

深大基坑周边原水管沉降影响因素分析

叶 薇¹, 柴芮祥², 朱国权^{1*}

(1. 宁波宁大地基处理技术有限公司, 浙江 宁波 315000; 2. 绍兴文理学院土木工程学院, 浙江 绍兴 312000)

摘 要: 为探究深基坑开挖对邻近原水管线的沉降影响, 以宁波地铁某车站深大基坑工程为背景, 结合正交设计法进行基坑有限元模拟, 结果表明数值模拟结果与监测点实际沉降值基本吻合。地连墙弹性模量、管材以及管径三因素均对原水管的沉降有影响。地连墙弹性模量的增大可以减小原水管沉降; PVC管材沉降值小于刚性管材, 刚性管材随着管材刚度系数的增大沉降值也有所减小; 原水管沉降值随着管径的增大表现为先增大后减小的规律。三因素对原水管沉降影响的主次顺序为: 管径、管材、地连墙弹性模量。对基坑开挖附近管线的防护具有一定的指导意义。

关键词: 深基坑开挖; 原水管; 沉降; 影响因素分析

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)04-0340-07

Analysis of factors affecting settlement of existing water pipes around deep and large foundation pits

YE Wei¹, CHAI Rui-xiang², ZHU Guo-quan^{1*}

(1. Ningbo Ningda Foundation Treatment Technology Co., Ltd., Ningbo 315000, China;

2. College of civil engineering, Shaoxing University of Arts and science, Shaoxing 312000, China)

Abstract: In order to explore the impact of deep foundation pit excavation on the settlement of adjacent existing water pipelines, in combination with the orthogonal design method, a finite element simulation of the foundation pit was carried out on the background of a deep and large foundation pit project of a station in Ningbo subway. The result shows that the numerical simulation result is consistent with the actual settlement value of monitoring points. The three factors of elastic modulus of the diaphragm wall, pipe material and pipe diameter all have an influence on the settlement of existing water pipes. The increase in the elastic modulus of the diaphragm wall can reduce the settlement of existing water pipes; the settlement value of the PVC pipe is smaller than that of the rigid pipe, and the settlement value of the rigid pipe decreases with the increase of the pipe stiffness coefficient; the settlement value of existing water pipes increases with the pipe diameter. The settlement value of existing water pipes increases first and then decreases with the increase of pipe diameter. The significance level of the three factors on the settlement of existing water pipes from high to low is pipe diameter, pipe material and elastic modulus of the diaphragm wall. The conclusion has certain guiding significance for the protection of pipelines near the excavation of foundation pit.

Key words: deep excavation; existing water pipe; settlement; analysis of influencing factors

0 引 言

深基坑工程周边往往埋设有大量的地下管线, 安全防护要求高。开挖过程要进行必要的监测, 防止管线变形过大造成财产损失。深基坑周围地下管

线扰动逐渐成为重要研究课题。

基坑开挖周围管线变形主要以竖向变形为主^[1], 李大勇、龚晓南^[2]提出基坑开挖土体与管线间的耦合作用, 展开了对深基坑地下管线位移的数值分析研究, 同时提出基坑内被动区土体的加固是

收稿日期: 2020-08-03

作者简介: 叶薇(1982—), 女, 浙江宁波人, 硕士, 高级工程师, 主要从事工程地质勘察、基坑工程的研究工作。E-mail: 21563215@qq.com。

*通讯作者: 朱国权(1971—), 男, 浙江宁波人, 学士, 高级工程师, 主要从事工程地质勘察、建设工程地基基础检测工程的研究工作。E-mail: chaiwu1314@qq.com。

对管线最有效的加固措施;王洪德、肖杨^[3]等分别对管线材质、埋距、埋深以及管径与管线位移间的关系进行单独分析,得出管线材质影响最为明显。一些学者也从各个角度探究基坑开挖对周边环境变形影响^[4-9]。然而,软土地区深大基坑开挖对周边大型管线沉降影响因素的相关研究相对较少。

