

引用本文:邓彬,张磊,郑鹏鹏,等.深基坑开挖与内支撑调节对邻近沉井影响规律试验研究[J].建筑科学与工程学报,2023,40(5):174-182.

DENG Bin, ZHANG Lei, ZHENG Pengpeng, et al. Experimental study on influence of deep foundation pit excavation and inner support adjustment on adjacent open caisson[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(5): 174-182.

DOI:10.19815/j.jace.2022.01034

深基坑开挖与内支撑调节对邻近沉井影响规律 试验研究

邓彬¹, 张磊², 郑鹏鹏¹, 陈保国², 邹顺清¹

(1. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610081; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:为了探明基坑开挖以及内支撑伸缩调控下基坑与邻近沉井受力特性变化规律,采用室内“基坑-沉井”模型试验,研究了沉井侧壁土压力、内力、周边地表沉降、墙背土压力等变化规律。结果表明:基坑开挖过程中,墙背土压力减小,沉井侧壁水平弯矩由正转负,最大弯矩值位置随开挖深度的增大逐渐下移,周边地表沉降呈三角形分布;内支撑伸缩调节时,当前支撑深度附近墙背土压力受到的影响最明显,调节第3道支撑时局部土压力变化率最大,调节第4道支撑时局部土压力值达到最大值;多道支撑同时调节综合影响范围大于单支撑调节;支撑伸缩可能造成沉井发生一定转动,对靠近基坑侧沉井侧壁土压力影响大于远离基坑一侧;伸长内支撑可以一定程度减小基坑围护结构和邻近沉井位移,但是会导致沉井局部弯矩和土压力急剧增大,工程中应加强土压力和结构变形监测。

关键词:深基坑;沉井;可调节内支撑;受力特性;模型试验

中图分类号: TU470

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2023)05-0174-09

Experimental study on influence of deep foundation pit excavation and inner support adjustment on adjacent open caisson

DENG Bin¹, ZHANG Lei², ZHENG Pengpeng¹, CHEN Baoguo², ZOU Shunqing¹

(1. Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: In order to investigate the variation law of the stress characteristics of the foundation pit and the adjacent open caisson under the excavation of the foundation pit and the adjustment of the inner support, indoor model tests of foundation pit-open caisson were carried out to analyze the change law of the soil pressure on the sidewall of the open caisson, the internal force, the settlement of the surrounding surface, and the lateral earth pressure on the diaphragm wall back. The results show that the lateral earth pressure on the diaphragm wall back decreases, the horizontal bending moment of the sidewall of the open caisson changes from positive to negative, the position of the maximum bending moment gradually moves down with the increase of the excavation depth, and the surrounding surface settlement is triangularly distributed during the

收稿日期:2022-01-11

基金项目:国家自然科学基金项目(52178370);中国电建集团铁路建设有限公司科技项目[ZJSP-KY-001(YN)]

作者简介:邓彬(1982-),男,工程师,E-mail:34003113@qq.com。

excavation of the foundation pit. When adjusting the expansion and contraction of the inner support, the soil pressure behind the diaphragm wall near the current support depth is most obviously affected, and the change rate of the local soil pressure is highest when the third support is adjusted, and the local soil pressure value reaches the maximum when the fourth support is adjusted. The combined effect of simultaneous adjustment of multiple supports is greater than that of single support adjustment. Inner support adjustment may cause the open caisson to rotate to a certain extent, and the effect on soil pressure at the sidewall of the open caisson near the foundation pit is greater than that on the opposite side. The extension of the inner support can reduce the displacement of the foundation pit enclosure and the adjacent open caisson to a certain extent, but it will lead to a sharp increase in the local bending moment and earth pressure of the open caisson, so the field monitoring of earth pressure and structural deformation should be increased in the project.

Key words: deep foundation pit; open caisson; adjustable inner support; stress characteristic; model test

0 引 言

基坑在既有构筑物附近开挖施工的情况越来越多,由于开挖土体致使地层缺失不仅会直接造成基坑支护结构本身产生受力变形^[1-4],同时附加荷载也会影响周围构筑物安全^[5-8]。基坑施工对邻近构筑物的影响一直是近些年的热点课题之一。

诸多学者针对基坑施工对既有构筑物的影响程度和影响范围开展了一系列的研究工作。江杰等^[9]基于 Winkler-Pasternak 双参数地基模型采用有限差分法得到了隧道纵向变形解析解。朱国权等^[10]利用 PLAXIS 程序研究了基坑不同分区、分块的开挖顺序对隧道变形的影响,指出基坑隧道间距以及分块面积大小对隧道变形影响较大。张浩等^[11]采用 IGS 模型对上海东方路立交项目进行了案例分析,证明了 IGS 模型用于软土地区基坑工程数值模拟的适用性。范雪辉等^[12]将隧道变形影响区划分为主要、次要、一般和微弱 4 个等级,影响区范围大致呈直角梯形形状。贺雷等^[13]分析指出隧道总体位移会随覆土厚度增大而减小,并且由竖向位移为主转变为水平位移。

