

移动荷载作用下隧道施工动态响应分析

叶 帅¹ 邹佳旺²

1. 南昌轨道交通集团有限公司, 江西 南昌 330013

2. 大连海事大学交通运输系, 辽宁 大连 116026

[摘要] 以金普线过沈大高速暗挖段隧道为背景, 利用 Midas 软件模拟在车辆移动荷载的作用下, 在施工过程中引起的路基及路面的动力响应。建立适当的模型将车辆移动荷载简化, 对比分析了标准汽车轴载、重载汽车移动荷载在施工过程中对路面的影响, 针对隧道施工的不同阶段, 依次对路面下方土体的变形规律进行研究。模拟结果表明: 标准轴载行驶时, 其对围岩的稳定性和支护结构应力状态影响较小; 重载车辆在路面行驶, 与静力荷载产生的位移叠加后接近临界值, 需要采用相应的有效措施减小重载的影响, 来保证隧道正常施工。

[关键词] 隧道建设; 动力响应; 土体变形; 数值模拟

DOI: 10.33142/aem.v6i8.13280

中图分类号: U451.3

文献标识码: A

Dynamic Response Analysis of Tunnel Construction under Mobile Load

YE Shuai¹, ZOU Jiawang²

1. Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd., Jiangxi, Nanchang, 330013, China

2. Department of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning, 116026, China

Abstract: Taking the Jinpu Line passing through the Shenda Expressway tunnel as the background, Midas software was used to simulate the dynamic response of the roadbed and pavement caused by the action of vehicle moving loads during the construction process. An appropriate model was established to simplify the vehicle movement load, and the effects of standard vehicle axle load and heavy-duty vehicle movement load on the road surface during the construction process were compared and analyzed. For different stages of tunnel construction, the deformation law of the soil below the road surface was studied in sequence. The simulation results show that when driving under standard axle load, its impact on the stability of surrounding rock and the stress state of supporting structures is relatively small; When heavy-duty vehicles are driving on the road and the displacement generated by static loads is close to the critical value, corresponding effective measures need to be taken to reduce the impact of heavy loads and ensure the normal construction of tunnels.

Keywords: tunnel construction; power response; soil deformation; numerical simulation

引言

随着城市发展的不断推进,地下交通建设已经成为现代城市发展中不可或缺的一部分。暗挖法作为一种常用的地下交通隧道开挖技术,具有高效、安全和环保的特点,因此被广泛应用于地铁、铁路和道路等项目中。然而,盾构隧道开挖过程会上部汽车荷载会对围岩稳定性产生影响,围岩稳定性是暗挖法隧道开挖过程中最为关注的问题之一。围岩稳定性会直接影响到周围建筑物的稳定性和使用安全性,因此对于围岩稳定性的研究具有重要的理论和实践意义。

目前,关于交通荷载作用下隧道围岩稳定性已经取得了许多研究成果。凌建明、王伟等^[1]依据弹性层状体系理论计算了行车荷载作用下路基顶面及路基土中的竖向应力建立了路基附加应力的动力模式。采用室内动三轴试验模拟了行车荷载作用下路基土的残余应变特性和孔隙水压力变化规律提出了行车荷载作用下湿软路基残余变形

的预估方法;张洪亮等^[2]将车辆荷载的接地形状简化为矩形,将柔性路面视作多层粘弹性半空间体,并考虑路基材料对应变幅的依赖性,采用修正的平面应变模型,用传递矩阵配拉氏变换和傅里叶变换法对移动的平稳荷载作用下柔性路面的动力响应进行了分析,得到了柔性路面任意深度处的应力和位移,并将理论计算结果用模型试验进行了验证;雷晓燕等^[3]通过傅里叶积分变换以及虚功原理,分析了在半空间域弹性空间下移动荷载的动力响应。胡安峰等^[4]通过对列车荷载引起的地面振动进行分析,在列车行驶产生的移动荷载的前提下,研究了饱和地基-梁耦合系统的动力响应。李怡君^[5]通过建立各种隧道和地基模型,分析了列车移动荷载作用下附近地基土的稳态振动问题。

