

深基坑开挖引起邻近地下管线位移的两阶段法

刘小兵, 陈有亮, 孟伟波

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 针对深基坑开挖引起的周围地下管线位移, 基于两阶段法, 首先给出了基坑开挖引起的周围自由土体位移的计算方法, 然后结合 Winkler 弹性地基梁模型, 建立了受土体卸载附加变形影响的地下管线竖向和水平方向位移方程, 通过有限差分法求解出地下管线位移。将此方法应用于工程实例, 其理论计算结果与现场实测数据基本吻合, 验证了两阶段法的合理性及适用性。本方法可用于分析管线埋深、管线距离、地基土性质等因素对管线变形的影响。

关键词: Winkler 模型; 两阶段法; 地下管线; 位移; 有限差分法

中图分类号: TU 45 文献标志码: A

Two-Stage Method on the Displacement of Underground Pipelines Caused by Excavation of Deep Foundation Pit

LIU Xiaobing, CHEN Youliang, MENG Weibo

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the displacement of underground pipelines caused by excavation of deep foundation pit, the algorithm for the displacement of the surrounding free soil caused by excavation was proposed based on the two-stage method. Combined with Winkler elastic foundation beam model, the equations for calculating the vertical and horizontal displacement of underground pipelines subjected to additional deformation of soil unloading are established. The displacement of underground pipeline was solved by finite difference method. Then the two-stage method was applied to an engineering example. The results show that the theoretical calculation is in good agreement with the data measured in field. Thus, the rationality and usability of the two-stage method has been verified. The method presented in this paper can be used for analysis of the influences of pipelines buried depth, distance between pipelines, and soil properties on the deformation of pipelines.

Keywords: Winkler model; two-stage method; underground pipeline; displacement; finite difference method

收稿日期: 2018-05-10

基金项目: 上海市自然科学基金资助项目 (14ZR1428200)

第一作者: 刘小兵 (1992-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 岩土力学. E-mail: 13122990889@163.com

通信作者: 陈有亮 (1966-), 男, 教授. 研究方向: 岩石力学. E-mail: chenyouliang2001@163.com

随着城市的发展，高层建筑、超高层建筑、地下建筑等工程大量兴起，而与之对应的是越来越多、越来越深的深基坑工程的出现。在城市复杂环境条件下基坑开挖引起的地下管线变形直接影响到人民的生命财产安全，因此受到极大的重视。所谓基坑开挖的环境效应问题就是基坑开挖使土体由初始应力场状态变为第二应力状态。土体内应力重新分布，致使围护结构产生变形、位移，引起基坑周围地表沉陷，从而对临近建筑物和地下设施带来不利影响，诸如临近建筑物的开裂、倾斜、道路开裂、地下管线的变形和开裂等^[1]。在基坑开挖对周围地下管线影响的评估中，分析基坑引起的管线变形是非常重要的工作。

在管线变形的众多影响因素中，深基坑围护结构变形和其基坑周围地表沉陷，是引起管线位移、变形，甚至破坏的根本原因。目前国内外很多学者对基坑开挖引起周围地下管线的位移进行了研究^[2-9]，并得出了不同的结论。

为此，本文针对深基坑开挖引起的周围地下管线位移，结合 Winkler 弹性地基梁模型，采用两阶段法，建立了受土体卸载附加变形影响的地下管线竖向和水平方向位移方程，通过有限单元法解出地下管线位移，经过与工程实例对比分析，表明理论计算结果与现场实测数据吻合。

1 基坑开挖引起周围地下管线位移的两阶段法分析

两阶段法将基坑开挖对管线的影响分成两个阶段。第一阶段，分析开挖引起的管线位置处的自由土体位移，包括竖向位移和水平位移；第二阶段，基于 Winkler 地基模型，将上述自由土体位移视为作用在管线上的附加应力，分析计算管线的附加位移。

1.1 作用在管线上的竖向附加应力

根据李大勇等^[1]的研究，地下管线受到自重、上覆土压力、地面超载、地基反力等作用力。但由于自重和上覆土压力在基坑开挖前就已经达到平衡，因此在计算基坑开挖引起的管线变形时，应将其忽略。李大勇等^[1]将基坑周围地表分为沉陷区和非沉陷区分别计算，并将沉陷区的沉降曲线设为抛物线，并假定沉陷区和非沉陷区交界处土体表面不发生沉降，这与实际情况差距较大，易

