

文章编号: 1000-7598-(2006) 08-1317-05

隧道开挖对地下管线的影响分析

毕继红, 刘 伟, 江志峰

(天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘 要: 采用 Abaqus 有限元分析软件, 建立三维模型, 模拟隧道开挖对地下管线的影响, 充分考虑了不同的埋深、材质、下卧层刚度等条件。结果表明, 管线周围土的性状, 与双线隧道的相对位置以及管线自身刚度、管径等不同, 将对其变形和内力产生较大影响, 从而得出一些规律, 为今后类似工程施工提供依据。

关 键 词: 地下管线; 盾构施工; 有限元; 数值模拟

中图分类号: TV 554

文献标识码: A

Analysis of effects of tunnel excavation on underground pipeline

BI Ji-hong, LIU Wei, JIANG Zhi-feng

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Based on ABAQUS program, 3-D finite element analysis model is established to simulate the effects of tunnel excavation on underground pipeline, in which different embedments, material properties and stiffnesses of subjacent bed are considered. The results show that the different soil properties and stiffnesses, caliber of pipeline have great influences on its deformation and internal force. Some conclusions are drawn to provide corresponding guidance for subsequent projects.

Key words: underground pipeline; shield construction; finite element; numerical simulation

1 引 言

地铁工程建设中常常遇到各种各样的地下管线, 这些地下管线往往直接阻碍或影响地铁施工。必须妥善处理好地下管线, 解决好地铁施工与管线保护之间的矛盾。地层沉降是影响地下管线的主要因素, 目前国内外对软土地层中隧道掘进引起的地层沉降进行了较多研究^[1, 2], 最有影响的是预测地表沉降分布的Peck公式。同济大学对Peck公式进行了研究分析, 提出了考虑土体扰动后固结沉降和地层损失概念的修正Peck公式。目前, 在各种方法中, 利用有限元可以较准确地模拟影响地下管线的各种因素, 并为采取保护措施提供定量分析。

城市地下管线主要包括: 给水、排水、煤气、电信、热力, 有线电视等管线。它可以分为刚性管线和柔性管线, 刚性管线在土体移动不大时可正常使用, 土体移动幅度超过一定值时将发生断裂破坏; 而柔性管线受力变形后, 接头可产生近于自由转动的角度, 接头转动的角度及关节中的应力小于允许

值时, 管线可以正常使用。以深圳城市轨道交通2期 1 号线续建工程为例, 建立三维模型模拟研究隧道开挖对地下管线的影响。工程采用盾构施工, 盾构外径为6 m, 衬砌厚度为300 mm, 分为6块, 每环宽1 m, 混凝土强度等级为C45。

2 管线控制标准

目前, 我国还没有关于管线的控制标准, 邻近施工的要求是避免对已有重要管线造成不利影响, 采用容许值, 即定量表示这一不利影响的程度, 一般采用小于容许值的指标作为施工管理标准值。目前, 国内在工程实践中常用的标准如下:

(1) 管线沉降控制标准^[3] 承插接口及机械铸铁管道和柔性接缝管道, 每节许可差异沉降为 $\delta \leq L/1\ 000\ \text{mm}$ (L 为管节长度)。

(2) 管节受弯应力控制标准 通过对管线的理论分析可知^[4], 管节中纵向弯曲应力对管线的受力起控制作用, 故当管节中的弯曲应力小于容许值时, 管道可正常使用, 否则产生断裂或泄漏。例如: 对

于铸铁管线安全系数取5时,容许拉应力 $[\sigma_t]=37.21$ MPa,容许压应力 $[\sigma_c]=127.4$ MPa,即需满足: $\sigma_t < [\sigma_t]$ 或 $\sigma_c < [\sigma_c]$ 。

(3) 管接缝张开值控制标准 当管线接头转动的角度或接缝张开值小于允许值时,管道接头处于安全状态,否则也将产生泄漏或破坏,影响使用。文献[5]的试验数据为:接缝允许张开值 $[\Delta]$ 可取为0.925 mm,即直径为 D 、管节长为 b 的管线在管线沉降曲线曲率最大处 $(1/R)$ 接缝的张开值需满足^[3]:

$$\Delta = \frac{Db}{R} < [\Delta] \quad (1)$$

式中 R 为曲线半径; Δ 为接缝张开值。

3 相关理论及建模说明

3.1 基本假定

为了便于问题分析,抓住规律,文中作了以下假定:

(1) 地下管线为等直径、等壁厚,管道材料本构关系按线弹性考虑。

(2) 假定管线与周围土体自始至终是紧密接触的,即在变形过程中,管线与土没有产生相对滑动或脱离。因此,把管线与土体间接触面上的节点耦合,使两者接触面上的节点共同变形,以考虑管线与土体的相互作用,不考虑管、土的分离现象。

