

文章编号: 1000-7598-(2009) 01-0123-06

地铁列车振动作用下近距离平行隧道的弹塑性动力响应

白 冰, 李春峰

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘 要: 利用有限元数值方法, 对地铁列车振动荷载作用下近距离平行隧道结构的二维弹塑性动力响应进行模拟, 分析了单列列车荷载以及双列列车荷载作用下土体-隧道结构体系的加速度和内力响应时程曲线。研究表明, 列车动力荷载作用下的内力值要比无列车荷载作用下的内力值有较大程度的增加; 在单列列车荷载作用下, 另一相邻平行隧道的加速度响应、弯矩、轴力峰值要比列车运行所在隧道相应点处的响应值要小; 在双列列车荷载作用下隧道结构体系动力响应值要比单列列车荷载作用下的动力响应值有显著增加。

关 键 词: 地铁列车; 振动加速度; 地铁隧道; 动力响应

中图分类号: U 459.1; TU 435

文献标识码: A

Elastoplastic dynamic responses of close parallel metro tunnels to vibration loading

BAI Bing, LI Chun-feng

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Two-dimensional elastoplastic dynamic responses of close parallel metro tunnels to vibration loading caused by passing metro trains are studied by using finite element method. The responses of soil-tunnel system such as vibration acceleration, axial load and bending moment etc. are analyzed for one-arrange train loading and two-arrange train loading. Calculation results show that the dynamic responses such as axial load and bending moment are obvious. The responses of the tunnel with passing metro trains are greater than another tunnel without passing metro train. When two-arrange trains are passing simultaneously, the dynamic responses are notably increased than the responses caused by one-arrange passing trains.

Key words: metro train; vibration acceleration; metro tunnel; dynamic response

1 引 言

地铁列车振动荷载作用对周围建筑物和环境的影响^[1]以及它对土体-隧道结构体系本身的安全性影响问题已日益受到人们的重视^[2-4], 特别是近年来, 由于大量近距离隧道(如平行隧道、交叠隧道等)的兴建以及地铁列车运行速度的快速提高使得这一问题更为突出^[5]。一般而言, 地铁列车运行期间的振动不会立即导致隧道结构的破坏, 但在动力荷载的长期反复作用条件下它可能会使隧道结构以及周围的软弱地层(如饱和砂土或粉土)产生液化或振陷变形并使其强度不断减小, 最终危及地铁

列车的运行安全。

除理论分析和现场测试之外, 目前将地铁列车荷载简化为某种特定的荷载作用模式, 然后进行动力有限元分析, 是研究土体-隧道结构体系动力响应的一个有效手段, 它可以模拟多种工况下以及长期运行过程等复杂条件下土体-隧道结构体系的动力学响应, 从而为地铁隧道的设计提供依据。Balendra 等^[2]研究了地铁列车振动荷载作用下隧道结构体系的动力响应。Chua 等^[3]研究了既有建筑物在地铁列车振动荷载影响下的动力响应。Guan 等^[4]通过坐标变换对主隧道内有车辆恒速通过时, 主、辅隧道的动力响应以及土-隧道间的动力相互作用进行了三

收稿日期: 2007-05-28

基金项目: 北京市自然科学基金(No. 8062024)。

作者简介: 白冰, 男, 1966 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事复杂环境条件下岩土介质力学特性的研究工作。E-mail: baibing66@263.net

维数值分析。由广明等^[6]以北京地铁 5 号线崇文门车站下穿既有地铁 2 号线区间隧道为工程背景,研究了上下交叠地铁区间隧道与车站在列车同时通过时,其振动对周围环境的影响。王祥秋等^[7]给出了隧道衬砌结构动力有限元分析的数值计算结果。

