和 AC 层底部的最大疲劳应变变化。模型深度直到这些变化被认为可忽略时为止。由此选择的模型为 2.5 m 深、2.5 m 宽、3 m 长,见图 2。

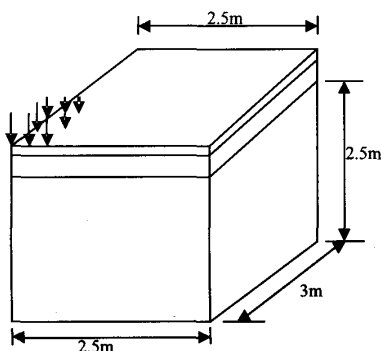


图 2 有限元模型几何形状

### 1.1 边界条件

采用常规运动学边界条件,如网格的所有四个垂直边界采用滚轴支撑,并在网格底部采用固定支撑。

### 1.2 加载系统

本文只考虑了单个车轮荷载,即 80 kN 的单轴荷载。采用的 3 D 有限元分析中,接触压力的分布假定是统一的 550 kPa,轮胎痕迹的形状可看作是长度为  $L$  的圆角矩形。

$$L = \left( \frac{A}{0.5226} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中,  $A$  为接触面积,可转化为等效的长  $L=372.6$  mm 和宽  $B=194.7$  mm 的矩形。本文的数值模型取  $L=406.4$  mm,  $B=177.8$  mm。

当车辆行驶在高速公路时,轴向和径向应力变化短时间内可认为是应力脉冲。这些脉冲的大小、形状和周期随车轮荷载、速度及在路面的深度而变化。当荷载直接作用在给定点上,该点应力达到最大值;而荷载距离该点相当远时,应力为 0。因此认为应力波为正弦曲线或三角形波是合理的。本文采用了峰值为 40 kN 的三角应力波,周期为 0.1 s。

有限元网格划分见图 3。

静力分析得到最大垂直表面弯曲,可以进行动力分析,用 ADINA 中的隐方式实现。Bathe

(1996)详细介绍了动力分析的方法技术,通过静力和动力分析结果对比中发现,动力分析得到的路面最大垂直表面弯曲比相应的静力分析结果小几乎 50%,这是动力分析所期待的,因为惯性力、耗散力和内力吸收了外力所做的功。而静力分析中,只有内力吸收了外力做的功,导致更大的位移。

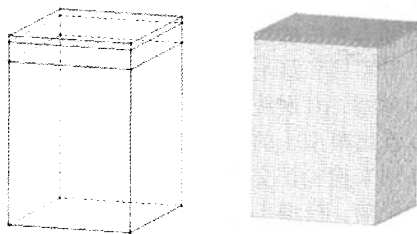


图 3 有限元网格划分

## 2 材料特性和本构关系

### 2.1 沥青混凝土层

沥青混凝土层的竖向永久变形在总的表面变形中作用不显著,尤其对于中等荷载。总的表面变形主要是由路基和基层引起的变形。因此没必要对该层采用更好的粘弹性模型,因为这需要繁重的试验,占用大量的计算时间和内存。所以为简化起见,本文认为该层是线弹性材料。考虑到反映交通荷载波的三角波的相对较小的持续时间,这种假设是合理的。

### 2.2 颗粒基层

Tutumluer 和 Thompson (1997)<sup>[8]</sup>认为非结合颗粒材料具有正交各向异性或横向各向同性。本文采用线弹性正交各向异性模型 (LECI) 表示颗粒材料。Drucker-Prager 和 Mohr-Coulomb 模型等弹塑性模型是代表弹塑性土和颗粒材料特性的最简单模型。除了可以模拟颗粒材料的非受拉特性和静水灵敏度响应,这些模型还能反映颗粒材料的其它一些重要特性,如低应力水平的弹性响应、高应力水平的塑性响应、接近破坏的小材料刚度、破坏条件和屈服后的弹性卸载 (Baladi 和 Chen 1985)。由于 Mohr-Coulomb 模型的屈服面的至高点不易收敛,相关的塑性准则不满足,因此 Drucker-Prager 模型在数值计算上更易处理。

### 2.3 路基

本文中,路基用修正的剑桥模型 (CamClay model) 模拟。剑桥模型可以模拟正常固结或超固结状态下的应变硬化、软化及静水压力下的弹性体应变的非线性依赖性,还可反映完全塑性即体

