

联络通道与主隧道连接处列车振动响应分析

施成华, 刘强, 彭立敏, 杨伟超

中南大学土木工程学院, 长沙 410075

摘要 基于有效应力分析法, 运用有限差分程序 FLAC3D 建立了盾构隧道主隧道、联络通道、地层相互作用三维计算模型。分析了两辆列车单次交汇运营条件下, 联络通道与隧道结构连接处典型断面特征点处土层孔隙水压力、盾构隧道衬砌结构变形及主应力变化。计算结果表明: 在列车振动荷载作用下离隧道拱底越近的土层, 孔隙水压力与初始有效应力的比值越大, 但均小于 1, 土体尚未达到发生液化的条件; 衬砌结构位移最大值出现在盾构隧道拱底, 为 0.16mm; 衬砌结构拉、压应力最大值均未超过结构抗拉、抗压强度设计值, 表明衬砌结构在列车振动荷载作用下是安全的。

关键词 盾构隧道; 联络通道; 列车振动荷载; 有效应力分析法

中图分类号 U25

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.35.002

Analysis of Dynamic Responses of Junction of Connected Aisle and Tunnel Subjected to Train Vibrating Load

SHI Chenghua, LIU Qiang, PENG Limin, YANG Weichao

School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, 410075, China

Abstract Based on effective stress analysis method, the main tunnel, connected aisle and formation interaction three-dimensional calculation model was proposed by finite difference program FLAC3D. On condition of single-time intersection of two trains, pore water pressure, deformation and principle stress of the typical section characteristic points of junction between the connected aisle and tunnel was emphatically analyzed. The results show that: under train vibration load, the closer the soil layer from the arch bottom, the larger the PPR, but all are smaller than 1, which still cannot reach the condition of liquefaction; the maximum displacement of lining appears at the arch bottom, of which the value is 0.16 mm; the maximum tension-compression stress of lining are all smaller than its design value of corresponding strength, which shows that the lining is safe under train vibration load.

Keywords shield tunnel; connected aisle; train vibrating load; effective stress analysis method

0 引言

广深港客运专线狮子洋隧道位于东涌站—虎门站区间, 是广深港客运专线的控制性工程。隧道全长 10800m, 是中国第一座采用盾构法施工的水下铁路隧道, 也是目前国内隧道最长、标准最高的水底隧道, 设计行车时速高达 350km/h。其中盾构隧道段长 9340m, 内径 9.8m, 外径 10.8m, 管片厚度 500mm。左右线隧道之间按间距不大于 500m 设置联络通道, 全线共设置联络通道 23 处。

目前, 对于列车振动荷载下隧道结构受力变形特性, 大多学者运用有限元或有限差分法进行研究。例如 Andersen 等^[1]

利用二维和三维模型, 采用耦合有限元-边界元方法研究了列车在隧道中运行引起的振动问题。白冰等^[2]通过数值计算方法研究了地铁列车振动荷载作用下, 由左右平行隧道过渡到上下平行隧道情形下的三维弹性动力响应。王祥秋等^[3]在京广线朱亭隧道列车振动荷载现场测试成果的基础上, 对 3 种不同断面形状的隧道衬砌结构的动力响应进行了分析。但相关研究主要是针对普通铁路隧道和地铁隧道, 专门针对高速铁路水下盾构隧道的研究甚少。水下盾构隧道显著特点是穿越较宽的河床或基床, 隧道穿越地层性质及埋深复杂多变, 性质呈现出较大的不均匀性。在高速列车振动荷载作用

收稿日期: 2013-04-24; 修回日期: 2013-10-10

基金项目: 国家自然科学基金-高速铁路联合基金项目(U1134208)