产生较大误差。

张陈蓉等^[10]在前人研究的基础上提出了坑外地表土体沉降预测公式

$$\omega_v(x,y,0)=\begin{cases} \omega_{v,\max}(x/H+0.5)e^{-\pi(y/A)^2} & (0 < x \leq 0.5H) \\ \omega_{v,\max}(-0.6x/H+1.3)e^{-\pi(y/A)^2} & (0.5H < x \leq 2H) \\ \omega_{v,\max}(-0.05x/H+0.2)e^{-\pi(y/A)^2} & (2H < x \leq 4H) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\omega_{v,\max}$ 为地面最大沉降值； H 为基坑开挖深度； A 为变形影响半径，与基坑开挖深度 H 和基坑开挖深度长度 L 有关。

$$A=L(0.069\ln(H/L)+1.03)/2$$

基于位移控制理论，张陈蓉等^[10]由拟合结果得到上海软土地区板式维护基坑体系基坑外的任一点土体沉降曲线公式

$$\omega_v(x,y,z)=\begin{cases} \omega_v(x,y,0)(1.54e^{-z/3x}-0.54) & (0 < x \leq 0.5H) \\ \omega_v(x,y,0)(-0.6z/x+1) & (0.5H < x \leq 1.5H) \\ \omega_v(x,y,0)(-1.5z/x+1) & (x > 1.5H) \end{cases} \quad (2)$$

因此，地表沉降引起的管线处附加应力 q_1 为

$$q_1=K_v\omega_v=K_0D\omega_v \quad (3)$$

式中： K_v 为地基竖向基床换算系数(N/m²)； K_0 为地基竖向基床系数(N/m²)； D 为地下管外径。

目前很多学者均采用 Vesic^[11]提出的地基基床系数公式

$$K_0=\frac{0.65E_s}{1-\nu_s^2}\left(\frac{E_sD^4}{EI}\right)^{\frac{1}{12}} \quad (4)$$

式中： E_s 为地基土弹性模量； EI 为管线的等效抗弯刚度； ν_s 为地基土泊松比。

Vesic 公式是基于置于地表的弹性地基梁提出的，没有考虑埋深对地基竖向机床系数的影响。俞剑等^[12]改进了 Vesic 的地基基床系数，可以考虑地基土埋深的影响，本文将地下管线看做埋于地下的弹性地基梁，因此俞剑等^[12]提出的模型公式更为符合本文实际情况，公式如下：

$$K_0=\frac{3.08E_s}{\eta(1-\nu_s^2)}\left(\frac{E_sD^4}{EI}\right)^{\frac{1}{8}} \quad (5)$$

式中： η 为与管线埋深 h 和管外径 D 相关的系数。当 $h/D \leq 0.5$ 时， $\eta=2.18$ ；当 $h/D > 0.5$ ， $\eta=1+\frac{1}{1.7h/D}$ 。

1.2 地下管线的竖向变形理论

在 Winkler 弹性地基梁模型中, 假定土体与管线之间保持弹性接触, 用连续分布的弹簧来模拟管-土之间的相互作用, 土体与管线之间满足变形协调, 不可发生分离。计算模型见图 1。

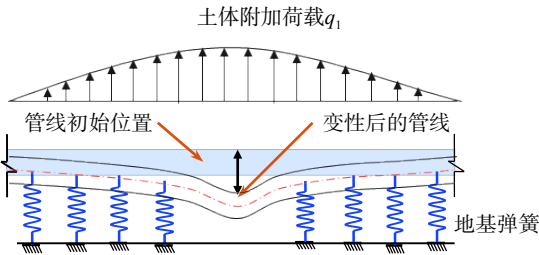


图1 Winkler 弹性地基梁模型
Fig.1 Winkler elastic foundation beam model

根据 Winkler 弹性地基梁理论, 地下管线竖向位移的微分方程为

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + K_v y - K_v \omega_v - q_0 = 0 \quad (6)$$

式中, q_0 为地下管线的自重、管内水的重量以及上附土压力的合力。计算时, 取 $q_0 = 0$ 。式(6)为高阶微分方程, 直接求解较为复杂, 本文采用有限单元法求解该方程。

