

文章编号: 1005-0523(2008)04-0019-06

# 地铁及国铁荷载共同作用下地基土动力响应分析

陕耀, 黄小翠

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室 上海 201804)

摘要: 结合南京地铁二号线东延线盾构隧道下穿宁芜铁路工程, 研究地铁及铁路荷载共同作用下地基土动力响应. 利用车辆-轨道耦合模型, 计算轮轨垂向力. 利用有限单元法分析地铁线路中心线下地基土和国铁路基面弹性变形、加速度随时间的变化规律, 以及地基土中动应力分布规律. 分析结果表明, 在同样的加载条件下, 地铁左线和右线地基土弹性变形及加速度随时间变化规律相似, 动应力响应较大的区域主要分布在铁路基床表层、拱腰附近和轨枕下方土层.

关键词: 动力响应; 地铁; 铁路; 轮轨力

中图分类号: U231

文献标识码: A

在地铁下穿铁路区段, 地铁投入运营后, 其振动荷载的长期作用可能使地基土软化、孔隙水压力增大, 导致土体承载力降低, 而土体被弱化的后果不仅危及地铁运营的安全, 对上方铁路地基的稳定性也同样会造成难以挽回的不利后果. 同时, 盾构隧道下卧土层中产生的长期累计变形也有可能对铁路行车的安全产生影响. 所以应对地铁及国铁荷载作用下地基土及隧道管片动应力分布进行研究, 以采取合理的预防措施.

目前, 国内外研究较多的是单一国铁或地铁列车荷载作用下路基或隧道地基土的动力响应. 如国内铁科院、西南交大等科研单位结合秦沈客运专线对路基动应力作了研究试验<sup>[1~3]</sup>, 田海波等人结合合肥-南京高速客货共线铁路试验段路基原位动载试验对路基动力响应作了研究<sup>[4]</sup>, 高峰等人以深圳地铁一期工程区间近距离重叠隧道为背景, 研究了地铁列车振动荷载对隧道结构及地基土的影响<sup>[5]</sup>, 邓黄飞等人利用有限差分模型对广州地铁某区间隧道运行列车振动诱发的地层和地表动力响应进行了分析<sup>[6]</sup>; 国外日本、德国对轨下动应力分布作了系统的研究测试<sup>[7,8]</sup>; 但对于地铁下穿铁路区段, 地铁

及铁路荷载同时作用下地基土弹性变形及振动加速度研究极少, 本文以南京地铁二号线东延线工程盾构隧道下穿宁芜铁路为背景, 研究地铁及国铁荷载共同作用下路基与地基土的动力响应.

## 1 工程背景

南京地铁二号线东延线工程自马群站起, 经紫金山客运枢纽至九乡河西侧终点站, 全长 8.773 km. 区间穿越宁芜铁路段, 采用盾构法施工, 盾构隧道中心水平间距 13.2 m, 埋深 8 m. 盾构隧道与铁路相交段的地层主要为素填土和粉质粘土, 其中区间段隧道穿越的土层主要为粉质粘土. 各主要土层参数见表 1.

## 2 计算方法及计算模型

由于土体及结构早已存在初始内力, 在动力作用下使内力增加, 且土体在动力作用下的残余应变、动孔压、动力蠕变特性等都与土体所受的初始应力有关. 因此, 采用 Geo-slope 中的 Quake/w 有限元

收稿日期: 2008-03-16

作者简介: 陕耀(1984-), 男, 山东济宁人, 工学硕士研究生, 主要从事铁道工程和城市轨道交通工程的研究.

