

短时吊车荷载对超深工作井基坑变形影响分析^{*}

李春林¹ 刘 燕^{2,3**} 虞 涛³ 王 浩³ 方 正³ 邵玉婷⁴

(1. 济南城市建设集团有限公司, 250031, 济南; 2. 山东省城市地下工程支护及风险监控工程技术研究中心, 250022, 济南;
3. 济南大学土木建筑学院, 250022, 济南; 4. 山东省土木建筑学会, 250002, 济南//第一作者, 高级工程师)

摘 要 目的:为了充分认识超深盾构工作井基坑施工过程中的安全性,应密切关注施工中坑顶行车、吊装等短时频繁的施工荷载对基坑变形和安全性的影响。方法:以济南黄河隧道工程南岸超深工作井基坑为研究背景,采用现场实测数据和数值模拟相结合的方法,研究不同吨位吊装荷载在基坑施工过程中对支护结构变形的作用规律。结果及结论:研究表明,坑边荷载对变形的影响与荷载大小及作用时间有关,荷载消失后地下连续墙变形会有 50% 左右的回弹量,荷载值越小,作用时间越短,回弹量越大,且大部分回弹约在 3 h 内完成。但仍有 50% 的变形不可恢复,荷载的多次频繁的短时作用,使得这种变形不断累积,因此,简单的对坑顶施工荷载进行拟静力化的设计,有可能使得基坑支护结构存在安全隐患。

关键词 超深基坑; 短时荷载; 现场试验; 数值模拟; 地下连续墙

中图分类号 TU441^{+.6}

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.12.015

Impact Analysis of Short-term Crane Loading on Ultra-deep Working Shaft Foundation Pit Deformation

LI Chunlin, LIU Yan, YU Tao, WANG Hao, FANG Zheng, SHAO Yuting

Abstract Objective: To comprehensively understand the safety aspects of the construction process of ultra-deep shield working shaft foundation pit, close attention should be paid to the frequent short-term construction loads, such as pit top vehicle passing and crane operations, and their impact on the deformation and safety of foundation pit. Method: Using the ultra-deep working shaft foundation pit on the south bank of Ji'nan Yellow River Tunnel project as research background, a combined approach of field measurements and numerical simulations is employed to study the impact law of different tonnage crane loads on the deformation of the supporting structure dur-

ing pit construction process. Result & Conclusion: It is indicated that the impact of edge loads on deformation is related to the load magnitude and duration. After the load disappears, there is approximately a 50% rebound in the deformation of underground diaphragm wall, with smaller loads and shorter durations resulting in larger rebound amounts. Most rebound occurs within approximately 3 hours. However, about 50% of the deformation remains unrecoverable. The cumulative effect of multiple short-term load applications may lead to continuous deformation accumulation. Therefore, simplistic quasi-static designs for pit top construction loads may pose safety risks to the foundation pit supporting structure.

Key words ultra-deep foundation pit; short-term load; field test; numerical simulation; diaphragm wall

First-author's address Jinan City Construction Group Co., Ltd., 250031, Ji'nan, China

随着我国基础设施建设快速发展,涌现了大量的超深超大基坑工程,也包括超深的工作井。超深工作井基坑需要满足盾构拼装、支撑吊装等要求,其坑边短时荷载作用频繁,荷载值甚至上千吨,而设计时往往不考虑这些荷载的短时性、往复性和冲击性,简单的把这些荷载作为恒定荷载作用于坑顶。

近年来,短时性荷载对不同土性的影响已经引起了学者们的关注。有学者认为忽视短时性,则活荷载恒定简化会使基坑支护的设计更加安全^[1]。但也有学者认为,短时加卸荷对基坑的作用是一个孔隙水压力与土中应力耦合的复杂过程,与土层性质、基坑开挖卸荷比、坑顶荷载加荷卸荷程度有很大关系^[2-3]。文献[4]研究表明,在短时往复荷载作用下,将表现为瞬时回弹变形与不可恢复的永久变形两种变形特性,前者会引起土体的疲劳破坏,而后者则会造成土体产生不均匀沉降。文献[5]通过

^{*} 国家自然科学基金项目(51979122);山东省自然科学基金面上项目(ZR2022ME042)

^{**} 通信作者

对黏性土特性的研究,发现短时荷载作用后,卸荷时存在弹性回弹和塑性回弹,相比于前者,塑性回弹变形模式影响深度更大。因此,荷载的短时性对基坑的影响无论是从强度和变形角度都是一个复杂的过程,必须开展深入、系统的研究。

