

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2023.03.002

分离式“桩墙合一”支护结构的数值分析

韩孟君¹, 汪 军², 王小庆¹, 张文康¹, 李大华², 宋国文²

(1. 安徽建工集团股份有限公司, 安徽 合肥 230601; 2. 安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 结合合肥市某雨水调蓄池深基坑工程, 运用 MIDAS 三维有限元软件模拟全过程施工工况, 对比分析了“桩墙合一”支护结构与传统临时支护结构下基坑开挖时支护结构内力与位移变形规律。研究结果表明: 深层水平位移方面, 传统临时结构围护桩变形是新型结构的 1.74 倍; 弯矩方面, 传统临时结构围护桩变形是新型结构的 3.64 倍, 地下室外墙变形是新型结构的 5.08 倍; 剪力方面, 传统临时结构围护桩变形是新型结构的 2.72 倍, 地下室外墙变形是新型结构的 4.88 倍。这一结果表明, “桩墙合一”结构可大幅度提高基坑整体稳定性, 故应加大围护桩永久化技术在实际工程中的应用。

关键词: 支护结构; 桩墙合一; 实测; 数值模拟

中图分类号: TU94⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2023)03-0007-07

引文格式: 韩孟君, 汪 军, 王小庆, 等. 分离式“桩墙合一”支护结构的数值分析[J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(3): 7-13.

A Numerical Analysis of “Pile-Wall Integration” Supporting Structure

HAN Mengjun¹, WANG Jun², WANG Xiaoqing¹, ZHANG Wenkang¹, LI Dahua², SONG Guowen²

(1. Anhui Construction Engineering Group Co., Ltd., Hefei 230601, China;

2. College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: Combined with a deep foundation pit project of a rainwater storage tank in Hefei city, a simulation has been made of the whole construction process by using MIDAS three-dimensional finite element software, followed by a comparison as well as an analysis of the internal force and displacement deformation laws of the support structure under the “pile-wall integration” supporting structure and the traditional temporary supporting structure during the foundation pit excavation. The results show that the deformation of retaining piles of traditional temporary structures is 1.74 times that of new structures in terms of deep horizontal displacement; in terms of bending moment, the deformation of the retaining pile of the traditional temporary structure is 3.64 times that of the new structure, with the deformation of the basement exterior wall being 5.08 times that of the new structure; in terms of shear force, the deformation of the retaining pile of the traditional temporary structure is 2.72 times that of the new structure, with the deformation of the basement exterior wall being 4.88 times that of the new structure. This result shows that the “pile-wall integration” structure helps to greatly improve the overall stability of the foundation pit, which makes it necessary for an application of the permanent retaining pile technology in practical projects.

Keywords: supporting structure; pile-wall integration; actual measurement; numerical simulation

收稿日期: 2022-06-16

基金项目: 安徽建工集团股份有限公司校企合作基金资助项目 (HYB20210150)

作者简介: 韩孟君 (1989-), 男, 安徽阜阳人, 安徽建工集团股份有限公司高级工程师, 主要研究方向为建筑工程,

E-mail: 839935457@qq.com

0 引言

随着社会经济的快速发展和城市化进程的不断推进,地下工程建设越来越多,如地铁车站深基坑、高层建筑深基坑、大型管道深沟槽等工程建设,工程周边环境也变得日益复杂。与此同时,基坑支护技术面临新的挑战,地下工程建设的发展需要不断地更新支护技术以保障基坑开挖过程中的安全稳定。“桩墙合一”这一新型结构设计可以有效地解决这一问题。

“桩墙合一”结构在节省社会资源、增加利用空间、降低建造成本投入等方面,能够更好地为城市生活提供服务^[1-2]。

“桩墙合一”结构体系是将围护桩作为永久结构来进行结构设计^[3],施工主体结构完成后其仍为受力构件。该结构一般是在主体结构每一层楼板的位置布置传力板带,通过传力板带将围护桩与地下室外墙刚性连接起来,该结构能缩小地下室外墙厚度,减小围护桩与墙体间距,使围护桩与墙体紧贴,围护桩成为主体结构的一部分,桩墙整体承担地下水及侧向土体压力,成为永久挡土止水结构^[4]。为探讨“桩墙合一”支护结构的实用性,本文通过数值模拟与传统临时结构受力规律进行对比分析,验证了“桩墙合一”技术的可靠性,故应加大围护桩永久化技术在实际工程中的应用。