作者简介: 施成华, 副教授, 研究方向为隧道与地下工程动力, 电子邮箱: csusch@163.com

下,有可能出现不均匀沉降,地基可能产生液化。因此,有针对性的开展水下盾构隧道列车振动响应分析具有一定的指导意义。

狮子洋隧道地质条件复杂多变,地下水丰富,地层透水性强。根据地质勘察报告,里程 DIK34+700 联络通道(第2个)位置处地层多变、地质条件较差,隧道处于软硬不均地层中,主要穿越黏性土层和岩石弱风化层,选取该断面作为典型断面进行分析,该断面地质剖面如图1所示。

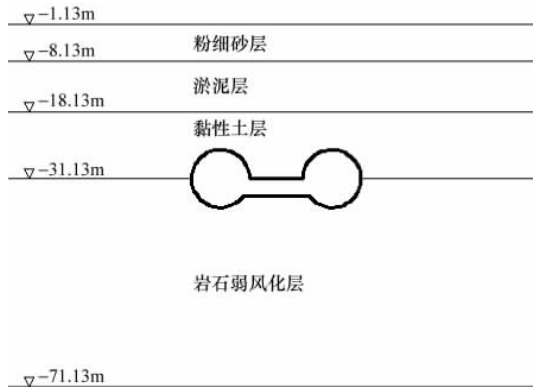


图1 DIK34+700 断面地质剖面示意
Fig.1 Geologic section of DIK34+700

1 计算原理与计算模型

1.1 孔隙水压力模型

基于 Martin 等根据饱和砂土在不排水条件下孔隙水压力增量与排水条件下体积应变增量之间的关系,Byrne 提出一个更为简明的孔压体变计算模型(Byrne 孔压体变模型)^[4]。本文计算过程中拟采用该模型,计算原理表达式为

$$\frac{\Delta \varepsilon_{vl}}{\gamma} = C_1 \exp \left[-C_2 \left(\frac{\varepsilon_{vl}}{\gamma} \right) \right] \quad (1)$$

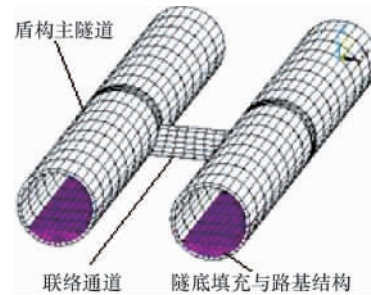
式中, ε_{vl} 、 $\Delta \varepsilon_{vl}$ 分别为体积应变和体应变增量, γ 为循环剪应变, C_1 、 C_2 为试验参数, 一般情况下, 参数 C_1 、 C_2 满足以下关系:

$$\begin{cases} C_1 = 8.7(N_{63.5})^{-1.25} \\ C_2 = 0.4/C_1 \end{cases} \quad (2)$$

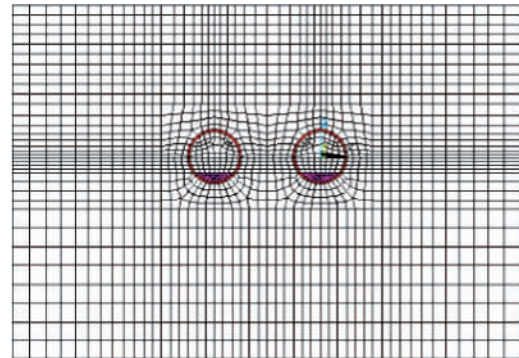
式中, $N_{63.5}$ 为标准贯入试验锤击数。

1.2 计算模型及计算参数

本文中计算模型取水平面内垂直主隧道轴线方向为 x 轴, 平行主隧道轴线方向为 y 轴, 垂直向上方向为 z 轴。计算范围: $-61\text{m} \leq x \leq 40\text{m}$, $0 \leq y \leq 80\text{m}$, $-40 \leq z \leq 30\text{m}$ 。计算模型如图2所示。



