



静应力场对隧道列车振动响应的影响分析

高峰

(重庆交通大学土木建筑学院, 重庆 400074)

摘要: 分析了静应力场对隧道及地下结构动力响应产生的影响。指出了静应力场的几种处理方法以及在隧道列车振动分析中宜采用的计算方法。以某一隧道为例, 计算了其在列车动力荷载作用下的反应。计算表明: 静应力场宜将高斯点应力和节点荷载同时输入。若仅输入高斯点应力或节点应力, 而不输入节点荷载, 以此为初始条件进行隧道列车荷载动力计算将产生错误的结果; 为消除静力残余不平衡节点力在动力分析中影响, 宜先不作用列车振动荷载, 而是在静力残余不平衡节点力作用下进行动力分析, 待体系逐步趋于静平衡状态后再施加动力荷载进行求解。

关键词: 静应力场; 隧道工程; 时程动力分析; 列车振动

中图分类号: U425.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)07-1105-05

作者简介: 高峰(1964-), 男, 浙江云和人, 教授, 博士生导师, 从事隧道及地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: gaofeng1964@163.com。

Influence of static stress fields on vibration responses of a tunnel subjected to train loading

GAO Feng

(School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The influence of the initial static stresses on dynamic responses of tunnels and underground structures is studied. Some disposal methods of the initial static stresses are presented and a preferable method is recommended in the analysis of train vibration responses of tunnels. Dynamic responses of a tunnel due to the train vibration are calculated. Results indicate that the initial condition in dynamic analysis is not only the input Gauss point stresses but also the input nodal loadings, or mistakes will be aroused. In dynamic calculation of anterior time steps, the static residual forces should be only acted. When the system responses incline to static states, the vibration loading is input and the dynamic calculation of remaining time steps is continued.

Key words: static stress field; tunneling engineering; dynamic time-history analysis; train vibration

0 引言

在城市地下铁道的建设中, 由于受到诸多条件的限制, 出现了较多的近距离交叠隧道、双层隧道、交叉通道等复杂洞群结构。如上海地铁二号线与一号线在人民公园站附近空间交叉, 隧道间垂直净距仅 1 m, 走向基本正交; 深圳地铁大剧院一老街区地铁的两条线路位置在空间上重叠交错, 变化复杂, 地铁设计中采用了单洞双层双隔板、单洞双层单隔板和双洞等多种断面型式; 上海市轨道交通明珠线二期地铁工程经过黄浦大桥时, 也采用了从垂直平行过渡到水平平行的双洞线路型式; 南京地铁南北线一期工程小行站—安德门站区间出现交叠的隧道群型式; 台湾地区也有垂直双孔平行隧道。国外方面, 俄罗斯采用盾构法施工了双洞双层隧道; 新加坡高速公路交通系统采用四孔平行隧道盾构法施工穿越回填土和海相黏土冲击

层; 意大利—瑞士高速公路, 在穿越米兰一小城时从水平平行过渡到垂直平行的双车道双孔隧道型式; 日本在新建的 Tozai 地铁线与既有 Keishin 线相连时, 采用了类似于四孔麻花型的线路型式。

对于这类工程, 列车、车辆振动对结构的应力和位移都有影响, 有时是决定结构尺寸的重要因素, 是设计中需要考虑的因素。而在振动分析中对结构的静应力场也是要考虑的, 只有考虑了静应力场才能得到完整的结果。在动力计算中对静应力场的处理有多种方法, 若处理不正确或忽视静应力场对动力计算结果的影响, 将得不到正确得结果, 对设计计算将产生较大的影响。目前, 在隧道列车振动反应分析中, 静应

基金项目: 国家自然科学基金项目(50678077); 重庆市自然科学基金项目(CSTC, 2008BB6066)

收稿日期: 2008-05-05

力场对计算结果的影响往往没有引起人们的重视,为此,本文将研究静应力场对隧道列车振动响应的影响,期望能得到较准确的结果,以利于工程的设计计算。

1 静应力场的处理方法

对于地面结构,初应力对计算结果的影响已有学者作了一些研究。如张晓敏等研究了初应力拱侧向振动的固有频率^[1]。沈之容等通过对多层纤绳桅杆结构的初应力分析,看出纤绳初应力对多层纤绳桅杆结构的影响是比较大的^[2]。尧国皇等进行了钢管初应力对钢管混凝土轴压力学性能影响的研究^[3]。

