

引用本文:颜 超,孙廉威,程子聪.深基坑开挖与周边既有建筑物改造相互影响研究[J].建筑科学与工程学报,2021,38(6):80-89.

YAN Chao, SUN Lian-wei, CHENG Zi-cong. Study on Interaction Between Deep Foundation Pit Excavation and Reconstruction of Surrounding Existing Buildings[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(6): 80-89.

DOI:10.19815/j.jace.2021.08060

深基坑开挖与周边既有建筑物改造相互影响研究

颜 超,孙廉威,程子聪

(上海建工集团股份有限公司工程研究总院,上海 201114)

摘要:基于上海体育馆、上海游泳馆改造及新建体育综合体项目,研究了紧邻深基坑既有建筑物改造与深基坑开挖之间的相互影响,通过大型有限元软件对深基坑开挖和周边既有建筑物“卸载-加载”改造进行模拟,分析了同时进行新建体育综合体深基坑开挖和上海体育馆“卸载-加载”改造两者叠加工况下的相互影响,进一步探讨了深基坑开挖与周边既有建筑物改造同时进行的最优工况。此外,在最优工况的基础上结合基坑被动区加固、围护结构刚度以及两者相互叠加对深基坑和周边建筑物的影响进行深入讨论。结果表明:最不利工况为基坑开挖至第 2 道支撑时对周边建筑物进行加载改造,在实际施工中应避免出现该工况;最优工况为基坑完成第 1 道支撑后对周边建筑物进行卸载改造,并在基坑完成第 2 道支撑后对周边建筑物加载改造;在最优工况及其他同等条件下基坑被动区加固对基坑和周边建筑物产生的影响要大于基坑围护结构强度对其产生的影响,研究结果可以为今后类似工程施工提供依据与参考。

关键词:深基坑;建筑物改造;相互影响;数值分析;HS 模型

中图分类号:TU473

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2021)06-0080-10

Study on Interaction Between Deep Foundation Pit Excavation and Reconstruction of Surrounding Existing Buildings

YAN Chao, SUN Lian-wei, CHENG Zi-cong

(Engineering General Institute of Shanghai Construction Group Co., Ltd., Shanghai 201114, China)

Abstract: Based on the reconstruction of Shanghai Gymnasium and Shanghai Natatorium and the new sports complex project, the interaction between the reconstruction of existing buildings close to the deep foundation pit and the excavation of deep foundation pit was studied. The excavation of deep foundation pit and the “unloading-loading” reconstruction of surrounding existing buildings were simulated by large finite element software, and the interaction between them were analyzed. The optimal working condition of deep foundation pit excavation and surrounding existing building reconstruction was further discussed. In addition, on the basis of the optimal working condition, combined with the reinforcement of the passive area of the foundation pit, the stiffness of the retaining structure and the influence of their superposition on the deep foundation pit and surrounding buildings were further discussed. The results show that the most unfavorable condition is the loading reconstruction of the surrounding buildings when the foundation pit is

收稿日期:2021-08-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0805500);上海建工集团股份有限公司重点科研项目(18JCSF-28)

作者简介:颜 超(1991-),男,江苏盐城人,工程师,工学硕士,E-mail:ychao1991@126.com。

excavated to the second support, which should be avoided in the actual construction. The optimal condition is unloading reconstruction of the surrounding buildings after the first support of the foundation pit is completed, and the loading reconstruction of the surrounding buildings after the second support of the foundation pit is completed. Under the optimal working conditions and other equivalent conditions, the impact of passive area reinforcement of foundation pit on foundation pit and surrounding buildings is greater than that of foundation pit retaining structure strength. The research results can provide basis and reference for future similar engineering construction.

Key words: deep foundation pit; reconstruction of building; interaction; numerical simulation; HS model

0 引言

随着中国城市建设步伐的不断加快,一些特大城市(北京、上海、深圳等)的土地资源日趋紧张,城市地下空间开发建设的周边环境也逐渐变得复杂,在实际工程中也逐渐出现一些特殊的施工工况,如深基坑开挖与周边既有建筑物改造同时施工。为了避免两者之间的相互扰动影响,在实际施工的过程中通常将两者进行先后施工,但是施工成本偏大。因此弄清两者同步施工的相互影响,对提高实际工程的安全性和经济性具有重大的意义。

目前已有不少学者对基坑开挖及周边扰动进行了大量研究。在基坑施工对周边既有建(构)筑物影响方面,胡军等^[1-4]通过数值分析、数据监测及模型试验等方法研究了基坑开挖对邻近桩基的影响,进一步揭示了在邻近基坑开挖时既有建(构)筑物桩基的响应机制;Shi 等^[5-8]通过解析法、试验及数值分析的方法研究了基坑开挖与邻近既有盾构隧道的相互影响,提出了相应的保护技术和控制措施;张陈蓉等^[9-12]分析了基坑开挖对周边既有管线的影响,提出了相应的变形控制标准;郭亚磊等^[13-17]通过数值分析等方法研究了基坑被动区土体加固对基坑变形的影响,提出了基坑被动区加固的合理范围;谭永朝等^[18-19],分析了支护结构对基坑变形及工程造价的影响,提出了不同情况下使用经济合理的支护结构。上述学者的研究主要集中于基坑开挖对周边既有建(构)筑物的单一扰动影响,而对深基坑施工与周边既有建(构)筑物改造同步进行的工况研究相对较少。本文将综合考虑深基坑开挖与周边既有建筑物改造同步进行下的相互影响机制,分析安全影响因素,以便指导施工、优化方案、保障安全。

本文基于上海体育馆、上海游泳馆改造及新建体育综合体项目,通过数值分析法,探索新建体育综

合体基坑开挖与上海体育馆在不同“卸载-加载”改造次序下的相互影响,并在此基础上探讨了基坑开挖与改造施工的有利方案,以降低风险,更好地预防本工程以及未来类似工程中施工事故的发生。