为了更加合理地控制深基坑开挖对邻近构筑物的影响^[14-15],很多研究工作通过轴力伺服系统提供轴力补偿以减小基坑围护结构变形以及对邻近构筑物影响。王志杰等^[16]通过数值模拟和理论分析方法,对采取伺服系统时支撑轴力的设定方法、伺服系统的布置方法、伺服系统节点计算等方面展开研究。贾坚等^[17-18]结合实际工程研究证明基坑钢支撑伺服系统可以将围护结构变形和隧道变形控制在预定目

标内。黄大明等^[19]分析了基坑伺服系统设置数量和分布位置的不同对基坑围护自身和周围环境的影响。孙九春等^[20]基于结构力学中的影响性原理,从内支撑轴力对围护结构侧向变形、土体流变的影响等方面探讨了伺服系统在基坑侧向变形主动控制中的应用。上述研究工作对深开挖施工控制技术和理论起到了积极的推动作用。

目前深基坑内支撑轴力伺服系统主要是通过单向加压伸长控制围护结构水平位移,而多道内支撑体系伸缩调节对围护结构自身和邻近构筑物受力特性的影响规律尚不明确。为了探明基坑开挖以及内支撑伸缩调控下基坑与邻近沉井受力特性变化规律,通过室内模型试验探究不同支撑伸长和缩短控制条件下地连墙变形、墙背土压力,沉井侧壁土压力和内力等变化规律,以期为工程设计和施工提供理论依据。

1 模型试验方案

1.1 试验模型及材料

试验模型箱三面采用厚度 10 mm 的 Q235 钢板,正立面采用厚度 10 mm 的钢化玻璃(图 1),尺寸为 1.5 m(长度)×1.5 m(宽度)×1.0 m(高度)。考虑到基坑开挖影响范围和边界效应,基坑模型采用对称布置方案并对模型箱左侧钢板加固。试验模型和实际工程的几何相似比为 1:50,基坑开挖深度 H 为 40 cm,支护体系为地连墙内支撑组合形式。地连墙采用厚度 3 mm 的 Q235 钢板,长度 50 cm,深度 60 cm。内支撑采用直径 12 mm 的 Q235 圆形钢管,水平间距 6 cm。围檩采用边长 20 mm

表 2 试验工况
Table 2 Test working conditions

一级 工况	二级 工况	基坑开挖 深度/m	对应支撑伸缩
A	Z1	0.03	
	Z2	0.13	
	Z3	0.23	
	Z4	0.33	
	Z5	0.40	
B1	同工况 A		S2 缩短 1 mm
B2			S2 伸长 1、2、3 mm
C1	同工况 A		S3 缩短 1 mm
C2			S3 伸长 1、2、3 mm
D1	同工况 A		S4 缩短 1 mm
D2			S4 伸长 1、2、3 mm
E1	同工况 A		S2~S4 同时缩短 1 mm
E2			S2~S4 同时伸长 1、2、3 mm

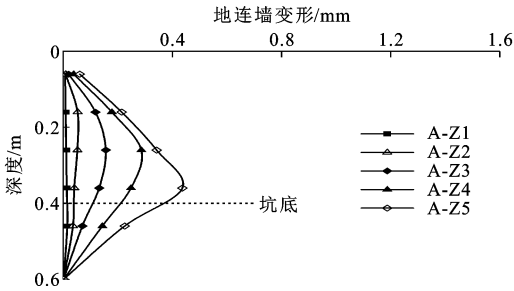


图 4 地连墙变形
Fig. 4 Deformation of diaphragm wall

“弓”形分布,地连墙中部变形大于两端变形,变形最大点分布于基坑下部。当基坑开挖结束时,地连墙最大变形值为 0.43 mm,约为 0.11% H 。最大变形点位于 0.36 m 深度处,即 0.9 H 。

2.2 基坑周围地表沉降

基坑周围地表沉降值与基坑开挖深度呈正相关关系,与距坑壁距离呈负相关关系(图 5)。试验砂土为无黏性土,地表沉降曲线近似呈三角形分布,沉降最大点位于基坑侧壁边缘。开挖到底部后基坑周边最大沉降值为 0.67 mm,约为 0.16% H 。工况 A-Z2 地表沉降影响范围约为 1.0 H ,工况 A-Z5 的影响范围扩大到 1.6 H 。开挖第 3 步及以后阶段沉降值快速增大,高于前两个阶段,这可归因于开挖第 3 步以后地连墙水平变形迅速增加,地层缺失加剧。

2.3 墙背水平土压力

墙背水平土压力变化规律如图 6 所示。地连墙墙背水平土压力总体上随深度的增加而增大。由于土体开挖卸荷作用,同一深度处墙背水平土压力随开挖深度的增大而减小,鉴于地连墙变形主要位于