1 工程背景

1.1 工程概况

本研究中选用的工程为合肥市某新建雨水调蓄深基坑工程,其东、西、北面均毗邻河道,南面靠近公路,总容积约为40 000 m³。基坑开挖包括雨水调蓄池1座、排涝泵站1座。主体矩形基坑与西南侧的空泵房基坑同步施工,主体基坑平面尺寸为88.20 m×58.34 m,开挖深度为18.4~19.7 m,安全等级为一级;西南侧的空泵房基坑,凸出的平面尺寸为12.1 m×33.9 m,开挖深度为19.7~21.2 m,安全等级为二级。

基坑开挖深度范围内的土层主要有素填土、黏土、粉质黏土、粉质黏土夹粉土、细砂夹粉土、强风化砂岩、中风化砂岩。场地三面环水,最近处离河水仅1.5 m,勘察期间测得河水面标高为11.82 m,水深约为0.5~2.5 m,河中淤泥层厚度约为1.5~2.5 m。场地地下水十分丰富,与临近河水有一定的水力联系,广泛分布于各层地质土层当中,主要分类有上层滞水、层间水、孔隙水和基岩裂隙水。现场施工环境如图1所示。



图1 基坑周边环境示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the foundation pit surrounding environment

1.2 结构设计

雨水调蓄池基坑支护方案采用冲孔灌注桩排桩作为围护结构,排桩直径 Φ 为1 200 mm,总长度为23 m。为保护桩间土体,桩间加上一排高压旋喷桩,其直径 Φ 为1 200 mm,长度为9 m。大刚度围护排桩如果只作为临时围护结构,将造成极大的资源与材料浪费。考虑围护排桩可以继续作为挡土挡水地下受力结构发挥作用,故采用“桩墙合一”^[5]的基坑围护新技术,图2为该支护结构剖面图。

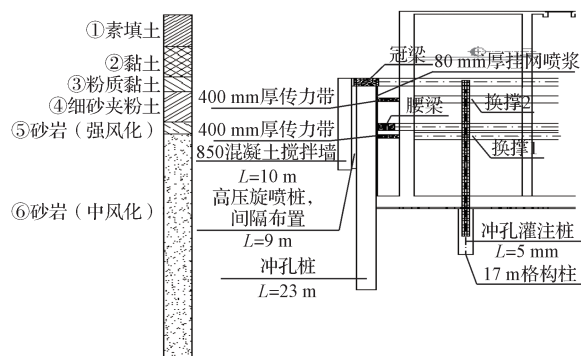


图2 分离式“桩墙合一”支护结构剖面图

Fig. 2 Sectional view of the “pile-wall integration” supporting structure

桩与墙之间通过传力板带相连,其结构示意图见图3。

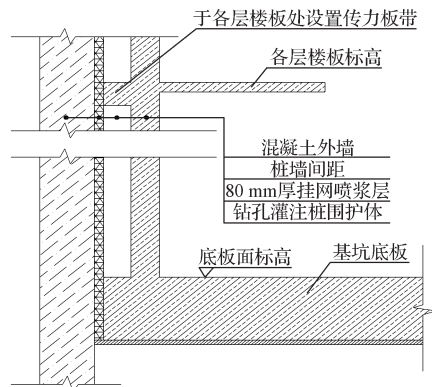


图3 桩墙间连接件传力板带示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the force transfer plate belt of the connecting pieces between pile walls

传力板带将临时的围护结构变为永久结构, 在正常使用阶段也将继续承担地下水、土体水平压力。因传力板带使临时围护桩结构与地下室外墙整体协同受力, 作用在桩上的荷载会按一定的比例分配到外墙上, 减小围护桩受力。

2 有限元模型建立

2.1 模拟方法

通过 MIDAS GTS 有限元分析软件^[6-7]对施工工序进行模拟分析, 取莫尔-库仑本构模型。根据经验^[8-10], 有限元模型土层水平尺寸约为基坑开挖平面尺寸的 3 倍, 竖向约为基坑开挖深度的 2 倍, 最终确定模型的尺寸为 220 m×202 m×40 m。

模型中放坡、地连墙为 2D 板单元, 立柱、冠梁、腰梁、内支撑为 1D 梁单元, 土体为 3D 实体单元^[11-12]。在 MIDAS 模型中正确输入土层信息后, 进行网格划分, 并对模型四周及底部设置边界约束。有限元整体模型、基坑支护结构和地下室结构如图 4 和 5 所示。

