

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.071



基坑开挖对临近基坑地铁高架结构变形的影响

梅祯, 肖军华, 王炳龙

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要:以苏南地区临近城市轨道交通结构的基坑工程为例,通过三维有限元模拟施工过程,反演适宜模拟该基坑施工过程的计算参数,并在此基础上研究不同开挖距离、基坑规模、开挖深度、基坑数量和施工工序的基坑施工对临近地铁高架结构的影响。结果表明:基坑与结构水平间距小于 $2H$ (H 为基坑深度)时,结构横向变形发展大于竖向,水平间距为 $1H$ 时,桥墩水平位移和沉降达到最大;地铁高架桥桥墩附加变形伴随着基坑宽度的增大而迅速增大,当基坑宽度大于 $8H$ 时,影响迅速减小;基坑开挖深度对基坑中线 $4H$ 范围内的桥墩影响最大,尤其是开挖深度超过 10 m 后;多个基坑施工引起的结构变形表现出明显的非线性叠加效应;多基坑施工工序对结构总变形略有影响。

关键词:地铁;高架结构;基坑开挖;有限元;反分析

中图分类号:U447 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2019)04-0051-08

Influence of foundation pit excavation on the deformation of adjacent subway elevated structure

Mei Zhen, Xiao Junhua, Wang Binglong

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, P. R. China)

Abstract: Taking a foundation pit near the urban rail transit structure in southern Jiangsu as an example, the soil parameters were obtained by inverse analysis and three-dimensional finite element method simulations. On this basis, the influence of different excavation distances, excavation geometries, number of foundation pits and construction procedure on the deformation of adjacent subway elevated structure is studied. The results show that, when the horizontal distance between foundation pit and structure is less than $2H$ (H represents the depth of the foundation pit), the lateral deformation of the structure is larger than that of vertical. The horizontal displacement and settlement of elevated bridge pier reach the maximum when horizontal distance is $1H$. Besides, the additional deformation of subway viaduct piers increases rapidly with width of foundation pit. It decreases significantly when the width of foundation pit is larger than $8H$. The depth of excavation of the foundation pit has the greatest influence on viaduct pier within $4H$ range of the central line of the foundation pit, especially when the excavation depth is more than 10 m . It is found that the structural deformation caused by multiple foundation pit construction shows obvious nonlinear superposition effect, while the construction procedure of multiple foundation pit has a slight influence on the total deformation of the structure.

Keywords: metro; elevated structure; foundation excavation; finite element analysis; back analysis

收稿日期:2018-10-26

基金项目:国家自然科学基金(51678447)

作者简介:梅祯(1991-),女,博士生,主要从事城市轨道交通结构服役性能研究,E-mail: tjjtmz1991@163.com.

Received:2018-10-26

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51678447)

Author brief: Mei Zhen (1991-), PhD candidate, main research interest: performance of urban rail transit structure, E-mail: tjjtmz1991@163.com.

在软土地区,由于地质软弱,基坑开挖势必会引起周边地层应力场和位移场的改变,继而对周边地铁结构产生影响,严重时,临近结构产生显著变形,甚至破坏^[1-2]。如杭州地铁 2 号线某区间临近基坑施工,造成近百环管片的收敛变形超过 80 mm,深圳地铁 1 号线某区间临近基坑施工造成隧道水平位移达 70 mm^[3]。

学者们就基坑开挖对临近地铁结构的影响问题展开了深入研究。Wang 等^[1]提出随机反分析法预测基坑开挖引起的邻近建筑潜在损坏的可能性。Doležalová^[4]、Hu 等^[5]和王卫东等^[6]采用数值分析法分析基坑开挖卸荷对邻近既有隧道的影响。Liang 等^[7-8]和周顺华等^[9]基于两阶段法提出临近开挖对既有地铁隧道受力变形影响的简化计算方法。魏纲^[10]和 Zheng 等^[11]在实测数据基础上,推导了基坑开挖引起临近地铁隧道竖向位移的经验公式。张子新等^[12]采用三维有限元,对比室内试验以及实测数据,分析了基坑开挖对位于基坑中心的地铁高架桥墩的影响。

上述研究采用解析、半解析以及数值分析等手段,结合大量工程实践,对基坑开挖对周边建构筑物,尤其是地铁隧道的影响已有较清晰的认识,但基坑开挖对地铁高架结构的影响认识却较少。然而,位于市郊的城市轨道交通结构多以高架结构为主,随着城市的不断扩张,临近地铁高架结构的施工活动也越来越频繁,尤其在软土地区复杂地质条件下,如何控制施工影响、保护临近地铁高架结构面临许多新的问题。

