

河湖相沉积软土地层地铁车站深基坑施工位移分析

白学平

(青海省交通规划设计研究院有限公司, 810008, 西宁//高级工程师)

摘要 为研究河湖相沉积环境下的软土深基坑在施工过程中的变形规律,以佛山轨道交通2号线某车站深基坑工程为研究对象,在进行实际开挖和布设监测点的基础上,结合工程地质条件建立三维数值模型,对基坑围护结构、地面沉降和地下连续墙墙体水平位移等进行了对比分析。结果发现:该软土深基坑长边方向最大水平位移监测值为23.0~24.0 mm,短边方向最大水平位移监测值为13.5 mm,基坑水平位移曲线整体呈拱形;基坑长边方向地面沉降监测最大值25.0 mm,短边方向地面沉降监测最大值为14.5 mm,距基坑边缘6.8 m,其曲线呈宽“V”字型;深基坑三维数值模拟结果与监测结果基本一致,与监测值相比最大误差为10%~12%;开挖深度达到7 m时,基坑深部土体由于嵌固作用和围护结构内移存在隆起趋势,开挖完成后隆起位移达到4.1 mm;通过监测和模拟手段对此类型软土深基坑施工过程中的变形规律进行了验证,其变形值均未超过基坑变形控制上限。

关键词 地铁;车站;深基坑;施工位移;河湖相软土地层
中图分类号 U4456.3⁺1; U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.06.011

Analysis of Metro Station Deep Foundation Pit Construction Displacement in Fluvial and Lake Sedimentary Soft Soil Stratum

BAI Xueping

Abstract In order to study the deformation law of soft soil deep foundation pit in fluvial and lake sedimentary environment, taking the deep foundation pit project of a station along Foshan Rail Transit Line 2 as research object, based on actual excavation and layout of monitoring points, combined with its engineering geological conditions, a three-dimensional numerical model is established, and a comparative analysis of the foundation pit retaining structure, land subsidence and diaphragm wall horizontal displacement is carried out. The results reveal that the maximum monitoring horizontal displacement of the soft soil deep foundation pit long side is 23.0~24.0 mm, that of the short side is 13.5 mm, and the displacement curve is overall arched; the land subsidence monitoring maximum value in foundation pit long side direction is 25.0 mm while

that in short side direction is 14.5 mm, and is 6.8 m away from pit edge with the curve showing a wide 'V' shape; the foundation pit 3D numerical simulation results are generally consistent with the monitoring values, and the biggest deviation from monitoring value is 10% to 12%; when excavation depth reaches 7 m, the foundation pit deep soil shows heave tendency due to solidification effect and retaining structure moving inward, the heave displacement reaches 4.1 mm after the excavation is completed; through monitoring and simulation means, the deformation law of deep foundation pit construction in this type of soft soil is verified, and the deformation value didn't exceed foundation pit deformation control limit.

Key words metro; station; deep foundation pit; construction displacement; fluvial and lake sedimentary soft soil stratum

Author's address Qinghai Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., 810008, Xining, China

基坑工程是一个融合水文、岩土地质和结构等多专业的复杂系统工程。文献[1-2]在挡土墙受力分析的基础上率先提出了基坑开挖过程中的变形和破坏问题。文献[3]通过总结已建地铁深基坑沉降数据,将上海地区的深基坑现场监测数据进行了回归分析,提出了该地区基坑开挖过程中地面沉降的经验性公式;文献[4]收集了我国南方沿海城市中软土深基坑的监测数据,发现基坑围护结构受土体流变特性影响,其变形大致在0.2%~9.0% H (H 为基坑深度)内;文献[5-8]分别利用Plaxis、ABAQUS和Midas等有限元软件,对不同支护结构和开挖方式下的深基坑变形规律进行了数值分析,并与现场监测结果进行对比,总结出深基坑围护结构变形的一些规律。