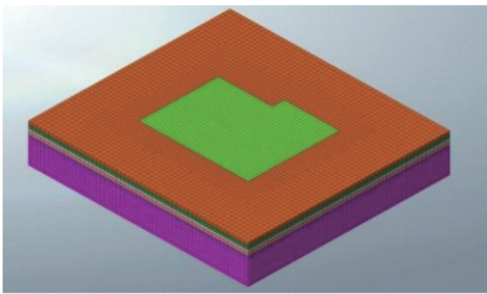


图 4 有限元整体模型图
Fig. 4 Finite element overall model diagram

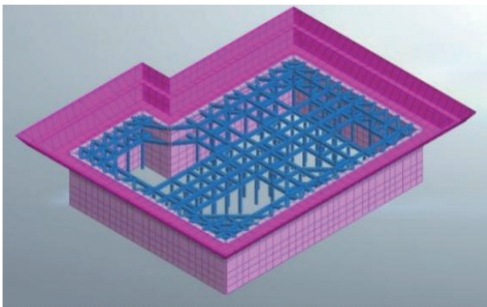


图 5 基坑支护结构和地下室结构图
Fig. 5 Foundation pit supporting structure and basement structure diagram

2.2 定义施工阶段

基坑开挖工序包括初始阶段、开挖-1、开挖-2、围护桩和立柱、开挖-3、开挖-4、开挖-5、地下室柱、负三层、拆撑-1、负二层、拆撑-2、负一层、永久荷载, 具体的基坑工程施工阶段工况划分见表 1。

表 1 基坑开挖阶段有限元模拟步骤

Table 1 Finite element simulation steps of the foundation pit excavation

工 序	施工步骤	施工阶段内容
初始阶段	初始应力分析	激活原状土, 添加位移边界约束、自重
开挖 -1	开挖至 -3.5 m	开挖第 1 层土钝化, 激活护坡 1
开挖 -2	开挖至 -7.0 m	开挖第 2 层土钝化, 激活护坡 2
围护桩和立柱	围护桩、立柱施工	激活基坑围护桩、立柱
开挖 -3	开挖至 7.8 m	开挖第 3 层土钝化, 激活内支撑 1、冠梁
开挖 -4	开挖至 12.7 m	开挖第 4 层土钝化, 内支撑 2、激活腰梁
开挖 -5	开挖至 18.2 m	开挖第 5 层土钝化
地下室柱	地下室柱施工	激活地下室柱
负三层	负三层及传力板带 1 施工	激活负三层地下室板、梁及传力板带 1
拆撑 -1	拆除腰梁和内支撑 2	钝化腰梁、内支撑 2
负二层	负二层及传力板带 2 施工	激活负二层地下室板、梁及传力板带 2
拆撑 -2	拆除冠梁、内支撑 1 和立柱	钝化冠梁、内支撑 1 以及立柱
负一层	负一层和传力板带 3 施工	激活负一层地下室板、梁及传力板带 3
永久荷载	施加永久荷载	激活荷载

3 模拟结果与监测结果对比分析

3.1 桩顶水平位移对比分析

对基坑西侧围护桩作为桩顶水平位移进行模拟分析, 所得结果见图 6 和 7。选取同侧的监测点位 D15、D16、D17 和模拟点 D115、D116、D117 进行比较, 其位移变化见图 8 和 9。

由图 6 和 7 可知, 基坑开挖到冠梁底时, 桩顶水平位移最大值为 6.30 mm; 开挖到腰梁底时, 桩顶水平位移最大值为 16.20 mm。继续开挖, 到基坑底部时, 得知桩顶水平位移最大值为 23.80 mm。可见, 桩顶位移随着基坑开挖逐渐增大。

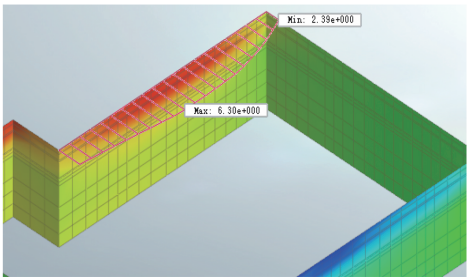


图 6 基坑开挖到冠梁底时桩顶水平位移模拟图
Fig. 6 Simulation diagram of horizontal displacement of pile top with the foundation pit excavated to the crown beam bottom