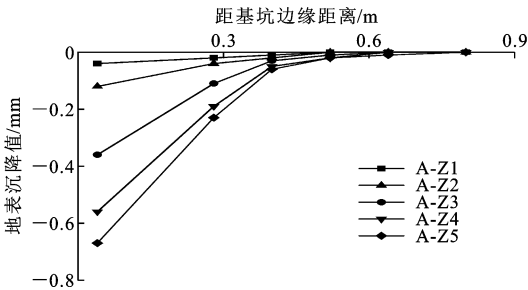


图 5 周边地表沉降
Fig. 5 Surrounding surface settlement

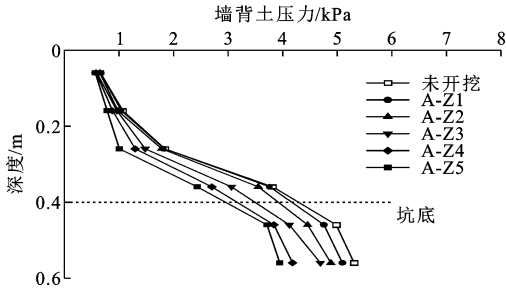


图 6 地连墙墙背水平土压力

Fig. 6 Lateral earth pressure on diaphragm wall back
基坑中下部,此深度区域墙背水平土压力值减小更快。地连墙变形最大位置(0.9 H)处开挖结束时墙背水平土压力减小了 36.11%。

2.4 沉井侧壁水平土压力

开挖过程对沉井侧壁土压力影响较小,开挖前后靠近基坑一侧水平土压力变化如图 7 所示,土压力随开挖深度增大而增大,开挖结束时约 1.1 H 深度以上水平土压力均减小,其中 S3 深度处减小 0.29 kPa,减小了 18.8%,S4 深度处减小 0.36 kPa,减小达 15.7%。1.1 H 以下水平土压力增大,其中 1.18 H 深度处增长 0.11 kPa。可能是基坑开挖过程中沉井发生了微弱旋转,其下部向基坑一侧位移,上部向远离基坑一侧位移,致使土压力呈现上减下增。

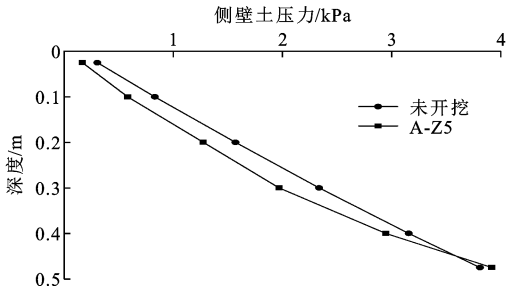


图 7 沉井侧壁水平土压力

Fig. 7 Lateral earth pressure of open caisson sidewall
2.5 沉井侧壁弯矩
监测沉井侧壁应变,然后根据材料力学等直梁

弯矩计算理论得出侧壁的弯矩。基坑分层开挖过程中,沉井结构靠近基坑侧的弯矩随深度变化如图 8 所示,正值表示向远离基坑侧弯曲,负值表示向基坑侧弯曲。A-Z1 阶段沉井弯矩值均为很小的正值,且沉井上部 and 下部差别不大,即受初始侧向土压力作用而向远离基坑侧弯曲,A-Z1 阶段由于仅开挖 0.03 m,对沉井影响很小。随基坑开挖的进行,弯矩变为负值,且绝对值呈增大趋势。由于地连墙向基坑内侧变形,土体产生向基坑侧运动,沉井产生与初始弯矩方向相反的弯矩。工况 A-Z1 和 A-Z2 阶段弯矩变化不明显,随着开挖深度增大,A-Z3、A-Z4 和 A-Z5 阶段弯矩数值变化显著,其最大弯矩点所处深度位置不断下移。开挖至基坑底部时,最大弯矩点位于坑底和第 4 道支撑之间,和前文中地连墙最大变形位置相吻合。