对于地下结构,由于结构及周围地层的复杂性,一般得不到解析解,往往采用数值解法。在线弹性分析中,将静力和动力分开计算,然后将两种结果相加,这时结构静应力对动力分析是没有影响的。但在非线性分析中,静力与动力反应的叠加原理不再成立,动力分析中需要考虑静力效应的影响。这时,可以用两种方法进行分析:①以静力分析结果为初始条件进行动力分析^[4-5];②采用动力分析程序计算静动力问题,即将静力荷载以阶跃函数的形式施加到结构上,用动力方法进行计算,待静力反应稳定后,再进行动力分析^[6]。采用第二种方法的前提是静力荷载明确或已知。而对于隧道等地下结构,其静力解是开挖过程中地层应力不断释放的结果,与施工方法和施工过程密切相关,一般采用第一种方法进行分析。

因此,地下结构动力分析中静应力场的处理方法可分为:①对线性问题,静力与动力分开计算,然后将两种计算结果进行叠加;②静力荷载明确或已知时,采用动力分析程序计算静力问题,在此基础上进行动力计算;③无法用动力分析程序计算静力问题时,采用静力分析程序求静态解,将静应力场作为初始条件进行动力分析。由于隧道围岩一般为非线性材料,在隧道开挖过程的数值模拟中,其应力是不断释放的,因此,用动力分析程序计算是不适宜的,只能采用第3种方法。以下分析使用第3种方法时应注意的问题。

2 静应力场输入的问题

将静应力场作为初始条件进行动力分析时应注意以下3个问题:①静力分析与动力分析时模型的统一边界问题,若使用不同的边界,会产生附加应力和位移;②静应力场的输入形式;③动力荷载的输入时间。

目前,静力分析一般采用法向约束的固定边界^[4],而动力分析需采用透射边界、黏性边界、黏弹性边界等人工边界,当然计算模型的范围取的足够大时也可采用固定约束边界^[4-7]。文献[8]提出了黏弹性静-动力统一人工边界,研究了其计算精度,证明了其可靠性。分析时采用这种人工边界,就解决了边界统一的

问题。

在隧道及地下结构动力计算时应注意静应力场的输入形式。静应力场可以以节点应力或高斯点应力的形式输入(内力)。一般情况下,高斯点应力是较准确的值,而节点应力是由高斯点应力通过一定的方式处理后得到的,其准确性或精确性比高斯点应力低^[9-10],因此输入时最好用高斯点应力。同时要注意,不论静应力场是以节点应力还是以高斯点应力的形式输入,必须同时将节点荷载或节点力输入(外荷载),否则将得不到正确的结果。

采用有限元模拟隧道的施工过程时,可以得到结构体系的节点荷载和等效的节点力,以此作为初始条件用于求解体系的动力反应。在静力非线性分析中,是通过迭代运算进行的。对每一荷载步,判断残余不平衡节点力和位移的收敛情况,一般是判断残余不平衡节点力和位移的范数^[4],即:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta u_i^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2}}, \quad \varepsilon = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N \psi_i^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N F_i^2}}, \quad (1)$$

式中, ε 为规定的值, u_i 为节点位移, Δu_i 为节点位移增量, ψ_i 为残余不平衡节点力, F_i 为外荷载节点力, N 为结构体系的自由度总数。当 ε 达到人为设置的要求时,即停止迭代运算,进行下一步计算。在此过程中,并不能保证所有的节点都精确达到了平衡,因此,这些不平衡节点力在动力分析中将以阶跃荷载的形式作用在体系上,若在动力非线性分析中不对静力残余不平衡节点力进行处理,静力残余不平衡节点力产生的反应将会影响动力分析结果,得不到真实的反应值。

3 算例及分析

图1为某城市地铁区间近距离交叠隧道工程的一种典型断面,以下分析静应力场对隧道列车动力响应的影响。图2为体系有限元网格,采用8节点四边形等参数单元,隧道初期支护厚度为30 cm,二次衬砌最小厚度为50 cm。材料的物理力学参数见表1。列车竖向振动荷载时程曲线如图3所示^[11-12]。

