

3D-FEM Analysis of a Retaining System Using OU Combined Sheet Pile (OUCSP)

Longhua Shi¹, Yunjin Lai²

¹Ningbo Transportation Engineering Construction Group Co. Ltd., Ningbo Zhejiang

²Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai

Email: laiyunjn@126.com

Received: Mar. 3rd, 2020; accepted: Mar. 18th, 2020; published: Mar. 25th, 2020

Abstract

OU Combined Sheet Pile (OUCSP) for retaining wall is a new type of its kind that is combined with steel pipe, called O pile, and U-section Larsen sheet pile by means of plane layouts such as O-U-O type, or O-U-U-O type, or O-U-U-U-O type, or of different profile layouts such as that with equal length or unequal length. The OUCSP is stiffer than traditional sheet pile, and can be used for deeper excavation with fewer struts accordingly. As such, it is increasingly adopted as the retaining system of the excavations of building foundation pits and underpasses. This paper reports a 3D-FEM analysis on an underpass excavation for following types of OUCSP: O-U-O type, O-U-U-O type, and O-U-U-U-O type, O-U-O type with equal length and O-U-O type with unequal length. This 3D-FEM analysis harvests some recognition about OUCSP's mechanical behaviors when it is used for a practical project, and shows that the calculation agrees rather well with the site monitoring.

Keywords

OUCSP, Underpass of Highway, Retaining Structure, 3D-FEM

OU组合型板桩围护的三维有限元分析

施龙华¹, 赖允瑾²

¹宁波交通工程建设集团有限公司, 浙江 宁波

²同济大学地下建筑与工程系, 上海

Email: laiyunjn@126.com

收稿日期: 2020年3月3日; 录用日期: 2020年3月18日; 发布日期: 2020年3月25日

摘要

OU组合型板桩是指采用钢管桩(O型)和U型钢板桩通过平面组合和长短组合形成的新型板桩墙。针对某

文章引用: 施龙华, 赖允瑾. OU组合型板桩围护的三维有限元分析[J]. 土木工程, 2020, 9(3): 254-264.

DOI: 10.12677/hjce.2020.93028

公路下穿地道的OU组合型板桩支护基坑, 采用3D有限元软件对如下组合进行了数值模拟计算: 1) O型桩与U型桩按O-U-O, O-U-U-O和O-U-U-U-O形式的平面组合; 2) O型桩与U型桩按O-U-O的等长度组合和不等长度组合。计算得到O型桩和U型长度组合及平面组合下基坑变形的规律性认识。针对某实际下穿地道工程, 有限元分析结果和实测结果进行了对比分析, 论证了OU组合型板桩应用于公路下穿地道基坑的可行性。

关键词

OU组合型板桩, 公路地道基坑, 支护结构, 3D有限元

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

OU组合型板桩是指采用钢管桩(O型)和U型钢板桩通过平面组合和长短组合形成的新型板桩墙。和传统的拉森钢板桩相比, OU组合型板桩具有如下优点: 1) 刚度大; 2) 变形小; 3) 支撑道数少; 4) 拆除后的悬臂允许长度大。和其它支护(排桩、SMW工法等)相比, 具有自防水性、可以重复利用、不需要养护, 可缩短工期等优点。因此, OU组合型板桩(也有称PC工法桩)近年来在基坑工程中的应用不断增加[1][2][3][4]。对于OU组合型板桩的设计计算, 目前主要采用建筑基坑工程的国家或地方标准[5][6], 将平面不同组合和长度不同组合进行截面刚度等效处理, 然后按柔性板桩计算基坑支护的内力和变形, 以及验算基坑的稳定性[7], 这种设计计算方法, 我们称为规范方法。这种方法存在明显缺陷: 无法确知介于O型钢管桩间的U型板桩的受力情况, 以及长短桩组合时基坑稳定性情况, 因而无法确定OU型组合桩搭接处齿口的受力及其安全性。为此, 采用三维有限元(3D-FEM)数值模拟的方法对OU组合型板桩不同组合情况下的支护结构进行计算分析, 对于了解各种不同组合情况下的基坑支护结构力学性能十分必要, 并有助于验证规范方法确定的设计参数的准确性。

