

DOI: 10.11779/CJGE2014S2086

# 兰州地铁车站深基坑开挖过程中降水对邻近地下管道的影响

周 勇<sup>1, 2</sup>, 魏嵩琦<sup>1, 2</sup>, 朱彦鹏<sup>1, 2</sup>

(1. 兰州理工大学甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 以兰州地铁1号线某车站基坑支护工程为背景, 对该车站基坑开挖降水过程中地下管道的位移进行了全面的分析。采用排桩加内撑支护结构对基坑进行支护, 考虑了深基坑降水贯穿基坑开挖的全过程, 借助有限元软件ADINA建立地铁车站基坑三维有限元分析模型。通过有限元法分析以及实际监测数据, 表明车站深基坑开挖及降水对地下管道的位移有显著影响, 进而总结了管道的变形规律, 为兰州地区地铁车站及类似深基坑设计和施工提供重要的依据。

**关键词:** 深基坑; 地铁车站; 有限元法; 基坑降水; 位移

中图分类号: TU473.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)S2-0495-05

**作者简介:** 周 勇(1978-), 男, 湖北宣恩人, 博士, 教授, 主要从事深基坑开挖支护与边坡加固方面的教学和研究工作。E-mail: gsutzhouy@163.com。

## Effects of dewatering on adjacent underground pipelines during excavation of deep foundation pit at a metro station in Lanzhou

ZHOU Yong<sup>1,2</sup>, WEI Song-qi<sup>1,2</sup>, ZHU Yan-peng<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Taking the deep foundation pit at a subway station of Lanzhou metro line 1 as an example, the displacement of the underground pipes induced by its dewatering is comprehensively analyzed. Using piles and internal bracing structures to support the deep foundation pit and considering dewatering during the whole excavation process, a three-dimensional finite element model is established by using the FEM software ADINA. The FEM analysis and monitoring data show that the deep excavation and dewatering have significant effects on the displacement of underground pipelines. Accordingly the deformation of the pipelines is summarized, so as to provide an important basis for the design and construction of Lanzhou subway stations and similar deep foundation pits.

**Key words:** deep foundation pit; subway station; FEM; dewatering; displacement

## 0 引言

随着城市建设的发展, 地铁深基坑工程的规模和施工难度也在日益增大。兰州地区地铁也在建设当中, 如何避免由于地铁深基坑及开挖降水而引起周边地下管道变形过大而破裂, 已经成为人们关注的重点问题。目前现有的研究理论在软土地区相对比较成熟, 而对于兰州地区土层复杂的地铁车站深基坑的数值模拟还相对较少, 因此深入系统地开展“兰州地区地铁车站深基坑开挖及降水对周边管道影响的数值分析与研究”是十分有必要的, 同时对完善理论分析及工程设计具有重要的参考价值。

兰州地铁1号线车站都建在繁华闹市区, 周围各

种地下管道错综复杂, 如若基坑开挖保护措施不当, 必将引起地下管道的破裂, 从而造成不可估量的经济损失。因此针对兰州地铁深基坑开挖及降水对周边地下管道的影响的研究就显得尤为重要。

深基坑降水要贯穿基坑开挖的全过程, 所以在施工过程中要着重保护地下管道。近年来, 国内针对深基坑降水对基坑周边环境影响分析较多, 刘伟莉<sup>[1]</sup>对深基坑降水对周边环境影响的主要因素进行了分析,

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目(1208RJZA158); 兰州理工大学红柳青年教师培养计划项目(Q20110B); 甘肃省高等学校基本科研业务费项目

收稿日期: 2014-07-28

陈永才等<sup>[2]</sup>对深基坑降水对周边环境影响的处理措施进行了分析, 朱庆杰等<sup>[3]</sup>对管土摩擦和管径对管道破坏的影响进行了分析。本文主要通过三维有限元法<sup>[4-5]</sup>重点研究兰州地区地铁车站深基坑开挖及降水对邻近地下管道的影响<sup>[6-7]</sup>, 为兰州地区地铁车站及类似深基坑设计和施工提供重要的依据。

