

既有管线下盾构施工地层沉降监测和位移加载数值分析

贾瑞华¹, 阳军生¹, 马涛², 刘树亚³

(1. 中南大学土木建筑学院, 湖南长沙 410075; 2. 铁道部第四勘察设计院, 湖北武汉 430063; 3. 深圳市地铁有限公司, 广东深圳 518049)

摘要: 针对深圳地铁下穿电缆隧道的实例, 通过采用位移加载法模拟隧道开挖效应和弹性地基梁理论分析管土相互作用, 提出将地铁上方的既有隧道视为大管径管线考虑, 分析了地铁左线施工引起的地层响应, 并借助相关控制标准对电缆隧道的安全性作出评价, 分析结果表明: 数值计算结果与实测数据吻合较好, 电缆隧道也处于安全状态, 可为相关类似工程研究提供借鉴。

关键词: 既有隧道; 管线; 位移加载法; 弹性地基梁

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)03-0425-06

作者简介: 贾瑞华(1980-), 男, 湖北通山人, 博士研究生, 主要从事地下工程施工力学研究。E-mail: rhigeo@163.com。

Field monitoring and numerical analysis of shield tunneling considering existing tunnels

JIA Rui-hua¹, YANG Jun-sheng¹, MA Tao², LIU Shu-ya³

(1. Department of Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Fourth Survey and Design Institute of China Railway, Wuhan 430063, China; 3. Shenzhen Metro Co., Ltd., Shenzhen 518026, China)

Abstract: Based on the example of Shenzhen shield tunneling under a cable tunnel, through application of the displacement load method to simulate the tunnel excavation and by use of the beam theory of elastic foundation to analyze pipe-soil interaction, the existing tunnel above the subway tunnel considered as a large-diameter pipeline is proposed. The formation response caused by the construction of the left line of the subway is analyzed. The safety of the cable tunnel is evaluated by the relative control standards. It is shown that the numerical results agree well with the measured data, and the cable tunnel is also in a state of safety. It can provide reference for similar projects.

Key words: existing tunnel; pipeline; displacement load method; elastic foundation beam theory

0 引言

地下空间的开发和隧道网络的不断完善, 使得城市地铁中近接隧道施工现象大量涌现, 带来众多施工相互影响问题。随着盾构隧道施工愈发复杂, 施工的相互影响问题也日益突出。对于该问题的研究, 目前国内外已取得了一些成果^[1-2]。

对于隧道开挖引起邻近管线的影响分析, 已有不少学者做了许多工作。吴波等利用三维有限元方法, 建立了隧道结构-土体-地下管线耦合作用的三维有限元分析模型^[3]。Klar 和 Marshall 采用子结构法, 分别用梁单元和壳单元对比模拟管线, 进行三维数值模拟分析^[4]。马涛利用自编程序 DLFEA-TPR, 采用位移加载法, 按面积等效原理将管线等效为相同范围内的弹性材料, 分析地铁施工对邻近管线的影响^[5]。

在已有研究成果的基础上, 本文将地铁上方既有隧道视为管线考虑, 借助弹性地基梁理论模拟管土相互作用, 采用位移加载法对深圳地铁的施工进行二维

有限元数值模拟, 并结合现场实测结果, 参考相关标准对电缆隧道的安全性做出评价。

1 工程概况

深圳地铁一期工程益田至香蜜湖段采用盾构法施工。地铁分左右线, 左右两中心线间距 15.0 m, 在 CK8+750 处隧道洞顶正上方 1.2 m 有一直径 3 m 的电缆隧道, 与地铁隧道走向垂直交叉, 如图 1 所示。

隧道位于砾质、砂质黏性土中, 采用的盾构机管片外径 6.0 m, 刀盘外径 6.19 m, 理论间隙参数为 2.18 m³, 实际施工每环注浆量约为 1.8 m³。盾构掘进中先开挖左线隧道, 地面沉降稳定后再开始右线地铁隧道的施工。

2 现场沉降观测

为了评价盾构施工对地表和电缆隧道的影响, 施

工期间进行了全面监测。在地表分别位于电缆隧道正上方、距离电缆隧道 3.0 m 以及距离电缆隧道 50 m 布置了 DL, G, H 三排测点。电缆隧道内布置了 E, W 两排测线。图 2 为 DL 处地表及电缆隧道内测点布置图。

