

文章编号: 1002-0268 (2011) 05-0044-05

交通荷载作用下公路路基动力特性的数值模拟研究

陈 剑¹, 苏跃宏²

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

2. 内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 根据交通荷载的特性, 应用 ABAQUS 有限元软件进行数值模拟, 将交通荷载作用下的公路路基简化为三维立体模型, 采用拟静力法来分析动态的数值问题, 分别以静荷载、移动恒定荷载和正弦荷载的形式模拟交通荷载。从现有的弹塑性土体本构关系入手, 建立路基土有限元模型, 通过模型参数的确定, 对路基土在交通荷载作用下的动力响应进行数值分析和计算, 从而得到了路基土在交通荷载作用下的动力特性。结果表明, 荷载沿道路平面方形的影响范围为 8~10 m, 沿路基深度方向为 6~8 m。移动荷载作用下, 道路结构的动力响应较静荷载的有所增加, 塑性应变增幅显著; 正弦荷载作用下, 道路结构的动力响应与移动荷载的相比变化不大, 且车速对结构的响应影响不大。

关键词: 道路工程; 公路路基; 数值模拟; 动力特性; 交通荷载

中图分类号: U416.1 文献标识码: A

Numerical Simulation of Dynamic Performance of Highway Subgrade under Traffic Loads

CHEN Jian¹, SU Yuehong²

(1. School of Transportation Science and Engineering Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150090, China)

2. School of Civil Engineering Inner Mongolia University of Technology, Hohhot Inner Mongolia 010051, China)

Abstract According to the traffic load characteristics, the numerical simulation was carried out using the finite element software ABAQUS to simplify the subgrade under traffic load to a 3D model. The dynamic parameters of traffic loads including static load, moving constant load and sinusoidal load were simulated and analyzed by adopting pseudo static method. By using the existing constitutive relation of elasto-plastic soil, the finite element model of subgrade soil was established. By determining the parameters of model, the numerical analysis and computation of the dynamic response of the subgrade soil under traffic load were carried out, thus the dynamic performance of the subgrade soil under traffic load was obtained. The results show that (1) the effect of loading on the road surface ranges from square of 8 m × 8 m to 10 m × 10 m, and the effect along the direction of the subgrade ranges from depth of 6 m to 8 m; (2) under moving load, dynamic response of pavement structure is larger than the response under static load, and the plastic strain increases significantly; (3) under sinusoidal load, the dynamic response of pavement structure changes little compared to that under moving load, and the effect of vehicle speed on the response of the structure is small.

Key words road engineering; highway subgrade; numerical simulation; dynamic performance; traffic load

收稿日期: 2010-10-15

作者简介: 陈剑 (1980-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士研究生, 从事水泥混凝土研究。(chenjian462@yahoo.com.cn)

0 引言

路基是道路工程的重要组成部分, 是道路的承重主体。无论是公路路基还是轨道路基, 都承受着路面传来的车辆荷载和路面的自重。路基质量的好坏, 直接影响到路面或轨道的使用质量, 在其上部荷载的作用下, 路基将产生过量的残余变形, 表现为较大的工后沉降、不均匀沉降并开裂, 且逐步反应到路面。路面的损坏往往与路基排水不畅、压实度不够、强度低、沉降或不均匀沉降过大等有直接关系, 从而不能满足车辆能以一定的速度、安全、舒适而经济地在道路上运行, 不能提供良好的行驶条件和服务水平^[1-3]。

交通荷载作用下路基动力响应及路基路面的沉降变形, 一直是工程界普遍关心的问题, 也是学术和科研人员长期以来的重点研究课题。近年来, 我国高速公路建设取得了突飞猛进的发展。高速公路建设的快速发展, 要求公路建设者们不断提高高速公路的设计和建设水平。我国现行的公路路基路面设计理念均是基于静力学理论, 这种按静力学的设计方法与路基路面在动荷载作用下动力响应的真实情况有很大的差别, 特别是在高速重载情况下, 交通荷载明显表现为一种动力荷载, 将其对路基的作用仅用静力近似替代显然存在不足。随着我国国民经济和交通运输事业的发展, 公路交通流量、汽车行驶速度和载重量均不断增加, 交通荷载对路基的影响也越来越大。因此, 路基设计理论由单一的静力学方法向包含动力学方法发展已势成必然^[4]。