本文以近距离隧道为研究对象,利用二维有限元模型,对列车振动荷载作用下土体-隧道结构体系的动力响应进行数值模拟计算。

2 计算模型和参数

2.1 模型建立

采用动力有限元法模拟地铁列车振动荷载作用下土体-隧道结构体系的相互作用问题如图 1 所示。计算模型中两隧道衬砌之间的最近距离为 2 m。计算时假定:(1)为简化计算,将实际的三维问题简化为二维平面应变问题进行分析;(2)将隧道周围的地基土看作是均质各向同性的弹塑性体,并采用 Drucker-Prager (DP) 本构模型;(3)动力荷载作用下各层土之间、土体-隧道结构之间不发生脱离和相对滑动。

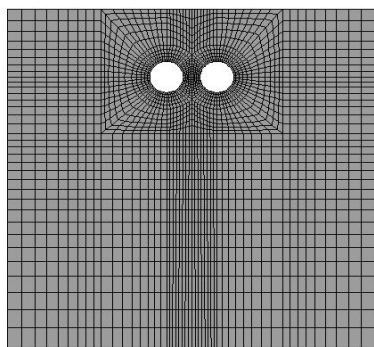


图 1 土体-隧道体系分析模型

Fig.1 Calculation model for soil-tunnel system

受计算速度和计算空间的限制,所选取的有限元计算区域为 60 m×60 m。将上部地表面假设为自由边界,计算区域的底部边界处在 2 个方向上均为固定约束,左右边界允许产生竖向位移而无水平向位移。

隧道顶部距地面 9 m,隧道内径为 5.5 m,外径为 6.2 m,混凝土衬砌厚度为 0.35 m。模型共包括 2 455 个单元。土体采用平面 4 结点等参单元,混凝土衬砌采用 2 结点梁单元来模拟。

首先计算断面的自重应力场,然后模拟隧道的开挖施工过程,计算支护结构及围岩的静态应力场和位移场,最后模拟列车动力荷载作用下土体-隧道结构体系的动力响应。

2.2 计算参数

根据北京地铁某断面的典型地质资料^[8],土体的分层厚度 H 、弹性模量 E 、泊松比 μ 、重度 γ 以及强度指标 c 和 φ 见表 1。衬砌混凝土力学参数为:密度为 2 500 kg/m³,弹性模量为 30 GPa,泊松比为 0.25。

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Properties of soil layers

土层	H / m	E / MPa	μ	γ / (kN/m ³)	φ / (°)	c / kPa
杂填土	4.5	9.0	0.30	16.5	30	20
粉土	6.0	7.0	0.25	19.1	30	31
粉细砂	6.5	24.0	0.27	20.5	25	0
粉质黏土	7.0	13.3	0.30	19.9	16	36
粉土	6.0	16.5	0.30	19.5	25	36
中粗砂	4.0	35.0	0.25	21.0	30	0
细砂	26.0	45.0	0.25	22.0	28	0

2.3 模态分析

首先通过模态分析研究结构物在易受影响的频率范围内各阶主要模态的特性,在此基础上分析结构在这一频段内由于列车振动荷载引起的动力响应。本文采用 Block Lanczos 法^[8]提取前 8 阶振型,相应的频率 f 分别为 0.797 56, 0.965 11, 1.509 4, 1.691, 2.004 2, 2.144 8, 2.268 5 Hz 和 2.332 4 Hz。最小圆频率 $\omega_0 = 2\pi \times 0.797 56 = 5.009 \text{ rad/s}$, 体系的最大固有周期 $T_{\max} = 1/f_{\min} = 1.3 \text{ s}$ 。

在用 Newmark 积分法求解运动平衡方程时,首先需要确定 Rayleigh 阻尼系数 α 、 β 。资料表明,岩土介质的阻尼比一般在 $\xi = 0.02 \sim 0.24$ 范围内^[5]。本文取 $\xi = 0.08$, $\alpha = 0.400 7$, $\beta = 0.001 6$ 。