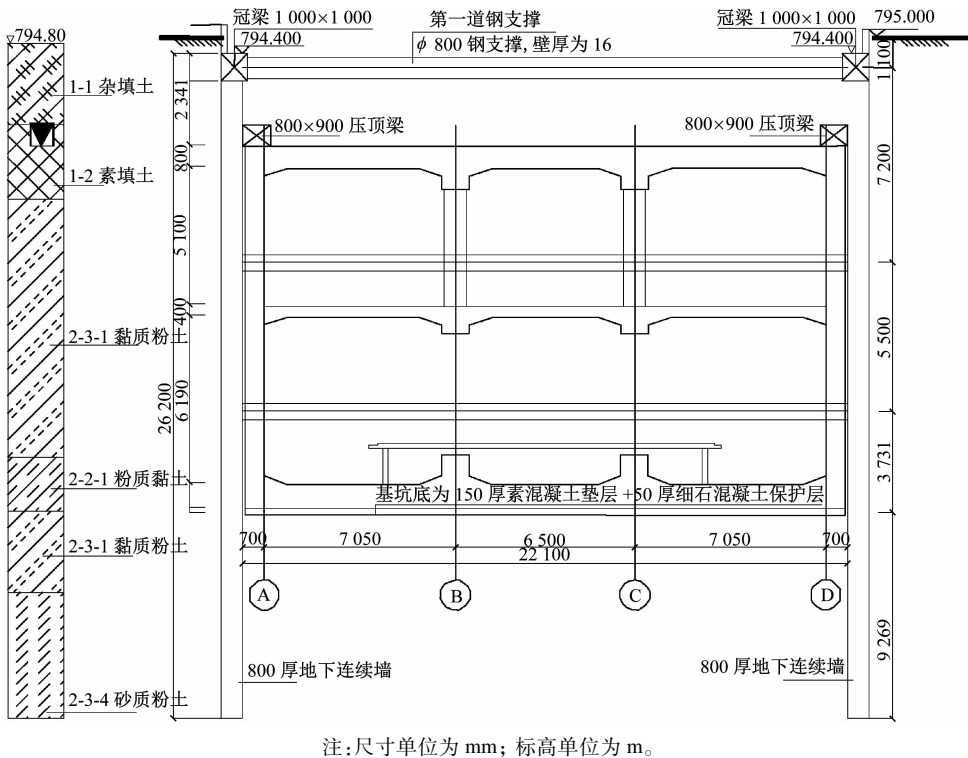
佛山轨道交通2号线(以下简称“2号线”)一期工程线路穿越区域的地质条件较为复杂,揭露地层以河湖相沉积成因的软土为主,由于临近湖泊,地下水补给丰富,给深基坑开挖造成一定难度。本

文以 2 号线某车站河湖相沉积软土地层深基坑为研究对象,在充分获取其基坑水文和地质概况的基础上,开展了现场施工变形监测和数值模拟分析,初步获取了研究区域软土深基坑施工过程中的变形规律。

1 2 号线某车站深基坑工程概况

2 号线某车站标准段宽度为 22.5 m,长度为

220 m,底板最大埋深为 20.5 m,设计为地下二层结构。车站主体基坑开挖方式为明挖顺作法,支护方式为地下连续墙加内部钢支撑,开挖过程中辅以基坑降水。其中,地下连续墙厚 0.8 m,基坑从上至下设置 3 道 ϕ 800 mm 钢管支撑,地下连续墙墙底深入隔水层约 5 m。2 号线某车站基坑支护结构标准段横断面见图 1。



注:尺寸单位为 mm; 标高单位为 m。

图 1 2 号线某车站基坑支护结构标准段横断面图

Fig. 1 Standard cross-section of foundation pit supporting structure of a station on Line 2

根据地质勘察成果,研究区域上覆土层依次为第四系人工填土、杂填土、冲洪积成因粉土及粉砂层。根据土层物理力学特性分为 4 个主要土层及若干亚层,包括人工填土、杂填土、砂质粉土、粉质黏土及砂层。其中,人工填土和杂填土呈杂色、饱和、稍密,主要由粉土构成,含部分建筑垃圾和生活垃圾,层厚 2~3 m;其余地层呈土黄色,含水量较高,属于中-高压缩性土,饱水状态下部分细颗粒呈流塑状。研究区域地下水为第四系孔隙潜水,埋深为 0.2~2.0 m,受大气降水和河流侧向补给。2 号线某车站基坑主要土层物理力学参数见表 1。

2 基坑变形监测与分析

2.1 基坑监测方案及布置

为验证基坑围护结构的支护效果,分析施工过

表 1 2 号线某车站基坑主要土层物理力学参数

Tab. 1 Foundation pit main soil layer physical and mechanical parameters of a station on Line 2