1 工程概况

济南黄河隧道工程南岸工作井基坑平面尺寸为 49.4 m(长)×30.2 m(宽),基坑最大开挖深度约为 35.4 m,围护结构采用 1.2 m 厚、58.4 m 深的地下连续墙支护,设置 8 道内支撑,其中第 1、4、7、8 道为混凝土支撑,混凝土支撑横截面尺寸为 1.2 m×1.2 m,其余为直径 0.8 m 的钢支撑。混凝土支撑间距约为 6 m,钢支撑间距为 3 m。基坑平面图和剖面图如图 1 及图 2 所示。

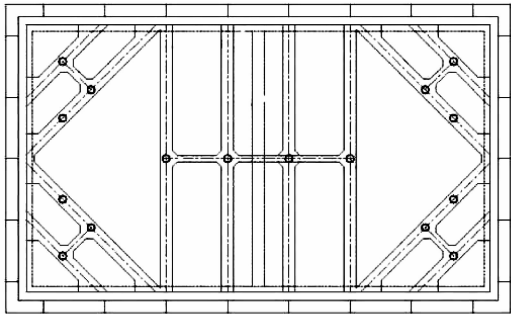


图 1 工作井基坑支护平面图

Fig. 1 Support plan of working shaft foundation pit

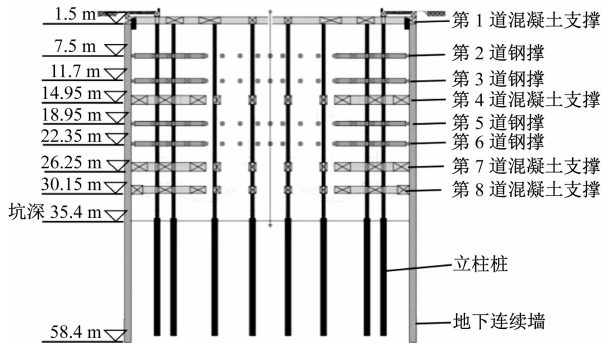


图 2 工作井基坑支护剖面图

Fig. 2 Support profit diagram of working shaft foundation pit

工作井基坑开挖深度范围内土层多呈软塑 – 可塑状,属中等 – 高压缩性土。土层的主要物理力学参数见表 1。

南岸工作井基坑土方开挖共耗时 95 d,基坑开挖施工工况如表 2 所示。期间,短时荷载作用次数及作用时间统计如表 3 所示。

表 1 土层的主要物理力学参数

Tab. 1 Main physical and mechanical parameters of soil layers

土层名称	厚度/ m	重度/ (kN/m ³)	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
黏质粉土	3	18.4	0.4	15	21.0
粉质黏土	6	18.6	0.39	23	18.0
粉质黏土	6	19.5	0.34	23	16.0
粉质黏土	7	19.7	0.34	24	18.5
粉质黏土	7	19.6	0.32	30	18.5
粉质黏土	5	19.3	0.29	30	17.0
粉质黏土	2	19.4	0.29	30	17.0
粉质黏土	6	20.0	0.29	35	18.0
粉质黏土	7	20.0	0.29	45	32.0
辉长岩	12	22.0	0.25	10	38.0

表 2 基坑开挖施工工况

Tab. 2 Construction conditions of foundation pit excavation

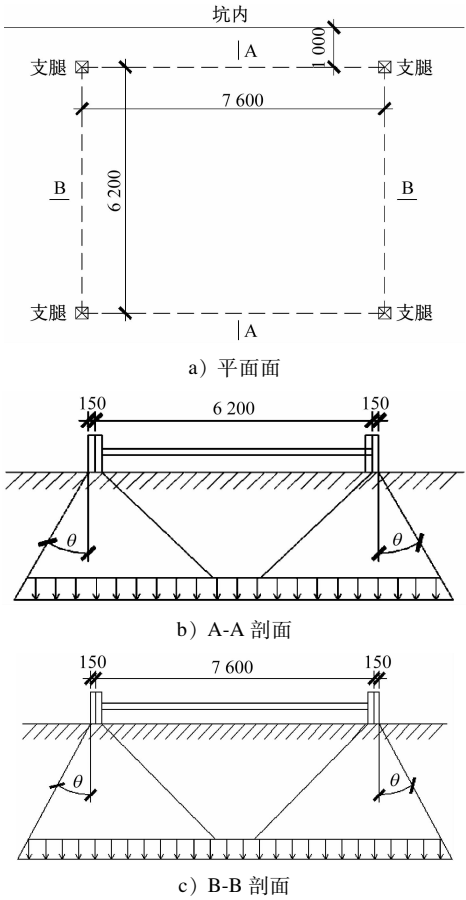
施工工况	施工主要内容	坑顶作用荷载/kN
工况 1	基坑开挖至 2.1 m	250(渣土车)
工况 2	施工第 1 道混凝土支撑	200(吊车)
工况 3	基坑开挖至 8.4 m	250(渣土车)
工况 4	施工第 2 道钢支撑	200(吊车)
工况 5	基坑开挖至 12.6 m	250(渣土车)
工况 6	施工第 3 道钢支撑	250(吊车)
工况 7	基坑开挖至 15.7 m	250(渣土车)
工况 8	施工第 4 道混凝土支撑	200~1 000(吊车)
工况 9	基坑开挖至 19.8 m	250(渣土车)
工况 10	施工第 5 道钢支撑	800(吊车)
工况 11	基坑开挖至 23.3 m	250(渣土车)
工况 12	施工第 6 道钢支撑	800(吊车)
工况 13	基坑开挖至 27.0 m	250(渣土车)
工况 14	施工第 7 道混凝土支撑	1 000(吊车)
工况 15	基坑开挖至 31.0 m	250(渣土车)
工况 16	施工第 8 道混凝土支撑	1 000(吊车)
工况 17	基坑开挖至 35.4 m	250(渣土车)