软件,先计算地基土的初始应力,再进行动力计算。

对于土性较弱的地基,反射波能在土体中很快消散,因此可以采用同静力计算一样的方法,在离建筑物一定距离将土体截断建立边界条件,设置刚性支撑、辊轴或自由变形节点等。为使因虚拟边界产生反射波的影响减至最小,研究地层范围应尽量取远(一般可视具体情况选择5~10倍建筑物直径处)。这里取计算断面长度为隧道直径的12倍,高度为隧道直径的6倍。

在静力计算中,侧边为水平约束,竖向自由,底

边为水平和竖向全约束,上部地表为自由边界。在动力计算中,由于列车荷载以竖直振动为主,为模拟无限空间对波的吸收,计算边界采用阻尼单元,即将临近边界单元的阻尼系数增大。

断面网格划分见图1,图中隧道结构、整体道床、土体均采用四节点单元模拟。其中,点A、点B分别位于左线与右线隧道中心线以下的地基土内,点C位于国铁路基顶面。计算时采用的材料参数见表1。

表1 计算断面土层参数

| 土层   | 厚度/m | 重度 $\gamma_3$ /kN m <sup>-3</sup> | 动弹性模量 Ed/MPa | 泊松比 $\mu_d$ | 最大阻尼比 $D_{max}$ | 最大动剪切模量 Gd/MPa |
|------|------|-----------------------------------|--------------|-------------|-----------------|----------------|
| 素填土  | 3.3  | 18                                | 104.7        | 0.3         | 0.303           | 36.5           |
| 粉质黏土 | 6    | 19.6                              | 214.3        | 0.35        | 0.313           | 74.6           |
| 粉质黏土 | 5.6  | 19.1                              | 115.7        | 0.29        | 0.309           | 40.3           |
| 粉质黏土 | 0.7  | 19.8                              | 321.4        | 0.31        | 0.238           | 111.8          |
| 粉质黏土 | 4.3  | 19.8                              | 219          | 0.27        | 0.242           | 76.2           |

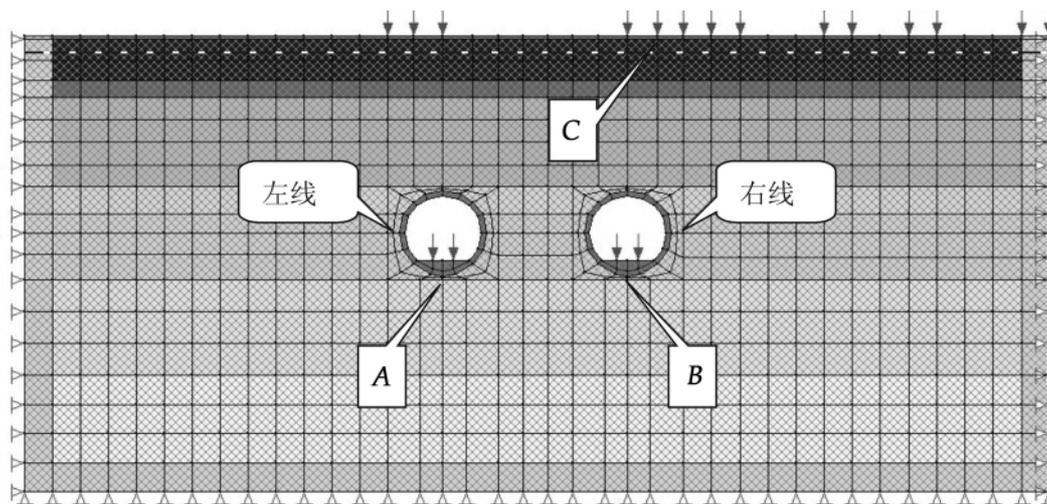


图1 计算断面

在动荷载条件下,土体剪切模量和阻尼比的非线性特性可以近似的以等效线性分析来模拟。在等效线性分析中,一次动荷载分析所用的剪切模量和阻尼比为常量。由动态分析得到的等效循环剪应变可以计算出新的剪切模量和阻尼比,然后以新的剪切模量和阻尼比进行下一步的动荷载分析。这种迭代过程会不断重复直到两步成功的迭代过程计算出的位移变化足够小。