土层名称	天然密度/ (g/cm ³)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	侧压力 系数
杂填土	1.81	5.1	10.2	0.54
砂质粉土	2.02	20.1	19.8	0.39
粉质黏土	2.01	20.3	10.5	0.36
砂	2.05	5.1	32.4	0.35

程中基坑的变形规律,采取的监测项目包括墙顶水平位移、墙顶竖向位移、墙体水平位移、支撑轴力及地面沉降。监测点的布置见图 2。基坑监测周期直至车站主体结构完工并且沉降趋于稳定为止。基坑各监测点的监测频率见表 2。基坑开挖分 6 个阶段,不同阶段的开挖支护情况见表 3。

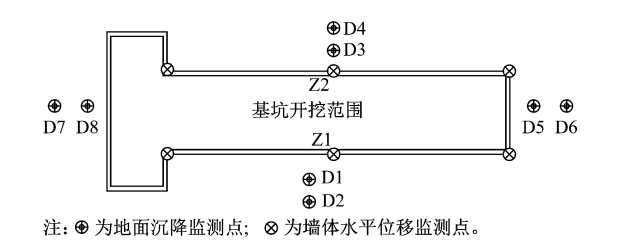


图2 基坑监测点平面布置图

Fig. 2 Layout of foundation pit monitoring points

表2 基坑各监测点的监测频率

Tab.2 Monitoring frequency of all monitoring points in foundation pit			
施工阶段	开挖深度/m	土层厚度/m	采集频率(次/d)
基坑开挖施工	<5	0~5	1
	5~10	0~5	2
	>10~15	5	2
	>15	10	3
主体结构施工	<5	0~5	3
	5~10	0~5	2
	>10~20	5	1
	>20	10	1

表3 基坑施工阶段划分

Tab.3 Stage division of foundation pit construction		
施工阶段	施工进度	时间/d
1	基坑开挖深度2 m,开始第1道钢支撑架设	8~10
2	基坑开挖深度5 m	5
3	基坑开挖深度8 m,进行第2道钢支撑架设	11
4	基坑开挖深度13 m,进行第3道钢支撑架设	13
5	基坑开挖深度16 m	20
6	基坑开挖至底部,完成垫层浇筑	25

2.2 基坑监测数据分析

2.2.1 围护结构变形分析

围护结构变形监测是基坑监测中的重要关注点。该车站基坑形式为长条形,本文分别选取基坑长边中部位置和短边中部位置的监测点在不同施工阶段的变形曲线进行分析。基坑围护结构水平位移监测曲线见图3。

由图3可见:

1) 在施工阶段1(基坑开挖深2 m),基坑长边方向围护结构变形曲线表现为悬臂式分布,最大水平位移约1.5 mm,位于支撑结构顶部。

2) 随着施工阶段的不断深入,基坑长边方向顶部的水平位移基本保持不变,但随着基坑深度增大

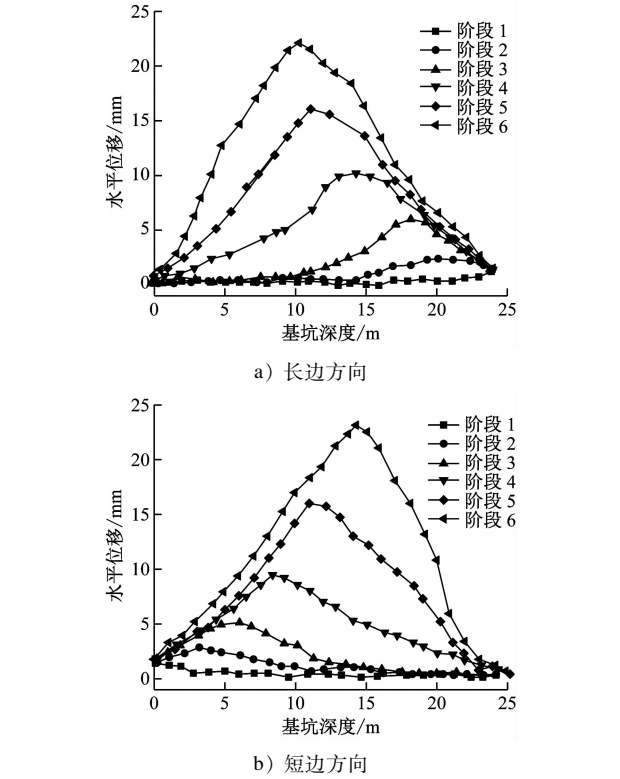


图3 基坑围护结构水平位移监测曲线

Fig. 3 Horizontal displacement monitoring curve of foundation pit retaining structure

