

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.02.19

土岩组合地区基坑开挖对扩展基础桥墩沉降影响研究

张向东, 刘 刚, 李 军

(辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 针对在建基坑工程对既有桥梁造成影响的问题, 依托徐州土岩组合地区某地铁基坑工程, 通过研究软土地区基坑开挖墙后地表沉降预测理论, 推导出该工程的墙后地表沉降曲线。通过 Midas 数值软件模拟与现场监测综合分析的方法, 研究了基坑开挖对墙后地表和扩展基础桥墩造成的沉降影响。研究表明: 在整个开挖过程中, 基坑周边地表沉降曲线呈“勺形”分布, 第三层土体开挖对地表沉降的影响最大; 桥墩与相同位置地表在各开挖阶段的沉降量分别占其最终沉降量的比例基本一致; 基坑开挖对桥墩造成的倾斜角度会随桥墩下卧土体沉降曲线的变化而变化, 桥墩受基坑开挖造成的沉降影响会随其基础埋深的增加而减弱。该研究可为类似工程设计和施工提供参考。

关键词: 基坑; 土岩组合; 沉降; 桥墩; 数值模拟

中图分类号: P642

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)02-0115-07

Study on influence of foundation pit excavation on settlement of spread foundation piers in soil-rock combined area

ZHANG Xiangdong, LIU Gang, LI Jun

(College of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: Excavation of foundation pit can influence the safety of existing bridge, based on a subway foundation pit project in the soil-rock combined area in Xuzhou, the settlement curve of ground surface behind retaining wall is derived based on the ground surface settlement prediction theory. The ground surface settlement behind the retaining wall and the settlement of spread foundation piers after excavation of the foundation pit has been analyzed by Midas numerical simulation software and field monitoring. The research results indicate that: during the whole excavation process, the surface settlement curve of the foundation pit is “spoon-shaped” distribution, and the third layer excavation has the greatest influence on the surface settlement, the pier settlement and the corresponding surface settlement after each excavation are account for a some proportion of the final settlement; the angle of inclination of the pier caused by the excavation of foundation pit varies with the settlement curve of the soil below the pier, and the pier settlement reduces with the increase of the foundation burial depth. This research could provide reference for similar engineering design and construction.

Keywords: foundation; soil-rock combined areas; settlement; pier; numerical simulation

收稿日期: 2017-06-18; 修订日期: 2017-08-07

基金项目: 国家自然科学基金: 神华集团有限公司煤炭联合基金(51174268); 高等学校博士学科点专项科研基金(20112121110004)

第一作者: 张向东(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土木工程方面的教学与科研工作。E-mail: jwd101@126.com

通讯作者: 刘 刚(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: 237002189@qq.com

0 引言

近年来,我国城市的快速发展以及城市化水平的不断提高,快速轨道交通进入大发展时期。据统计显示,2017 年我国有 30 座城市新增 63 条即将开工的轨道交通线路,合计里程 1 581.35 km,车站 826 座。随着基坑工程越来越多,基坑的建设不仅要保证自身结构的稳定性,还要保证周围建筑物以及公共设施的正常使用。基坑开挖对基坑周边环境的影响、甚至基坑工程的安全都非常重要^[1]。基坑的开挖会造成周边土体卸荷,使临近建筑、构筑物产生沉降,从而对周围环境产生较大影响。因此,基坑开挖造成的周边设施影响的研究对于基坑工程的设计、施工等都具有重要的现实意义。