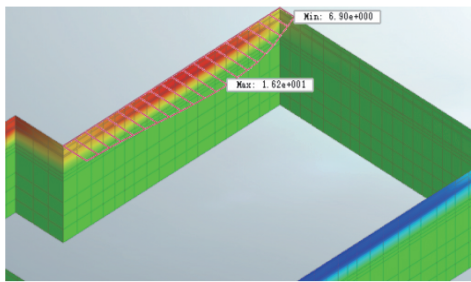


图7 基坑开挖到腰梁底时桩顶水平位移模拟图

Fig. 7 Simulation diagram of horizontal displacement of pile top with the foundation pit excavated to the waist beam bottom

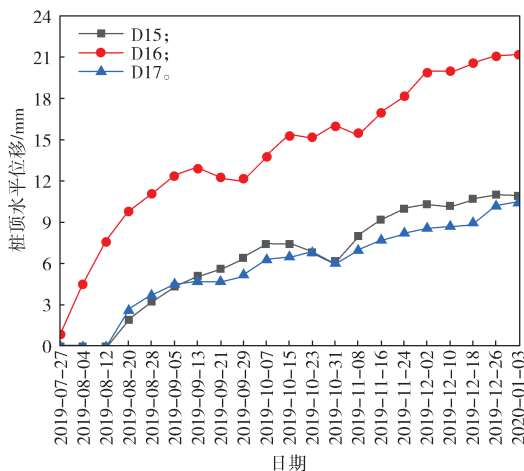


图8 监测点位 D15~D17 桩顶水平位移变化曲线

Fig. 8 Horizontal displacement change curves of the pile top at monitoring points from D15 to D17

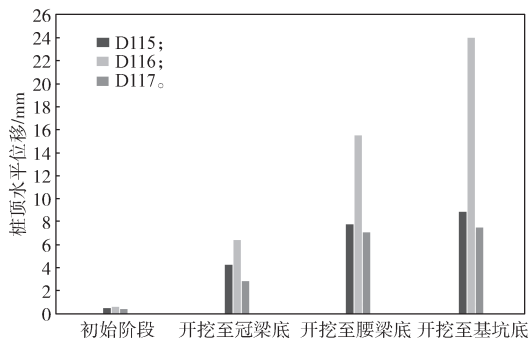


图9 模拟点位 D115~D117 桩顶水平位移量走势图

Fig. 9 Trend chart of horizontal displacement of the pile top at finite element simulation points from D115 to D117

由图8和图9可以得知:3个测点的模拟结果走势与监测结果走势基本为同一变化趋势。无论是模拟值还是实测值,在不同的工程施工阶段,点位D16、D116的桩顶水平位移量都是3个测点当中的最大值,当开挖到基坑底时,两者的桩顶水平位移分别为21.20、23.80 mm,可见两数据较为吻合,且水平位移保持在合理范围内^[13]。

3.2 内支撑轴力对比分析

模拟所得基坑内支撑不同工况下的最大轴力变

化情况如图10所示,实测值轴力变化情况见图11。

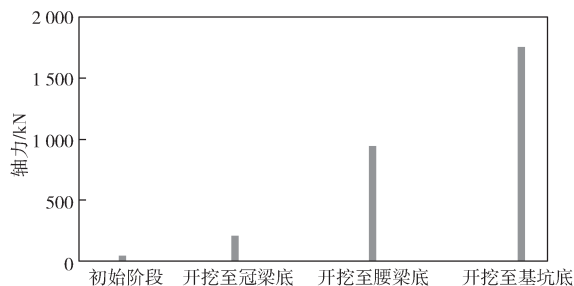


图10 基坑内支撑不同工况最大轴力值模拟图

Fig. 10 Simulation diagram of the maximum axial force value of the support in the foundation pit under different working conditions

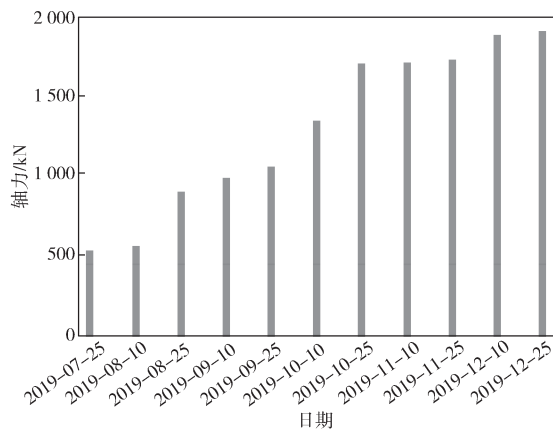


图11 基坑内支撑不同阶段最大轴力值监测图

Fig. 11 Monitoring diagram of the maximum axial force value at different stages of the support in the foundation pit