(a) 模型
(a) Model



(b) 联络通道
(b) Connected aisle

图2 计算模型网格划分
Fig.2 Grid division of calculate models

地层材料性质采用弹塑性本构关系, 屈服条件满足 Mohr-Coulomb 准则; 管片采用弹性曲梁单元模拟, 管片接缝的影响通过折减结构的抗弯刚度来考虑(折减系数取 0.75)^[5], 动力计算时, 材料强度和弹性模量按静力时的 1.3 倍取值^[6], 相关地层及隧道支护结构材料力学参数见表1(表1中 C50 管片弹性模量是折减后的值)。

表1 地层及隧道衬砌结构材料力学参数

Table 1 Material mechanics parameters of related formation and lining structure

土层	厚度/m	天然重度/ (kN/m ³)	变形模量/ MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	标贯击数	渗透系数/ (m·d ⁻¹)
粉细砂	7.00	19.5	20	0.28	0	30.0	15	5.0000
淤泥层	10.00	16.8	2	0.41	11	7.1	3	0.0001
黏性土层	13.00	19.2	5	0.35	36	20.0	9	0.0032
岩石弱风化	40.00	26.0	2530	0.23	150	50.0	80	0.8000
C50 管片	0.50	26.0	2630	0.17				
C35 联络通道衬砌	0.35	24.5	3150	0.20				

1.3 动力计算边界条件

对地下结构进行动力分析,模型周围边界条件的选取是一个主要内容,FLAC3D中允许采用静态边界条件吸收边界上的入射波^[7],该边界条件是 Lysmer 等于 1969 年提出的,具体做法是在模型底部边界的法向和切向分别设置自由的阻尼器,从而实现吸收入射波的目的,阻尼器提供的法向和切向牵引黏滞力计算式分别为

$$\begin{cases} t_n = -\rho_0 c_p v_n \\ t_s = -\rho_0 c_s v_s \end{cases} \quad (3)$$

式中, v_n, v_s 分别为边界点法向和切向速度分量; c_p, c_s 分别为边界地层 P 波和 S 波波速。

1.4 列车振动荷载

列车在不平顺的轨道上行驶,竖向激振荷载可用一个激振力函数来模拟,其表达式为^[8]:

$$F(t) = F_0 + F_1 \sin(\omega_1 t) + F_2 \sin(\omega_2 t) + F_3 \sin(\omega_3 t) \quad (4)$$

式中, F_0 为车轮静载; F_1, F_2, F_3 均为振动荷载,分别对应于表 2^[9]中的控制条件①~③中的某一典型值。令列车簧下质量为 m_0 ,则相应的振动荷载幅值为

$$F_i = m a_i \omega_i^2 \quad (i=1, 2, 3) \quad (5)$$

式中, a_i 为典型矢高,与表 2 中①、②、③三种情况相对应; ω_i 为对应车速下不平顺振动波长的圆频率,分别对应于表 2 中相应条件①、②、③,其计算式为

$$\omega_i = 2\pi v / L_i, \quad i=1, 2, 3 \quad (6)$$

式中, v 为列车的运行速度, L_i 为典型波长,对应于表 2 中①、②、③三种情况。

表 2 英国轨道几何不平顺管理值

Table 2 Geometric parameters for UK railway engineering

控制条件	波长/m	正矢/mm
① 按行车平顺性	50.00	16.000
	20.00	9.000
	10.00	5.000
② 按作用到线路上的动力附加荷载	5.00	2.500
	2.00	0.600
	1.00	0.300
③ 波形磨耗	0.50	0.100
	0.05	0.005

高速车辆的轴重一般为 16~17t^[10],这里取轴重为 17t,簧下质量 $m_0=750\text{kg}$ 。另外考虑到狮子隧道的运行标准,对应于①、②、③三种控制条件下的不平顺振动波长和矢高分别取为: $L_1=10\text{m}, a_1=3.5\text{mm}; L_2=2\text{m}, a_2=0.4\text{mm}; L_3=0.5\text{m}, a_3=0.08\text{mm}$ 。由此得到的列车振动荷载时程如图 3 所示(图 3 中只给出了前 0.5s 的时程)。