1 车辆-道路动力特性的研究概况^[5-6]

车辆与道路之间相互作用的分析和研究已经受到人们的重视, 世界各国特别是西方国家已在这方面开展了许多的理论研究工作, 如美国 1987 年投资 1.5 亿美元用于开展 SHRP 计划, 1993 年结束后, 国会又追加 7 亿美元用于路面长期性能观测, 而这些资金大部分用于车辆与路面相互作用的研究, 即路面动态性能的研究。这些研究工作不仅为人们搞清楚车辆对路面作用提供一些特征, 而且更重要的是, 通过理论分析和研究提出了减小对路面损伤的一些措施和方法, 充分发挥它们的功能, 节省费用, 以获得良好的经济效益。

在我国, 关于车辆与路面相互作用的研究并不多。道路方面的研究工作主要从路面力学的角度出发, 将车辆视为一个静止的荷载去分析路面设计中

的一些问题, 对车辆动载以及由此引起的路面动力反应却很少考虑。而从事车辆动力学研究的工作人员, 也一般只是把道路作为一种随机分布的外界激励, 很少涉及车辆运动过程中对道路的作用及损伤的研究。

2 交通荷载在 ABAQUS 中的模拟实现

2.1 移动荷载的模拟

当汽车在路面上行驶时, 路面受到复杂的竖向力和水平力的共同作用。为了将问题简化, 在汽车正常行驶时, 假设汽车轮载为垂直均布矩形荷载, 分布面积为 $0.30\text{ m} \times 0.24\text{ m}$ ^[7], 暂不考虑水平荷载的影响。模型沿水平方向取 $11.25\text{ m} \times 12.0\text{ m}$, 深度方向取 8.55 m 。荷载接地压力取 0.7 MPa 。道路结构组成示意图如图 1 所示。

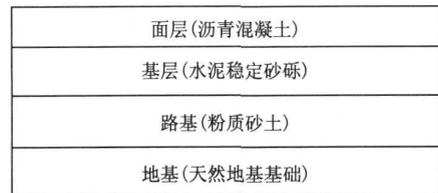


图 1 道路结构组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of road structure

为了在 ABAQUS 软件的计算过程中实现荷载的移动, 首先沿荷载移动方向设定荷载移动带, 移动带沿路横向的宽度与施加的均布荷载宽度相同, 沿路纵向的长度即为轮载行驶的距离。然后, 将荷载移动带细分成许多小矩形, 每个小矩形大小为一个双轮组车轮的接地面积, 即 $0.30\text{ m} \times 0.24\text{ m}$, 如图 2 所示。初始状态荷载占了 1 个小矩形的面积即图 2 中的阴影部分。移动过程中, 荷载沿移动带匀速向前移动, 通过设置多个荷载步, 每个荷载步结束时, 荷载整体向前移动 1 个小矩形面积, 如荷载步 1 结束时, 荷载占据荷载步 2。荷载移动的速度, 可以通过设置每个荷载步的时间大小来实现。正常行驶时, 行驶速度 v 不变, 所以经过每个小矩形所用的时间都是相同的。

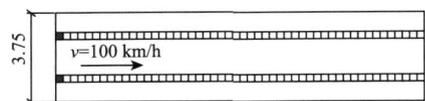


图 2 荷载移动带划分图

Fig. 2 Subdivision of load moving strip

2.2 正弦荷载的模拟

本文采用的汽车荷载模型, 是将车辆振动荷载模

拟成一种简单正弦荷载。同样假定汽车轮载为垂直均布矩形荷载,分布面积为 $0.30\text{m} \times 0.24\text{m}$,暂不考虑水平荷载的影响。模型沿水平方向取 $11.25\text{m} \times 12.0\text{m}$,深度方向取 8.55m ;荷载接地压力取 0.7MPa ,本文采用的正弦波动荷载的表达式为^[8-9]:

$$P = P_0 + P_1 \sin(\omega t),$$

式中, P_0 为汽车静载荷,后轴单侧双轮承受荷载; P_1 为振动荷载幅值, $P_1 = M_0 \mu \omega^2$; M_0 为簧下质量; μ 为路面几何不平顺矢高(按国际高速公路平整度指数取值); ω 为振动圆频率; v 为汽车行驶速度; L 为几何曲线波长。

