

软土地基深基坑周围地下管线保护措施数值模拟

Numerical simulation of the buried pipelines protection adjacent to deep excavation

李大勇¹, 龚晓南², 张土乔²

(1. 山东科技大学 土木建筑学院, 山东 泰安 271019; 2. 浙江大学 土木系, 浙江 杭州 310027)

摘要: 建立了同时考虑基坑围护结构、土体与地下管线变形耦合作用的三维有限元分析模型, 对地下管线保护措施进行了数值分析, 得出对设计、施工有一定指导意义的结论。

关键词: 深基坑; 地下管线; 数值模拟

中图分类号: TU 473. 2

文献标识码: A

文章编号: 1000- 4548(2001) 06- 0736- 05

作者简介: 李大勇, 男, 1971 年生, 2001 年获浙江大学土木工程学科博士学位, 从事岩土工程的教学与科研工作。

LI Da-yong¹, GONG Xiao-nan², ZHANG Tu-qiao²

(1. Institute of Civil & Architecture Engineering, Shandong University of Science & Technology, Taian 271019, China; 2. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Based on the previous study, the coupled action of the retaining structure, soil and pipeline is considered. All kinds of pipeline protections are analyzed by numerical simulation. The results which are important to guide design and construction, are obtained in this paper.

Key words: deep excavation; buried pipelines; numerical simulation

1 前言*

改革开放以来, 由于经济建设的快速发展, 城市建设规模不断扩大。据统计, 上海高层建筑(14 层以上) 93% 是在 80 年代以后建造的^[1]。这些高层建筑的大量兴建, 带动了深基坑工程的发展, 如上海金茂大厦主楼基坑深度达 19.5 m, 北京京城大厦基坑开挖深度达 23.5 m 等。同时, 由于深基坑工程向着深、大方向发展, 且往往处于建筑物、道路和地下管线等设施的密集区, 从而对其周围环境产生较大的影响, 严重的会导致建筑物倾斜、开裂甚至破坏, 最终无法使用; 道路下沉开裂, 影响车辆交通; 地下管线(给排水管道、煤气管道、电缆管及通讯管等) 严重变形, 引起较大的应力而破坏, 严重影响居民日常生活等等。此外, 由基坑开挖引起邻产的法律纠纷, 已呈上升趋势, 引起人们的高度重视。基坑工程对周围环境的影响是基坑工程的重点和难点课题, 它的一个突出特点是: 仅把基坑工程作为一个孤立的问题来考虑——侧重于基坑围护结构强度控制, 是难于达到保护周围环境目的的, 而要把基坑工程与周围环境作为一个整体系统加以分析, 这就要求人们实现从强度控制到变形控制的思想转变^[2]。

深基坑开挖工程对邻近地下管线的影响规律研究, 是基坑环境工程中的重要课题, 文献[3] 采用三维有限元法考虑了基坑围护结构、土体与地下管线变形的耦合作用, 成功地计算了由于基坑开挖引起的邻近地下管线的位移, 通过与工程实例比较, 能够准确预测

基坑开挖引起的地下管线位移。本文在此基础上, 较细致地分析了加固措施对减少地下管线位移程度的影响, 为工程实际应用提供了理论依据。

2 计算理论与方法

2.1 基坑开挖模拟

有限元法模拟基坑开挖过程, 开挖荷载计算是进行分析的关键。开挖前土体处于平衡状态, 在开挖面上的应力完全释放, 成为应力自由面。所谓开挖等效荷载实际上就是被挖除土体与剩余土体之间的相互作用力。对于开挖荷载许多学者提出了计算方法, 例如: 应用较广的 Mana(1976) 计算方法^[4], 单元应力内差法(Kulhawy), 由位移直接求得结点力方法(Chandrasekaran, 1974) 等。由于 Mana 法没有计入体力对开挖荷载的影响, 实际上是不合理的, Ghaboussi(1984)^[5] 和 Brown(1985)^[6] 对 Mana 法进一步研究发展, 提出了不排水情况下较为合理的开挖荷载一般计算方法, 其计算公式为

$$\{f\} = \int_v [B]^T \{\sigma\} dv - \int_v [N]^T \{\gamma\} dv \quad (1)$$

式中 $\{f\}$ 为基坑等效开挖荷载列向量; $[B]$ 为应变矩阵; $\{\sigma\}$ 为土体应力列向量; $[N]$ 为形函数矩阵; $\{\gamma\}$ 为单位土体自重列向量; v 为开挖区域。 $\{f\}$ 与开挖区域的土体应力状态以及自重有关。