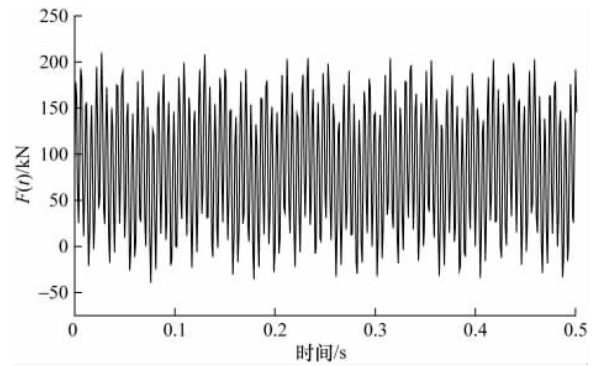


图 3 列车振动荷载时程曲线
Fig. 3 Time-history curve of vibrating load

2 计算结果与分析

2.1 列车振动荷载作用下各土层反应

超孔隙水压力与初始有效应力之比 PPR (Pore Water Pressure Ratio) 可作为判断土体是否液化的有效判据^[11],当土层的超孔隙水压力与初始有效应力之比达到 1 时,土层将发生液化。列车通过典型分析断面时,地表以下 3m、盾构隧道拱顶和拱底处各土层的孔隙水压力变化时程曲线见图 4。列车荷载作用下各土层的超孔隙水压力与土层的初始有效应力比值见表 3。

分析图 4 可知:当列车驶入断面时,分析断面各土层孔隙水压力开始出现轻微的波动;当整个列车通过分析断面各特征点时,随着列车的反复加载、卸载,土层孔隙水压力不断剧烈地上升、下降;当列车驶过分析断面时,土层孔隙水压力波动幅度逐渐减小,直至恢复初始水平;各土层的孔隙水压力时程曲线形状比较相似,大体上是由多个简谐波叠加而成,只是各土层孔隙水压力到达峰值的时间不一样。

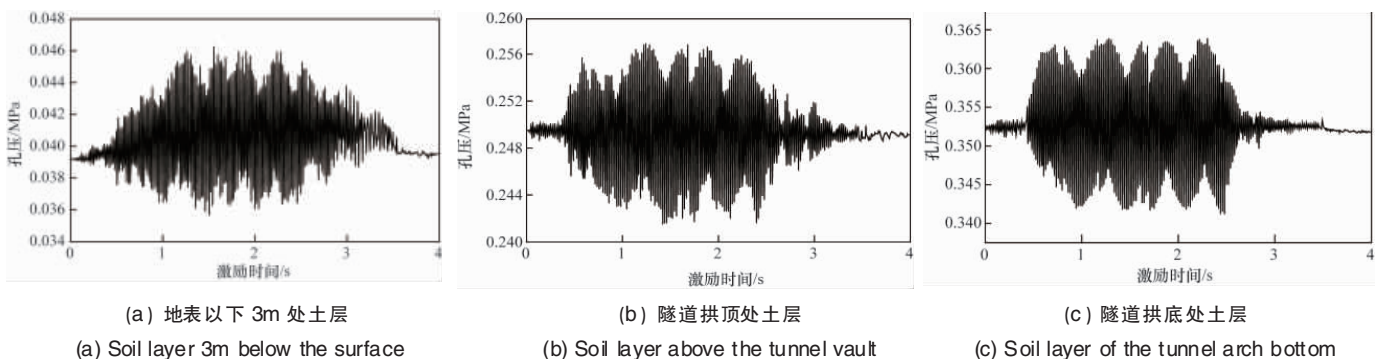


图 4 各土层的孔隙水压力变化时程曲线

Fig.4 Time-history curve of pore water pressure of every soil layer



表 3 各土层超孔隙水压力与初始有效应力之比
Table 3 PPR of every soil layer

土层类别	与隧道拱底的相对距离/m	超孔隙水压力与初始有效应力之比
粉细砂层	拱底之上 33	0.481
黏性土层	拱底之上 10	0.522
黏性土层	拱底之上 5.5	0.527
岩石弱风化	拱底处	0.556
岩石弱风化	拱底之下 2	0.474