围护结构的水平位移曲线有明显增大趋势,最大水平位移从1.5 mm逐渐增加至22.5 mm;且基坑发生最大水平位移的深度不断下移,分别为0、2.7 m、5.1 m、10.8 m和14.1 m。

3) 开挖完成后,基坑长边方向最大水平位移保持在23~24 mm,即0.95%~1.10% H (H 为基坑深度),最大水平位移位置在0.71 H 处;长边方向基坑最大水平位移未超过基坑变形控制上限(30 mm),基本达到变形控制要求。

4) 基坑短边方向在施工各阶段的水平位移变化规律与长边方向基本一致:开挖初期由于开挖深度小,围护结构两侧承受土压力小,变形量基本在0~2 mm;当开挖至5~8 m时,围护结构水平位移达到3~4 mm,且变形速率加快。每个施工阶段围护结构的水平位移增量都达到4 mm,围护结构水平位移最大值约13.5 mm,主要变形深度在12.5~18.0 m范围内,变形曲线表现为拱形。

5) 当基坑开挖完成后,围护结构在开挖深度以下也发生了一定程度变形,分析认为虽然基础土体对基坑结构变形起到了嵌固作用,但由于基坑降水不及时,基底细粒土由于含水量过高使得其强度相

对减少,导致基坑底部变形大于顶部变形。

6) 由于基坑短边方向围护结构的刚度明显高于长边方向,导致基坑两个方向上围护结构的变形量最大值和变形位置在空间上存在明显差异,但其变形曲线规律基本一致。

2.2.2 地面沉降分析

该车站基坑长边和短边方向的地面沉降监测曲线见图4。

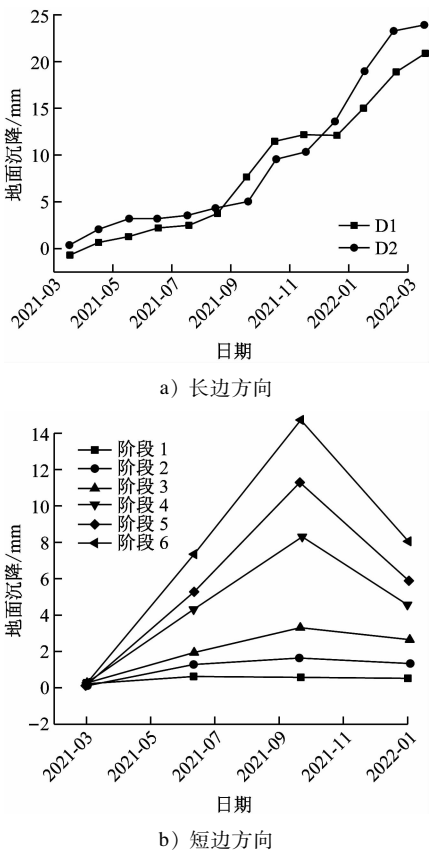


图4 基坑D7监测点地面沉降监测曲线

Fig.4 Foundation pit D7 monitoring point land subsidence monitoring curve

由图4可见:

1) 基坑长边方向地面沉降曲线表明:在基坑开挖深度小于5 m时,地面沉降处于平稳缓慢增加过程中;当基坑开挖深度超过5 m后,地面沉降速率明显加快,且其增速与开挖深度呈正相关趋势;当基坑开挖完成后,地面沉降达到最大值,为25.0 mm。

2) 基坑短边方向地面沉降曲线表明:随着开挖深度的加大,地面沉降缓慢增加;当基坑开挖深度达到12 m时,地面沉降最大值达到14.5 mm,比长边方向小5.5 mm,其位置距离基坑边缘约6.8 m;