由于问题的复杂性,传统解析方法难以合理地分析基坑开挖对临近结构的影响,数值分析方法由于能考虑土层的性质、土层开挖、支护结构以及周边建(构)筑物存在的影响等复杂因素,已成为基坑工程分析的最有效方法^[4-6]。因此,本文依托苏南地区临近城市轨道交通结构的基坑工程,采用三维有限元法,模拟基坑开挖全过程,分析开挖卸载对临近地铁高架桥墩的作用机制,并与实测结果进行比较,验证数值模型和计算参数的合理性,继而讨论不同基坑参数对地铁桥墩附加变形的影响,为临近地铁高架结构施工控制及结构安全保护提供参考。

1 工程概况

1.1 高架结构变形监测情况

沉降监测是轨道交通结构安全的重要监测项目。图 1 为上海地铁 11 号线花桥方向延伸段运营期内累计沉降变形曲线^[13],图中灰色标注部分表示监测期间周边存在建筑施工活动。可以看出,全线共有 6 处较为明显的沉降槽,与灰色标注部分基本吻合,且沉降槽的宽度与邻近基坑宽度近似。这说明,临近基坑施工是引起地铁桥墩沉降的重要影响因素。以下以其中一处基坑工程为例进行详细分析。

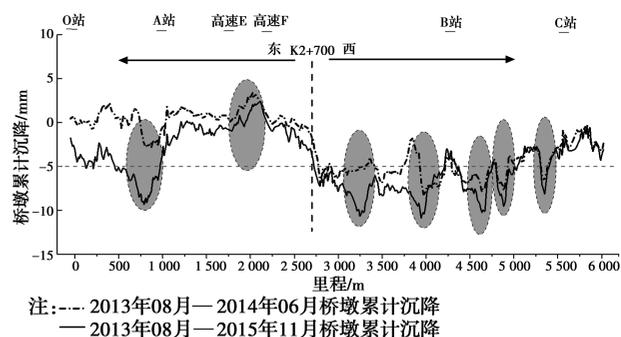


图 1 地铁高架桥墩累计沉降变形曲线^[13]

Fig. 1 Accumulated settlement curve of subway viaduct pier^[13]

1.2 基坑工程概况

该项目为地铁 11 号线沿线中城商务广场写字楼基坑工程,场地内,地基层属第四系泻湖沼泽相地基土沉积层,主要由饱和粘性土、粉性土以及砂土组成。基坑侧壁土层由上至下主要以素填土、软塑状粘性土、流塑状淤泥质粉质黏土为主,基坑底部处于淤泥质粉质黏土层中。土体属于高压缩性土,施工过程如果控制不当,易发生较大变形而导致局部失稳,影响临近轨道交通结构的安全。

建筑基坑呈长方形,纵向宽 156 m,横向宽 70 m(沿地铁敷设方向为纵,垂直为横),挖深 9.6 m。设三轴水泥搅拌桩围护结构兼作止水帷幕,桩长 22.0 m。坑内设两道钢筋混凝土支撑,分别在 -2.6 m 和 -6.3 m 的位置。基坑北侧平行某轨道交通高架线,距离围护结构 31 m。监测数据表明,基坑开挖影响范围约为基坑宽度的 1.5 倍,影响范围内,共有 9 根高架桥墩,分别为 S1~S9 号墩,如图 2 所示。