对于基坑开挖引起周边地表沉降的研究,R. B. PECK 教授通过工程实测统计得出了一套与土性及开挖深度有关的地表沉降估算方法^[2]。聂宗泉等^[3]基于现阶段刚度较大的支护结构,通过对多个深基坑开挖引起地表沉降的实测资料的整理、分析,提出按偏态分布密度函数拟合基坑周边地表沉降曲线的方法,并推导出软土地区深基坑开挖引起地表沉降的估算公式。赵志峰等^[4]提出将坑外深层土体竖向变形分为凹槽沉降区、过渡区和隆起区;龚土良等^[5]通过对基坑工程典型案例的总结分析,研究了基坑开挖引起地面沉降的变化规律,并提出基坑工程地面沉降的技术准则。在基坑开挖引起临近建筑沉降研究方面,范凡等^[6]结合工程经验和数值分析探讨了坑外土体随深度的变化规律,提出了坑外开挖面深度以上土体沉降分布的简化计算公式。刘念武等^[7]基于深基坑工程的实测资料,对基坑开挖引起土体变形以及建筑变形进行了分析,研究建筑沉降与地表沉降的关系。閤超等^[8]结合基坑工程现场监测结果,分析了基坑开挖导致临近建筑物沉降变形的发展过程,并提出支护桩间水土流失及不当的施工工序是诱发浅基础建筑沉降过大的根本原因。王浩然等^[9]通过对有限元计算结果的分析及拟合,推导了地表最大沉降简化计算公式和沉降预测曲线,并提出采用地表沉降预测曲线作为预估上海地区板式支护体系基坑开挖对环境影响的简化公式。

目前,关于深基坑开挖对周边环境造成影响的研究多侧重于软土地区,土岩组合(上覆土层,下为岩层)地区深基坑开挖对周边土体造成沉降影响的研究多数基于软土地区的经验基础之上。由于不同地区的

土层条件存在差异,如果直接将基于软土地区的公式直接应用于土岩组合地区,结果可能会产生较大偏差。在土岩组合地区基坑开挖引起周边地表沉降的研究方面,黄敏等^[10]通过有限元模拟,对不同条件下基坑开挖引起的地表沉降特征进行了分析,得到基坑开挖引起地表沉降的一些定性和定量的规律。彭晶^[11]研究了建筑物至基坑距离、建筑超载作用深度等因素对建筑物基础沉降规律的影响,并通过拟合分析出建筑物基础沉降的表达式。蔡景萍^[12]通过大量现场实测数据分析,研究了土岩组合地层地铁深基坑地表变形规律。

土岩组合地区已有许多深基坑工程的开挖实例,但针对土岩组合地区基坑开挖引起附近建筑沉降的研究相对较少。本文以徐州土岩组合地区某地铁站深基坑工程为背景,基于三维有限元程序 Midas - GTS - NX 模拟该基坑工程开挖对浅埋基础桥墩造成的沉降影响。

1 工程实例研究

1.1 工程概况

研究地铁站深基坑总长度为 262 m,车站标准段宽度为 21 m,车站标准段基坑深度为 15.66 ~ 16.33 m。采用明挖顺做法施工,车站主体围护结构采用 800 mm 厚地下连续墙,其长度为 19 m,嵌入中风化石灰岩深度为 3 m。采用砼支撑 + 钢管内支撑形式;第一道支撑采用钢筋混凝土支撑,尺寸为 800 mm × 800 mm,支撑水平间距 7 m。墙顶设置钢筋混凝土冠梁,冠梁尺寸 1 200 mm × 800 mm,冠梁作为第一道钢筋混凝土支撑的围檩,地下连续墙与冠梁采用 C30 混凝土。另外两道支撑均采用内径 609 mm Q235 钢支撑,壁厚 $t = 16$ mm(图 1)。

基坑北侧是三道中河扩大基础式简支梁桥。桥墩为双柱式实体桥墩,桥墩基础中心至基坑边距离 $d = 15$ m,桥墩截面直径 0.9 m,两柱间距 0.59 m。桥墩扩展基础一层台尺寸为 8 m × 2.6 m × 0.8 m,二层台尺寸为 9.3 m × 4.2 m × 0.8 m。对桥墩的两个墩柱进行编号,靠近基坑一侧墩柱为 1#墩,远离基坑一侧墩柱为 2#墩。

1.2 监测项目及方法

依据本工程的要求、周围环境、基坑本身的特点及相关工程的经验,按照安全、经济、合理的原则,需在 1 倍以上 3 倍以内基坑开挖深度影响范围内布置监测点。施工过程中,除基坑开挖所必须的常规监测外,尚