基坑短边方向最大沉降约为0.14% H ,其变形曲线呈宽“V”字型分布,且具有明显的空间分布特征。

3 基坑三维数值模拟分析

3.1 基坑三维模型的建立

采用FLAC3D建立该基坑的三维数值模型。根据JGJ 120—2012《建筑基坑支护技术规程》和文献[9-10],软土基坑开挖对其周边土体的变形影响范围为 $(3\sim4)H$,地基深度影响范围为 $(1\sim2)H$ 。因此本文选取上限值,开挖影响范围取 $4H$,地基深度取 $2H$ 。建模尺寸为 $150\text{ m}\times168\text{ m}\times50\text{ m}$,该模型中共有32 120个节点和29 875个有限单元,基本模型见图5。土体本构关系选取经典的摩尔-库伦模型,模型开挖方式根据车站实际开挖工序进行,共设定6个阶段的施工工况(见表3)。

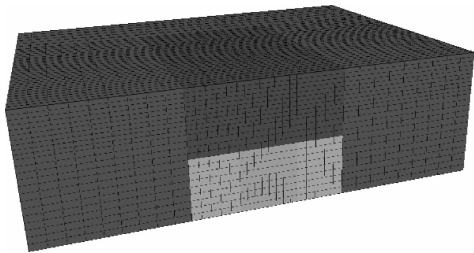


图5 基坑三维数值模型图

Fig.5 Diagram of foundation pit three-dimensional model

考虑到该地区属于河流冲积成因,无较大的构造发育,土层近水平分布,因此设定竖向应力为自重应力,水平应力以侧压力系数进行计算。各土层输入参数见表1。以水土耦合方式计算基坑所受静水压力,模型四周和底部为固定约束,顶部不受约束,通过施加整体向下的重力加速度获取模型的初始应力场。

3.2 基坑数值模拟结果分析

3.2.1 基坑短边方向变形分析

图6为不同施工阶段下基坑短边方向的水平位移云图。由图6可见:基坑开挖初期土体水平位移最大值均集中在基坑顶部短边或长边中间部位,基坑底部未发生变形;随着开挖深度增加,基坑水平位移最大值明显下移,受到顶部钢支撑的限制,基坑顶部位移基本控制在一定范围内。整体上看,基坑短边方向的位移值在水平面上呈现从中上部逐渐向两侧和底部扩散的特点。通过提取基坑短边方向位移值发现,其中部水平位移最大值为8.2 mm,最大变形位置位于地面以下9~10 m。

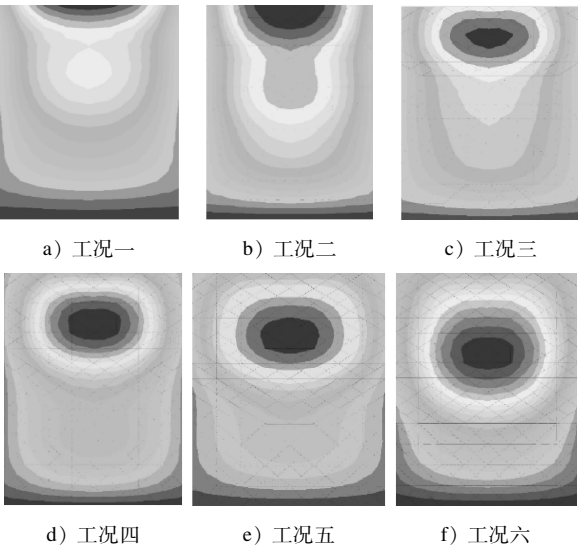


图 6 基坑短边方向水平位移云图

Fig. 6 Nephogram of foundation pit short-side direction horizontal deformation

3.2.2 基坑长边方向变形分析

图 7 为基坑长边方向变形云图。从图 7 中可以看出:基坑周围土体变形以竖向变形为主,在开挖初期由于围护结构产生的位移朝向临空侧,土层向侧面补给,地面土体发生竖向压缩,而应力云图显示深部土体未发生沉降;当开挖深度达到 7 m 时,地面土体沉降有所加速,同时基坑较深部土体发生向上变形;施工初始阶段基坑深部土体产生的向上

