

地面超载引起邻近埋地管道的位移分析

龚晓南^{1,2}, 孙中菊³, 俞建霖^{1,2}

(1. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058
3. 浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310006)

摘 要: 地基土承受超载作用时就会产生沉降, 在土体沉降作用下埋置于其中的管道, 管壁就会产生变形甚至破裂。为分析地面超载对临近地下管线的影响, 基于温克勒 (Winkler) 弹性地基短梁理论, 应用 Boussinesq 解, 考虑地面超载引起下卧层的沉降及地基土体的侧向移动对管道的影响, 建立地面超载对埋地管道影响的分析计算模型, 并采用有限差分法进行求解; 通过算例分析了超载大小、位置, 管道刚度、埋深、管径以及土体性质对埋地管道位移的影响; 结果表明: 超载大小、管道的刚度、埋深、管径对地下管道位移的影响较大, 而当地基基床系数和超载离管道的距离增大到一定值时, 地面超载对其影响将减弱。因此, 需要考虑邻近超载对管道的影响, 合理制定埋地管道的保护措施。

关 键 词: 地面超载; 附加应力; 地下管线位移; 温克勒弹性地基短梁; 有限差分法

中图分类号: TU 279.7+6

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2015) 02-0305-06

Analysis of displacement of adjacent buried pipeline caused by ground surcharge

GONG Xiao-nan^{1,2}, SUN Zhong-ju³, YU Jian-lin^{1,2}

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;
2. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering of Education Ministry, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;
3. Zhejiang Provincial Institute of Communications Planning, Design & Research, Hangzhou, Zhejiang 310006, China.)

Abstract: Ground would settle while ground is subjected to surcharge loads. The deformation or break would happen in the walls of the pipelines in the ground due to the settlement. This paper focuses on the effects of ground surcharge on adjacent buried pipelines. A calculation model is established with the theory of Winkler elastic foundation short beam and Boussinesq basic formulas, taking into account the impact of subsoil deformation induced by ground surcharge on pipelines. The solution is derived with the finite difference method. Consequently, cases are performed under various loads, location of the load, geologic condition, pipeline depth, diameter and stiffness of pipeline as well as property of soil. Results show that: after increasing to a certain threshold, the pipeline diameter and the coefficients of foundation bed would have a relatively small impact on the pipeline maximum displacement. However, the buried pipeline deforms significantly as the burial depth decreases. As expected, the maximum displacement of pipeline decreases while the pipe stiffness increases and the location of ground surcharge loads pose large effect on buried pipelines. So it is necessary to consider the surcharge loads and make a reasonable protective measure for buried pipelines.

Key words: ground surcharge; additional stress; displacement of buried pipeline; Winkler elastic foundation short beam; finite difference method

1 引 言

大型建筑、高速公路的修建及地面大面积堆放建筑材料等造成地面严重超载。地面超载通过地基传递到管道上, 使管道受到附加的压力和水平推力, 进而产生附加变形和位移, 引起管道的开裂、错位、渗水、漏水等管道病害。这不仅会造成管道本身给

排水受阻, 同时还会严重影响地面交通、周围房屋建筑和其他地下管线, 而且修复非常困难。因此, 研究给排水管线在地面超载作用下的沉降和变形非常重要。

关于地面超载对埋地管线的影响这一问题, 目前的研究有: 李镜培等^[1]采用曲线拟合的方法在 Winkler 弹性地基短梁理论上推出附加应力作用

收稿日期: 2013-10-07

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51078377)。

第一作者简介: 龚晓南, 男, 1944 年生, 博士, 中国工程院院士, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: xngong@hznc.com

通讯作者: 孙中菊, 女, 1989 年生, 硕士, 主要从事地基处理方面的研究工作。E-mail: 21112065@zju.edu.cn

下管线的变形、剪力和弯矩计算方法;戴宏伟等^[2]采用有限差分法分析了新施工载荷的荷载作用位置、不同土质等对地铁隧道沉降和内力的影响;杨俊涛^[3]利用 Abaqus 有限元计算软件对垂直荷载作用下的埋地管道力学性质进行了三维分析;李大勇等^[4]利用 Winkler 弹性地基短梁理论建立了基坑开挖影响下地下管线竖向与水平位移方程,分析了地下管线位移的影响因素。