本文通过数值模拟与实际工程监测值进行对比,分析基坑开挖对周围原水管沉降的影响规律,并结合正交设计试验法对地连墙弹性模量、管材以及管径与基坑周边原水管沉降的关系进行研究,通过数据分析得出三因素与原水管沉降的关系以及影响主次顺序,为基坑工程周边管线防护提供理论依据。

1 工程概况

该地铁车站为地下2层岛式站台车站采用明挖分层法施工,总共分7层施工,每开挖一层进行支护。标准段车站全长约190 m,宽约为19.7 m,深约16.4 m,基坑支护采用地下连续墙+内支撑支护体系,地下连续墙厚度为0.8 m,地质分层以及各土层开挖基坑变形控制情况如图1、表1所示。

2 二维有限元模型构建

2.1 基本假定

采用ABAQUS软件对基坑进行二维建模,基坑采用摩尔库伦本构模型建模,地连墙、原水管材料均为线弹性材料。在建模过程地连墙与土体采用tie约束绑定。原水管从土体中切割出然后赋予原水管属性,认为原水管与土体共同变形。

2.2 模型力学参数

数值模型中,各层土厚度选取区间中间值,土体参数以及相关构件部位计算参数如表2、表3所示。

2.3 计算模型

由于基坑具有对称性,本次二维基坑模拟选取基坑剖面的1/2进行建模。在所构建的有限元数值模型中,初始时限制左右水平方向位移,底部约束水平跟竖直2个方向的位移。采用四面体结构单元划分网格。基坑开挖与支护过程共建立14个分析步。所构建的有限元计算模型如图2所示。

2.4 数值模型监测内容

在最终计算结果中,本文主要提取了基坑开挖过程中原水管沉降位移以及水平位移,并与实际监测值进行比对,分析深大基坑分层开挖引起的周围土体位移效应。为进一步研究地连墙弹性模量、管材以及管径三因素与原水管沉降做铺垫。

3 数值模拟结果分析

通过计算可知,基坑开挖过程水平、竖直位移云图如图3、图4所示。明显可见,在整个开挖过

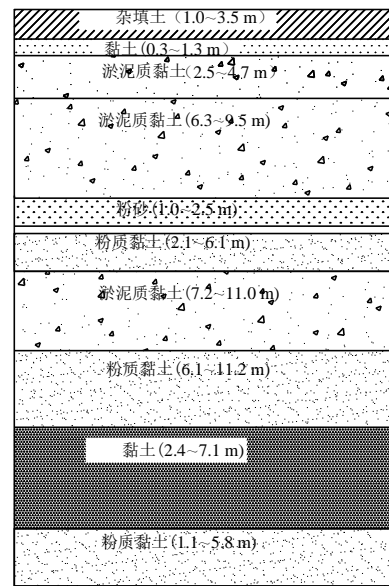


图1 地质分层

Fig. 1 Geological stratification

表1 开挖分层表

Tab. 1 Layers of excavation

| 序号 | 土层 | 开挖深度/m | 开挖标高/m | 位移控制/mm |
|----|-----|----------|--------------|---------|
| 1 | 表层 | 1 | +3.100~+2 | 10 |
| 2 | 第1层 | 2 | +2~±0.00 | 25 |
| 3 | 第2层 | 1.44~1.8 | ±0.00~-1.8 | 42 |
| 4 | 第3层 | 3 | -1.8~-4.8 | 66 |
| 5 | 第4层 | 3 | -4.8~-7.8 | 74 |
| 6 | 第5层 | 2.74 | -7.8~-10.54 | 85 |
| 7 | 第6层 | 2.56 | -10.54~-13.1 | 97 |