1.3 地铁高架线

地铁 11 号线花桥方向延伸段为高架结构,上部结构为简支混凝土梁,标准跨径 30 m,基坑影响范

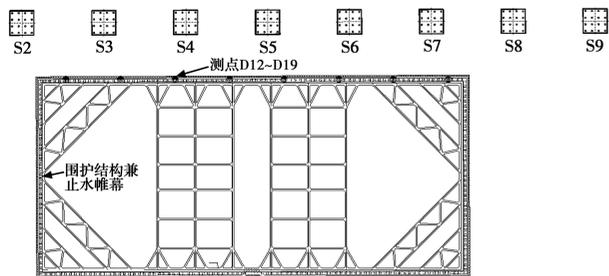


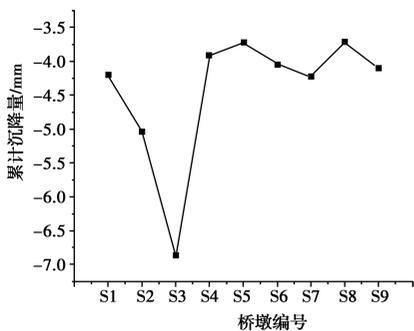
图 2 基坑围护结构及周边场地平面图

Fig. 2 Enclosure structure and surrounding site of foundation pit

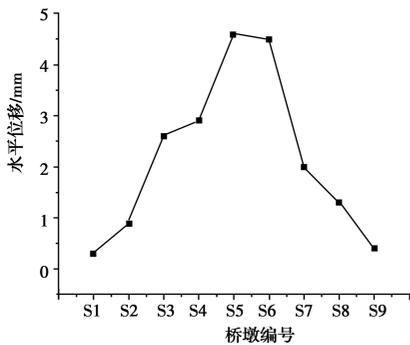
围内, S1~S4 桥墩桩基为预制混凝土管桩, 桩长 40 m; S5~S9 桥墩桩基为钻孔灌注桩, 桩长 56 m。

1.4 施工监测及数据整理

在桥墩 S1~S9 的墩底和墩顶等部位布置多处监测点, 对桥墩的沉降和水平位移进行观测。现场监测贯穿整个工程。桥墩沉降与水平位移监测结果如图 3 所示。



(a) 桥墩沉降



(b) 桥墩水平位移

图 3 监测结果

Fig. 3 Monitoring results

由于桩长不同, 短桩 S1~S4 的沉降量最大达 7 mm, 大于长桩 S5~S9 的最大沉降量。墩顶水平位移大致以基坑中心轴线为对称轴, 呈中间大, 两侧小的趋势, 最大水平位移为 4.5 mm。

2 基坑施工全过程数值分析

2.1 计算模型

该基坑为规则矩形, 但由于临近地铁高架桩基存

在长短桩, 需建立三维模型加以分析。所建高架结构共 8 跨 9 桥墩, 均采用实体单元, 桩基均采用可考虑侧摩阻力和桩端阻力的桩单元。为便于计算, 把基坑围护桩按抗弯刚度等效原则等效为连续墙体, 内支撑采用梁单元进行模拟, 其布置图如图 2 所示。

为了更有效地模拟结构和土的相互作用, 在基坑连续墙与地层、桥墩与地层均直接设置了界面。有限元计算模型纵剖面示意图如图 4 所示。

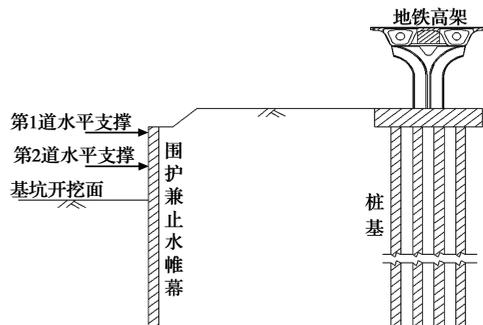


图 4 有限元计算模型示意图(纵剖面)

Fig. 4 Finite element model(longitudinal profile)

数值分析方法的关键问题之一, 是要采用合适的本构模型和计算参数。目前, 在软土地区基坑施工数值模拟中, 大量使用的硬化模型包括硬土模型(简称 HS)和小应变土体硬化模型(简称 HSS)^[14], 是通用岩土有限元软件 Plaxis 中常用的两种土体本构模型。在城市基坑工程中, 土体的剪应变一般需控制在 $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-3}$ 的量级之间, 方可保证基坑开挖对周边环境的影响可控, 处于小应变状态。因此, 土体采用小应变土体硬化模型(HSS), 混凝土管桩、钻孔灌注桩、桥墩、桥梁、基坑围护及内支撑均采用线弹性模型。

基坑施工共分 3 次开挖, 每次开挖前进行基坑降水, 地下水位降至开挖面以下 1 m。计算过程中, 以稳态渗流法模拟基坑内外水头差引起的渗流, 其中, 围护墙结构渗透系数视为 0。

2.2 基于实测数据的计算参数反演

除了 HS 模型中的剪切模量 E_{oed}^{ref} 、割线模量 E_{50}^{ref} 、卸载再加载模量 E_{ur}^{ref} 这 3 个特性参数, HSS 模型中, 还需确定小应变特性参数, 即初始剪切模量 G_0^{ref} 和阈值剪应变 $\gamma_{0.7}$, 分别为参考压力 P^{ref} 对应的剪切模量和剪切模量 G 随应力增大而降低至 $0.7G_0^{ref}$ 时所对应的剪应变^[14]。徐中华等^[15]、王卫东等^[16]针对上海软土地区 HS 模型和 HSS 模型的取值方法进行了多年实验和数值研究。苏南地区与上