* 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(59738160)

收稿日期: 2001- 04- 16

2.2 围护结构与土体接触面的模拟

因钢筋混凝土与土的变形模量存在较大差异,故围护结构与土体的接触具有特殊的性质。用有限元分析土体与围护结构的相互作用时,必须加以特别注意。

以往分析土体与结构的相互作用时,往往采用下列两种极端化的假定之一(朱伯芳, 1998): ①接触面十分粗糙, 土体与结构之间无相对滑动可能; 或 ②接触面十分光滑, 不可能产生剪应力以阻止土体与结构之间的相对滑动^[7]。显然, 这两种假定都是绝对理想化的, 不符合实际情况。为了充分反映围护结构与土体的相对滑动, 目前 Goodman 接触面单元是较常用的一种单元。

设接触面单元应力和位移之间的关系为

$$\{\sigma\} = [\sigma_x, \tau_{xy}, \tau_{xz}]^T = [K]\{W\} \quad (2)$$

式中 $\{W\}$ 为接触面上左右两片的相对位移, 其表达式为

$$\{W\} = \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \\ \Delta w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}_{\text{左}} - \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}_{\text{右}} = [D]\{\delta\}^e \quad (3)$$

取位移模式为线性函数, 可把每一接触面上任意一点的位移表示为结点位移, 即

$$\begin{bmatrix} u_{\text{左}} \\ v_{\text{左}} \\ w_{\text{左}} \end{bmatrix} = N_1 \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \end{bmatrix} + N_4 \begin{bmatrix} u_4 \\ v_4 \\ w_4 \end{bmatrix} + N_5 \begin{bmatrix} u_5 \\ v_5 \\ w_5 \end{bmatrix} + N_8 \begin{bmatrix} u_8 \\ v_8 \\ w_8 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} u_{\text{右}} \\ v_{\text{右}} \\ w_{\text{右}} \end{bmatrix} = N_2 \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ w_2 \end{bmatrix} + N_3 \begin{bmatrix} u_3 \\ v_3 \\ w_3 \end{bmatrix} + N_6 \begin{bmatrix} u_6 \\ v_6 \\ w_6 \end{bmatrix} + N_7 \begin{bmatrix} u_7 \\ v_7 \\ w_7 \end{bmatrix} \quad (5)$$

形函数 N_i 的值分别为

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{4}(1-\eta)(1+\xi) & N_2 &= \frac{1}{4}(1-\eta)(1-\xi) \\ N_3 &= \frac{1}{4}(1+\eta)(1+\xi) & N_4 &= \frac{1}{4}(1+\eta)(1-\xi) \\ N_5 &= \frac{1}{4}(1-\eta)(1-\xi) & N_6 &= \frac{1}{4}(1-\eta)(1+\xi) \\ N_7 &= \frac{1}{4}(1+\eta)(1-\xi) & N_8 &= \frac{1}{4}(1+\eta)(1+\xi) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

2.3 地下管线的模拟

用有限单元法分析弹性薄壳, 有两种不同的途径: 一是用薄单元组成的折板系统代替原来的薄壳, 由平面应力状态和板弯曲应力状态加以组合而得到薄壳的应力状态; 二是直接采用曲面单元, 根据壳体理论推导单元刚度矩阵。本文采用了后一种方法。

3 保护措施数值分析

3.1 算例参数

某悬臂式基坑, 平面尺寸为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$, 基坑开挖

深度为 5 m , 围护结构宽度为 0.6 m , 插入深度为 10 m 。根据工程经验及有限元计算结果, 基坑开挖影响宽度约为基坑开挖深度的 $3 \sim 4$ 倍, 影响深度约为开挖深度的 $2 \sim 4$ 倍。根据结构对称性, 沿基坑中部取一半进行分析, 计算范围取为 $60.6 \text{ m} \times 121.2 \text{ m} \times 35 \text{ m}$, 即影响宽度和深度分别取 9 倍、 6 倍的开挖深度。如图 1.2 所示。土层 I 中土体的弹性模量 $E = 2 \text{ MPa}$, 泊松比 $\mu = 0.49$, 层厚 5 m ; 土层 II 中土体的弹性模量 $E = 4 \text{ MPa}$, 泊松比 $\mu = 0.45$, 层厚 10 m ; 土层 III 中土体的弹性模量 $E = 16 \text{ MPa}$, 泊松比 $\mu = 0.40$, 层厚 20 m 。管道为混凝土管, 其弹性模量和泊松比分别为 25000 MPa , 0.17 。