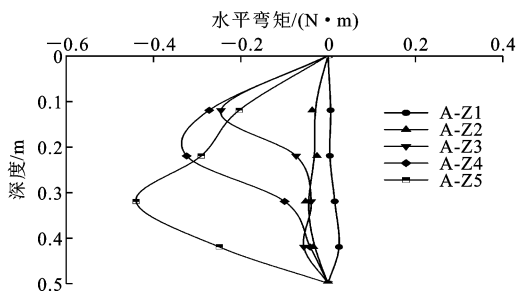


图 8 沉井水平弯矩变化

Fig. 8 Variation of horizontal bending moment of open caisson

3 内支撑调节影响规律分析

3.1 地连墙墙背土压力变化

调节 S2 时墙背土压力变化规律如图 9(a) 所示,土压力变化主要集中于开挖面以上区间。B1 工况下,S4 以上呈减小趋势,S2 附近减小明显,其中 0.15H 深度处减小 0.13 kPa,0.4H 深度处减小 0.14 kPa。S4 深度以下土压力值略微增大,即地连墙围绕开挖面深度附近点发生了一定偏转,致使土压力呈现上减下增。B2 工况下,受支撑伸长作用,土压力呈上增下减趋势,S2 深度附近土压力增长最大,相比未调整工况,0.15H 处土压力依次增大 0.75、1.70、2.50 kPa,即增大 130.23%、294.93%、434.49%。0.4H 处土压力依次增大 1.12、1.78、2.41 kPa,即增大 141.71%、225.21%、304.19%。

调节 S3 时[图 9(b)],土压力在 S3 深度上下变化显著。C1 工况下,S4 以上土压力同样表现为减小,其中 0.4H、0.65H 处分别减小 0.18、0.11 kPa,S4 以下略有增大。C2 工况下,土压力均表现为增

大,S3 附近墙背土压力增长最为明显,其中 0.4H 处依次增大 1.21、2.36、3.81 kPa,即增大 151.99%、297.78%、480.90%。

当调节 S4 时[图 9(c)],S3 至基坑开挖面区间范围墙背土压力变化明显。D1 工况下,以 0.65H 深度附近作为分界点呈上增下减趋势,由于上面 2 道支撑承压作用,其中 0.15H、0.4H 处分别增长 0.19、0.24 kPa,S4 以下无支撑,1.4H 处墙背土压力减小 0.34 kPa。D2 工况下,土压力总体表现增长态势,坑底至 0.65H 区间土压力增长最为迅速,0.65H 处依次增大 1.06、2.08、3.49 kPa,即增大 105.15%、204.57%、343.64%。0.9H 深度处墙背土压力达到最大,依次增大 1.35、2.09、3.21 kPa,即增大 55.22%、85.57%、131.59%。

同时调节 S2、S3 和 S4 时[图 9(d)],从上至下地连墙墙背土压力均有一定变化。E1 工况下,仅最底端测点土压力增大 0.19 kPa,其余测点墙背土压力均表现为减小,其中 0.9H 处减小最显著,达到 0.50 kPa。E2 工况下,测点土压力均表现为增大,其中 0.9H 处依次增大 1.35、1.93、2.82 kPa,即增大 52.35%、78.91%、115.23%。

从上述试验结果发现,内支撑伸缩对当前支撑深度附近墙背土压力影响最大,土压力随支撑伸长而增大,随支撑缩短而减小。调节第 3 道支撑时土压力变化率最高,调节第 4 道支撑时局部土压力值达到最大,3 道支撑共同调节时综合影响范围最广。

3.2 沉井弯矩变化规律

当调节 S2 时[图 10(a)],沉井弯矩变化主要位于 S2 附近。B1 工况下,受 S2 缩短影响,弯矩绝对值呈上增下减,对沉井上部弯矩影响更大,约在 S4 深度以下沉井向远离基坑侧弯曲,S4 深度以上沉井再次向基坑侧弯曲,表明沉井上部向基坑侧微弱偏转。B2 工况下,水平弯矩呈现上增下减,S2 深度附近弯矩显著增大,由负值转变为正值,表明沉井上部在支撑伸长推动作用下向远离基坑方向位移,沉井围绕其中下段某点发生微弱转动。

调节 S3 时,对 S3 附近弯矩值影响最大[图 10(b)]。C1 工况下,S2 和 S3 深度区间弯矩值显著变化,其中 0.3H、0.55H 深度处分别减小 0.31、0.36 N·m。C2 工况下,S3 附近弯矩值随支撑伸长明显增大,其中 0.55H 处增长值最大,依次增大 0.97、1.82、2.51 N·m。0.55H 以下随深度增大弯矩增长放缓,1.05H 深度处弯矩值已表现为减小。