由图10可知,基坑开挖中,内支撑轴力始终增大,当开挖到冠梁并施工第一层内支撑后,内支撑最大轴力为176.90 kN;当开挖到腰梁底并施工第二层内支撑后,内支撑轴力逐渐增大到905.60 kN;继续开挖到基底,内支撑最大轴力达1714.00 kN,最大轴力均为压力。由图11可知:基坑内支撑最大轴力在基坑开挖至底部时达最大值,为1887.00 kN,实测值略大于模拟值,但两者变化趋势较一致。

以上分析说明新型结构模拟数据与基坑工程监测数据变化趋势较为吻合:桩顶水平位移最大值仅相差2.60 mm,内支撑轴力最大值相差173.00 kN,误差在合理范围内。参考2020年颁布并实施的《建筑基坑工程监测技术标准》中的相关数据^[13],可知本工程监测数据完全符合国家规范要求,因此可以证明分离式“桩墙合一”结构的有限元模型是正确的、合理的,可被应用于实际工程建设中。

4 两种支护结构受力对比分析

4.1 不同工况下深层水平位移量对比分析

在新型结构的地下室主体结构和传统的传力板

带施工中, 模拟选取点位处的深层水平位移曲线如图 12 所示。

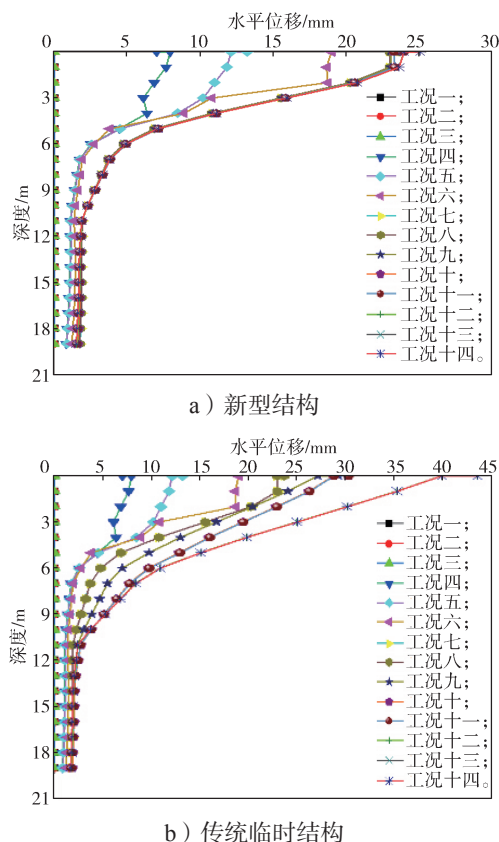


图 12 两件结构不同工况时的深层水平位移曲线

Fig. 12 Deep horizontal displacement curves of the two structure under different working conditions

由图 12 可知, 不同工况时深层水平位移相比于基坑开挖到基底时有微小增加。由图 12a 可知当开挖到基底时, 新型结构的深层水平位移为 23.70 mm, 基本达最大值。继续施工, 由主体结构至添加永久荷载, 深层水平位移在工况十四时为 25.10 mm。由此可得知新型结构从基底开挖完成到主体结构施工, 深层水平位移基本不再变化。

根据图 12b 可以得知: 传统临时结构在开挖到基底时与新型结构的深层水平位移是相同的, 都为 23.70 mm, 但继续施工至地下室主体结构过程中, 围护桩深层水平位移仍然在增加, 至工况十四时, 深层水平位移最大值达 43.60 mm, 接近新型结构位移值的两倍。传统临时结构变形量不断增大, 这一变化趋势与新型结构对比呈现出巨大的差异性, 可见传统临时结构水平位移量远大于新型结构的对应值。

地下室外墙由工况九、十一、十三逐步施工完成, 因此选择这 3 个主要工况进行分析, 其主体结构外墙施工过程中的水平位移曲线见图 13。由图可知: 新型结构的最终水平位移为 1.14 mm, 而传统临时结构的最终水平位移为 1.67 mm, 可见两者相差不大。