海地区毗邻,可借鉴其参数取值方式。本文按照表 1 进行参数反演,经过与实测数据的比较分析,最终为苏南地区基坑施工数值模拟土体本构模型及参数选择提供建议。

表 1 参数反演

Table 1 Parameter inversion

方案	$E_s : E_{ocd}^{ref} : E_{50}^{ref} : E_{ur}^{ref}$	$E_{ur}^{ref} : G_0^{ref}$	$\gamma_{0.7} / 10^{-4}$	考虑渗流
A	1:1:1:5	1:2.5	1	是
B	1:1:1:8	1:2.5	1	是
C	1:1:1:5	1:4	2	是
D	1:1:1:8	1:4	2	是
E	1:1:1:5	1:2.5	1	否
F	1:1:1:8	1:4	2	否

注: E_s 为土层压缩模量

图 5 为不同参数取值方案下,计算值与实测值的对比结果。

从桥墩沉降和水平位移以及基坑坡顶沉降和水平位移(测点位置如图 2 所示)的实际监测结果与数值计算值的对比可知,方案 B 最为接近实测值。

各土层性质不同,参数取值方式也不尽相同。依据徐中华等^[15]对上海地区土层的研究,土层越

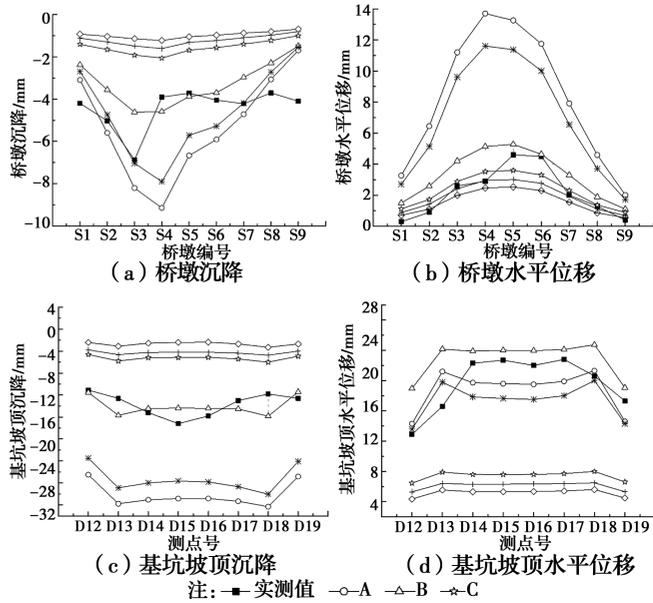


图 5 实测值与计算结果对比

Fig. 5 Comparison of measured and calculated results

软, E_{ur}^{ref} 与 E_{50}^{ref} 的比值越高。因此,结合上述计算结果,对方案 B 中各土层的特性参数进行局部调整,淤泥质土层取 E_{ur}^{ref} 为 E_{50}^{ref} 的 8~10 倍;黏土及粉土层取 E_{ur}^{ref} 为 E_{50}^{ref} 的 5~6 倍,其他保持不变,最终地层计算参数如表 2 所示。

表 2 地层计算参数

Table 2 Calculated parameters

土层名称	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c' / kPa	$\varphi' / (^\circ)$	$E_{ocd}^{ref} / \text{MPa}$	$E_{50}^{ref} / \text{MPa}$	$E_{ur}^{ref} / \text{MPa}$	G_0^{ref} / MPa	$\gamma_{0.7} / 10^{-4}$
② ₁ 黏土	18.7	19	23	4.4	4.4	36	90	1
③ 淤泥质粉质黏土	17.7	11	25	2.52	2.52	25.2	65	1
④ ₁ 粉质黏土	19.5	28	23	8.04	8.04	40	100	1
④ ₃ 砂质粉土	18.7	7	31	8.6	8.6	41	100	1
⑤ ₃ 粉质黏土	17.9	16	28	4.68	4.68	36	90	1
⑧ ₁₋₂ 粉黏夹粉土	18.4	18	28	5.99	5.99	37	92	1
⑨ ₁ 黏土	18.7	19	28	6.94	6.94	45	112	1