目前, 采用有限元数值方法分析OU组合型板桩的工作仅见于文献[8], 该文报道了采用MIDAS-GTS NX软件分析浙江省德清中科产业大楼PC工法桩支护基坑工程。但是, 该基坑采用等长组合和一O一U平面组合, 按悬臂支护设计。由于该计算在分析前已经采取等效归一化处理成矩形截面的板桩, 因此仍然不能得到O型桩间的U型桩受力情况。Shiya Inazumi *et al.* [9][10]采用有限元数值模拟和试验手段研究了组合型板桩的截水帷幕受力变形特性, Kuhlmann U. *et al.* [11]采用有限元三维数值模拟分析了某组合型板桩突堤在海浪作用下的受力变形特性。

本文将基于浙江舟山市某下穿地道深基坑, 对OU组合型板桩的如下组合采用三维有限元软件ZSOIL进行了数值模拟计算分析: 1) 平面三种组合: O-U-O, O-U-U-O, O-U-U-U-O; 2) O-U-O下的长度两种组合: OU等长(均为18米)和OU不等长(O桩18米, U桩12米)。通过对基坑受力和变形的分析, 可以获得对OU组合型板桩支护的一些规律性认识和启示。

2. 基坑基本概况

本工程位于浙江舟山市朱家尖, 该地道长约450米, 开挖深度0~8米, 局部11米。为了分析的针对性起见, 选取开挖深度8米的暗埋段进行计算分析。该段基坑所处地层为: ①1层素填土, ①2层粉质黏

土, ②1 层淤泥质黏土, ②2 层淤泥质粉质黏土, ②2-1 层粉砂, ③1 层淤泥质黏土, ③2-1 层粉砂, ③3 层粉质黏土, ③4 层粉砂, ④1 层黏土, ④3 层粉质黏土, ⑤3 层粉质黏土, 10-3 层强风化 - 中风化凝灰岩。基坑坑底采用三轴水泥土搅拌桩满堂加固, 加固深度 4 米。

基坑所处的地层自上而下分别为: 基坑底位于②2 层淤泥质粉质黏土。土层物理力学参数如表 1 所示。土层剖面和地道的位置关系如图 1 和图 2 所示(开挖深度 8 m 情况)。地下水位埋深约 2 米。