## 1 管道安全性能评价

地下管道处于安全状态, 强度需要满足下式<sup>[8]</sup>:

$$\delta_{\max} \leq [\delta] , \quad (1)$$

式中,  $\delta_{\max}$  为管道截面所受的最大压力、拉应力,  $[\delta]$  为地下管线材料的容许抗压、拉强度。其中,

$$\delta_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} , \quad (2)$$

$$M_{\max} = \sqrt{M_{v\max}^2 + M_{h\max}^2} , \quad (3)$$

$$\begin{aligned} M_v &= 4EI \left[ y_0 - c - \frac{q_0}{K_v} \right] \beta^2 \phi_3(\beta x) + \\ & EI \left[ \frac{M_0}{EI} + 2\alpha \right] \phi_1(\beta x) - 2\alpha' EI , \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} M_h &= 4EI(y_0 - c')\beta^2 \phi_3(\beta x) + \\ & EI \left[ \frac{M_0}{EI} + 2\alpha' \right] \phi_1(\beta L) - 2\alpha' EI , \end{aligned} \quad (5)$$

$$W = D^3 \pi (1 - \alpha^4) / 32 . \quad (6)$$

式中  $EI$  为管线刚度,  $y_0$  为计算截面处的竖向位移;  $\phi_1(\beta x)$ ,  $\phi_3(\beta x)$  为雷洛夫函数;  $q_0$  为管道竖向荷载;  $K_v$  为地基竖向基床换算系数;  $\alpha = d/D$ ,  $D$  为地下管线外径,  $d$  为地下管线内径。

## 2 计算模型与参数

### 2.1 模型建立

取兰州地铁 1 号线某车站基坑的一部分进行数值模拟, 地铁车站的基坑很长, 本文模型只选取了其中的一段。选取的基坑平面由两部分组成, 上部分的尺寸为  $18 \text{ m} \times 9 \text{ m}$ , 下部分尺寸为  $10 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ , 基坑深  $17 \text{ m}$ , 图 1 为本算例的三维有限元计算模型。

由于在实际工程中降水是伴随施工同时进行的, 所以此模型为考虑降水时, 基坑施工对周边地下管道的影响模型。在模型中共设置了 6 个井点进行降水, 但由于模型是对称的, 所以取其左半边模拟。具体模型如图 2 所示。从图 2 我们可以看出在模型中设立了 3 个降水井, 且均匀分布在基坑的周围。地下管道距基坑左边缘  $10 \text{ m}$ , 埋深  $3 \text{ m}$ 。基坑降水是在基坑开挖前进行的, 所以模型中设置了降水井在基坑开挖前  $15 \text{ d}$  开始降水。在模型中要体现出基坑开挖与支护的过程, 因此模型中设置了生死单元来体现支护结构的设

置与基坑开挖的全过程。模型中设置了重力和抽水压力, 并且在初始设置化中平衡了初始位移。具体模型中的土体参数、支护结构参数以及管道参数如表 1~表 3。

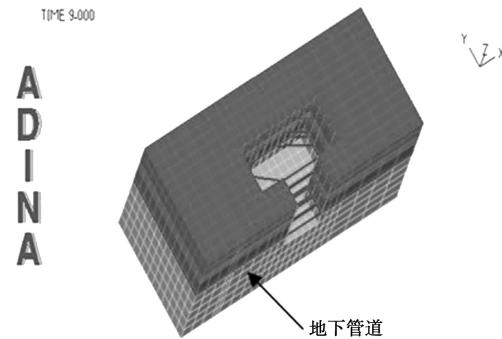


图 1 计算分析模型

Fig. 1 Computational analysis model

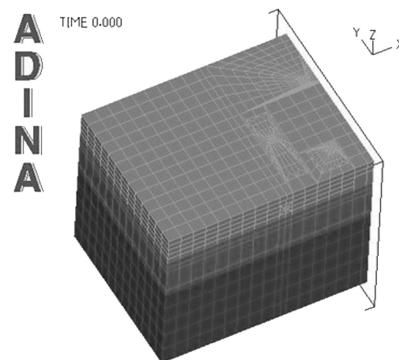


图 2 左半边计算模型

Fig. 2 Left half of computational model

表 1 土体参数

Table 1 Parameters of soils

土层	厚度 /m	泊松比 $\nu$	黏聚力 $c / \text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi / (\text{°})$	弹性模量 /Pa	单元类型
杂填土	6	0.39	0	14	6	3D-solid
黄土	8	0.30	9	19	6	3D-solid
卵石	16	0.16	0	39	55	3D-solid

表 2 管道参数

Table 2 Parameters of pipelines

参数	弹性模量 $E / \text{MPa}$	泊松比 $\nu$	结构尺寸 /m	单元类型
取值	24000	0.17	外径 2 壁厚 0.2	shell

表 3 围护结构参数

Table 3 Parameters of bracing structures

围护结构	弹性模量 /MPa	结构尺寸	泊松比 $\nu$	单元类型
钻孔灌桩	24000	桩径 0.8 m 桩间距 1.5 m	0.17	Beam
钢支撑	200000	外径 0.6 m 壁厚 0.0016 m	0.24	Truss
梁	24000	长 0.8 m, 宽 0.8 m	0.17	Beam

