

地铁深基坑施工对周边管线影响数值分析*

施有志^{1,2}, 葛修润^{2,3}, 李秀芳¹, 林树枝⁴

- (1. 厦门理工学院土木工程与建筑学院, 福建 厦门 361021;
2. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240;
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071;
4. 厦门市建设局, 福建 厦门 361003)

摘要: 以厦门地铁一号线某深基坑的实测资料为基础, 采用考虑土体小应变刚度特性的有限元方法, 对基坑施工对邻近管线影响规律进行参数分析; 结合规范中的变形控制标准, 划分了基坑开挖对邻近管线影响分区。研究表明: 相比于管线距基坑的水平距离, 管线埋深对最大沉降量的影响更大; 管线最大变形与坑外地层变形有较大的相关性, 管-土之间的刚度对土体位移的限制作用有限; 管线轴力随其距基坑的水平距离的减小而有所增大; 管线轴线刚度越大, 截面积越大, 产生的轴力也越大。综合考虑基坑外管线的水平距离和埋深, 基坑开挖对邻近管线的影响可划分为主要影响区(I)、次要影响区(II)、一般影响区(III)和微弱影响区(IV)。

关键词: 小应变刚度模型(HSS); 地铁工程; 深基坑; 管线; 数值模拟; 影响分区

中图分类号: TU435 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2017)06-0083-11

Numerical analysis on the influence of deep metro excavation construction on adjacent pipelines

SHI Youzhi^{1,2}, GE Xiurun^{2,3}, LI Xiufang¹, LIN Shuzhi⁴

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xiamen University of Technology, Xiamen 361021, China;

2. Shanghai Jiao Tong University, School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai 200240, China;

3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hubei 430071, China;

4. Xiamen Construction Bureau, Xiamen 361003, China)

Abstract: The deep metro excavation will lead to the deformation of adjacent pipelines. Knowing the influence of excavation construction on pipelines has significant meanings for controlling the deformation of pipelines effectively and reducing construction risks. Based on the actual measurement data of some excavation of Xiamen line 1, parametric analysis is applied to the influence of excavation on adjacent pipelines by using the finite element method with the consideration of soil small strain stiffness characteristics. The influential zone of adjacent pipelines is divided combined with control standards on deformation. The study shows that burial depth of pipelines, compared to the horizontal distance of which from excavation, has a larger influence to the maximum settlement of pipelines. The maximum deformation of pipelines has

* 收稿日期: 2016-08-27

基金项目: 福建省自然科学基金(2016J01271); 福建省住房和城乡建设厅科学技术项目(2016-K-26); 厦门市建设局科技项目(XJK-2017-1-3)

作者简介: 施有志(1976年生), 男; 研究方向: 岩土与地下工程; E-mail: 2013110907@xmut.edu.cn

considerable correlation to stratum deformation outside the excavation. The stiffness between pipeline and soil has limited restrictions to the soil displacement. The axial force will increase as the horizon distance from excavation declines. The larger axis stiffness and sectional area are, the bigger the axial force is. With overall consideration of pipelines horizontal distance, burial depth and other factors, the influence of excavation on adjacent pipelines can be divided into main influence area (I), minor influence area (II), general influence area (III) and weak influence area (IV).

Key words: HS small model (HSS); metro engineering; deep foundation pit; pipeline; numerical simulation; partition of impact

目前, 我国的轨道交通建设正处于蓬勃发展阶段, 很多城市形成了四通八达的轨道交通网络。深基坑开挖对邻近管线的影响本质上是因为开挖卸荷造成周边土体变形, 导致埋设于土体内部的管线产生附加应力。当附加应力超出抗拉强度时, 就可能产生断裂破坏; 另外, 当管线接头转角过大, 管线的不均匀沉降, 将会使管线不能保持封闭状态而造成开裂破坏。管线的任何破坏都可能引发电力中断、煤气泄露、天然气破裂爆炸等事故^[1-2], 甚至可能由于管线渗水软化土体, 造成坍塌事故^[3]。针对深基坑施工对邻近管线的影响问题, 国内外学者采用室内试验、现场测试、解析及数值模拟等方法进行了一系列的研究。如 Yimsiri 等^[4]用离心机模型和有限元方法分析了砂土中管线在深埋时水平和竖向的土与管线之间相互作用; Istanbuloglu 等^[5]采用试验和数值分析法分别研究了管土相互作用。受试验条件及费用的限制, 室内试验的研究成果较少。有限元模型能模拟复杂的地质与工程条件, 可详细计算基坑开挖步骤、管线埋深、管线与基坑距离以及基坑刚度等不同因素对管线变形的影响^[6-9], 还可模拟管线接口等细部构造^[10]、考虑管道和土的相对位移影响^[11]以及土与管线的相互作用^[12]。除有限元之外, 有限差分法等数值方法也在管线变形研究中有所应用^[13]。为了得出管线变形的理论解析解, 避免建模的繁琐, 有的学者将管线被视为弹性地基梁, 通过确定弹性地基梁上基坑开挖引起的附加荷载来进行求解, 并得出各种计算公式^[14-15], 如刘红岩等^[16]基于实测地表位移的基坑开挖引起临近地下管线位移的计算。解析公式由于做较多的简化, 在实际应用中仍有待检验。现场的实测研究能较为客观的反映管线的变形, 葛照国^[17]通过现场实测研究深基坑降水对邻近管线的沉降影响。

综合目前研究现状可知, 在数值模拟分析中, 土体本构一般采用参数较少的摩尔-库伦或修正的剑桥模型为多, 未考虑土体小应变特性, 由此产生

的结果会导致基坑位移变形偏大, 弯矩偏小^[18-19]。如邵羽等^[18]通过模拟指出当土体本构选用 MCC 模型时地表最大沉降和最大弯矩为 HSS 模型时的 1.2 和 1.3 倍。较多的研究表明, 小应变土体硬化本构模型是能够较为准确地反映基坑工程的小应变力学响应特性^[20-24]; 王卫东等^[22]的研究表明 HSS 模型可以同时考虑土体剪切硬化和压缩硬化, 而且还可以考虑初始剪切模量 (G_0) 在微小应变范围内随阈值剪切应变 (γ_0) 衰退的行为, 并采用该模型对上海地区若干典型基坑工程进行研究, 发现数值与实测值吻合得较好。但是目前鲜见采用小应变模型 (HSS) 对深基坑施工引起邻近管线的影响分析, 对管线影响程度的分区研究也较少。基于此, 本文以厦门市轨道交通一号线某地铁车站深基坑工程为背景, 建立考虑土体小应变刚度特性的有限元分析模型, 计算地表沉降及管线变形, 通过与实测对比验证了模型的正确性; 在此基础上, 选择 3 种不同管径及材质的管线, 研究管线距基坑的水平位移、埋深对管线变形及受力的影响; 结合规范对管线变形控制标准, 提出了基坑开挖对邻近管线变形的影响区划分, 从而对邻近管线的基坑施工可能对管线产生的影响进行预先评估, 有利于提前指导基坑方案和管线保护措施制定。