应力或有效应力不变时,塑性剪切仍在继续时的临界条件。

3 基础材料特性的影响

用三个设计标准即沥青混凝土层底部的最大张应变  $\epsilon_t^{\max}$ 、用传递到路基顶部的最大垂直压应变  $\epsilon_v^{\max}$ 和加载区域中心的最大垂直表面弯曲 $\Delta_z^{\max}$ ,来检验本文采用的基层及路基的本构特性对路面系统材料动态响应的影响。

对基层和路基不同的本构模型,建立了四个不同模型,AC 层统一用线弹性模型,如表 4 所示。可以看出模型 1 的所有层均采用线弹性模型。模型 2 用来检验正交各向异性的基层特性对路面响应的影响。模型 1 和模型 2 中路面系统均假定表现为弹性变形,而实际上在外加荷载下,会产生相当大的塑性特性。因此当路面表现为塑性响应时,应采用表 1 中的分析 3 和分析 4。

从分析 1 和分析 2 得到的结果看,LECI 基层特性与各向同性线弹性模型(No.1)引起车辙应变

增加 17%相比,仅使疲劳应变增加 4.3%,垂直表面弯曲增加 2.5%。而分析 3 的结果表明,弹塑性颗粒基层特性对车辙应变增加 46%有很大影响,传递到沥青层底部的最大张应变(疲劳标准)增加了 28%,最大垂直表面弯曲增加了 30%。因此从分析结果中可以看出,弹塑性颗粒基层模型比相应的弹性模型能得到更保守的结果。分析 4 表明,对粉沙路基,弹塑性应变硬化特性(模型 4)对疲劳标准影响不大(小于 1%增长),对垂直表面弯曲也是如此,增长仅为 10%。另一方面,模型 4 得到的车辙是模型 1 的 5 倍。说明弹塑性应变硬化路基特性对路面的车辙响应有很大影响,比线弹性特性得到的结果更保守。

从图 4 不同计算步数和计算频率下列车荷载的路基变形图中可以看出,荷载圆圆心以下是路面结构内应力集度最大的位置。路面内部拉应力峰值通常出现在半刚性基层底面,其大小较静态荷载作用的情况明显偏小。且从计算结果中能得到下列结论:

表 1 基础本构模型和动力分析结果

模型	本 构 模 型			$\epsilon_t^{\max}$	$\epsilon_v^{\max}$	$\epsilon_z^{\max}$
	AC	Base	Subgrade			
1	LE	LE	LE	1.70879E-04	-5.04810E-04	-0.202250
2	LE	LECI	LE	1.78296E-04	-5.92834E-04	-0.207847
3	LE	EPP(DP)	LE	2.18370E-04	-7.37514E-04	-0.262130
4	LE	LE	EPSH(CC)	1.72379E-04	-3.02363E-03	-0.222962

注:LE=Linear elastic; LECI=Linear elastic cross-anisotropic; EPP=Elastic perfectly plastic; DP=Drucker Prager; EPSH=Elastoplastic strain hardening; CC=Cam Clay; AC=Asphalt concrete。

