

文章编号: 1000-4750(2005)04-0079-05

深基坑开挖引起邻近管线破坏分析

*段绍伟¹, 沈蒲生²

(1. 湖南科技大学土木工程学院, 湘潭 411201; 2. 湖南大学土木工程学院, 长沙 410082)

摘 要: 利用非线性有限元方法计算了深基坑开挖引起的地表沉降量与墙体侧向挠度。采用有厚度的接触面单元模拟土体与支护墙体、土体与地下管线的相互作用, 分析了土体与地下管线接触面的应力应变关系, 并建立了接触面上的应力应变方程。探讨了地表沉降、墙体侧向挠度对地下管线拉裂破坏的影响。算例分析表明, 深基坑开挖对邻近管线破坏极大, 因而提出了深基坑支护结构设计时应采取的具体措施。

关键词: 深基坑; 地下管线; 有限元; 接触面单元; 地表沉降

中图分类号: TU433 文献标识码: A

ANALYSIS OF NEARBY PIPELINE DAMAGE INDUCED BY DEEP EXCAVATION

*DUAN Shao-wei¹, SHEN Pu-sheng²

(1. Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. Institute of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The ground surface settlement and lateral deflection of retaining wall for deep excavations are calculated using nonlinear finite element method. The interaction of soils and retaining walls, soils and buried pipelines are simulated by an interface element with thickness. The stress and strain equations for the interface are established. The effect of ground settlement and lateral deflection on damage of buried pipelines is studied. Examples show that the damage effect of deep excavations is great, and a method is suggested to resolve the problem in design of retaining structures.

Key words: deep foundation pit; buried pipeline; finite element method; interface element; ground settlement

随着国民经济的飞速发展, 高层、超高层建筑层出不穷, 与之对应的深基坑工程也日益增多。由于深基坑工程大都在城市中进行, 引起的工程事故层出不穷, 如邻近建筑物倾斜、路面开裂, 地下管线破裂等。工程事故的不断出现, 不仅带来了巨大的经济损失, 且造成了不良的社会影响。近年来, 国内外深基坑开挖引起的环境破坏问题研究很少, 在文献[1]中, 作者已对深基坑开挖引起的路面开裂问题进行了研究, 本文针对深基坑开挖引起的地下

管线破裂问题进行了详细探讨。

基坑开挖打破了基坑土体原有的应力平衡, 使得支护结构侧移, 土体也随之发生侧移, 必然导致地下管线发生向基坑内方向的移动, 移动的距离称为水平位移; 同时, 深基坑开挖将引起邻近路面下沉, 导致地下管线竖向移动, 移动的距离称为竖向位移。当竖向位移与水平位移达到地下管线变形的极限值时, 将会引起地下管线的竖向与水平拉裂破坏^[2,3,4]。为此, 本文采用有厚度的接触面单元模拟

收稿日期: 2003-07-14; 修改日期: 2003-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10171029), 湖南省自然科学基金资助项目(00JJY2055)

作者简介: *段绍伟(1967), 男, 湘潭人, 副教授, 博士生, 主要从事深基坑工程等方面工作(E-mail: duanshaowei8@sohu.com);

沈蒲生(1942), 男, 长沙人, 教授, 博士生导师, 主要从事结构工程等方面工作。

土体与支护墙体、土体与地下管线的相互作用^[5], 通过非线性有限元方法, 研究了土与地下管线接触面应力应变关系, 分析了深基坑开挖对地下管线拉裂破坏的影响。文章的目的是通过邻近管线破坏分析, 为深基坑支护结构设计提供依据。

1 土体性质及有限元模型

设基坑的平面形状为矩形, 基坑开挖深度为 H , 墙体插入深度为 D ^[6]。基坑由排桩支护, 长度为 L , 支护桩经等刚度替代后, 墙体厚度为 t 。土体模型为: 粘性土用修正的剑桥模型^[7]来模拟, 非粘性土用邓肯-张模型^[8]来模拟; 对于支护结构, 采用线弹性模型计算, 对于土与支护结构的共同作用, 采用有厚度的接触面单元^[5]来模拟两者的相互错动。土体区域采用平面 8 节点四边形等参单元进行划分。