用有限元法求解时域内的动力问题时必须保证计算过程的稳定性,如果时间步距 Δt 选取过大,会损失高频成份,并使计算精度降低,甚至导致计算不收敛;如果时间步长选取过小,则会耗费机时,且累积误差也会影响到计算精度,一般认为隐式积分的时间步长不应超过最大固有周期的 1/100,这里取步长 $\Delta t = 0.01 \text{ s}$ 。

3 地铁列车荷载

假定列车行进速度为 72 km/h,根据北京地铁典型列车、轨道和土性等相关参数^[8],通过车辆-轨道耦合系统动力分析模型^[9-10]得到如图 2 所示的地铁列车振动荷载。本文采用这一列车荷载形式进行数值计算。

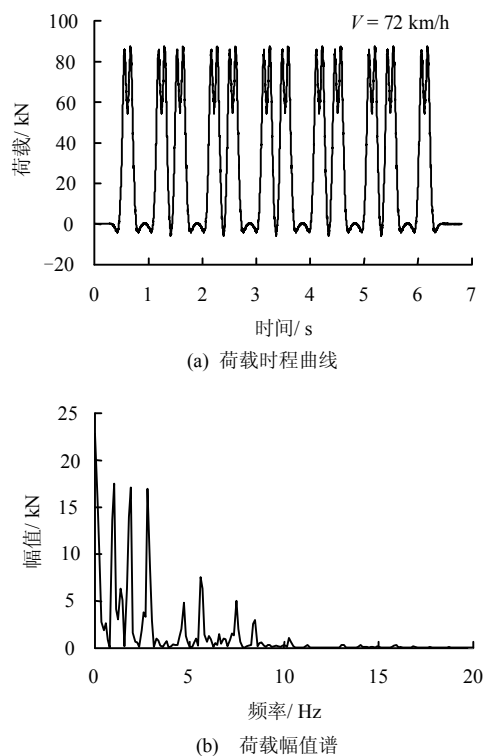


图2 地铁列车荷载

Fig.2 Vibration loading of metro trains

4 计算结果及分析

4.1 单列列车荷载作用

为便于分析,计算模型取为左右对称。首先分析列车荷载作用在平行隧道的一个隧道(左边隧道)情况下隧道结构体系的动力响应,这里主要讨论图3所给出的一些特征衬砌单元或结点的动力响应。当单列列车通过左边隧道时(图1),计算得到隧道拱顶2068点、拱底2012点和拱腰2064点的振动加速度时程曲线如图4所示。由图可以看出,拱顶(图4(a))和拱底(图4(b))的加速度响应值比较大,而拱腰(图4(c))的加速度响应值相对较小。以拱底(图4(b))的加速度时程曲线为例加以分析可见,列车荷载作用开始的2~3 s内加速度值很大,最大值接近 0.2 m/s^2 ,平均峰值也在 0.1 m/s^2 左右,之后加速度峰值在 0.05 m/s^2 左右。

计算表明,拱腰和拱底处弯距值比较大,而运行列车所在隧道(即左边隧道)弯矩的动力响应值一般要比另一隧道(即右边隧道)相应位置处的响应值要大。图5给出列车动力荷载作用下拱底处(2325单元)和拱腰处(2340单元)的弯矩时程曲线,可见在0~3 s范围内,静力荷载作用下(即无列车荷载作用)拱底处和拱腰处的弯矩分别为 $235 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 和 $-215 \text{ kN}\cdot\text{m}$,在列车动力荷载作用下它们的最大弯距值分别达到 $285 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 和 $-268 \text{ kN}\cdot\text{m}$,

分别增加了21.3%和24.6%。随后的3~8 s内,其弯距值在 $200\sim 250 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 的范围内波动,动力荷载作用下弯矩响应值的衰减是比较明显的。