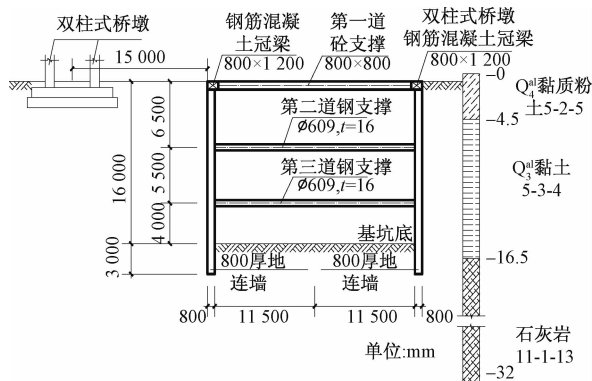


图1 基坑断面图

Fig.1 Cross-sectional drawing of the foundation pit

应在1#和2#墩柱布置竖向位移监测点(监测点号分别为 Q_1 和 Q_2),并在基坑另一侧相同断面地表布置沉降观测点,研究其在基坑开挖期间的沉降情况,CJ5、CJ10分别与1、2号墩柱至基坑距离相同($O_1 = O'_1$, $O_2 = O'_2$),基坑测点布置见图2。

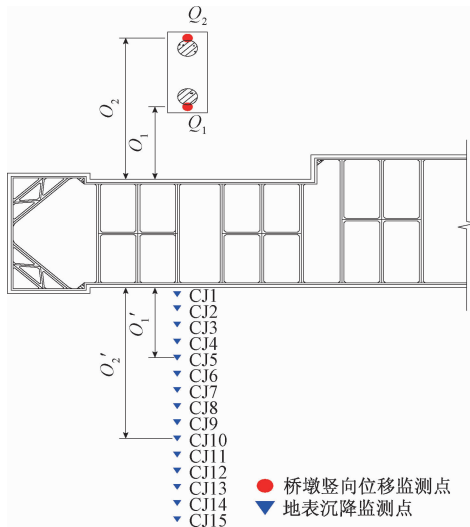


图2 桥墩和地表竖向位移监测点布置图

Fig.2 Layout of monitoring points on piers and surface

2 土岩组合地区沉降预测理论

土岩组合地层基坑周边地表沉降形式和软土地区相类似,聂宗泉等^[3]基于软土深基坑开挖引起地表沉降实测曲线的拟合分析,提出偏态分布的沉降计算模型,图3为计算模型简图,模型假定:

(1)地表沉降曲线为偏态分布,即:

$$\delta(x) = \frac{S_w}{\sqrt{2\pi\omega x}} \exp\left[-\frac{(\ln x/x_m)^2}{2\omega^2}\right] \quad (1)$$

式中: $\delta(x)$ ——墙后任一点地表沉降量/mm;

x_m ——最大沉降点距离基坑边距离/m;

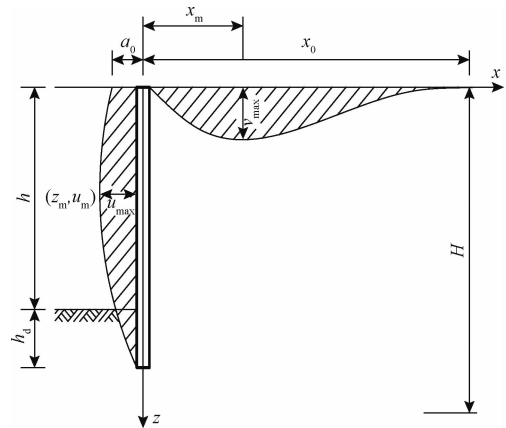


图3 基坑开挖引起地表沉降计算简图

Fig.3 Calculation model of surface settlement induced by foundation pit excavation

S_w ——沉降曲线包络面积/ mm^2 ;

ω ——经验系数,软土基坑可取0.6~0.7;

x ——待求沉降点距离基坑边距离/m。

(2)最大沉降点位置和基坑开挖深度成比例关系,即:

$$x_m = \alpha h \quad (2)$$

式中: α ——比例系数,软土地区通过插入比判断取值;

h ——开挖深度/m。

(3)沉降曲线包络面积 S_w 与支护结构变位曲线包络面积 S_p 之间存在比例关系,即:

$$S_w = \beta \cdot S_p \quad (3)$$

式中: β ——比例系数,软土地区通过插入比判断取值;