1 工程概况

本项目位于上海市徐家汇区,基坑总面积约 $5.6 \times 10^4 \text{ m}^2$,基坑开挖深度为 $-6.75 \sim -12.8 \text{ m}$ 。其中,2 区基坑平均开挖深度为 -12.5 m ,上海体育馆位于基坑东北侧,距基坑边线最近大约为 3.4 m ,如图 1 所示。

上海体育馆采用桩筏基础,基底埋深为室内地坪以下 3.7 m ,钻孔灌注桩直径为 600 mm ,桩长 16.1 m ;本基坑采用顺作法施工,普遍采用 1.0 m 厚地下连续墙+2 道钢筋混凝土支撑的支护形式,如图 2 所示。

本基坑场地属于古河道分布区,主要为流塑性黏体,含水量较大,压缩性高,土体力学性质较差,在基坑开挖范围内沿深度分布的土层依次为①填土、③淤泥质粉质黏土、④₁淤泥质黏土、④₂₋₁粉质黏土、④₂₋₂砂质粉土、⑤₁粉质黏土和⑤₃粉质黏土。

2 有限元模型

2.1 模型简介

为了研究深基坑开挖与周边既有建筑物改造的相互影响,选取了图 1 中 A-A 截面建立二维有限元模型,如图 3 所示。模型坑外长度为 140 m (约 11 倍开挖深度),坑底以下长度为 40 m (约 3 倍开挖深度),基坑开挖深度为 -12.5 m 。模型中土体采用平面应变 15 节点 2-D 等参单元,地下连续墙及周边构筑物采用板单元模拟,支撑采用锚定杆单元模拟,其中上海体育馆上部结构均转换为实际荷载代替。

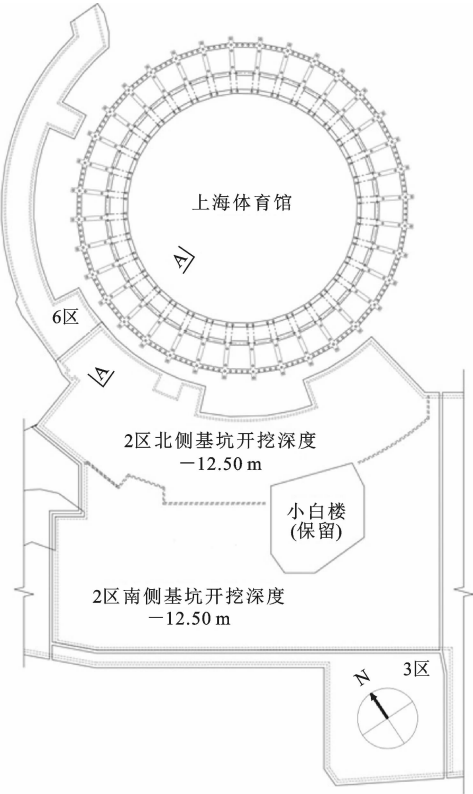


图 1 工程平面示意

Fig. 1 Plan Schematic of Project

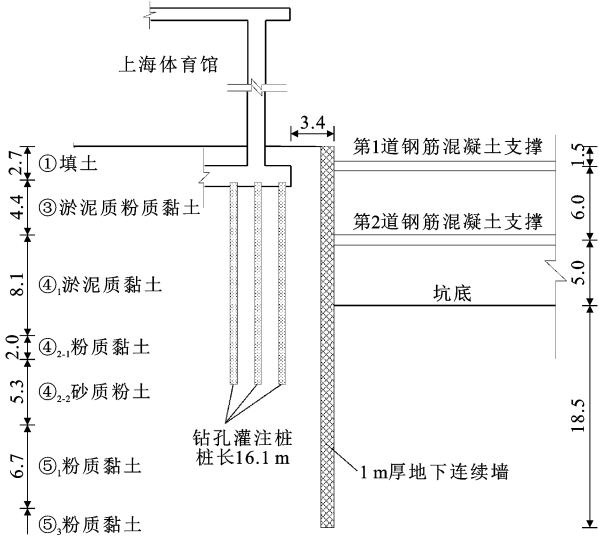


图 2 工程典型剖面 (单位:m)

Fig. 2 Typical Profile of Project (Unit:m)

2.2 参数选取

土体硬化(HS)本构模型是目前在基坑开挖数值分析中常用的模型之一,适用于在敏感环境下对基坑开挖进行分析^[20-24]。HS本构模型土体强度采用三轴试验模量 E_{50} 、三轴卸载/再加载模量 E_{ur} 以及固结仪荷载模量 E_{oed} 来考虑土体在卸载/再加载条件下的性状,各刚度计算公式为

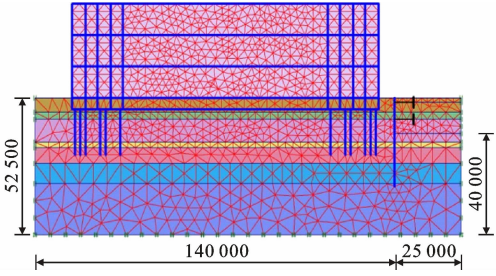


图 3 有限元模型 (单位:mm)

Fig. 3 Finite Element Model (Unit:mm)

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left[\frac{c \cos(\varphi) - \sigma'_3 \sin(\varphi)}{c \cos(\varphi) + p^{ref} \sin(\varphi)} \right]^m \quad (1)$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left[\frac{c \cos(\varphi) - \sigma'_3 \sin(\varphi)}{c \cos(\varphi) + p^{ref} \sin(\varphi)} \right]^m \quad (2)$$