表 3 短时荷载作用次数和时间统计表

Tab. 3 Statistics of the number and duration of short-term load actions

施工内容	施工时间/ d	施工车辆	吊车重量/ kN	作业次数/ 次	最短作用 时长/h	最长作用 时长/h	平均作用 时长/h
土体开挖	48	渣土车	250	3 100	0.25	0.3	0.27
		汽车吊	200	16	2.50	13.5	8.00
		汽车吊	250	79	2.00	12.0	7.00
支撑施作	44	汽车吊	800	17	2.00	11.5	6.75
		汽车吊	1 000	22	3.00	11.5	7.25

汽车吊荷载主要为支腿对坑边路面的垂直作用力,汽车吊及吊装的构件总质量通过支腿传递到坑边路面。支腿为四边形箱型结构,支腿纵向间距约 7 m、横向宽度约 6 m。以 1 000 kN 的汽车吊吊装钢支撑为例,1 000 kN 汽车吊自重 700 kN,支腿纵向间距 7.6 m,横向间距 6.2 m,支腿外侧距离坑边 $L=1$ m,平面位置及尺寸见图 3。



注:图中尺寸单位为 mm; θ 为支腿力的扩散角度。

图 3 自重 1 000 kN 汽车吊作业位置及尺寸图
Fig. 3 Position and dimension diagram of 1 000 kN truck crane operation

2 有限元数值模拟及数值分析

2.1 模型建立

本文通过 Midas GTS/NX 有限元软件建立三维计算模型,基坑模型尺寸的选取为 100 m(长)×90 m(宽)×66 m(高),结合本工程中土层参数,本次模拟选用修正 Mohr-Coulomb 本构模型。

2.2 不同吨位吊车的荷载模拟结果

JTG D30—2015《公路路基设计规范》^[6]中规定,当基坑周边有车辆荷载作用时,基坑四周岩土

体破裂面范围内的车辆荷载可以近似看作成一个均布荷载。基坑北侧 1 000 kN 吊车进行吊装时(2019 年 10 月 17 日),基坑正在架设第 4 道混凝土支撑,坑顶等效均布荷载幅值 40 kPa;基坑西侧 800 kN 吊车进行吊装时(2019 年 11 月 4 日),基坑架设第 6 道钢支撑,坑顶等效均布荷载幅值 30 kPa;基坑东侧 200 kN 吊车进行吊装时(2019 年 10 月 18 日),基坑正在架设第 4 道混凝土支撑,坑顶等效均布荷载幅值 8 kPa。根据场地施工工况,施工步骤如下:①基坑按相应工况进行施工;②距离坑边 7.2 m 范围内施加 40 kPa、30 kPa、8 kPa 短时荷载,时长 3 h,步长 30 min。图 4—图 6 为坑边作用不同吊车荷载作用前后地下连续墙深层水平位移变化量差值模拟。