本文利用 Winkler 弹性地基短梁理论,采用有限差分法,建立了地面超载对邻近地下管线的影响分析方法,基于算例对地面超载导致的地下管线竖向与水平位移进行计算,最后分析了超载作用位置、管道埋深、直径、刚度及地基土性质对地下管线位移的影响。本文成果可以为地下管线的保护提供一定依据。

2 地面超载引起的附加荷载与位移

如图 1 所示,管线埋置在地下 H 深处,距离管道中心 S 处有一超载,而超载简化为地面均布面荷载 P 。以管道左端(轴线处)为原点,管道轴线方向为 X 轴,载荷中心 O 坐标 (x_p, y_p, z_p) ,长为 $2a$,宽为 $2b$,管道上任一点的坐标为 $(x_0, 0, 0)$,管道的附加荷载取相应的位置土体内的附加应力。地基为半无限弹性体,通过对集中荷载作用下应力解(Boussinesq 解)的积分计算出地下给排水管道竖向及侧向附加应力的计算公式^[5]为

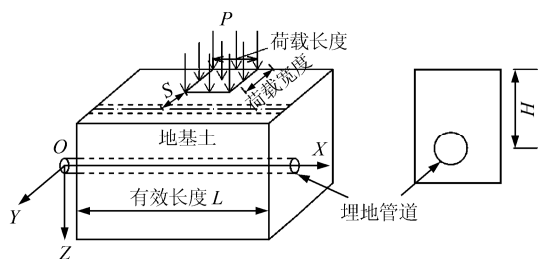


图 1 地面临近超载作用下管道分析模型

Fig.1 Numerical calculation model of buried pipeline of adjacent ground surcharge

$$\left. \begin{aligned} q_v &= -\frac{3pz^3}{2\pi} \int_{y_p-b}^{y_p+b} \int_{x_p-a}^{x_p+a} \frac{1}{R^5} dx dy \\ q_u &= -\frac{3p}{2\pi} \int_{y_p-b}^{y_p+b} \int_{x_p-a}^{x_p+a} \left\{ \frac{y^2 z}{R^5} + \frac{1-2\mu}{3} \cdot \left[\frac{R^2 - z(R+z)}{R^3(R+z)} - \frac{y^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right] \right\} dx dy \\ R^2 &= (x-x_0)^2 + y^2 + z^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: μ 为土的泊松比; p 为均布面荷载 (kPa)。

在附加荷载的作用下,地基土体会发生沉降变形,根据《建筑地基基础设计规范》^[6],可以利用分层总和法计算管道地基土体的沉降量 $\delta_1(x)$:

$$\delta_1(x) = \int_{z_1}^{z_2} \frac{q_v(x, z)}{E_s} dz \quad (2)$$

式中: q_v 为管道顶面地基土的附加应力 (kPa); E_s 为地基土的压缩模量 (kPa); z_1 为管道的埋深 (m); z_2 为附加应力作用下压缩土层的深度 (m)。

超载作用下地基土侧向位移 $\delta_2(x)$ 计算式为^[7]

$$\delta_2(x) = \frac{p(1+\mu)}{2E_s\pi} \int_{y_p-b}^{y_p+b} \int_{x_p-a}^{x_p+a} \left[\frac{xz}{R^5} - \frac{(1-2\mu)x}{R(R+z)} \right] dx dy \quad (3)$$

3 基本假设

土体为各向同性连续介质线弹性体,故不分层考虑;且土体在自重作用下的变形和应力经过相当长时间后对管道的影响已经基本稳定,即不考虑土体固结及荷载随时间变化的问题,只考虑邻近超载产生的附加应力。

