

文章编号: 1002-0268 (2008) 10-0022-04

移动荷载作用下公路隧道 水泥路面结构力学分析

石春香¹, 杨 群², 郭忠印²

(1. 上海应用技术学院, 上海 200235; 2. 同济大学, 上海 200092)

摘要: 建立了公路隧道水泥混凝土路面结构的三维有限元分析模型, 运用桥梁工程中影响线求法中移动布载方式模拟车辆荷载在路面上真实的运动情况。讨论了不同荷载速度、不同基层模量和基岩模量对轴载移动到板中时板顶最大竖向位移和板底最大拉应力的影响。通过比较动态荷载与静止荷载作用下板底拉应力值和板顶竖向位移值得出, 对于公路隧道基岩强度比较大的情况, 板底应力动载系数近似为 0.5, 路表弯沉动载系数近似为 1.0。

关键词: 道路工程; 三维有限元; 水泥混凝土路面; 移动荷载; 动载系数

中图分类号: U416. 216

文献标识码: A

Mechanical Analysis on Cement Concrete Pavement in Highway Tunnel under Moving Load

SHI Chun-xiang¹, YANG Qun², GUO Zhong-yin²

(1. Shanghai Institute of Technology, Shanghai 200235, China;

2. Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Three-dimensional finite model of cement concrete pavement in highway tunnel was established. The true moving vehicle load on the slab was simulated by moving load step in solving the influence line of bridge engineering. The max tensile stress on the bottom of the slab and the max vertical displacement on the slab surface were also discussed considering the effect of structural factors such as load velocity, base stiffness and bedrock stiffness. Through comparing the max tensile stress on the bottom of the slab and the max vertical displacement on the slab surface under the static and the dynamic load, it was concluded that the dynamic coefficient of the stress on the bottom of the slab is 0.5 approximately and the dynamic coefficient of the displacement on the slab surface is 1.0 approximately.

Key words: road engineering; three-dimensional finite element; cement concrete pavement; moving load; dynamic coefficient

0 引言

目前国内外对路面结构的力学计算多以静止车辆荷载作用下的路面结构为研究对象, 这对荷载不大、车速较低的情况下基本上是合理的。然而, 在明显的运动荷载作用下, 静力荷载模式与车辆行驶过程中对

路面的实际作用之间的差异很大。目前对道路结构动力学的研究主要有两种方法: 一为解析法, 二为有限元法。解析法对多层体系的路面在动力荷载下的动力响应虽有一些理论研究, 但所得到的响应的精确解最多也只能对两层介质有效, 难以考虑复杂的三维边界条件和荷载情况。本文采用更符合实际情况的三维有

收稿日期: 2007-09-07

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目 (2002-318-000-23)

作者简介: 石春香 (1976 -), 女, 内蒙古四子王旗人, 副教授, 研究方向为道路和桥梁工程结构理论. (stone106106 @126. com)

有限元分析模型, 将车辆荷载看作以一定速度移动的面荷载, 运用桥梁工程中影响线求法中移动布载的方式模拟车辆荷载在路面上真实的运动状况^[1~3], 分析公路隧道水泥混凝土路面结构在车辆不同移动速度下水泥板设计荷位板顶竖向位移和板底拉应力的响应, 并讨论了基层和基岩模量对其的影响, 以掌握路面实际的结构响应情况, 从而对路面的结构性能和服务寿命有更为准确的把握, 也会对基于静止荷载的路面设计方法^[2,3]提供一定的指导。

1 结构模型及加载方式

结构模型与静力分析中所采用的单块板模型相同, 面层板尺寸取为 $3.75 \times 5.0 \times 0.26$ m, 模量为 30 000 MPa, 基层厚度定为 15 cm, 基岩厚度为 5 m。通过对不同尺寸、不同约束条件的三维有限元模型的分析比较, 采用如图 1 所示的公路隧道水泥混凝土有限元模型。其中, 水泥混凝土板、基层和基岩为线弹性材料。水泥混凝土板与基层、基层与基岩之间引入三维接触单元描述层间的接触状态^[4]。边界条件设为: 底面没有 z 方向位移, 左右两面没有 x 方向位移, 前后两侧没有 y 方向位移, 面层表面为自由面。让荷载从板边以不同的速度匀速运动到板中, 分析单轴双轮荷载沿单层板的 $Y = 0.0$, $X = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3, 1.5, 1.7, 1.9, 2.1, 2.3$ 运动到 2.5 m 处 (板中) 时设计荷位板顶竖向位移和板底拉应力, 轴载移动如图 2 所示。考虑的因素如表 1 所示。