调节 S4 时,沉井弯矩变化范围和幅度均大于单

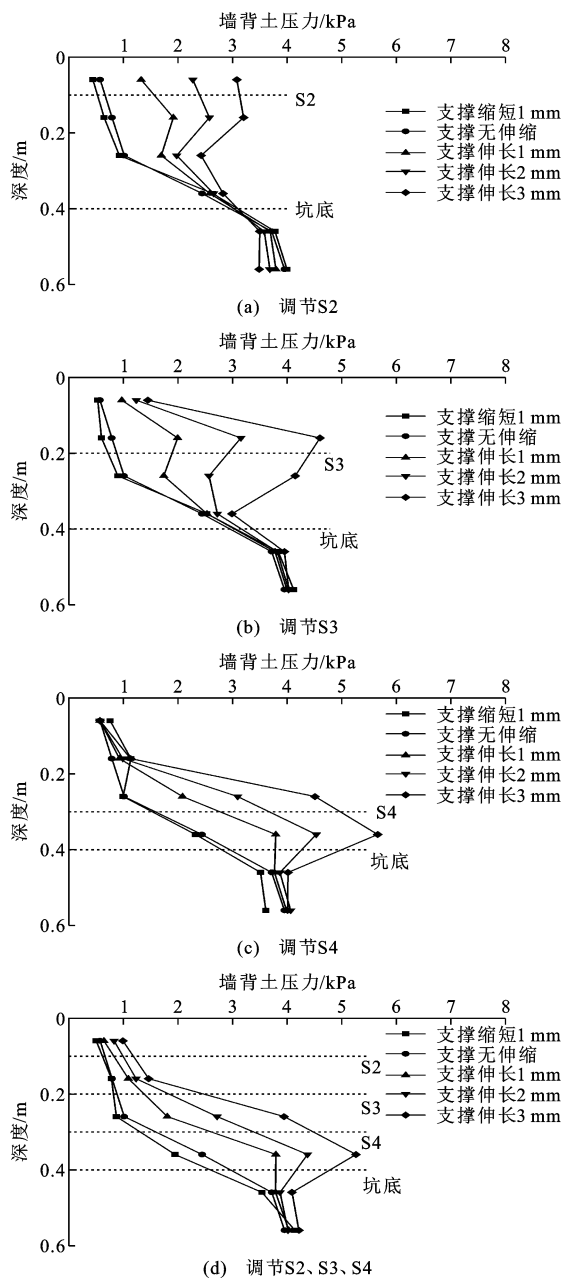


图 9 地连墙墙背水平土压力变化

Fig. 9 Variation of lateral earth pressure on diaphragm wall back

独调节 S2 或 S3[图 10(c)]。D1 工况下,约 $0.3H$ 深度以下弯矩值减小, $0.8H$ 深度处减小值最大,减小 $0.35 \text{ N} \cdot \text{m}$, $0.3H$ 深度以上弯矩值微弱增大。D2 工况下,弯矩随深度变化曲线呈弓形,S4 深度附近弯矩值呈大幅增长,其中 $0.8H$ 深度处增长最明显,依次增大 1.24 、 2.15 、 $3.08 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

同时调节 S2、S3 和 S4 时,沉井弯矩变化幅值高于单道支撑调节[图 10(d)]。E1 工况下,所有测点弯矩值均出现减小,S3 和 S4 深度处弯矩变化最大, $0.55H$ 、 $0.8H$ 处测点弯矩值分别减小 0.64 、

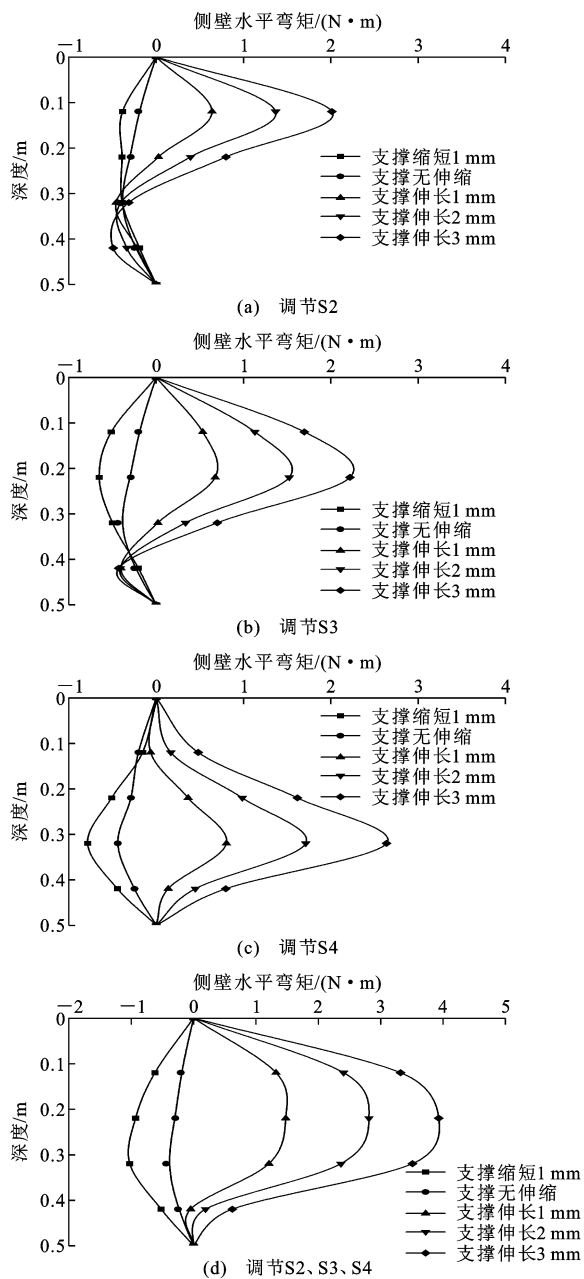


图 10 沉井弯矩变化

Fig. 10 Variation of open caisson bending moment

$0.58 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。E2 工况下,弯矩值均增大,S3 附近弯矩值增长显著, $0.55H$ 处弯矩值变化最大,依次增大 1.76 、 3.10 、 $4.22 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