有限元计算范围为宽70 m×高80 m。在衬砌附近的单元划分的较密,远离衬砌的单元划分的较大,单元最小尺寸0.3 m,最大尺寸5 m。由于本文着重点在于分析静应力场对动力分析的影响,因此,使用了如下的边界条件:上部自由,下部铰接,两侧法向约束。侧向边界越大计算结果越精确,理论上应取无穷远,但是这将造成计算无法进行,因此需采用人工边界,对此已有许多文献进行过研究^[4-8]。

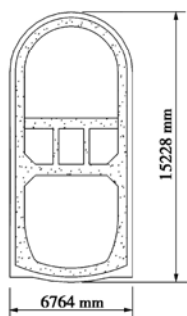


图 1 衬砌断面

Fig. 1 Cress-section of lining

表 1 材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters for materials

材料	弹性模量 /kPa	泊松 比	重度 /(kN·m ⁻³)	c /kPa	φ /(°)
围岩 1	5.5×10 ⁶	0.26	24	800.0	37.0
围岩 2	2×10 ⁶	0.32	22	200.0	32.5
围岩 3	600000	0.38	20	50.0	27.0
围岩 4	200000	0.44	18	12.5	22.0
混凝土	2.6×10 ⁷	0.18	24	3000.0	56.0

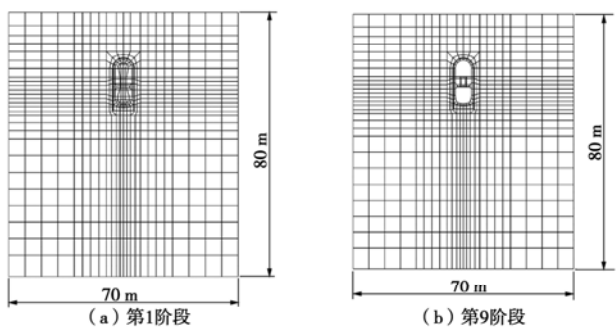


图 2 体系有限元网格

Fig. 2 Finite element mesh

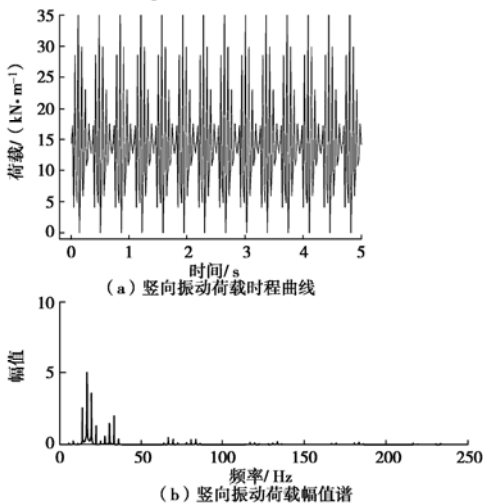


图 3 列车竖向振动荷载时程曲线和列车竖向振动荷载幅值谱

Fig. 3 Curves of vertical train loading and amplitudes of vertical train loading

根据表 1 的材料参数，计算可得混凝土的纵波波速为 3435 m/s，围岩的最小纵波波速为 785 m/s，由图 3 (b) 可以看出列车荷载的主要频率以低频为主，在

50 Hz 以下。由以上数据，根据文献[13]，对于尺寸为 0.3 m 的混凝土衬砌单元的最高频率为 3646 Hz，尺寸为 5.0 m 的围岩单元的最高频率为 50 Hz。因此围岩的有限元网格尺寸为 5 m 可以满足精度要求。

首先进行静力计算。在围岩的自重应力场计算完成后，根据施工步骤，采用释放荷载法^[4]，计算出衬砌结构和围岩的最终静应力场。计算中共分 9 步，模拟具体的开挖过程。

静力和动力分析分别采用自编的程序 GEOEPL2D 和 DYNIMP2D 进行计算^[4]。

采用子空间迭代法^[4, 9]，对有限元体系做了振型计算，得到体系的基频 $\omega=22$ 。参照文献[4]，由振型计算结果并取阻尼系数 $\xi=0.05$ ，计算得到瑞利阻尼常数 $\alpha=1.2$ 、 $\beta=0.002$ ，隐式时间积分步长 $\Delta t=0.002$ s。

