

# 深基坑开挖对邻近埋管影响分析

杜金龙<sup>1, 2</sup>, 杨敏<sup>1</sup>

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075)

**摘要:** 为建立深基坑开挖对邻近埋管影响的评估方法, 采用 FLAC<sup>3D</sup> 分析基坑开挖对邻近不同管径管线的影响。计算结果表明, 管径大小对管、土相互作用影响很大; 当管径约小于 400 mm 时, 管线基本与土体具有相同的位移; 管径大于 400 mm 时, 应考虑管-土相互作用; 此外, 管线最大曲率、转角、最大应力和弯矩均发生在基坑端角部 20% 开挖长度的范围内。在数值分析的基础上, 给出小管径管线变形受力计算的简化分析方法。

**关键词:** 桩基工程; 深基坑; 管线; 位移分布模式; 管-土相互作用

**中图分类号:** TU 473.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2009)增 1-3015-06

## INFLUENCE ANALYSIS OF EXCAVATION OF DEEP PIT ON ADJACENT BURIED PIPELINES

DU Jinlong<sup>1, 2</sup>, YANG Min<sup>1</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China)

**Abstract:** In order to study the evaluation method of influence of deep excavation on adjacent buried utilities the influence of excavation on adjacent pipelines with varied diameters is analyzed by FLAC<sup>3D</sup>. The results indicate that pipeline diameter is important to the interaction between pipeline and soil; When pipeline diameter is less than 400 mm, the pipelines have the same displacement as surrounding soil; when the pipeline diameter is larger than 400 mm, the interaction between pipelines and soil should be taken into account. Furthermore, the maximum value of curvature, angle of rotation, stress and moment of flexure of pipeline all appear at the corner of pit with 20% excavation length. Based on the numeral analysis, a simplified method for calculating deformation and internal force of pipelines with small diameter and the evaluation grade of pipeline safety are put forward.

**Key words:** pile foundations; deep pit; pipeline; displacement distribution mode; pipeline-soil interaction

## 1 引言

随着城市化进程的发展, 越来越多的深基坑工程出现在城市密集区, 不可避免对周围地下管线产生影响。开挖对邻近埋管影响的本质内因在于开挖造成的土体位移。土体位移作用在管线上, 一方面

使其产生附加应力, 另一方面使管线发生不均匀沉降。当附加应力较大, 超过了材料的抗拉强度时, 管线将发生断裂从而丧失工作能力。另外, 管线产生的不均匀沉降将使接头转角过大, 当其超过接头转角限值时, 将不能保持封闭状态而发生泄漏造成管线损坏。

基坑开挖对邻近管线的影响已引起工程界的普

**收稿日期:** 2007-12-04; **修回日期:** 2008-03-31

**基金项目:** 高等学校博士学科点专项科研资助项目(20070247004)

**作者简介:** 杜金龙(1976-), 男, 2008 年于同济大学岩土工程专业获博士学位, 现任中南大学讲师, 主要从事深基础与深基坑方面的教学与研究。E-mail: djinlong2005@gmail.com

遍关注。国内唐孟雄和赵锡宏<sup>[1]</sup>首先用回归分析方法求得深基坑围护结构侧向位移函数，并导出围护结构任意剖面位移计算公式，通过地面沉降与围护结构侧向位移之间的关系，可求出地表任意点沉降公式，并推导出地表任意方向的倾斜、曲率变形及曲率半径，最后从管道受力分析，求出允许曲率半径，两者进行比较，估计管道在基坑开挖过程中是否遭受破坏。李佳川和夏明耀<sup>[2]</sup>采用空间八节点非协调等参单元方法，研究了地下连续墙基坑开挖过程中土体沉降沿基坑纵向的分布规律；并引进了沉降传递系数的概念，据此根据地表沉降估算地下管线的变形。刘建航<sup>[3]</sup>提出地下管线按柔性管和刚性管分别进行考虑的两种方法。李大勇和龚晓南<sup>[4]</sup>结合一实例给出柔性管在深基坑开挖过程中的力学性能并与刚性管相应性能进行比较并给出比较结果。