Quake/w 在一次动荷载分析中计算出最大动位移量,并且将两次成功迭代计算的最大位移值进行比较,最大位移量可用下式表示

$$A_{max}^i = \max \left( \sqrt{\sum_{n=1}^{n_p} (a_n^i)^2} / n_p \right)$$

式中  $a_n^i$  是节点  $n$  的动位移,  $i$  是迭代次数,  $\max()$  是在动态分析中取得的最大值。当最大位移变化量小于设定的收敛容差或者已经达到了设定的最大迭代次数时计算结束。收敛容差定义如下

$$\delta A_{max} = \frac{ABS(A_{max}^{i+1} - A_{max}^i)}{A_{max}^i} < \text{Tolerance}$$

式中 ABS 表示绝对值。本文采用的是孔压的应力模型。在振动荷载作用下,超孔隙水压的产生将引起有效应力的减小;如果土体属于各向同性固结,有效应力可能减小到 0;当超孔隙水压不断产生时,

Seed 及 Lee(1966 年)认为超孔隙水压增大到有效应力时土体开始液化.曾经有人用过许多方法,做过许多试验来判断潜在的液化区域并预测地震荷载下的孔隙水压力.一种普遍被接受的方法是 Seed 等人于 1967 年创立的循环应力法,孔压比与循环次数比之间的关系式如下所示.

$$\frac{u_{\text{excess}}}{\delta_{3c}} + \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arcsin\left(2\left(\frac{N}{N_L}\right)^{\frac{1}{\alpha}} - 1\right)$$

式中:  $\alpha$  为常数,一般取 0.7;  $N$  为振动次数;  $N_L$  是达到破坏所需的振动次数,典型的孔压比曲线见图 2.

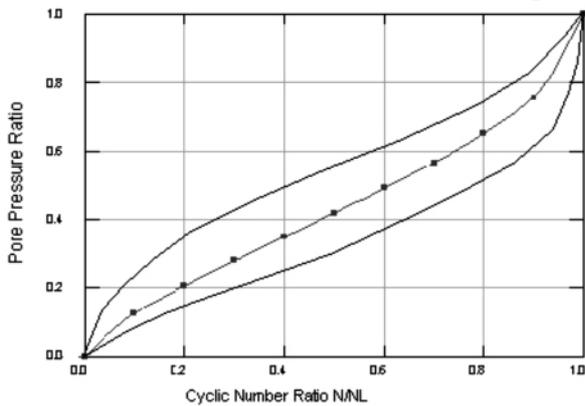


图 2 孔隙水压力模型

### 3 列车激振荷载的模拟

行驶中的列车作用于轨道的接触力是十分复杂的,一般可分为垂直力、横向力和纵向力,是由于车辆与轨道的相互作用而引起的.进行列车动应力在土层中传递规律的分析,主要是要考虑轮轨接触中垂直作用力的影响.

根据轮轨接触力的作用特点(动态变化、点接触)在分析列车产生的动应力的影响时(主要考虑垂直力的影响),可以将列车运行时各个车轮的动荷载简化为一系列大小随着时间动态变化的竖直集中力荷载,即竖向动荷载.

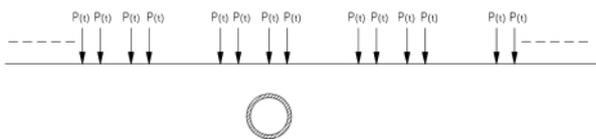


图 3 列车动荷载简化示意图

沿轨道纵向建立的有限元计算模型,实际的作用荷载应为沿轨道方向移动的动荷载,它应该是同时包括时间  $t$  和位置  $x$  两个自变量的复变函数,即  $P_1 = P_1(x, t)$ .然而,由于动态荷载的各态历经性,

在列车移动的过程中,总会经过一个对隧道结构最不利的位罝,可以重点研究列车动载在这个最不利的位罝上对隧道结构的影响,因此动荷载  $P_1(x, t)$  可进一步简化成  $P(t)$ ,具体见图 3.本文为确定国铁荷载作用最不利位罝,按所有可能的荷载组合方式进行试算,对比各种加载条件下隧道结构的动力响应,最终得出如图 1 所示的最不利荷载作用位罝.