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left[\frac{c \cos(\varphi) - \sigma'_3 \sin(\varphi)}{c \cos(\varphi) + p^{ref} \sin(\varphi)} \right]^m \quad (3)$$

式中: c 为黏聚力; φ 为内摩擦角; p^{ref} 为参考应力; σ'_3 为三轴试验中的围压; E_{50}^{ref} 为割线模量; E_{ur}^{ref} 为卸载/再加载模量; E_{oed}^{ref} 为切线模量; m 为刚度应力水平相关幂指数。

模型土体计算参数见表 1。模型中上海体育馆的“卸载-加载”改造通过荷载的实施来模拟,初始荷载为实际上部结构的重力,取 550 kN,结构详细计算参数见表 2。

表 1 土体计算参数

Table 1 Calculation Parameters of Soils

土层名称	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	E_{50}^{ref}/MPa
①填土	18.0	5	10	4.2
③淤泥质粉质黏土	17.4	13	17	4.2
④ ₁ 淤泥质黏土	16.7	14	12	4.0
④ ₂₋₁ 粉质黏土	18.0	14	22	2.4
④ ₂₋₂ 砂质粉土	18.8	5	32	4.0
⑤ ₁ 粉质黏土	17.9	17	17	13.0
⑤ ₃ 粉质黏土	18.2	18	22	4.2

表 2 结构计算参数

Table 2 Calculation Parameters of Structures

结构名称	混凝土强度	弹性模量/MPa	泊松比
地下连续墙	C30	30 000	0.2
第 1 道支撑	C30	30 000	0.2
第 2 道支撑	C35	31 500	0.2
地基梁	C30	30 000	0.2
工程桩	C35	31 500	0.2

2.3 计算工况

由于上海体育馆在改造的过程中只是对上部结构进行局部的拆除改造,因此在计算过程中对卸载荷载取约为上海体育馆初始荷载的一半进行分析。

模型共设置了 17 种“卸载-加载”工况,以全面体现上海体育馆在不同改造时间点进行深基坑开挖之间的相互影响,计算工况见表 3,其中模型 1 为基础工况,即在深基坑开挖的过程中对上海体育馆不进行任何改造。

表 3 计算工况

Table 3 Calculation Work Conditions

模型编号	卸载时间点	加载时间点
1		
2	基坑开挖前	开挖至第 1 道支撑
3	基坑开挖前	施工完第 1 道支撑
4	基坑开挖前	开挖至第 2 道支撑
5	基坑开挖前	施工完第 2 道支撑
6	基坑开挖前	开挖至基坑底
7	开挖至第 1 道支撑	施工完第 1 道支撑
8	开挖至第 1 道支撑	开挖至第 2 道支撑
9	开挖至第 1 道支撑	施工完第 2 道支撑
10	开挖至第 1 道支撑	开挖至基坑底
11	施工完第 1 道支撑	开挖至第 2 道支撑
12	施工完第 1 道支撑	施工完第 2 道支撑
13	施工完第 1 道支撑	开挖至基坑底
14	开挖至第 2 道支撑	施工完第 2 道支撑
15	开挖至第 2 道支撑	开挖至基坑底
16	施工完第 2 道支撑	开挖至基坑底
17	开挖至基坑底	

3 计算分析

3.1 模型参数验证

为了确保有限元计算参数选取的合理性,根据工程实际进度,特选取表 3 中的模型 1 开展有限元计算,并将计算结果与现场监测结果进行对比。

图 4、表 4 分别给出了围护结构侧向位移、地基梁沉降监测点的计算值与监测值的对比情况。从图 4 和表 4 可以看出,有限元计算值与现场监测值较为接近,采用该模型进行后续计算分析较为合理。

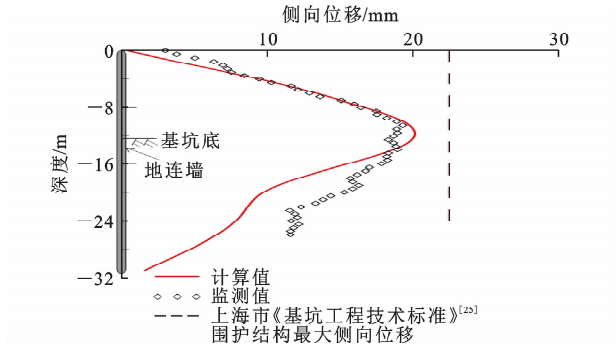


图 4 侧向位移对比

Fig. 4 Comparison of Lateral Displacements

表 4 地基梁沉降对比

Table 4 Comparison of Foundation Beam Settlements

地基沉降计算值/mm	地基沉降监测值/mm	相对误差/%
-9.0	-7.4	21.6

3.2 “卸载-加载”影响分析

本文主要讨论在不考虑基坑被动区加固的条件下,上海体育馆在基坑开挖过程中进行“卸载-加载”对围护结构和上海体育馆基础的影响。

图 5 给出了各模型工况下的结构变形曲线,从图 5 中可以看出:

(1)在基坑开挖至第 2 道支撑而未施工第 2 道支撑时对建筑物进行加载,围护结构的侧向位移超过了规范规定的值(模型 4、模型 8 以及模型 11),因此这是最不利的施工工况,在施工时避免出现这一情况。

(2)结合围护结构侧向位移、建筑物桩基侧向位移以及建筑物地基梁沉降可以看出,施工完成第 2 道支撑后开挖至坑底前(模型 5、模型 9、模型 12 以及模型 14),施工对围护结构和建筑物的影响最小,因此基坑开挖的同时宜在完成第 2 道支撑后、开挖至坑底前完成建筑物的改造。

