

软土区超深箱式挡墙支护结构监测与仿真优化

孔维耀

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 为了阐明新型超深箱式挡墙在软土区深基坑围护体系中的工作性状,以上海软土区某箱式挡墙基坑工程为依托,基于现场原位监测数据分析开展深基坑开挖全过程有限元数值仿真。箱体挡墙应力及测斜监测结果表明箱式挡墙支护结构刚度较大,向坑内滑移及倾覆趋势不明显。基于不同宽度的箱式挡墙的有限元数值仿真结果,评价其抗滑移、抗倾覆稳定性并验算承载能力,发现前、后墙和桩顶抗剪力对结构抗滑移稳定性的贡献最大,结构自重和后墙轴向拉应力对抗倾覆稳定性的贡献最大,而地基反力和前墙轴力对承载力的贡献最大。仿真优化结果表明:从抗滑移、抗倾覆和承载力等安全性方面考虑,箱式挡墙结构宽度取0.45倍基坑深度时,箱式挡墙支护结构的墙体、隔板、底板的承载力既得以充分发挥,满足规范要求,同时能提高构件利用率,节约工期,经济性更好。研究成果对后续软土区箱式挡墙支护基坑工程的设计和参数优化具有参考意义。

关键词: 软土;箱式挡墙;监测;优化分析;有限元分析

中图分类号: TU473

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)01-0167-07

Monitoring and Simulation Optimization of Ultra-deep Box Retaining Wall Supporting Structure in Soft Soil Area

KONG Weiyao

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: In order to elucidate the working performance of the new ultra-deep box retaining wall in the deep foundation pit enclosure system in the soft soil area, relying on a box retaining wall foundation pit project in the soft soil area of Shanghai, the finite element numerical simulation of the whole process of deep foundation pit excavation is carried out according to the analysis of the in-situ monitoring data. The monitoring results of stress and slope measurement of box retaining wall show that the stiffness of the box retaining wall is large, and the tendency of sliding into the pit and overturning is not obvious. Based on the finite element numerical simulation results of box retaining walls with different widths, the stability against sliding and overturning is evaluated, and the bearing capacity is calculated. It is found that the shear resistance of front wall, rear wall and pile head contributes the most to the anti-sliding stability of the structure. The structural dead weight and the axial tensile stress of the rear wall contribute the most to the stability against overturning. And the foundation reaction and the axial force of the front wall contribute the most to the bearing capacity. The results of simulation and optimization show that considering the safety of sliding resistance, overturning resistance and bearing capacity, when the width of the box retaining wall structure is taken as 0.45 times of the depth of the foundation pit, the bearing capacity of the wall body, partition and base plate of the box retaining wall support structure can be given full play to meet the specification requirements, and at the same time, the utilization rate of components can be improved, the construction period can be saved and the economy can be better. The research results have a reference significance for the design and parameter optimization of the subsequent foundation pit engineering of box retaining wall in soft soil area.

Keywords: soft soil; box retaining wall; monitoring; optimization analysis; finite element analysis

0 引言

21世纪以来,东南沿海地区大规模的地下空间

开发利用迅猛发展,高层建筑地下室、地下变电站、地下轨道交通、大型污水处理系统等深基坑工程建设如火如荼^[1]。软土地区基坑工程的规模、深度、主体结构的复杂程度日趋增大,深基坑支护结构的设计与创新引起了工程技术人员的高度关注。传统的深基坑基本采用有支撑的设计方案,具有施工作业

收稿日期: 2024-02-23

作者简介: 孔维耀(1989—),男,硕士,高级工程师,从事建筑结构及岩土设计工作。

面积小、存在安全隐患等问题,深基坑工程亟需采用新的建设思路来解决。近年来,新型基坑支护结构逐渐涌现,尤其是反压土+悬臂式支护、双排桩无支撑支护、多级支护、倾斜桩支护等一系列基坑无支撑支护技术得到了工程技术人员的青睐^[2-3]。大量工程实践表明:软土地区的基坑工程无支撑支护技术,在适当条件下,可显著降低基坑工程造价、缩短工期、减少钢筋水泥用量,推动了基坑工程绿色低碳发展^[4]。