管线为等直径、等壁厚,且不考虑管道接头的影响,管道材料为各向同性的线弹性体;在分析过程中,认为本计算体系符合 Winkler 弹性地基梁理论的基本假定,将管道看成地基上的短梁,假设管道纵向弯曲符合 Bernoulli 梁的假定。

超载对临近埋地管道的影响长度 L 假设为超载长度的 3 倍;对于一般地下管线,考虑覆土厚度与施工工艺两个条件的相互作用,本来的固定支座可能由于小覆土厚度等的影响产生一定的转动,本来的转动支座可能由于大覆土厚度等的影响而可以承受一定的弯矩,为不失一般性,本文计算模式采用两端为固定支座。

4 地下管线位移计算

地下管线位移计算可按竖向和水平两个方向的位移分别计算^[8]。

4.1 地下管线竖向位移计算

4.1.1 地基模型

采用 Winkler 地基模型,管道上除了有荷载 q_v 的作用外还有地基反力 p_1 的作用^[9]。

$$p_1 = kv \quad (4)$$

式中: v 为地下管线的竖向位移 (m); k 为地基基床系数 (kN/m³)。

4.1.2 管道的挠曲微分方程为

$$E_p I \frac{d^4 v}{dx^4} + Dkv = q_v + k\delta_1(x) \quad (5)$$

令 $K = kD$, $q_1(x) = q_v + k\delta_1(x)$

则有

$$E_p I \frac{d^4 v}{dx^4} + kv = q_1(x) \quad (6)$$

式中: $E_p I$ 为地下管线的抗弯刚度 ($\text{kN} \cdot \text{m}^2$); D 为地下管线横截面宽度, 本文为圆管直径 (m)。

4.1.3 有限差分法

对于 $v = f(x)$ 在 i 点处的四阶导数, 可以近似地用四阶导数的中心差分表示, 即

$$\left(\frac{d^4 v}{dx^4} \right)_i \approx \frac{v_{i+2} - 4v_{i+1} + 6v_i - 4v_{i-1} + v_{i-2}}{\Delta x^4} \quad (7)$$

4.1.4 差分方程组的建立和求解

易知管道所受的竖向土压力为非均布力, 故在对管道进行分析时, 将管道上的附加作用力看成无数多个集中力 q_i 分别进行计算; 将荷载影响长度 L 范围内的管道进行分段, 每段长为 c , 第 i 段中点的竖向位移为 v_i , 基底均布反力为 p_i ; 如图 2 所示。这样不仅考虑了管道与周围土体的共同作用, 还将管周土体传至的荷载考虑在内, 从而进行荷载-土体-管道的相互作用分析。对于第 i 分段, 由式 (5) 可得:

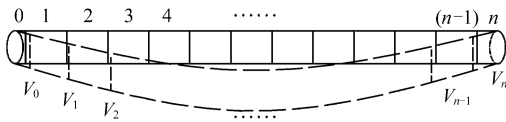


图2 有限差分网格

Fig.2 FDM meshes of pipeline

$$\left. \begin{aligned} E_p I \frac{v_{i+2} - 4v_{i+1} + 6v_i - 4v_{i-1} + v_{i-2}}{c^4} + Kv_i &= q_i \\ C(v_{i+2} - 4v_{i+1} + 6v_i - 4v_{i-1} + v_{i-2}) + Kv_i &= q_i \\ C \left[v_{i+2} - 4v_{i+1} + \left(6 + \frac{K}{C} \right) v_i - 4v_{i-1} + v_{i-2} \right] &= q_i \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: $C = EI/c^4$, $i = 2, 3, \dots, (n-2)$ 。

管道两端边界条件为固定端, 故有

$$\left\{ \begin{aligned} x=0 \text{ 处, 竖向位移 } \delta_{10} &= 0, \text{ 转角 } \theta_{10} = 0; \\ x=L \text{ 处, 竖向位移 } \delta_{1L} &= 0, \text{ 转角 } \theta_{1L} = 0. \\ (\theta = 0, \text{ 即 } dy/dx &= 0) \end{aligned} \right.$$