图 6 为最终计算结果,从图中可以看出,桥墩沉降和水平位移计算值和变形规律与实测结果已十分接近。因此,可认为该有限元模型能够模拟该项工程。

3 影响因素分析

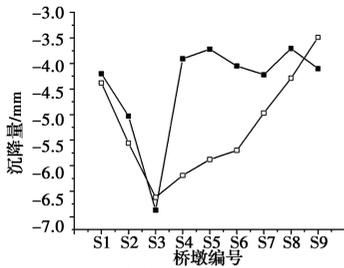
为进一步了解基坑开挖对临近地铁高架结构的影响,以上述有限元模型为基础,从数值分析的角度进一步研究基坑与桥墩开挖距离、基坑深度、基坑数量和施工顺序等因素对桥墩附加变形的影响规律。为避免不同桩型对沉降和水平位移规律的影响,后续计算过程中,高架桩基均采用桩长 40 m,桩径 600 mm 的预制管桩,其他地铁高架结构以及各材料

参数均保持不变。计算工况如表 3 所示。

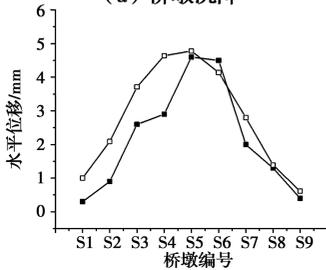
表 3 计算工况

Table 3 Calculation schemes

影响因素	计算工况	计算模型
基坑与桥墩水平距离/m	5、10、15、20、30、40、50	
基坑宽度/m	60、70、80、90、100、110、120、130、140	
基坑深度/m	5、10、13、16	
基坑数量	A→B→C→D 依次施工	
多基坑施工顺序	依次施工:A→B→C→D 分侧施工:A、B→C、D 同时施工:A、B、C、D	



(a) 桥墩沉降



(b) 桥墩水平位移
注: ■ 实测值 □ 计算值

图 6 有限元计算结果

Fig. 6 Finite element results

3.1 基坑与桥墩水平距离的影响分析

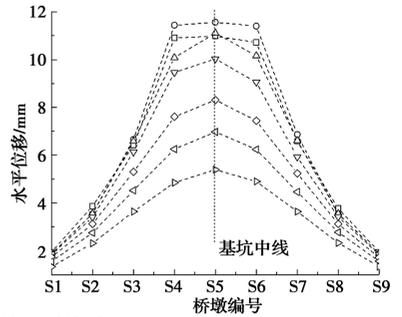
图 7 为基坑与桥墩水平间距对桥墩水平位移和沉降的影响曲线, 从变形趋势可以看出, 开挖距离对临近结构的横向变形影响要大于结构沉降变形, 特别是距离桥墩 $2H$ 范围内 (H 为基坑深度)。建议近距离基坑施工时, 将横向变形作为基坑施工临近结构安全性控制指标; 随着开挖距离的增大, 结构变形基本呈线性变化, 仅在 $1H$ 附近出现了拐点, 即当开挖距离约为 $1H$ 时, 结构变形达到最大。因此, 在确定基坑与临近结构水平间距时, 应尽可能避开 1 倍基坑开挖深度的情况。

3.2 基坑宽度的影响分析

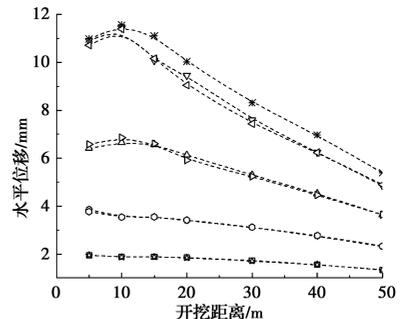
图 8 为不同基坑宽度条件下, 基坑开挖引起各桥墩的附加沉降分布图和沉降曲线。从图中可以看出, 随着基坑宽度的增大, 沉降槽逐渐扩大, 且存在明显的拐点, 当基坑宽度小于 $8H$ 时, 宽度对中心 $1/3$ 边长范围内的桥墩附加沉降影响最大, 每增加 10 m , 附加沉降将增大 1.3 mm 左右, 之后趋于平缓, 基坑宽度每增加 10 m , 附加沉降仅增大 0.4 mm 左右。说明当横向基坑宽度小于 8 倍基坑开挖深度时, 减小基坑宽度可以有效地减小桥墩水平位移和沉降。

3.3 基坑深度的影响分析

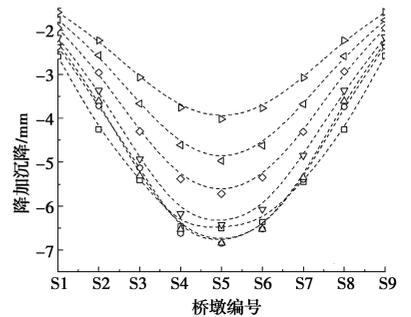
图 9 为各桥墩沉降随基坑深度变化的分布曲线和变化曲线。总体来看, 随着开挖深度增大, 结构变形明显增加, 特别是在开挖深度超过 10 m 后, 变形