(3) 用降低弹性模量的方法考虑接头的影响^[6]。

3.2 相关理论

运用Abaqus有限元分析软件,建立三维模型。考虑土的非线性特性,并分别建立衬砌与土体之间的摩擦面来定义相互作用的一对表面,这样就可以求出两表面的相互作用力,从而模拟土体与衬砌的摩擦接触。采用准静态的方法研究双线隧道开挖对管线的影响^[7]。岩土材料采用扩展的线性Drucker-prager模型,其屈服准则为

$$F = t - p \tan \beta - d = 0 \quad (2)$$

$$p = -\frac{1}{3} \text{trace}(\sigma) \quad (3)$$

$$t = \frac{1}{2} q \left[1 + \frac{1}{K} - \left(1 - \frac{1}{K} \right) \left(\frac{r}{q} \right)^3 \right] \quad (4)$$

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}} \quad (\text{Mises等效力}) \quad (5)$$

$$r = \sqrt{\frac{9}{2} s_{ij} s_{jk} s_{ki}} \quad (\text{第三偏应力不变量}) \quad (6)$$

式中 F 为屈服函数; p 为等效压应力; β 为 p - t 应力面中线屈服面的斜率,通常称作材料的摩擦角; d 为材料的凝聚力; K 为三轴拉伸屈服应力与三轴压缩屈服应力的比值,它控制着屈服面与中主应力之间的关系; s_{ij} 为应力偏张量。

3.3 建模说明

土体采用52 m×80 m×40 m ($X \times Y \times Z$), Y 为开挖方向。由于管线一般埋置得较浅,仅考虑隧道上方的管线,文中管线埋深为2~8 m。共采用5条管线进行分析,管线分布如图1所示,土层参数见表1。3条横向(X 向)管线为G1, G2和G3,埋深分别为2 m, 4 m和6 m,距离开挖起始面($Y=0$)均为10 m。两条纵向管线,即沿着开挖方向(Y 向)为G4和G5(离隧道近的为G4),埋深均为8 m,间距为6 m, G5距左边界8 m。管径为1 m,管厚为150 mm。取实际工程中常用的钢管、混凝土管、PVC管进行研究说明。其弹性模量和泊松比分别为: 2.06×10^5 MPa, 0.3; 1.2×10^4 MPa, 0.26; 2.26×10^3 MPa, 0.35^[6]。考虑到管壁厚度与管径相比很小,可将管道视为薄壁管,故采用板壳单元S4R,土体采用C3D8R单元。双线隧道^[8]净间距4 m,埋深16 m,施工中先行开挖左线隧道,再开挖右线隧道。地下管线与左右隧道的相对位置见图1。

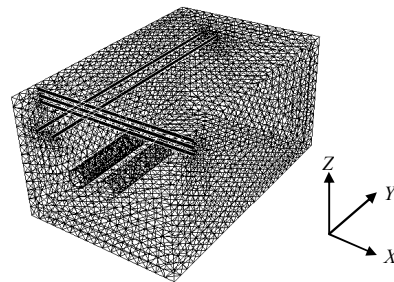


图1 管线分布及其有限元模型
Fig.1 Pipeline distribution and FEM

表1 土的物理参数^[9]
Table 1 Parameters of soils

土层	土质	密度 $\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	摩擦角 $\varphi / (^{\circ})$	弹性模量 E / MPa	凝聚力 c / kPa	泊松比 μ	厚度 h / m
1	粉质黏土	1.88	18.3	6.37	23.5	0.4	4.0
2	中砂	1.95	22	5.42	20	0.35	11.5
3	砾质黏土	1.84	25	5.45	34.0	0.4	7.0
4	花岗岩	1.92	55	48 000	3 000	0.25	17.5

4 计算结果分析说明

4.1 埋深对地下管线的影响

以先开挖左线,再开挖右线隧道进行分析。

隧道开挖引起的横向管线(G1, G2, G3)变形曲线如图2、图3所示,管线均有明显的相对沉降。

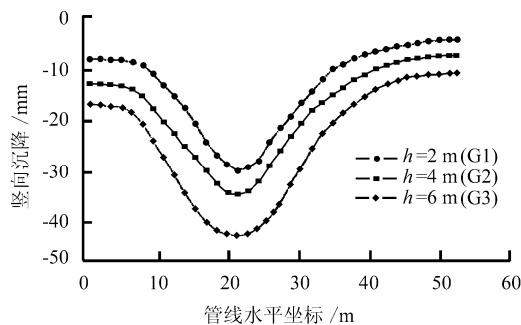


图2 左线开挖后的横向管线沉降图(PVC管)
Fig.2 Settlements of cross direction pipeline after left tunnel excavation(PVC pipe)