1 工程概况

1.1 深基坑设计概况

厦门轨道交通一号线城市广场站为地下二层岛式车站, 车站主体基坑长 198.6 m, 标准段基坑宽 21.7 m, 基坑深度 16.2 ~ 17.7 m。场地工程地质情况复杂, 岩层分布软硬不均, 上软下硬, 且起伏较大。围护桩采用 $\Phi 1\ 000 @ 1\ 200$ 钻孔灌注桩 (C35), 插入深度为 7 ~ 8 m; 设四道内支撑, 第一道为钢筋混凝土支撑 (断面尺寸 800 mm \times 800 mm \times 800 mm, 间距 9.7 m, C45), 其余支撑为 $\Phi 609$ 、长度 21.7 m、 $t = 16$ mm 的钢管支撑; 四周采用 $\Phi 800 @ 1\ 200$ 三重管旋喷桩止水帷幕。标准段

围护结构剖面见图 1。

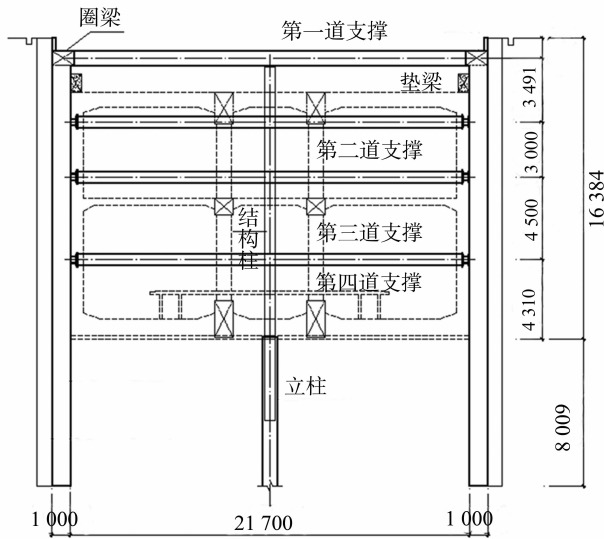


图 1 围护结构剖面图 (mm)
Fig. 1 Profile of retaining structure

1.2 邻近管线基本信息

基坑开挖影响范围包括三纵、两横共 5 条地下管线，其中影响比较大的为沿基坑纵向两侧分布的两条给水管和一条燃气管，与基坑之间的空间相对位置关系见图 2。

3 条管线的规格、材质、材料属性及埋深、距坑边距离等信息汇总，统一列于表 1 中。

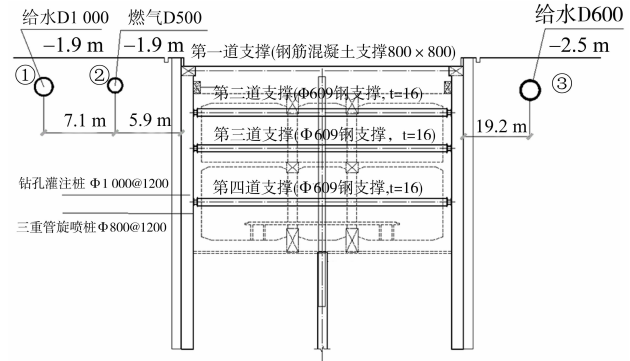


图 2 基坑与周边地下管线相对位置关系
Fig. 2 Relative position of excavation and adjacent underground pipelines

表 1 城市广场站基坑周边地下管线基本信息

Table 1 Basic information of pipelines adjacent to City Square Station excavation

编号	1	2	3
相对基坑位置	基坑西侧	基坑西侧	基坑东侧
距坑边水平距离/m	13.0	3.4 ~ 6.0	17.5 ~ 19.5
埋深/m	0.96 ~ 1.90	1.36 ~ 1.90	1.59 ~ 2.50
用途	给水	燃气	给水
规格	DN1 000	DN500	DN600
材质	混凝土 (C30)	铸铁	铸铁
壁厚/mm	100.0	9.0	9.9
重度/(kN · m ⁻³)	25.0	70.5	70.5
抗拉强度 (标准值)/MPa	2.01	420	420
抗拉强度 (设计值)/MPa	1.43	230.00	230.00
弹性模量/MPa	3.0 × 10 ⁴	1.6 × 10 ⁵	1.6 × 10 ⁵

2 三维数值分析模型

2.1 土体模型及计算参数

土体模型采用小应变土体硬化高级本构模型 (HSS)，得出土体模型的计算参数如表 2。

如表 2 所示模型共有 10 个计算参数，包括：重度 γ 、三轴固结排水剪切实验的参考割线模量 E_{50}^{ref} 、固结实验的参考切线模量 E_{oed}^{ref} 、三轴固结排水卸载 - 再加载试验的参考卸载再加载模量 E_{ur}^{ref} 、有

效粘聚力 c'_{ref} 、有效内摩擦角 φ' 、界面折减系数 R_{inter} 和渗透系数 k 。综合地勘报告提供的参数，并根据实测数据进行优化。

2.2 地层模型

考虑到基坑纵向较长，基坑纵向两端支护形式、施工方法相同，且地层分布变化不大，为提高计算效率，选取 6 个代表性钻孔资料揭示的地层分布信息作为建模依据，见表 3。

表 2 土体 HSS 模型的参数
Table 2 Soil HSS model's parameters

参数	量符号	单位	人工填土	残积砂质黏性土	淤泥质土	粉质黏土
重度	γ	kN/m^3	18	18.5	16.7	18.4
刚度	$E_{\text{so}}^{\text{ref}}$	MPa	6	21	2.5	5
	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	MPa	6	21	2.5	5
	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	MPa	30	63	12.5	25
强度	c'_{ref}	kPa	25	31	13	37
	φ'	($^{\circ}$)	15	23	12	15
小应变	G_0^{ref}	MPa	30	30	100	30
	$\gamma_{0.7}$	10^{-3}	0.3	0.352	0.25	0.15
界面折减系数	R_{inter}		0.5	0.75	0.5	0.5
渗透系数	k	m/d	0.500	0.005	0.005	0.003