通过建立相应的车辆-轨道耦合模型,在常规随机不平顺条件下,得出轮轨垂向力.宁芜铁路为客货共线铁路,国铁车辆模型可以采用高速客车和满载货车,经计算分析显示,采用满载货车模型计算的结果对隧道结构影响更不利,因此这里国铁车辆模型采用满载 C62A 编组货车,列车时速为 80 km/h,静轴重 21 T;地铁车辆模型采用地铁 A 型车,时速为 70 km/h,静轴重 16 T.计算采用平面模型,因此需将荷载转化为平面荷载.假定轮轨荷载经过钢轨传递到道床上成为线性均布荷载,并考虑轮轨力分配比,得出平面计算荷载,如图 4、5 所示.图 5 中荷载随时间变化规律,即为函数  $P(t)$  随自变量  $t$  变化的规律.

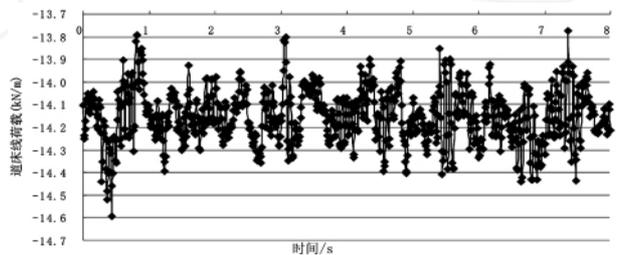


图 4 地铁道床表面承受的线荷载

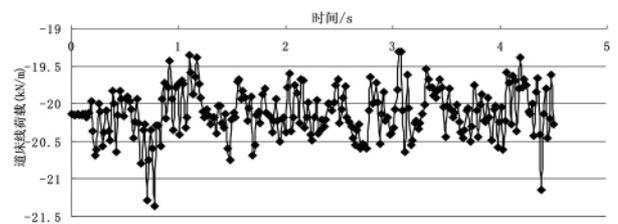


图 5 国铁道床表面承受的线荷载

### 4 路基与地基土的动力响应

#### 4.1 路基与地基土弹性变形及竖向加速度

本文分别就国铁荷载单独作用、地铁荷载单独作用以及国铁和地铁荷载共同作用下的地铁隧道地基土和国铁路基面的动力响应进行了计算分析,地铁隧道中心线下 A 点、B 点以及国铁路基面 C 点在三种加载情况下的弹性变形、加速度时程曲线如图

6-图11所示。

由计算结果可见,地铁隧道中心线下地基土的弹性变形受国铁荷载作用的影响要大于受地铁荷载作用的影响。在地铁荷载单独作用下,隧道地基土中最大弹性变形为0.48 mm,而在国铁荷载单独作用下则为1.9 mm。由图6、图7可见,在同样的加载条件下,地铁左线和右线地基土弹性变形随时间变化规律相似,但数值有一定差异。在地铁和国铁荷载共同作用下右线最大弹性变形2.7 mm,左线为1.8 mm。产生这种结果的原因主要是隧道地基土的弹性变形受国铁荷载影响较大,而数值模拟中选择在对隧道结构最不利的位置施加国铁荷载,这就造成了地铁左线与右线上部国铁荷载施加的不对称,从而产生了弹性变形在数值上的差异。