1 工程概况

1.1 隧道模型

某市拟建某轻轨项目,主要工程为一座隧道,线路全长约 42.6km,其中暗挖隧道长 170m (DK+345-DK28+515),

该隧道暗挖段为土质隧道，拱形断面；此暗挖段下穿某高速三条匝道，结构拱顶最大埋深 13m。隧道纵断面见图 1，隧道横断面见图 2。此隧道在开挖过程中穿越高速公路及其匝道，高速公路上作用有车辆荷载，因此本文对汽车移动荷载的变化对施工过程中位移的影响进行模拟及分析，以判定移动荷载的影响并对施工方法的选取提供参考依据。

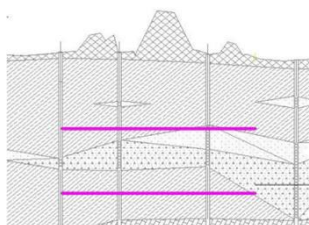


图 1 隧道纵断面图

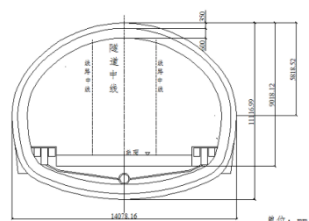


图 2 隧道横断面图

1.2 材料参数

结构采用 C35 混凝土，截面厚度为 0.95cm，长度按 1m 计算。混凝土弹性模量 31GPa，重度 $\gamma = 25\text{kg/m}^3$ ，泊松比为 0.18，地基反力系数 $k_v = 32240\text{kN/m}^3$ 。隧道所处地层的物理力学指标见表 1。

表 1 土体计算参数

材料类型	密度 (kg/m^3)	泊松比	弹性模量 (Pa)	粘聚力 (kPa)	摩擦角 ($^\circ$)
素填土	1700	0.35	11e6	15	10
粉质粘土	2000	0.34	15e6	5	22
砂土	1950	0.30	12e6	—	20
角砾	2100	0.30	20e6	—	28
碎石	2200	0.30	25e6	—	33

2 车辆荷载的确定及模拟

2.1 车辆荷载模型的简化与建立

现有的车辆型号较多，因此作用在路面上的移动荷载也有很大区别，车辆在行驶过程中，通过车轮将荷载以集中力传递给路面，然而路面结构刚度较大，因此以面荷载的形式将荷载传递给路面的地面，作用在路基土体上。

交通荷载在移动过程中与路面之间的相互作用是一个十分复杂的过程。车辆在高速行驶的过程中，由于路面的不平整和空气动力的作用会引起车辆的振动，这种振动也会施加在路面上，由动荷载产生的附加应力会引起整个路基的应力重分布，因此，在隧道的施工过程中，其围岩的稳定性会受到一定程度的影响。因此有必要对交通荷载

进行研究与分析。

交通荷载是由于车辆移动产生的，在其时间和空间上具有特点：交通荷载属于动荷载的范畴，其在时间和空间上的分布都不均匀；汽车在行进过程中产生的振动会对路基产生某种程度的影响；交通荷载对路基沉降的影响随填土增加而减少。

要进行振动影响和路面、岩土变形，首先需要进行特征值分析，计算动力分析需要的结构的第一、第二固有周期以及固有频率，将随时间变化的车辆移动荷载数据输入到相应的节点上进行动力学分析，得到结果后可查看由于汽车移动荷载作用下周围的振动影响和岩土变形。

建立模型时需要定义模型的约束条件，进行特征值分析需要利用弹性边界进行定义边界条件，弹性边界使用曲面弹簧来定义，然后根据铁路设计规范中的地基反力系数计算公式来计算出曲面弹簧的弹性模量。