3.3 沉井侧壁水平土压力变化

沉井左、右侧壁水平土压力变化如图 11、12 所示。调节 S2 时,B1 工况下,沉井左侧壁水平土压力变化如图 11(a)所示。上部变化幅度大于下部,仅最底端测点微弱增大,其余测点土压力均出现不同程度减小,S2 测点减小 44.24% 。沉井右侧壁土压力同样减小,下部减小幅值大于上部[图 12(a)],表明沉井发生向基坑侧位移,且沉井下部位移略大于

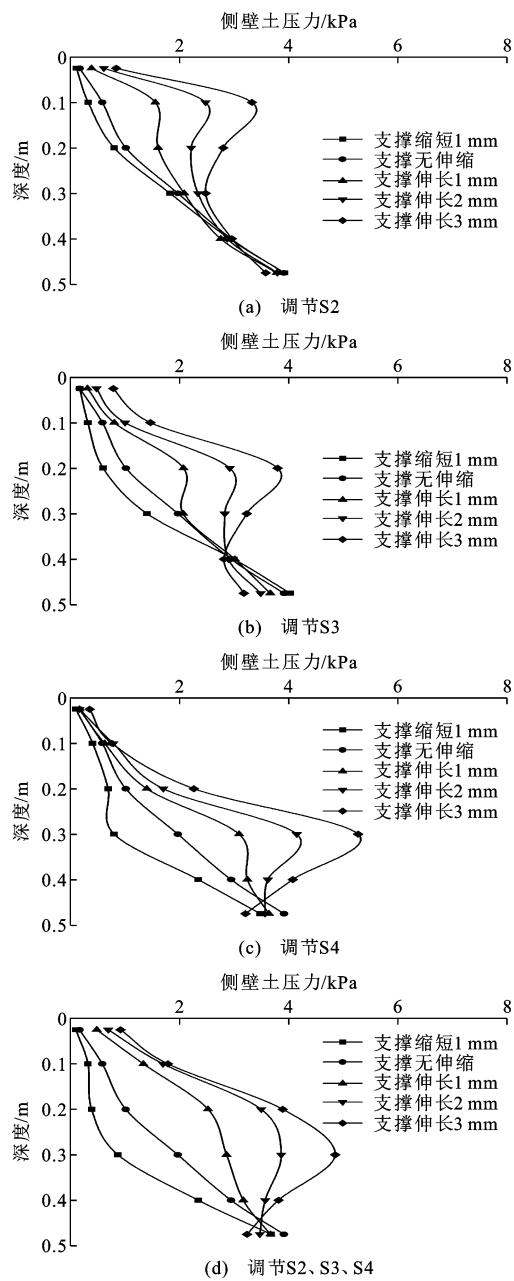


图 11 沉井左侧壁水平土压力变化

Fig. 11 Variation of lateral earth pressure on open caisson left sidewall

上部。B2 工况下,左侧壁约 S4 深度以上水平土压力受影响较大,S2 处增长值最大,依次增大 166.52%、324.55%、470.25%,底端沉井土压力微弱减小。右侧壁水平土压力呈上增下减变化,约 1.0H 深度以上土压力增大,1.0H 以下减小,可能是沉井发生了一定旋转,最大土压力位于 0.75H 位置。