目前随着计算机软硬件技术的发展，通过三维有限元建模，综合考虑基坑开挖，土体位移和管线受力变形的耦合分析成为基坑工程对管线影响的有效方法<sup>[5]</sup>。本文采用 FLAC<sup>3D</sup> 分析了基坑开挖对邻近不同管径管线的影响，在此基础上，提出基于土体位移的基坑开挖对邻近小管径管线影响的简化分析方法。

## 2 基坑开挖对管线影响的数值分析

开挖引起土体位移，很多学者对此进行了分析研究，但绝大多数是针对垂直于围护结构方向(横向)的地表沉降分析<sup>[6-7]</sup>。由于管线埋置在地表下一定深度(一般 1.5~4.5 m)处，且多数情况管线与基坑边平行(纵向)，因此必须对与基坑边平行的纵向方向的土体位移分布性状进行研究。分析土体的变形规律是为了从总体上把握邻近基坑管线的变形性状和规律，对于了解管线和土体相互作用关系，分析管线受力提供依据和参数。

### 2.1 计算模型

为了对沿基坑纵向土体位移及管线力学性状进行研究，需要建立考虑基坑开挖，围护结构以及土体和管线相互作用的三维耦合分析模型。土层为上海典型土层，物理力学参数见表 1。基坑开挖深度为 5 m，边长为 50 m。围护结构采用 0.8 m 厚地下连续墙，深度为 8 m，开挖方式为无支撑明挖法。由于对称，取 1/4 模型分析。计算模型如图 1 所示。

表 1 土层分布及物理力学参数

Table 1 Layers distribution and physico-mechanical parameters of soils

层号	土层	层厚/m	重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	c /kPa	φ /(°)	E /MPa
①	填土	1.20	18.0	10.0	22.5	10.12
② <sub>1</sub>	褐黄色黏土	2.40	18.7	28.0	15.0	27.95
③	粉质黏土	4.00	17.8	14.0	11.5	27.57
④	淤泥质黏土	9.70	16.8	14.0	9.5	29.26
⑤ <sub>1,1</sub>	灰色黏土	2.30	17.6	15.0	11.0	41.84
⑤ <sub>2</sub>	黏质粉土	10.90	18.1	12.0	21.5	55.04
⑤ <sub>3</sub>	粉质黏土	5.10	17.9	15.0	16.5	45.00
⑦ <sub>1</sub>	砂质粉土	14.70	18.3	9.0	27.5	70.72

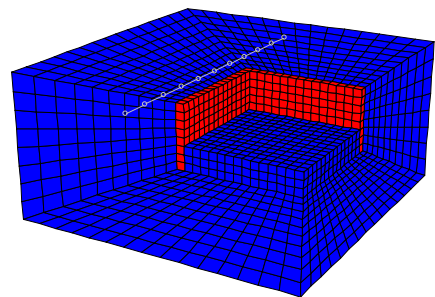


图 1 三维模型图

Fig.1 Three-dimensional model

根据工程经验和有限元计算结果，为了减小边界效应影响，基坑开挖影响宽度约为基坑开挖深度的 3~5 倍，影响深度约为开挖深度的 2~4 倍。因此计算域深度方向取 30 m，宽度取 50 m。两侧边界采用水平铰支约束，下端边界采用固支约束。土体采用六面体理想弹塑性实体单元，围护墙体采用线弹性实体单元。墙、土之间相互作用通过接触面单元实现，符合 Mohr-Column 屈服准则。

管线为球墨铸铁管，埋置深度为地表下 2.5 m，位于墙后 5 m 的位置并与围护墙平行。为了满足管线-土体相互作用相当以及抵抗侧向变形能力相当的原则，模拟中将管线按等刚度和等界面周长原则 ( $E_{eq}I_{eq} = EI$ ,  $D_{eq} = D$ ) 简化为实心梁杆单元，因而没有考虑管道内部压力的影响。管线和周围土体的相互作用通过设置单元界面参数来实现，根据朱碧堂<sup>[8]</sup>的研究，土体中弹性地基梁界面的切向弹簧刚度  $k_s = 0.77E_s$ ，法向弹簧刚度  $k_n = 1.15E_s$ ， $E_s$  为土体弹性模量。界面符合 Mohr-Column 屈服准则，黏聚力  $c' = (1/2 \sim 2/3)c$ ，内摩擦角满足： $\tan\phi' = (1/3 \sim 2/3)\tan\phi$ 。