(3)虽然土方开挖至坑底再对建筑物进行“卸载-加载”未超过规范规定值(模型 6、模型 11、模型 13、模型 15、模型 16 以及模型 17),但是在实际施工过程中是严禁在基坑开挖至坑底时再对周边建筑物进行加载,因此本文只对这几个模型进行对比,不作为有利模型进行考虑。

对于在不同的“卸载-加载”工况条件下,当基坑施工完成第 2 道支撑后、开挖至坑底前完成对周边加载时,对基坑的安全更有利,因此模型 5、模型 9、模型 12 以及模型 14 为对基坑安全的有利模型。

从图 6 给出了 4 个有利模型下的结构位移。可以看出,4 个模型在不同的工况条件下,对上海体育馆的沉降影响不大,但是对围护结构的侧向位移和上海体育馆桩基影响明显,模型 12 要优于其他 3 个模型。

结合图 5 和图 6 可以看出,基坑周边建筑物加载时间点的影响要远大于卸载时间点的影响,因此基坑开挖过程对周边建筑物进行改造时主要还是取决于建筑物的加载时间点。

综上所述,在基坑开挖过程中,为了更好地控制周边建筑“卸载-加载”时对围护结构和上海体育馆的影响,要注意基坑周边荷载的加载阶段,建议施工过程中宜按照模型 12 的施工工况进行合理施工。

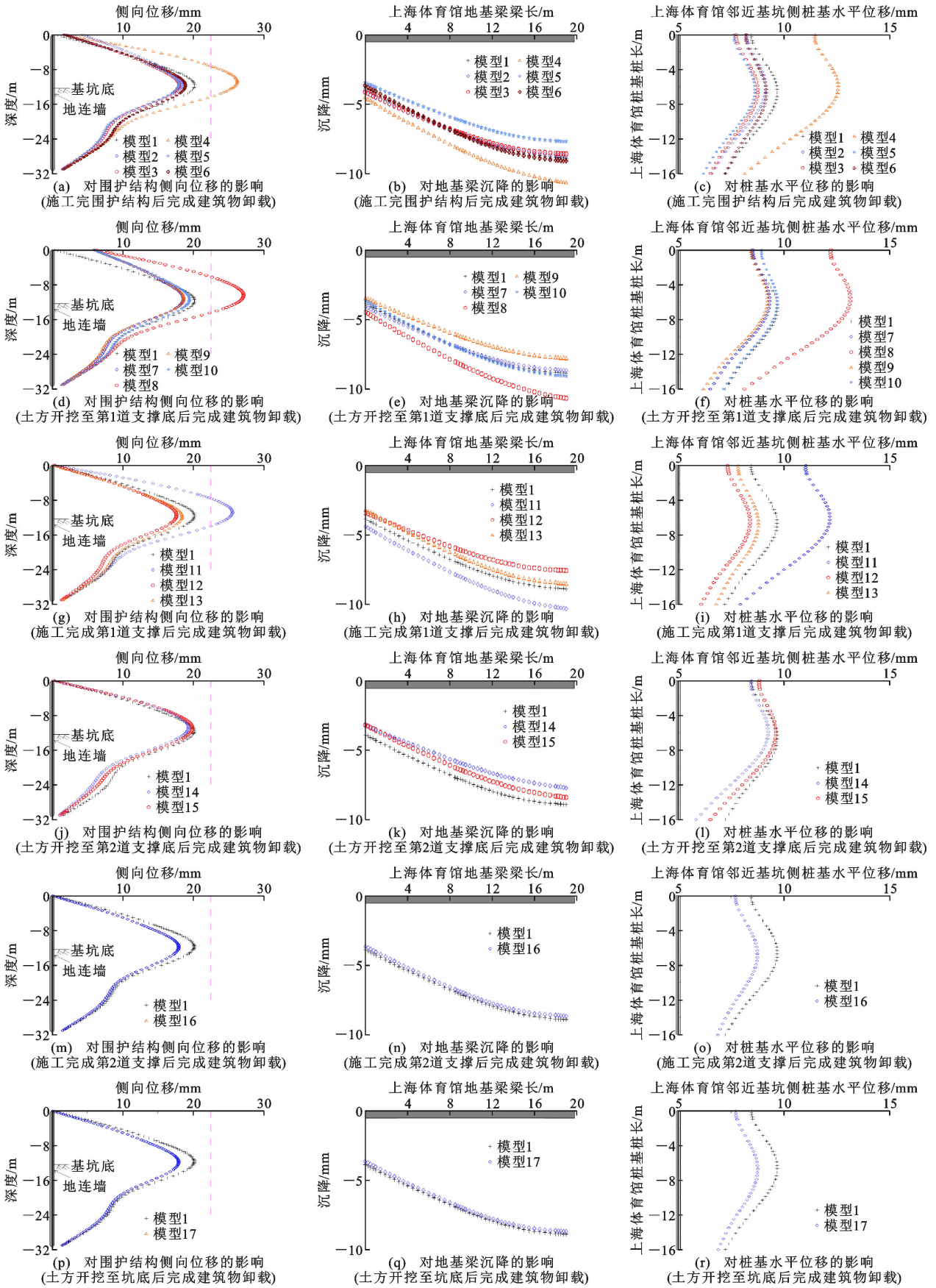


图 5 各模型结构变形

Fig. 5 Structural Deformation of Each Model

工况见表 5,各模型分析结果见图 7~9。

表 5 加固工况

Table 5 Reinforcement Work Conditions		
加固范围	模型编号	分析工况
第 1 道支撑底至坑底 以下 3 m	1	加固宽度为 0.4H
	2	加固宽度为 0.5H
	3	加固宽度为 0.6H
	4	加固宽度为 0.7H
	5	加固宽度为 0.8H
	6	加固宽度为 0.9H
	7	加固宽度为 1.0H
第 1 道支撑底,加固 宽度为 1.0H	1	加固深度为 0.25H
	2	加固深度为 0.30H
	3	加固深度为 0.40H
	4	加固深度为 0.50H
	5	加固深度为 0.60H
	6	加固深度为 0.70H
	7	加固深度为 0.80H
加固宽度为 H,坑底 加固深度为 0.6H	1	从第 1 道支撑底开始加固
	2	从第 2 道支撑底开始加固
	3	从基坑底开始加固