由边界条件补足另外所缺方程。这样就建立了以各段中点挠度为未知数的线性代数方程式, 用矩阵的形式表示为

$$[A]\{v\} = \{P\} \quad (9)$$

式中: $[A]$ 为系数常数矩阵;

求解式 (9) 即可得管道的竖向位移。

4.2 地下管线水平位移计算

超载作用下土体会发生显著的侧向位移, 这必然导致地下管线发生侧移^[10]。可以把地下管线看成以水平方向上的 Winkler 地基梁计算其水平位移, 方法类似于地下管线竖向位移的计算方法^[11]。

4.2.1 地基模型

采用 Winkler 地基模型。

$$p_2 = ku \quad (10)$$

式中: u 为地下管线的水平位移 (m)。

4.2.2 管道的挠曲微分方程

$$E_p I \frac{d^4 u}{dx^4} + ku = q_u + K\delta_2(x) \quad (11)$$

4.2.3 差分方程组的建立和求解

将荷载影响长度范围内的管道进行分段, 建立以各段中点小挠度为未知数的线性代数方程式, 用矩阵的形式表示为

$$[A]\{u\} = \{P\} \quad (12)$$

结合边界条件, 求解式 (12), 从而确定地下管道的水平位移。

4.3 超载作用下地下管线的位移的计算

将以上算得的竖向位移 v 和水平位移 u 进行矢量叠加, 得到超载作用下地下管线的位移值 d 。

$$d = \sqrt{v^2 + u^2} \quad (13)$$

5 超载引起地下管线变形因素分析

5.1 算例

如图 3 所示, 某城市排水管道埋置在一居民楼房附近, 管道材质为钢材, 截面抗弯刚度为 $E_p I = 1.0 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$, 管径为 4 m, 轴线埋深 5 m, 软土地基的密度为 1.80 g/cm^3 , 压缩模量 $E_s = 3 \text{ MPa}$, 泊松比 $\mu = 0.5$; 地基床系数为 $k = 1.0 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$, 地面荷载大小为 100 kPa , 为均布面荷载, 长 20 m, 宽 8 m, 荷载作用中心线与管道轴线相距 3 m。超载对埋地管道的影响长度 L 取地面超载纵向长度的 3 倍, 即 60 m, 将管道分为 30 段, 每段长为 2 m。

5.2 计算结果及影响因素分析

利用式 (1) ~ (3), 编写相应的计算程序, 运用 MATLAB 软件^[12-13]可分别计算出管道不同位置处的竖向和水平附加应力及超载作用下地基土体的变形, 其结果如图 4、5 所示, 竖向和水平附加应力及超载作用下地基土体的变形曲线均是呈两侧小