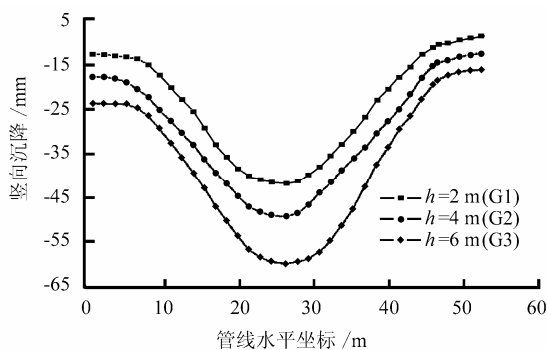


图3 右线开挖后的横向管线沉降图(PVC管)
Fig.3 Settlements of cross direction pipeline after right tunnel excavation(PVC pipe)

(1) 左线开挖时,埋深2, 4, 6 m的管道最大沉降分别为29.7, 35.6, 42.7 mm, 最大倾斜率分别为2.44, 2.56, 2.73 mm/m。可知埋深越大沉降值越大, 倾斜率越大。类似于隧道开挖时的地表沉降槽曲线。

(2) 左线完成、右线开挖后,埋深2, 4, 6 m的管道最大沉降分别为41.6, 49.1, 59.6 mm, 最大倾斜率分别为2.67, 2.89, 3.02 mm/m。最大沉降右移, 发生在两条隧道连线的中点处, 相当于2个沉降槽叠加, 产生一个大的沉降槽。

在双线施工中对于靠近隧道的管线会产生较大的差异沉降, 应根据前述管线控制标准, 避免隧道开挖使管线产生不均匀沉降而破坏。由图2、图3可以看出, 土质较差、埋深大的管线沉降值较大, 在盾构施工中应采取保护措施。

4.2 距离隧道远近对纵向管线的影响

以先开挖左线再开挖右线隧道进行分析。

(1) 从图4可以看出, 右线隧道开挖后, 离左

线隧道较近的G4, 沉降量由11.17 mm增加到16.72 mm; 而较远的G5, 沉降量由6.74 mm增加到8.77 mm。可见对于距离隧道轴线10 m内的管线(G4)影响较大; 对于10 m以外的管线影响不是很大(G5), 且都较横向管线沉降量小。随着左、右线盾构的掘进, 开挖面推进到40 m以后对管线的影响可忽略不计。

(2) 从图5可以看出, 管线水平位移受盾构施工影响较小, 但有向隧道轴线偏移的趋势。

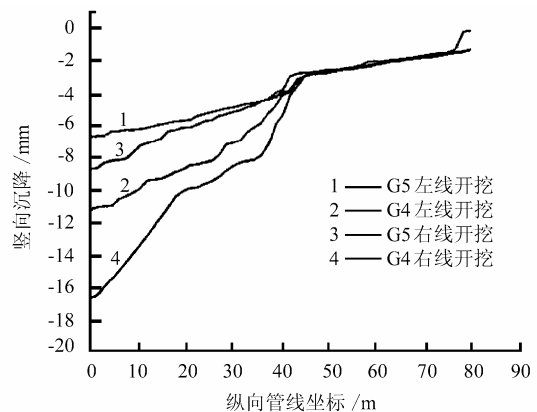


图4 纵向管线竖向沉降(混凝土管)
Fig.4 Settlements of lengthways pipeline(concrete pipe)

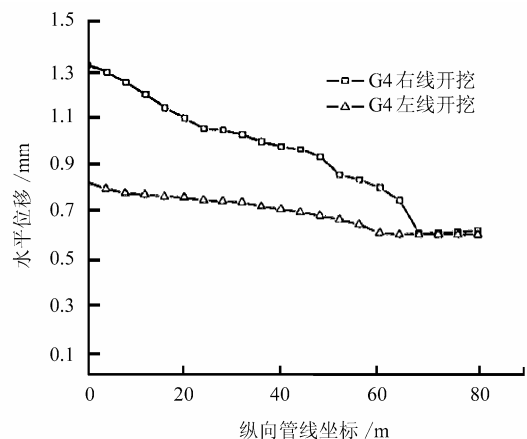


图5 纵向管线水平位移(混凝土管)
Fig.5 Level displacements of pipeline(concrete pipe)