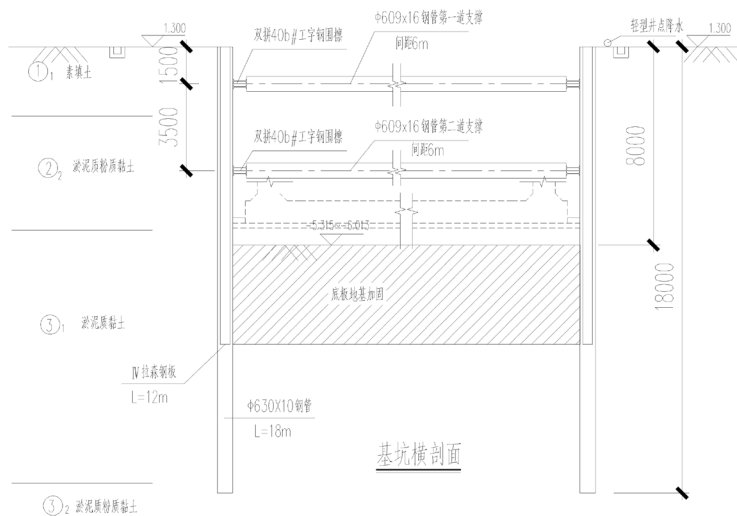


Figure 1. Transversal section of excavation
图 1. 基坑横剖面图

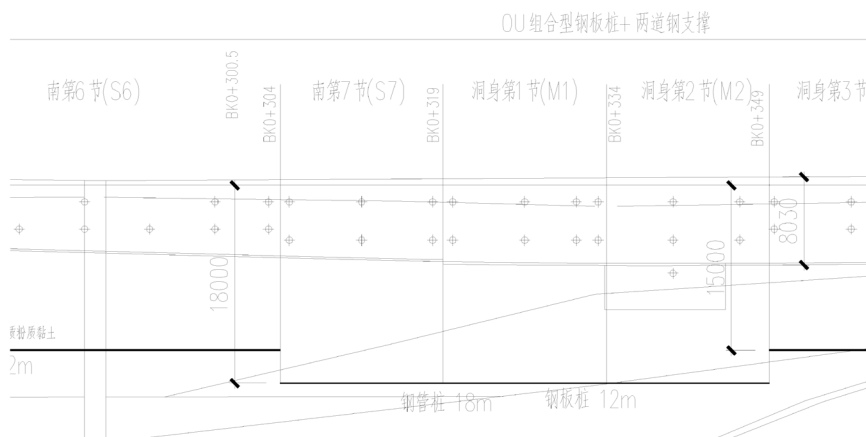


Figure 2. Longitudinal profile of excavation
图 2. 基坑纵剖面

Table 1. Soil properties for excavation design
表 1. 基坑支护设计参数建议值一览表

层号	土层名称	重度 γ (KN/m ³)	粘聚力 C_{cu} (kPa)	内摩擦角 Φ_u (度)	渗透系数 K (10e-8 cm/s)	水平基床系数 m (MN/m ⁴)
②1	淤泥质粉质粘土	17.1	12.8	8.6	7.02-9.15	2
②2	淤泥质粉质粘土	17.8	13.6	9.4	173	3
③2	淤泥质粉质粘土	17.3	13.1	8.8	140	2.5

3. 3D-有限元计算模型

针对等长组合的 OU 组合型板桩和不等长组合型板桩的力学性能, 采用三维有限元软件 Zsoil 进行了数值模拟计算。Zsoil 软件是瑞士联邦理工学院(Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne)开发的真三维岩土工程有限元软件, 可以提供涉及土力学和岩石力学、地下结构、基坑开挖、土-结构相互作用、地下水和温度分析的统一方法, 在国际岩土界得到广泛应用。

3.1. 基坑支护结构的有限元建模

针对开挖深度 8 米地道基坑, 本计算选取计算模型尺寸为 77 m × 17.6 m × 30 m (长 × 宽 × 高)。土层采用六面体实体单元, 拉森钢板桩数按板(one layer shell)单元, 钢管桩按和支撑按梁(beam)单元选取, 同时考虑了接触面的渗透(seepage)面单元。

模型的边界条件为: 顶部自由, 四周及底部限制法向位移, 底边限制三个方向的位移。四周为透水边界, 底部为不透水边界。

有限元模型如下图 3 和图 4 所示。

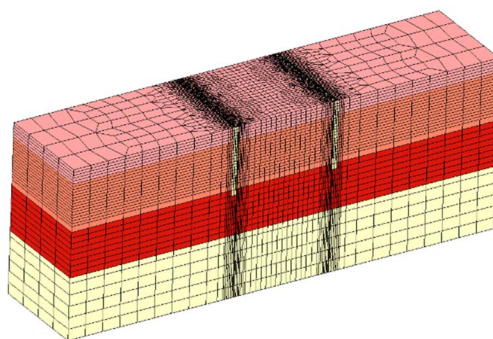


Figure 3. 3D-FEM modeling (before excavation)

图 3. 有限元单元建模(开挖前)

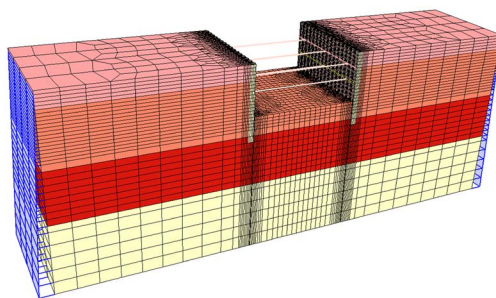


Figure 4. 3D-FEM modeling (during excavation)

图 4. 有限元单元建模(开挖过程)

3.2. 计算参数

1) 土体计算参数

计算中, 针对土体, 采用了小应变硬化土模型(HSS)。该模型可以考虑如下情况: 粘土体在小应变范围内土体剪切模量随应变增大而衰减的特点。由于在规范允许变形范围内, 基坑工程可以视作小变形问题, 因此, HSS 模型在基坑开挖数值分析中得到较多的运用。考虑到该模型参数较多, 本计算参照文献[12]的 HSS 模型参数, 计算参数如表 2 所示。

Table 2. Soil properties for calculation**表 2.** 土体计算参数表

土层序号	回弹模量(MPa)	初始弹性模量(MPa)	重度	初始孔隙比	含水量	干重度(kN/m ³)
①	57.45	124.65	18.1	1.075	35.9	13.32
②2	41.55	172.35	17.7	1.215	43.8	12.31
③1	35.25	105.75	17.3	1.374	48.8	11.63