S_p ——支护结构变位曲线包络面积/ mm^2 。

土岩组合地区地下连续墙嵌入岩石并且插入深度较小, α, β 无法带入经验取值,本文试图通过实际监测沉降数据对预测曲线进行拟合。研究表明,支护结构水平位移的分布规律可按抛物线考虑,即:

$$u(z) = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 \quad (4)$$

式中: a_0, a_1, a_2 ——待求参数。

支护结构变位曲线包络面积为:

$$S_p = \int_0^H u(z) dz = H(a_0 + \frac{1}{2}a_1 H + \frac{1}{3}a_2 H^2) \quad (5)$$

式中: H ——地下连续墙深度/m;

a_0, a_1, a_2 ——为待求参数。

式(4)、(5)中,沿基坑深度方向实测位移点坐标为 (z, u) 。

周贺^[13]根据大量有限元计算结果分析得出土岩组合地区 ω 取0.67,已知实测墙顶位移 $a_0 =$

0.82 mm, 地连墙最大水平位移点坐标为 ($z_m = 11$ m, $u_m = 13.8$ mm), 根据抛物线函数性质求得: $a_1 = 2.36$ mm, $a_2 = 1.08$ mm。将各参数代入式(5)求得 $S_p = 1.78$ m²。

将各参数代入式(1)可得:

$$\delta(x) = \frac{1.78\beta}{\sqrt{2\pi} \times 0.67x} \exp\left[-\frac{\left(\ln \frac{x}{16\alpha}\right)^2}{0.8978}\right] \quad (6)$$

根据公式(6), 利用 Origin 数值分析软件的公式编辑功能对监测数据进行拟合, 拟合曲线见图 4, 得到拟合参数: $\alpha = 0.86$, $\beta = 1.89$ 。代回公式(6)可得到适用于该土岩组合基坑开挖过程的地表沉降预测曲线:

$$\delta(x) = \frac{3.36}{\sqrt{2\pi} \times 0.67x} \exp\left[-\frac{(\ln x/13.76)^2}{0.8978}\right] \quad (7)$$

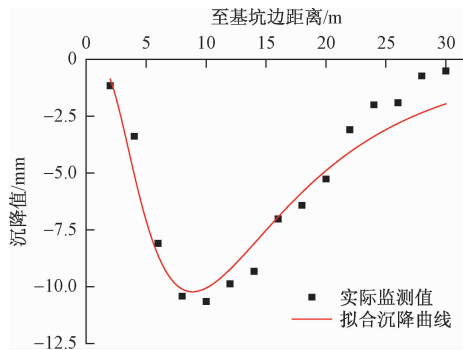


图 4 坑外地表沉降预测曲线

Fig.4 Prediction curve of surface settlement outside the foundation pit

3 数值模型的建立

基坑开挖施工中许多情况下周边土体处于塑性状态, 可采用理想弹塑性模型对土体进行数值分析。本文基于三维有限元程序 Midas-GTS-NX 进行分析, 采用摩尔-库伦 (Mohr-Coulomb) 本构模型, 不考虑土体固结引起的长期沉降, 墩身、基础及基坑围护结构均采用弹性本构模型。岩土体及结构材料参数取值见表 1。建模时考虑了以下几个问题:

表 1 土层及结构参数表

Table 1 The soil and structure parameters

	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	容重 $\gamma/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(\circ)$
黏质粉土	50	0.3	19	23	6
黏土	50	0.3	20	11	24
石灰岩	210	0.3	24	40	40
钢材 Q235	200 000	0.3	78.5	—	—
C30 钢筋砼	35 000	0.19	25.2	—	—

(1) 基坑实际尺寸很大, 为提高运算效率和计算收敛, 根据圣维南原理 (Saint-Venant's Principle), 远离桥墩的基坑开挖对桥墩没有影响。因此, 可只对靠近桥墩的 18 m 的基坑区间段进行模拟, 其他基坑区域作为约束边界考虑;