注: H 为挖深。

从图 7,8 可以看出,在基坑开挖至底时,被动区坑底加固深度对围护结构侧向位移、地基梁沉降和桩基侧向位移的影响要大于加固宽度产生的影响。随着加固深度的增加,围护结构侧向位移和上海体育馆桩基侧向位移逐渐减小,当坑底加固深度达到 $0.4H$ 时,被动区加固对围护结构侧向位移和上海体育馆桩基侧向位移影响趋于平稳;被动区加固深度对地基梁沉降有一定的影响,但规律性不明显。

从图 9 可以看出,在不同工况下对基坑被动区进行加固,对围护结构侧向位移和上海体育馆桩基侧向位移影响不大,但对上海体育馆地基梁沉降影响较明显,加固从第 1 道支撑底开始比从第 2 道支撑底和基坑底开始更能有效地控制上海体育馆地基

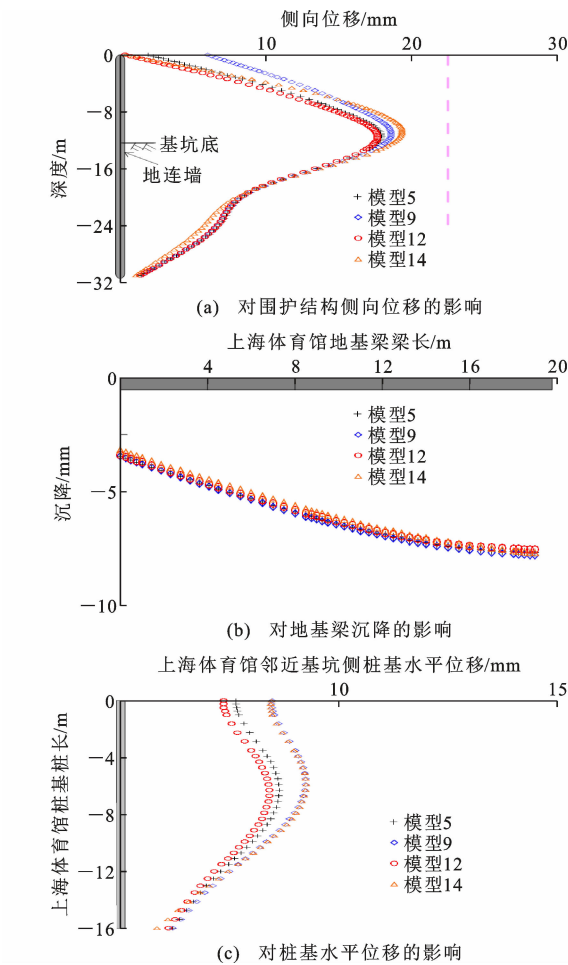


图 6 各有利模型下的结构位移

Fig. 6 Structural Deformation of Each Favorable Model

3.3 影响因素分析

3.3.1 基坑被动区加固的影响

本文采用最有利模型 12 讨论基坑被动区加固对围护结构和上海体育馆基础的影响。

根据上海市工程建设规范《基坑工程技术标准》(DG/TJ 08-61—2018)^[25]:被动区加固体的宽度不宜小于基坑开挖深度的 0.4 倍,并不宜小于 4 m;加固体的深度不宜小于 3 m。各模型基坑被动区加固