表 1 邓肯-张模型参数

Table 1 Parameters of Duncan-Chang model

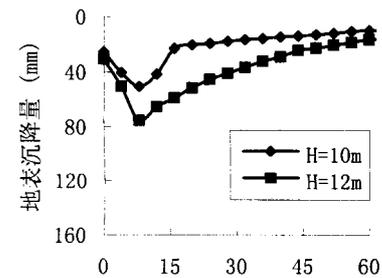
参数	符号	粉土(或填土)
破坏比	R_f	0.9
主加载时的刚度模量数	K	100
刚度模量指数	n	1.0
卸荷-再加荷的刚度模量数	K_{ur}	130
刚度模量指数	m	0.85

表 2 修正剑桥模型参数

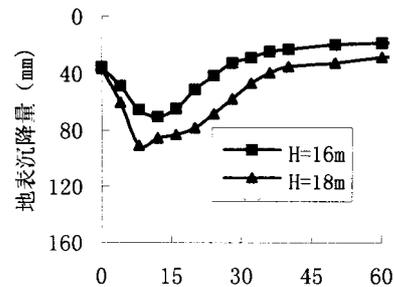
Table 2 Parameters of modified cam-clay model

参数	符号	粘性土
临界状态线的斜率	M	0.76
回弹指数		0.08
压缩指数	k	0.03
初始孔隙比	e_0	1.3
泊松比		0.3

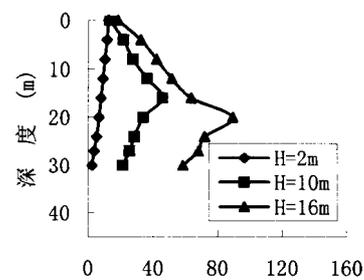
为了分析基坑开挖对地表沉降的影响, 采用一些数据进行有限元分析: 设地基上层土由粉土组成, 厚 2m, $\gamma=20\text{kN/m}^3$, $C=0^\circ$, $\Phi=32^\circ$, 下层土为粘土, 厚 40m, $\gamma=18\text{kN/m}^3$, $C=15\text{kN/m}^2$, $\Phi=20^\circ$, 墙体长度 L 分别为 18m 和 30m, 土体模型参数见表 1 和表 2。由于基坑开挖较快, 地下孔隙水来不及迁移, 土体主要是变形问题, 因此采用总应力不排水分析程序进行模拟计算。基坑开挖深度对地表沉降和墙体侧向挠度的有限元计算结果见图 1。



(a) 离开墙体背面距离(m)($L=18\text{m}$)



(b) 离开墙体背面距离(m) ($L=30\text{m}$)



(c) 墙体侧向挠度(mm)($L=30\text{m}$)

图 1 基坑开挖深度对地表沉降和墙体侧向挠度的影响

Fig.1 The effect of excavation on ground sinking depth and lateral deflection of wall

由图 1(a)与(b)可见, 随着开挖深度的增加, 地表沉降明显增大, 地表沉降的沉降槽(沉降曲线上的最大值位置)不是发生在紧靠支护结构的位置, 而是离支护结构有一定的距离, 一般为 $0.3H\sim H$ 。地表沉降曲线与沉降量大小密切相关, 沉降量小时, 沉降槽分布在支护结构附近, 沉降量大时, 沉降槽远离支护结构分布。沉降影响区域与开挖深度有关, 一般大于 $2H$ 。将沉降区域分为两部分, 沉降槽对应的一定区域为有效沉降区域, 其余部分为非有效沉降影响区域, 有效沉降影响区域的宽度为沉降宽度。图 1 所示的沉降宽度小于 $2H$, 而沉降槽位于沉降宽度中间位置。图 1(c)反映了深基坑开挖对墙体侧向挠度的影响。对于同一长度的墙体, 随着开挖深度的增加, 墙体最大侧向挠度值也在不断增加, 但通过计算来看, 当挠度超过某一峰值后, 随即迅速减小^[9]。

2 深基坑开挖引起地下管线拉裂破坏研究

2.1 土体与地下管线接触面应力应变关系

殷宗泽在文献[5]中以土与混凝土墙接触面的错动为例，将接触面的破坏分为三类：(1) 混凝土墙面较光滑，滑动面沿墙面；(2) 墙面粗糙，滑动面发生在靠墙的土体中；(3) 滑动破坏不是沿一个面，而是许多面，形成剪切破坏带。不管哪一种破坏形式，都在与墙距离不大的范围内产生了较大的相对位移，将混凝土墙面与附近一定范围内土体连在一起，用一种有厚度的接触面单元来模拟。

土与地下管线接触面的破坏也可以分成上述三类情况，考虑到深基坑开挖主要引起地下管线的竖向应变与水平应变，将土与地下管线接触面的破坏分为竖向拉裂破坏和水平拉裂破坏，见图 2 所示。