表2 土体参数
Tab. 2 Soil parameters

| 土层 | 厚度/m | 弹性模量 E/MPa | 天然重度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ | 黏聚力 c/kPa | 内摩擦角 $\varphi/^\circ$ |
|-------|------------|---------------------|---|--------------------|-----------------------|
| 杂填土 | 1.00~3.50 | 1.76 | 16.4 | 12.1 | 8.1 |
| 黏土 | 0.30~1.30 | 2.81 | 17.9 | 22.7 | 11.5 |
| 淤泥质黏土 | 6.30~9.50 | 4.00 | 17.1 | 6.6 | 8.7 |
| 粉砂 | 1.00~2.50 | 12.04 | 19.2 | 30.0 | 15.7 |
| 粉质黏土 | 2.10~6.10 | 2.61 | 17.6 | 14.5 | 9.2 |
| 淤泥质黏土 | 7.2~11.0 | 2.31 | 16.9 | 17.4 | 10.0 |
| 粉质黏土 | 6.10~11.20 | 3.96 | 18.5 | 14.3 | 10.7 |
| 黏土 | 2.40~7.10 | 2.53 | 17.1 | 22.8 | 11.8 |
| 粉质黏土 | 1.10~5.80 | 2.32 | 17.0 | 17.4 | 10.1 |

表3 结构参数

Tab. 3 Parameters of structures

| 结构部位 | 重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ | 泊松比 μ | 弹性模量 E/GPa |
|-------|---|-----------|---------------------|
| 地下连续墙 | 2 800 | 0.20 | 20 |
| 混凝土支撑 | 2 500 | 0.20 | 32 |
| 钢支撑 | 7 800 | 0.30 | 220 |
| 原水管 | 7 250 | 0.28 | 90 |

程中, 基坑以竖向位移为主, 竖向位移最大值大约是水平位移的 17 倍左右, 基坑内伴随着挤土效应。在分区开挖过程中水平位移并不明显是由于基坑存在支护和围护结构。

3.1 原水管沉降分析

图5 (a) 是原水管监测点数值模拟沉降值 44.27 mm, 图5 (b) 为实际沉降值 39.22 mm。实际沉降值与竖直模拟结果误差为 11.4%, 在容许误差范围之内。管线竖向位移随着基坑开挖工序的进行不断增大。

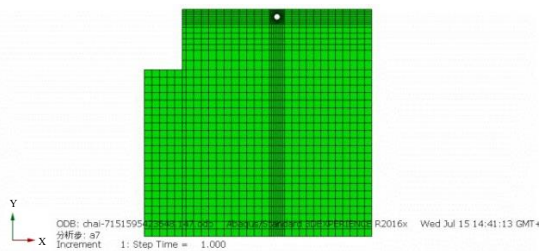


图2 基坑二维模型

Fig. 2 Two-dimensional model of foundation pit

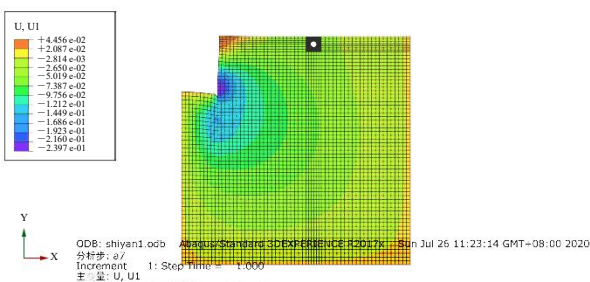


图3 水平位移云图

Fig. 3 Nephogram of horizontal displacement

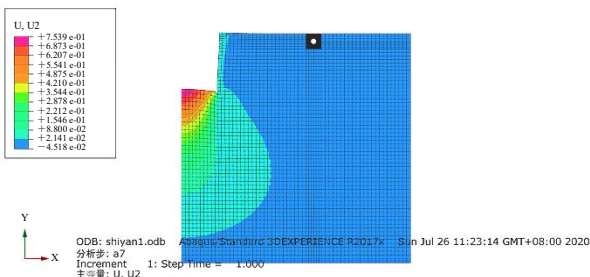
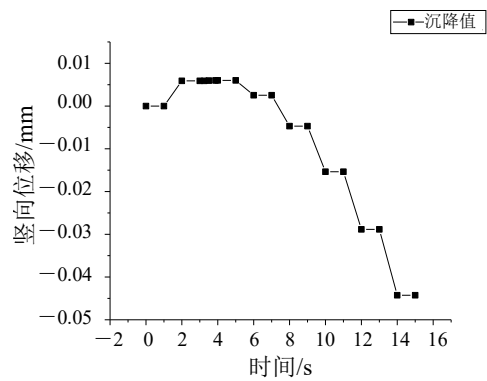
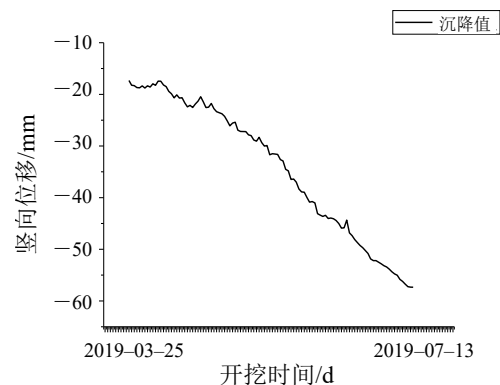