(2) 桥梁主体、车辆和行人等作用在桥墩的外界荷载等效成集中荷载为 2 000 kN 作用于墩柱截面上;

(3) 基坑开挖前, 先进行原始地应力和桥墩模拟, 并进行位移清零, 然后才进行基坑开挖的模拟。本着“分层开挖、及时支撑、严禁超挖”的原则, 每一次土体开挖和支撑施工作为一个工况进行模拟, 施工工况见表 2。共 6 个施工工况, 开挖 4 次, 支撑 3 道 (表 2)。

表 2 施工工况表

Table 2 Construction schedule

工况	施工内容
工况 0	初始应力状态
工况 1	地下连续墙施工
工况 2	开挖第一层土体至 -1 m 并施工第一道砼支撑
工况 3	第二层土体开挖至 -7 m 并施工第二道钢支撑
工况 4	第三层土体开挖至 -12.5 m 并施工第三道钢支撑
工况 5	第四层土体开挖至坑底 -16 m

有限元模型见图 5、图 6, 有限元模型尺寸为 93 m × 18 m × 23 m, 桥墩基础一层台尺寸 9 m × 3 m × 1 m, 二层台尺寸 10 m × 4 m × 1 m。桥墩基础中心距离基坑 15 m, 其埋深为 2 m。

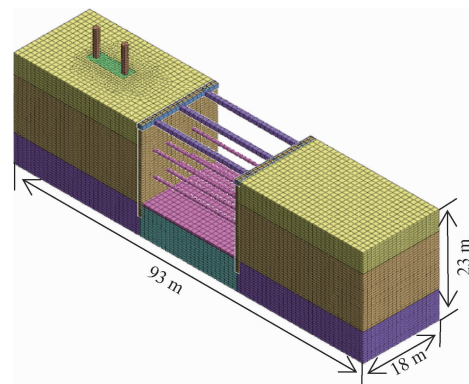


图 5 基坑开挖后的模型

Fig.5 Foundation pit model after excavation

4 数值模拟分析

4.1 地表最终沉降分析

从图 7 可以看出, 在基坑开挖完成后, 模拟曲线的

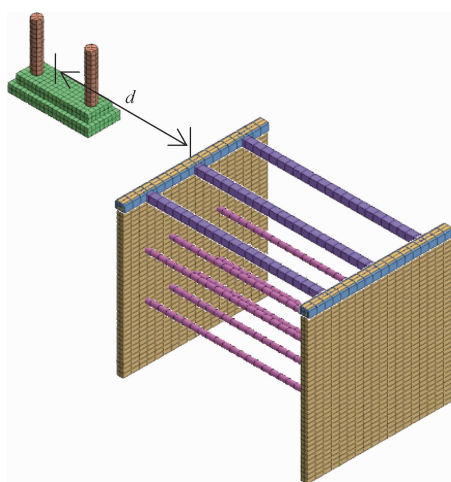


图6 围护结构和桥墩

Fig. 6 Enclosure structure and pier

主沉降区域距离基坑边 5 ~ 15 m, 最大沉降位置距离基坑边 10 m, 最大沉降量为 9.36 mm, 沉降影响范围约 30 m 为 2 倍基坑开挖深度。由于数值模拟计算时选取了一部分理想计算模型, 忽略了许多不确定因素, 故数值模拟计算结果小于实际监测值。通过 SPSS 软件进行相关度分析, 模拟沉降曲线和监测沉降曲线线性相关度为 0.93, 说明计算结果与实情吻合度较高, 有限元模型参数和计算方法选取是合理的, 能够很好的模拟工程施工的实际情况。