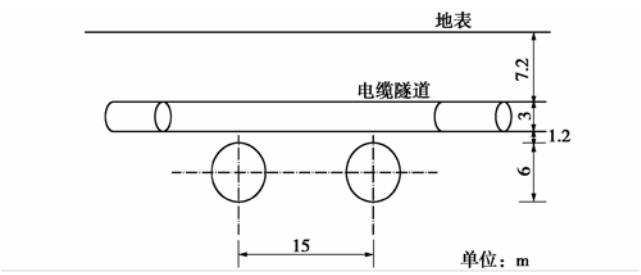


图 1 地铁隧道与电缆隧道空间位置示意图

Fig. 1 Spatial location of subway tunnel and cable tunnel

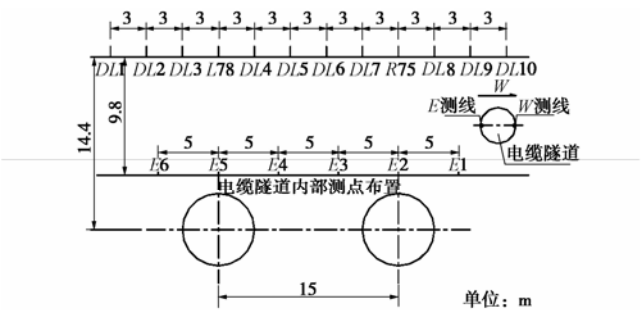


图 2 DL 处测点布置图

Fig. 2 Layout of measuring points in DL

当左线隧道通过并沉降稳定后,地面累计沉降量监测结果如图3所示,其中DL, G, H三处地表最大沉降分别为6.90, 7.55和10.49 mm。可以看出,随着地表各测点与电缆隧道的水平距离的逐渐增大,DL, G和H测点处的地表最大沉降也依次变大,这主要是土体位移受电缆隧道抑制程度不同的结果。DL测线位于电缆隧道正上方,受抑制最强。故而地表沉降相对最小;H测线距离DL测线50.0 m,远离电缆隧道,可认为不受电缆隧道影响,故而此处地表沉降最大;G测线在DL与H之间,故而沉降也位于二者之间。

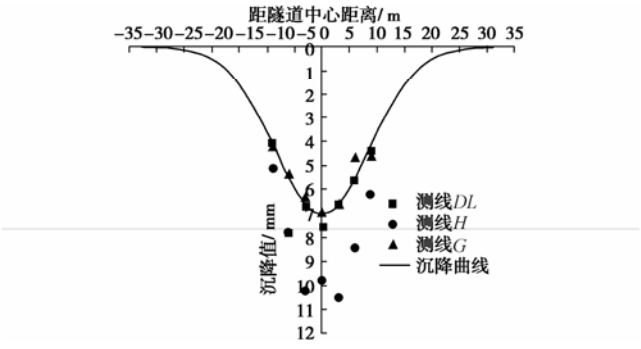


图 3 左线地铁隧道通过后地表沉降

Fig. 3 Ground settlement for passage of left line of subway tunnel

电缆隧道内累计沉降量如图4所示,电缆隧道周边

土体沉降受其影响程度更大,故而沉降相对地表要小,但仍能较好地与沉降曲线拟合。

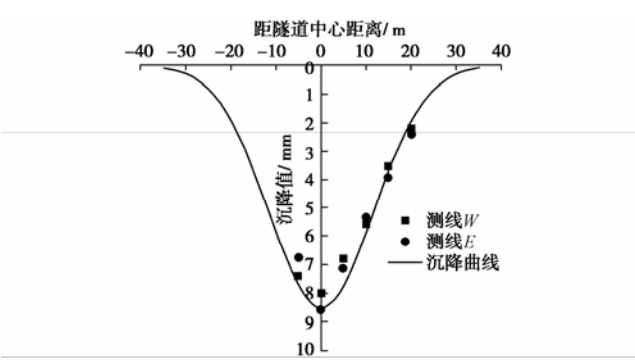


图 4 左线地铁隧道通过后管线沉降

Fig. 4 Pipeline settlement for passage of left line of subway tunnel

右线通过后实测地表沉降如图 5 所示,可看出地表沉降值较左线隧道通过后要大,并且地表最大沉降值发生在左右两条隧道连线中心处,说明两条隧道施工引起的地表沉降槽是单峰形式。图中的横坐标为测点距左右隧道中心处的距离,即图 2 中测点 DL5 和 DL6 的正中位置。