土层序号	垂直方向渗透系数(m/d)	水平方向渗透系数(m/d)	内摩擦角(°)	粘聚力(kPa)	侧限压缩模量(MPa)	侧压力系数
①	6.99E-05	6.71E-05	10	10	11.49	0.83
②2	1.53E-04	2.52E-04	9.1	13.2	8.31	0.84
③1	6.32E-05	8.35E-05	8.7	13	7.05	0.85

2) 支护结构计算参数

支护构件包括钢板桩、钢支撑及钢围檩的计算参数如表 3 所示。

Table 3. Properties of members of retaining system**表 3.** 支护结构计算参数

弹性模型	弹模(MPa)
钢板桩	210000
钢支撑、钢围檩	210000

4. 计算结果分析

4.1. 平面不同组合计算结果

针对 OU 组合型板桩的平面组合三种情况, 即 O-U-O, O-U-U-O 和 O-U-U-U-O 进行了有限元计算。上述组合中 O 型桩和 U 型桩长度不等, 其中 O 型桩长度 18 米, U 型桩长度 12 米。

1) 基坑开挖到底时基坑隆起和地表沉降计算结果(云图所示的 Y 方向位移)

根据计算, 三种组合的基坑隆起和周边地表沉降计算结果如表 4 所示。

Table 4. The maximum heave and surface settlement of pit**表 4.** 基坑隆起和地表沉降计算结果

组合类型	坑底隆起(mm)	地表沉降(mm)
O-U-O	54.88	13.63
O-U-U-O	61.49	16.46
O-U-U-U-O	85.96	25.15

选取中央断面, 可以得到三种组合的铅锤方向(云图所示 Y 方向)的输出云图, 由于三种组合的规律相似, 本文选取了 O-U-O 组合情况的结果, 基坑坑底隆起和坑外地表沉降(云图中 Y 方向位移)计算结果如图 5 所示。

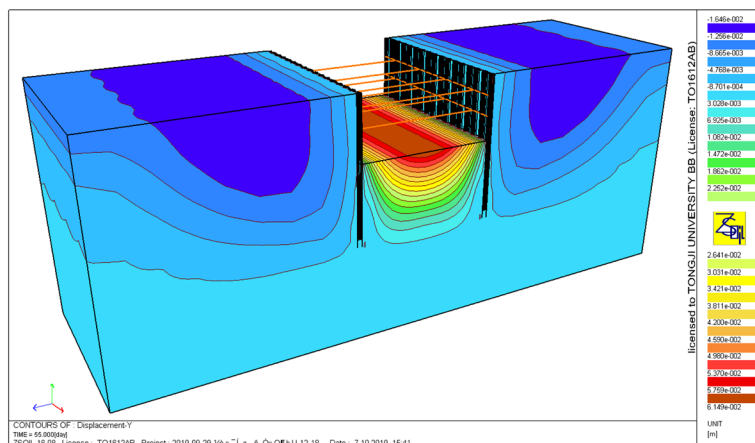


Figure 5. Y-direction displacement of soil when excavation completed
图 5. 开挖至坑底时土体铅锤方向位移云图

计算结果表明, 对于软土地层, OU 组合型钢板桩的平面组合方式对坑底隆起和坑外地面沉降影响是很明显的: 当钢管桩(O 型桩)增大时, 位移变化呈现非线性变化。说明当钢管桩间距到达一定值时, 土体的水平成拱效应丧失: 即在间距小时土体水平拱发挥作用, 逐渐增大间距到一定值时, 水平拱破坏。钢管桩桩间土的成拱效应如图 6 所示。

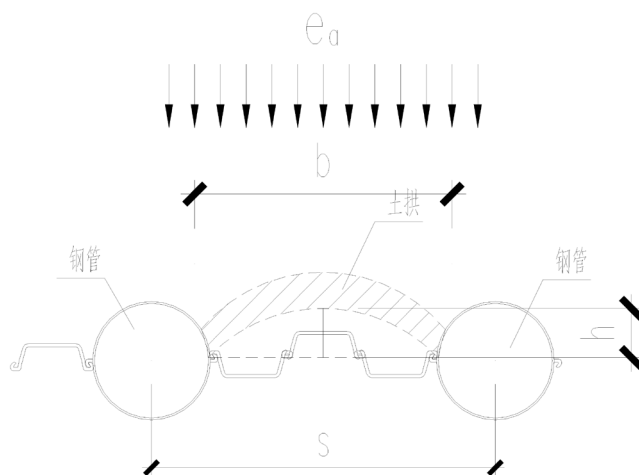


Figure 6. Soil Arching
图 6. 土拱效应

2) 基坑开挖到底时基坑水平位移计算结果(云图所示的 Z 方向位移)