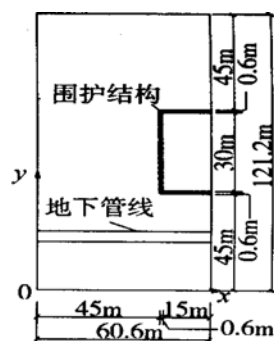


图1 算例基坑平面

Fig. 1 Plan of the pit



图2 算例基坑剖面图

Fig. 2 Pit section

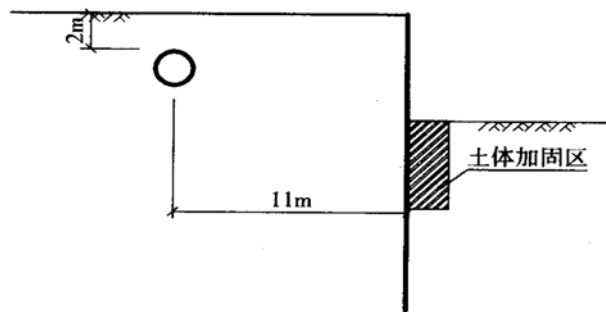


图3 基坑内被动区加固示意

Fig. 3 Soil reinforced in passive area of the pit

3.2 基坑内被动区土体加固对地下管线位移的影响

基坑内土体被动区加固是减少围护结构位移的常用施工方法。王欣(1998)利用平面有限元方法研究了基坑内被动区土体加固对围护结构的影响^[8]。Ou

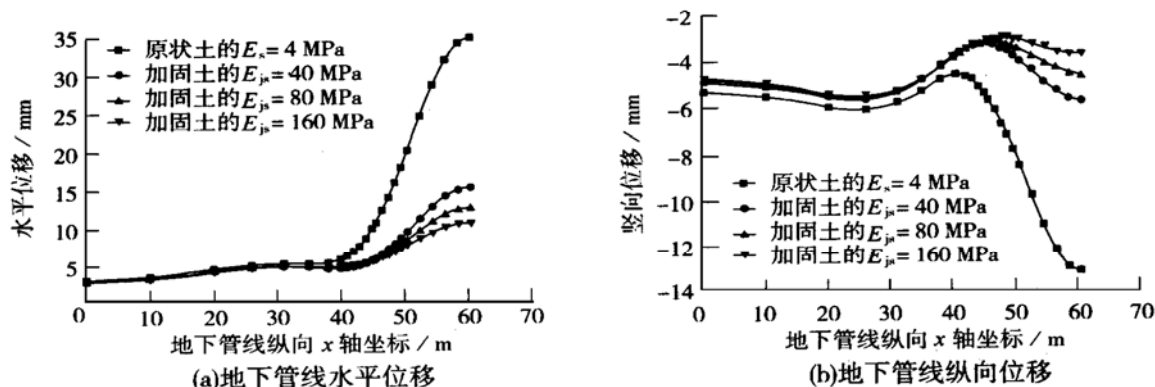
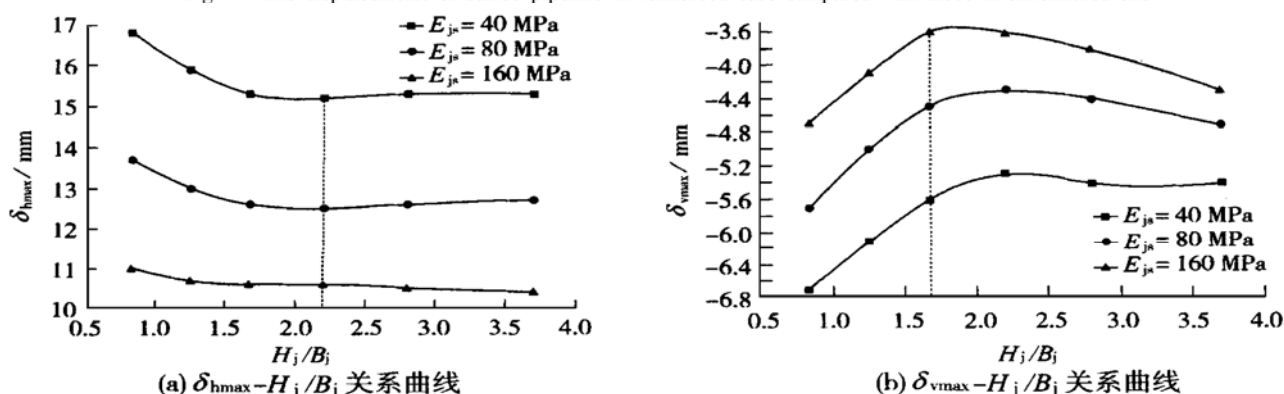
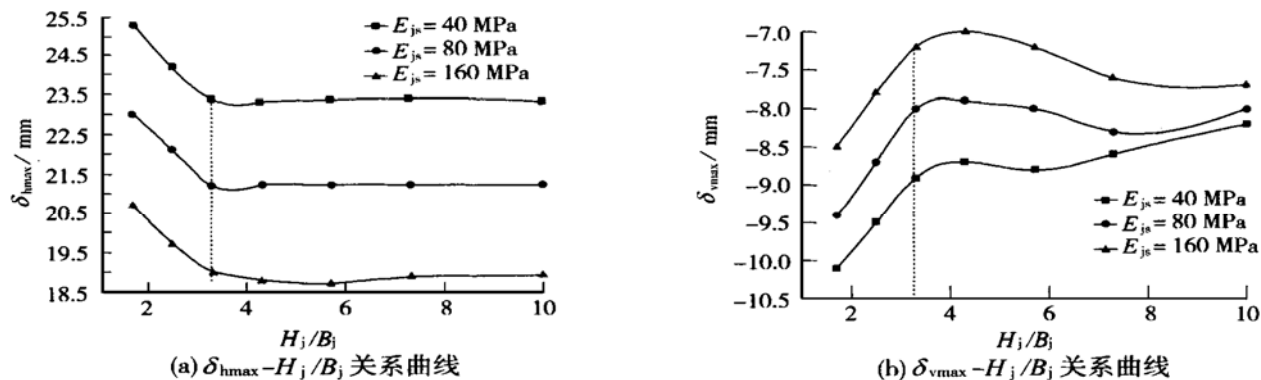


图4 基坑被动区加固前后的地下管线位移对比

Fig. 4 The displacements of buried pipeline in reinforced case compared with those in unreinforced one

图5 地下管线最大位移与 H_j/B_j 的关系曲线($B_j = 6$ m)Fig. 5 Relations between the maximal displacements of pipeline and H_j/B_j ($B_j = 6$ m)图6 基坑被动区加固情况下地下管线最大位移与 H_j/B_j 的关系曲线($B_j = 3$ m)Fig. 6 Relations between the maximal displacements of pipeline and H_j/B_j ($B_j = 3$ m)

(1996)提出了基坑内被动区土体加固的三种方案——块体型、柱型和墙型^[9]。这三种类型中,块体类型的加固效果一般较其它两种类型的加固效果要好,但由于加固的体积较大,而费用较高。为了计算方便,本文采用了块体类型方案(图3)进行分析。

图4、5是在桩管外径 $D = 1$ m,埋深 $h = 2$ m,距离基坑边 $L = 11$ m,基坑内被动区加固宽度 $B_j = 6$ m和加固深度 $H_j = 10$ m的情况下得到的。以被动区初始弹性模量 $E_s = 4$ MPa为基准,对被动区加固土体弹性模量取 $10E_s$ 、 $20E_s$ 和 $40E_s$ 的情况分别进行计算,以分

析被动区土体加固对地下管线影响效果。从图中可知,基坑内被动区土体弹性模量提高到初始值的10倍时,地下管线水平位移将减少56%,竖向位移减少57%。可见基坑内被动区土体加固对减少基坑相应范围内地下管线位移作用非常大,但对基坑相应范围以外地下管线位移影响甚小。另外,被动区土体加固对地下管线水平位移和竖向位移影响的程度相当。图5是地下管线最大位移和土体加固深度 H_j 与加固宽度 B_j 比值的关系($B_j = 6$ m保持不变),图中显示,地下管线最大位移随 H_j/B_j 比值增大而减小,当减小到一定