静力与动力计算均采用弹塑性本构模型，材料屈服条件为 Mohr-Coulomb 屈服准则。

对上述模型，分别用下列 3 种方式进行动力计算。

(1) 静应力场仅输入高斯点应力（内力），不输入节点荷载（外荷载）。先不加振动荷载，在此状况下进行动力计算，积分时长达到 2.0 s 后再施加振动荷载进行计算，积分总时长为 7.0 s。

(2) 静应力场以高斯点应力形式输入，同时输入节点荷载（外荷载）。先不加振动荷载，在此状况下进行动力计算，积分时长达到 2.0 s 后再施加振动荷载进行计算，积分总时长为 7.0 s。

(3) 静应力场以高斯点应力形式输入，同时输入节点荷载（外荷载）。在此状况下直接施加振动荷载进行动力计算，积分总时长为 5.0 s。

图 4~6 为采用第一种计算方式衬砌上隔板中点处的位移时程曲线、衬砌上隔板中点上缘的第一主应力时程曲线及第三主应力时程曲线。图 7~9 为采用第二种计算方式隔板中点及隔板中点上缘处的位移和应力时程曲线。图 10~12 为同一部位采用第三种计算方式相应的计算结果。

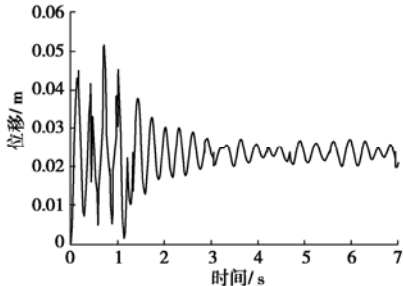


图 4 位移时程曲线（第一种方式）

Fig. 4 Time-history curves of displacement

由静力计算可知，衬砌上隔板中点上缘的第一主应力和第三主应力分别为 -156.06、-984.89 kPa。从图 4~6 可看到，前 2 s 虽然没有施加动荷载，但也产生的较大的应力和位移，最大位移达到 5.1 cm，最大第

一主应力和第三主应力分别达到 737 MPa 和 -800 MPa, 结构是难以承受这样巨大的应力的, 已达到破坏状态。这是由于未施加节点荷载, 节点力不平衡, 产生了较大的位移和应力的结果。

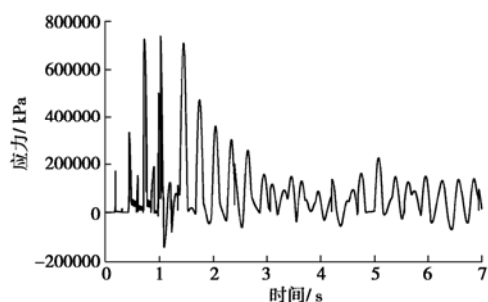


图 5 第一主应力时程曲线 (第一种方式)

Fig. 5 Time-history curves of major principal stress

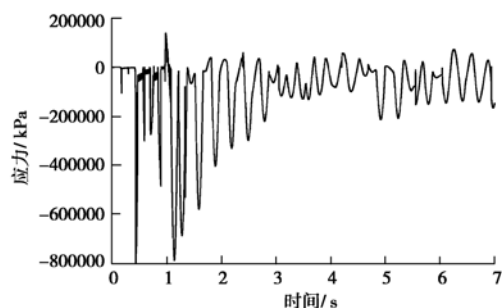


图 6 第三主应力时程曲线 (第一种方式)

Fig. 6 Time-history curves of major principal stress

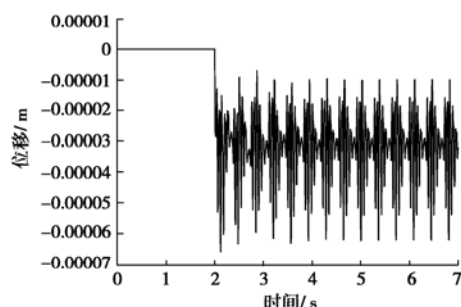


图 7 位移时程曲线 (第二种方式)