4.3 下卧层刚度对管线的影响

取埋深 $h=2$ m的横向钢管左线开挖进行分析。

(1) 由图6可以得出, 随下卧层刚度的增加, 管道的沉降量明显减小。

(2) 由图7可以得出, 管道减小的沉降量值与下卧层刚度 E 的增加值并不成正比关系, 而是在逐渐减小。这说明增大下卧层刚度来减小沉降量其作用是有限的, 所以应合理地提高管道的下卧层刚度, 以达到最经济实用的效果。

4.4 不同材质对管线的影响

取埋深 $h=2\text{ m}$ 的横向管道左线开挖进行分析。

由图8得知,在相同的地质条件和埋深下,管线的刚度越大,沉降也越小,表明地下管线的弹性模量越小,与土体的变形协调能力就越强。

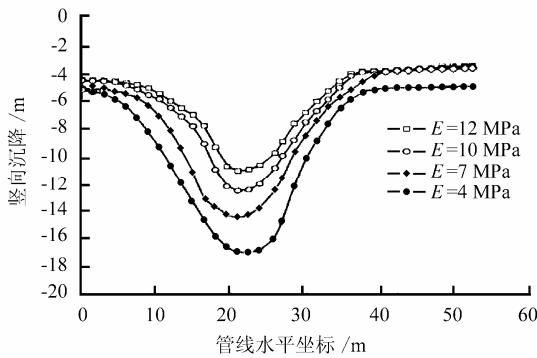


图6 沉降值与下卧层E的关系(左线开挖)
Fig.6 Correlation between settlement and stiffness of subjacent bed (left tunnel excavation)

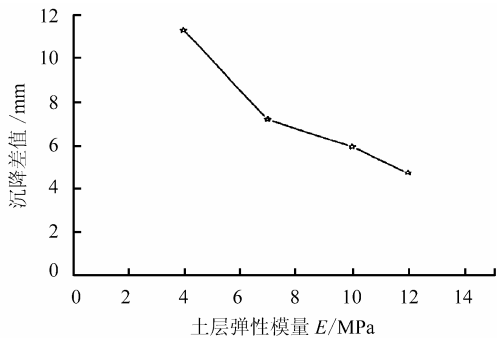


图7 左线开挖时 Δh 与E 的关系
Fig.7 Correlation between Δh and E (left tunnel excavation)

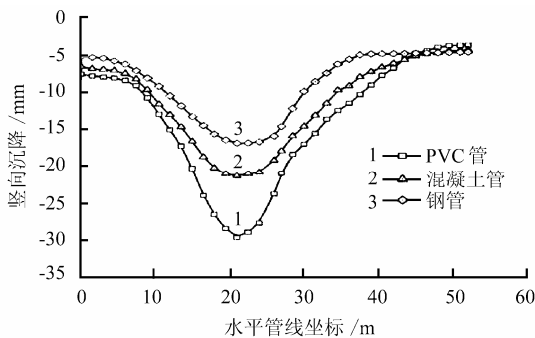


图8 不同材质的管线沉降
Fig.8 Settlements of different material properties

4.5 受力分析

表2~4对先开挖左线再开挖右线隧道应力进行了分析,列出了管道中的最大拉应力和最大压应力值。

从表2~4可以看出:

(1) 对于材质相同的管线,随着埋深的增加,拉应力明显增加,进行右线开挖时,使管线增加的附加拉应力也越大,说明右线开挖对已有管线的影响是很大的。

(2) 相同埋深的管线刚度越大,管线应力也越大。例如:同为埋深2 m的管线,单开挖左线隧道时PVC管最大拉应力为0.267 MPa,混凝土管为4.08 MPa,钢管为46.2 MPa,差别很大。这主要是刚度越小,土体的协调变形能力越好。对于混凝土管线拉应力可能已经超出规范的规定(如C20, $\sigma_t=1.51\text{ MPa}$, $\sigma_c=11.3\text{ MPa}$),在实际工程中应该注意。

表2 PVC管各阶段应力(单位: MPa)
Table 2 Stress of PVC pipeline at different stages (unit: MPa)

管线	左线开挖		右线开挖	
	最大拉应力 /MPa	最大压应力 /MPa	最大拉应力 /MPa	最大压应力 /MPa
G1	0.267	-0.351	0.605	-0.686
G2	0.373	-0.784	0.718	-0.804
G3	0.527	-1.09	0.844	-1.21
G4	1.12	-1.19	1.21	-1.48
G5	1.01	-1.12	1.02	-1.33

表3 混凝土管各阶段应力(单位: MPa)
Table 3 Stress of concrete pipeline at different stages (unit: MPa)