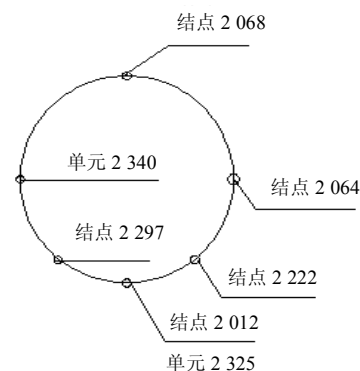
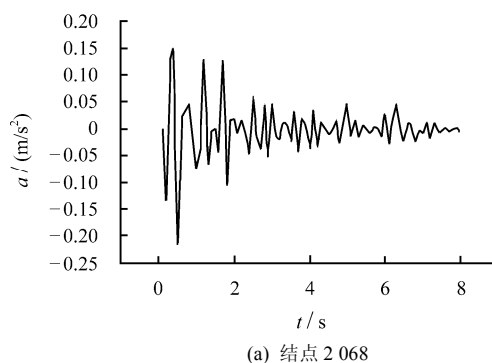
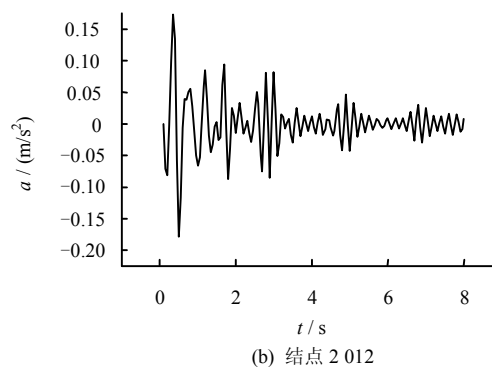