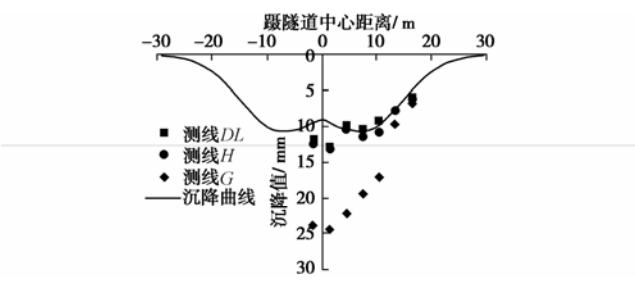


图 5 右线地铁隧道通过后地表沉降

Fig. 5 Ground settlement for passage of right line of subway tunnel

右线通过后管线沉降如图6所示,可看出管线沉降关系较左线隧道通过后地表沉降相似,管线沉降也是单峰形式。

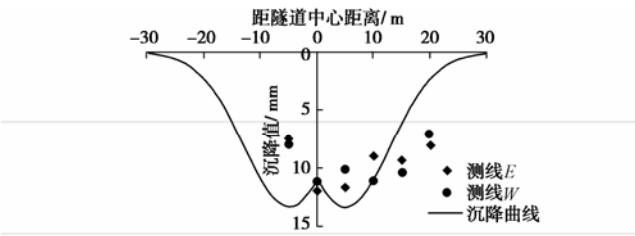


图 6 右线地铁隧道通过后管线沉降

Fig. 6 Pipeline settlement for passage of right line of subway tunnel

3 数值分析

3.1 隧道开挖效应的模拟

隧道开挖效应的模拟采用位移加载法。位移加载

法关键在于断面收敛模式的选取,它可根据现场数据,预测得到开挖断面边界各节点的最终位移值,将边界节点的位移值施加于开挖边界,作为边界位移条件进行有限元分析^[6]。

位移加载法假定:隧道收敛断面相似于开挖断面,二者均为圆形。如果断面为非圆形,可以取为等代圆。

对于盾构隧道,可先假定断面收敛为均匀收敛,如图7(a)所示。由体积损失定义有

$$V_L = \frac{\pi R^2 - \pi r^2}{\pi r^2} = \left(\frac{R}{R - u_0} \right)^2 - 1, \quad (1)$$

于是

$$u_0 = R \cdot \left(1 - \sqrt{1/(1+V_L)} \right). \quad (2)$$

式中, u_0 为均匀收敛值; V_L 为体积损失; R , r 分别为隧道开挖断面和收敛断面的半径。

相关学者的研究表明,开挖断面上拱顶易产生更大沉降,仰拱处变形很小^[7-8],因此,断面收敛模式假定为不均匀收敛更为合理。对于非均匀收敛变形模式,如图7(b),其断面边界条件可由 Park 的研究成果用函数简单表示如下^[9]:

$$u_r = -u_0(1 + \sin \theta), \quad (3)$$

式中, u_r 为洞周径向收敛位移, u_0 由式(2)计算所得。

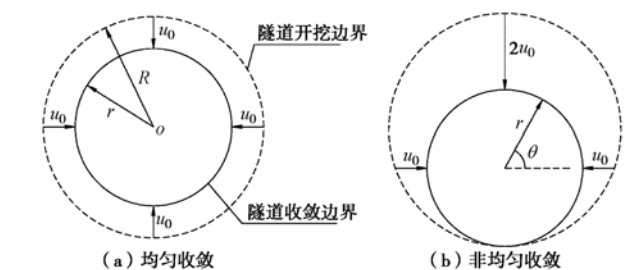


图7 断面收敛变形模式

Fig. 7 Section convergence deformation mode

按式(3)可得到隧道开挖断面上任意位置处的径向收敛位移,按水平方向和竖直方向分解,即可得到开挖断面的边界位移条件。

3.2 电缆隧道的模拟

本文将电缆隧道视为大管径管线考虑,由于管线的存在,必然会影响土体应力应变的分布,考虑到管线与土体的相互作用,数值分析中采用弹性地基梁理论模拟管土相互作用。

将管线视为 Winkler 地基梁,借助于 ABAQUS 软件平台,电缆隧道与周围土体的管土相互作用机理按如下模式考虑:电缆隧道用梁单元模拟,其应力应变受管道四周土体约束;梁单元的单元节点用弹簧单元