程度($H_j/B_j = 1.67$), 位移数值基本保持不变, 这在水平位移上反映较为突出, 而竖向位移不太明显(但也可以取 $H_j/B_j = 1.67$)。这说明, 被动区土体在一定的加固宽度下, 加固深度有一加固效果最佳值, 当超过这一最佳值时, 不但加固效果不理想, 反而造成施工上的浪费。

图6是在砼管外径 $D = 1\text{ m}$, 埋深 $h = 2\text{ m}$, 距离基坑边 $L = 11\text{ m}$, 基坑内被动区加固宽度 $B_j = 3\text{ m}$ 的情况下得到的。比较图6和图5, 发现它们的曲线规律基本一致, 不同的是, 在相同 H_j/B_j 比值条件下, 图5的加固效果明显优于图6。图6中 H_j/B_j 的最优取值为3.3。以最佳 H_j/B_j 比值为例, 加固体的横断面积, 图5为 60.12 m^2 , 图6为 29.7 m^2 , 前者是后者的2倍。实际工程中, 应根据管线变形控制条件, 选择完全、经济、合理的加固方案。

3.3 地下管线底部土体加固对地下管线位移的影响

图8是由图7所示砼管外径 $D = 1\text{ m}$, 埋深 $h = 2\text{ m}$, 距离基坑边 $L = 11\text{ m}$, 管线底部土体加固宽度 $B_j = 2\text{ m}$ 及加固土体弹性模量 $E_{js} = 40\text{ MPa}$ 的情况下得到的。从图8看出, 管线底部土体加固对管线水平位移几乎没有作用(图中曲线几乎重叠为一条), 而对地下管线竖向位移有明显影响, 当加固深度 $H_j = 3.5\text{ m}$ 时, 最大竖向位移可减少18%, 加固深度为 $H_j = 11\text{ m}$ 时, 最大竖向位移减少35%。另外, 从图8(b)还可得出, 随加固深度增加, 竖向位移并不是随之有大幅度减少, 存在一个临界深度, 本例取为 8.5 m 。