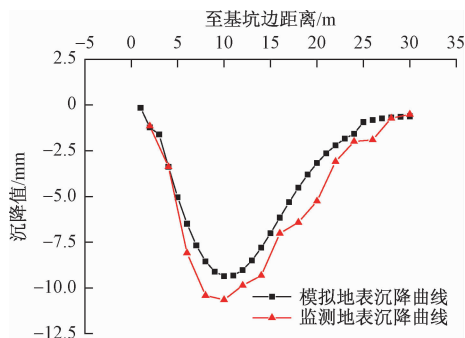


图7 地表沉降实测值和模拟曲线对比

Fig. 7 Comparison of measured and simulated curves of surface settlement

4.2 地表沉降曲线的发展过程

基坑周边地表沉降发展过程如图 8 所示。地连墙施工结束后, 基坑周边地表竖向位移基本小于 0.5 mm, 沉降曲线接近水平, 沉降影响范围在墙后 15 m 范围内, 即地连墙施工引起的坑外地表沉降可以忽略不计。在完成第一层土体开挖时, 坑外地表出现沉降量依然较少, 说明在开挖深度较浅时冠梁能较好的控制周边土体的变形。随着开挖深度的不断加深,

土体竖向位移呈增大趋势, 沉降影响范围也随之扩大, 最大沉降位置逐渐远离基坑。地表在基坑各开挖阶段最大沉降值分别为 0.60 mm、1.60 mm、3.83 mm、7.52 mm 和 9.36 mm, 每个开挖阶段沉降值分别占最终沉降值的 6%、11%、23%、40% 和 20%。在整个开挖过程中, 基坑周边地表沉降曲线呈“勺形”分布, 最大沉降值位于距离基坑 5 ~ 15 m 范围。开挖各阶段沉降曲线在墙后 15 m 左右有拐点, 当距离基坑 8 m 范围以内, 沉降值迅速增大, 当大于 15 m 时, 沉降值都缓慢减小逐渐收敛至 0, 沉降影响范围为 2 倍的基坑开挖深度。

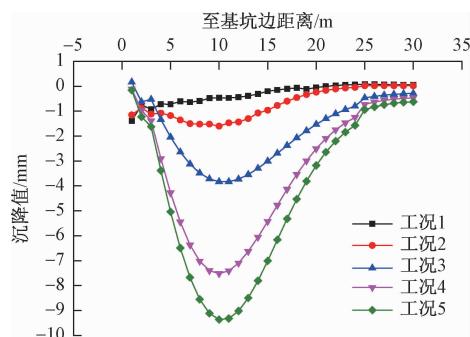


图8 数值模拟各工况地表沉降曲线

Fig. 8 Numerical simulation of surface settlement curves

4.3 桥墩沉降分析

从图 9 可以看出, 地连墙施工结束时 (图中开挖深度 0 m 处), 1、2 号墩沉降值均小于 0.1 mm。随着基坑开挖深度增加, 桥墩总体沉降值呈增大趋势, 1、2 号墩差异沉降逐渐明显。各层土体开挖造成桥墩的沉降量分别占其最终沉降量的 11%、26%、40% 和 23%, 第三层土体开挖造成的桥墩总体沉降量最大, 桥墩与相同位置地表在每开挖阶段造成的沉降量占最终沉降量的比例基本相同。

范凡等^[6]认为基坑外土体沉降随其深度的增加具有折减趋势, 并且提出折减系数。本工程中桥墩基础埋深较浅为 2 m, 可将坑外地表沉降值等同于埋深 3 m 处沉降值进行研究。开挖完成后 1、2 号墩沉降值分别为 14.19 mm 和 6.84 mm, 相同位置地表 CJ5 和 CJ10 沉降值分别为 7.84 mm 和 2.37 mm。说明桥墩及其上部荷载会加大桥墩基础下部土体的竖向位移, 若定义 k 为桥墩沉降量与相同位置地表沉降量的比值, 由表 3 可以判断 k 大于 1 且随开挖深度的增加呈增大趋势。