## 2.2 基坑降水及分步开挖过程模拟

在计算分析深基坑之前首先计算土体的初始应力场, 以及设置初始位移为零, 其次在每个井点处设置抽水压力 (0.5 MPa), 并让其先抽水 15 d。最后把桩体打入地表下-18 m, 并进行基坑开挖以及钢支撑与梁的支护, 具体实施步骤如表 4。

表 4 基坑开挖以及钢支撑支护步骤

Table 4 Excavation and steps of steel bracing

施工步骤	基坑开挖	钢支撑、梁
第一步	-2.50 m	在-1.50 m 处设第一道
第二步	-8.05 m	在-7.05 m 处设第二道
第三步	-14.64 m	在-13.64 m 处设第三道
第四步	-16.60 m	

## 3 地下管道性状分析

### 3.1 深基坑开挖对邻近地下管道的影响

利用有限元软件分析管道 (埋深 3 m) 在不考虑基坑降水时基坑开挖工程中的变形, 提取管道纵坐标不同的五个单元 ( $Y=1, Y=6, Y=13, Y=15, Y=20$ ) 在每一时刻的竖向沉降, 从而得到管道的沉降变化情况, 如图 3。

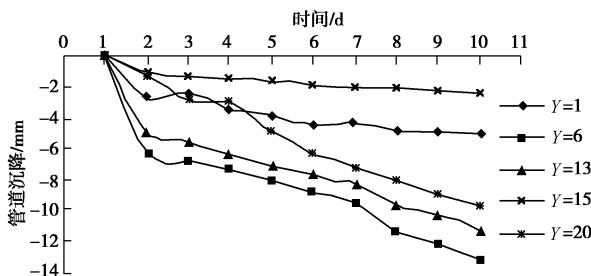


图 3 不考虑降水时管道沉降曲线

Fig. 3 Settlement curves of pipelines without precipitation

从图 3 可以看出, 管道沉降的整体趋势是随着施工时间的增加而增大。在整个分析过程中管道纵坐标  $Y=6$  处的沉降最大,  $Y=15$  处的沉降最小。管道最大和最小沉降都没有发生在管道的末端, 其原因是由于模拟中设置了约束边界影响了其沉降。

### 3.2 基坑在降水过程对管道沉降影响分析

利用有限元软件分析管道在基坑施工降水过程中的变形, 提取管道纵坐标不同的五个单元 ( $Y=1, Y=6, Y=13, Y=15, Y=20$ ) 在每一时刻的竖向沉降, 从而得到管道的沉降变化情况, 其变化曲线如图 4。

由图 4 可以看出: ①管道在降水过程中的沉降随着时间的增加而增大。在降水开始 1~2 d 时间段内管道的总体沉降比较均匀, 都在 0~5 mm 范围内; 在降水开始 2~4 d 时间段内管道前半部分的沉降也比较均匀; 在降水开始 4~9 d 时间段内管道的沉降显著增加, 从 8.4 mm 增加到 19 mm; 在降水开始 9~12 d 时间段

内管道的沉降趋于平缓, 在降水至 12 d 时, 管道的沉降达到最大, 其中  $Y=1$  处的沉降达到 24.12 mm。②管道沉降随着纵坐标的增加而减小。在降水开始 1~4 d 时间段内由于管道沉降比较均匀, 所以不太明显; 在降水开始 4~12 d 时间段内管道前后两端的位移差在逐渐拉大, 管道的变形也在逐渐变大。

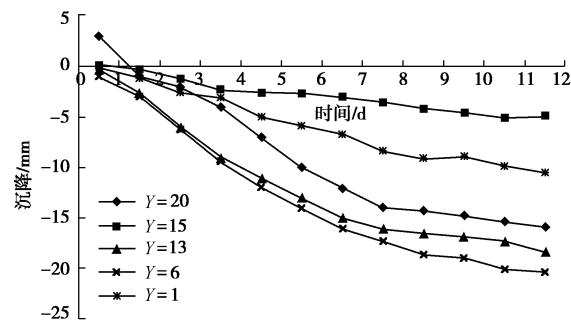


图 4 考虑降水时管道沉降曲线

Fig. 4 Settlement curves of pipelines with precipitation

利用有限元软件分析管道在降水过程中的变形, 提取管道纵坐标不同的五个单元 ( $Y=1, Y=6, Y=13, Y=15, Y=20$ ) 在每一时刻的水平位移, 从而得到管道的水平位移变化情况, 其变化曲线如图 5。