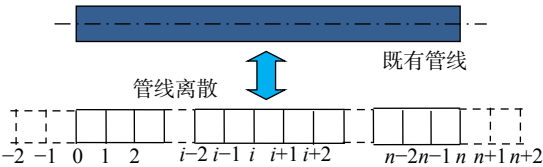


图2 管线离散示意图
Fig.2 Schematic diagram of pipeline discrete

图 2 为对地下管线做了有限差分离散化的示意图。管线离散为 $(n+5)$ 个节点单元(其中管线两端各设置 2 个虚拟节点单元), 每个单元的长度设为 l 。根据有限差分法原理, 式(6)中的微分项可表示为

$$\frac{d^4 y(x)}{dx^4} = \frac{6y_i - 4(y_{i+1} + y_{i-1}) + (y_{i+2} + y_{i-2})}{l^4} \quad (7)$$

式中: $y_i, y_{i+1}, y_{i-1}, y_{i+2}, y_{i-2}$ 分别为节点 $i, i+1, i-1, i+2, i-2$ 处的位移。

由此可得式(6)的有限差分表达式为

$$EI \frac{6y_i - 4(y_{i+1} + y_{i-1}) + (y_{i+2} + y_{i-2})}{l^4} + K_v y_i - K_v y' = 0 \quad (8)$$

边界条件: 假定管线两端自由, 则有两端的

弯矩 M 、剪力 Q 均为 0, 即

$$\left\{ \begin{aligned} M_0 &= -(EI) \frac{d^2 y}{dx^2} \Big|_{x=0} = 0 \\ - (EI) \frac{y_1 - 2y_0 + y_{-1}}{h^2} &= 0 \\ M_n &= -(EI) \frac{d^2 y}{dx^2} \Big|_{x=n} = 0 \\ - (EI) \frac{y_{n+1} - 2y_n + y_{n-1}}{h^2} &= 0 \\ Q_0 &= -(EI) \frac{d^3 y}{dx^3} \Big|_{x=0} = 0 \\ - (EI) \frac{y_2 - 2y_1 + 2y_{-1} - y_{-2}}{2h^3} &= 0 \\ Q_n &= -(EI) \frac{d^3 y}{dx^3} \Big|_{x=n} = 0 \\ - (EI) \frac{y_{n+2} - 2y_{n+1} + 2y_{n-1} - y_{n-2}}{2h^3} &= 0 \end{aligned} \right. \quad (9)$$

由式(9)可得 4 个虚节点的位移

$$\left\{ \begin{aligned} y_{-2} &= 4y_0 - 4y_1 + y_2 \\ y_{-1} &= 2y_0 - y_1 \\ y_{n+1} &= 2y_n - y_{n-1} \\ y_{n+2} &= 4y_n - 4y_{n-1} + y_{n-2} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

式(6)可写成矩阵的形式

$$K_t y + K_s y = Q \quad (11)$$

并可简化为

$$(K_t + K_s) y = Q \quad (12)$$

式中: K_t 为管线变形刚度矩阵; K_s 为地基刚度矩阵; y 为管线竖向位移列向量; Q 为管线处土体附加变形列向量。其中各变量的具体表达形式如下:

$$y = [y_0 \ y_1 \ \cdots \ y_i \ y_{i+1} \ \cdots \ y_n]^T$$

$$Q = K_v [y'(x_0) \ y'(x_1) \ \cdots \ y'(x_i) \ y'(x_{i+1}) \ \cdots \ y'(x_n)]^T$$

$$K_t = \frac{EI}{l^4} \begin{bmatrix} 2 & -4 & 2 & & & \\ -2 & 5 & -4 & 1 & & \\ 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \\ & & & 1 & -4 & 5 & -2 \\ & & & & 2 & -4 & 2 \end{bmatrix}_{(n+1)(n+1)}$$

$$K_s = K_v \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & 1 \\ & & & & & & 1 \end{bmatrix}_{(n+1)(n+1)}$$

令 $K=K_t+K_s$ ，则式(12)可改写为

$$y=K^{-1}Q \tag{13}$$

式中， K^{-1} 为 K 的逆矩阵。因此，在已求得管线上附加应力的情况下，可通过式(13)求得基坑开挖引起周围地下管线的变形。

1.3 作用在管线上的水平附加应力

计算管线水平方向位移时，可将其看做一个水平放置的弹性地基梁。基坑开挖，支护结构会向基坑内侧方向隆起从而达到新的平衡，埋在土中的管线也会随之发生变形。设在管线埋深处基坑支护结构变形曲线方程为