竖向地基反力系数：

$$k_v = k_{v_0} \cdot \left(\frac{B_v}{30} \right)^{-3/4} \quad (1)$$

水平地基反力系数：

$$k_h = k_{h_0} \cdot \left(\frac{B_v}{30} \right)^{-3/4} \quad (2)$$

$$\text{式中：} k_{v_0} = \frac{1}{30} \cdot \alpha \cdot E_0 = k_{h_0}, B_v = \sqrt{A_v}, B_h = \sqrt{A_h}.$$

其中， A_v 和 A_h 是各地基的竖直和水平的截面积； E_0 是地基弹性模量； α 取 1.0。

经过计算得出路面水平地基反力系数： $K_x = 3.15 \times 10^6\text{kN/m}^2$ 。

岩土的竖直地基反力系数： $K_v = 7884\text{kN/m}^2$ ， $K_x = 10224\text{kN/m}^2$ ， $K_y = 14018\text{kN/m}^2$ 。

确定相关参数后进行特征值计算，从特征值表中可得到第一、第二阶振型对应的周期为： $T_1 = 2.199902\text{s}$ ， $T_2 = 0.8600390\text{s}$ 。

对于交通荷载的模拟，目前各国主要有 5 种模型，分别为半波正弦荷载模型、恒定荷载模型、矩形波荷载模型、冲击荷载模型、随机荷载模型。在本文的模拟计算中，采用半波模型，示意图如图 3。

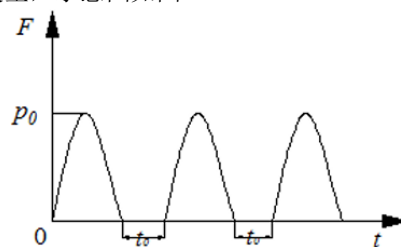


图 3 半波正弦荷载模型

2.2 标准车辆移动荷载转化为节点移动荷载

振动是由于汽车在道路上高速行驶时所产生的，振动

对于路基以及周围的环境具有极大的影响,因此必须进行建模计算。车辆在行进过程中车轮不是无规律振动,而是按照一定的周期和振幅在路面上跳动,并作用在路面上,故先将标准车辆移动荷载转化为节点移动荷载进行分析计算。

考虑到车辆行驶时的振动效应,将车辆振动荷载模型放大 10%,取车轮直径 0.6m,以汽车行驶速度 25m/s 来计算车辆车轮转动频率:

$$\omega = \frac{v}{r} = 83.3 \text{ rad/s} \quad (3)$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = 13.3 \text{ Hz} \quad (4)$$