图3 典型结点或单元

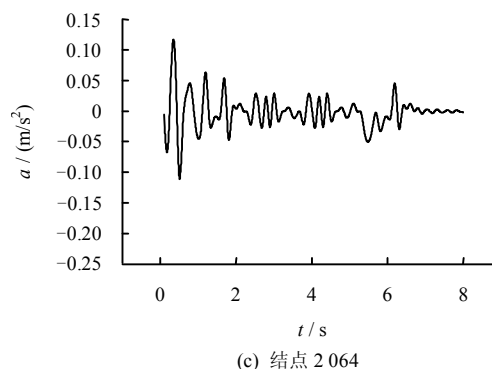
Fig.3 Some typical nodes and elements



(a) 结点2068



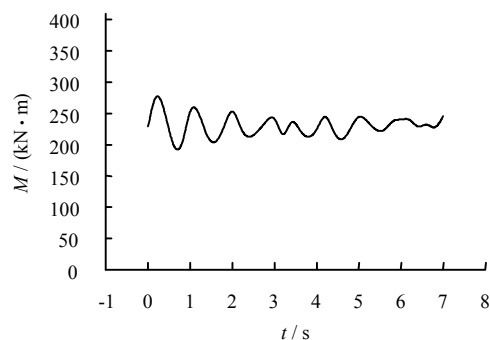
(b) 结点2012



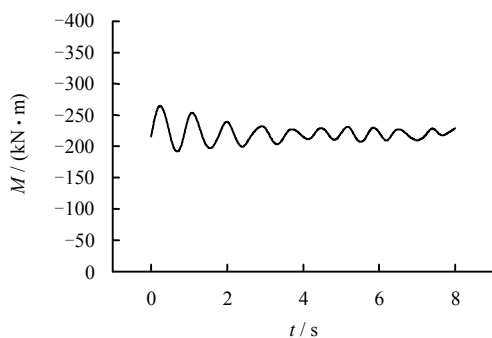
(c) 结点2064

图4 振动加速度时程曲线

Fig.4 Vibration acceleration versus time curves



(a) 单元 2 325



(b) 单元 2 340

图 5 弯矩时程曲线

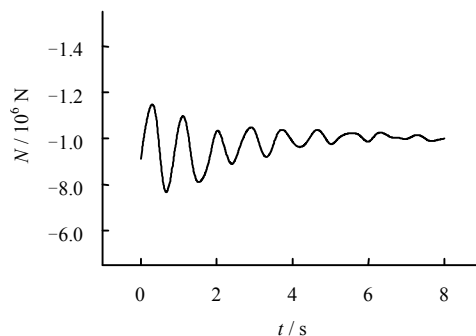
Fig.5 Bending moment versus time curve

计算表明,拱腰处(图 3 中,2 340 单元)的轴力最大,而拱底处(2 325 单元)的轴力相对较小。图 6 为这 2 个单元的轴力时程曲线,可见其分布特征与图 5 的弯矩分布特征类似。可以看出,随着时间的增长,轴力的衰减很明显,静力荷载作用下(即无列车荷载作用),2 340 单元和 2 325 单元的轴力值分别为 -891 kN 和 -530 kN ,而动力荷载作用下它们的轴力峰值分别为 $-1 180 \text{ kN}$ 和 -700 kN ,分别增加了 32.4% 和 32% 。此外,运行列车所在隧道(即左边隧道)比另一隧道(即右边隧道)的轴力响应值要大。

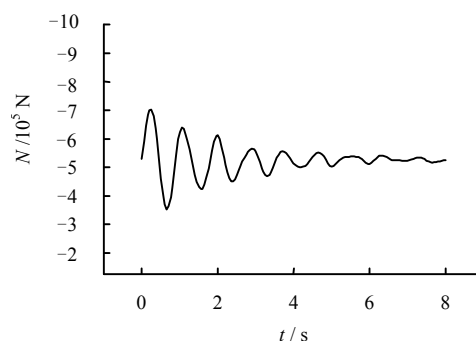
当单列列车荷载作用于左边隧道时,最大剪应力值并不是出现在 2 个隧道的中轴线处,而是发生在大约与中轴线成 45° 位置处。由图 7 可以看出,对于图 3 中的结点 2 222,剪应力可由无列车荷载作用下的 124 kN 增加到有列车荷载作用下的 154 kN ,增加幅度(增加了 24.2%)是非常明显的。

4.2 双列列车荷载作用

地铁实际运行时经常会出现多列列车在不同的隧道内相邻而行,此时,在多列列车荷载的动力作用下土体-隧道结构体系的动力响应与单列列车动力作用下的响应值有显著不同。



(a) 单元 2 340



(b) 单元 2 325

图 6 单元轴力时程曲线

Fig.6 Axial load versus time curve

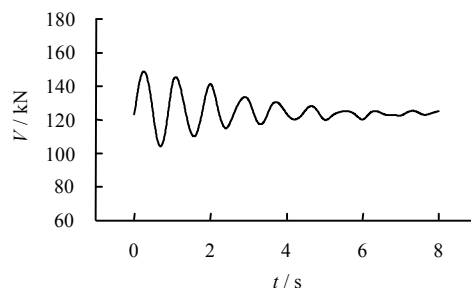


图 7 剪力时程曲线

Fig.7 Shear load versus time curve

这里考虑一种稍微简单的情形,即 2 列列车荷载大小相同,并分别同时作用在左右隧道上。由图 8 可以看出,与单列列车荷载作用相比,双列列车荷载作用下的加速度响应值几乎成倍增加,特别是当动力荷载刚施加的一段时间内,双列列车荷载作用引起的加速度响应值非常大。当然,在隧道不同的位置处,加速度响应值是不同的,例如在拱腰处(即点 2 064)增加量较小,而在拱底处(即点 2 012)增加较大,最大加速度接近 0.25 m/s^2 ,随着时间的增长,加速度响应值也逐渐衰减。