与地基连接^[10],如图8所示,弹簧的弹性系数 k 由 Vesic (1961) 得出的公式给出^[11]

$$k = 0.65^{1/2} \sqrt{\frac{E_0 b^4}{EI}} \frac{E_0}{(1-\nu^2)b}, \quad (4)$$

式中, E_0 和 ν 分别为土的变形模量与泊松比, EI 为基础弯曲刚度, b 为基础宽度。

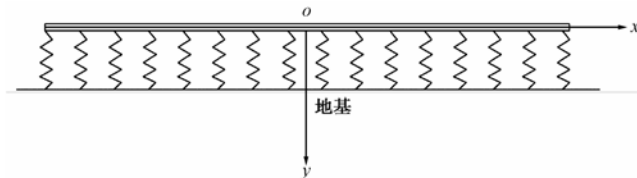


图8 Winkler 地基梁模型

Fig. 8 Winkler foundation beam model

3.3 管线沉降控制标准

考虑到本文的研究对象为已建的电缆隧道,且为整体浇注完成,不存在一般城市地下管线的分节和接头等,因此,本文参考国内管线经验控制标准,将电缆隧道模拟为大管径管线后,仅对其沉降控制标准进行验算(图9)。

(1) 德国建筑标准规定:管线允许水平位移为 $0.6 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$, 允许倾斜变形为 $1 \sim 2 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

(2) 刘招伟等提出从考虑地下管线的安全角度来确定最大允许地表沉降值,然后由此控制地表最大沉降^[12]。

地铁上方电缆隧道可视为受垂直荷载的梁。根据结构在正常使用时收到的应力小于其允许应变的设计应力,有

$$[\epsilon] = [\sigma]/E. \quad (5)$$

式中 $[\epsilon]$ 为允许拉应变; $[\sigma]$ 为允许拉应力; E 为材料弹性模量。

管线在地层沉降时产生的变形应小于(或等于)其允许应力的相应变形范围,由此可计算差异沉降允许值:

$$\Delta S = \sqrt{([\epsilon]m + m)^2 - m^2}, \quad (6)$$

式中, m 为计算长度。

3.4 计算模型的建立

本文仅考虑左线施工引起的土层和电缆隧道的相互影响分析,采用有限元软件 ABAQUS 建模分析,计算边界取为 $70 \text{ m} \times 44.4 \text{ m}$ (宽×高),左右边界限制水平位移,下部边界限制竖向位移,隧道开挖半径 R 取 3.095 m 。选取各层土体的参数加权均值作为计算土体参数,土体本构关系为莫尔库仑理想弹塑性模型。

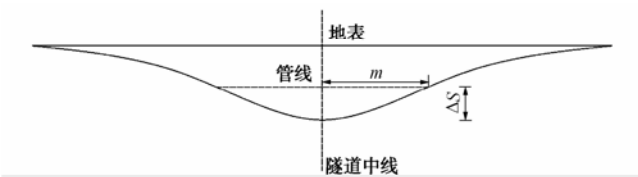


图 9 管线沉降示意图

Fig. 9 Settlement of pipeline

表 1 模型计算参数

Table 1 Model parameters

材料	密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 (GPa)	泊 松 比	黏聚力 (kPa)	内摩 擦角 ($^{\circ}$)
土体	1557	0.0082	0.30	68.9	13.7
管线	2300	25	0.17		

根据盾构理论间隙参数和实际施工每环注浆量的分析,地铁地层损失率为 0.84%,由式(1)可得均匀收敛值 $u_0=13\text{ mm}$ 。电缆隧道直径 D 为 3.0 m,梁单元模拟,并用弹簧单元与地基连接,弹簧系数可由式(4)得到, $k=1\text{ MPa}$ 。如图 10 所示,模型图中黑粗线所示为梁单元。