图4 竖直位移云图

Fig. 4 Nephogram of vertical displacement



(a) 数值模拟



(b) 实际监测

图5 原水管沉降对比

Fig. 5 Comparison of settlement of existing water pipes

4 原水管沉降影响因素分析

基坑周围土体及管线位移分析十分复杂, 受地质条件、施工工序等综合影响。探究地连墙弹性模量、管线材质以及管径与原水管沉降的关系, 采用单因素研究工作量需要进行 $3^3=27$ 次模拟才能够完成。本文结合正交设计实验, 选取不同变量组合进行有限元模拟, 只需要进行9次提高了模拟效率。正交设计采用 $L_9(3^3)$ 试验计划表, 设置空白列进行误差分析。三因素水平表以及具体实验计划表如表4、表5所示, 不同管材参数如表6。

表 4 因素水平表

Tab. 4 Influencing factors

| 因素 | 地连墙弹性模量/GPa | 原水管材质 | 管径/m |
|------|-------------|-------|------|
| 水平 1 | 10 | PVC | 0.4 |
| 水平 2 | 20 | 铸铁 | 0.6 |
| 水平 3 | 30 | 钢管 | 0.8 |

表 5 正交试验设计表

Tab. 5 Orthogonal experimental design

| 因素 | 地连墙弹性模量/GPa | 原水管材质 | 管径/m |
|------|-------------|-------|------|
| 试验 1 | 10 | PVC | 0.4 |
| 试验 2 | 10 | 铸铁 | 0.6 |
| 试验 3 | 10 | 钢管 | 0.8 |
| 试验 4 | 20 | PVC | 0.6 |
| 试验 5 | 20 | 铸铁 | 0.8 |
| 试验 6 | 20 | 钢管 | 0.4 |
| 试验 7 | 30 | PVC | 0.8 |
| 试验 8 | 30 | 铸铁 | 0.4 |
| 试验 9 | 30 | 钢管 | 0.6 |

表 6 不同管材参数

Tab. 6 Parameters of different pipes

| 管材 | 重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ | 泊松比 μ | 弹性模量 E/GPa |
|-----|---|-----------|---------------------|
| PVC | 1 600 | 0.35 | 2 |
| 铸铁 | 7 250 | 0.28 | 90 |
| 钢管 | 7 850 | 0.30 | 200 |

4.1 直观分析

9种情况下原水管沉降曲线如图6所示。

各组模拟结果直观分析如表7所示。通过直观分析表中极差值判断试验的主次因素, 选择试验最优因素水平组。

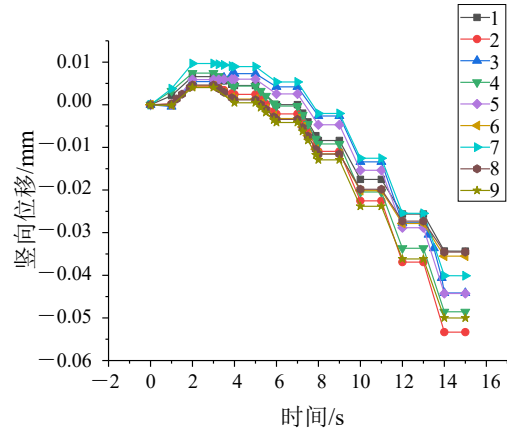


图6 各试验水平原水管沉降曲线

Fig 6 Settlement curves of existing water pipes for each test level

直观分析表中极差值越大, 表示该因素对试验结果的影响也越大。从表中可以看出地连墙弹性模量、管线材质以及管径对原水管沉降的主次顺序都为: $3 > 2 > 1$ 。管径对原水管沉降影响最大。三因素中管径贡献率为74.5%, 管线材质次之为14.3%, 地连墙弹性模量的贡献率为11.2%。故最优组合 $A_3B_1C_1$ 。