对于划入有厚度接触面单元的接触面和其附近的土体而言，变形分为二部分：一是土体的基本变形，以 $\{\varepsilon\}'$ 表示，不管破坏与否都存在；二是拉裂破坏变形，以 $\{\varepsilon\}''$ 表示，总的变形为

$$\{\Delta\varepsilon\} = \{\Delta\varepsilon\}' + \{\Delta\varepsilon\}''$$

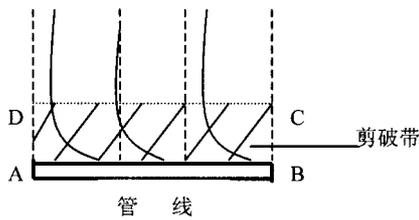


图 2 地下管线与土体接触面的破坏形式

Fig.2 The damage of buried pipeline and soil interface

基本变形采用的应力应变模型与支护结构附近土体相同，采用 Duncan 模型或修正的剑桥模型，其应力应变方程为

$$\begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_t \\ \Delta\varepsilon_n \\ \Delta r_m \end{Bmatrix}' = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}' \begin{Bmatrix} \Delta\sigma_t \\ \Delta\sigma_n \\ \Delta\tau_m \end{Bmatrix} = [C]'\{\Delta\sigma\} \quad (1)$$

式中，n 表示竖向，t 表示水平方向。

破坏变形有三种，一种是竖向拉裂破坏，一种是水平拉裂破坏，另外一种为剪切破坏。其应力应变方程表示为

$$\begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_t \\ \Delta\varepsilon_n \\ \Delta r_m \end{Bmatrix}'' = \begin{bmatrix} \frac{1}{E''} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{E''} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}'' \begin{Bmatrix} \Delta\sigma_t \\ \Delta\sigma_n \\ \Delta\tau_m \end{Bmatrix} = [C]''\{\Delta\sigma\} \quad (2)$$

参数 E'' 用来反映拉裂产生的变形。文献[5]不考虑水平方向的应变，即 $\Delta\varepsilon_t'' = 0$ ，而 $\Delta\gamma_m = 1/G'' \cdot \tau_m$ ；式(2)则不同，由于剪切变形较小，剪切变形不予考虑，即 $\Delta\gamma_m = 0$ ，而水平方向的应变为 $\Delta\varepsilon_t'' = 1/E'' \cdot \Delta\sigma_t$ 。

接触面上的应力应变方程为

$$\{\Delta\varepsilon\} = \{\Delta\varepsilon\}' + \{\Delta\varepsilon\}'' = \begin{bmatrix} C_{11} + \frac{1}{E''} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} + \frac{1}{E''} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\sigma_t \\ \Delta\sigma_n \\ \Delta\tau_m \end{Bmatrix} = [C]\{\Delta\sigma\} \quad (3)$$

2.2 深基坑开挖引起地下管线拉裂破坏有限元分析

对于第一节所描述的土体参数与模型，设有一地下管线距支护墙体 10 米，距地表 3 米，地下管线位于有效地表沉降区域内。地下管线以线弹性模型来模拟，深基坑的计算范围在水平方向自基坑壁内侧到周围地表 60m，深度方向自地表以下 30m。地下管线的竖向位移和水平位移有限元计算结果见图 3 与图 4。

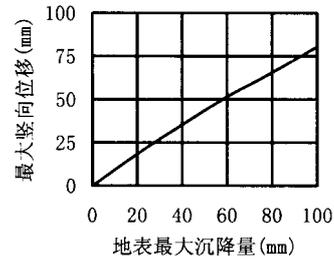


图 3 地表最大沉降量与地下管线最大竖向位移的关系

Fig.3 Relation of maximum ground sinking depth and vertical displacement of buried pipeline

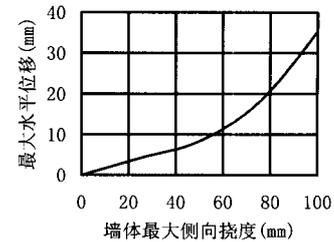


图 4 墙体最大侧向挠度与地下管线最大水平位移的关系

Fig.4 Maximum lateral deflection of wall versus horizontal displacement of buried pipeline

由图 3 可见，随着地表最大沉降量的增大，地下管线的竖向位移近似线性增加。因此，地表沉降量对地下管线竖向位移影响巨大，当竖向位移值超过地下管线变形允许值时，如市政部门规定允许值为 30mm，地下管线将产生竖向拉裂破坏。通过对