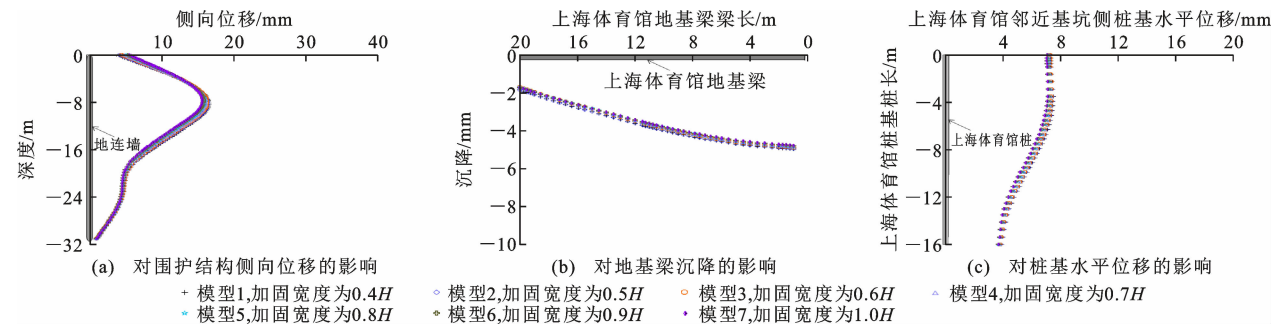


图 7 被动区不同加固宽度的影响

Fig. 7 Influence of Different Passive Zone Reinforcement Widths

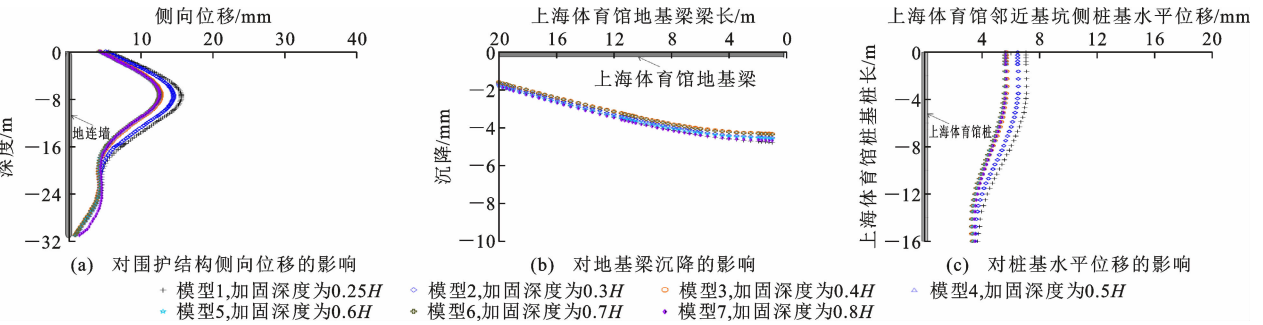


图 8 被动区不同加固深度的影响

Fig. 8 Influence of Different Passive Zone Reinforcement Depths

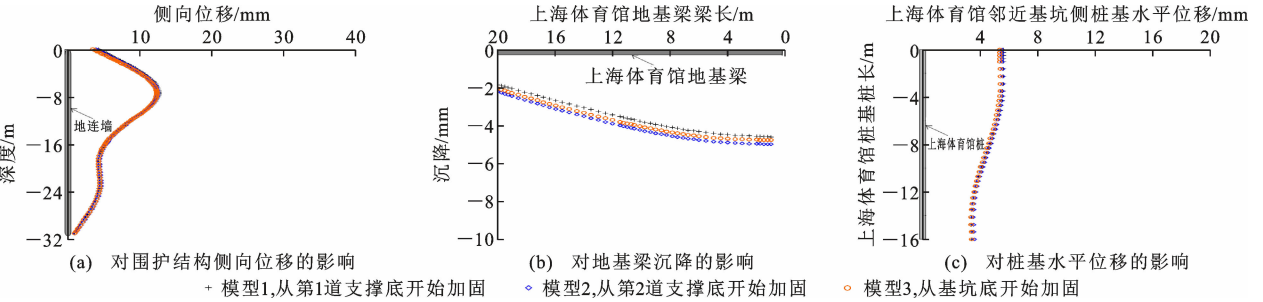


图 9 被动区不同加固工况的影响

Fig. 9 Influence of Different Passive Zone Reinforcement Working Conditions

梁沉降。

表 6 围护结构强度工况

综上所述,适当进行基坑被动区加固能够有效控制围护结构变形及周边建筑的沉降。

3.3.2 不同围护结构强度的影响

本文采用最有利模型 12 讨论不同围护结构强度对围护结构和上海体育馆基础的影响。各模型不同围护结构强度工况见表 6。

图 10 为不同围护结构强度的影响。可以看出,在基坑开挖至底时,采用高强度混凝土围护结构能减小上海体育馆地基梁沉降和桩基侧向位移,虽然这种减小量相对较小,但能减小围护结构侧向位移,有利于控制基坑围护结构变形。

3.3.3 被动区加固与围护结构强度叠加的影响

讨论在基坑被动区加固与围护结构强度叠加条件下对围护结构和上海体育馆基础的影响。各模型

Table 6 Work Condition of Retaining Structure Strength	
模型编号	围护结构混凝土强度
1	C30
2	C35
3	C40
4	C45
5	C50
6	C55
7	C60

不同叠加工况见表 7。

图 11 为基坑被动区加固与围护结构强度叠加的影响。可以看出:在基坑开挖至底时,采用高强度混凝土围护结构能减小围护结构的侧向位移、上海体育馆地基梁沉降和桩基侧向位移,但这种减小量相对较小;基坑被动区加固能够有效地减小围护结

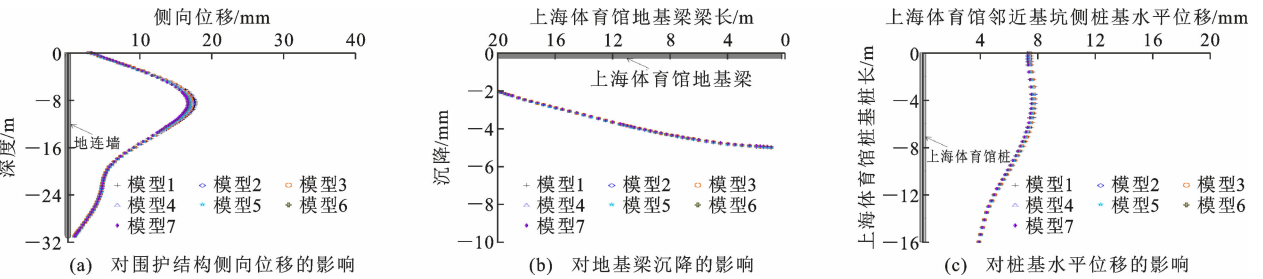


图 10 不同围护结构强度的影响

Fig. 10 Influence of Different Retaining Structure Strengths

表 7 被动区加固与围护结构强度叠加工况
Table 7 Work Condition of Passive Zone Reinforcement and Retaining Structure Strength

模型编号	工况内容
1	围护结构强度为 C30 混凝土,基坑被动区不加固
2	围护结构强度为 C30 混凝土,基坑被动区加固(从第 1 道支撑开始加固,加固宽度为 1.0H,坑底加固深度为 0.6H)
3	围护结构强度为 C60 混凝土,基坑被动区不加固
4	围护结构强度为 C60 混凝土,基坑被动区加固(从第 1 道支撑开始加固,加固宽度为 1.0H,坑底加固深度为 0.6H)