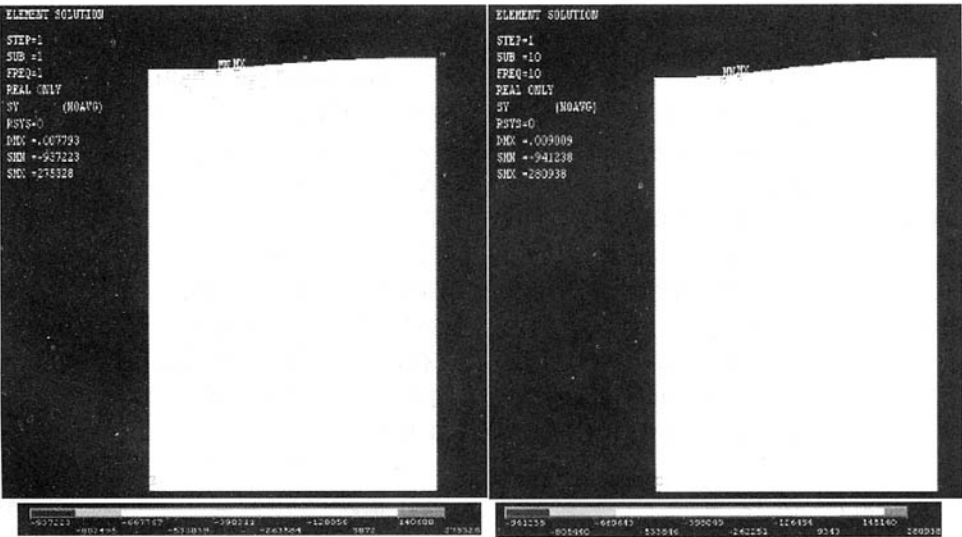


图 4 路基动应力变化

(1)路基材料的性质对疲劳应变的影响很小,不到1%。

(2)路基性质对车辙应变的影响很大,对弱基层来说,当粘土路基变为粉沙路基时,车辙应变减少57~60%;对强基层材料,减少55~68%。

(3)对厚基层,基层性质由弱到强时,疲劳应变减少31%;而对于薄基层,减少13%。

(4)路面系统采用强基层时,当其厚度由304.8 mm减少到152.4 mm,引起疲劳应变 $\epsilon_f^{\text{max}}$ 增加38%。

(5)对车辙应变,基层厚度减少会引起车辙应变的不断增加,对粘土路基采用强基层时,增加50%;对粉砂路基弱基层仅增加6%。

#### 4 结论

路基路面材料的力学性质将影响整个结构体系的动力特性,从而进一步影响行车荷载作用下路面的响应。为此,本文建立了一个基层路基在动荷载作用下的有限元计算模型,对有限元网格划分和不同的材料本构关系进行了仔细而深刻的分析,实际计算结果也证明了这些工作对计算精度

的重要性。当然,其中的一些计算参数还需要进一步去研究确定。本文的结论可为工程施工提供依据。

#### 参考文献

- [1]ADINA (2001). ADINA-finite element computer program[Z]. theory and modeling guide, Vol. 1, Report ARD 1-7.
- [2]Zaghloul, S. M., White, T. D. Use of a three-dimensional, dynamic finite element program for analysis of flexible pavement[Z]. Transportation Research Record, 60-69.
- [3]UDDIN, PANZ, NOPPAKUN, et al. Finite element dynamic analysis of distressed asphalt pavements. Proceedings of ICAP [C]. Washington, 1997.
- [4]黄晓明.路面结构在动荷载作用下的力学分析[D].南京:东南大学,1990.
- [5]邓学钧,黄晓明,沈伟新.弹性层状体系的动力响应分析[J].土木工程学报,1995,28(3).
- [6]郝大力,王秉纲.路面结构动力响应分析[J].长安大学学报(自然科学版),2002,3(3).
- [7]侯芸,孙四平,郭忠印.移动荷载下刚性路面响应的参数影响分析[J].同济大学学报,2003,1(1).
- [8]Bassam Saad, Hani Mitri, Hormoz Poorooshasb. Three-Dimensional Dynamic Analysis of Flexible Conventional Pavement Foundation[Z]. JOURNAL OF TRANSPORTATION ENGINEERING, 2005.

## 成都首个地铁站全部完工

成都首个正式开建的地铁站——南三环站1月11日宣布主体全部完工。接下来将对该站封顶路面防水以及回填土方,今年4月底前完成整个路面铺设,同时增加风景。

作为成都第一个对外招标的地铁工程,南三环站北接火车南站、南临新益州站,设计使用年限将达到100年,工程的抗震等级、防水等级、耐火等级、人防等级均为一级。

南三环站站台内区间的结构为单层双跨矩形框架结构,中部还有隔墙和梁柱,区间左右顶部每隔32 m设置了风道,共4条通风道用于通风和排放污气。4个出入口分别位于车站4个角,其中2、3号出入口连接高新区管委会和法院,1、4号出入口连接和记黄埔地产及新华职中等。

地铁南三环站于2005年12月28日正式开建,车站总建筑面积达到6 671.51 m<sup>2</sup>。南三环站位于高新区南都西路,距离东西方向的武侯大道及南三环路约500 m,为地下一层侧式站台车站。该线路全长1 031.75 m,其中车站长145.2 m,宽36.8 m,最深处约15 m,两区间总长886.55 m。