根据计算, 三种组合的基坑水平位移计算结果如表 5 所示, 该表数值为围护桩的最大水平位移。

Table 5. The maximum horizontal displacement of pit
表 5. 基坑坑内方向的水平位移计算结果

组合类型	水平位移(mm)
O-U-O	22.54
O-U-U-O	28.50
O-U-U-U-O	42.01

计算结果表明, OU 组合型钢板桩的平面组合方式对水平位移同样是很明显的: 当钢管桩(O 型桩)增大时, 水平位移变化呈现非线性变化。其原因也是由于当钢管桩间距到达一定值时, 土体的水平成拱效应丧失。

选取中央断面, 可以得到三种组合的基坑水平方向方向三维位移云图。由于三种组合的规律相似, 本文选取了 O-U-O 组合情况的结果, 水平位移(云图中 Z 方向位移)如图 7 所示。

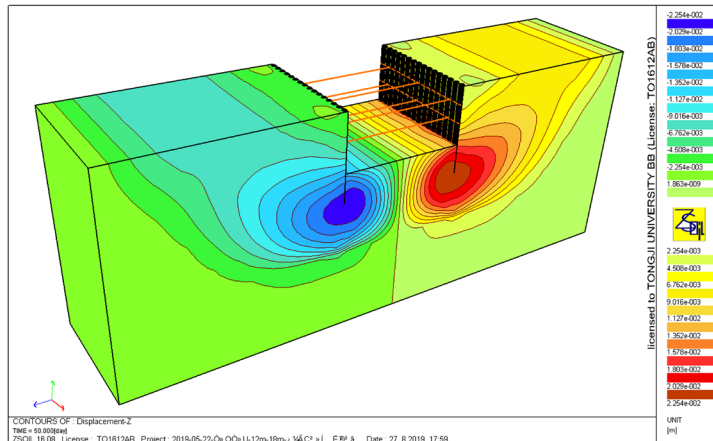


Figure 7. Horizontal displacement of soil when excavation completed
图 7. 开挖至坑底时土体水平方向位移云图

3) 基坑开挖到底时围护桩的水平位移计算结果

根据计算, 三种组合的基坑围护桩水平位移计算结果如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 围护桩的水平位移随着 OU 组合型钢板桩中钢管桩(O 型桩)间距增大而整体增大; 当间距达到某一数值时, 急剧增大。

图 9 为 O-U-O 组合时围护桩的水平位移云图。从图中可以看出, 围护桩的水平位移在坑底一定范围还是很显著的。

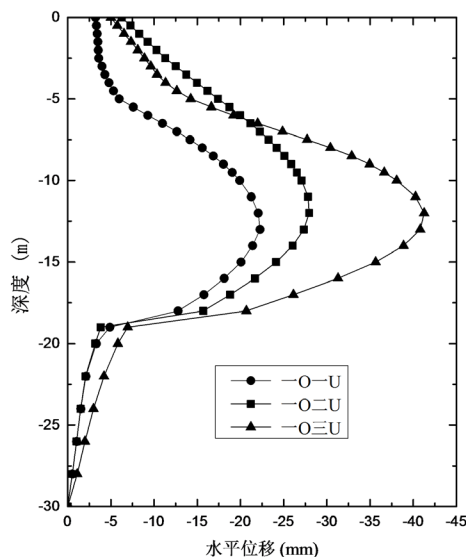


Figure 8. Horizontal deflection of steel pipe
图 8. 围护桩的水平位移

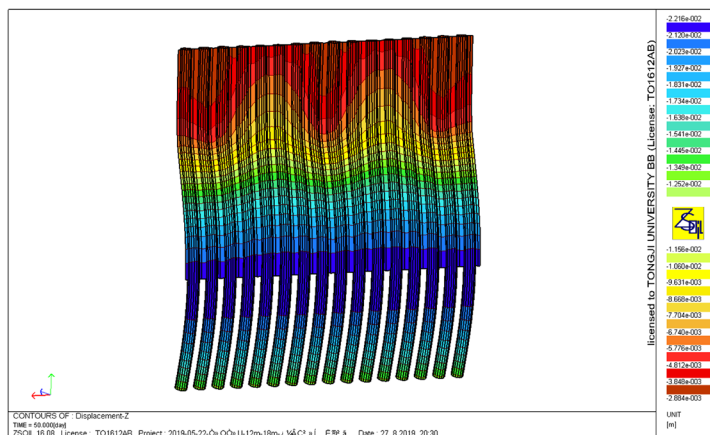


Figure 9. Horizontal displacement clouds of piles after excavation
图 9. 开挖至坑底时的围护桩水平位移