箱式挡墙(全称箱型重力式混凝土挡墙)是一种近年来在软土区基坑工程中发展迅速的新型支护结构型式,内部充填素土、石料等填料,外围为钢混结构,能节省大量混凝土材料,降低制造成本。箱式挡墙的结构型式与日常生活中所见的空箱类似,即四周闭合,内部空出,最早是用来支撑和加固填土或山坡土体,防止其坍塌,保持其稳定的一种支挡建筑物^[5-6]。当应用于软土地区深基坑工程时,可无支撑开挖便于施工,减少了废弃工程量,降低了碳排放,节约工期。

本文结合上海某污水处理厂污泥处理深基坑工程实例,开展软土区超深箱式挡墙支护结构工作性状研究,首先通过监测数据对箱式挡墙结构变形和受力规律进行深入分析,进而建立有限元模型开展仿真优化,模拟分析不同宽度的箱式挡墙的抗滑移、抗倾覆稳定性并验算其承载能力,从而从安全性和经济性综合最优的角度给出箱式挡墙结构的宽度建议值。

1 工程概况

白龙港污水处理厂污泥处理处置二期工程,位于现状白龙港污水厂污泥厌氧消化池两侧的空地,其中01地块位于污泥厌氧消化池东北侧。01地块下沉式厂区平面尺寸为179.2 m×169.8 m,埋深分别为13.6 m(9 875.7 m²)、10.6 m(5 296.3 m²)和6.8 m(11 048.7 m²),总面积为26 220.7 m²。由于设备及周边环境需要,永久工况下无法设置上部支撑或楼板,形成一种下沉式厂区结构,为此,可以结合下沉式厂区深基坑围护体系设计出一种超深箱式挡墙结构,满足本工程永久工况下的运行管理需求。

2 现场原位监测分析

2.1 监测布置

为验证箱式挡墙结构的受力特性与实际情况的

匹配性,开展现场原位监测研究,工程地块下沉式厂区基坑的监测点布置如图1所示。以东侧开挖监测结果进行分析。东侧区域于5月18日开始开挖,6月18日开挖至坑底,6月22日完成底板浇筑,基坑开挖工作结束,箱式挡墙结构与基坑底板、后墙外侧土体之间逐步达到稳定状态。为分析不同状态下的箱式挡墙结构应力分布特点及变化趋势,分别选取5月16日(开挖前夕),6月18日(基坑开挖完成但坑内底板未浇筑),和7月3日(坑内底板浇筑完成)3个时段的应力数据进行分析。坑内底板浇筑完成10 d后,箱式挡墙结构应力重分布基本完成,应力不再发生剧烈变化。

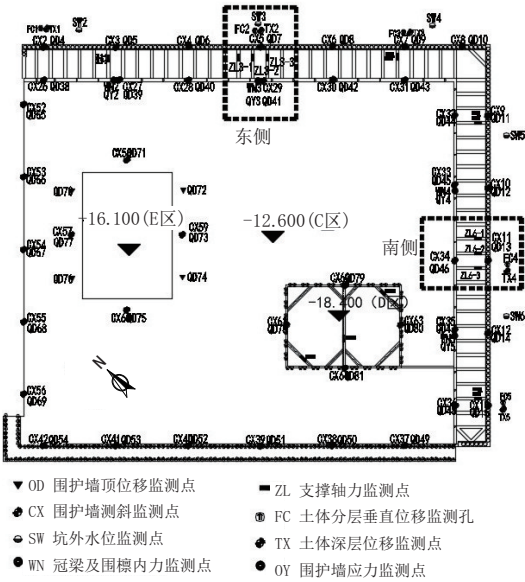


图1 基坑监测点布置图

2.2 变形监测规律

图2为前墙内坑开挖引起的前、后墙测斜值曲线图。可以看出,随着前墙内基坑开挖,挡墙逐渐发生向内坑的变形,挡墙底部变形比上部大,前墙的变形比后墙大,最大变形约为10 mm(发生在前墙17 m深处),挡墙最大变形约为8 mm,整体变形均较小。其中,后墙测斜增量远小于前墙,表明前墙变形主要是由于箱体内部填充土体的侧压及侧面支撑消失引起。坑外侧的土压力并未引起前墙过多的变形量,前后墙的大部分变形量是在箱式挡墙基坑开挖时所产生的。可见,结构向坑内滑移、倾覆变形的趋势均不明显。