$$y'=ax^2+bx+c \tag{14}$$

式中， a, b, c 均为常数，其值可由以下边界条件确定：

$$\begin{cases} x=0, y'=\delta \\ x=L, y'=0 \\ x=-L, y'=0 \end{cases} \tag{15}$$

求得： $a=-\frac{\delta}{L^2}$ ； $b=0$ ； $c=\delta$ 。其中 δ 为支护结构在管线埋深处位移量。从而，式(14)可转化为

$$y'=-\frac{\delta}{L^2}x^2+\delta \tag{16}$$

因此，基坑支护变形引起的管线处水平附加应力为

$$q_1=K_hy' \tag{17}$$

式中， K_h 为地基水平基床换算系数。根据刘建航等^[4]的研究， K_h 的取值为 K_v 的1.5~2.0倍。其余参数与上文相同。

因此，可以得到管线水平方向附加应力为

$$q_1=K_h\left(-\frac{\delta}{L^2}x^2+\delta\right) \tag{18}$$

1.4 地下管线的水平方向变形理论

将管线看做水平放置的弹性地基梁，可得其位移微分方程为

$$EI\frac{d^4y}{dx^4}+K_hy-K_hy'-q_0=0 \tag{19}$$

求解该方程，可参照上文管线竖向位移微分方程的解法。

2 工程实例

即墨变电站位于浦东新区陆家嘴地区银城路南侧、昌邑路北侧、日照路东侧三角形地块内。地块用地面积7 100 m²，其站体平面形状布置为L型，如图3所示。具体平面尺寸为：矩形101.5 m×

56.4 m切去东北角35.3 m×21.4 m，站体占地面积为4 969.18 m²。地下变电站为剪力墙结构体系，在地下一层顶板设转换层。建筑物为地下三层、地上五层(局部四层)布置，基坑面积4 569 m²，基坑开挖深度22.0 m。基坑南侧沿昌邑路分布有一条上水管线，材质为钢材，管径300 mm，管厚4 mm，弹性模量20.1 GPa，顶埋深1.0 m，距基坑边约5.87 m。管线上设10个监测点，分别为M1，M2，M3，M4，M5，M6，M7，M8，M9，M10。

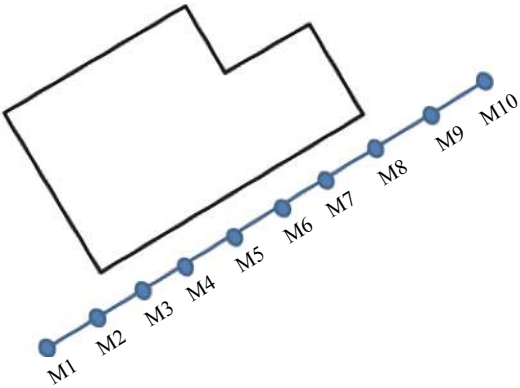


图3 管线监测点示意图

Fig.3 Schematic diagram of pipeline monitoring points

为了计算简便而准确，根据地勘报告表，土体假定为均质土层，采用线弹性模型，重度为17.6 kN/m³，压缩模量为6.1 MPa，泊松比为0.3。图4为采取本文提出的解析方法计算得到的基坑开挖引起周围地下管线竖向位移的计算值与工程实测值的对比。可以看出，本文方法计算结果与现场实测的地下管线纵向变形曲线分布规律基本吻合，但数值上还存在一定差别。理论计算得到

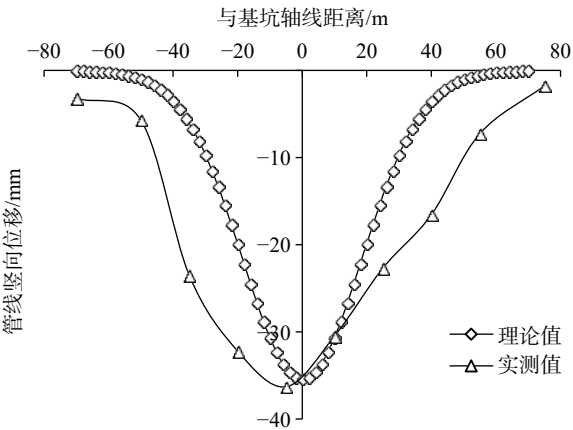


图4 基坑周围管线竖向位移理论值与实测值

Fig.4 Theoretical and measurement values for the vertical displacement of pipelines surrounding the foundation pit

的管线沉降最大值为 35.42 mm，实测管线最大沉降值为 36.8 mm，相对误差为 3.8%。该误差产生的主要原因为：a. 土层性质的不均匀性；b. 基坑形状不是规则的矩形，没有对称性；c. 地基基床系数是根据前人公式算得，没有经过现场实测，可能存在差异。