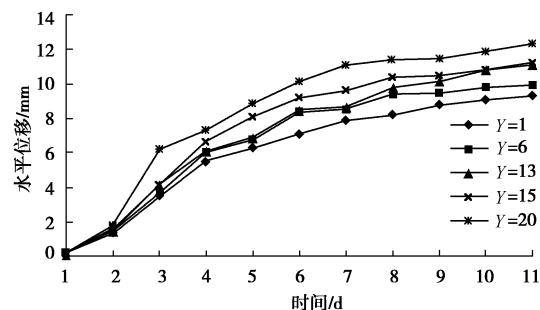


图 5 管道水平位移曲线

Fig. 5 Horizontal displacement curves of pipelines

从图 5 可以看出, ①管道在降水过程中的水平位移随着时间的增加而增大。在降水开始 1~2 d 时间段内管道的总体水平位移比较均匀, 都在 0~2 mm 范围内; 在降水开始 2~4 d 时间段内管道后半部分的沉降也比较均匀; 在降水开始 4~8 d 时间段内管道的水平位移增大较快, 从 4.40 mm 增大到 11.00 mm; 在降水开始 8~11 d 时间段内管道的沉降趋于平缓, 在降水至 11 d 时, 管道的水平位移到达最大, 其中  $Y=20$  处的位移到达 12.36 mm。②管道沉降位移随着纵坐标的增加而增大。在降水开始 1~2 d 时间段内由于管道沉降比较均匀, 所以不太明显; 在降水开始 2~11 d 时间段内管道前后两端的位移差在逐渐拉大, 管道的变形也在逐渐变大。

综上可知: ①基坑降水引起基坑周边土体孔隙率变化, 导致土体不均匀沉降引起管道变形。②由于基

坑周边地应力发生了变化，导致管道表面受力不均匀从而导致了管道的不均匀沉降。

## 4 数据对比

### 4.1 管道监测数据分析

监测数据：监测的管道位于地表下 3 m，距基坑右边缘 10 m 处。在管道上分别监测节点 1、节点 2、节点 3、节点 4、节点 5、节点 6 共 6 个点位在基坑开挖 15 d 内的沉降值，具体数据如图 6，6 个监测节点距离基坑的具体位置如表 5。

表 5 监测点距离基坑的位置

Table 5 Distances of monitoring points to foundation pit

监测点	距离基坑 右边缘位置/m	距离地表/m
节点 1	9.12	-2.01
节点 2	9.12	-2.89
节点 3	9.12	-2.93
节点 4	9.12	-2.65
节点 5	9.12	-2.70
节点 6	9.12	-2.54

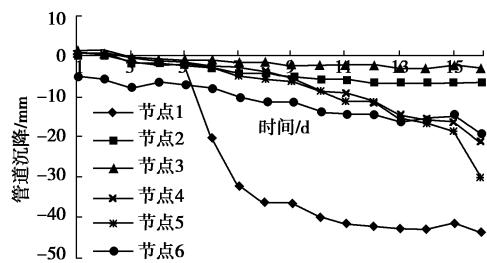


图 6 管道 6 个节点的沉降曲线

Fig. 6 Settlement curves of six nodes of pipelines

从图 6 中可以看出管道沉降随着施工时间的增加而增大。节点 2 和节点 3 的沉降相对较小，在第 15 d 时的沉降分别达到最大，其值为 -5.9 mm 和 -3.92 mm。节点 4、节点 5 和节点 6 的沉降值在中间的几天有少许波动，但总体趋势都在随着施工时间的增加而增大，在第 15 d 时沉降分别达到最大，其值为 -21.4 mm，-30.3 mm 和 -19.4 mm。节点 1 的沉降与其他节点的沉降变化曲线不同，在监测至第 5 d 左右，其沉降值迅速增加，直到第 8 d 时才稳定下来。原因是节点 1 布置在管道的接口处，在第 15 d 后节点沉降达到最大值 -43.4 mm。

### 4.2 实际数据与数值模拟数据对比

在模型中选取了与实际管道相对应的两个节点并提取其位移，与实测数据进行对比如图 7，8。

从图 7，8 中可以看出：①管道的沉降无论是模拟值还是实测值都在随着施工时间的增加而逐渐增大。两种情况下管道的沉降初始值都比较接近，而最终的沉降差值较大。节点 2 的初始和最终模拟沉降值分别

为 +0.4 mm 和 -5.93 mm，实测初始和最终沉降值为 +0.43 mm 和 -6.4 mm，而节点 5 的初始沉降模拟与实测值和最终沉降模拟与实测值分别为：+0.3 mm、+0.6 mm 和 -14.2 mm、-31 mm。②节点 2 在监测期间的模拟值比实测值小，原因是数值模拟中考虑的影响因素相对较少，而在实际施工中周边环境的扰动对管道沉降的影响是较严重的。节点 5 的实测沉降值在监测前 10 d 都比较小，而在后 6 d 中则比较大，在第 15~16 d 期间沉降成直线式增加。模拟值在整个过程中变化都相对平缓，没有太大的波动。