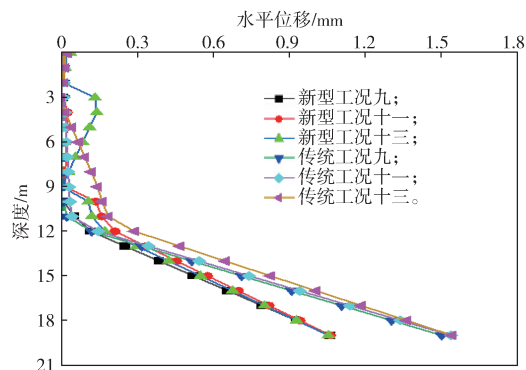


图 13 主体结构外墙施工过程中的水平位移曲线

Fig. 13 Horizontal displacement curves of the external wall of main structure during construction

4.2 不同工况下内力对比分析

图 14 和 15 为两种结构在不同工况下的弯矩图。

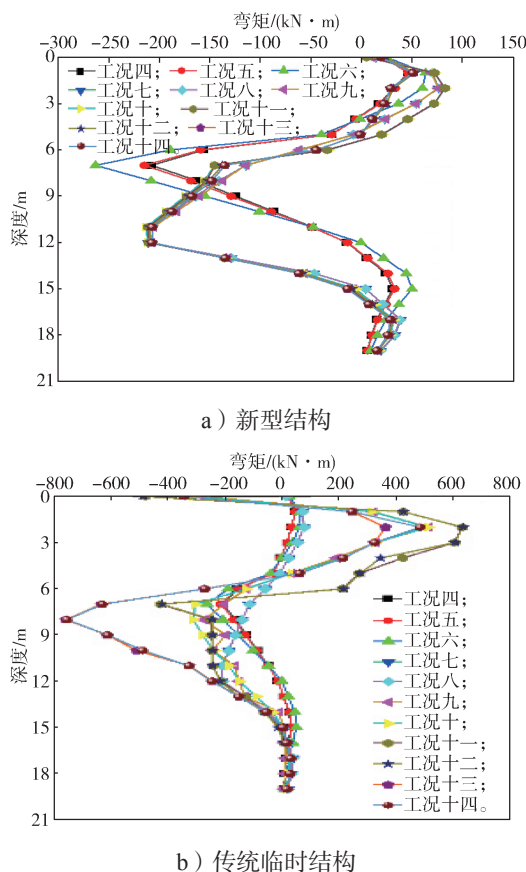


图 14 不同工况下围护桩弯矩变化曲线

Fig. 14 Bending moment curves of retaining piles under different working conditions

由图 14a 可以得知, 在新型结构开挖过程中, 开始开挖时的围护桩弯矩值随开挖深度的增加而增大。开挖未达基底时, 弯矩在工况六时达最大值, 为 263.54 kN·m, 继续开挖到基底及主体结构阶段, 围护桩弯矩减小, 至工况十四时, 弯矩为 207.55 kN·m。由图 14b 可知, 在开挖到基底前传统临时结构与新型结构的弯矩变化趋势相同, 继续施工主体

结构与桩墙间填土过程中, 弯矩值增加较快, 至工况十四时弯矩达最大值, 为 $755.03 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

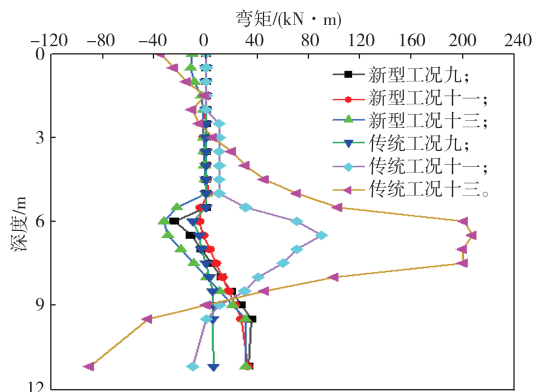


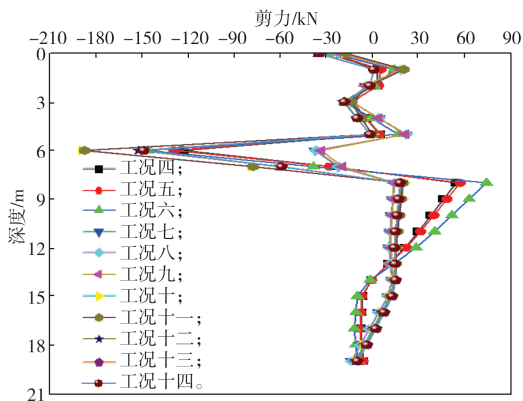
图 15 不同工况下地下室外墙弯矩变化曲线

Fig. 15 Bending moment curves of the basement exterior wall under different working conditions