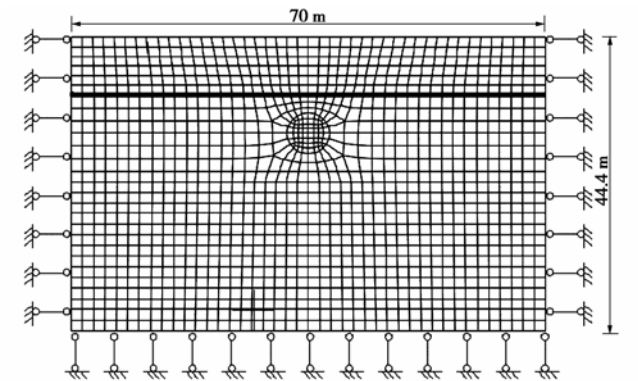


图 10 二维有限元计算模型

Fig. 10 2D FEM Model

隧道开挖后,按各节点平面位置关系计算出夹角 θ ,将 $u_0=13\text{ mm}$ 代入式(1),计算出开挖边界上各节点径向位移 u_r ,然后分解为水平位移 u_x 和竖直位移 u_y ,在 ABAQUS 里面将 u_x , u_y 直接定义为计算步中开挖断面的位移边界条件。

3.5 计算结果

(1) 隧道施工引起的地表沉降

图 11 给出了 DL , H 测点的地表沉降数值计算结果与实测值的拟合关系。可以看出,计算曲线与实测数据吻合很好,只是个别点存在一定偏差,说明了本文将电缆隧道视为大管径管线,并用基于 Winkler 地基梁理论的梁单元来模拟管土相互作用可行。

计算结果也表明,存在电缆隧道时地铁隧道开挖引起的地表沉降比起不受影响的 H 测线处要小,这主

要还是由于管线对周围土体移动的抑制作用。

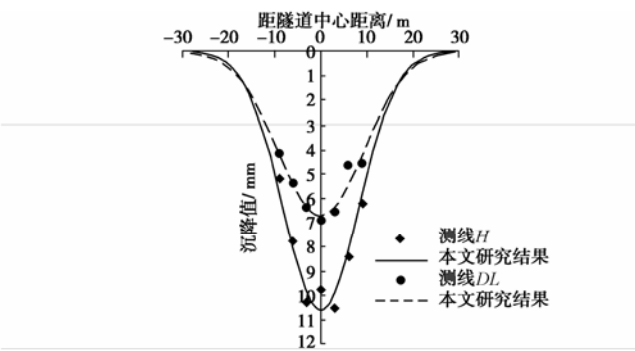


图 11 左线隧道开挖引起的地表沉降

Fig. 11 Ground settlement for excavation of the left line

(2) 隧道洞顶沿埋深竖向沉降

管线的存在对周围土体的抑制作用,还可由洞顶正上方各点沉降沿埋深变化曲线对比看出,由于电缆隧道的存在,管线埋深位置上方土层受管线影响,土体位移明显小于不受电缆隧道影响的土层,而在管线埋深位置下方各点沉降将逐渐接近。

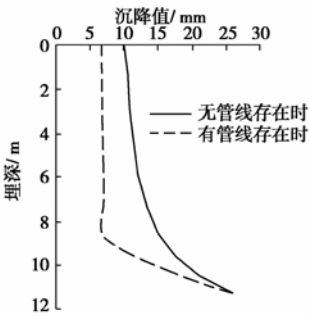


图 12 隧道洞顶上方沿埋深沉降曲线

Fig. 12 Subsidence along depth above the tunnel

(3) 竖向位移等值线图

图 13 给出了受管线影响 DL 测点和距离电缆隧道 50 m 的 H 测点的土层竖向位移等值图,由竖向位移等值线,可以看出由于电缆隧道的存在,土体内部竖向位移明显小于受影响土层。图中等值线图单位为 mm。

3.6 管线分析及验算

(1) 管线沉降分析及验算

图 14 给了管线沉降的计算值与 E , W 两排测线实测值的关系,可以看出二者吻合较好。由实测及计算结果,可逐一验算管线沉降控制标准:

数值计算结果表明管线节点最大水平位移为 0.04 mm (节点间距 1.5 m),于是管线最大水平位移为

$$u_x=0.04\text{ mm}/1.5\text{ m}=0.03\text{ mm}\cdot\text{m}^{-1},\quad (7)$$

管线最大倾斜变形为

$$\Delta=2.02\text{ mm}/5.0\text{ m}=0.404\text{ (mm}\cdot\text{m}^{-1})。 \quad (8)$$