图 9 为几个特征点(图 3)的弯矩、剪力和轴力的时程曲线,可以看出双列列车荷载作用下左右平行近距离隧道的动力响应比单列列车荷载作用

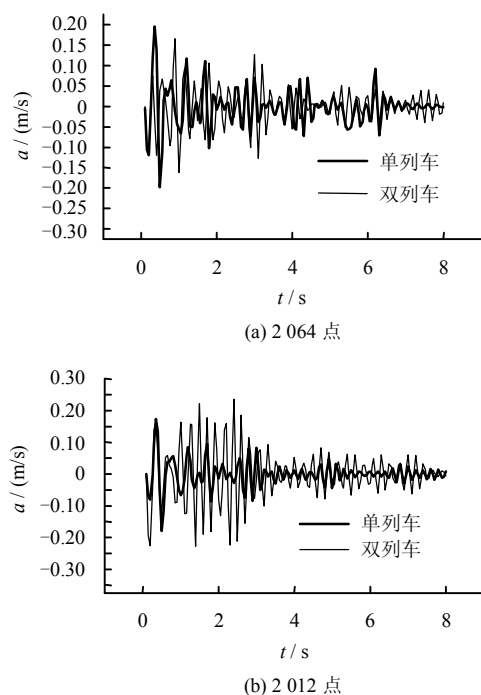


图8 双列列车荷载作用加速度时程曲线
Fig.8 Vibration acceleration versus time curves under two-arrange train loading

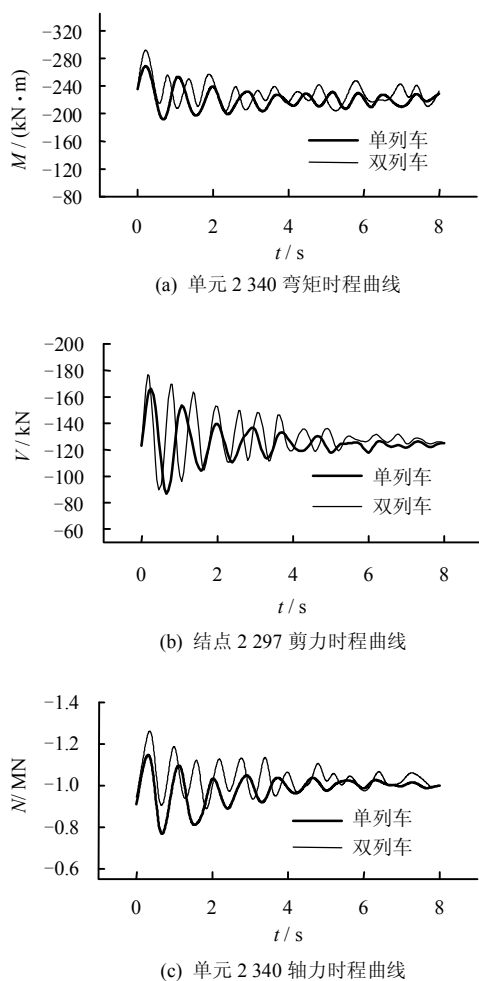


图9 双列列车荷载作用的动力响应
Fig.9 Dynamic responses under two-arrange train loading

下的内力响应值有较大增加, 而且它们的衰减速度也要慢些。

5 结 论

(1) 利用二维弹塑性有限元数值计算方法, 对左右平行近距离隧道在单列列车荷载作用和双列列车荷载同时作用下的动力响应进行研究, 得到土体-隧道结构体系的加速度以及内力时程曲线。计算表明, 列车荷载作用下的内力值较无列车荷载作用下相应的内力值有较大幅度的增加。

(2) 单列列车荷载作用下, 拱顶和拱底处加速度响应比较大, 在拱腰和拱底处弯距值为最大, 而在拱腰处轴力最大。此外, 列车所在隧道的动力响应值(如加速度、弯矩、轴力)比相邻隧道相应位置处的响应值要大。