图 3 的分析,可以由经验法求得地表最大沉降量与地下管线最大竖向位移的关系为

$$\delta_w = 1.25\delta_v \quad (4)$$

其中: δ_w 为地表最大沉降量, δ_v 为地下管线最大竖向位移

对于实际深基坑工程,若能得到类似(4)式的经验公式,根据地下管线竖向位移限值,就可以计算地表最大沉降量的限值,从而进行基坑开挖控制。图 4 中地下管线水平位移与墙体最大侧向挠度之间的关系呈非线性增加,墙体最大侧向挠度值小于 80mm 时,水平位移增大较慢,当墙体最大侧向挠度值大于 80mm 时,水平位移增大较快,这说明地下管线已失去抵抗水平变形的能力,水平拉裂破坏即将发生。同样通过对图 4 的分析,可以由经验法求得墙体最大侧向挠度与地下管线最大水平位移

的关系为

$$\delta_d = 6.8\delta_h - 0.15\delta_h^2, \quad \delta_h \leq 20\text{mm} \quad (5)$$

其中: δ_d 为墙体最大侧向挠度, δ_h 为地下管线最大水平位移

式(5)的经验公式与式(4)一样,根据地下管线水平位移限值,就可以计算墙体最大侧向挠度的限值。

3 算例

某大厦位于市中心两条主干道交汇的三角地带,东、西、南三面紧邻城市干道。该大厦地下 3 层,地上 23 层,建筑面积 40000m²,屋顶标高 90 米。采用钢筋混凝土框剪结构,人工挖孔灌注桩基础。

表 3 地基土层参数

Table 3 Properties of soil body

土层名称	厚度/m	重度/(kN/m ³)	C/kPa	/($^{\circ}$)	M		k	e_0		R_f	K	n	K_{ur}	m
杂填土	1.8													
粉质粘土	3.6	19.3	25.8	13.7	1.18	0.09	0.03	1.42	0.3					
残质粉质粘土	4.8	16.5	14.5	13.8	1.02	0.13	0.03	1.48	0.3					
泥质砂岩层	12.0	17.5	8.5	22.0						0.85	167	0.5	235	0.65

路基距基坑距离为 8~15 米,路基旁有一条煤气管道和一条自来水管,距基坑桩分别为 12 米和 15 米。基坑开挖深度为 15.7m,基坑周长 192m,原设计采用锚杆桩支护,因造价高,改为悬臂桩支护,悬臂长度 10m,受力筋为 10 25,地基岩土参数见表 3。

基坑开挖至 13.7 米时,距基坑南面 8 米处的混凝土路面开裂,裂缝宽度达 20mm。2 天之内,距悬臂桩 12m 处的地下煤气管道(埋深 1.5m)发生破裂,引起煤气泄漏,产生了严重的后果。

采用本文非线性有限元进行计算,深基坑开挖引起地表沉降的影响区域为 20m,最大沉降量为 140mm,煤气管道位于有效沉降影响区域内。有限元计算的深基坑开挖引起煤气管道的最大竖向位移和最大水平位移分别为 45mm 和 25mm,而煤气管道竖向位移与水平位移允许值小于 15mm^[10],煤气管道破裂是必然要发生的。由此可见,采用悬臂桩支护,其强度与刚度不能满足周围设施变形的要求。

4 结论

采用非线性有限元方法,研究了深基坑开挖对邻近地下管线破裂的影响。研究表明,当地表最大沉降量达到一定值时,将会引起地下管线的竖向拉裂破坏;当支护墙体侧向挠度达到一定值时,将会引起地下管线的水平拉裂破坏,为此,建议工程技术人员在深基坑支护结构设计时,须采取如下措施,以免造成不必要的损失:

(1) 在支护结构设计时,要了解基坑附近管线的分布情况;

(2) 分析深基坑施工引起的地表沉降量和支护墙体的侧向位移,计算它们所引起的邻近管线的竖向位移与水平位移;

(3) 根据不同的管线类型,其竖向位移与水平位移须在规定的限值内;若超过规定的限值,则需通过改变支护类型、增加锚索道数等方法,减少地表沉降量和降低支护墙体的侧向位移,保证邻近管线位移满足限值要求。