二者均满足德国建筑标准。

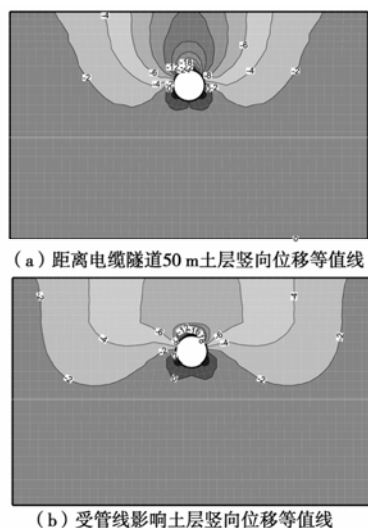


图 13 土体内部竖向位移等值线

Fig. 13 Vertical displacement contour of soil

按《公路隧道设计规范 JTG D70—2004》，电缆隧道混凝土允许弯曲拉应力 $[\sigma]$ 取 0.50 MPa，则允许拉应变 $[\varepsilon]$ 为

$$[\varepsilon] = \frac{[\sigma]}{E} = \frac{0.5}{25 \times 10^3} = 2 \times 10^{-5} \quad (9)$$

此处取 $m=25$ m，即图 2 中测点 E1, E5 的间距，则最大允许差异沉降 ΔS 为

$$\Delta S = \sqrt{([\varepsilon]m+m)^2 - m^2} = 158 \text{ mm} \quad (10)$$

实测结果表明，测点 E1, E5 的沉降分别为 8.58 mm 和 2.44 mm，二者差异沉降为 6.14 mm，小于最大允许差异沉降。

可知，管线满足安全性要求。

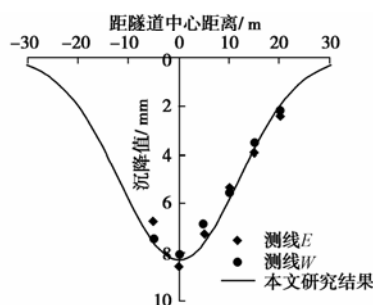


图 14 左线隧道施工引起的管线沉降

Fig. 14 Pipeline subsidence by the construction of the left line

(2) 管线受力分析

由 ABAQUS 直接计算得到的梁单元截面正应力，除以电缆隧道截面积，可得到管线的内力计算结果，隧道顶部位置管线处于受拉状态，最大拉应力为 37.6 kPa，小于混凝土允许弯曲应力 $[\sigma]$ 即 0.50 MPa，最大弯矩为 -1232.46 kN·m（图 15, 16）。

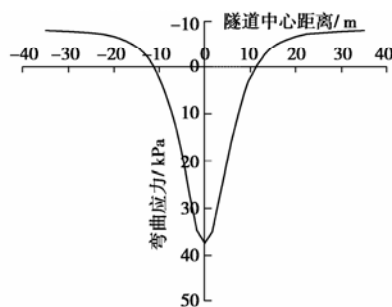


图 15 管线弯曲应力图

Fig. 15 Bending stress of pipeline

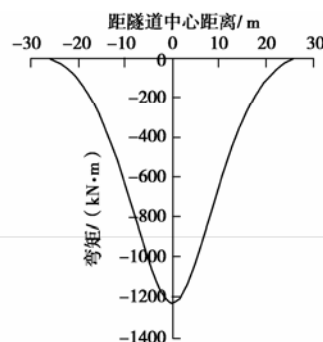


图 16 管线弯矩图

Fig. 16 Bending moment of pipeline

由管线沉降分析结果和受力分析结果可知，本文将无管节和接口的电缆隧道视为大管径管线，参考管线经验控制标准，电缆隧道满足安全性要求。考虑到电缆隧道整体浇注，相对土体刚度较大，且地铁施工中地表沉降控制严格，采取的相应保护措施也比较多，本文仅从控制管线沉降的角度去考虑电缆隧道的安全，也是可行的。

4 结 论

本文将地铁上方电缆隧道视为大直径管线考虑，借助于 ABAQUS 平台，用梁单元和弹簧单元将分析管土相互作用，假定开挖断面为非均匀收敛变形，采用位移加载法模拟地铁左线施工引起相邻管线的影响分析，并与现场实测结果进行对比，可得出以下一些结论：

(1) 位移加载法断面收敛模式可根据埋深不同假定为均匀收敛变形和非均匀收敛变形，边界条件可由体积损失 V_L 直接计算给出，计算简便，且计算结果与实测数据吻合较好，可作为模拟隧道开挖效应的一种简便方法在工程中得以推广应用。