管线	左线开挖		右线开挖	
	最大拉应力 /MPa	最大压应力 /MPa	最大拉应力 /MPa	最大压应力 /MPa
G1	4.08	-4.59	7.22	-5.18
G2	4.52	-8.30	7.82	-9.60
G3	5.76	-11.9	8.90	-12.79
G4	13.5	-14.5	13.7	-14.8
G5	12.2	-10.1	12.6	-10.3

表4 钢管各阶段应力(单位: MPa)
Table 4 Stress of steel pipeline at different stages (unit: MPa)

管线	左线开挖		右线开挖	
	最大拉应力 /MPa	最大压应力 /MPa	最大拉应力 /MPa	最大压应力 /MPa
G1	46.2	-12.3	81.8	-14.7
G2	56.5	-12.7	91.6	-15.2
G3	68.7	-14.7	107	-16.8
G4	64.1	-25.6	111	-28.3
G5	68.5	-24.1	97	-27.4

5 结 论

隧道开挖过程中伴随着地层应力状态的改变和调整,相应地引起地层位移与变形,因此,对地下管线会产生不同程度的影响。本文采用 Abaqus 有限元分析软件,建立三维的模型模拟隧道开挖对地下管线的影响,得出一些有益的结论:

(1) 隧道上方的管线距离隧道越近,受到隧道开挖的影响越大,右线隧道开挖后的附加影响也越大。

(2) 在同一埋深的管线,刚度越大,变形越小,产生的附加应力越大。主要是因为刚度越大,土体的变形协调能力越差。因此,在其他条件允许的情况下,应选用刚度小的管线,从而和土体协调变形。

(3) 沿隧道轴线布置的管线,在隧道开挖的过程中,有向隧道偏移的趋势,距离开挖面近的管线端偏移比较明显,然后沿着开挖轴线的方向逐渐减小。

(4) 管线下卧层土体的刚度对管线的沉降有很大的影响,提高刚度能明显减小沉降,但是并不是无限的减小,应该有个限值。所以,用此方法减小沉降时,应该事先进行分析,避免浪费。

参 考 文 献

- [1] Renato E B, Kael R. Tunnel design and construction in extremely difficult ground conditions[J]. **Tunnel**, 1998, (8): 23—31.
- [2] Krizek R J, Mc Quade P V. Behavior of buried concrete pipe[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, 1978, 104(GT7): 815—836.
- [3] 蒋正华, 吴波, 高波. 地铁区间隧道施工对管线影响的数值模拟[J]. **现代隧道技术**, 2003, 40(1): 16—20.
JIANG Zheng-hua, WU Bo, GAO Bo. Numerical simulation of the influence of running tunnel construction on underground pipeline[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2003, 40(1): 16—20.
- [4] 李宏刚. 铸铁给水管线的应力分析、爆管原因、处理及预防措施[J]. **纯碱工业**, 2000, (2): 38—41.
LI Hong-gang. Stress analysis, reason of pipe burst and measure of disposal and prevention of cast iron water-supply line[J]. **Soda Industry**, 2000, (2): 38—41.
- [5] 韩扬, 孙绍平. 地下管道抗震分析中的若干参数[J]. **特种结构**, 1999, 16(3): 14—16.
HAN Yang, SUN Shao-ping. Several parameters about aseismic analysis of buried pipe[J]. **Special Structures**, 1999, 16(3): 14—16.
- [6] 余振翼, 陈水福. 软土地区路基下横穿管线的三维有限元分析[J]. **市政技术**, 2002, (1): 20—22.
YU Zhen-yi, CHEN Shui-fu. Analysis by three dimensions FEM on pipeline underrun the soft soil roadbed[J]. **Municipal Engineering Technology**, 2002, (1): 20—22.
- [7] 吴波, 高波, 索晓明, 等. 城市地铁隧道施工对管线的影响研究[J]. **岩土力学**, 2004, 25(4): 657—662.
WU Bo, GAO Bo, SUO Xiao-ming, et al. Study on influence of metro tunnel excavation on buried pipeline[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(4): 657—662.
- [8] 唐仪兴, 张玉军. 近距离双隧道开挖与支护的稳定性有限元计算[J]. **岩土力学**, 1999, 20(1): 87—92.
TANG Yi-xing, ZHANG Yu-jun. Plane visco-elasto-plastic FEM calculation for the stability of the excavation and lining structure of a nearby double tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(1): 87—92.
- [9] 毕继红, 江志峰, 常斌. 近距离地铁施工的有限元数值模拟[J]. **岩土力学**, 2005, 26(2): 277—281.
BI Ji-hong, JIANG Zhi-feng, CHANG Bin. Numerical simulation for constructions of Metro tunnels with short distance between them[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(2): 277—281.