2.3 受力监测规律

图3为3个监测时段的结构截面受力分布图,其中图3(a)为基坑未开挖时段的结构受力分布图,图3(b)为内坑开挖到底后厂区底板尚未浇筑阶段,图

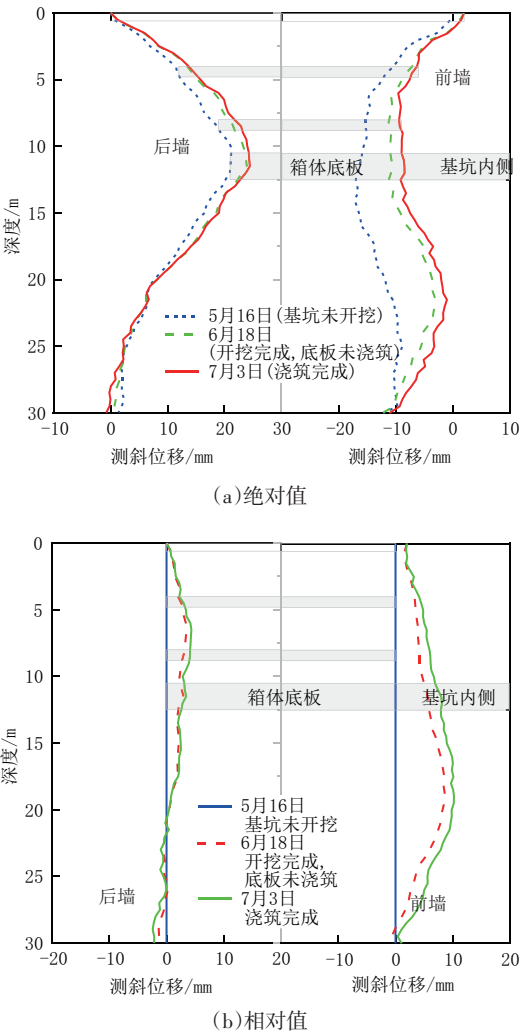


图2 基坑开挖引起的前后墙测斜曲线图(单位:mm)

3(c)为内坑开挖到底后厂区底板浇筑完成阶段。图中长形点朝向表示受力的方向,颜色表示力的大小,浅蓝色区域为轴向压力包络图。截面受力由预埋钢筋计受力产生的应变反算得到。因箱式挡墙结构各板、墙的内外侧均设有钢筋和钢筋计,对应的截面压力有所差别。为表现出结构受弯特性,实测压力值分别绘于结构两侧。基于监测到的箱式挡墙结构压力分布情况,分析各个抗力对抗滑移稳定的影响程度。3组不同时段的结果均表明,挡墙结构大部分区域表现为受压状态,而后墙与上层水平隔板局部表现为受拉状态。通过不同时段坑外侧土压力的监测数据可知,随着前墙内基坑开挖,前墙侧土压力逐渐减小,往内坑的变形量逐渐增加,后墙的主动土压力逐渐变小。

进一步说,对箱式挡墙前、后墙进行隔离体的受力平衡分析如图4所示。前墙隔离体受力包括:挡墙中隔板力、挡墙内土压力、挡墙底板轴力、厂区底板压力 N 、前墙剪力。后墙隔离体受力包括:外土