在列车经过过程中,地表以下 3m、盾构隧道拱顶和拱底处各土层的最大孔隙水压力分别为 46.3、261.9 和 365.8kPa,最大变幅分别为 10.6、15.4 和 22.7kPa,可见离隧道拱底越近的土层,其孔隙水压力变幅越大。

由表 3 可知:距离隧道仰拱底部越近的土层,其 PPR 值越大,也就是距离列车振动荷载振源越近的土层,其液化的可能性越大;各土层的 PPR 值均小于 1,说明在列车单次交汇情况下各土体尚达不到发生液化的条件。

2.2 列车振动荷载作用下隧道衬砌结构位移响应分析

图 5 为列车经过分析断面时,列车振动荷载引起的盾构隧道拱顶、拱底位移时程曲线。图 6 为列车驶出该断面后,衬砌结构位移分布。

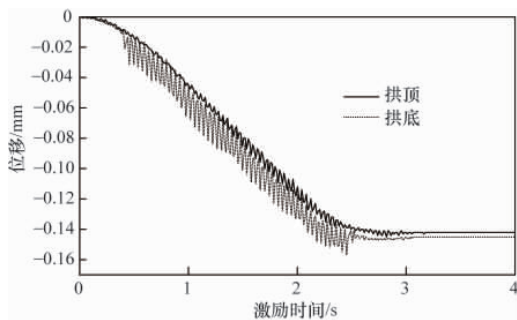


图 5 隧道拱顶、拱底位移时程曲线

Fig. 5 Time-history curve of vault and arch bottom of tunnel

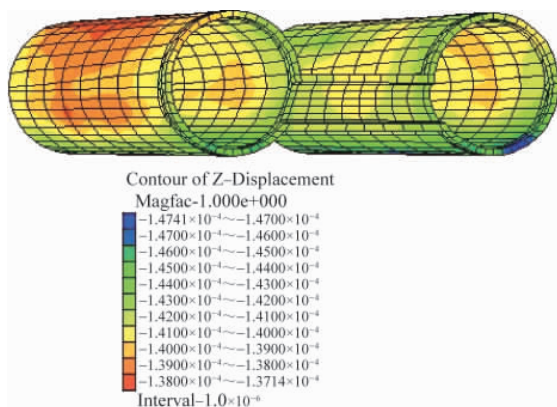


图 6 隧道衬砌结构位移分布云

Fig. 6 Displacement distribution nephogram of lining

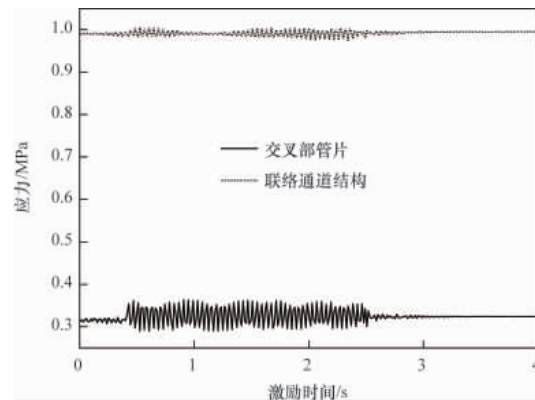
分析图 5 可知:当列车驶入断面时,计算点有少许的垂直向下方向的位移;当整个列车通过计算点所在断面时,列车振动荷载致使衬砌结构产生振动,在列车振动荷载作用下,衬砌结构顶部和底部做上、下受迫运动,并且伴随有整体下沉的趋势;当列车驶过断面时,衬砌结构受迫振动逐渐减弱,结构位移有少许的回弹,直至趋于一稳定值;在列车振动荷载作用下,结构各部位有相同的运动趋势,但结构底部振动幅度要比结构顶部大。