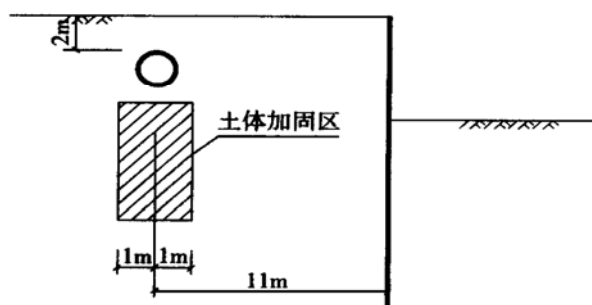


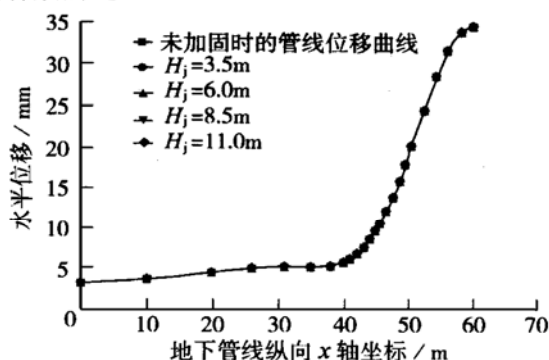
图7 管线底部土体加固示意

Fig. 7 Soil reinforced under pipeline

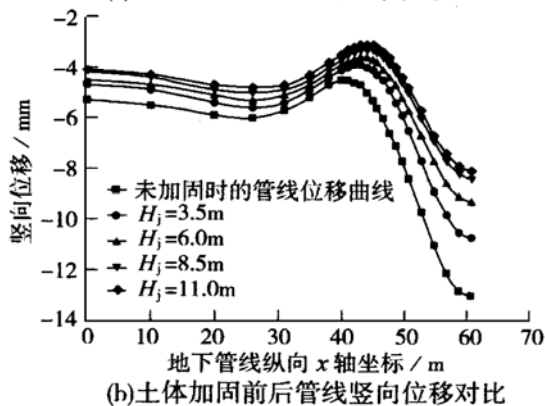
3.4 地下管线侧向土体加固对地下管线位移的影响

图10是由图9所示砼管外径 $D = 1\text{ m}$, 埋深 $h = 2\text{ m}$, 距离基坑边 $L = 11\text{ m}$, 管线侧向土体加固宽度 $B_j = 1\text{ m}$, 距离基坑边 $L_j = 9\text{ m}$ 及加固土体弹性模量 $E_{js} = 40\text{ MPa}$ 的情况下得到的。从本图中看出, 该方案对地下管线水平位移影响效果不十分明显, 然而对其竖向位移影响显著, 这说明侧向加固效果与加固土体的宽度 B_j 、深度 H_j 和距离基坑边距离 L_j 密切相关。当土体加固区距离基坑边越远且加固宽度较小时, 加固土

体犹如处于地基中的“悬挂体”, 故对地下管线的水平位移影响较小, 然而对竖向位移, 它却起到了较大的阻碍作用, 故导致了上述结果。这从图11也有所反映, 当 $L_j = 0\text{ m}$ 即加固区与围护结构紧密相连时, 加固效果最好, 可同时有效地减小地下管线水平和竖向位移, 这是因为此种情况下, 增强了围护结构的整体刚度, 从而大大地减少了围护结构位移。针对一定的加固宽度, 土体侧向加固也存在最优加固深度问题(如本例最优 H_j/B_j 比为5)。当加固体深度超过这一界限值, 增大加固深度已无效果, 反而会造成不必要的浪费。综上所述, 保护基坑周边环境安全, 减少围护结构位移是最有效的途径。



(a)土体加固前后管线水平位移对比



(b)土体加固前后管线竖向位移对比

图8 地下管线底部土体加固对其位移的影响
(加固宽度 $B_j = 2\text{ m}$)

Fig. 8 Displacements of pipeline affected by the soil reinforced under pipeline

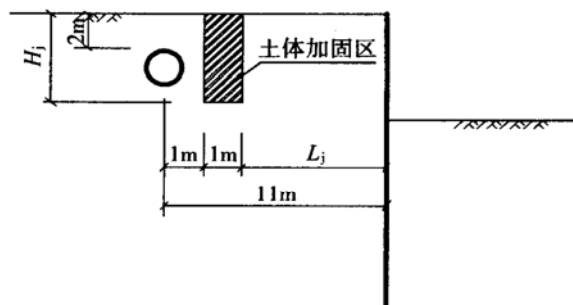


图9 管线侧向加固剖面图

Fig. 9 Soil reinforced on lateral side of pipeline

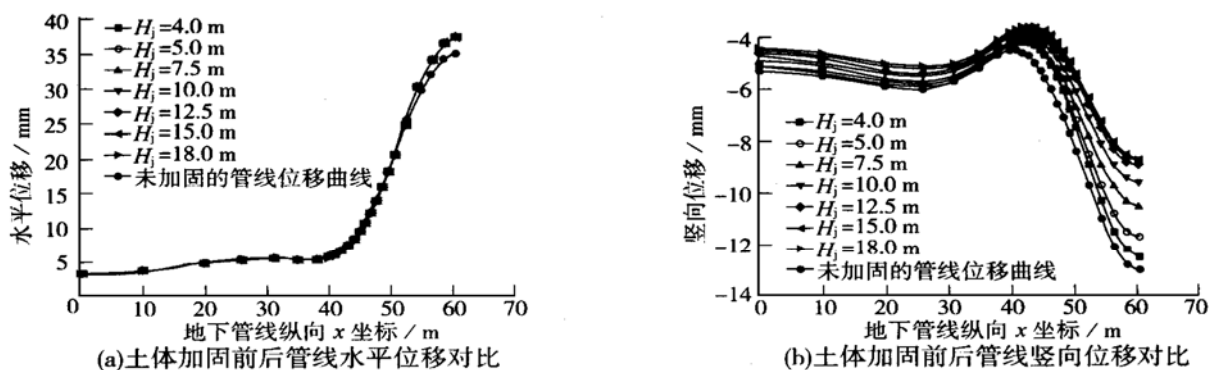
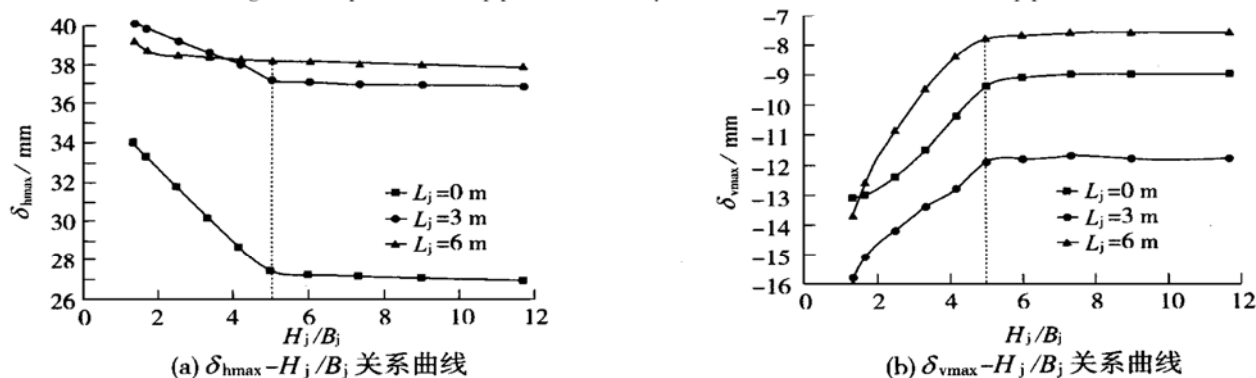