### 2.2 材料本构关系和计算参数

土体采用以莫尔-库仑屈服条件为破坏准则的

理想弹塑性模型, 采用非关联流动法则, 根据多函数包线屈服面确定塑性应变的方法可得到相应的弹塑性物理矩阵<sup>[9]</sup>。计算参数有弹性模量  $E$ , 泊松比  $\mu$ , 黏聚力  $c$ , 内摩擦角  $\varphi$  和剪胀角  $\psi$ 。各参量取值见表 1。需要说明的是, 除了超固结土层外, 软黏土常常表现出较小的剪胀性, 即  $\psi \approx 0$ 。对于砂土和水泥土加固体则近似采用下式:

$$\psi = \varphi - 30^\circ \quad (1)$$

当  $\psi \leq 0$  时, 取  $\psi = 0$ 。另外, 取弹性模量  $E = (2.5 \sim 3.5)E_{s(1-2)}$ <sup>[10]</sup>, 考虑到基坑开挖卸荷, 计算时弹性模量采用卸荷模量。U. Kano 等<sup>[11]</sup>通过旁压仪的反复加卸载表明, 黏性土体卸荷模量为初始加载模量的 2~3 倍。同时考虑土体部分固结效应引起土体刚度和强度的增长效应, 卸载时软土取 3 倍加载模量, 硬土取 2 倍。对于砂土, 取 1~2 倍弹性模量。

地下连续墙采用线弹性模型。考虑地连墙的分幅连接以及施工质量对构件抵抗变形能力的弱化效应, 其弹性模量折减后取  $2.3 \times 10^8$  kPa, 泊松比为 0.17。管线弹性模量取 160 GPa。计算时不同管径的等效弹性模量  $E_{eq}$  和等效界面周长  $D_{eq}$  见表 2。

表 2 管线参数

Table 2 Pipeline parameters

管径 $D$ /mm	$D_{eq}$ /mm	$E_{eq}$ /GPa	管径 $D$ /mm	$D_{eq}$ /mm	$E_{eq}$ /GPa
75	75	38.6	300	300	18.4
100	100	37.7	400	400	15.4
150	150	31.5	500	500	13.6
200	200	24.1	-	-	-

### 2.3 数值计算结果分析

图 2, 3 分别为基坑开挖深度为 -5 m 时, 计算得到的不同管径管线侧向位移和竖向位移, 同时也附带了同位置处土体变形值。图中横坐标原点为基坑挡墙中间部位。可以看出, 所有管线位移均小于

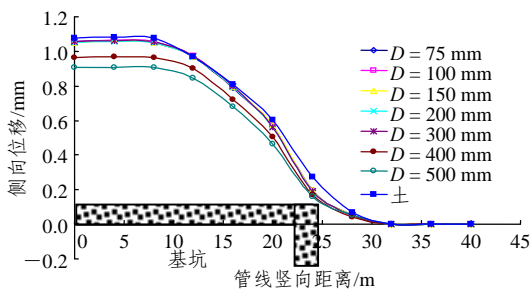


图 2 不同管线侧向位移比较

Fig.2 Comparison curves of horizontal displacement with varied pipelines

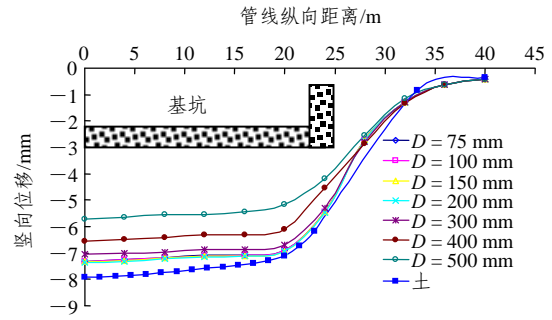


图 3 不同管线竖向位移比较

Fig.3 Comparison curves of vertical displacement with varied pipelines

土体位移。当  $D < 400$  mm 时, 管线位移与土体位移非常接近, 最大差值不超过 1 mm。这说明, 当  $D < 400$  mm 时, 其变形几乎与土体变形相同, 而  $D > 400$  mm 时, 二者间出现较大的位移差。这是由于管径较大时, 管线 - 土体相互作用加强, 特别是管线刚度增大, 对土体位移产生抑制作用, 使得二者间出现较大的位移差。