中间大形态,且竖向附加应力要大于水平附加应力,而土体竖向位移远远大于水平位移。

在附加应力及考虑地基土体变形影响下,采用本文的计算方法,可以进行管道变形影响因素分析。

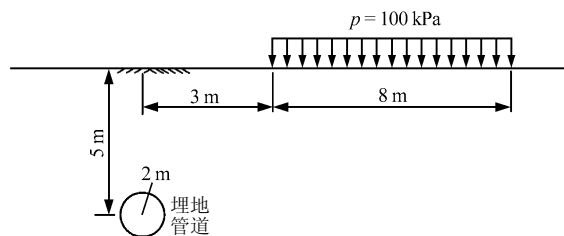


图3 埋地管道与邻近超载示意图

Fig.3 Overview of pipeline and adjacent surcharge

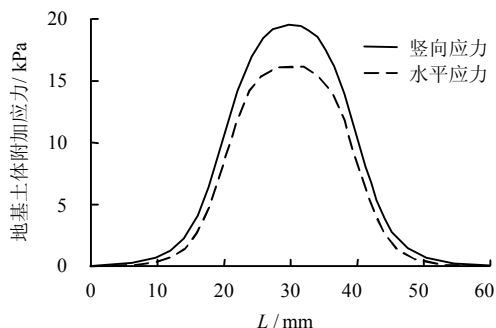


图4 地基土体附加应力

Fig.4 Additional stress of subsoil

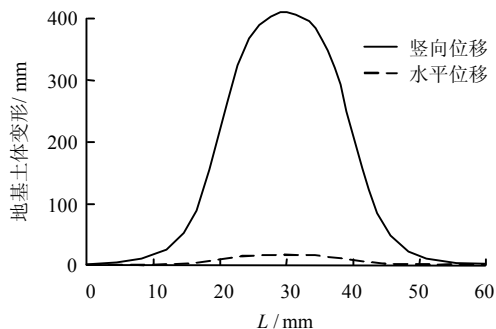


图5 地基土体变形

Fig.5 Deformations of subsoil

5.2.1 荷载作用位置

图6表示荷载大小和面积不变,荷载中心位置距离管道的不同对埋地管道的影响。

从图中可以看出,当荷载中心距离管线轴线位置 S 增加时,管道的最大位移降幅明显,但当距离增加到某一值时(本算例为9 m),管道的最大竖向位移及内力几乎为0,这是因为地面超载下方实际上产生一个沉陷区,荷载位置移动相当于该沉陷区在移动,当荷载与管道相距较远时,管道远离沉陷区,因此,最大竖向位移逐渐减小。因此,在工程

中,管道距离地面超载的位置可根据实际超载引起地面沉陷曲线取值^[3]。

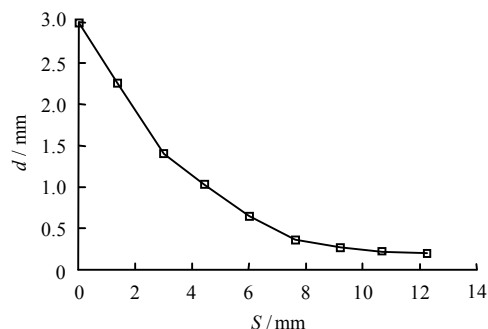


图6 荷载作用位置 S 的影响

Fig.6 Effect of location of adjacent surcharge load S on displacement d of pipeline

5.2.2 地基土性质

地基土的种类也会对埋地管道的内力产生影响,表现为地基土基床系数的影响,从图7中可以看出,随地基基床系数 k_v 增加,地下管线的最大位移逐渐减小,但当 k_v 增大到某一值时(本算例 $k_v = 1.5 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$),地下管线的竖向位移增加幅度趋于平稳,即地基基床系数的增加对管道位移的影响已不明显,这是因为地基基床系数越大,地基土体的压缩模量就越大^[11]。可见,为确保埋地管道的安全,在进行管道安置时,要尽量选取地基基床系数较大的土层,这也解释了在管道保护措施中采用地基土体加固的原理^[14]。

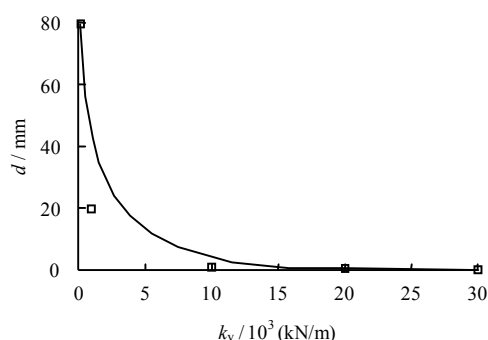


图7 基床系数的影响

Fig.7 Influence of foundation soil coefficient k on displacement d of pipeline

5.2.3 管道刚度

图8在同一埋深的管线,刚度越大,变形越小。主要是因为刚度越大,土体的变形协调能力越差。这也是实际工程中,当刚性管发生破坏时,同等情况下的柔性管反而正常工作的原因。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。