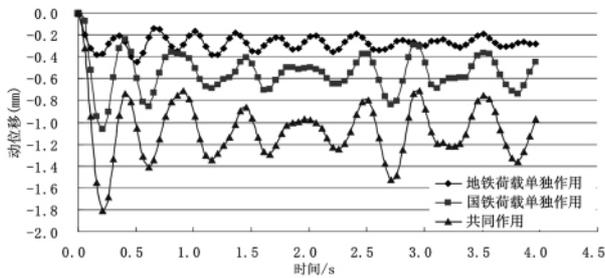


图6 左线隧道下A点弹性变形时程曲线

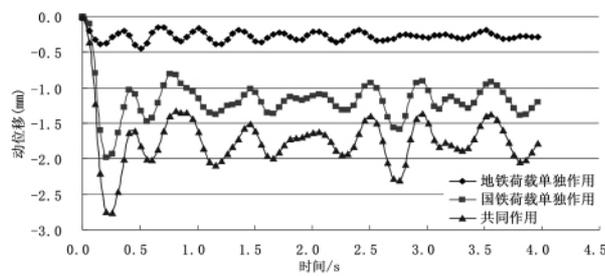


图7 右线隧道下B点弹性变形时程曲线

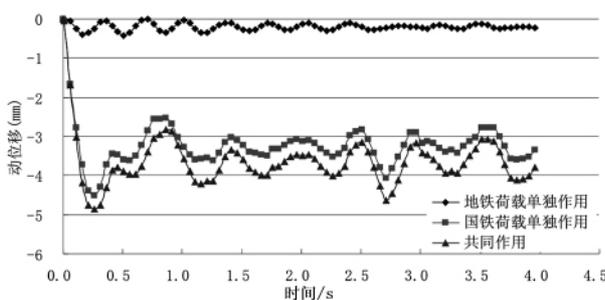


图8 国铁路基面C点弹性变形时程曲线

由图8可见,地铁荷载作用对国铁路基面弹性变形的影响很小,其变形主要由国铁荷载提供,在两种荷载共同作用下,国铁路基面最大弹性变形为4.8 mm。

在同样的加载条件下地铁左线和右线地基土竖

向加速度随时间变化规律相似,变化幅度基本相同,最大振动加速度 $0.21 \text{ m/s}^2$ 。

地铁荷载作用对国铁路基面竖向加速度影响很小,由图11可见,在地铁与国铁荷载共同作用下,国铁路基面的竖向加速度几乎完全由国铁荷载作用提供,地铁荷载作用可以忽略,最大竖向加速度为 $0.55 \text{ m/s}^2$ 。