3 基坑开挖引起地下管线变形的因素分析

3.1 管线埋深

本文将管线埋深取 8 种情况，分别为：1，2，3，4，5，10，15，20 m。通过图 5、图 6 可以看出，管线竖向位移随着其埋深的增大而减小，减小速度与管线埋深增大速度不呈正比关系。管线

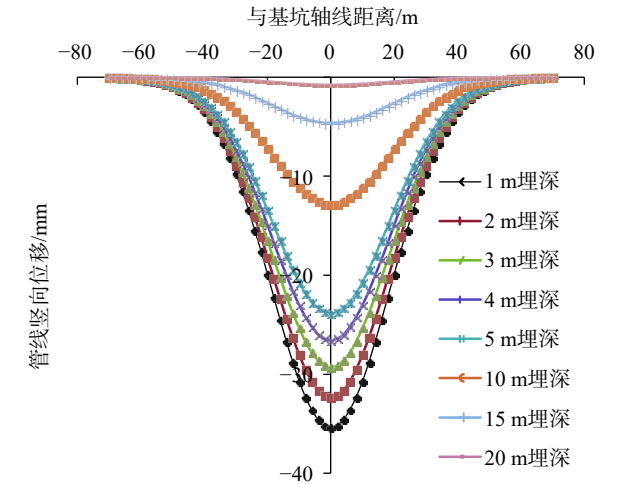


图 5 不同埋深地下管线的竖向位移情况

Fig. 5 Vertical displacements of pipelines with different depths

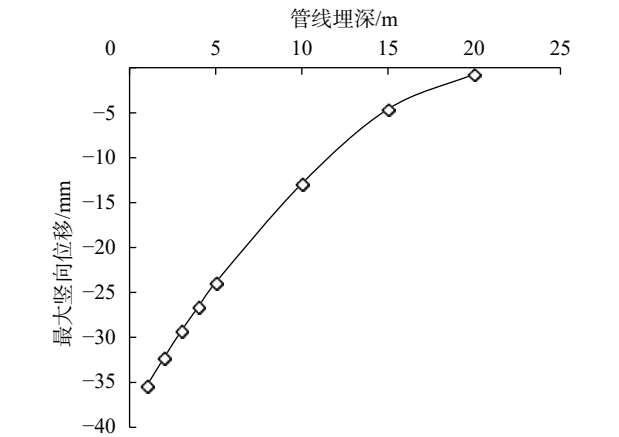


图 6 埋深对地下管线的最大竖向位移的影响

Fig. 6 Influence of depth on the vertical displacement of pipelines

埋深越大，其最大竖向位移越小，且其随埋深的增大而减小的速率也越小。当管线埋深达到 20 m 时，管线的竖向位移几乎为 0。

3.2 地下管线到基坑边缘的水平距离

图 7 为管线最大竖向位移与管线到基坑的水平距离之间的变化规律，两者的变化规律呈 V 字形，即管线与基坑边缘的水平距离随管线最大竖向位移先增大后减小，当水平距离增加到一定程度后(本文为 50 m)，管线竖向位移趋近于 0。最大竖向位移出现在水平距离 10~15 m 之间，即 0.5H 左右，这与前人^[13-14]研究的坑外土体沉降规律基本一致。

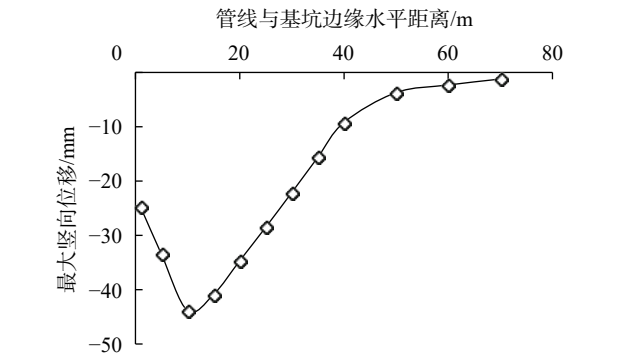


图 7 水平距离对管线最大竖向位移的影响

Fig. 7 Influence of horizontal distance on the maximum vertical distance of pipeline

3.3 地基土性质(基床系数)