4.2 方差分析

在正交试验助手软件中F比就是F值, 通过F比的大小判断某种因素影响的显著性水平。方差分析结果如表8所示。

由表8可知, 地连墙弹性模量、管线材质以及管径对固化淤泥抗压强度影响的F比分别为743.231、14.887、8.428, 所以主次顺序为管径 > 管线材质 > 地连墙弹性模量。虽然管线材质以及管径F比值差距较大, 但两因素显著性水平都表现为十分显著。

由表8可知, 各因素F比大小知管径最大, 管线材质次之, 地连墙弹性模量最小。三因素F比差值相差较大。

4.3 因素分析图

图7为三因素与原水管沉降值的关系。

由地连墙弹性模量因素不同水平趋势图可知, 基坑周边原水管沉降值随着地连墙弹性模量的增大而减小, 当地连墙弹性模量为10 GPa时, 沉降值大约为-41.5 mm, 弹性模量增加到 2 GPa和3 GPa时, 沉降值分别为-40.5 mm、-39.5 mm左右, 两阶段原水管沉降值分别减小了2.4%和2.5%左右; 管材因素分析图可知, 原水管为PVC管材时管线沉降值为-39.1 mm左右, 铸铁管材与钢管线沉降值分别为-41.5 mm、-40.9 mm, PVC管材与其它

表7 原水管沉降直观分析

Tab. 7 Analysis of existing water pipe settlements

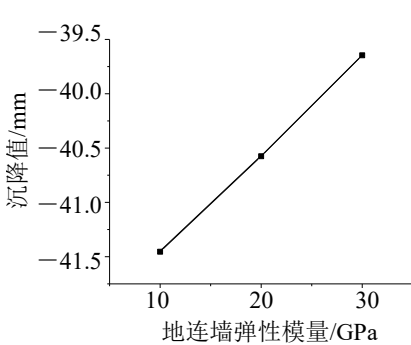
| 因素 | 地连墙弹性模量/GPa (A) | 原水管材质 (B) | 管径/m (C) | 空白列 | 实验结果/mm |
|------|-----------------|--|----------|---------|---------|
| 试验 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -34.33 |
| 试验 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | -53.3 |
| 试验 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | -44.15 |
| 试验 4 | 2 | 1 | 2 | 3 | -48.56 |
| 试验 5 | 2 | 2 | 3 | 1 | -44.26 |
| 试验 6 | 2 | 3 | 1 | 2 | -35.5 |
| 试验 7 | 3 | 1 | 3 | 2 | -40.1 |
| 试验 8 | 3 | 2 | 1 | 3 | -34.55 |
| 试验 9 | 3 | 3 | 2 | 1 | -50.01 |
| 均值 1 | -43.927 | -40.997 | -34.793 | -42.867 | - |
| 均值 2 | -42.773 | -44.037 | -50.623 | -42.967 | - |
| 均值 3 | -41.553 | -43.220 | -42.837 | -42.420 | - |
| 极差 | 2.374 | 3.040 | 15.830 | 0.547 | - |
| 最优组合 | | A ₃ B ₁ C ₁ | | | |