表 3 城市广场站基坑钻孔土层分布

Table 3 City Square Station excavation's drilling stratum distribution

钻孔编号	05	06	B9	17	18
人工填土	2.4	2.6	2.8	4.0	2.3
粉质粘土	4.5	4.4	3.2	5.0	7.7
淤泥质土	6.9	6.8	6.3	5.4	8.1
粉质粘土	9.6	8.0	9.2	5.8	8.5
残积土	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0

假设土体均匀连续, 钻孔之间土体按照线性插值, 构建的三维数值模型如图 3 所示。初始地下水位取 3 m, 模型长宽高为 140 m \times 80 m \times 30 m。模型的边界条件为: 四周侧面限制水平位移, 模型底部设置固定约束。

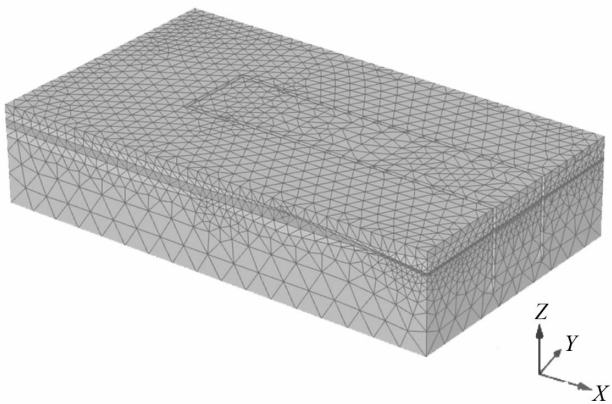


图 3 城市广场站基坑三维数值模型

Fig. 3 City Square Station excavation's three dimensional numerical model

2.3 围护及支撑结构模拟

基坑围护结构采用板单元模拟, 通过刚度等效确定计算参数: 厚度 $d=0.833$ m, 杨氏模量 $E=30 \times 10^6$ kN/m^2 , 泊松比 $\nu_{12}=0.2$, 剪切模量 $G_{12}=12.5 \times 10^6$ kN/m^2 。围护结构两侧与土体之间采用零厚度接触面单元模拟土与结构相互作用, 接触面参数通过对与结构接触的土体强度和刚度参数进行一定程度的折减确定, 折减系数见表 2。混凝土支撑采用梁单元 (线单元) 模拟, 按其实际尺寸和混凝土等级确定计算参数: 截面面积 $A=0.64$ m^2 , 杨氏模量 $E=30 \times 10^6$ kN/m^2 , 惯性矩 $I_2=I_3=0.034$ m^4 。钢支撑采用点对点弹簧单元 (线单元) 模拟, 按其实际尺寸和钢材强度确定计算参数: $E_A=920 \times 10^3$ kN/m 。

2.4 地下管线建模

周边 3 条地下管线截面属性各不相同, 距基坑的水平距离及其埋深也有所差异, 可以从管线截面尺寸、材质、与基坑相对位置等多个方面反映基坑开挖施工过程对周边环境的扰动效应。假设地下管线满足以下几个条件: ①假设地下管线连续, 无原生缺陷、破损; ②不考虑管道的内压力及管内流体, 假设给水管综合重度与土体重度相当; ③将地下管线按线单元进行处理, 不考虑管道横截面尺度上的径向和切向变形及受力。

采用 PLAXIS 3D 软件提供的 embedded beam 单元模拟地下管线。根据表 1 及其他相关资料, 将上述 3 条地下管线引入第 3.2 节建立的地层模型中, 如图 4 所示。其中, ①为 DN1 000 给水管, ②为 DN500 燃气管, ③为 DN600 给水管。DN1 000 的给水管、DN500 燃气管和 DN600 的给水管的杨氏模量分别为 30.0×10^6 , 160.0×10^6 和 160.0×10^6 kN/m^2 。

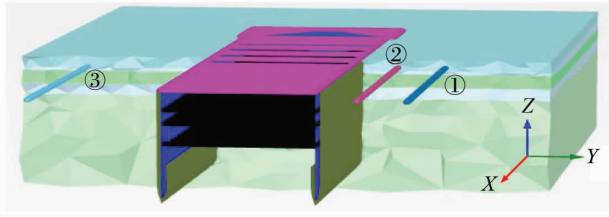


图 4 地层、基坑支护及地下管线的三维模型

Fig. 4 Three dimensional numerical model of stratum, excavation support and pipelines

2.5 基坑施工阶段模拟

根据实际施工过程进行模型施工阶段设置，基坑施工过程及相应模型状态见表 4。模拟过程中，考虑了坑内降水的影响，即坑内水头及孔隙水压力场的变化，能较全面反应基坑开挖时支护结构变形随开挖时间及位置而变化的主要影响因素。

表 4 数值计算的施工工况

Table 4 Construction case by numerical calculation

施工阶段	模拟内容
初始工况	初始地应力平衡
工况 1	整体开挖到 4.0 m, 设置第一道支撑
工况 2	设置第二道支撑, 并施加 400 kN 预应力
工况 3	1~8 轴开挖到 7.5 m
工况 4	设置第三道支撑, 并施加 900 kN 预应力
工况 5	8~12 轴开挖到 12.5 m
工况 6	开挖 + 降水到 12.5 m
工况 7	设置第四道支撑, 并施加 1000 kN 预应力
工况 8	1~8 轴开挖到 16.4 m + 降水到 16.4 m
工况 9	整个基坑开挖到底

2.6 计算结果与实测验证

2.6.1 地表沉降计算与实测验证 所研究剖面与监测断面的对应关系如图 5 所示。车站中心桩号为 YDK9 + 039.549，轴线 4 距车站中心 52 m，轴线 17 距车站中心 69 m，轴线 20 距车站中心 94 m；轴 1-5 每相邻两轴之间的距离依次为 55、78、90.5、85 m；轴 5-14 每相邻两轴之间的距离均为 97.5 m。深基坑整体开挖支护施工完毕后，现场实测地表沉降云图，并与三维数值模拟计算结果进行对比。如图 6 所示，三维数值计算得到的地表沉降变形特征和最大沉降量都与现场监测结果相吻合。将三维数值模型中 A-A' 剖面的地表沉降值与 DBC-4 和 DBC-16 现场实测沉降值进行对比，沉降计算值与实测值的极差及标准差见表 5。地表沉降计算值与实测值之间的标准差处于 15% 以内，表明