列车作用过程中,结构最大位移出现在盾构隧道拱底,为 0.16mm.说明列车单次交汇条件下由列车振动荷载引起的结构位移或变形很小,满足隧道周边收敛变形的设计要求。

2.3 列车振动荷载作用下隧道衬砌结构主应力变化分析

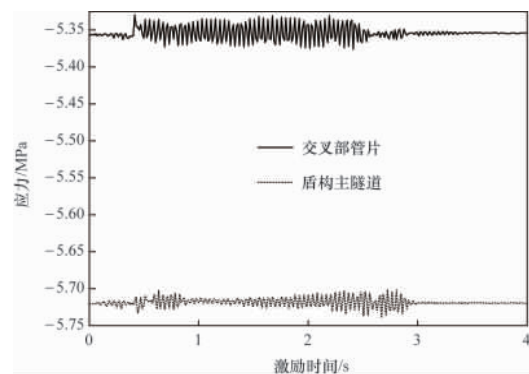
列车振动荷载作用下,分析断面衬砌结构各特征点第一、第三主应力时程曲线见图 7,衬砌结构第一、第三主应力分布见图 8,衬砌结构各典型部位应力结果汇总表 4。

分析图 7 可知:结构主应力变化时程曲线同结构位移时程曲线及土体孔隙水压力时程曲线相似;当列车驶入分析断面时,该断面各特征点主应力开始缓慢的小范围波动;当整个列车通过分析断面各特征点位置时,特征点主应力开始急



(a) 第一主应力

(a) First main stress



(b) 第三主应力

(b) Third main stress

图 7 各特征点主应力时程曲线

Fig.7 Time-history curve of principal stress of each characteristic point

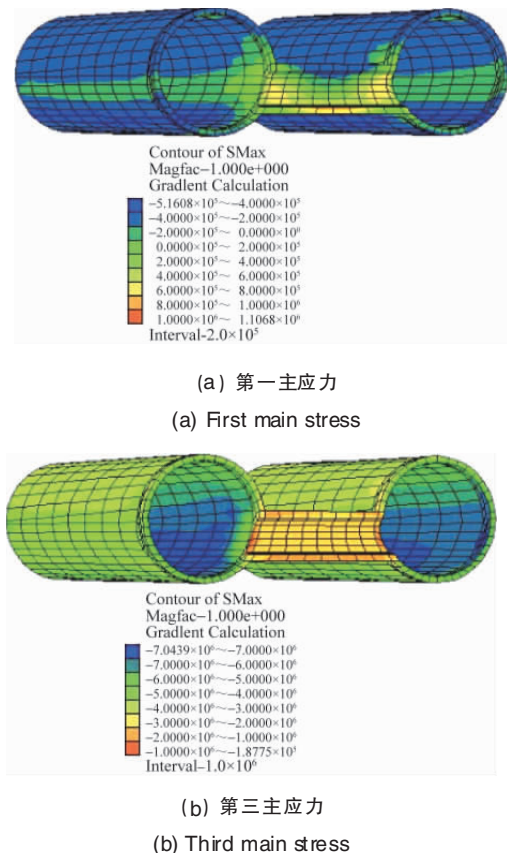


图 8 衬砌结构主应力分布云

Fig. 8 Principal stress distribution nephogram of lining

表 4 各典型部位主应力结果

Table 4 Principal stress results of each typical part

衬砌结构部位	最大拉应力/MPa	最大压应力/MPa
盾构主隧道	联络通道处 0.79	联络通道处 7.04
联络通道	底板 1.11	顶部两侧 45° 3.03
交叉部管片	底板 0.81	边墙外侧 4.27

剧波动;当列车驶出断面时,主应力时程曲线波动幅度逐渐减小,直至趋于一稳定值。

列车振动荷载作用下,同列车作用前相比衬砌结构主应力分布规律同列车作用前相似,说明结构主应力分布规律受列车振动荷载影响不大。

在列车振动荷载作用过程中,衬砌结构拉应力最大值出现在联络通道结构底板位置处,为 1.11MPa,较列车作用前增大 4%;衬砌结构压应力最大值出现在盾构隧道衬砌环靠近联络通道一侧拱顶偏下 25°位置处,为 7.04MPa,较列车作用前增大 2%。列车振动荷载作用下,衬砌结构拉、压应力最大值均未超过结构抗拉、抗压强度设计值(表 4),说明隧道衬砌结构在列车振动荷载作用下是安全的。