荷载计算参数见表 1,荷载幅值随时间变化曲线如图 3 所示。

表 1 正弦荷载计算参数

Tab 1 Calculation parameters of sinusoidal load

计算参数	P_0 / kN	$\omega / (\text{s}^{-1})$	$M_0 / [(\text{N} \cdot \text{s}^2) \cdot \text{m}^{-1}]$	μ / mm	L / m
取值	50	$2\pi v / L$	250	2.00	6.0

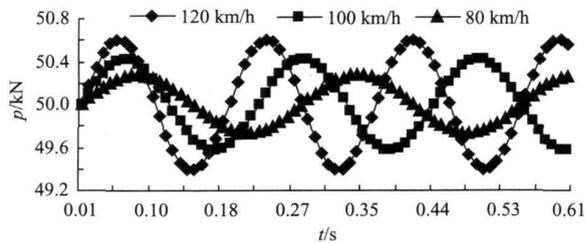


图 3 正弦荷载的幅值随时间变化曲线

Fig 3 Amplitude of sinusoidal load changing with time

从图 3 可以看出,正弦荷载的幅值受行车速度影响,车速越快幅值越大,正弦荷载的周期也受行车速度影响,速度越快周期越短。

3 公路路基在交通动荷载作用下的动力特性分析

3.1 有限元模型的建立

3.1.1 模型的基本假定

为使有限元模拟分析即符合客观实际又便于研究,现引入以下基本假定:

(1) 假定交通荷载作用下道路面层和基层材料是完全弹性的,路基土体变形符合弹塑性小变形假设;

(2) 假定道路各层之间变形连续,不发生相对滑移,也不产生相对分离;

(3) 假定路基的初始应力主要是土体的竖向自重应力和侧向静止土压力;

(4) 假设在每次加载过程中,路基的弹塑性参

数保持不变。

3.1.2 模型的建立

由于道路结构沿道路中线方向为对称结构,因此本文模拟半幅道路结构,建立三维有限元模型。路基顶面宽度为 13m ,路基深度为 8m ;路面总厚度为 0.55m ,其中面层为上中下 3 层沥青混凝土,厚度为 0.15m ,基层为 2 层水泥稳定碎石,厚度为 0.4m ;模型沿路线中线方向取长度为 18m ;模型横向为 X 轴,竖向为 Y 轴,沿路线中线方向为 Z 轴。

材料计算参数见表 2,汽车在道路中间行车道上行驶,后轴重 100kN ,速度为 $80 \sim 120\text{km/h}$,荷载分别采用静载、移动恒载和正弦荷载的形式进行模拟。

荷载采用标准轴载,根据规范^[10]规定,标准轴载为 100kN ,轮胎着地压力取轮胎内压为 0.7MPa ,单轮着地当量圆直径为 0.213m ,双轮着地面积为 0.0713m^2 ,为方便建模,采用 $0.3\text{m} \times 0.24\text{m}$ 的矩形框^[7],以均布荷载的形式施加在小矩形框内。

表 2 路基路面材料计算参数

Tab 2 Calculation parameters of materials of pavement and subgrade

结构层	材料名称	E / MPa	μ	C / kPa	$\varphi / (^\circ)$	$\gamma / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
面层	沥青混凝土	1300	0.25	-	-	2400
基层	水泥稳定砂砾	1100	0.25	250	40	2200
路基	粉质砂土	50	0.35	5	10	1800