三维数值模拟能够得到与现场实测值相符的结果。
 2.6.2 地下管线变形计算与实测验证 根据图 2，此处 in 基坑东西两侧各取一条管线的沉降实测值与计算值进行对比，如表 6 所示。可见，地下管线沉降计算值与实测值的相对误差在 20% 左右。应该注意到，数值模拟计算得到的沉降值是接近最终沉降量的，而沉降实测值则只是监测到 2015 年 9 月份的沉降值，所以计算值总体上比现有的实测值偏大是合理的。这基本验证了数值模拟的合理性。

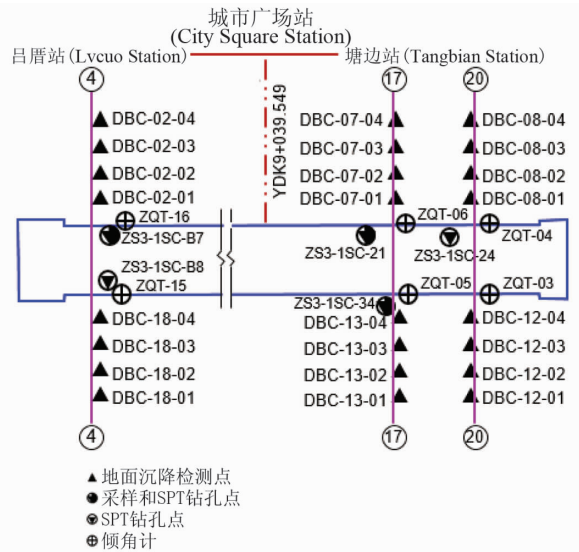


图 5 轴线与监测点位置关系图

Fig. 5 Position relationship between axis and monitoring points

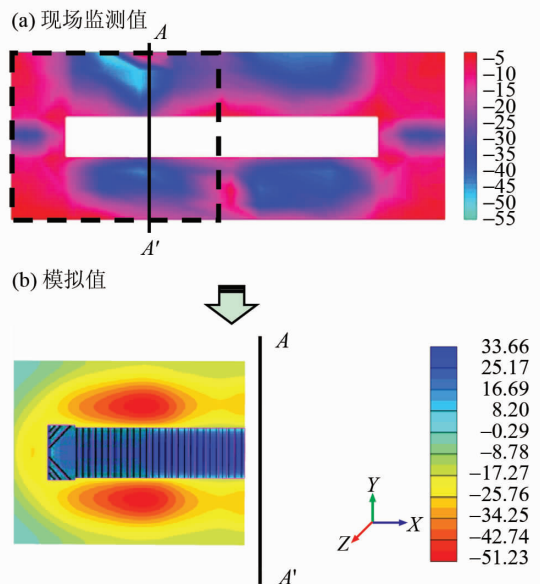


图 6 城市广场站基坑地表沉降云图

Fig. 6 City Square Station excavation's surface subsidence cloud picture

表 5 地表沉降计算值与现场实测值误差对比

Table 5 Error comparison between surface subsidence calculation value and field measurement value

测点	监测 /mm	计算 /mm	极差 R /%	标准差 σ /%
DBC-16-4	-15.64	-13.82	-12	13.74
DBC-16-3	-23.82	-26.12	10	
DBC-16-2	-28.34	-26.42	-7	
DBC-16-1	-30.25	-31.04	3	
DBC-4-1	-26.01	-29.74	14	
DBC-4-2	-28.51	-29.22	2	
DBC-4-3	-25.56	-27.34	7	
DBC-4-4	-16.22	-13.67	-16	

3 基坑周边地下管线参数变化分析

城市地下管线种类繁多,用途、材质和尺寸等差异较大,且分布广泛。结合地层-管线-基坑的三维数值模型,研究管线 1、管线 2 和管线 3 与基坑的水平距离及埋深对管线变形的影响,以扩展研究成果的适用范围。

3.1 水平距离的影响

3.1.1 数值模型 管线与基坑的不同水平距离变化如表 7 所示,地下管线距基坑边界的最远距离在相当于基坑两倍深度的水平范围之内,基本考虑了基坑开挖影响范围内的各种情况。三维模型如图 7 所示。

表 6 管线沉降监测点

Table 6 Pipeline settlement monitoring points

管线类型	测点编号	测点距基坑 南端水平距离/m	基坑开挖完毕后 测点沉降实测值/mm	基坑开挖完毕后 测点沉降计算值/mm	计算值与实测值 相对误差/%
管线 1:	GXC-11	66	-35.48	-34.29	3.35
给水管 DN1 000	GXC-12	94	-21.71	-26.45	21.83
管线 3:	GXC-15	48	—	-29.72	—
给水管 DN600	GXC-16	72	-18.00	-21.91	21.72

表 7 地下管线的参数

Table 7 Parameters of underground pipelines

参数	地下管线的类型		
管径	DN500	DN600	DN1 000
材质	铸铁	铸铁	混凝土
用途	燃气	给水	给水
水平距离/m	5, 10, 15, 20, 25	5, 10, 15, 20, 25	5, 10, 15, 20, 25
埋深/m	-	-	1, 6, 11

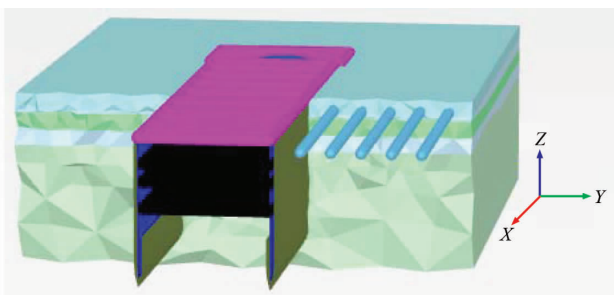


图 7 管线距基坑不同水平距离三维模型

Fig. 7 Three dimensional model for pipeline at different horizontal distances away from excavation

3.1.2 计算结果分析 图 8 为 DN1 000 的混凝土管的管线变形-水平距离变化曲线。图中,管线距基坑的水平距离从 36 m 降到了 16 m。

从图 8 来看,管线位移极值并未出现在水平距离为 16 m 的管线中,而是出现在距基坑的水平距离为 21~26 m 的管线中,这表明管线最大变形与坑外地层变形有关。经计算发现,距基坑的水平距离不同时, DN500 和 DN600 的铸铁管与 DN1 000 的混凝土管的变形差别很小,基本可以忽略。这表

明虽然管 - 土之间存在刚度差异, 但由于管线横截面相对地层分布来说非常小, 对于土体位移的限制作用也十分有限。

图 9 - 11 为管线轴力随水平距离的变化。可以看出, 管线轴力随其距基坑的水平距离的减小而有所增大; 管线材质、横截面尺寸对管线轴力有一定影响, 管线轴线刚度越大, 截面积越大, 产生的轴力越大。