注：设置空白列进行误差分析。

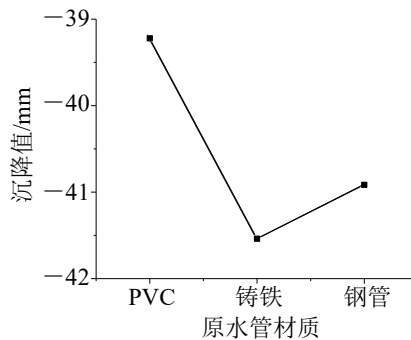
表8 原始管沉降方差分析

Tab. 8 Variance analysis of existing pipe settlement

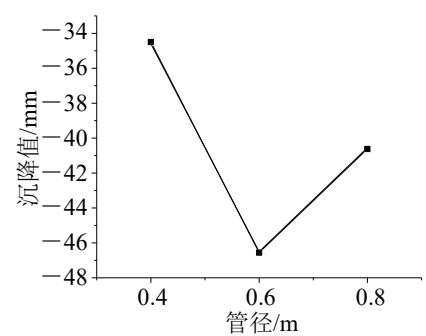
| 因素 | 偏差平方和 | 自由度 | F比 | F临界值 | 显著性 |
|---------|---------|-----|---------|--------|--------|
| 地连墙弹性模量 | 8.428 | 2 | 16.656 | 19.000 | - |
| 管线材质 | 14.887 | 2 | 29.421 | 19.000 | ※ (显著) |
| 管径 | 376.075 | 2 | 743.231 | 19.000 | ※ (显著) |
| 误差 | 0.51 | 2 | - | - | - |



(a) 地连墙弹性模量因素分析



(b) 原水管因素分析



(c) 管径因素分析

图7 三因素不同水平影响趋势

Fig. 7 The influence of three factors at different levels

2种刚性管材相比沉降值反而要小。PVC管道与刚性管材有所不同，可能是较大的密度差导致。所以管材自身重量是影响沉降值的因素之一。当管材为刚性时，沉降值随刚度的增加有所减小，减小率为1.7%，密度相差不大的管材刚度的增大时可以限制

沉降位移。

管径因素分析图可知，管径的改变对沉降值影响最为明显，0.4 m管径沉降值最小约为-34 mm，均小于0.6 m与0.8 m管径，当管径从0.4 m增加到0.6 m时沉降值增加了37.4%，当从0.6 m增加到0.8 m

时沉降值减小了12.8%左右。

5 结 论

通过对深大基坑工程开挖过程模拟,分析基坑周围原水管沉降与地连墙弹性模量、管线材质以及管径的关系。主要结论有:

(1) 随着地下连续墙强弹性模量的增加,基坑周围管线沉降值减小,但显著性较低, F 比为16.656。通过增加地下连续墙强弹性模量降低管线沉降值效率较低,不建议使用。

(2) 3种管材分析可知PVC相比刚性管材沉降值要小。刚性管材时刚度系数较大的钢管比铸铁管沉降值减小约1.7%左右。管材对管线的沉降值影响次之, F 比为29.421。

(3) 3种因素中管径对于基坑周围管线沉降影响最为明显, F 比达到743.231,与其它2种因素的差值较大。管径为0.4 m时沉降值达到最小值。

(4) 基坑开挖时周围土体位移变化以竖直方向为主,竖向位移对管线造成破坏的风险大于水平位移,所有对于基坑周围管线重点监测其沉降值。实际工程可以根据不同的基坑支护以及管线参数规定不同的沉降预报值。