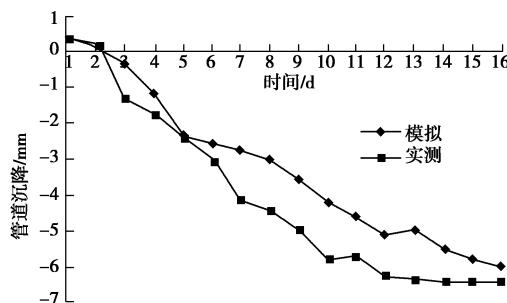


图 7 节点 2 的实测与模拟沉降过程曲线对比

Fig. 7 Comparison between measured and model settlement curves of node 2

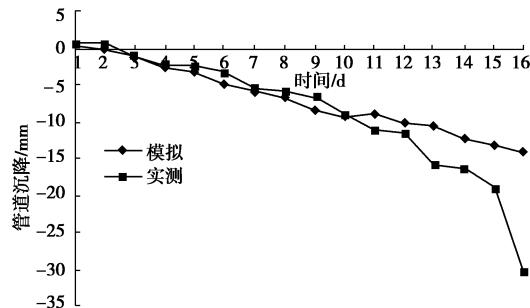


图 8 节点 5 的实测与模拟沉降过程曲线对比

Fig. 8 Comparison between measured and model settlement curves of node 5

综上可知，由于数值模拟没有考虑基坑周边环境的变化，导致其得出的数值相对平滑。实际监测结果与数值模拟结果相对比较接近，可见数值模拟对于实际工程有一定的参考价值。

## 5 结 论

针对兰州地铁 1 号线车站地下错综复杂的地下管道，分析了车站基坑开挖降水对地下管道位移的影响，得到以下结论：

- (1) 在降水过程中，距离降水井越近土体的孔隙水压力越大。
- (2) 基坑降水引起基坑周边土体孔隙率变化，导致土体不均匀沉降，并引起管道变形。

(3)管道在基坑开挖降水过程中的沉降随着时间的增加而增大, 随着管道纵坐标的增加而减小。

(4)由于在基坑开挖过程中基坑周边土体的地应力以及土体沉降的变化, 导致管道不均匀沉降。

#### 参考文献:

- [1] 刘伟莉. 深基坑降水对周边环境产生影响的主要因素分析[J]. 天津建设科技, 2012(4): 34 - 35. (LIU Wei-li. The main factors affecting the deep foundation pit dewatering on the surrounding environment analysis[J]. Tianjin Construction Science and Technology, 2012(4): 34 - 35. (in Chinese))
- [2] 陈永才, 李镜培, 邸国恩, 等. 某深基坑降水对周边环境影响的分析及处理措施[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 319 - 322. (CHEN Yong-cai, LI Jing-pei, DI Guo-en, et al. Analysis of a deep foundation pit dewatering impacts on the surrounding environment and treatment measures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 319 - 322. (in Chinese))
- [3] 朱庆杰, 刘英利, 蒋录珍, 等. 管道摩擦和管径对埋地管道破坏的影响分析[J]. 地震工程与工程振动学报, 2006(3): 197 - 199. (ZHU Qing-jie, LIU Ying-li, JIANG Lu-zhen, et al. Diameter pipe friction and impact of buried pipeline damage analysis[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006(3): 197 - 199. (in Chinese))
- [4] CLOUGH G H, DUNCAN J M. Finite element analysis of retaining wall behavior [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1971, 97(12): 1657 - 1672.
- [5] YVES Robert. A new approach to the analysis of high-strain dynamics pile test data[J]. Can Geotech J, 1994, 31: 246 - 253.
- [6] JGJ120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (JGJ120—2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012. (in Chinese))
- [7] GB 50299—1999 地下铁道工程施工及验收规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007. (GB 50299—1999 Subway construction and acceptance of norms[S]. Beijing: China Planning Press, 2007. (in Chinese))
- [8] 李一凡, 李大勇. 受深开挖影响的地下管线安全性判别[J]. 山东农业大学学报, 2004, 35(4): 593 - 596. (LI Yi-fan, LI Da-yong. Affected by deep excavation underground pipeline safety discrimination[J]. Journal of Shandong Agricultural University, 2004, 35(4): 593 - 596. (in Chinese))

(本文责编 明经平)