3. 2 埋深的影响

3.2.1 数值模型 选择距基坑 10 m 处直径 DN1 000 混凝土管, 研究埋深管埋深为 1, 6 和 11 m 时的整体变形情况。不同埋深时的三维模型如图 12 所示。

3.2.2 模拟结果 图 13 为不同埋深时的整体变形情况。从图中可以看出, 随着埋深的变化, 管线的水平位移量变化不大, 管线沉降则发生显著变化;

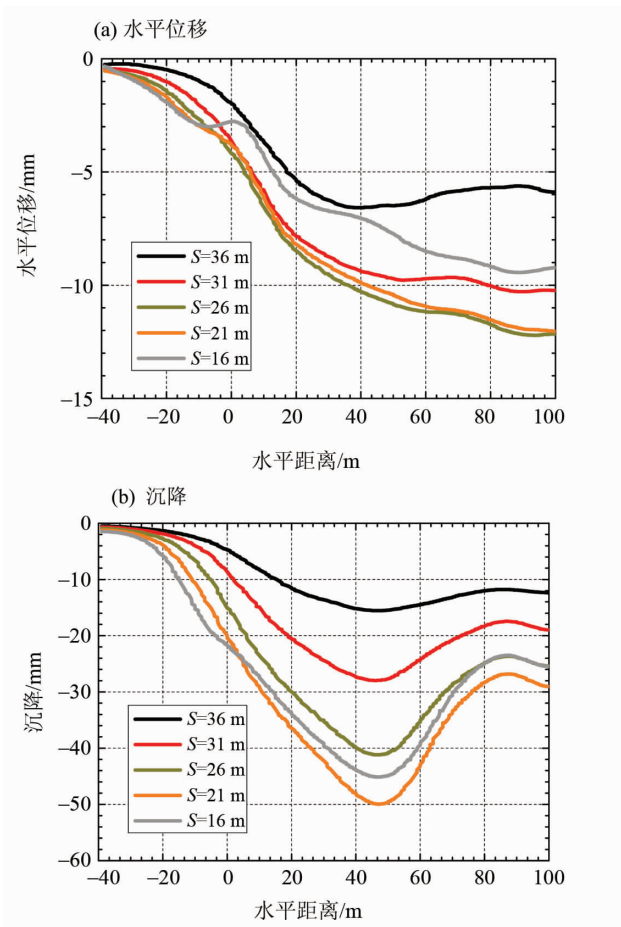


图 8 DN1 000 混凝土管整体变形随其到基坑水平距离的变化

Fig. 8 The change of DN1 000 concrete pipe entire deformation with with different horizontal distance from excavation

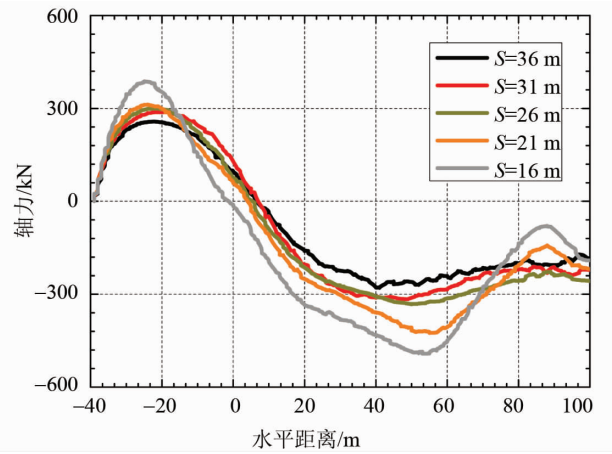


图 9 DN1 000 混凝土管轴力随其到基坑水平距离的变化
Fig. 9 The change of DN1 000 concrete pipe axial force with different horizontal distance from excavation

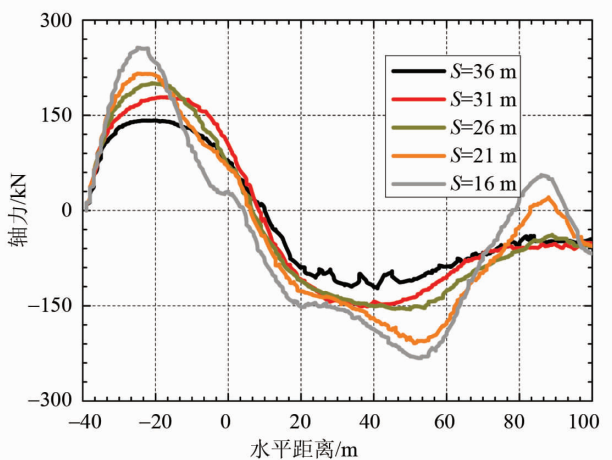


图 10 DN500 铸铁管轴力随其到基坑水平距离的变化
Fig. 10 The change of DN500 cast iron pipe axial force with different horizontal distance from excavation

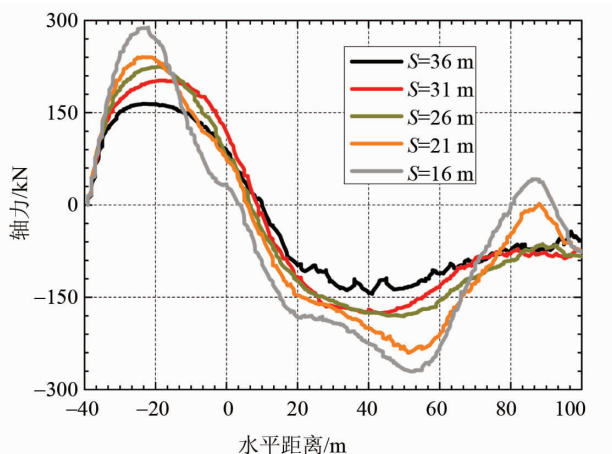


图 11 DN600 铸铁管轴力随其到基坑水平距离的变化
Fig. 11 The change of DN600 cast iron pipe axial force with different horizontal distance from excavation