图 4 可以清楚的看出随着管径增大, 同位置处土体位移与管线位移的比值逐渐增大。如果以 10% 作为容差, 由图 4 说明对于管线侧向位移, 直径小于 400 mm 时, 认为管线与土体共同侧向运动, 而对于管线竖向位移, 直径小于 300 mm 时, 认为管线与土体有相同的竖向位移。统一将 400 mm 作为管线的界限管径, 即当管径小于 400 mm 时, 管线与土体有相同的变形, 可以不考虑管线 - 土体相互作用, 而对于管径大于 400 mm 的管线, 位移要明显小于土体位移, 计算时应考虑管线 - 土体相互作用。根据上述, 实际工程中分析管线变形时, 对于小管径管线变形可以直接采用土体的变形值进行分析。

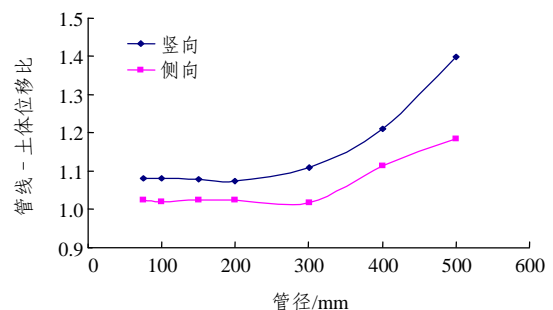


图 4 不同管径下管线 - 土体位移比

Fig.4 Change curves of soil- pipelines displacement ratios with varied pipelines diameters

图 5 为管线竖向弯矩的变化示意图。可以看出, 随着管径的增加, 弯矩显著增大, 但基本变化趋势

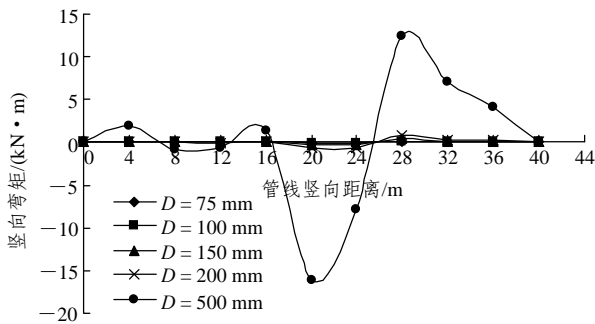


图5 不同管径竖向弯矩变化

Fig.5 Change curves of vertical bending moment with varied pipeline diameters

是相同的。基坑中部范围内管线弯矩较小，角部附近弯矩明显增大。这是由于中间部分土体位移约束较小，产生的位移较平缓(见图 2, 3)，而角部附近，由于开挖的空间效应和角部效应，土体位移受到较大的抑制作用，因而产生较大的位移差，作用在管线上后，就表现出弯矩显著增大的现象。因此，管线的最大弯曲应力和转角将发生在基坑端角部位，本例中位于角部±20%开挖长度范围。在实际管线分析中，应对该部分区域重点监测并加以保护。图 6, 7 对比了各管线的最大位移和最大弯矩与 100 mm 管径比的变化关系，图 6 中纵坐标表示最大弯矩比的对数，用  $M_e$  表示，从中可以进一步看出大管径与小管径受力变形的差异。