则车辆单轴移动荷载为 $F = F_1 + F_1 \cdot 10\% \sin(\omega t)$ 。
模拟移动荷载各测点布置图见图 4。

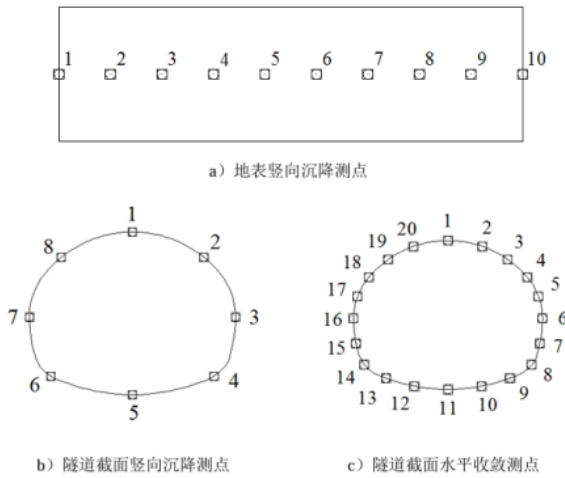


图 4 测点布置及编号

单轴动载时程曲线见图 5。

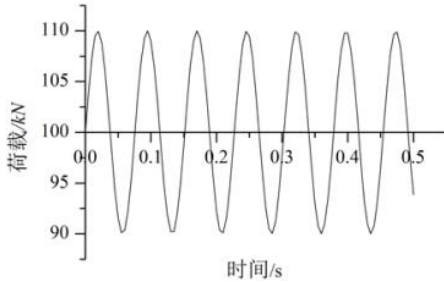


图 5 单轴动载时程曲线

3 结果和分析

3.1 标准汽车轴载作用下动力响应模拟分析

在下穿隧道的施工中,汽车移动荷载会对隧道结构产生影响,同时隧道的开挖对路面下方土体发生扰动,形成临空面,进行应力重分配;在动荷载的作用下,土体的变形规律发生变化,其影响范围和程度,需要进行分析与模拟。本文选择了标准汽车轴载作用及重载汽车轴载进行对比分析,在工况上选择了两种工况来进行计算。工况一:隧道未开挖;工况二:隧道开挖 2/3 并支护;分别得到两

种工况的动力影响力曲线。

标准汽车轴载工况一动力影响曲线见图 6。

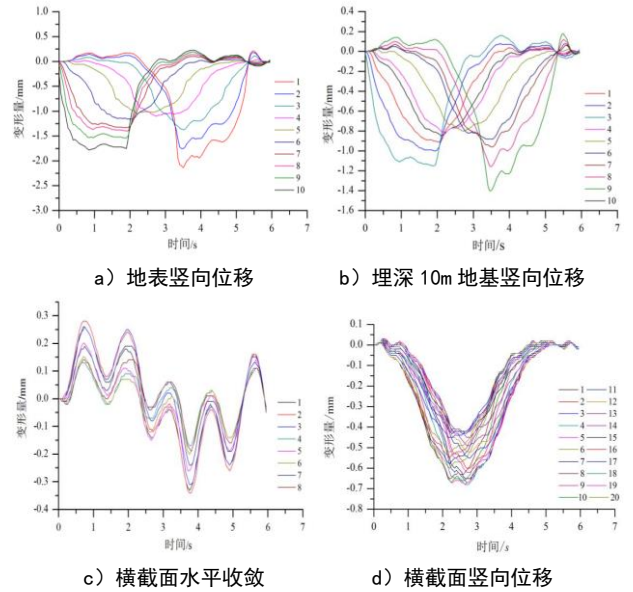


图 6 工况一动力影响曲线

工况一属于初始状态下,即隧道未开挖时各结构部位的变形数据,绘出该工况下各项数据为后面其他工况的数据做更好的对比,以更好的体现汽车移动荷载对施工过程的影响。通过模拟和观察曲线得出相关数据:地表最大下沉 2.1435mm,10m 地层处最大下沉 1.413mm;隧道截面最大竖向位移 0.364mm,隧道截面最大水平位移 0.685mm;标准汽车轴载工况二动力影响曲线见图 7。

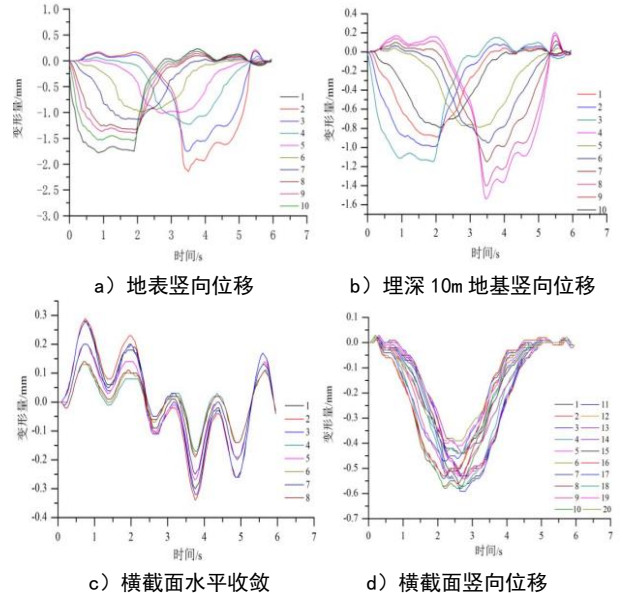


图 7 标准汽车轴载工况二动力影响曲线

通过模拟和观察曲线得出相关数据:地表最大下沉 2.1403mm,10m 地层处最大下沉 1.381mm;隧道截面最大竖向位移 0.361mm,隧道截面最大水平位移 0.675mm。