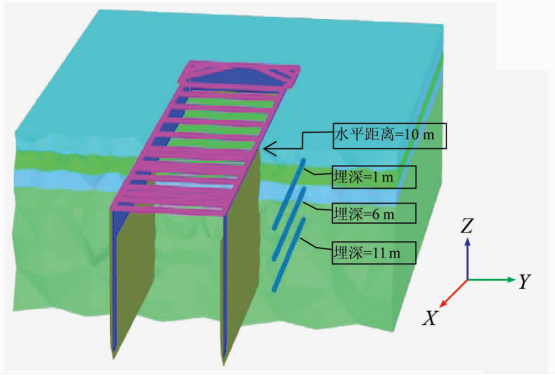


图 12 不同埋深时的三维模型

Fig. 12 Three dimensional model with different burial depths

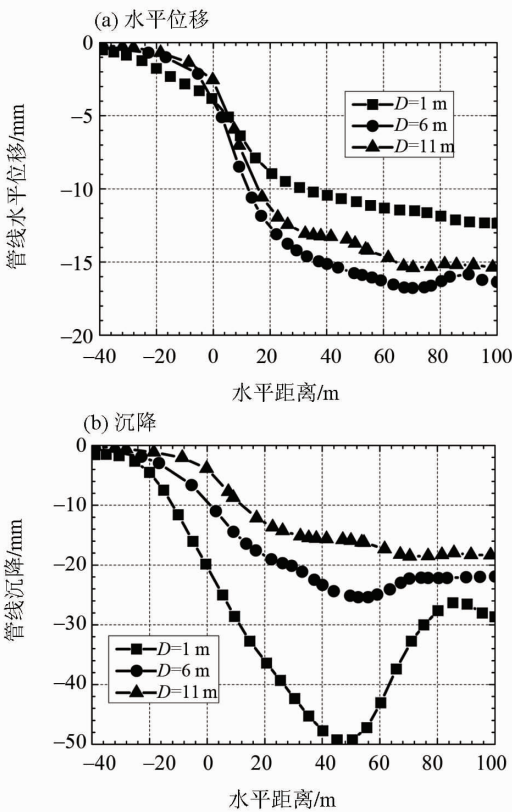


图 13 DN1 000 混凝土管的整体变形随其埋深的变化 (距基坑的水平距离为 10 m)

Fig. 13 The change of DN 1 000 concrete pipe entire deformation with different the burial depths (at a horizontal distance of 10 m from excavation)

埋深较浅时 ($D = 1\text{ m}$) 最大沉降量比埋深较深时 ($D = 11\text{ m}$) 增大了约 67%。

图 14 为管线轴力随管线埋深的变化曲线。如图 14 所示, 随着管线埋深不同, 管线轴力分布有所变化, 最大压力总体不变; 且最大拉力随着埋深的增大而增大。总体来看, 管线轴力随埋深的变化未呈现明显的规律性变化。因数值模拟中采用了小

应变土体硬化本构模型, 随着埋深的增大, 土体刚度会随着围压的增大而增大, 导致管土刚度差异有所变化。因此, 在深基坑施工过程中, 管线轴力变化体现出出不规律性。

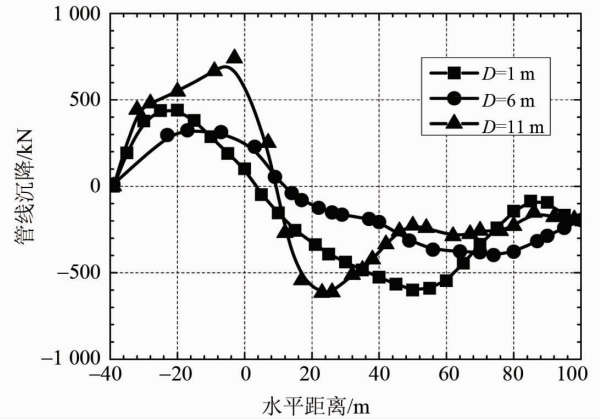


图 14 管线轴力随其埋深的变化

Fig. 14 The change of pipeline axial force with with different the change of burial depths

3.3 相对敏感度分析

考虑水平距离和管线埋深两种因素的影响, 距基坑水平距离取 10, 5, 5 m, 管线埋深取 1, 6, 11 m, 计算分析各施工阶段时的管线最大沉降量的相对敏感度。不同水平距离和埋深时的三维模型如图 15 所示。

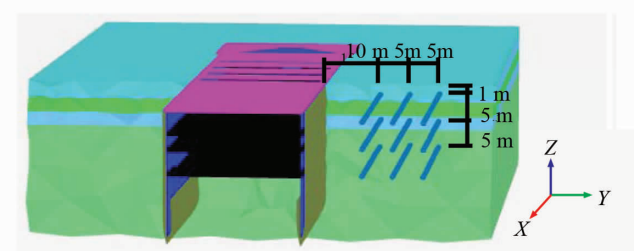


图 15 不同水平距离和埋深时的三维模型

Fig. 15 The three dimensional model withfor the consideration of different horizontal distances and burial depths

参数敏感度性分析中, 敏感比 η_{SR} 。是输出结果与输入参数变化百分比的比值, 其定义式为:

$$\eta_{SR} = \frac{\left[\frac{f(x_{L,R}) - f(x)}{f(x)} \right] \times 100\%}{\left[\frac{x_{L,R} - x}{x} \right] \times 100\%} \quad (1)$$

式中, $f(x)$ 是输入为标准参数时控制指标的输出变量, $f(x_{L,R})$ 是改变一个输入值时所对应的控制指标的输出值。 x 和 $x_{L,R}$ 代表输入变量。整个敏感性分析需要执行 $2N + 1$ 次计算, 每一次计算输入一组变量 $x_{L,R}$, N 是需要考虑的参数的数量。根据敏感比, 可以获得敏感系数 η_{SS} :

$$\eta_{SS} = \eta_{SR} \frac{(\max x_R - \min x_R)}{x} \quad (2)$$

根据参数敏感性分析得原理, 以不同水平距离和埋深条件下管线得最大沉降量为指标, 计算得到各施工阶段时管线最大沉降量的相对敏感度, 如图 16 所示。

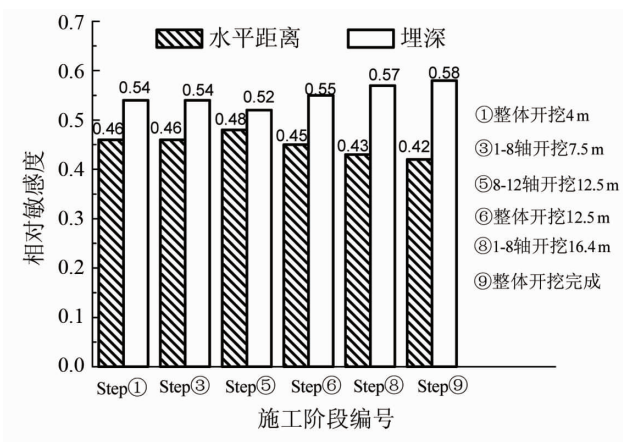


图 16 水平距离和埋深对管线最大沉降的相对敏感度

Fig. 16 The relative sensitivity of horizontal distance and burial depth to pipeline maximum settlement