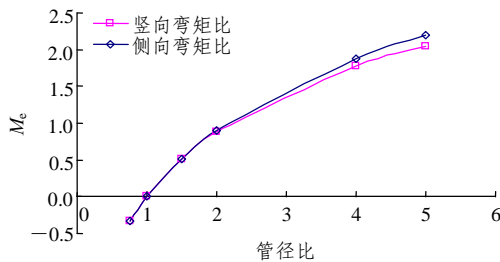


图6 不同管径最大弯矩变化

Fig.6 Change curves of maximum bending moment with varied pipeline diameters

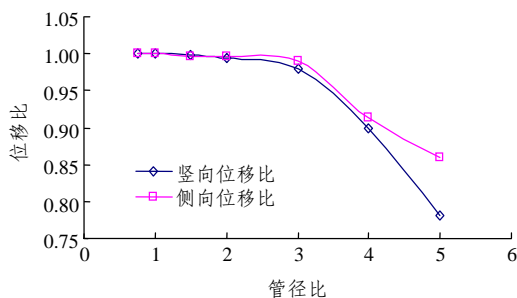


图7 不同管径最大位移对比

Fig.7 Comparison curves of maximum displacement with varied pipeline diameters

上述分析结果是在基坑开挖深度为-5 m 时得到的，此时，开挖深度大于管线埋置深度。为了考查开挖深度对计算结果的影响。计算开挖深度分别为-8 和-12 m 时不同管径管线的位移，并与同位置处土体位移进行了对比，如图 8 所示。由图 8 可知，不同开挖深度下，管线与土体位移比随管径的变化具有较好的一致性。即当管径小于 400 mm 时，可以认为管线与土体具有相同的位移量。

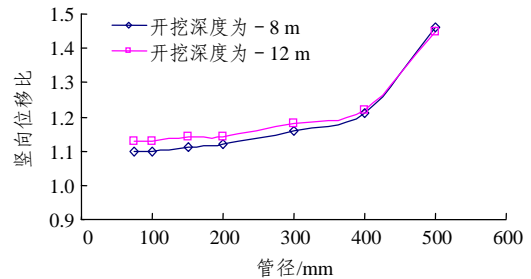


图8 不同管径管线 - 土体竖向位移比

Fig.8 Ratio of displacement of varied pipelines to soil with varied pipelines diameters

### 3 管线位移分布模式

工程上常用的小口径管线的变形与土体变形相同，只要知道土体纵向方向的变形就可以确定管线的变形。J. Roboski 和 R. J. Finno<sup>[12]</sup>提出一种预测基坑开挖引起周围土体沿平行于围护墙方向(即基坑纵向)水平和竖向位移的方法，但该方法要求土体位移不受抑制作用。通过实测数据反分析研究后，土体位移分布可以直接利用下式计算：

$$\delta(x) = \delta_{\max} \left[ 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{2.8\{x + L[0.015 + 0.035 \ln(H_e / L)]\}}{0.5L - L[0.015 + 0.035 \ln(H_e / L)]} \right) \right] \quad (2)$$

式中： $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为误差补函数； $\delta(x)$ 为沿基坑纵向距墙角距离为  $x$  的点的水平或竖向位移； $\delta_{\max}$  为最大水平或竖向位移，通过实测或数值模拟得到。各参数具体物理意义见 J. Roboski 和 R. J. Finno<sup>[12]</sup>的研究成果。

最大变形曲率为

$$C = \frac{2.8\delta_{\max}}{0.5L[0.97 + 0.069 \ln(H_e / L)]\sqrt{\pi}} \quad (3)$$

从式(2)可以看出，开挖引起的基坑纵向土体位移只与最大变形值和基坑开挖长度和深度有关。因此，对于确定的基坑，只要知道了开挖深度和土体最大变形(竖向位移和侧向位移)则可以得到土体的

位移分布曲线。

图 9 比较了算例中数值模拟得到的土体竖向位移值和用误差补函数拟合得到的土体竖向位移, 二者具有较好的一致性, 最大差值在 1.5 mm 左右, 满足一般工程误差要求。说明用误差补函数拟合土体位移具有足够精度, 验证了其合理性。

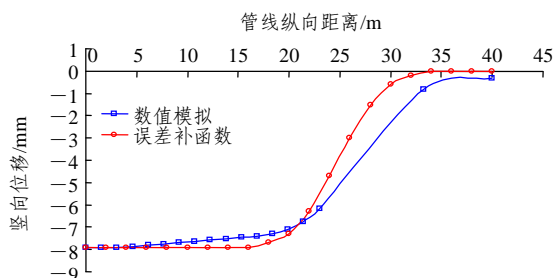


图 9 数值模拟和误差补函数拟合土体竖向位移比较  
Fig.9 Comparison of soil vertical displacement between numerical simulation and  $erfc(\cdot)$  method