模型长度 (18m) 为正弦荷载的 3 个波长,边界条件为: 3 个侧面约束水平方向的变形,底部固结,路基边坡面为自由边。层间相互作用采用面面接触,切线方向无相对滑动,法线方向不发生分离。为减小边界效应的影响,荷载加在沿 Z 轴方向 $6 \sim 12\text{m}$ 处;网格划分以六面体为主,面层网格划分为 $0.24\text{m} \times 0.3\text{m} \times 0.15\text{m}$,基层网格划分为 $0.3\text{m} \times 0.3\text{m} \times 0.2\text{m}$,路基网格划分为 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.3\text{m}$,单元类型为线性单元,缩减积分。分析方法采用拟静力法。

3.2 静荷载作用下道路结构的动力响应

模型中只考虑竖向荷载作用,本文对正弦荷载对应的 26 个荷载步分别进行静载模拟,从而得到不同位置的静载效应,最后同移动恒载和正弦荷载作用下的结果进行比较,分析路面结构的动力响应和路基材料的塑性变形特性。图 4 为静载作用下竖向应力、应变和位移随深度增加的变化曲线(第 13 荷载步)。图 5 为静载作用下竖向应力、应变和位移随距荷载中心距离的变化曲线(第 13 荷载步)。

说明: 图 4 图 5 中竖向应力 S_{22} 值单位为

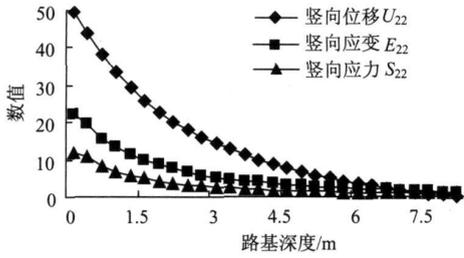


图 4 竖向应力、应变、位移随深度增加变化曲线
Fig. 4 Vertical stress, strain and displacement changing with depth

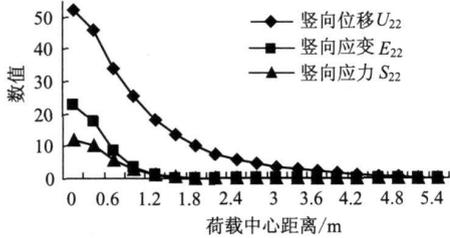


图 5 竖向应力、应变、位移随距荷载中心距离的变化曲线
Fig. 5 Vertical stress, strain and displacement changing with distance to loading center

[$\times (-10^3 \text{ Pa})$]; 竖向位移 U_{22} 值单位为 [$\times (-10^{-5} \text{ mm})$]; 竖向应变 E_{22} 值为 [$\times (-10^{-5})$], 无单位。

从图 4 图 5 可以看出, 随着路基深度的增加和距荷载中心距离的增大, 竖向应力、竖向应变、竖向位移, 均呈指数衰减趋势。同路基顶面相比, 路基底面的竖向应力 (S_{22}) 减小了 92.63%, 竖向应变 (E_{22}) 减小了 94.80%, 考虑路基底面全约束的影响, 在路基深度为 6 m 处竖向位移 (U_{22}) 减小了 92.87%。同荷载中心点相比, 距离为 9 m 位置的竖向应力 (S_{22}) 减小了 99.88%, 竖向应变 (E_{22}) 减小了 99.94%, 考虑路基侧面约束的影响, 在距离为 6 m 处竖向位移 (U_{22}) 减小了 99.81%。

由此可以得到以下结论: 静荷载的影响范围, 沿道路平面方向为 8~10 m, 沿路基深度方向为 6~8 m。
3.3 移动恒定荷载和正弦荷载作用下道路结构的响应

模型中只考虑竖向荷载作用, 荷载以均布荷载形式在 26 个矩形框内匀速移动, 每个荷载步运行 0.008 64 s, 荷载运行总时间为 0.224 64 s, 最后得到各个荷载步在移动恒定荷载作用下的动力响应。