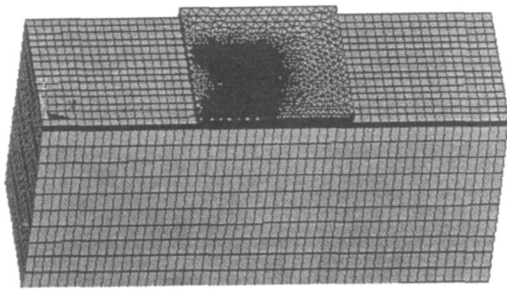


图 1 水泥混凝土路面有限元

Fig. 1 Finite element model of cement concrete pavement

表 1 分析因素

Tab. 1 Analyzing factors

基层模量/MPa	基岩模量/MPa	荷载速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
15 000	15 000	0
5 000	5 000	0.21
1 000	2 000	10.4
500	500	20.8

荷载选取了标准轴载 100 kN, 考虑了 4 种不同的

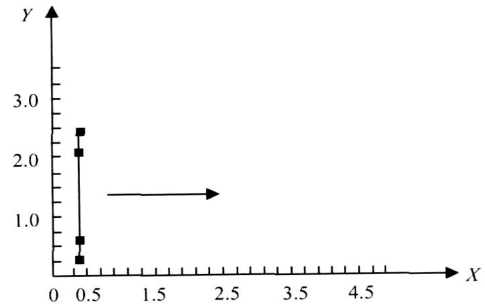


图 2 轴载移动示意图

Fig. 2 Moving axle load

速度水平: (1) 模拟车辆在隧道的水泥板中停止, 采用的速度为 0 km/h (0 m/s); (2) 模拟车辆在隧道中缓慢滑行, 采用的速度约为 0.76 km/h (0.21 m/s); (3) 模拟车辆以较低速度通过隧道, 采用的速度约为 38 km/h (10.4 m/s); (4) 模拟车辆以较高速度通过隧道, 采用的速度约为 76 km/h (20.8 m/s)。

2 计算结果分析

2.1 荷载速度对路面响应的影响

固定基岩的模量为 15 000 MPa, 基层模量 2 000 MPa, 考察不同荷载速度下轴载移动到板中时板顶最大竖向位移和板底的最大拉应力。计算结果如表 2 和图 3 所示。

表 2 不同荷载速度的结果

Tab. 2 Results of different load velocities

荷载速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	板底最大拉应力/MPa	板顶最大竖向位移/ μm
0	0.517	32.8
0.21	0.262	39.9
10.4	0.261	39.9
20.8	0.264	39.7

由图 3 (a) 可以看出: (1) 在荷载移动情况下, 荷载速度对面板底部最大拉应力的影响不大。(2) 静止荷载作用下的面板底部最大拉应力大于移动荷载作用下的面板底部最大拉应力, 且大约为 2 倍关系, 其动载影响系数可以取为 0.5。也即通过求得静止情况下的板中底面最大拉应力, 然后乘以 0.5 即为考虑动载时的板中底面拉应力。

由图 3 (b) 可以看出: (1) 荷载速度对临界位置表面最大竖向位移的影响也不大, 总体上荷载处于移动情况下的竖向位移高于静止荷载, 这与板在荷载作用下的竖向振动有关。(2) 不同速度下的竖向位移并非呈直线发展, 而且相差不是很大, 大约为 1 倍关系, 其动载影响系数可以取为 1.0。