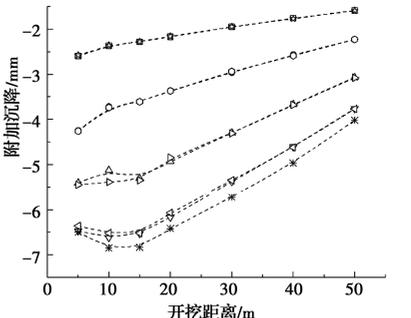
注: 开挖距离/m: □ 5 ○ 10 △ 15
▽ 20 ◇ 30 < 40 > 50
(a) 桥墩水平位移分布曲线



注: 桥墩编号: □ S1 ○ S2 △ S3 > S4
* S5 < S6 < S7 ○ S8 * S9
(b) 桥墩水平位移曲线



注: 开挖距离/m: □ 5 ○ 10 △ 15
▽ 20 ◇ 30 < 40 > 50
(c) 桥墩沉降分布曲线



注: 桥墩编号: □ S1 ○ S2 △ S3 > S4
* S5 < S6 < S7 ○ S8 * S9
(d) 各桥墩沉降曲线

图 7 基坑与桥墩水平间距对结构变形的影响
Fig. 7 The relationship between settlement of piers and horizontal spacing

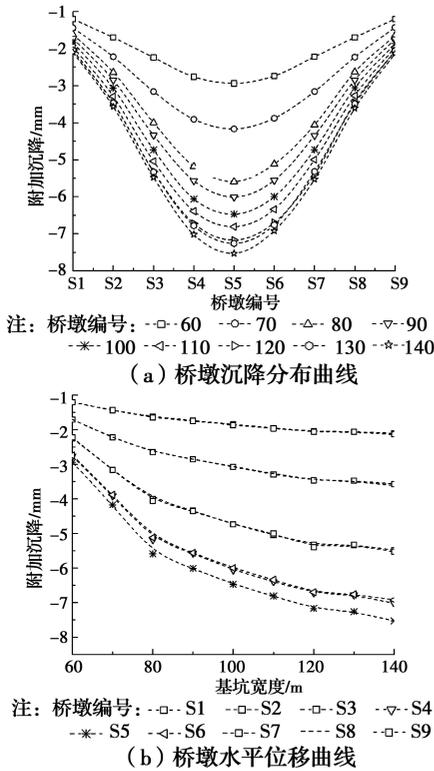


图8 桥墩沉降与基坑宽度的关系

Fig. 8 The relationship between settlement of piers and width of pit

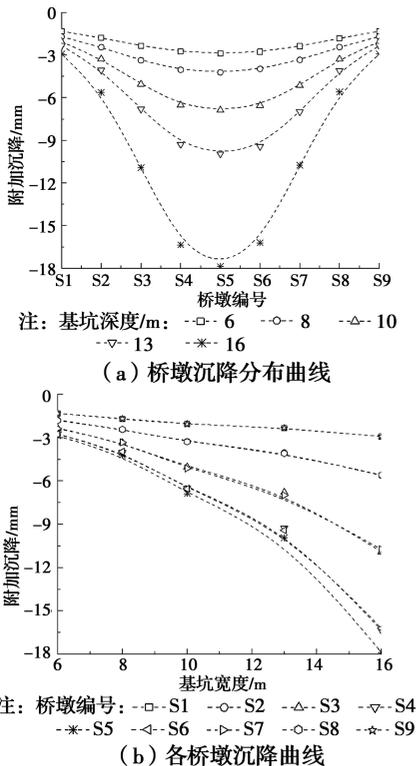


图9 桥墩沉降与基坑深度的关系

Fig. 9 The relationship between settlement of piers and depth of pit

速度明显加快,且以基坑中线左右 $2H$ 范围内的桥墩变形最为明显,开挖深度由 6 m 分别增加到 10 m 和 16 m,桥墩沉降增加了约 4 mm 和 14 mm。因此,当增加基坑挖深时,应重点控制和保护该范围内的桥墩,必要时需对桥墩进行加固或增设隔离措施。