模型中荷载以正弦荷载的形式移动, 分别计算车速为 80、100、120 km/h 时, 正弦荷载作用下路基土的动力响应。

在移动恒定荷载作用下, 各塑性参数值随着荷

载步的增加和时间的延长均呈增大的趋势。一般情况下, 动荷载对路基的作用相对静载要更大一些, 尤其是对路基顶面的塑性应变具有非常显著的影响, 汽车行驶速对路基顶面的塑性应变的影响比较微弱。

3.4 计算结果分析

对于静荷载、移动恒定荷载和移动正弦荷载作用下, 对比分析竖向应力分量 S_{22} 、竖向应变分量 E_{22} 、竖向位移分量 U_{22} 的结果见图 6。塑性应变值 PE_{MAG} 、竖向塑性应变分量 PE_{22} 、等效塑性应变 PE_{EQ} 等参数的结果见图 7。

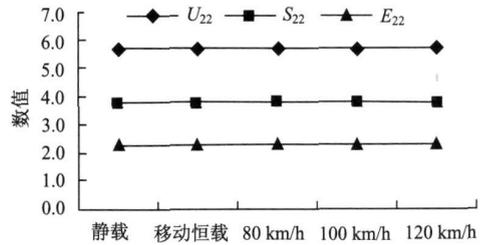


图 6 竖向应力、应变、位移值对比图

图 6 Comparison of vertical stresses, strains and displacements

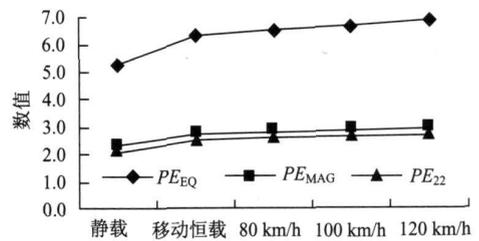


图 7 各塑性参数值对比图

Fig. 7 Comparison of plastic parameters

说明: 图 6 中竖向位移分量 U_{22} 的单位为 [$\times (-10^{-4} \text{ mm})$]; 竖向应力分量 S_{22} 的单位为 [$\times (-10^5 \text{ Pa})$]; 竖向应变分量 E_{22} 的数值 [$\times (-10^{-4})$], 无量纲。图 7 中等效塑性应变 PE_{EQ} 的数值 [$\times (-10^{-5})$], 无量纲; 塑性应变值 PE_{MAG} 的数值 [$\times (-10^5)$], 无量纲; 竖向塑性应变分量 PE_{22} 的数值 ($\times 10^{-5}$), 无量纲。

从图中可以看出, 移动恒定荷载作用下, 同静载情况比较, 竖向应力、竖向应变和竖向位移均有提高, 但增幅很小, 其中最大竖向应力 (S_{22}) 提高了 0.01%, 最大竖向应变 (E_{22}) 提高了 0.72%, 最大竖向位移 (U_{22}) 提高了 0.06%。但各塑性参数结果提高较为明显, 其中最大竖向塑性应变 (PE_{22}) 提高了 19.53%, 最大塑性应变值 (PE_{MAG}) 提高了 18.40%, 最大等效塑性应变值 (PE_{EQ}) 提高了 19.66%。

正弦荷载作用下, 同移动恒定荷载情况下比较, 最大竖向应力 (S_{22})、最大竖向应变 (E_{22})、最大竖向位移 (U_{22}) 数值均没有发生变化。各塑性指标数值虽然也有提高, 但增幅并不大, 其中, 最大竖向塑性应变 (PE_{22}) 提高了 5.23%, 最大塑性应变值 (PE_{MAG}) 提高了 5.23%, 最大等效塑性应变值 (PE_{EQ}) 提高了 5.42%。由此可以看出, 在正弦荷载作用下, 路基的塑性变形相对增大。