3.2 重载影响下的动力响应

重载汽车轴载工况一动力影响曲线见图 8。

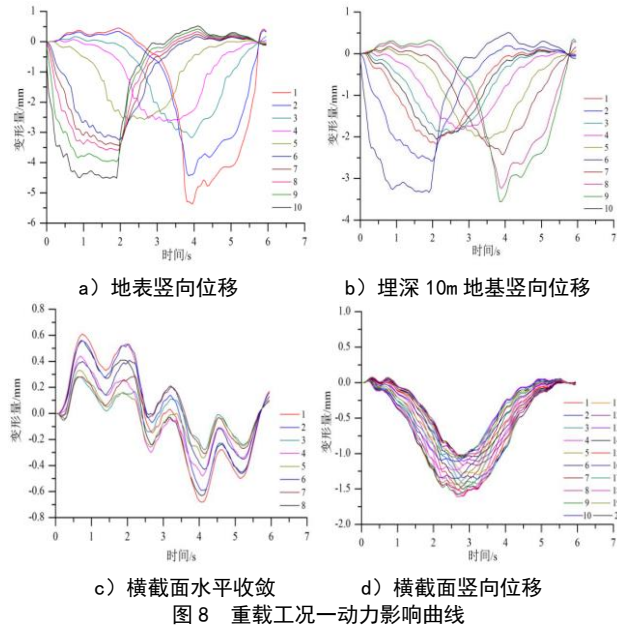


图 8 重载工况一动力影响曲线

通过模拟和观察曲线得出相关数据：地表最大下沉 5.6235mm，10m 地层处最大下沉 3.713mm；隧道截面最大竖向位移 0.764mm，隧道截面最大水平位移 1.485mm；此数据可以看出地表最大下沉以及竖向位移明显较标准汽车荷载增大。重载汽车轴载工况二动力影响曲线见图 9。

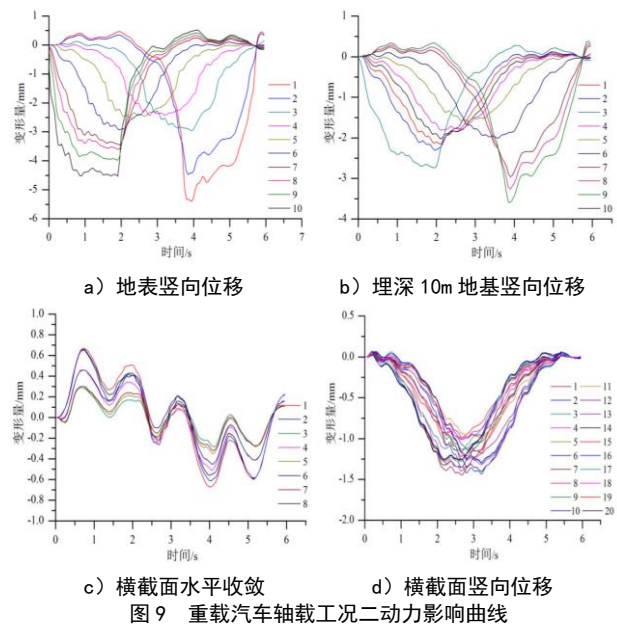


图 9 重载汽车轴载工况二动力影响曲线

通过模拟和观察曲线得出相关数据：地表最大下沉 5.7237mm，10m 地层处最大下沉 3.815mm；隧道截面最大竖向位移 0.775mm，隧道截面最大水平位移 1.490mm。