3.4 基坑数量的影响分析

当地铁高架结构两侧存在单个或多个基坑时,高架结构的变形出现不同程度的叠加情况。A、B、C、D 分别为位于地铁高架桥两侧的同规模基坑,其中,A、B 并列于高架左侧,C、D 并列于右侧。图 10 所示为 4 个基坑依次施工对高架结构水平位移和沉降的影响曲线。由图 10 可知,对侧基坑施工结构横向变形回弹明显,基本可以忽略结构的水平位移,同侧施工则在基坑相邻处出现明显的叠加区域,水平位移极值点仍然处于基坑中心附近,相对于单基坑时有所增大,但并不显著;对侧基坑施工时,基坑中心处桥墩沉降明显增大,远远超过了 2 倍单基坑引起的桥墩沉降,同侧基坑施工沉降规律与横向变形规律相似。总的来说,随着基坑数量的增多,变形叠加区域结构变形呈现出明显的非线性特性,这是因为,多重施工扰动导致软土结构受损,土体工程性质逐渐弱化。

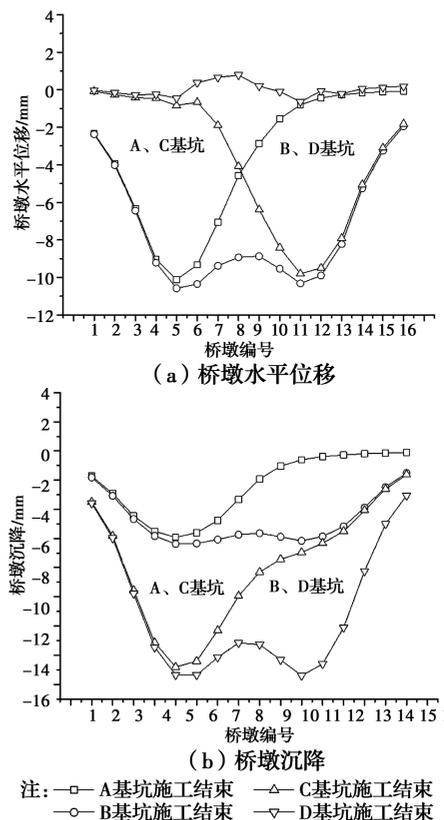


图10 多基坑依次施工引起桥墩水平变形、沉降曲线

Fig. 10 The relationship between settlement of piers and depth of pit

3.5 多基坑施工顺序的影响分析

图 11 为不同施工顺序对高架结构水平位移和沉降的影响曲线。从图中可以看出,双侧 4 基坑同时施工或先后依次施工,桥墩水平变形基本相当;分侧施工时,桥墩水平位移最大值出现在后施工一侧的基坑相邻处;多个基坑同时施工引起的结构沉降最大,按结构两侧分侧施工时最小,各个基坑依次施工时次之。

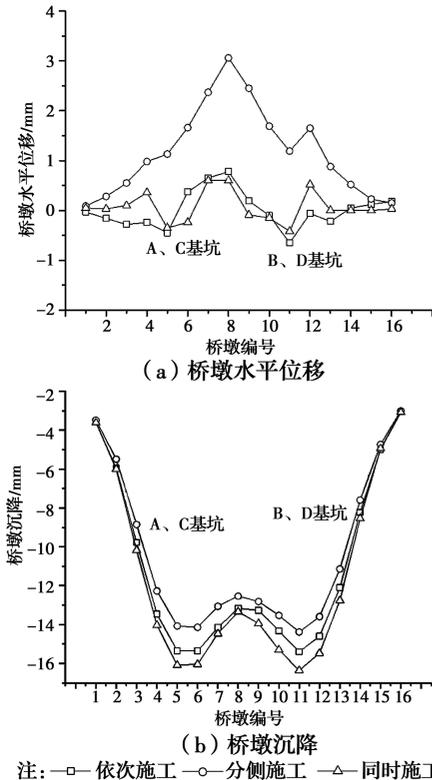


图 11 多基坑施工顺序引起桥墩水平变形、沉降曲线

Fig. 11 The relationship between settlement of piers and depth of pit

4 结论

结合实际工程,通过基坑开挖对沿线地铁高架结构变形影响的现场实测和数值模拟发现,基坑与地铁高架结构水平间距、基坑宽度、基坑深度、基坑数量以及基坑施工顺序对相邻结构变形均有明显的影响。

1) 开挖距离小于 $2H$ 时 (H 为基坑深度), 基坑与结构间距对结构横向变形的影响要大于竖向变形; 开挖距离为 $1H$ 时, 结构横向变形与竖向变形均达到最大。