Fig. 7 Time-history curves of displacement

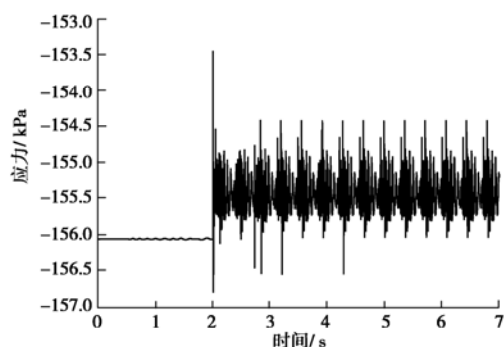


图 8 第一主应力时程曲线 (第二种方式)

Fig. 8 Time-history curves of major principal stress

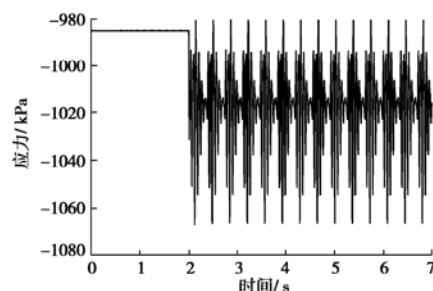


图 9 第三主应力时程曲线 (第二种方式)

Fig. 9 Time-history curves of major principal stress

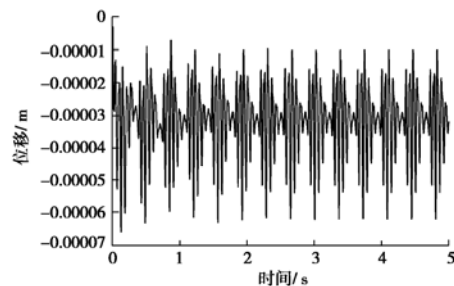


图 10 位移时程曲线 (第三种方式)

Fig. 10 Time-history curves of displacement

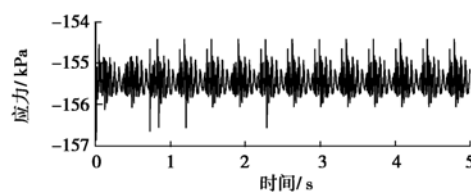


图 11 第一主应力时程曲线 (第三种方式)

Fig. 11 Time-history curves of major principal stress

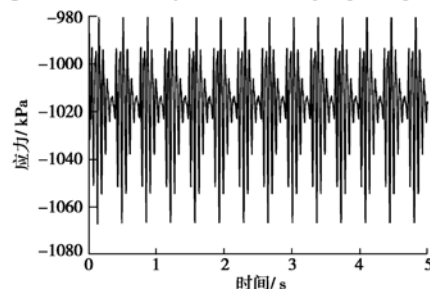


图 12 第三主应力时程曲线 (第三种方式)

Fig. 12 Time-history curves of major principal stress

由图 7 可以看到, 在静力残余不平衡节点力作用下 (前 2 s), 由于阻尼的存在, 衬砌上隔板中点处的位移逐渐趋近于零; 同理, 由图 8, 9 可以看到, 衬砌上隔板中点上缘的第一主应力和第三主应力逐渐趋近于静应力场。这时静力残余不平衡节点力产生的附加应力已消除, 再施加动荷载就是结构的动力反应, 见图 7~9 中的 2~7 s 时程曲线。

图 10~12 的时程曲线是直接施加动力荷载的结果, 即有动力荷载的作用也包括了静力残余不平衡节点力的作用, 比较图 10 和图 7、图 11 和图 8 以及图 12 和图 9 可以看出, 虽然两种计算方式计算的位移和应力结果相近, 但还是有一定的差别。

由以上分析可知, 第一种计算方式引起了较大的附加应力和位移, 产生了错误的结果; 第三种计算方式没有消除静力残余不平衡节点力的影响, 虽然通过与第二种计算方式的结果比较看到其影响有限, 但还是存在一定的差别, 而第二种计算方式消除了静力残余不平衡节点力的影响, 因此, 采用第二种计算方式可以得到较好的结果。

4 结 论

(1) 对于隧道等地下结构, 由于其周围地层一般为非线性材料, 静力场和动应力场不能进行叠加。另外, 其静力解是开挖过程中地层应力不断释放的结果, 与施工方法和施工过程密切相关, 无法用动力分析程序进行计算。宜采用静力分析程序模拟其开挖过程, 以此作为初始条件进行动力分析的计算方法。