由数据可发现，在隧道的开挖的阶段，汽车荷载引起的动力响应大致相同，因此本文只截取隧道贯通后不同时刻隧道的位移变化图像。整体竖向位移云图如图 10。

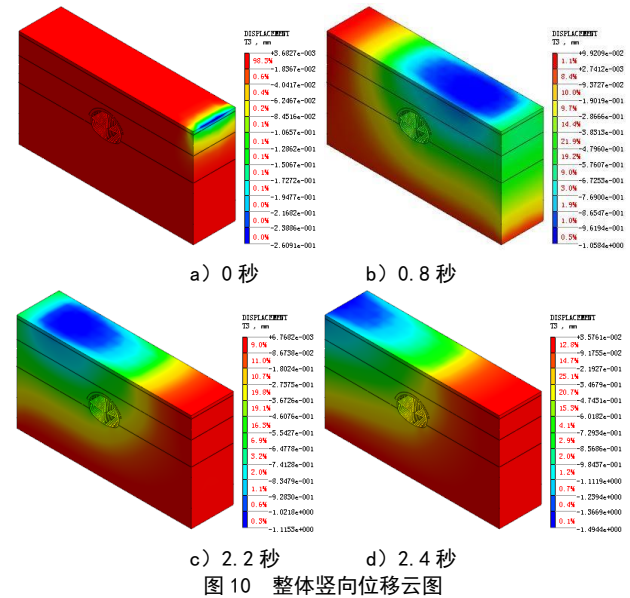


图 10 整体竖向位移云图

通过对各个施工阶段的数据进行分析可知：由重载的沉降变化曲线可以看出，在重载车辆的影响下，路基表面沉降，隧道截面的竖向和横向位移都比标准轴载作用下的弯沉值大，地表沉降达到 5.7mm，隧道截面最大竖向位移达到 1.5mm，横向位移达到 1.1mm；地表最大变形与静力荷载下产生的竖向位移叠加后不超过 20mm，属于安全范围。重载车辆在隧道上方路面通过时，隧道拱顶、拱腰、拱脚处以及路基表面的变形量都增大，并且塑性区的范围也有所扩大，随着重载车辆通过次数的增加，衬砌和地表的变形不断增大。既有公路下隧道设计时，应对路面通过重载车辆进行验算，并且应该结合静力条件对支护结构的参数进行调整与优化。

4 结论

本文首先建立三维数值模型，利用 Midas 求解器模拟隧道开挖过程中交通荷载的模拟，并且交通荷载的模拟分为标准轴载模拟和重载模拟两种情况。计算出各主要结构面的动力响应，对相应动力响应曲线进行分析可得出以下结论：

(1) 标准轴载行驶时，路面最大沉降 2.14mm，其对隧道围岩的稳定性和支护结构应力状态影响较小，不会影响隧道正常施工；

(2) 重载车辆在路面行驶时，路面沉降达到 5.7mm，与静力荷载产生的位移叠加后接近临界值，虽不会影响隧道正常施工，但需采用相应的有效措施减小重载的影响，保证隧道正常施工；

(3) 对过高速公路下暗挖隧道进行结构设计时，应对重载车辆进行验算，并结合静力荷载计算的位移与应力状态

对相应的支护结构和施工方案进行修正。

[参考文献]

- [1] 凌建明, 王伟, 邬洪波. 行车荷载作用下湿软路基残余变形的研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002(11): 1315-1320.
- [2] 张洪亮, 胡长顺, 许伟清. 移动荷载作用下柔性路面的动力响应[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2005(05): 6-10.
- [3] 雷晓燕, 徐斌, 徐满清. 半无限弹性空间中移动荷载动力响应的频域-波数域比例边界有限元法分析[J]. 振动工程学报, 2017, 30(05): 798-805.
- [4] 胡安峰, 李怡君, 付鹏, 等. 埋置移动荷载作用下饱和成层地基-梁耦合系统动力响应分析[J]. 振动工程学报, 2018, 31(01): 140-147.
- [5] 李怡君. 地下列车荷载作用下土体与隧道结构的动力响应理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.

作者简介: 叶帅(1988.11—), 工程师, 大学本科, 研究方向为城市轨道交通工程。