从图 16 可以看出, 对于管线最大沉降量而言, 管线埋深比其距基坑的水平距离敏感度略大, 且管线埋深的相对敏感度随着基坑开挖深度增大而增加, 水平距离的敏感度则随之下降。通过上述分析可以看出, 在地表沉降最大的位置管线变形最大。这是因为厦门地区约 10 m 深度以内为稍软地层, 约 10 m 深度以下为稍硬的地层, 基坑开挖使得外侧形成一个“类三角形”滑移区域, 位于稍软地层(浅埋)的管线变形较大; 且, 当浅埋管线位于地表沉降槽的峰值位置时变形最大。

4 地下管线变形的影响分区

《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911 - 2013)^[25] (以下简称“城轨监测规范”)将基坑施工对周围岩土体扰动和周边环境影响的程度及范围, 划分为主要、次要和可能 3 个工程影响

分区, 如图 17 所示。

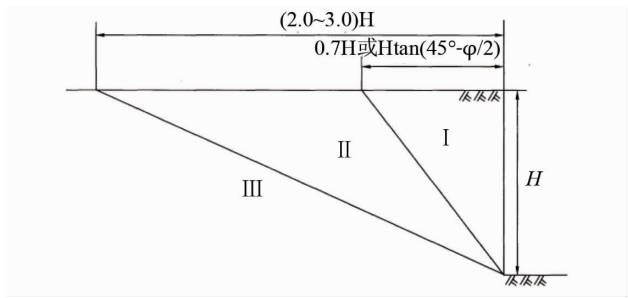


图 17 基坑工程影响分区^[25]

Fig. 17 Excavation construction influentialinfluencing partition^[25]

对本基坑算例而言, 基坑施工的主要影响区地表宽度为 $H \tan(45^\circ - \varphi/2) = 16.5 \times \tan(45^\circ - 15^\circ/2) = 12.66$ m, 次要影响区地表宽度为 $3H = 3 \times 16.5 = 49.5$ m, 在此范围之外为一般影响区。依据坑外不同距离处管线的位移结果(图 8), 距基坑 30 m (1.82H) 以内的管线最大沉降超过 30 mm, 距基坑 30 ~ 34 m (1.82H ~ 2.06H) 范围内的管线最大沉降处于 20 ~ 30 mm 区间, 距基坑 34 ~ 39 m (2.06H ~ 2.36H) 范围内管线最大沉降处于 10 ~ 20 mm 区间, 距基坑 39 m (2.36H) 以外的管线沉降小于 10 mm。基坑开挖深度处于 15 ~ 20 m 范围时, 煤气管线允许沉降 10 mm, 其他管线允许沉降 20 mm。据此, 可将基坑施工影响分区调整为四个区, 即主要影响区 (I)、次要影响区 (II)、一般影响区 (III) 和微弱影响区 (IV), 距坑边水平距离依次为 $\leq 1.82H$ 、 $1.82H \sim 2.06H$ 、 $2.06H \sim 2.36H$ 和 $> 2.36H$ 。

依据坑外 10 m 处不同埋深管线的位移结果(图 13), 可以得到管线沉降 30、20 和 10 mm 时所对应的埋深为 5 (0.30H)、10 (0.61H) 和 16.5 m (1.00H)。同样的, 基坑施工影响分区为主要影响区 (I)、次要影响区 (II)、一般影响区 (III) 和微弱影响区 (IV), 埋深依次为 $\leq 0.30H$ 、 $0.30H \sim 0.61H$ 、 $0.61H \sim 1.00H$ 和 $> 1.0H$ 。综合考虑基坑外管线水平距离及埋深因素, 调整后的影响分区如图 18 所示。

5 结 论

本文通过全三维基坑降水开挖支护及流固耦合分析, 获得深基坑降水开挖支护三维空间效应特征, 在考虑不同管线材质、截面、距离等因素的前提下, 得到了基坑开挖对管线的影响特征, 并针对

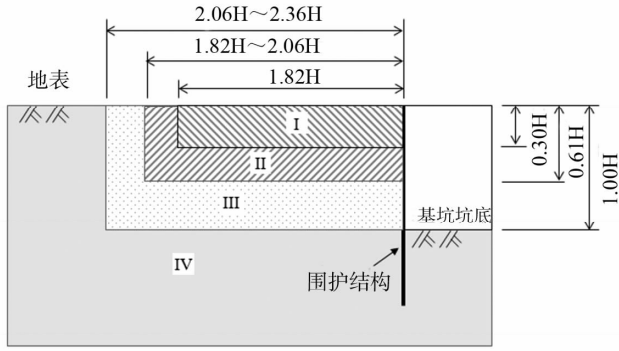


图 18 邻近管线基坑施工影响分区

Fig. 18 Adjacent pipeline excavation construction influential partitioning

最不利管线的变形区域, 提出影响分区, 主要结论如下:

1) 相对于基坑的水平距离而言, 管线最大变形与坑外地层变形具有较大的相关性, 虽然管-土之间存在刚度差异, 但由于管线横截面相对地层分布来说还是非常小, 对土体位移的限制作用十分有限; 管线轴力随其距基坑水平距离的减小而有所增大, 管线材质、横截面对基坑开挖影响下管线轴力有一定影响, 管线轴线刚度越大, 产生的轴力越大。

2) 管线水平位移量值随埋深变化不大, 管线沉降则随埋深不同发生显著变化; 管线轴力随埋深的变化未发现明显规律性。由于三维模拟中使用了小应变土体硬化高级本构模型, 随埋深增大, 土体刚度亦随围压增大而增大, 导致管土刚度差异有所变化, 在深基坑复杂施工过程影响下, 管线轴力变化体现出出不规律性。

3) 对于基坑开挖施工过程中引起的管线最大沉降量而言, 管线埋深比其距基坑水平距离的影响敏感度略大, 且管线埋深的相对敏感度随着基坑开挖深度增大而增加, 水平距离的敏感度则随之下降。

4) 综合考虑基坑外管线水平距离及埋深因素, 将基坑开挖对邻近管线的影响分区调整为: 主要影响区 (I)、次要影响区 (II)、一般影响区 (III) 和微弱影响区 (IV), 距坑边水平距离依次为 $\leq 1.82H$ 、 $1.82H \sim 2.06H$ 、 $2.06H \sim 2.36H$ 和 $> 2.36H$; 埋深依次为 $\leq 0.30H$ 、 $0.30H \sim 0.61H$ 、 $0.61H \sim 1.00H$ 、 $> 1.00H$ 。

参考文献:

[1] 方华, 李国成, 丁烈云, 等. 隧道竖井施工对地下管

线影响的数值模拟[J]. 铁道工程学报, 2008(11): 62-65.