2) 结构变形随基坑宽度的增大而增大, 当宽度大于 $8H$ 时, 影响骤然降低。

3) 基坑挖深对结构变形的影响显著, 深度超过 10 m 后, 沉降尤为明显, 且以基坑中线 $1H$ 范围内的结构影响最大。

4) 多个基坑施工引起的结构变形表现出一定的非线性, 同侧多基坑施工对基坑相邻区内结构影响较大, 有明显的叠加效应; 对侧基坑施工时, 结构横向变形有明显的回弹现象, 最终变形较小, 而竖向变形有显著的非线性叠加效应, 变形量约为单个基坑的 2.5 倍。

5) 当结构两侧存在多个基坑时, 不同施工工序引起的结构变形略有差别。分侧施工引起的结构竖向变形最小, 但横向变形最大; 同时施工引起的结构竖向位移最大, 横向变形却较小。

参考文献:

- [1] WANG L, LUO Z, XIAO J H, et al. Probabilistic inverse analysis of excavation-induced wall and ground responses for assessing damage potential of adjacent buildings [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2014, 32(2): 273-285.
- [2] ZHANG X M, YANG J S, ZHANG Y X, et al. Cause investigation of damages in existing building adjacent to foundation pit in construction [J]. Engineering Failure Analysis, 2018, 83: 117-124.
- [3] 杭州杭港地铁有限公司. 杭州地铁 1 号线地铁保护区巡查月度报告[R]. 杭州: 杭州杭港地铁有限公司, 2014. Hangzhou MTR Corporation. Monthly inspection report of Hangzhou Metro Line 1 protection area [R]. Hangzhou: Hangzhou MTR Corporation, 2014.
- [4] DOLEŽALOVÁ M. Tunnel complex unloaded by a deep excavation [J]. Computers and Geotechnics, 2001, 28(6/7): 469-493.
- [5] HU F, YUE Q, ZHOU J, et al. Design and construction of a deep excavation in soft soils adjacent to the Shanghai Metro tunnels [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(5): 933-948.
- [6] 王卫东, 沈健, 翁其平, 等. 基坑工程对邻近地铁隧道影响的分析与对策[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(Sup1): 1340-1345. WANG W D, SHEN J, WENG Q P, et al. Analysis and countermeasures of influence of excavation on adjacent tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(Sup1): 1340-1345. (in Chinese)
- [7] LIANG R Z, WU W B, YU F, et al. Simplified method for evaluating shield tunnel deformation due to

- adjacent excavation [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 71: 94-105.
- [8] LIANG R Z, XIA T D, HUANG M S, et al. Simplified analytical method for evaluating the effects of adjacent excavation on shield tunnel considering the shearing effect [J]. *Computers and Geotechnics*, 2017, 81: 167-187.
- [9] 周顺华,何超,肖军华,等. 环间错台效应下基坑开挖引起临近地铁盾构隧道变形的能量计算法[J]. *中国铁道科学*, 2016, 37(3): 53-60.
- ZHOU S H, HE C, XIAO J H, et al. Energy method for calculating deformation of adjacent shield tunnels due to foundation pit excavation considering step between rings [J]. *China Railway Science*, 2016, 37(3): 53-60. (in Chinese)
- [10] 魏纲. 基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的实测与分析[J]. *岩土力学*, 2013, 34(5): 1421-1428.
- WEI G. Measurement and analysis of impact of foundation pit excavation on below existed shield tunnels [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(5): 1421-1428. (in Chinese)
- [11] ZHENG G, YANG X Y, ZHOU H Z, et al. A simplified prediction method for evaluating tunnel displacement induced by laterally adjacent excavations [J]. *Computers and Geotechnics*, 2018, 95: 119-128.
- [12] 张子新,李佳宇,周湘,等. 近距离开挖卸荷条件下运营地铁高架桥墩响应研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(12): 3531-3540.
- ZHANG Z X, LI J Y, ZHOU X, et al. A study on the response of the piers of operating metro viaducts under the excavation-induced unloading condition [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(12): 3531-3540. (in Chinese)
- [13] 吴楠,肖军华,软土地区地铁高架结构不均匀沉降特征与影响因素[J]. *交通运输工程学报*, 2017, 17(2): 12-20.
- WU N, XIAO J H. Uneven settlement characteristics and influence factors of metro elevated structures in soft soil region [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2017, 17(2): 12-20. (in Chinese)
- [14] BENZ T. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences [D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2007.
- [15] 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, 326.
- 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, 326. (in Chinese)
- [16] 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. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)