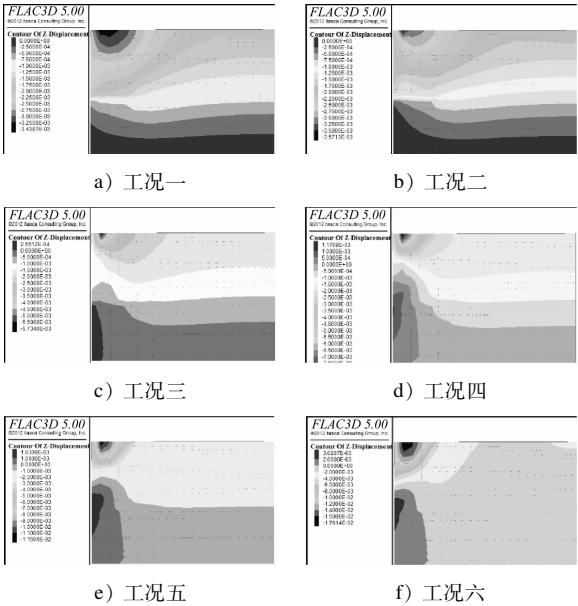


图 7 基坑长边方向变形云图

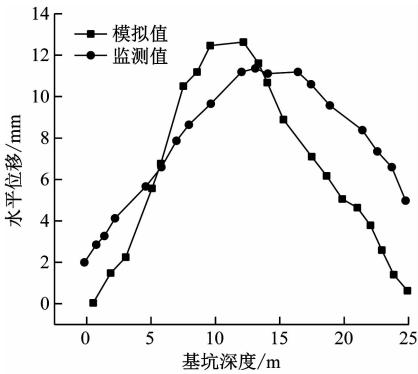
Fig. 7 Nephogram of foundation pit long-side direction deformation

变形量约为 0.1 ~ 0.3 mm,表明土体存在向上运动的趋势,当施工完成后基坑深部土体隆起值达到 4.1 mm。模型模拟结果表明,基坑长边方向土体沉降为 19.3 1 mm,即 0.11% H ,距离基坑边缘 4.6 m。根据相关设计工况,基坑土体沉降值符合环境变形要求,说明基坑支护设计方案较合理。

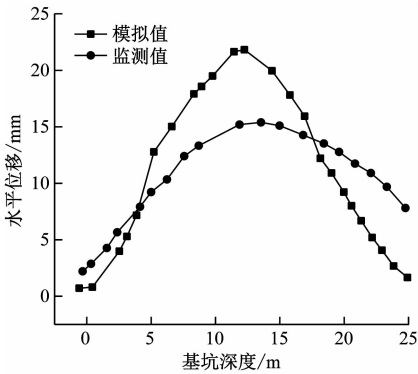
4 基坑水平位移和地面沉降监测值与模拟值对比分析

4.1 基坑水平位移对比分析

分别选取基坑短边方向和长边方向基坑水平位移的监测值与模拟值建立变形曲线,见图 8。从图 8 中可以看出:基坑短边方向上的水平位移最大值均在 11 ~ 12 mm 范围内,但最大位移位置有所区别,最大水平位移监测值位置在地面以下 14.0 m,而最大水平位移模拟值在 9.5 m 左右;基坑长边方向上,最大水平位移监测值约 25.0 mm,而最大水平位移模拟值约 15.0 mm。但两者所揭示的最大水平位移在基坑深度方向的位置基本一致,均在深度为



a) 短边方向



b) 长边方向

图 8 基坑水平位移监测值与模拟值对比

Fig. 8 Comparison of foundation pit horizontal displacement monitored and simulated values

13.0 m 左右。不论监测曲线还是模拟曲线,基坑水平位移均呈现拱形,两者误差平均值在 10% ~ 12% 范围内,说明该数值模型的建立基本合理,能够较好地反映基坑施工过程中的规律。

4.2 地面沉降对比分析

基坑短边方向地面沉降曲线监测值与模拟值对比见图 9。从图 9 可以看出:地面沉降监测值与模拟值所揭示的基坑沉降规律基本一致,均呈现宽“V”字型;地面最大沉降值均在 14.0 ~ 16.0 mm 范围内,其中,监测值中地面最大位移处距离基坑边缘约 6.8 m,而模拟值中地面最大位移处距离基坑边缘约 4.0 m,说明该数值模拟基本能够反映基坑开挖过程中的地面沉降规律。