由桥墩沉降量的监测曲线可以看出桥墩最大沉降量发生在第三层土体开挖阶段, 1、2 号墩最大差异沉

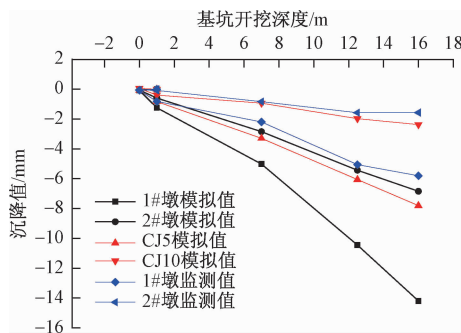


图9 桥墩沉降值随开挖深度的变化曲线

Fig.9 The piers settlement variation with the depth of excavation

降发生在基坑土体开挖完成后,这与数值模拟呈现的规律一致。桥墩沉降实际监测值比模拟计算结果偏小,这主要是由于桥墩基础施工时对基础底土体进行了地基加固处理改变了土体的固结程度,从而造成桥墩基础底部土体沉降较小。

表3 桥墩沉降与地表沉降的比值

Table 3 The ratio between piers settlement and surface settlement

	开挖至 -1 m	开挖至 -7 m	开挖至 -12.5 m	开挖至 -16 m
Q1/CJ5	1.24	1.52	1.72	1.81
Q2/CJ10	2.43	2.58	3.10	3.29

4.4 改变桥墩位置

改变数值模型中桥墩至基坑边的距离,研究不同距离时基坑开挖对桥墩的影响。从图10可以看出,当 d 小于10 m时,桥墩向远离基坑方向倾斜,1、2号墩差异沉降较大且随 d 的增大而减小,其平均沉降值随 d 的增大逐渐增大;当 d 等于10 m时1、2号墩平均沉降值最大,其差异沉降接近零;当 d 大于10 m时,桥墩向基坑方向倾斜,1、2号墩差异沉降和平均沉降值都随 d 的增大而减小。说明桥墩的不均匀沉降与桥墩基础下卧土体沉降曲线有一定相关性,其倾斜角度会随桥墩基础下卧土体沉降曲线变化而变化。

改变数值模型中桥墩基础的埋深,研究基坑开挖对基础埋深不同的桥墩的影响。从图11可以看出,当随着桥墩基础埋深的增加,1、2号墩的平均沉降值与差异沉降值都呈减小趋势。其主要原因是由于基坑外土体的沉降随深度的增加具有折减的趋势^[6],而桥墩沉降主要来源于其基础下卧土体的变形。

5 结论

(1)通过将地表沉降和桥墩沉降的模拟结果与实

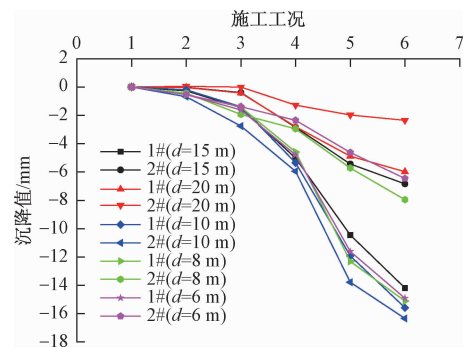


图10 改变桥墩至基坑边距离

Fig.10 Settlement variation with the distance from the pier to the foundation pit

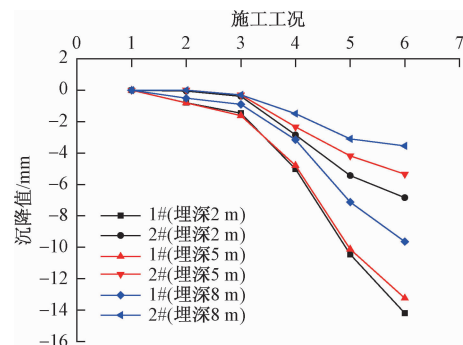


图11 改变桥墩基础埋深

Fig.11 Settlement variation with the buried depth of pier foundation

测沉降值进行对比分析,结果表明有限元模拟在分析基坑开挖对扩展基础桥墩沉降影响方面具有可靠性,计算结果可以很好的反映基坑施工的实际情况。

(2)在整个开挖过程中,基坑周边地表沉降曲线呈“勺形”分布。各个开挖阶段的沉降值分别占总沉降值的6%、11%、23%、40%和20%,第三层土体开挖对周边地表沉降影响最大,所以在第三层土体开挖时要加大对围护结构变形及周边环境的监测频率。