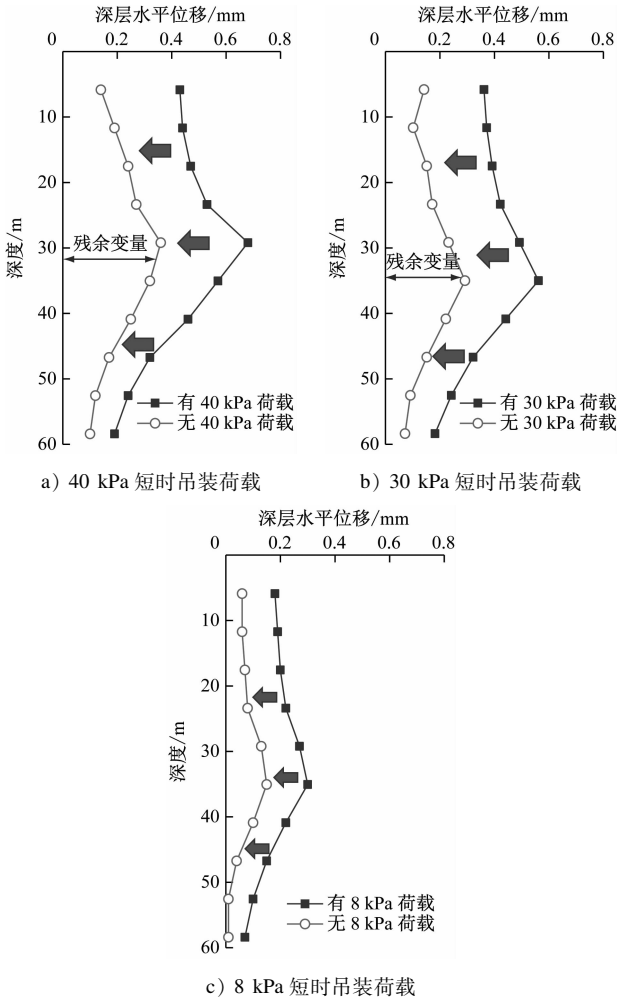


图 4 不同坑顶短时吊装荷载作业过程前后地下连续墙深层水平位移变化量差值模拟
Fig. 4 Simulation of variation difference in deep-seated horizontal displacement of underground continuous walls before and after short-term lifting load operation at different pit tops

基坑北侧 40 kPa 短时荷载作用期间地下连续墙变化量为 0.68 mm,荷载钝化后地下连续墙平均变形恢复量达 50.2%;基坑北侧 30 kPa 短时荷载作用期间地下连续墙变化量为 0.56 mm,荷载钝化后地下连续墙平均变形恢复量达 58.3%;基坑北侧 8 kPa 短时荷载作用期间地下连续墙变化量为 0.30 mm,荷载钝化后地下连续墙平均变形恢复量达 66.1%。

3 短时荷载作用下现场实时监测

在现场布设实时监测系统,利用全向实时位移管进行监测,探究基坑周边短时荷载的作用规律,以真实反映现场不同吊装荷载对基坑的变形影响。根据智能化监测方案,于南岸工作井基坑四边埋设 4 根全向管,如图 5 所示。

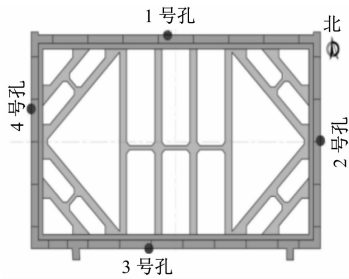


图 5 全向管布置图

Fig. 5 Layout diagram of omnidirectional pipes

由图 6—图 8 可知,基坑北侧 1 000 k N 吊车作业前后地下连续墙变化量为 0.49 mm,平均变形恢复量达 41.7%;基坑西侧 800 k N 吊车作业前后地

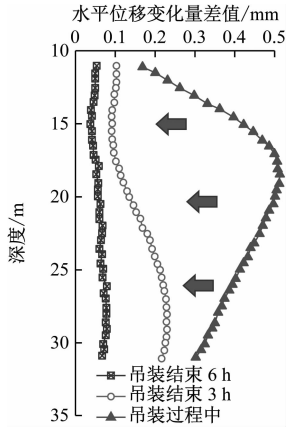


图 6 基坑北侧 1 000 k N 吊车作业前后地下连续墙深层水平位移变化量差值

Fig. 6 Variation difference in deep-seated horizontal displacement of diaphragm wall before and after 1 000 k N crane operation in north side of foundation pit

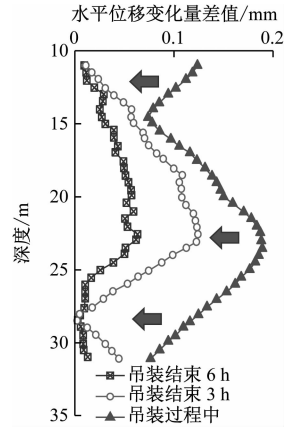


图 7 基坑西侧 800 k N 吊车作业前后地下连续墙深层水平位移变化量差值

Fig. 7 Variation difference in deep-seated horizontal displacement of diaphragm wall before and after 800 k N crane operation on the west side of foundation pit