调节 S3 时,左侧壁水平土压力如图 11(b)所示,C1 工况下,约 1H 深度以上土压力均减小,其中 S3 和 S4 深度处受影响最明显,水平土压力分别减

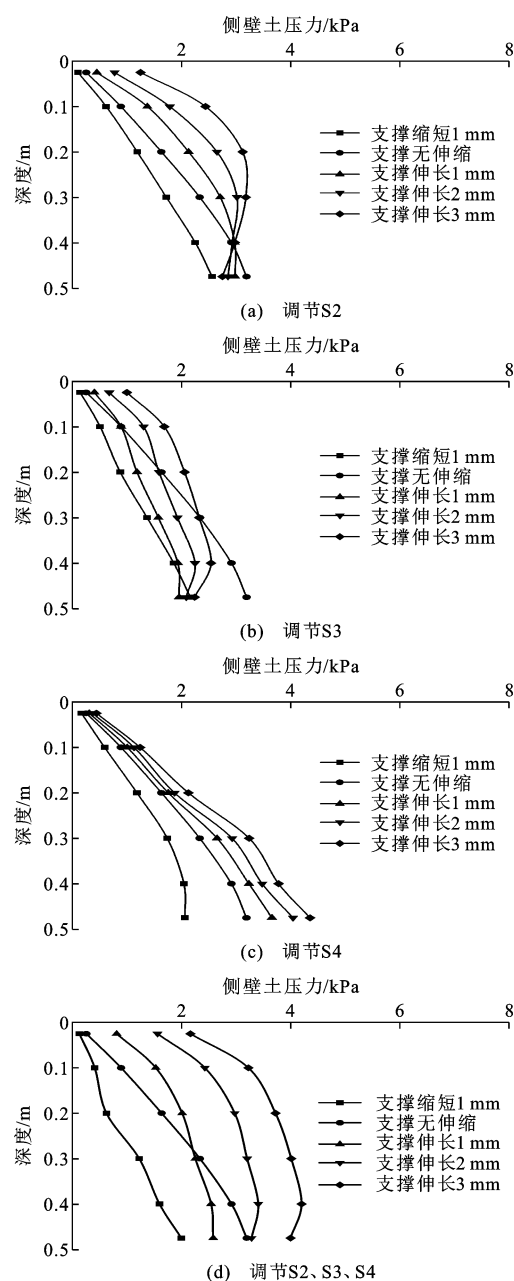


图 12 沉井右侧壁水平土压力变化

Fig. 12 Variation of lateral earth pressure on open caisson right sidewall

小21.18%、28.71%。C2 工况下,沉井同样发生转动,约 1H 深度以上土压力快速增长,受影响最大的 S3 深度处测点水平土压力依次增大 104.06%、187.76%、274.4%。右侧壁水平土压力如图 12(b)所示,C1 工况下,受支撑缩短影响,土体向基坑侧位移,所有测点土压力均减小,接近于主动土压力值,且沉井下部受影响大于上部。C2 工况下,土压力表现为上增下减,且随着支撑伸长长度增大,沉井发生旋转中心点深度位置不断下移。

调节 S4 时,左侧壁水平土压力如图 11(c)所

示,D1工况下土压力表现为减小,沉井中下部减小更明显,0.75H处土压力减小值达到最大。D2工况下,S4深度处水平土压力受影响最大,随支撑伸长而快速增大,之后土压力增速随深度增大而减小,约1.1H深度以下土压力减小而靠近主动土压力状态。右侧壁水平土压力如图12(c)所示,D1工况下土压力减小,随深度增大减小更为明显。D2工况下,沉井水平土压力均随支撑伸长而呈增大趋势,同时支撑伸长对沉井下段土压力影响更大。

同时调节S2、S3和S4时,左侧壁水平土压力变化如图11(d)所示,E1工况下,土压力均减小,中部减小比上下两端减小更为显著,0.75H处土压力减小值最大。E2工况下,约1.1H深度以上土压力均增大,0.5H~1.0H深度区间增长明显。右侧壁水平土压力如图12(d)所示,D1工况下土压力随深度增大减小更为明显。D2工况下,当支撑伸长1mm时,土压力呈上增下减,约S4深度以上土压力增大,S4以下减小。当伸长2、3mm时,土压力均表现为增大。

4 结 语

(1)基坑开挖结束后地连墙最大变形位于基坑下部。支撑伸缩调整时,地连墙除了挠曲变形外,还会围绕某中性点位发生转动,中性点上段和下段墙背土压力变化趋势相反。

(2)地连墙和沉井受力变化趋势具有一致性,内支撑伸缩对当前支撑深度土压力和内力影响明显。支撑缩短时,沉井远离基坑侧水平土压力均减小,下段减小值大于上段。支撑伸长时,沉井会发生微弱转动。多道支撑同时调节综合影响范围大于单支撑调节。

(3)基坑内支撑调节对靠近基坑一侧沉井局部水平土压力影响更大,而远离基坑一侧沉井上下段土压力变化更具一致性。

(4)工程中通过伸长内支撑可以一定程度减小基坑围护结构和邻近沉井位移,但是会导致沉井局部弯矩和土压力急剧增大,产生安全隐患。实际工程还应注重进行支撑伸缩协同控制,加强土压力和结构变形趋势监测。

参考文献:

References:

[1] 章润红,刘汉龙,仇文岗.深基坑支护开挖对临近地铁隧道结构的影响分析研究[J].防灾减灾工程学报,

2018,38(5):857-866.

ZHANG Runhong,LIU Hanlong,ZHANG Wengang. Numerical investigation on tunnel responses induced by adjacent deep braced pit excavations[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018,38(5):857-866.

[2] HE L X,LIU Y,BI S F,et al. Estimation of failure probability in braced excavation using Bayesian networks with integrated model updating [J]. Underground Space,2020,5(4):315-323.

[3] XU C J,CHEN Q Z,WANG Y L,et al. Dynamic deformation control of retaining structures of a deep excavation[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities,2016,30(4): 04015071.