4.2. OU 桩长短不同组合计算结果

针对 O-U-O 平面组合, 对 O 型桩和 U 型桩等长和不等长两种情况进行了计算。等长组合情况时, O 型桩和 U 型桩桩长均为 18 米; 不等长组合情况时, O 型桩桩长 18 米和 U 型桩桩长 12 米。相关计算结果如表 6 所示。

Table 6. Comparison between combinations of equal length and of unequal length

表 6. 长度不同组合的结果对比分析

计算结果	不等长	等长
基坑最大位移(mm)	54.88	43.82
周边沉降(mm)	13.63	10.81
坑底隆起(mm)	54.88	43.82
围护水平位移(mm)	22.54	18.17

对于坑外地表沉降分布情况, 两种组合的计算结果如图 10 所示。计算结果表明, 等长组合下的地表沉降小于不等长组合下的地表沉降。

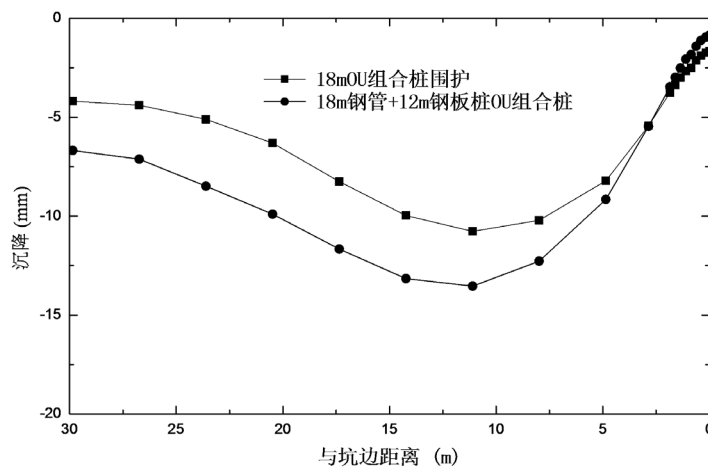


Figure 10. Settlement troughs of combinations of equal length and of unequal length
图 10. 长度不同组合时地表沉降槽曲线

对于围护桩(O型桩)水平位移(即挠曲变形), 两种组合的计算结果如图 11 所示。计算结果表明, 等长组合下的水平位移小于不等长组合下的水平位移。

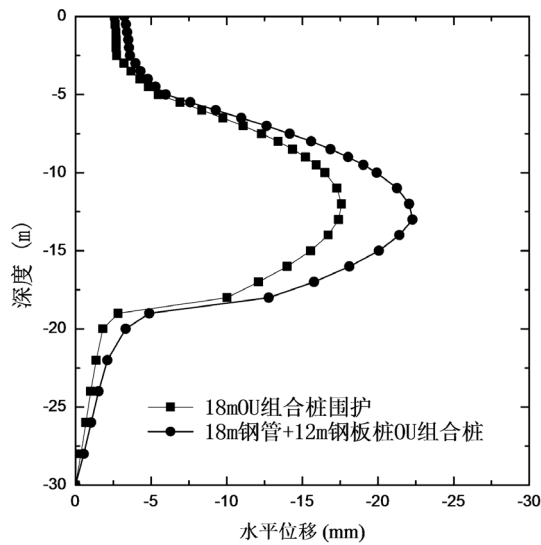


Figure 11. Deflections of O piles of combinations of equal length and of unequal length
图 11. 长度不同组合围护桩挠曲变形

5. 实测结果的对比分析

本工程在实际应用中, 考虑到工程安全和对周边环境的控制, 采用了 O-U-O 平面组合, 及不等长组合, 其中 O 型桩桩长 18 米和 U 型桩桩长 12 米。在基坑挖深最大位置, 埋设了测斜管监测围护桩的挠曲变形, 测斜管埋设于钢管桩中央。同时还进行了地表沉降变形监测和坑外水位观测。测点埋设位置如图 12 所示。