(3) 与单列列车荷载作用相比, 双列列车荷载作用下的动力响应值增加量十分显著, 其加速度响应值几乎成倍增加, 而隧道衬砌内力(如弯距和轴力)的动力响应值也有较大增加, 特别是在动力荷载刚施加的一段时间内, 双列列车荷载作用引起的加速度响应值非常大。

参 考 文 献

- [1] 夏禾, 张楠, 曹艳梅. 列车对周围地面及建筑物振动影响的试验研究[J]. 铁道学报, 2004, 26(4): 93-98.
XIA He, ZHANG Nan, CAO Yan-mei. Experimental study of train-induced vibrations of ground and nearby buildings[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2004, 26(4): 93-98.
- [2] BALENDRA T, KOH C G, HO Y C. Dynamic response of buildings due to trains in underground tunnels[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1991, 20(5): 275-291.
- [3] CHUA K H, BALENDRA T, LO K W. Groundborne vibrations due to trains in tunnels[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1992, 21(5): 445-460.
- [4] GUAN F, MOORE I D. Three-dimensional dynamic response of twin cavities due to traveling loads[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1994, 120(3): 637-657.
- [5] 林刚. 列车振动对地铁重叠隧道结构力学行为的影响[J]. 铁道建筑技术, 2006, (3): 9-11.
LIN Gang. Influence of train vibration on structural mechanical behavior of metro overlapping tunnel[J]. *Railway Construction Technology*, 2006, (3): 9-11.
- [6] 由广明, 刘维宁. 交叠车站与区间隧道列车振动对环境的影响[J]. 北京交通大学学报, 2005, 29(4): 40-44.
YOU Guang-ming, LIU Wei-ning. Environmental vibrations induced by trains passages through overlapping

- station and tunnels[J]. **Journal of Beijing Jiaotong University**, 2005, 29(4): 40—44.
- [7] 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 Xiang-qi, YANG Lin-de, ZHOU Zhi-guo. Dynamic response analysis of lining structures for tunnel under vibration loads of train[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(7): 1337—1342.
- [8] 李春峰. 地铁列车作用下近距离交叠隧道的动力响应[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.
- [9] 刘维宁, 夏禾. 地铁列车振动的环境响应[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(增刊): 586—593.
- LIU Wei-ning, XIA He. Environmental Response due to trains vibration in metro[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1996, 15(Supp.): 586—593.
- [10] HIROKAZU T, SHUHEI S, XIE Wei-ping. Train track-ground dynamics due to high speed moving source and ground vibration transmission[J]. **Journal of Structure Mechanics and Earthquake Engineering**, 2001, 682(7): 299—309.

第二届全国环境岩土工程及土工合成材料技术研讨会会议纪要

(2008 年 11 月 15 日)

第二届环境岩土工程与土工合成材料技术交流会于 2008 年 11 月 13—15 日在长沙湖南大学召开。本次会议是由中国岩石力学与工程学会环境岩土工程分会、中国土木工程学会土力学及岩土工程分会、中国土工合成材料工程协会三个学会联合举办, 湖南大学、中南大学、湖南科技大学及湖南工业大学联合承办、长沙理工大学与湖南省交通规划勘察设计院协办的一次高水平的学术会议。来自全国各地的高等院校和科研院所及企事业单位从事环境岩土工程及土工合成材料技术研究和应用的科技工作者共 216 位专家和代表参加了本次会议。会议开幕式由本届会议组委会主席湖南大学赵明华教授主持, 湖南大学党委副书记栾永玉教授, 中国工程院刘宝琛院士、郑颖人院士、中国岩石力学与工程学会郑双良副秘书长、方祖烈副秘书长, 中国土工合成材料工程协会理事长李广信教授、中国岩石力学与工程学会环境岩土工程分会理事长刘汉龙教授、中国土木工程学会土力学及岩土工程分会副理事长张建民教授等专家及领导出席了大会开幕式。