(2) 施工期间，数值及现场监测都表明，开挖完成后管线沉降不超过控制标准，管线处于安全。

(3) 鉴于本管线的重要性，考虑到由于使用年限和地下水对混凝土的腐蚀性等将会使得电缆隧道的强

度有所降低,因此,施工过程中应予以重视,如保证盾构注浆效果,可提高管线下卧层刚度,能明显降低管线沉降等。

参考文献:

- [1] SOLIMAN E, DUDDECK H, AHRENS H. Two and three-dimensional analysis of closely spaced double-tube tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1993, 8(1): 13 - 18.
- [2] 白廷辉, 尤旭东, 李文勇. 盾构超近距离穿越地铁运营隧道的保护技术[J]. 地下工程与隧道, 2000, 3: 2 - 6. (BAI Ting-hui, YOU Xu-dong, LI Wen-yong. Protective technology of the shield tunnelling underneath the immediate running metro tunnel[J]. Underground Work and Tunnel, 2000, 3: 2 - 6. (in Chinese))
- [3] 吴波, 高波. 地铁区间隧道施工对邻近管线影响的三维数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 21(增2): 2451 - 2456. (WU Bo, GAO Bo. 3D numerical simulation on effect of tunnel construction on adjacent pipeline[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 21(S2): 2451 - 2456. (in Chinese))
- [4] KLAR Assaf, MARSHALL Alec M. Shell versus beam representation of pipes in the evaluation of tunneling effects on pipelines[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22: 1016 - 1022.
- [5] 马涛. 隧道施工引起的地层位移及其对邻近地下管线的影响分析[D]. 湖南: 长沙理工大学, 2005. (MA Tao. The research of tunneling-induced ground surface movements and their influence to adjacent utilities[D]. Hunan: Changsha University of Science & Technology, 2005. (in Chinese))
- [6] CHENG C Y, DASARI G R, CHOW Y K, et al. Finite element analysis of tunnel-soil-pile interaction using displacement controlled model[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22: 450 - 466.
- [7] MAIR R J. Centrifugal modeling of tunneling construction in soft clay[D]. London: University of Cambridge.
- [8] DEANE A P, BASSETT R H. The heathrow express trial tunnel[J]. Proceedings of Institutions Civil Engineers, 113(7): 144 - 156.
- [9] PARK Kyung Ho. Analytical solution for tunneling-induced ground movement in clays[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20: 249 - 261.
- [10] ABAQUS. Analysis user's manual[M]. Hibbitte Karlsson & Sorenson INC, 2002.
- [11] VESIC A B. Bending of beams resting on isotropic elastic solids[J]. Journal Engineering Mechanics Div, ASCE, 87: 35 - 53.
- [12] 刘招伟, 赵运臣. 城市地下工程施工监测与信息反馈技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (LIU Zhao-wei, ZHAO Yun-cheng. Construction monitoring and feedback technology for urban underground engineering[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [13] JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S]. (JTG D70—2004 Code for design of road tunnel[S]. (in Chinese))

现代结构予力平衡理论系列应用专著出版问世

介绍“予力”、“予力技术”、“予力技术作用原理”和“结构予力平衡理论”的最新概念和理论应用的3本专著,已陆续出版问世。

(1) 谢醒梅、韩选江、叶湘菡著《现代予力混凝土结构设计理论及应用》,北京:机械工业出版社,2007年1月,定价48.00元。

(2) 韩选江著《大型地下顶管施工技术原理及应用》,北京:中国建筑工业出版社,2008年2月,定价45.00元。

(3) 韩选江著《大型围海造地吹填土地基处理技术原理及应用》,北京:中国建筑工业出版社,2009年3月,定价59.00元。

以上三本专著内容新颖和丰富,包含三个不同技术领域的最新概念、理论、方法和应用实例,是三本理论与实践结合得很好的技术专著。无论对于初学的技术人员,还是已掌握了相应技术并具有一定工程经验的专家来说,都能从书中受到启迪和教益。

这三本专著可供从事土木、交通、水利、电力、矿山的结构工程、地下工程等专业的的设计、科研、施工、监理、检测和质检及管理部门的技术人员学习参考,同时可提供为以上专业的高等院校师生使用。

(南京工业大学 韩选江 供稿)