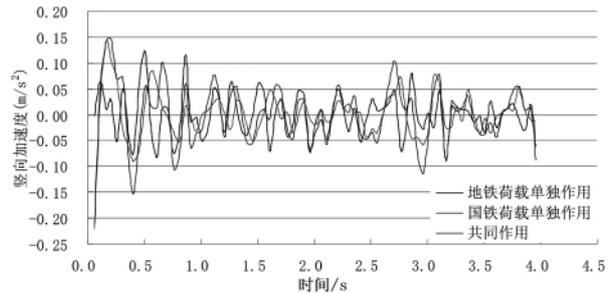


图9 左线隧道下A点竖向加速度时程曲线

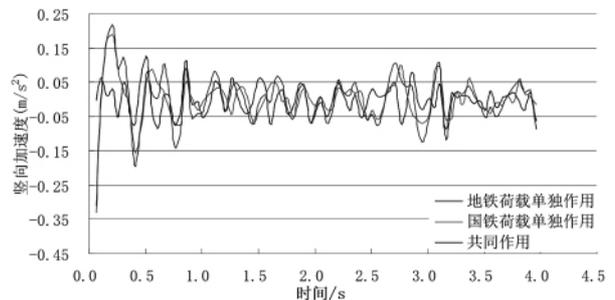


图10 右线隧道下B点竖向加速度时程曲线

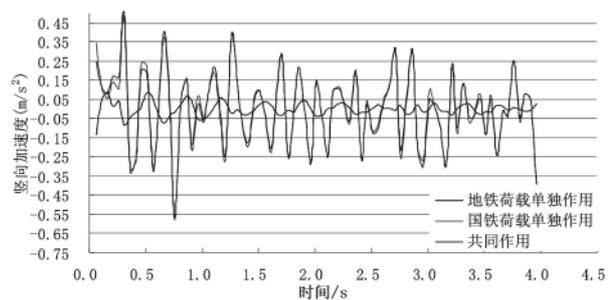


图11 国铁路基面C点竖向加速度时程曲线

#### 4.2 路基与地基土动应力

在地铁与列车荷载共同作用下的最大响应时刻,由计算得到的地基土动应力等值线分布图可知,动应力较大的区域主要分布在铁路基床表层、地铁隧道拱腰附近和轨枕下方土层中,这与文献[9]得出的规律相符。

铁路下方对应地铁左线及地铁右线地基土动应力分布如图12、13所示。在铁路轨道下方不存在构筑物时,列车运行产生的地基土动应力应随深度的增加逐渐衰减,由于隧道结构与地基土之间存在较大的刚度差,当铁路下方有构筑物时,铁路列车运行

产生的动应力主要由盾构隧道承担, 下方土层动应力的分布规律发生显著的变化. 在国铁荷载单独作用的情况下, 路基面最大动应力为 54.3 kPa, 路基面下 3 m 位置迅速衰减到 25.8 kPa, 约为路基面的 40%, 随后衰减缓慢, 在路基面下约 15 m 位置动应力开始增加, 最大增至 29.2 kPa, 且往下衰减缓慢. 在地铁荷载单独作用下, 动应力响应最大的位置在地铁轨枕下方土层中, 约为 10.7 kPa, 动应力向上方土层衰减迅速, 对国铁路基影响很小, 但向下衰减较缓慢. 在地铁与国铁荷载共同作用下, 路基与地基土中动应力分布与国铁荷载单独作用下的分布相似, 同样是在国铁路基内衰减较快, 但在隧道管片位置动应力突然增加, 由于地铁动荷载的叠加效应, 动应力最大增至 36.7 kPa, 随后随深度的增加衰减也较缓慢.

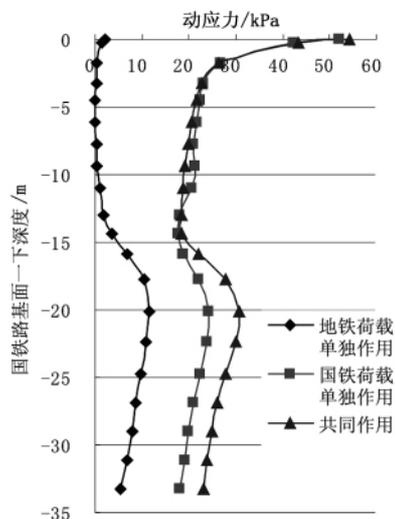


图 12 左线地基土竖向动应力分布

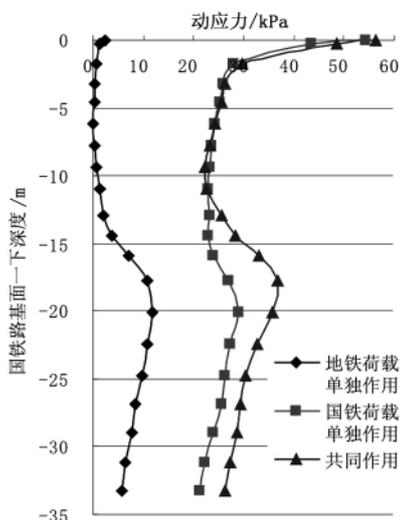


图 13 右线地基土竖向动应力分布

产生上述现象的原因在于, 轨道结构与地基土的刚度差异较大, 地铁及国铁荷载产生的动应力主要由隧道结构承担, 同时由于隧道结构对波的反射作用, 在上方有国铁列车荷载作用时, 隧道上方土层的动应力值增大; 在地铁荷载单独作用下, 地基土中的动应力较小, 且向上衰减迅速.