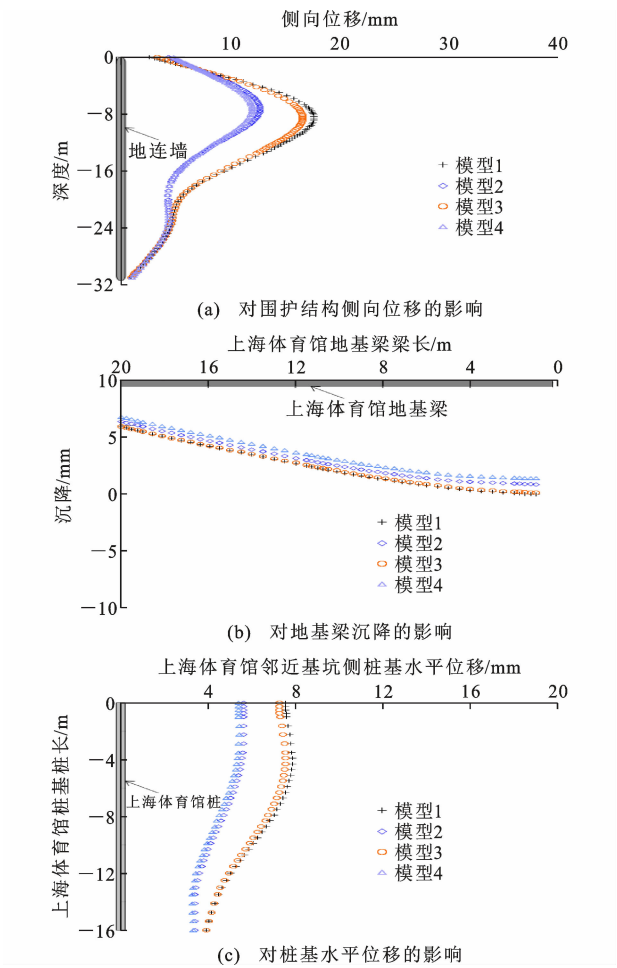


图 11 基坑被动区加固与围护结构强度叠加的影响

Fig. 11 Influences of Passive Zone Reinforcement and Retaining Structure Strength

构侧向位移以及上海体育馆地基梁沉降和桩基侧向位移。

通过上述分析可知,在相同的围护结构情况下,对基坑被动区进行合理加固能有效控制基坑围护结构变形和对周边环境的影响。

4 结 语

(1)基坑围护结构、上海体育馆基础结构变形随

卸载-加载不同时间点变化而变化,分析表明基坑受周边建筑物改造加载时间点影响要比受周边建筑物改造卸载时间点影响更大。

(2)在实际施工过程中,应控制好周边建筑物改造加载时间点,并避免在基坑开挖至第 2 道支撑时对周边建筑物进行加载改造,也不宜在基坑开挖至第 1 道支撑时对周边建筑物进行卸载改造,会导致基坑围护结构顶部产生较大的侧向位移。

(3)综合基坑围护结构变形、上海体育馆基础结构变形等安全影响因素,上海体育馆进行“卸载-加载”改造的最优工况为:在深基坑工程完成第 1 道支撑施工并达到设计强度后再进行卸载改造工序,在深基坑工程完成第 2 道支撑施工并达到设计强度后再进行加载改造工序。

(4)对于基坑被动区加固而言,在基坑其他条件一致的情况下,增加坑底加固的深度要比增加加固的宽度效果更好,更能够有效地控制围护结构的变形和对周边环境的影响。

参考文献:

References:

[1] 胡军. 深基坑开挖对邻近既有高铁桩基影响研究[J]. 铁道工程学报, 2017(6): 12-17, 22.
HU Jun. Research on the Influence of Excavation of Deep Foundation Pit to Adjacent Existing High-speed Railway Bridge Pile Foundations Stability[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017(6): 12-17, 22.

[2] 王明珉, 孙广宇, 朱立刚, 等. 深基坑开挖引起的桩基承载力损失和桩身附加拉力简化计算方法[J]. 建筑结构, 2019, 49(22): 53-58.
WANG Ming-min, SUN Guang-yu, ZHU Li-gang, et al. A Simplified Calculating Method for Calculating Bearing Capacity Loss of Pile Foundation and Additional Tension Force in Piles Caused by Deep Foundation Pit Excavation[J]. Building Structure, 2019, 49(22): 53-58.

[3] 刘松玉, 李洪江, 童立元, 等. 地下工程开挖卸荷既有桩基承载响应物理模拟及新进展[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(7): 1329-1338.
LIU Song-yu, LI Hong-jiang, TONG Li-yuan, et al. Model Tests and New Progress of Pile Response Due to Underground Excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(7): 1329-1338.

[4] 张骁, 肖军华, 农兴中, 等. 基于 HS-Small 模型的基坑近接桥桩开挖变形影响区研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(增 2): 263-273.
ZHANG Xiao, XIAO Jun-hua, NONG Xing-zhong,