### 4 管线位移分布模式

根据前面的分析, 可以认为工程常用小管径管线的变形与相应位置土体变形相同。因此可以利用土体变形曲线(通过数值模拟, 或误差补函数拟合得到)来分析管线受力。将管线视为水平放置的梁, 满足 Bernoulli-Navier 弯曲梁理论。在开挖卸荷作用下具有与表面土体相同的位移曲线。根据弹性力学梁板理论, 管线的弯矩, 截面正应力和应变可用下列公式表示:

$$M_z = EIW_z'' \quad M_x = EIW_x'' \quad (4)$$

$$\sigma = \pm Er(W_z'' \sin \theta + W_x'' \cos \theta) \quad (5)$$

$$\varepsilon = \pm r(W_z'' \sin \theta + W_x'' \cos \theta) \quad (6)$$

式中:  $W$  为管线的位移曲线;  $r$  为管线半径;  $\theta$  为主平面方向角, 可通过下式确定:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{W_z''}{W_x''} \right)$$

上述方程可通过单元离散后应用有限差分法或有限单元法进行求解。

对于刚性管, M. Kristin 等<sup>[13]</sup>利用矢量力学给出了接头处的转角表达式:

$$\alpha_j = \cos^{-1} \frac{\rho_{ji}\rho_{kj} + L_{ji}L_{kj} + \varepsilon_{ji}\varepsilon_{kj}}{\sqrt{\rho_{ji}^2 + L_{ji}^2 + \varepsilon_{ji}^2} \sqrt{\rho_{kj}^2 + L_{kj}^2 + \varepsilon_{kj}^2}} \quad (7)$$

式中:  $L_{ij}$  为管段长度,  $\rho_{ij}$  为管段两端的竖向位移差,  $\varepsilon_{ij}$  为管段两端的侧向位移差。

根据上述简化分析方法, 用图 9 所示的拟合误差补函数位移曲线计算节 2 的算例, 并与数值模拟结果进行对比。

图 10 给出了 2 种方法计算得到的  $\phi 200$  mm 铸铁管(管段长度取 4 m)的竖向弯矩, 由图 10 可以看出, 两者具有较好的相似性, 但数值计算结果要大于简化方法, 可能是由于数值模拟考虑了管土相互作用的结果。图 11~13 分别为计算得到的沿管线长度管线附加弯曲应力, 应变和转角, 三者的最大值

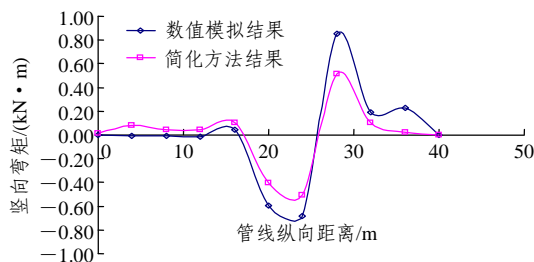


图 10 数值模拟与简化方法结果对比  
Fig.10 Comparison of results between numerical simulation and simplified method