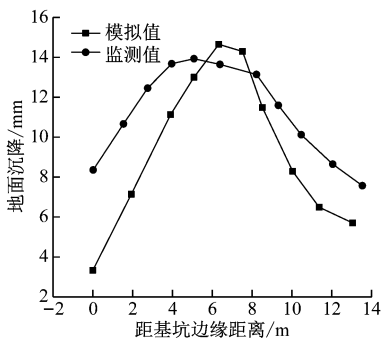


图9 基坑地面沉降监测值与模拟值对比

Fig.9 Comparison of foundation pit land subsidence monitored and simulated values

5 结语

1) 监测结果表明,河湖相沉积软土地层深基坑开挖过程中,初期开挖深度小于 5 m 时,基坑变形较为缓慢;超过 5 m 后,基坑变形和沉降速率显著增大。基坑长边方向最大水平位移保持在 23 ~ 24 mm,即 0.92% ~ 1.10% H ,其位置在 0.71 H 处;短边方向最大水平位移约为 13.5 mm,深度在 12.5 ~ 18.0 m 范围内。整体上基坑水平位移曲线表现为拱形。

2) 由基坑水平位移模拟值与监测值对比发现,基坑长边方向水平位移模拟值最大值为 15.0 mm,短边方向水平位移模拟值最大值为 9.5 mm,两种方法显示出基坑土体沉降值均在 14.0 ~ 16.0 mm 范围内。整体上,基坑水平位移模拟值误差平均值在 10% ~ 12% 范围内,说明该数值模型的建立基本合理,能够较好地反映基坑施工过程中的变形规律。

3) 本文通过现场监测与数值模拟对河湖相沉积软土深基坑在施工中的变形规律进行了验证,其

变形值均未超过基坑变形控制上限,说明设计方案基本达到变形控制要求。

4) 本文的研究仅限于该车站的实际情况,具有一定代表性,对于我国沿海地区软土深基坑的实际工程分析仍需要作进一步研究。

参考文献

- [1] TERZAGHI K, PECK R B. Soil mechanics in engineering practice[M]. 2d ed. New York: Wiley, 1967.
- [2] BJERRUM L, EIDE O. Stability of strutted excavations in clay[J]. Géotechnique, 1956, 6(1): 32.
- [3] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
LIU Guobin, WANG Weidong. Excavation engineering handbook[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [4] 刘兴旺,施祖元,益德清,等. 软土地区基坑开挖变形性状研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4): 456.
LIU Xingwang, SHI Zuyuan, YI Deqing, et al. Deformation characteristics analysis of braced excavation on soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(4): 456.
- [5] 王安正,雷金山,肖武权,等. 基坑开挖变形监测及数值仿真分析[J]. 土工基础, 2010, 24(1): 62.
WANG Anzheng, LEI Jinshan, XIAO Wuquan, et al. Numerical simulation analysis and deformation monitoring of foundation pit[J]. Soil Engineering and Foundation, 2010, 24(1): 62.
- [6] 荣晓巍. 深基坑开挖的有限元模拟与分析[D]. 天津: 天津大学, 2007.
RONG Xiaowei. Finite element simulation and analysis of deep foundation pit excavation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [7] 涂芬芬. 不同超载状态下深基坑支护结构的计算与分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
TU Fenfen. Calculation and analysis of deep foundation pit support structures under different overload states[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.
- [8] 屈若枫,覃亚洲,周传波,等. 基于弹性地基梁法的深基坑软土抗剪指标优选[J]. 人民长江, 2017, 48(17): 81.
QU Ruofeng, QIN Yazhou, ZHOU Chuanbo, et al. Optimization of shear strength parameters of soft soil in deep foundation pit based on elastic foundation beam[J]. Yangtze River, 2017, 48(17): 81.
- [9] 马郎,李松,徐光黎,等. 基于 Ps 值的软土抗剪强度指标选取研究: 以武汉长江 I 级阶地为例[J]. 人民长江, 2015, 46(22): 35.
MA Yun, LI Song, XU Guangli, et al. Research on shear strength index selection of soft soil according to Ps Value[J]. Yangtze River, 2015, 46(22): 35.
- [10] 闫威. 软土地区深基坑支护方案优选模型研究及应用[J]. 人民长江, 2014, 45(3): 40.
YAN Wei. Research on model for scheme optimization of foundation pit support in soft soil area and application[J]. Yangtze River, 2014, 45(3): 40.

(收稿日期:2022-03-16)