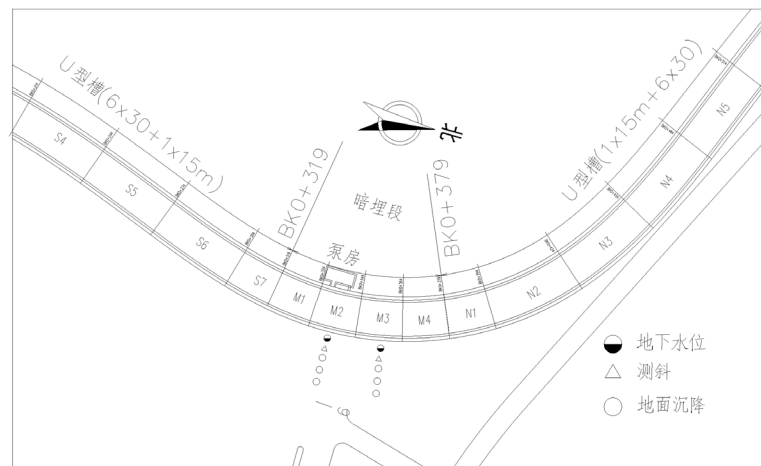


Figure 12. Layout of measurement
图 12. 测点布置图

5.1. 围护桩的挠曲变形

基坑施工过程中, 监测得到中央断面处围护桩的挠曲变形, 如图 13 所示。

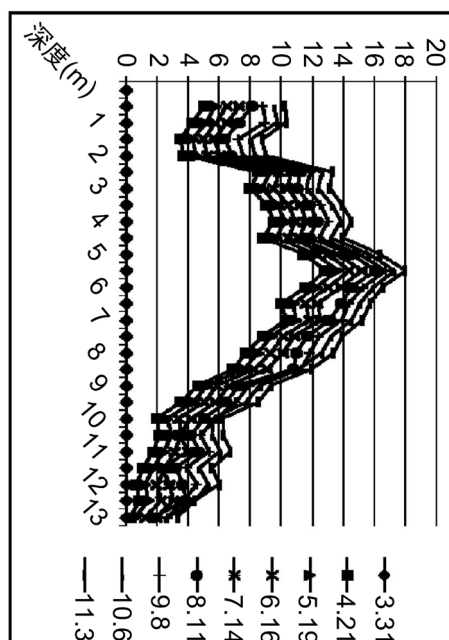


Figure 13. Measured deflection curves of O pile at central section
图 13. 中央断面处围护桩的实测挠曲变形

从图 13 中可以看出, 中央断面处的围护桩的最大水平位移为 28.65 mm。比计算值(22.54 mm)大。但挠曲变形规律一致。

5.2. 周边地面沉降

基坑施工过程中, 监测得到中央断面处坑外地表沉降情况, 如图 14 所示。

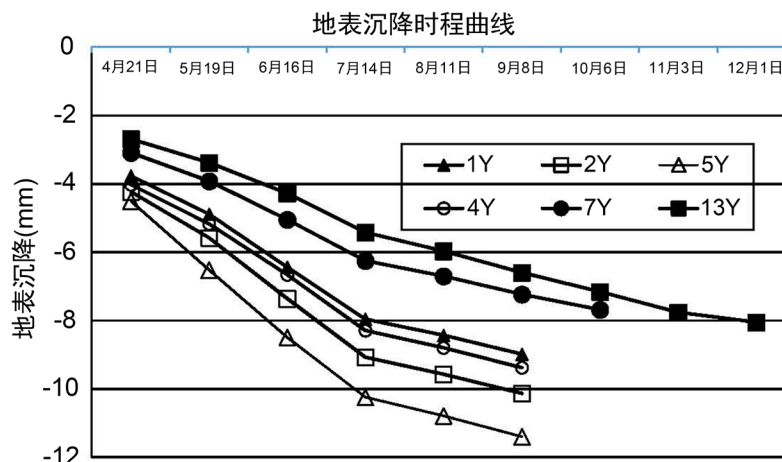


Figure 14. Measured surface settlement trough at central section
图 14. 中央断面处的地表沉降曲线