图 10 地下管线侧向土体加固对其位移的影响

Fig. 10 Displacements of pipeline affected by the soil reinforced on lateral side of pipeline

图 11 地下管线侧向土体加固时管线最大位移与 H_j/B_j 的关系曲线($B_j = 3$ m)Fig. 11 Relations between the maximal displacements of pipeline and H_j/B_j ($B_j = 3$ m)

4 结 论

(1) 传统意义的地下管线底部注浆加固,能有效控制地下管线竖向位移,但对其水平位移的影响较小。

(2) 侧向加固效果与加固土体的加固宽度 B_j 、加固深度 H_j 和距离基坑边距离 L_j 密切相关。在土体加固区距离基坑边越远且加固宽度较小的情况下,可有效控制地下管线竖向位移,然而对其水平位移影响甚小。加固体距离基坑越近,总体加固效果就越好。当加固宽度一定时,土体侧向加固存在着最优加固深度问题,当加固体深度超过这一界限值时,再继续增加加固深度已没有效果,反而会造成工程浪费。

(3) 最有效控制地下管线位移,达到对其安全保护的措施是采用基坑内被动区土体加固的方案。坑内土体被动区加固可以同时大幅度地减少地下管线竖向、水平位移量,加固效果与加固区的宽度、深度有关。同一加固区深度条件下,加固宽度越大加固效果越好;然而,在同一加固宽度下,存在着最佳加固深度的问题,即当加固深度超过这一值时,加固效果已不明显。因此,在采用被动区加固方案时,应根据管线变形控制要求,进行合理分析后,确定最优加固宽度和深度,以取得最佳的经济效益。

参考文献:

- [1] 李永盛. 城市基坑工程施工监控及其环境监测(一)[J]. 建筑施工, 1999, 21(1): 59~63.
- [2] 侯学渊, 刘国彬, 黄院雄. 城市基坑工程发展的几点看法[J]. 施工技术, 2000, 29(1): 5~7.
- [3] 李大勇. 软土地基深基坑工程邻近地下管线的性状研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- [4] Mana A I. Finite element analysis of deep excavation behavior [D]. US: Stanford University, 1976.
- [5] Ghaboussi J, Pecknold D A. Incremental finite element analysis of geometrically altered structures[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1984, 20: 2051~2064.
- [6] Brown P T, Booker J R. Finite element analysis of excavation [J]. Computer and Geotechnics, 1985, 1(3): 207~220.
- [7] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用: 第二版[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [8] 王欣. 挡土结构被动区加固性状有限元分析[D]. 杭州: 浙江大学, 1998.
- [9] Ou C Y, Wu T S, Hsieh H S. Analysis of deep excavation with column type of ground improvement in soft clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(9): 709~716.