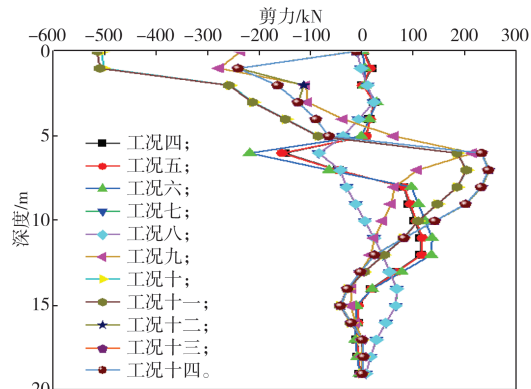
地下室外墙与围护桩有相同的内力变化规律, 新型结构外墙弯矩值先变大后稍变小, 而传统临时结构的外墙弯矩一直变大。新型结构开挖过程中外墙弯矩变化趋势与传统临时结构的变化趋势较吻合, 但新型结构弯矩承载值小于传统临时结构的弯矩承载值, 新型结构的弯矩最大值为 $40.86 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 传统临时结构的弯矩最大值为 $207.68 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

图 16 和 17 所示为两种结构在不同工况下的围护桩剪力变化曲线图和地下室外墙剪力变化曲线图。

由图 16a 可知, 新型结构围护桩的最大剪力值出现在工况十处, 为 188.82 kN , 继续开挖至施工地下室主体结构, 围护桩剪力变化趋势同新型结构的弯矩变化趋势一致。由图 16b 可知, 传统临时结构围护桩的剪力随着施工工况的进行不断增大, 变化趋势同传统临时结构的弯矩变化趋势一致。拆除腰梁第二道内支撑和拆除冠梁第一道内支撑时, 因突然失去了节点的支撑, 围护桩的剪力较大, 故工况十一时其剪力最大, 为 515.82 kN 。



a) 新型结构



b) 传统临时结构

图 16 不同工况下围护桩剪力变化曲线

Fig. 16 Shear force variation curves of the retaining pile under different working conditions

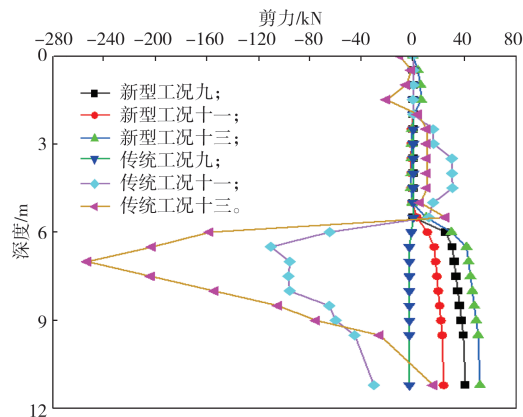


图 17 不同工况下地下室外墙剪力变化曲线

Fig. 17 Shear force change curves of the basement exterior wall under different working conditions

由图 17 所示地下室外墙剪力变化曲线可知, 新型结构的剪力最大值出现在工况十三处, 为 51.95 kN ; 而传统临时结构的剪力出现了较大增长, 到负三层地下室主体结构及最后一条传力板带施工完成后的整个施工过程中, 在工况十三时剪力达最大值, 为 253.35 kN 。

对新型结构与传统临时结构模拟数据进行分析可知: 深层水平位移方面, 传统临时结构围护桩的变形量是新型结构的 1.74 倍; 弯矩方面, 围护桩传统临时结构的力矩是新型结构的 3.64 倍, 地下室外墙传统结构力矩是新型结构的 5.08 倍; 剪力方面, 围护桩传统临时结构的剪力约为新型结构的 2.72 倍, 为地下室外墙剪力的 4.88 倍。