本次会议于 2006 年 5 月开始筹备, 并在中国土木工程学会第十届土力学及岩土工程学术会议及第十届全国岩石力学与工程学术大会等会议期间进行了广泛的宣传与意见收集工作, 明确了大会的主题与工作重心。自发出第一号征文通知后, 得到了来自全国各地的从事环境岩土工程及土工合成材料技术研究和应用科技工作者的大力支持和响应, 先后收到论文 127 篇。经会议学术委员会认真审查遴选, 共有 110 篇学术论文收入会议论文集, 并择优推荐出 40 篇优秀论文, 由湖南大学学报(自然科学版)出版了精美的论文集。论文内容主要包括废弃资源再生利用技术、城市卫生填埋技术、土壤污染与修复技术、工程与环境技术、边坡与环境技术以及土工合成材料技术六大方面, 反映了国内外在环境岩土工程与土工合成材料领域的新进展。本次会议是继 2003 年杭州浙江大学召开的第一次全国环境岩土工程与土工合成材料会议之后的又一次学术盛会。目的是给从事环境岩土工程与土工合成材料科技工作者提供一个相聚的机会, 交流新思想、新理论、新成就和新经验, 讨论学科的新进展, 互相启发, 共同提高, 从而推动我国土动力学研究工作的进一步发展。本次会议代表面广, 组织形式新, 内容丰富, 论文质量高。

大会特邀了 14 位国内外知名专家作了特邀, 这些报告经专家们的精心准备, 反映了目前环境岩土工程学科及土工合成研究的最新发展与动态, 其报告专家与题目为: 郑颖人院士: “加筋土挡墙稳定性分析研究”; 李广信教授: “土工合成材料在抗震工程中的应用”; 楚剑教授: “Use of geofabric for the reclamation of a slurry pond in Singapore”; 陈云敏教授: “污染物在土中运移、防污屏障及工程应用”; 刘汉龙教授: “酸碱污染土工程特性研究”; 杜修力教授: “无限域能量辐射的时域模拟方法”; 高广运教授: “环境振动屏障隔振研究”; 赵明华教授: “双向增强复合地基处理软土路基试验研究”; 蔡袁强教授: “高速交通荷载下饱和地基振动机理及防治对策”; 黄茂松教授: “软土盾构隧道施工的环境效应”; 胡黎明教授: “土壤地下水污染过程域修复技术研究”; 温彦锋教授: “燃煤电厂灰渣的安全储放技术” 和杨小礼教授: “非线性破坏下能量耗散理论及应用研究”。大会还分环境岩土工程及土工合成材料两大专题举办了 6 个主题报告, 共有 36 位代表发言。研讨会期间讨论发言积极踊跃, 气氛活跃, 收到了很好的效果。

第二届全国环境岩土工程及土工合成材料技术研讨会在岳麓山下召开, 使我们见到许多老朋友, 也结识了许多新朋友。经过两天的学术交流, 增进了了解, 加深了友谊, 得到了共同提高, 达到了预期目的, 取得了圆满成功。衷心感谢主办和承办及协办单位给我们大家提供了这样一个交流与相聚的机会。衷心感谢向本届论坛撰写论文的作者以及为本论文集出版而辛勤工作的人员, 衷心感谢在百忙之中抽时间来参加本次会议的专家和代表。

特别感谢本次会议的组委会主席赵明华教授、秘书长邹新军博士等老师为会议筹备、论文征集与出版等所做的大量工程, 特别感谢湖南大学岩土工程研究所曹文贵教授、陈昌富教授、苏永华教授、刘晓明副教授、杨明辉副教授、颜李副书记、罗宏老师、蒋德松老师、张玲及张永杰等博士和硕士研究生以及联合单位的老师和研究生为具体承办本次研讨会的组织与召开付出了辛勤的劳动。

第三届全国环境岩土工程及土工合成材料学术研讨会将于 2011 年在上海举办, 由上海大学承办。

(第二届全国环境岩土工程及土工合成材料技术研讨会组委会)