2.2 基层模量对路面响应的影响

固定基岩的模量为 5 000 MPa, 考察不同基层模量下轴载移动到板中时板顶最大竖向位移和板底的最

大拉应力。计算结果如图 4 所示。

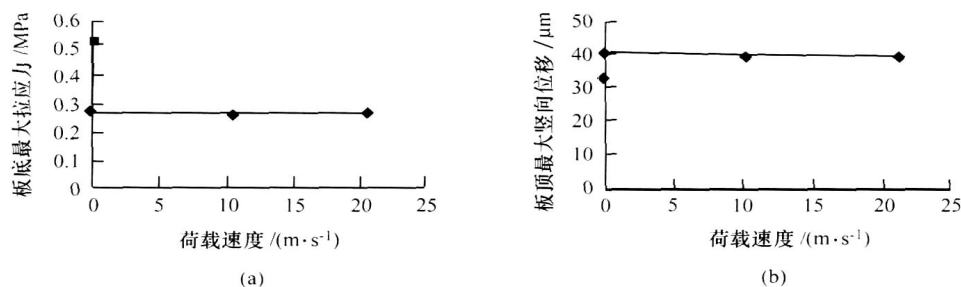


图 3 不同荷载速度应力位移曲线

Fig. 3 Stress-displacement curve of different load velocities

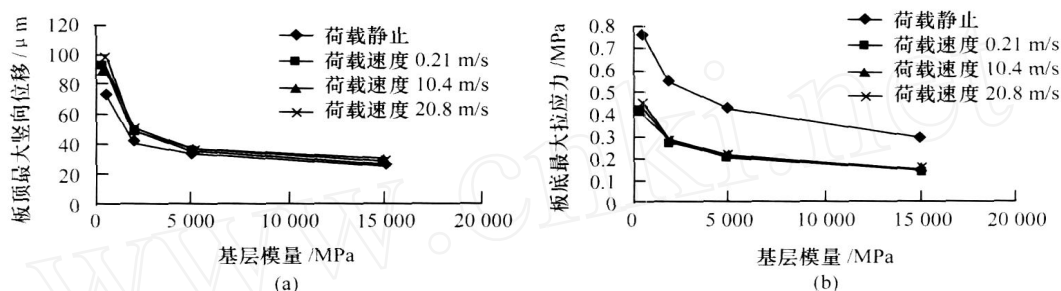


图 4 不同基层模量应力位移曲线

Fig. 4 Stress-displacement curve of different base moduli

由图 4 (a) 可以看出: (1) 随着基层模量的增加, 板中表面最大竖向位移均呈现减小的趋势。(2) 比较不同荷载速度间的差异, 可以看出, 当基层模量较小时, 不同荷载速度下板中表面最大竖向位移的差别较大, 即动态效应比较明显; 而当基层模量增大时, 这种差距在减小。(3) 动态荷载与静止荷载在路表弯沉上的响应类似, 对于隧道路面这种基岩强度大的情况, 路表弯沉的动态系数可以近似取为 1。

由图 4 (b) 可以看出: (1) 随着基层模量的增加, 无论在何种荷载速度下, 当荷载驶过板中时, 板中底面拉应力均减小, 并且均呈现类似的规律, 通过简单的回归分析, 均与基层模量有较好的半对数关

系。(2) 比较不同荷载速度间的差异可以看出, 当荷载移动时, 板中底面最大拉应力相差不大, 均小于荷载静止下板中底面最大拉应力值。(3) 随着基层模量的增加, 移动荷载与静止荷载间的差异减小。(4) 从动态荷载与静止荷载在板底拉应力数值比较上发现, 对于隧道路面这种基岩强度大的情况, 板底应力动载系数可以近似取为 0.5。

2.3 基岩模量对路面响应的影响

固定基层的模量为 15 000 MPa, 考察不同基岩模量下轴载移动到板中时板顶最大竖向位移和板底的最大拉应力。计算结果如图 5 所示。

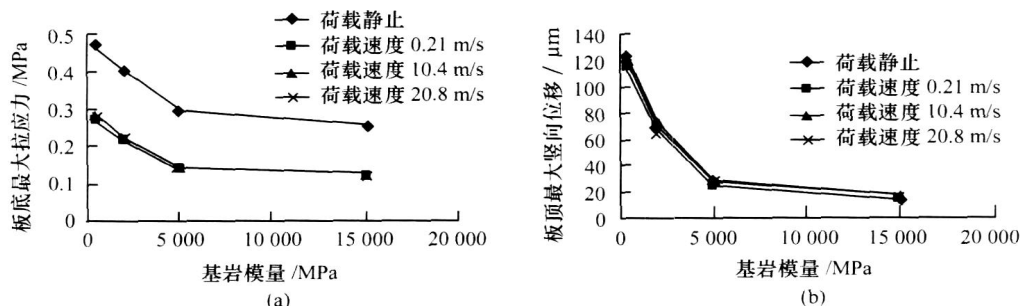


图 5 不同基岩模量应力位移曲线

Fig. 5 Stress-displacement curve of different bedrock moduli

由图 5 (a) 可以看出: (1) 随着基岩模量的增加, 无论在何种荷载速度下, 当荷载驶过板中时, 板中底面拉应力均减小, 并且均呈现类似的规律。(2) 当基岩模量达到并超过 5 000 MPa 以后, 随着基岩模量的增加, 板中底面拉应力的减小幅度明显变小。(3) 不同移动荷载速度下板中底面最大拉应力非常接近, 且小于静止荷载下的拉应力。(4) 从动态荷载与静止荷载在板底拉应力数值比较上发现, 对于隧道路面这种基岩强度大的情况, 板底应力动载系数可以近似取为 0.5。