通过对上述两种支护结构的对比分析可知: “桩墙合一” 结构可大幅度提高基坑整体稳定性, 故应加大围护桩永久化技术在实际工程中的应用。

5 结论

1) 内支撑轴力和位移模拟值与实际监测数据虽

然略有差距,但是总体趋势保持一致,且误差在合理范围内,验证了所建立模型的正确性,表明该项新型支护技术在工程中的实践应用是可行的。

2) 通过对新型结构模型和相应传统临时结构模型比较,得出新型结构桩墙内力与位移都远小于传统临时结构的相应值,证明了“桩墙合一”结构形式可大幅度提高基坑结构整体稳定性和新型支护结构的优越性。说明以围护桩永久化技术替代传统临时支护在实际工程中的应用是十分必要的。

3) 因结构承载内力的改变,新型结构可进一步缩小地下室外墙厚度、扩大地下室使用面积、减小围护桩尺寸,故可节约建造成本,创造更大经济效益。

参考文献:

- [1] 楼志军, 胡 耘, 沈 健. 邻江基坑工程应用“桩墙合一”技术的设计与实践[J]. 施工技术, 2017, 46(增刊2): 41-45.
LOU Zhijun, HU Yun, SHEN Jian. Design and Practice of Dual-Purpose Pile Wall in a Deep Foundation Excavation Adjacent to Huangpu River[J]. Construction Technology, 2017, 46(S2): 41-45.
- [2] 吴治厚. 压灌桩“桩墙合一”技术在逆作法基坑中应用[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(增刊1): 308-314, 356.
WU Zhihou. Practice of Dual Purpose Wall Technique with Auger Drilling Pressure-Grouting Pile in Top-Down Method Excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S1): 308-314, 356.
- [3] 王卫东, 王建华. 深基坑支护结构与主体结构相结合的设计、分析与实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 102-168.
WANG Weidong, WANG Jianhua. Design, Analysis and Case Histories of Deep Excavations Supported by Permanent Structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007: 102-168.
- [4] 王卫东, 沈 健. 基坑围护桩与地下室外墙相结合的“桩墙合一”的设计与分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊1): 303-308.
WANG Weidong, SHEN Jian. Design and Analysis of Unity of Support Piles and Basement External Walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 303-308.
- [5] 汪 军, 李大华, 张自光. “桩墙合一”技术在深基坑工程中的应用[J]. 安徽建筑大学学报, 2021, 29(1): 26-32.
WANG Jun, LI Dahua, ZHANG Ziguang. Practice of Dual-Purpose Pile Wall Technique in Deep Foundation Engineering[J]. Journal of Anhui Jianzhu University, 2021, 29(1): 26-32.
- [6] 易 韬. “桩墙合一”复合支护结构的受力特性与抗浮研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
YI Tao. Stress Characteristics and Anti-Floating Application of “Pile-Wall Interaction” Composite Support Structure[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019.
- [7] 李 治. MIDAS/GTS 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 86-159.
LI Zhi. Application of MIDAS/GTS in Geotechnical Engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013: 86-159.
- [8] 焦宗涛. 基于 Midas/GTS 的小河沟 1 号滑坡稳定性及治理工程数值模拟研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
JIAO Zongtao. Numerical Simulation of Landslide Stability and Project of Management Based on Midas/GTS in the 1st Landslide in Xiaohogou[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [9] 赵中棕. 基于 MIDAS-GTS 基坑支护三维数值模拟分析[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2014.
ZHAO Zhongliang. 3D Numerical Simulation Analysis of Foundation Pit Support of Based on MIDAS-GTS[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2014.
- [10] 袁久彬. 基于 MIDAS-GTS 软土区深基坑支护的数值模拟分析[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
YUAN Jiubin. Numerical Simulation Analysis of Deep Foundation Pit Support in Soft Soil Area Based on MIDAS-GTS[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2019.
- [11] 梁洪水. “两墙合一”支护结构的变形及土压力研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
LIANG Hongshui. Deformation and Earth Pressure Research on the Supporting Structure of Dual-Purpose Diaphragm Wall[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [12] EL-NAGGAR M H, ABDELGHANY Y. Helical Screw Piles (HSP) Capacity for Axial Cyclic Loadings in Cohesive Soils[C/OL]//Proceedings of the 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Thessalonik-Greece: s. n., 2007. [2022-06-10]. <https://www.docin.com/p-1535536934.html>.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑工程监测技术标准: GB 50497—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Standard for Monitoring of Building Excavation Engineering: GB 50497—2019[S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2020.

(责任编辑: 廖友媛)