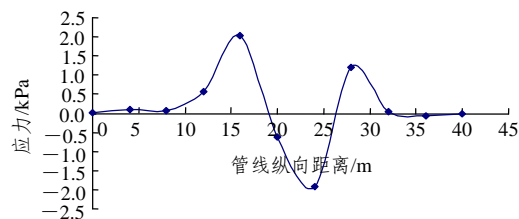


图 11 洞管线长度的应力  
Fig.11 Pipeline stress varying with pipeline depths

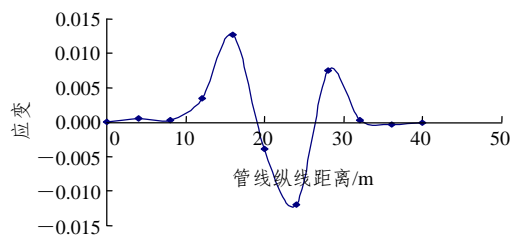


图 12 沿管线长度的应变  
Fig.12 Pipeline strain varying with pipeline depths

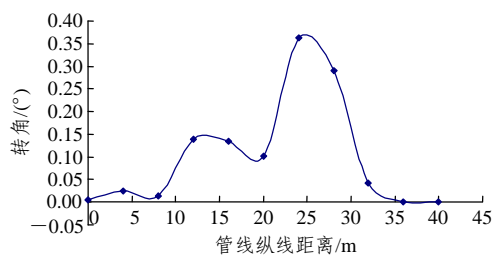


图 13 沿管线长度的转角  
Fig.13 Pipeline rotation varying with pipeline depths

分别为 2.03 kPa, 0.012 和 0.36°, 均小于 M. Kristin 等<sup>[13]</sup>给出的球墨铸铁管的极限破坏值, 通过式(2)计算得到的管线最大变形曲率为  $1.73 \times 10^{-3}$ , 表明该管线是安全的。另外最大值均发生在基坑端角附近, 与前文的分析结果相符。

## 5 结 论

(1) 计算分析表明, 管径大小对管、土相互作用影响很大。当管径约小于 400 mm 时, 管线基本与土体具有相同的位移, 因此可以利用土体位移计算管线的弯曲和受力, 并对管线安全性进行评估; 管径大于 400 mm 时, 计算中应考虑管、土相互作用。

(2) 对于平行基坑边的管线, 其最大曲率、转角、最大应力和弯矩均发生在基坑端角部 20% 开挖长度的范围内, 因此应对该区域管线加以特别保护。

(3) 基坑纵向土体位移曲线可以用误差补函数拟合, 验证了其正确性。根据拟合得到的土体位移曲线可以对一般小管径管线进行安全评估。

### 参考文献(References):

- [1] 唐孟雄, 赵锡宏. 深基坑周围地表任意点移动变形计算及应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1996, 24(3): 2 - 4.(TANG Mengxiong, ZHAO Xihong. Ground settlement and deformation calculation and application in deep excavation[J]. Journal of Tongji University(Science and Technology), 1996, 24(3): 2 - 4.(in Chinese))
- [2] 李佳川, 夏明耀. 地下连续墙深基坑开挖及纵向地下管线保护[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1995, 23(5): 499 - 504.(LI Jiachuan, XIA Mingyao. Protection of longitudinal underground pipe lines during the diaphragm wall deep excavation[J]. Journal of Tongji University(Science and Technology), 1995, 23(5): 499 - 504.(in Chinese))
- [3] 刘建航. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.(LIU Jianhang. Pit engineering manual[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.(in Chinese))
- [4] 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.(LI Dayong, GONG Xiaonan. Response of joined ductile pipeline to deep excavation in soft soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(2): 77 - 80.(in Chinese))
- [5] 李大勇, 龚晓南, 张土乔. 软土地基基坑周围地下管线保护措施的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(6): 736 - 740.(LI Dayong, GONG Xiaonan, ZHANG Tuqiao. Numerical simulation of the buried pipelines protection adjacent to deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(6): 736 - 740.(in Chinese))
- [6] CLOUGH G W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of in-situ walls[C]// Design and Performance of Earth Retaining Structures, Proceedings of a Specialty Conference at Cornell University. New York: ASCE, 1990: 439 - 470.
- [7] HSIEH P G, OU C Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(6): 1 004 - 1 017.
- [8] 朱碧堂. 土体的极限抗力与侧向受荷桩性状[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2005.(ZHU Bitang. Limiting force profile and response of laterally loaded piles[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 2005.(in Chinese))
- [9] KOITER R L. General theorems for elastic-plastic solids[M]. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1960.
- [10] 杨 敏, 赵锡宏. 分层土中的单桩分析法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1992, 20(4): 421 - 428.(YANG Min, ZHAO Xihong. An approach for a single pile in layered soil[J]. Journal of Tongji University(Science and Technology), 1992, 20(4): 421 - 428.(in Chinese))
- [11] KANO U, TORU Y, TOMIO T. Stability of slurry trench excavation in soft clay grounds stability[C]// Doboku Gakkai Rombun-Hokokushu: Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers. [S.l.]: [s.n.], 1973: 37 - 45.
- [12] ROBOSKI J, FINNO R J. Distributions of ground movements parallel to deep excavations in clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(1): 43 - 58.
- [13] KRISTIN M, RICHARD J F, EDWIN C R. Analysis of effects of deep braced excavations on adjacent buried utilities[R]. Evanston: Northwestern University, 2003.