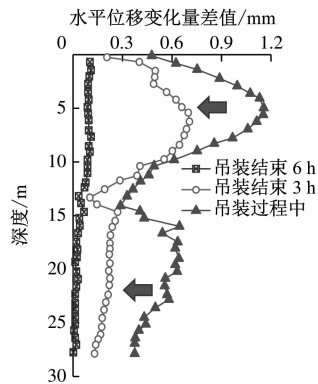


图 8 基坑东侧 200 k N 吊车吊装作业前后地下连续墙深层水平位移变化量差值

Fig. 8 Variation difference in deep-seated horizontal displacement of diaphragm wall before and after 200 k N crane operation on the east side of foundation pit

下连续墙变化量为 0.08 mm,平均变形恢复量达 50.2%;基坑东侧 200 k N 吊车吊装作业前后地下连续墙变化量为 0.49 mm,平均变形恢复量达 50.9%。

在坑顶以下 15 m 内地下连续墙的变形恢复量较大,且荷载越大,影响深度越深,荷载的影响深度大致在坑顶以下 15 m 内。地下连续墙的恢复变形主要在吊装结束后的 3 h 内完成,越往后恢复变形量越小。

图 9 为数值模拟与实测数据的对比图。由图 9 可以看出数值模拟的结果相对于实测数据偏大,但误差较小且总体趋势相同。所以,通过数值模拟来探究坑边短时荷载作用规律切实可行。

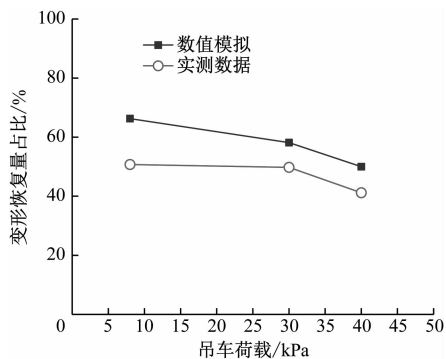


图 9 数值模拟结果和实测数据的平均变形量对比

Fig.9 Comparison of average deformation variation between numerical simulation results and measured data

4 结语

本文研究了超深盾构工作井基坑施工过程中,在坑顶短时荷载作用下地下连续墙的回弹变形分析,最后结合现场监测数据进行分析验证,得出结论:

1) 坑边短时荷载作用会加快地下连续墙变形,且短时荷载越大,地下连续墙变形越大。

2) 坑边短时荷载作用完成后,地下连续墙会出现“回弹”现象,在坑顶以下 15 m 内地下连续墙的变形恢复量较大,且荷载越大,影响深度越大,荷载的影响深度大致在坑顶以下 15 m 内。地下连续墙的恢复变形主要在吊装结束后的 3 h 内完成,越往后恢复变形量越小。

3) 该工作井基坑在坑边短时荷载(主要为吊装荷载)作用时,平均回弹量最大为 50.9%,且在荷载及作用时间大致相同的情况下,基坑长边回弹量低于基坑短边回弹量。

参考文献

- [1] 余凡, 杨林德. 连拱隧道的荷载及简化计算研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(5): 770.
YU Fan, YANG Linde. A study of arcade tunnel load and predigesting calculation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(5): 770.
- [2] 刘素锦, 郭明伟, 李兆源, 等. 浅析车辆荷载对深基坑支护结构的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(1): 105.
LIU Sujin, GUO Mingwei, LI Zhaoyuan, et al. Discussion on the influences of vehicle loads on supporting structure of deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(1): 105.
- [3] 乐金朝, 邱洪志, 张利军. 交通荷载作用下桩锚支护结构动力响应分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(6): 1320.
YUE Jinchao, QIU Hongzhi, ZHANG Lijun. Analysis on dynamic response of the foundation pit supporting structure under traffic loads[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(6): 1320.
- [4] 黄凯. 粉土在循环荷载作用下的累积变形研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2009.
HUANG Kai. Long term cumulative deformation of silt induced by repeated loading[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2009.
- [5] 郭德强. 软土地区基坑回弹机理及工程桩受力变形研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
GUO Deqiang. The study of pit resilience mechanism and behavior of pile in soft region[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [6] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基设计规范: JTG D 30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway subgrades: JTG D 30—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.

(收稿日期: 2022-03-29)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址: tougao. umt1998. com