(3)桥墩与相同位置地表在每开挖阶段的沉降量占其最终沉降量的比例基本相同。定义 k 为桥墩沉降量与相同位置地表沉降量的比值, k 大于1且随开挖深度的增加呈增大趋势。

(4)桥墩的倾斜角度会随桥墩基础下卧土体沉降曲线的变化而变化,且随着桥墩基础埋深的增加桥墩总体的沉降值与1、2号墩差异沉降值都呈减小趋势。所以对基坑开挖造成的桥墩沉降形式要充分考虑桥墩所处位置。

参考文献:

- [1] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册(第二版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009:46-47.
LIU Guobin, WANG Weidong. Excavation engineering manual (Second edition) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009:46-47.
- [2] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground [C]. Mexico City: Proceeding of 7th International conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1969:225-290.
- [3] 聂宗泉,张尚根,孟少平. 软土深基坑开挖地表沉降评估方法研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(8): 1218-1223.
NIE Zongquan, ZHANG Shanggen, MENG Shaoping. Surface settlement of deep foundation pits by excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(8): 1218-1223.
- [4] 赵志峰,高吉. 单支撑深基坑围护结构及坑外土体变形分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(1): 122-126.
ZHAO Zhifeng, GAO Ji. Analysis of retaining structure and surrounding soils of deep excavation supported by single concrete bracing [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(1): 122-126.
- [5] 龚士良,叶为民,陈洪胜,等. 上海市深基坑工程地面沉降评估理论与方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(4): 55-60.
GONG Shiliang, YE Weimin, CHEN Hongsheng, et al. Theory and method of ground subsidence evaluation for deep foundation pit engineering in Shanghai [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(4): 55-60.
- [6] 范凡,陈锦剑,章红兵,等. 基坑开挖引起紧邻建筑物沉降的简化计算方法[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(S2): 61-64.
FAN Fan, CHEN Jinjian, ZHANG Hongbing, et al. Simplified method to predict settlements of adjacent buildings due to deep excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(S2): 61-64.
- [7] 刘念武,龚晓南,俞峰,等. 软土地区基坑开挖引起的浅基础建筑沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2): 325-329.
LIU Nianwu, GONG Xiaonan, YU Feng, et al. Settlement of buildings with shallow foundations induced by excavation in soft soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 325-329.
- [8] 閻超,刘秀珍. 某深基坑安全开挖引起临近建筑物较大沉降的实例分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2): 479-482.
XIA Chao, LIU Xiuzhen. Case study of settlement of adjacent buildings caused by excavation of a deep foundation pit [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 479-482.
- [9] 王浩然,王卫东,徐中华. 基于数值分析的预估基坑开挖对环境影响的简化方法[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(S1): 108-112.
WANG Haoran, WANG Weidong, XU Zhonghua. Simplified method for evaluating excavation-induced impact on surrounding environment based on numerical analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 108-112.
- [10] 黄敏,刘小丽. 土岩组合地区桩锚支护基坑开挖地表沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(S1): 571-575.
HUANG Min, LIU Xiaoli. Ground settlement induced by excavation of pile-anchor retaining foundation pits in soil-rock mixed areas [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 571-575.
- [11] 彭晶. 土岩组合地区基坑开挖与邻近建筑物相互作用研究[D]. 中国海洋大学, 2014.
PENG Jing. Interactive effects of excavation of foundation pit and nearby buildings in soil-rock mixed strata [D]. Ocean University of China, 2014.
- [12] 蔡景萍. 土岩组合地层地铁深基坑地表变形规律研究[J]. 中外公路, 2015, 35(4): 23-29.
CAI Jingping. Study on ground deformation law of deep foundation pit in earth-rock combined stratum [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(4): 23-29.
- [13] 周贺. 土岩组合地区深基坑开挖地表沉降变形研究[D]. 中国海洋大学, 2011.
ZHOU He. Investigation on ground surface settlement for deep foundation pit excavation in soils underlain by rock [D]. Ocean University of China, 2011.