由图 5 (b) 可以看出: (1) 随着基岩模量的增加, 板中表面最大竖向位移均呈现减小的趋势。(2) 从动态荷载与静止荷载在板顶最大竖向位移数值比较上发现, 对于隧道路面这种基岩强度大的情况, 路表弯沉动载系数可以近似取为 1.0。

3 结论

利用三维有限元方法对移动荷载下公路隧道水泥路面结构进行了力学计算与分析, 讨论了不同荷载速度、不同基层模量和基岩模量对路面结构响应的影响。在各种分析因素组合情况下, 动态荷载与静止荷载在板底拉应力和板顶竖向位移数值比较发现, 对于隧道路面这种基岩强度大的情况, 板底应力动载系数都近似取为 0.5, 而路表弯沉动载系数都近似取为 1.0。这对基于静止荷载的路面设计方法考虑移动车辆荷载作用提供了动载系数。

参考文献:

References:

- [1] 张立明. Algor、Ansys 在桥梁工程中的应用方法与实例 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
ZHANG Li-ming. Application Method and Examples of Algor and Ansys in Bridge Engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [2] 石春香. 公路隧道水泥混凝土路面结构力学分析与设计方法研究 [R]. 上海: 同济大学, 2006.
SHI Chun-xiang. Research on Mechanical Analysis and Design Method of Cement Concrete Pavement of Road Tunnel [R]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [3] 周玉民. 水泥混凝土路面脱空状态下的结构分析 [D]. 上海: 同济大学, 2004.
ZHOU Yu-min. Structural Analysis on Cement Concrete Pavement under the Status of Void Beneath Slab [D]. Shanghai: Tongji University, 2004.
- [4] 姚祖康. 水泥混凝土路面设计理论和方法 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
YAO Zu-kang. Design Theory and Method of Cement Pavement Structure [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [5] JTG D40-2002, 公路水泥混凝土路面设计规范 [S].
JTG D40-2002, Specifications of Cement Concrete Pavement Design for Highway [S].
- [6] JTG D70-2004, 公路隧道设计规范 [S].
JTG D70-2004, Code for Tunnel Design of Road [S].
- [7] 杨良, 郭忠印, 丁志勇. 公路隧道路面工作环境调研与分析 [J]. 交通科技, 2004 (1): 27 - 30.
YANG Liang, GUO Zhong-yin, DING Zhi-yong. Environment Investigation and Analysis of Road Tunnel Pavement [J]. Transportation Science, 2004 (1): 27 - 30.
- [8] MYERS L R R, RUTH B, DRAKOS C. Measurement of Contact Stresses for Different Truck Tyre to Evaluate Their Influence on Near-surface Cracking and Rutting [R]. USA: National Research Council, 1999.
- [9] IKEDA T, ITOH M. Consideration on Equations for Estimating Tire Contact Pressure of a Large Truck [C] // Proceedings of the 60th Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers. Japan: JSCE, 1985 (5): 465 - 466.
- [10] CEBON D. Vehicle-generated Road Damage: A Review [J]. Vehicle Systems Dynamics, 1989, 18 (1 - 3): 107 - 150.
- [11] 杨群, 郭忠印, 陈立平. 考虑水平荷载的公路隧道复合式路面表面拉应力分析 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (1): 16 - 19.
YANG Qun, GUO Zhong-yin, CHEN Li-ping. Stress Analysis of Compound Pavement in Road Tunnel Considering Level Loads [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (1): 16 - 19.
- [12] 石春香, 杨群, 郭忠印. 公路隧道沥青路面结构的力学性能研究 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (7): 8 - 12.
SHI Chun-xiang, YANG Qun, GUO Zhong-yin. Research on Mechanical Properties of Asphalt Pavement in Highway Tunnel [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (7): 8 - 12.