对于正弦荷载作用下而言, 当车速不同时, 最大竖向应力 (S_{22})、最大竖向应变 (E_{22})、最大竖向位移 (U_{22}) 均没有发生变化。随着车速的提高, 各塑性参数结果虽有提高, 但增幅并不大, 当车速从 80 km/h 提高到 100 km/h 时, 最大竖向塑性应变 (PE_{22}) 提高了 1.84%, 最大塑性应变值 (PE_{MAG}) 提高了 1.83%, 最大等效塑性应变值 (PE_{EQ}) 提高了 1.88%; 当车速从 100 km/h 提高到 120 km/h 时, 最大竖向塑性应变 (PE_{22}) 提高了 2.21%, 最大塑性应变值 (PE_{MAG}) 提高了 2.18%, 最大等效塑性应变值 (PE_{EQ}) 提高了 2.50%。由此可以看出, 车速的变化对路基塑性变形的影响是微弱的。

4 结论

(1) 同静荷载作用下相比, 在移动荷载作用下, 道路结构的应力、应变和变形均有所增加, 但并不明显; 而塑性应变增幅非常显著。

(2) 同移动恒定荷载作用下相比, 在正弦荷载作用下, 道路结构的应力、应变和变形没有发生变化, 路基的塑性应变有所增加, 但增幅并不大。

(3) 在正弦荷载作用下, 随着行车速度的增加, 道路结构的应力、应变和变形并不发生变化, 路基的塑性应变增幅也十分微弱, 故行车速度对路基的塑性变形的影响不是很大。

(4) 荷载作用的影响范围, 沿道路平面方向为 8~10 m, 沿路基深度方向为 6~8 m, 随着范围的扩大和深度的增加均呈衰减趋势。

(5) 移动荷载和正弦荷载作用下, 路基顶面的各塑性应变参数随荷载步的增加和时间的延长均呈现增大趋势。

(6) 浅层路基是路基相对薄弱的部位, 容易产生较大的累计塑性变形。

参考文献:

References

[1] 邓学钧, 张登良. 路基路面工程 [M]. 北京: 人民

交通出版社, 2004.

DENG XueJun, ZHANG Dengliang. Subgrade and Pavement Engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2004.

[2] 黄仰贤. 路面分析与设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.

HUANG Yangxian. Pavement Analysis and Design [M]. Beijing: China Communications Press, 1998.

[3] 黄晓明, 朱湘. 沥青路面设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.

HUANG Xiaoming, ZHU Xiang. Asphalt Pavement Design [M]. Beijing: China Communications Press, 2002.

[4] 徐毅. 交通荷载对高速公路路基影响的试验研究 [D]. 南京: 河海大学, 2006.

XU Yi. Experimental Study of Effect of Traffic Load on Expressway Roadbed [D]. Nanjing: Hohai University, 2006.

[5] 邓学钧, 孙璐. 车辆-地面结构系统动力学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.

DENG Xuejun, SUN Lu. System Dynamics of Vehicles-ground Structure [M]. Beijing: China Communications Press, 2000.

[6] 尤晋闽. 车辆对路面作用的动荷载研究 [D]. 西安: 长安大学, 2006.

YOU Jimin. Dynamic Load of Vehicles on Road [D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.

[7] 单景松, 黄晓明, 廖公云. 移动荷载下路面结构应力响应分析 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (1): 10-13.

SHAN Jingsong, HUANG Xiaoming, LIAO Gongyun. Dynamic Response Analysis of Pavement Structure under Moving Load [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (1): 10-13.

[8] 兰辉萍, 李德建. 高速公路路基的动力响应分析 [J]. 西部探矿工程, 2003, 15 (8): 160-162.

LAN Huiping, LI Dejian. Dynamic Response Analysis of Freeway Subgrade [J]. West-China Exploration Engineering, 2003, 15 (8): 160-162.

[9] 向坤山. 动载作用下半刚性路面动力响应的三维有限元模拟 [J]. 湖南交通科技, 2006, 32 (3): 53-55.

XIANG Kunshan. Dynamic Response of Rigid Pavement under Dynamic Loads by Three-dimensional Finite Element Simulation [J]. Hunan Communications Technology, 2006, 32 (3): 53-55.

[10] 中华人民共和国交通部. JTG D50-2006 公路沥青路面设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.

P. R. China Ministry of Communications. JTG D50-2006 Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement [S]. Beijing: China Communications Press, 2006.