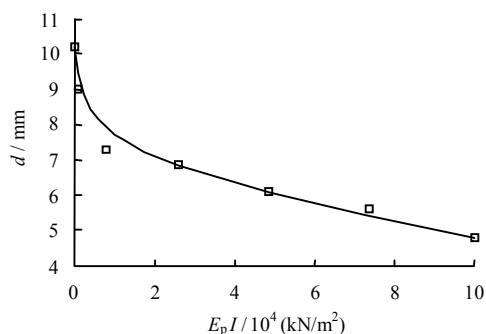


图8 管道刚度的影响

Fig.8 Influence of pipe stiffness $E_p I$ on displacement d of pipeline

5.2.4 管道直径

图9表示埋地管道直径不同对管道变形和内力的影响。从图中可以看出,随着管径的增大,地下管线竖向位移是逐渐减小的,这与金浏等^[15]通过实验得出的结论:埋地管道管径越大,管道在土中越容易变形协调相符合。

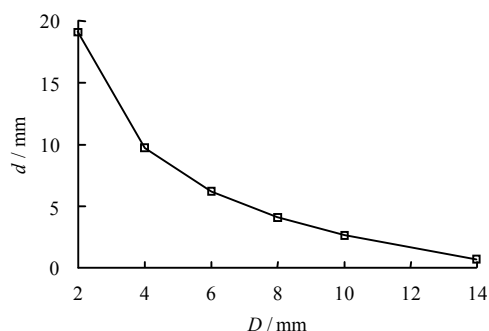


图9 管道直径的影响

Fig.9 Influence of pipe diameter on displacement d of pipeline

5.2.5 管道埋深

图10是管道直径 D 不变、管道埋深不同情况下管道的最大位移图。由图可知,随着管道埋深的增加,地面超载对埋地管道的影响越来越小,当埋深增加到一定数值时,对地下管道的影响已不明显。这是由于随管道埋深增加,土体与管道相互作用加强,有效作用区域减小,“限制”了管道的运动^[15],对管道抵抗变形有利;但由于本文只考虑了地面超载对埋地管道的影响,并未考虑管道上覆土压力及孔隙水压力和管内压力等的影响,随着埋深的增加,孔隙水压力、管内压力及地基土性质都可能会对管道内力和变形产生不良影响,因此,并不能说明,埋深越大管道就越安全。

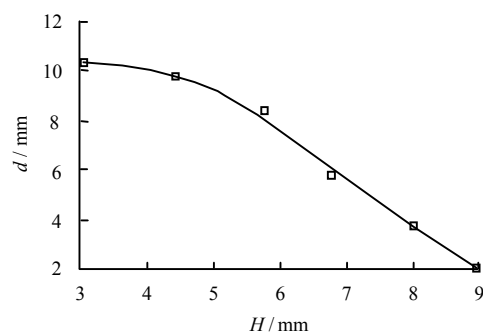


图10 管道埋深的影响

Fig.10 Influence of embedment depth of pipeline H on displacement d of pipeline

5.2.6 超载大小

由图11可知,随着超载的增大,埋地管道的位移值越来越大,且地下管线位移值随超载的增大几乎呈线性增大,说明上部荷载大小对地下管线的影响是比较大的。

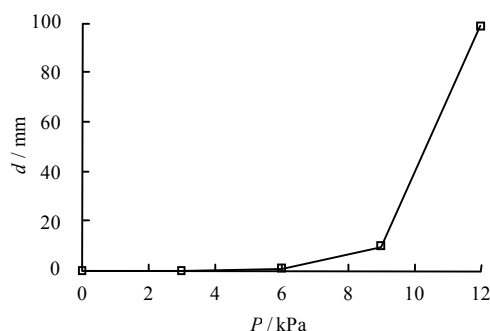


图11 超载大小的影响

Fig.11 Influence of surcharge P on displacement of pipeline d

通过以上几个参数的分析发现,在地面超载作用下,地基土的性质、管道的埋深、刚度、直径及荷载作用位置都会对管道的力学行为产生影响,当超载距管道距离与地基基床系数增加到一定值时,地下管线受到超载的影响将不明显。在地面超载作用下,如果管道的埋深较小或者地基土性质较差,会导致管道产生较大的内力和变形,甚至结构破坏。由此可知,实际工程中,要充分考虑上述因素对地下管线的影响,选择合理的位置安置地下管道。