[4] 陈伟,吴裕锦,彭振斌.广州某基坑抢险监测及坍塌事故技术原因分析[J].地下空间与工程学报,2006,2(6):1034-1039.

CHEN Wei, WU Yujin, PENG Zhenbin. Monitoring of rescue of a foundation pit and technical analysis of its collapse in Guangzhou[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(6): 1034-1039.

[5] 傅志峰,尹燕良,周伟生,等.基坑外设隔离桩参数对近邻既有地铁隧道变形的影响[J].安全与环境工程,2021,28(4):57-63,79.

FU Zhifeng, YIN Yanliang, ZHOU Weisheng, et al. Influence of parameters of isolation piles outside the foundation pits on deformation of the adjacent existing subway tunnels[J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(4): 57-63, 79.

[6] ONG D E, LEUNG C E, CHOW Y K. Pile behavior due to excavation-induced soil movement in clay. I: stable wall[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(1): 36-44.

[7] SUN H S, CHEN Y D, ZHANG J H, et al. Analytical investigation of tunnel deformation caused by circular foundation pit excavation[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 106: 193-198.

[8] 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.

[9] 江杰,邱居涛,欧孝夺,等.基坑开挖引起下卧地铁隧道变形的简化计算方法[J].铁道学报,2021,43(10):118-126.

JIANG Jie, QIU Jutao, OU Xiaoduo, et al. Simplified calculation method of underlying metro tunnel deformation due to excavation of foundation pit [J].

- Journal of the China Railway Society, 2021, 43(10): 118-126.
- [10] 朱国权, 陆 幸, 司壹恒, 等. 邻近基坑开挖顺序对既有隧道的变形影响分析[J]. 宁波大学学报(理工版), 2021, 34(5): 89-94.
- ZHU Guoquan, LU Xing, SI Yiheng, et al. The influence of construction sequence of adjacent foundation pit on the deformation of existing tunnel[J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition), 2021, 34(5): 89-94.
- [11] 张 浩, 张陈蓉, 时振昊, 等. 基于 IGS 小应变模型的基坑开挖对隧道影响数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增 2): 72-75.
- ZHANG Hao, ZHANG Chenrong, SHI Zhenhao, et al. Numerical simulation of excavation effects on tunneling with IGS small strain model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S2): 72-75.
- [12] 范雪辉, 刘 波, 王园园, 等. 软弱地层中内撑式基坑开挖引起下卧地铁隧道变形的影响区研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增 2): 217-220.
- FAN Xuehui, LIU Bo, WANG Yuanyuan, et al. Influenced zones for deformation of underlying metro tunnels induced by braced deep excavation in soft strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S2): 217-220.
- [13] 贺 雷, 马山青. 基坑开挖对既有电缆隧道影响的离心模型试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(增 1): 1975-1979.
- HE Lei, MA Shanqing. Centrifugal model test research on the influence of foundation pit on existing cable tunnel[J]. Building Structure, 2021, 51(S1): 1975-1979.
- [14] ZHANG D M, HUANG Z K, WANG R L, et al. Grouting-based treatment of tunnel settlement: practice in Shanghai[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 80: 181-196.
- [15] XING H F, XIONG F, WU J M. Effects of pit excavation on an existing subway station and preventive measures[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(6): 04016063.
- [16] 王志杰, 李 振, 蔡李斌, 等. 基坑钢支撑伺服系统应用技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(增 2): 10-22.
- WANG Zhijie, LI Zhen, CAI Libin, et al. Research on application technology of steel support servo system for foundation pit[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(S2): 10-22.
- [17] 贾 坚, 谢小林, 罗发扬, 等. 控制深基坑变形的支撑轴力伺服系统[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(10): 1589-1594.
- JIA Jian, XIE Xiaolin, LUO Fayang, et al. Support axial force servo system in deep excavation deformation control[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2009, 43(10): 1589-1594.
- [18] 贾 坚, 谢小林, 翟杰群, 等. 软土基坑变形控制的微扰动技术[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(10): 1651-1657.
- JIA Jian, XIE Xiaolin, ZHAI Jiequn, et al. Micro disturbance technology for controlling deformation of soft soil excavation[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2016, 50(10): 1651-1657.
- [19] 黄大明, 黄 栩. 钢支撑轴力伺服系统在基坑变形控制中的应用研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(增 1): 1069-1074.
- HUANG Daming, HUANG Xu. Applied research servo system of axial force for steel support in deformation control for deep foundation pit[J]. Building Structure, 2020, 50(S1): 1069-1074.
- [20] 孙九春, 白廷辉, 廖少明. 基于支撑轴力相干性的深基坑变形主动控制[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(2): 529-540.
- SUN Jiuchun, BAI Tinghui, LIAO Shaoming. Active control of deep foundation pit deformation based on coherence of supporting axial force[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(2): 529-540.