3 结论

(1) 离隧道拱底越近的土层,也就是距离列车荷载振源越近的土层,其孔隙水压力变幅越大,孔隙水压力与初始有效应力的比值越大,即其液化的可能性越大。

(2) 各土层的超孔隙水压力与初始有效应力的比值均小于 1,说明在列车单次交汇条件下土体尚达不到发生液化的条件。

(3) 列车作用过程中,结构最大位移出现在盾构隧道拱底,为 0.16mm。说明列车单次交汇条件下由列车振动荷载引起的结构位移或变形很小。

(4) 在列车振动荷载作用过程中,衬砌结构最大拉应力出现在联络通道结构底板位置处,为 1.11MPa,较列车作用前增大 4%;衬砌结构最大压应力出现在盾构隧道衬砌环靠近联络通道一侧拱顶偏下 25°位置处,为 7.04MPa,较列车作用前增大 2%。

(5) 在列车振动荷载作用过程中,衬砌结构拉、压应力最大值均未超过结构抗拉、抗压强度设计值,表明结构在列车振动荷载作用下是安全的。

参考文献 (References)

[1] Andersen L, Jones C. Coupled boundary and finite element analysis of vibration from railway tunnels—a comparison of two and three-dimensional models[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293(3): 611–625.

[2] 白冰, 李春峰. 地铁列车振动作用下交叠隧道的三维动力响应[J]. 岩土力学, 2007, 28(S1): 715–718.
Bai Bing, Li Chunfeng. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S1): 715–718.

[3] 王祥秋, 杨林德, 周治国. 列车振动荷载作用下隧道衬砌结构动力响应特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1337–1342.
Wang Xiangqiu, Yang Linde, Zhou Zhiguo. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7): 1337–1342.

[4] Byrne P M. A cyclic shear-volume coupling and pore pressure model for sand [C]// Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. St. Louis: [ns.], 1991: 47–55.

[5] 张海波, 殷宗泽, 朱俊高. 盾构法隧道衬砌施工阶段受力特性的三维有限元模拟[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 990–994.
Zhang Haibo Yin Zongze, Zhu Jungao. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 990–994.

[6] 祝彦知, 冯紫良, 方志. 地震动下考虑各向异性土体盾构隧道数值模拟[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 710–716.
Zhu Yanzhi, Feng Ziliang, Fang Zhi. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(5): 710–716.

[7] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
Chen Yumin, Xu Dingping. FLAC/FLAC3D foundation and engineering examples[M]. Beijing: China Water Power Press, 2009.

[8] 潘昌实, Pande G N. 黄土隧道列车动荷载响应有限元初步数定分析研究[J]. 土木工程学报, 1984, 17(4): 19–28.
Pan Changshi, Pande G N. China Civil Engineering Journal, 1984, 17(4): 19–28.

[9] 王志勇, 梁波. 高速列车荷载作用下仰拱对隧道整体动力特性的影响分析[J]. 现代隧道技术, 2008, 48(5): 28–33.
Wang Zhiyong, Liang Bo. Modern Tunnelling Technology, 2008, 48(5): 28–33.

[10] 李亮, 张丙强, 杨小礼. 高速列车振动荷载下大断面隧道结构动力响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4259–4265.
Li Liang, Zhang Bingqiang, Yang Xiaoli. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4259–4265.

[11] 国胜兵, 王明洋, 钱七虎. 饱和砂土爆炸液化特性研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 427–435.
Guo Shengbing, Wang Mingyang, Qian Qihu. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 427–435.

(责任编辑 赵业玲)