## 5 结论

(1) 地铁隧道中心线下方地基土的弹性变形受国铁荷载作用的影响要大于受地铁荷载作用的影响; 地铁及国铁荷载共同作用下, 地铁左线和右线地基土弹性变形随时间变化规律相似; 地铁荷载作用对国铁路基弹性变形的影响很小, 其变形主要由国铁荷载提供.

(2) 在同样的加载条件下, 地铁左线和右线地基土竖向加速度随时间变化规律相似, 变化幅度基本相同, 最大振动加速度  $0.21 \text{ m/s}^2$ ; 国铁路基面的竖向加速度几乎完全由国铁荷载作用提供, 地铁荷载作用可以忽略, 最大竖向加速度为  $0.55 \text{ m/s}^2$ .

(3) 在最大响应时刻, 动应力响应较大的区域主要分布在铁路基床表层、拱腰附近和轨枕下方土层. 应根据计算确定处理措施, 以减小动力响应对铁路和地铁运营的影响.

(4) 在有上方国铁列车荷载的情况下, 地基土中的动应力先随深度不断衰减, 当到达隧道拱腰位置时突然增大, 再随深度逐渐衰减; 而在地铁荷载单独作用下, 动应力响应最大的位置在地铁轨枕下方土层中, 动应力向上方土层衰减迅速, 对国铁路基影响很小, 但向下衰减较缓慢.

## 参考文献:

- [1] 孙常新, 梁波, 杨泉. 秦沈客运专线路基动应力响应分析[J]. 兰州铁道学院学报, 2003, 22(4): 110-112.
- [2] 聂志红, 李亮, 刘宝琛, 等. 秦沈客运专线路基振动测试分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1067-1071.
- [3] 李献民, 王永和, 杨果林, 等. 高速下过渡段路基动响应特性研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 100-104.
- [4] 田海波, 赵春彦. 改良膨胀土填筑路基动力响应研究试验[J]. 岩土工程技术, 2006, 20(2): 55-57.
- [5] 高峰, 关宝树, 仇文革, 等. 列车荷载作用下地铁重叠隧道的响应分析[J]. 西南交通大学学报, 2003, 38(1): 38-42.
- [6] 邓黄飞, 莫海鸿, 曾庆军. 地铁运行振动诱发地层和地表

- 动力响应分析[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(3): 348 - 351.
- [7] Sunaga, Makoto. Vibration behavior of roadbed on soft grounds under trainload [R]. Quarry Report of RTRI, 1990, (31): 29 - 35.
- [8] Leykauf, Gunther & Mattner, Lothar. Elastisches Verformungs Ver - Halten des Eisenbahnlaetbaus [J]. Eisenbahningenieur, 1990, 41(3): 111 - 119.
- [9] 宫全美, 徐勇, 周顺华. 地铁运行荷载引起的隧道地基土动力响应分析[J]. 中国铁道科学, 2005, 26(5): 47 - 50.

## Dynamic Response Analysis of Tunnel and Railway Foundation under Vibrating Load Induced by Train and Metro Vehicle

SHAN Yao, HUANG Xiao - cui

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering in Education Ministry, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Based on the project of Nanjing Subway Line 2 shield tunnel beneath the railway between Nanjing and Wuhu, dynamic response of tunnel and railway foundation under vibrating load induced by train and metro vehicle has been studied. The wheel - rail forces produced by the running of train and metro vehicle are calculated by wheel - rail coupling model. Using the dynamic finite element method, the law of subgrade deformation, acceleration and dynamic stress changed with time is found. The results indicate that under the same load condition, in the subgrade under the left and the right tunnel, the laws of elastic subgrade deformation and acceleration changed with time are similar. The dynamic response in the railway bedding mantle, near the haunch and under the arch bottom are bigger.

**Key words:** dynamic response; metro; railway; wheel - rail force

(责任编辑: 王建华)