监测结果表明, 基坑后地表最大沉降为 11.6 mm, 和计算结果(13.63 mm)相近。

5.3. 坑外水位变化情况

基坑施工过程中, 监测得到中央断面处坑外地下水位变化, 如图 15 所示。

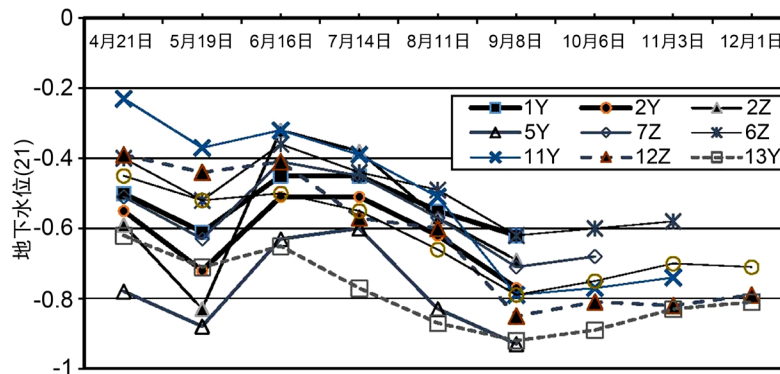


Figure 15. Measured change of ground water table outside pit
图 15. 中央断面处的坑外地下水位变化

监测结果表明, 基坑开挖期间, 坑外地下水位保持稳定, 说明围护桩止水效果良好。

6. 结语

- 1) 公路下穿地道基坑采用 OU 组合型板桩作为围护结构是一种可行方案。
- 2) OU 组合型板桩应根据基坑所处地基土情况, 选择 O 型桩和 U 型桩的平面组合或长度组合的依据是围护桩的受力变形特性和基坑变形情况。
- 3) 由于规范方法无法得到基坑变形, 采用三维有限元(3D-FEM)方法是值得推荐的一种方法。
- 4) 对于软土地基, 需要注意土体水平成拱效应的特点, 谨慎选择钢管桩的间距和 O 型桩和 U 型桩的长度, 防止出现坑底土体失稳导致基坑大变形事故。

基金项目

浙江省交通厅 2018 科技计划项目, 项目号: 2018040。

参考文献

- [1] 许海明, 郭生根, 卢纪璠, 曾怡婷, 徐长节. PC 工法桩在基坑支护中的应用[J]. 施工技术, 2019, 48(4): 85-89.
- [2] 陈圣贤, 徐铨彪. PC 工法桩在德清某项目基坑工程中的应用[J]. 山西建筑, 2016, 42(33): 80-81.
- [3] 陈赞. PC 工法支护桩在某深厚软土地区基坑中的应用及分析[J]. 浙江建筑, 2018, 35(5): 32-35.
- [4] 韦麟, 支彦锋, 斯纪平, 傅建红, 沈佳锋, 赖允瑾. OU 组合型板桩在下穿地道基坑中的应用[J]. 建筑施工, 2019(10): 1815-1817.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规程(JGJ120-2012) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [6] 浙江省建设厅. 建筑基坑支护技术规程(DB33/T1008-2014)[M]. 杭州: 浙江省标准设计站, 2014.
- [7] 支彦锋, 韦麟, 金龙林, 斯纪平, 沈佳锋, 赖允瑾. OU 组合型板桩支护的实用计算方法[J]. 建筑施工, 2019(10): 1821-1823.
- [8] 龚子豪. PC 工法桩在粘土地区基坑中的应用与数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽建筑大学, 2018.
- [9] Inazumi, S., et al. (2005) Construction of Vertical Cutoff Barrier Using H-Jointed Steel Pipe Sheet Pile with H-H Joints(J). *Journal of the Society of Materials Science*, **54**, 1105-1110.
- [10] Inazumi, S., et al. (2010) Experimental Study on Impermeable Properties of H-Joints SPSPs with H-H Joints under Soil Coexistence(J). *Journal of the Society of Materials Science*, **59**, 74-77.
- [11] Kuhlmann, U., et al. (2009) Stability Verification of H-Sections Used in Combined Quay Walls According to EC 3. *Stahlbau*, **78**, 832-840. <https://doi.org/10.1002/stab.200910099>
- [12] 梁发云, 贾亚杰, 丁钰津, 黄茂松. 上海地区软土 HSS 模型参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(2): 269-278.