FANG Hua, LI Guocheng, DING Lieyun, et al. Numerical simulation for the effect of tunnel shaft construction on buried pipelines[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008(11): 62-65.

[2] 王文辉. 盾构隧道下穿西气东输管道保护方案[J]. 铁道工程学报, 2012(10): 70-74.

WANG Wenhui. Protection scheme for shield tunnel under-passing west-east gas pipeline [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012(10): 70-74.

[3] 李兴高, 王霆. 管线渗漏诱发地铁工程事故的安全控制技术[J]. 中国安全科学学报, 2010(5): 125-130.

LI Xinggao, WANG Ting. Study on safety control technologies of pipeline leakage-induced accidents during metro construction [J]. China Safety Science Journal, 2010(5): 125-130.

[4] YIMSIRI S, SO G K, YOSHIKAWA I K, et al. Lateral and upward soil-pipe interactions in sand for deep embedment conditions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(8): 830-842.

[5] ISTANBULLUOGLU E, TARBOTON D G, PACK R T, et al. Experimental and numerical analysis of soil-pipe interaction[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(12): 1292-1299.

[6] 李大勇, 龚晓南, 张土乔. 软土地基深基坑周围地下管线保护措施数值模拟[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.

[7] 王磊, 周健, 贾敏才, 等. 相邻深基坑开挖对地下管线影响因素的分析[J]. 工业建筑, 2008, 38(10): 65-70.

WANG Lei, ZHOU Jian, JIA Mincai, et al. Analysis of effect factors on buried pipeline due to excavation of two adjacent foundations[J]. Industrial Construction, 2008, 38(10): 65-70.

[8] 杨旭, 宋宏伟, 秦明宇. 深基坑开挖对附近直埋管线影响的数值分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(3): 19-24.

YANG Xu, SONG Hongwei, QIN Yuening. Numerical analysis for influence of deep excavation on adjacent unprotected underground pipelines [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2011, 9(3): 19-24.

[9] 马石城, 李杰辉, 印长俊. 深基坑开挖对周边管线位移的影响分析[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2014, 36(3): 23-27.

MA Shicheng, LI Jiehui, YIN Changjun. Influence anal-

- ysis on adjacent pipeline displacement by deep pit excavation. *Natural Science Journal of Xiangtan University*, 2014, 36(3): 23–27.
- [10] 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 jointed ductile pipeline to deep excavation in soft soil[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2003, 36(2): 77–80.
- [11] 喻志洁, 张土乔. 深基坑工程临近管道力学性状的计算[J]. *公路工程*, 2010, 35(3): 74–77.
YU Zhijie, ZHANG Tuqiao. Calculation on mechanical behaviors of buried pipelines adjacent to deep excavation[J]. *Highway Engineering*, 2010, 35(3): 74–77.
- [12] GUO Peijun. Numerical model of pipe-soil interaction under oblique loading[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(2): 260–268.
- [13] 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(增1): 3015–3020.
DU Jinlong, YANG Min. Influence analysis of excavation of deep pit on adjacent buried pipelines[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(Sup.1): 3015–3020.
- [14] 张治国, 黄茂松, 王卫东. 邻近开挖对既有软土隧道的影 响[J]. *岩土力学*, 2009, 30(5): 1373–1380.
ZHANG Zhiguo, HUANG Maosong, WANG Weidong. Responses of existing tunnels induced by adjacent excavation in soft soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(5): 1373–1380.
- [15] 姜峥. 基坑开挖引起邻近管线变形的理论解析[J]. *地下空间与工程学报*, 2014, 10(2): 362–368.
JIANG Zheng. Theoretical analysis on deformation of pipeline caused by adjacent foundation pit excavation[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2014, 10(2): 362–368.
- [16] 刘红岩, 李厚恩, 黄好诗, 等. 基于实测地表位移的基坑开挖引起临近地下管线位移的计算[J]. *工业建筑*, 2011, 41(10): 72–76.
LIU Hongyan, LI Houen, HUANG Yushi, et al. Displacement calculation of nearby underground pipeline caused by deep excavation based on field test of ground displacement[J]. *Industrial Construction*, 2011, 41(10): 72–76.
- [17] 葛照国. 长江漫滩地区基坑施工对周边地表沉降及地下管线影响的现场试验研究[J]. *现代隧道技术*, 2014, 51(5): 205–209.
GE Zhaoguo. Field test on the impacts of foundation pit construction on ground settlement and underground utilities in the Yangtze River floodplain area[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2014, 51(5): 205–209.
- [18] 邵羽, 江杰, 陈俊羽, 等. 基于HSS模型与MCC模型的深基坑降水开挖变形分析[J]. *水利学报*, 2015, 46(S1): 231–235.
SHAO Yu, JIANG Jie, CHEN Junyu, et al. Deformation of deep foundation pits due to excavation and dewatering based on HSS model and Modified Cam-Clay Model[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(S1): 231–235.
- [19] ARDAKANI A, BAYAT M, JAVANMARD M. Numerical modeling of soil nail walls considering Mohr Coulomb, hardening soil and hardening soil with small-strain stiffness effect models[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2014, 6(4): 391–401.
- [20] 王海波, 徐明, 宋二祥. 基于硬化土模型的小应变本构模型研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(1): 39–43.
WANG H B, XU M, SONG E X. A small strain constitutive model based on hardening soil model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(1): 39–43.
- [21] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(8): 2283–2290.
WANG W D, WANG H R, XU Z H. Experimental study of parameters of hardening soil model for numerical analysis of deep excavations of foundation pits[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(8): 2283–2290.
- [22] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 上海地区基坑开挖数值分析中土体HS-SMALL模型参数的研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(6): 1766–1774.
WANG W D, WANG H R, XU Z H. Study of parameters of HS-Small model used in numerical analysis of excavations in Shanghai area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(6): 1766–1774.
- [23] 徐中华, 王卫东. 敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J]. *岩土力学*, 2010, 31(1): 258–264.
XU Z H, WANG W D. Selection of soil constitutive models for numerical analysis of deep excavations in close proximity to sensitive properties[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(1): 258–264.
- [24] 尹骥. 小应变硬化土模型在上海地区深基坑工程中的应用[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(S1): 166–172.
YIN J. Application of hardening soil model with small strain stiffness in deep foundation pits in Shanghai[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(s1): 166–172.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50911–2013城市轨道交通工程监测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.