图 8 为地基土基床系数对管线竖向位移的影响情况。可以看出，地下管线的最大竖向位移随地基土基床系数 K_v 增加而逐渐减少，但当 K_v 增大到某一值后(本例 $K_v=1.2\times10^7\text{ kN/m}^2$)，地下管线的竖向位移增加幅度趋于平稳，此时地基基床系数 K_v 的增加对竖向位移的影响已逐渐减小直至可忽略不计。

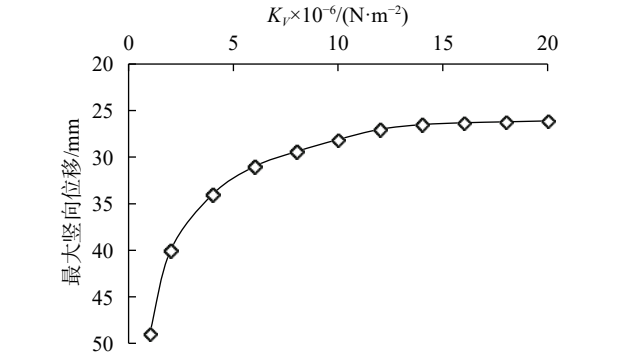


图 8 地基土基床系数对管线竖向位移的影响

Fig. 8 Influence of foundation soil coefficient of subgrade reaction on the vertical distance of pipeline

4 结 论

a. 基于 Winkler 弹性地基梁理论，利用两阶段法建立了受基坑开挖影响的地下管线竖向位移及水平位移方程，并通过工程实例验算，证明计算结果与现场实测的地下管线变形值基本吻合。

b. 管线竖向位移随着其埋深的增大而减小，且其减小的速度与管线埋深的增大速度不是线性关系。管线埋深越大，其最大竖向位移越小，且其随埋深的增大而减小的速率也越小。

c. 管线最大竖向位移与管线到基坑的水平距离之间的变化规律为凹槽形，即先增大后减小，当水平距离增加到一定程度后(本文为 50 m)，管线竖向位移趋近于零。最大竖向位移出现在水平距离 0.5H(H 为基坑开挖深度)左右。

d. 地下管线的最大沉降值随地基土基床系数 K_v 增加而减小的，但当 K_v 增大到一定程度后(本例 $K_v=1.2\times10^7\text{ N/m}^2$)，地下管线的最大沉降增加趋势趋于平稳，即 K_v 的增加对管线沉降的影响已逐渐减小。

参考文献:

[1] 李大勇, 张土乔, 龚晓南. 深基坑开挖引起临近地下管线的位移分析[J]. *工业建筑*, 1999, 29(11): 36–41.

[2] ROBOSKI J, FINNO R J. Distributions of ground movements parallel to deep excavation in clay[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2006, 43(1): 43–58.

[3] HUANG M S, ZHANG C R, LI Z. A simplified analysis method for the influence of tunneling on grouped piles[J].

Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(4): 410–422.

[4] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 856–877.

[5] 李大勇, 吕爱钟, 曾庆军. 内撑式基坑工程周围地下管线的性状分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(4): 682–687.

[6] 张陈蓉, 俞剑, 黄茂松. 基坑开挖对邻近地下管线影响的变形控制标准[J]. *岩土力学*, 2012, 33(7): 2027–2034.

[7] 刘红岩, 李厚恩, 黄好诗, 等. 基于实测地表位移的基坑开挖引起临近地下管线位移的计算[J]. *工业建筑*, 2011, 41(10): 72–74, 94.

[8] 蔡建鹏, 黄茂松, 钱建固, 等. 基坑开挖对邻近地下管线影响分析的 DCFEM 法[J]. *地下空间与工程学报*, 2010, 6(1): 120–124.

[9] 李大勇, 龚晓南. 软土地基深基坑工程邻近柔性接口地下管线的性状分析[J]. *土木工程学报*, 2003, 36(2): 77–80.

[10] 张陈蓉, 蔡建鹏, 黄茂松. 基坑开挖对邻近埋管的影响分析[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(S2): 154–157.

[11] VESIC A B. Bending of beams resting on isotropic elastic solid[J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1961, 87(2): 35–54.

[12] 俞剑, 张陈蓉, 黄茂松. 被动状态下埋管的地基模量[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(1): 123–132.

[13] 陈锦剑, 范巍, 王建华. 深基坑坑外降水引起土体沉降的有限元分析[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(S1): 1346–1349.

[14] 刘念武, 龚晓南, 楼春晖. 软土地区基坑开挖对周边设施的变形特性影响[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2014, 48(7): 1141–1147.

(编辑: 董 伟)