(2) 静应力场仅输入高斯点应力或节点应力, 不输入节点荷载, 以此为初始条件进行隧道列车荷载动力计算将产生错误的结果。

(3) 静应力场以高斯点应力或节点应力的形式输入(内力), 同时输入节点荷载(外荷载), 以此为初始条件进行动力计算可以得到的较好的结果。

(4) 静力残余不平衡节点力虽然不是很大, 但是对动力分析结果也是有影响的。为消除静力残余不平衡节点力在动力分析中影响宜先不作用列车振动荷载, 而是在静力残余不平衡节点力作用下进行动力分析, 由于阻尼的作用, 体系将逐步趋于静平衡状态, 此时再施加动力荷载进行动力求解。

参考文献:

- [1] 张晓敏, 盛天文, 张培源. 初应力拱侧向振动的固有频率[J]. 工程力学, 2004, **21**(4): 178 - 182. (ZHANG Xiao-min, SHENG Tian-wen, ZHANG Pei-yuan. Natural frequencies of initially stressed arches in lateral vibration[J]. Engineering Mechanics, 2004, **21**(4): 178 - 182. (in Chinese))
- [2] 沈之容, 马 星, 颜明忠. 多层纤绳桅杆结构的纤绳工作研究[J]. 特种结构, 2002, **19**(3): 51 - 53. (SHEN Zhi-rong, MA Xing, YAN Ming-zhong. Research on working status of multilayer cable guyed mast[J]. Special Structures, 2002, **19**(3): 51 - 53. (in Chinese))
- [3] 尧国皇, 曾 萌. 钢管初应力对钢管混凝土轴压力学性能影响的研究[J]. 黑龙江工程学院学报, 2002, **16**(4): 11 - 13. (RAO Guo-huang, ZENG Meng. Effects of pre-stress steel tubes on concrete-filled stress tubular subjected to compression[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2002, **16**(4): 11 - 13. (in Chinese))
- [4] 潘昌实. 隧道力学数值方法[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1995. (PAN Chang-shi. Numeric method of tunnel mechanics[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1995. (in Chinese))
- [5] OWEN D R J, HINTON E. Finite elements in plasticity, theory and practice[M]. Swansea: Pineridge Press Limited, 1980.
- [6] 杜修力, 涂 劲. 有缝拱坝—地基系统非线性地震波动反应分析方法[J]. 地震工程与工程振动, 2000, **20**(1): 11 - 20. (DU Xiu-li, TU Jin. Nonlinear seismic response analysis of arch dam—foundation systems with cracked surfaces[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, **20**(1): 11 - 20. (in Chinese))
- [7] 廖振鹏. 工程波动导引[M]. 北京: 科学出版社, 1996. (LIAO Zhen-peng. Guide for wave matter in engineering[M]. Beijing: Science Press, 1996. (in Chinese))
- [8] 刘晶波, 李 彬. 三维黏弹性静—动力统一人工边界[J]. 中国科学(E 辑), 2005, **35**(9): 966 - 980 (LIU Jing-bo, LI Bin. A unified viscous-spring artificial boundary for 3-D static and dynamic applications[J]. Science in China (Series E), 2005, **35**(9): 966 - 980. (in Chinese))
- [9] 吴鸿庆, 任 侠. 结构有限元分析[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000. (WU Hong-qing, REN Xia. Finite element analysis of structure[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2000. (in Chinese))
- [10] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京: 水利水电出版社, 1979. (ZHU Bo-fang. Theory of finite element method and its application[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1979. (in Chinese))
- [11] 李成辉. 深圳地铁道床动荷载分析[J]. 西南交通大学学报, 2001, **36**(2): 360 - 362. (LI Cheng-hui. Analysis of dynamic loading on bed-road in Shenzhen subway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2001, **36**(2): 360 - 362. (in Chinese))
- [12] 翟婉明. 车辆—轨道耦合动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1997. (ZHAI Wan-ming. Coupling dynamics on vehicle-railway system[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1997. (in Chinese))
- [13] 钱七虎, 黄小平, 唐德高. 冲击荷载作用下有限元方法求解波动过程的精度研究[J]. 爆炸与冲击, 1995, **15**(1): 1 - 9. (QIAN Qi-hu, HUANG Xiao-ping, TANG De-gao. A study of solution accuracy of FEM on wave propagation problems under shock loading[J]. Explosion and Shock Waves, 1995, **15**(1): 1 - 9. (in Chinese))