参考文献

- [1] 关永平,郭龙,李云龙,等. 城市地铁开挖对相邻地下管线影响的数值分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(2): 11-12, 48.
GUAN Yong-ping, GUO Long, LI Yun-long, et al. Numerical analysis of the influence of urban subway excavation on adjacent underground pipelines[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, 8(2): 11-12, 48.
- [2] 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 Da-yong, GONG Xiao-nan. Characteristic analysis of underground pipelines beside flexible joints of deep foundation pit engineering in soft soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(2): 77-80.
- [3] 王洪德,肖杨. 深基坑开挖对邻近埋管扰动影响分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2018, 37(5): 769-775.
WANG Hong-de, XIAO Yang. Analysis of the influence of deep foundation pit excavation on adjacent buried pipeline disturbance[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2018, 37(5): 769-775.
- [4] 杜金龙,杨敏. 深基坑开挖对邻近埋管影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 3015-3020.
DU Jin-long, YANG Min. Analysis of the influence of deep foundation pit excavation on adjacent buried pipelines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 3015-3020.
- [5] 沈玉涛. 软土地区深大基坑分区开挖力学效应数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(6): 23-27.
SHEN Yu-tao. Numerical simulation of mechanical effects of deep and large foundation pits in soft soil area[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, 15(6): 23-27.
- [6] 刘超. 赛达新兴产业园基坑开挖施工对临近建筑影响的分析[D]. 天津: 天津大学, 2017.
LIU Chao. Analysis of the impact of excavation of foundation pits in Saida Emerging Industrial Park on neighboring buildings[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [7] 韩梅,俞涛,徐山岱,等. 邻近地铁基坑围护结构的设计及变形控制措施[J]. 地基处理, 2019, 1(1): 57-62.
HAN Mei, YU Tao, XU Shan-dai, et al. Design and deformation control measures for enclosure structure of foundation pit adjacent to subway[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2019, 1(1): 57-62.
- [8] WANG L W, LIANG Q L. Low complexity optimization for user centric cellular networks via large dimensional analysis[J]. Physical Communication, 2017, 25: 412-419.
- [9] 尹俊. 基坑开挖对邻近原水管影响的三维数值分析[J]. 工程建设与设计, 2016(3): 45-48, 56.
YIN Jun. Three-dimensional numerical analysis of the influence of foundation pit excavation on adjacent raw water pipes[J]. Engineering Construction and Design, 2016(3): 45-48, 56.
- [10] WANG L W, LIANG Q L. Representation learning and nature encoded fusion for heterogeneous sensor networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 39227-39235
- [11] SHI M Y, WANG R, LIU E W, et al. Deep reinforcement learning based computation offloading for mobility-aware edge computing[C]//International Conference on Communications and Networking in China, Cham: Springer, 2019: 53-65.

[12] 姬奎香. 基于 ABAQUS 的基坑开挖对邻近管线变形影响的数值分析[D]. 天津: 天津城建大学, 2014.

Ji Kui-xiang. Numerical analysis of the influence of foundation pit excavation on the deformation of adjacent pipelines based on ABAQUS[D]. Tianjin: Tianjin Urban Construction University, 2014.

[13] 蒋宇峰. 舟山地区典型基坑开挖二维有限元分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.

JIANG Yu-feng. Two-dimensional finite element analysis of typical foundation pit excavation in Zhoushan area[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.

【简 讯】

2020年（第九届）国际桥梁与隧道技术大会暨展览会

“2020（第九届）国际桥梁与隧道技术大会”将于2020年9月在广州举办。届时大会将围绕国家重大工程规划建设、智能运维、安全保障等一系列关键问题进行深入研讨，推动前沿科学研究和信息技术融合创新，加快新技术、新工艺、新装备的转化应用，促进我国桥隧基础设施产业转型升级和高质量发展，努力将我国建设成为“桥隧强国”，提升国际影响力和知名度。值此机会，组委会诚邀业界专家代表拨冗莅临，共襄盛会！

一、会议主题

创新引领，建养并重

二、时间和地点

时间：2020年9月23日—25日

地点：广州

三、组织机构

指导单位：中国工程院土木、水利与建筑工程学部、中国土木工程学会

主办单位：上海市土木工程学会、同济大学、广东省公路学会、广东省土木建筑学会、江苏省土木建筑学会、上海

市工程建设质量管理协会

官方网站：www.IBTCevents.com

四、会议内容

- (1) 粤港澳大湾区战略交通规划
- (2) 川藏铁路建设关键技术及重大挑战
- (3) 深中通道关键技术与创新
- (4) 重大桥隧工程前沿热点介绍
- (5) 桥隧设计和施工技术创新
- (6) 拟在建桥隧工程最新进展
- (7) 桥隧工程智能运维和安全保障
- (8) 桥隧工程结构安全与健康监测
- (9) 新技术、新材料在桥隧建设和运维中的

应用

- (10) 大跨度、特殊结构桥隧施工工艺与装备
- (11) 既有桥隧工程病害整治技术与装备
- (12) 桥隧工业化、信息化现状及趋势

五、组委会秘书处联系方式

联系人：王翔

联系电话：021-51757707

电子邮件：xiang.wang@wintimechina.com