- et al. Analysis of Influenced Zone of Foundation Pit Excavation Adjacent to Bridge Pile Foundation Using HS-Small Constitutive Model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S2): 263-273.
- [5] SHI C H, CAO C Y, LEI M F, et al. Effects of Lateral Unloading on the Mechanical and Deformation Performance of Shield Tunnel Segment Joints[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2016, 51: 175-188.
- [6] 魏 纲, 洪文强, 魏新江, 等. 基坑开挖引起邻近盾构隧道转动与错台变形计算[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(7): 1251-1259.
- WEI Gang, HONG Wen-qiang, WEI Xin-jiang, et al. Calculation of Rigid Body Rotation and Shearing Dislocation Deformation of Adjacent Shield Tunnels Due to Excavation of Foundation Pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(7): 1251-1259.
- [7] 郑 刚, 杜一鸣, 刁 钰, 等. 基坑开挖引起邻近既有隧道变形的影响区研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 599-612.
- ZHENG Gang, DU Yi-ming, DIAO Yu, et al. Influenced Zones for Deformation of Existing Tunnels Adjacent to Excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 599-612.
- [8] 姚爱军, 张剑涛, 郭海峰, 等. 地铁盾构隧道上方基坑开挖卸荷-加载影响研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2318-2326, 2335.
- YAO Ai-jun, ZHANG Jian-tao, GUO Hai-feng, et al. Influence of Unloading-loading of Foundation on Shield Tunnel Underneath[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2318-2326, 2335.
- [9] 张陈蓉, 俞 剑, 黄茂松. 基坑开挖对邻近地下管线影响的变形控制标准[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 2027-2034.
- ZHANG Chen-rong, YU Jian, HUANG Mao-song. Deformation Controlling Criterion of Effect on Underground Pipelines Due to Foundation Pit Excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(7): 2027-2034.
- [10] 王成华, 段贤伟. 基坑开挖对地下管线工作性状影响的数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(5): 1166-1172.
- WANG Cheng-hua, DUAN Xian-wei. Numerical Analysis on the Influence of Foundation Pit Excavations on the Working Behavior of Underground Pipelines[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(5): 1166-1172.
- [11] 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.
- [12] 何小龙, 杨天鸿, 周云伟, 等. 考虑管-土分离的基坑开挖引起邻近地下管线位移分析[J]. 土木与环境工程学报: 中英文, 2019, 41(6): 9-16.
- HE Xiao-long, YANG Tian-hong, ZHOU Yun-wei, et al. Analysis of Pipeline Displacement Induced by Adjoining Foundation Pit Excavation Considering Pipeline-soil Separation[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(6): 9-16.
- [13] 郭亚磊, 江辉煌. 基坑被动区软土层加固宽度的数值分析[J]. 铁道建筑, 2017(2): 105-108.
- GUO Ya-lei, JIANG Hui-huang. Numerical Analysis of Reinforcement Width of Soft Soil in Passive Zone of Foundation Pit[J]. Railway Engineering, 2017(2): 105-108.
- [14] 康志军, 谭 勇, 邓 刚, 等. 被动区土体加固对深基坑变形影响的研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(6): 119-123.
- KANG Zhi-jun, TAN Yong, DENG Gang, et al. Impact of Soil Reinforcement in Passive Zone on the Deformation Behaviors of Deep Excavation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(6): 119-123.
- [15] 王 浩, 贾敏才, 杨修晗. 基坑变形的尺度效应及控制措施研究[J]. 四川建筑科学研究, 2016, 42(1): 69-74.
- WANG Hao, JIA Min-cai, YANG Xiu-han. Influence of Size Effect on Deformation of Foundation Pit and Control Measures[J]. Sichuan Building Science, 2016, 42(1): 69-74.
- [16] 程 博, 严 平, 龚新辉, 等. 被动区加固对软土基坑支护影响的探讨[J]. 低温建筑技术, 2016, 38(1): 100-101.
- CHENG Bo, YAN Ping, GONG Xin-hui, et al. Discussion on Influence of Passive Zone Reinforcement on Soft Soil Foundation Pit Support[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2016, 38(1): 100-101.
- [17] 李志伟, 侯伟生, 叶爱丽, 等. 深基坑开挖段被动区加固的位移控制效果分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增 1): 621-627.
- LI Zhi-wei, HOU Wei-sheng, YE Ai-li, et al. Displacement Control Effect of Passive Zone Improvement at Excavation Section of Deep Foundation Pits [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34

- (S1):621-627.
- [18] 谭永朝,唐雅茹,彭加强,等.基于数值分析的深基坑围护结构优化设计[J].城市轨道交通研究,2009,12(8):21-24.
- TAN Yong-zhao, TANG Ya-ru, PENG Jian-qiang, et al. Optimum Design for Deep Foundation Pit Based on Numerical Value Analysis[J]. Urban Mass Transit, 2009, 12(8): 21-24.
- [19] 吴金东.考虑经济效益的基坑围护结构选型研究[D].上海:上海交通大学,2009.
- WU Jin-dong. Investigation on Selection of Retaining Structures of Foundation Pit Based on Economic Analysis[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009.
- [20] 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 Zhong-hua, WANG Wei-dong. 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.
- [21] 王卫东,翁其平,胡玉银.新型逆作法结构型式的设计与应用[J].岩土工程学报,2006,28(增):1546-1551.
- WANG Wei-dong, WENG Qi-ping, HU Yu-yin. Application and Design of New Top-down Excavation Method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S): 1546-1551.
- [22] 徐中华,王建华,王卫东.主体地下结构与支护结构相结合的复杂深基坑分析[J].岩土工程学报,2006,28(增):1355-1359.
- XU Zhong-hua, WANG Jian-hua, WANG Wei-dong. Analysis of a Complicated Deep Excavations Supported by Substructures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S): 1355-1359.
- [23] 戴斌,王卫东,徐中华.密集建筑区域中深基坑全逆作法的设计与实践[J].地下空间与工程学报,2005,1(4):579-583.
- DAI Bin, WANG Wei-dong, XU Zhong-hua. Design & Practice of Deep Foundation Pit Constructed by Top-down Method in Dense-constructed Area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(4): 579-583.
- [24] 陈晓平,闫军.深基坑支护结构的三维杆系有限元分析[J].岩土力学,2001,22(3):258-261.
- CHEN Xiao-ping, YAN Jun. 3D Pole System FEM Analysis for Bracing Structure of Deep Foundation Pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(3): 258-261.
- [25] DG/TJ 08-61—2018,基坑工程技术标准[S].
- DG/TJ 08-61—2018, Technical Code for Excavation Engineering[S].