参考文献：

- [1] 段绍伟, 沈蒲生. 深基坑开挖引起混凝土路面断裂分析[J]. 工程力学, 2004, 21(3): 40~43.
Duan Shaowei, Sheng Pusheng. A crack analysis of concrete road with excavation of deep foundation pits [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(3): 40~43. (in Chinese)
- [2] Skempton A W, MacDonald D H. Allowable settlement of buildings [J]. Proc. Institution of Civil Engineer, 1956, 13(6): 19~32.
- [3] Polshin D E, Tokar R A. Maximum allowable nonuniform settlement of structure [J]. Proc. Institution of Civil Engineer, 1957, 5(8): 724~784.
- [4] Hashash Y M A, Whittle A J. Ground movement prediction for deep excavations in soft clay [J]. Geotech Engrg, ASCE, 1996, 122(6): 85~92.
- [5] 殷宗泽, 朱泓, 许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 14~22.
Yin Zongze, Zhu Hong, Xu Guohua. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structural material [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(3): 14~22. (in Chinese)
- [6] 段绍伟, 杜飞, 沈蒲生. 基坑深度、墙体长度、墙体插入深度对高层建筑深基坑开挖变形的影响[J]. 建筑结构, 2002, 32(7): 27~29.
Duan Shaowei, Du Fei, Sheng Pusheng. Effect of the depth of excavation, length and embedded depth of wall on the deformation of excavation of deep foundation pits [J]. Journal of Building Structures, 2002, 32(7): 27~29. (in Chinese)
- [7] 郑颖人, 龚晓南. 岩土塑性力学基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
Zheng Yingren, Gong Xiaonan. Fundamentals of plastic mechanics of soils [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1989. (in Chinese)
- [8] Duncan J M, Chang C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils [J]. J. Soil Mech. And Found. Engrg. Div., ASCE, 1970, 96(5): 1629~1653.
- [9] 杜飞. 高层建筑深基坑开挖数值分析理论及其应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 1998.
Du Fei. Numerical analysis theory and its application of excavations of deep foundation pits for tall buildings [D]. Changsha: Hunan University, 1998. (in Chinese)
- [10] 秦四清. 深基坑工程优化设计[M]. 北京: 地震出版社, 1998.
Qing Siqing. Optimal design for deep foundation engineering [M]. Beijing: Seismological Press, 1998. (in Chinese)

(上接第 78 页)

参考文献：

- [1] M Gu, C C Chang. Increase of critical flutter wind speed of long-span bridges using tuned mass dampers [J]. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 1998, 73: 111~123.
- [2] 顾明, 吴炜. 大跨桥梁颤振控制的试验研究[J]. 同济大学学报, 1996, 24(2): 124~129.
M Gu, Wu Wei. Testing study of flutter control of long-span bridges using tuned mass dampers [J]. Journal of Tongji University. 1996, 24(2): 124~129. (in Chinese)
- [3] J Nobuto, Y Fujino, M Ito. A study on the effectiveness of TMD to suppress a coupled flutter of bridge deck [A]. Proc. Japan Society of Civil Engineering [C]. 1988. 413~416.
- [4] 陈艾荣, 项海帆. 多重调质阻尼器制振性能及对桥梁抖振的控制[J]. 同济大学学报, 1998, 26(2): 125~129.
Chen Airong, Xiang Haifan. Vibration suppression characteristics of multiple tuned mass damper and its application to buffeting control of bridges [J]. Journal of Tongji University. 1998, 26(2): 125~129. (in Chinese)
- [5] Jain A, Jones N P, Scanlan R H. Coupled aeroelastic and aerodynamic response analysis of long-span bridges [J]. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 1996, 60: 69~80.
- [6] Jain A, Jones N P, Scanlan R H. Coupled flutter and buffeting analysis of long-span bridges [J]. J. Struct. Engrg. ASCE., 1996, 122(7): 716~725.
- [7] Agar T J A. Aerodynamic flutter analysis of suspension bridges by a modal technique [J]. Engrg. Struct., 1989, 11: 75~82.
- [8] Ge Y J, Tanaka H. Aerodynamic flutter analysis of cable-supported bridges by multi-mode and full-mode approaches [J]. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 2000, 86: 123~153.
- [9] Katsuchi H, Jones N P, Scanlan R H. Multimode coupled flutter and buffeting analysis of the Akashi-Kaikyo bridge [J]. J. Struct. Engrg. Asce., 1999, 125(1): 60~70.
- [10] Scanlan R H. The action of flexible bridges under wind (I): flutter theory [J]. J. Sound and Vibration, 1978, 60(2): 187~199.