6 结 论

地下管线与周围土体相互作用的课题一直是理论界的一个热点;本文从理论分析着手,基于Winkler弹性地基模型,假定埋地管道为各向同性的线弹性体,利用有限差分法建立了地面超载作用下埋地管道的变形计算理论,分析研究了地面超载对

埋地管道的位移的影响,对地面超载下邻近埋地管道位移影响程度的进行了定性评价。

分析表明:地面超载对临近埋地管道变形的影响是不可忽视的;超载作用位置距离管道的远近、管道直径、埋深、刚度及地基土的性质都会影响到管道的内力和变形。且管道的埋深与地面超载作用位置对管道的内力影响很明显。故在市政管道工程建设中,埋地管道的安置要考虑临近地面超载情况,根据实际情况,利用本文中提出的有限差分法理论进行计算,选择合理的埋深、管径、管的抗弯刚度及距超载的距离,以实现埋地管道的保护。

本文采用 Winkler 弹性地基模型进行分析,没有考虑地基分层级土体非线性作用的影响,在将来的研究中可进一步考虑。

参考文献

- [1] 李镜培,丁士君. 邻近建筑荷载对地下管线的影响分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(12): 1553—1557.
LI Jing-pei, DING Shi-jun. Influence of additional load caused by adjacent Buildings on underground pipeline[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science Edition)**, 2004, 32(12): 1553—1557.
- [2] 戴宏伟,陈仁鹏,陈云敏. 地面新施工荷载对临近地铁隧道纵向变形的影响分析研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 312—316.
DAI Hong-wei, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min. Study on effect of construction loads on longitudinal deformation of adjacent metro tunnels[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(3): 312—316.
- [3] 杨俊涛. 垂直荷载作用下埋地管道的纵向力学性状分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [4] 李大勇,张士乔,龚晓南. 深基坑开挖引起邻近地下管线的位移分析[J]. 工业建筑, 1999, 29(11): 36—41.
LI Da-yong, ZHANG Tu-qiao, GONG Xiao-nan. Analysis of displacements of buried pipelines caused by deep excavations[J]. **Industrial Construction**, 1999, 29(11): 36—41.
- [5] 龚晓南. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [6] 中华人民共和国行业标准编写组. GB5007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [7] 曾国熙. 垂直荷载下软粘土的侧向变形[J]. 浙江大学学报, 1962, 1: 93—124.
ZENG Guo-xi. Lateral displacements in soft clay under vertical load[J]. **Journal of Zhejiang University**, 1962, 1: 93—124.
- [8] TAVENAS F. Lateral displacements in clay foundations under embankments[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1979, 16(2): 32—55.
- [9] 龙驭球. 弹性地基梁的计算[M]. 北京: 人民教育出版社, 1981.
- [10] SELVADURAI A P S. 土与结构相互作用的弹性分析[M]. 范文田译. 北京: 中国铁道出版社, 1984.
- [11] 汪定繄,罗毅. 地基的基床系数[J]. 岩土工程技术, 1996, 3: 47—51.
WANG Ding-shang, LUO Yi. The coefficient of subgrade reaction[J]. **Geotechnical Engineering Technique**, 1996, 3: 47—51.
- [12] 刘北辰. 工程计算力学——理论与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [13] 龚纯,王正林. MATLAB 语言常用算法程序集[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [14] 张治国,张孟喜,王卫东. 基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2085—2092.
ZHANG Zhi-guo, ZHANG Meng-xi, WANG Wei-dong. Two-stage method for analyzing effects on adjacent metro tunnels due to foundation pit excavation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(7): 2085—2092.
- [15] 金浏,李鸿晶,姚保华. 埋地管线-土体相互作用分析计算区域的选取[J]. 南京工业大学学报, 2009, 31(3): 37—41.
JIN Liu, LI Hong-jing, YAO Bao-hua. Determination of interaction in pipeline-soil system under ground permanent deformation[J]. **Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition)**, 2009, 31(3): 37—41.