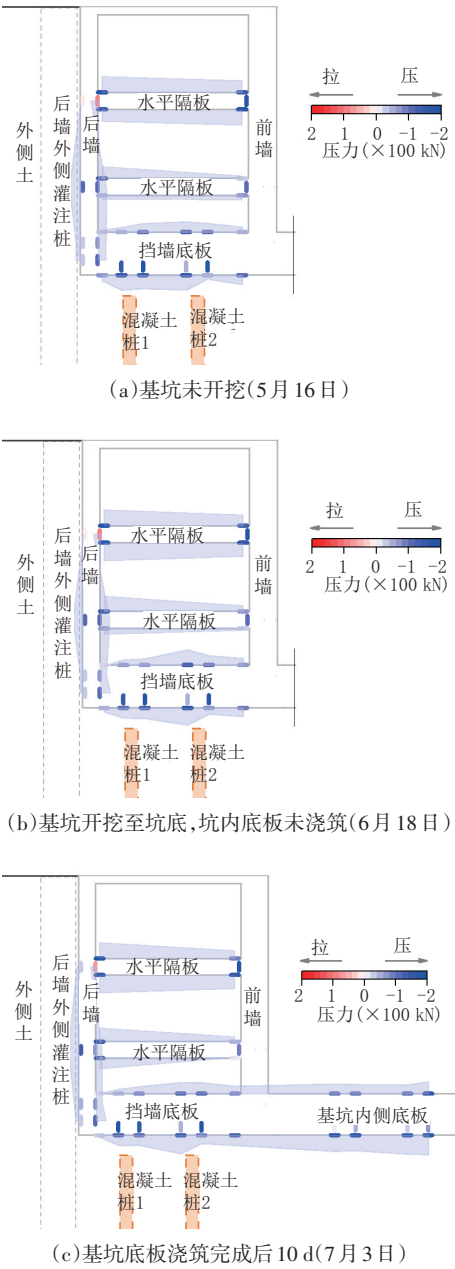


图3 东侧箱式挡墙受力分布图(单位: 10^2 kN)

压、挡墙中隔板力、挡墙内土压力、挡墙底板轴力、后墙剪力。选取两个工况:工况一,内坑开挖到底后厂区底板尚未浇筑;工况二,内坑开挖到底后厂区底板浇筑完成。对两个工况的监测数据进行整理分析,得到前后墙所承担的剪力 T_1 和 T_2 。具体结果见表1所示,表中挡墙底部摩阻力是根据挡墙整体受力平衡分析所得,即: $f = F - T_1 - T_2 - T_p - N$ 。

由表1可知,挡墙的抗滑力主要由前墙和后墙剪力提供,桩基抗剪基本未发挥,当厂区底板施工后,底板提供了部分抗滑力,相应挡墙底部的摩阻力减小,减小值接近底板提供的抗滑力。

进一步分析可知:

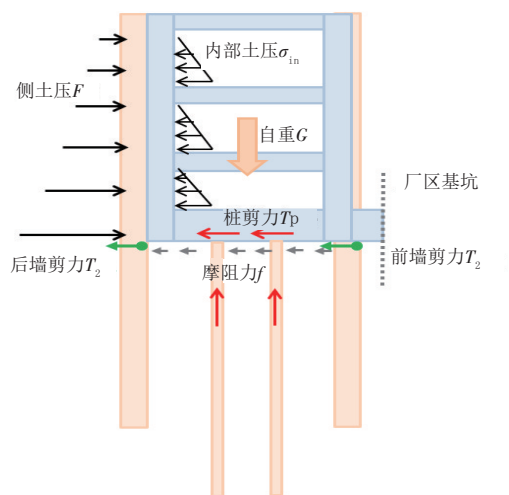


图4 箱式挡墙结构受力示意图

表1 不同工况下各构件所提供的抗滑力
(挡墙按每延米计)

		单位:kN					
项目		外侧土压力F	前墙剪力T ₁	后墙剪力T ₂	桩基剪力T _p	厂区底板压力N	挡墙底部摩阻力f
工况一	力值	644.25	304.98	180.92	30.05	0.00	128.30
	占比/%	100.00	47.34	28.08	4.66	0.00	19.91
工况二	力值	636.26	306.73	159.33	31.81	94.90	43.49
	占比/%	100.00	48.21	25.04	5.00	14.92	6.84

(1)根据计算对于配筋率不小于0.65%的灌注桩,单桩水平承载力特征值 $R_{ha}=414\text{ kN}$,根据监测值,桩基所受最大剪力为102 kN,仅发挥了约25%,安全余量充足;地墙坑底处抗剪强度791 kN/m,地墙坑底处所受最大剪力约310 kN/m,发挥了约40%,安全性可以保证。

(2)根据规范,并作以下假定:一是挡墙底部与地基之间的黏聚力 c 作为安全余量,不计入;二是挡墙底部与地基之间的摩擦角 $\varphi_0=20^\circ$;三是挡墙下的桩基和地墙不考虑承载受力,作为安全储备,计算所得挡墙与地基之间的摩阻力近975 kN/m,根据监测值计算所得摩阻力 f 最大为128.3 kN/m,仅发挥了13.2%,安全余量充足。

(3)根据监测值计算分析,每延米挡墙的倾覆力矩近3 500 kN·m/m,抗倾覆力矩为12 244 kN·m/m,抗倾覆稳定安全系数为3.45左右,满足规范^[4]要求($K_t\geq 1.5$)。

经上述分析,箱式挡墙结构的安全性可得到保证,且安全余量充足,可适当减小箱体的断面尺寸,以优化结构强度利用率,节约造价。

3 有限元数值仿真

3.1 计算模型

箱式挡墙二维有限元数值模型如图5所示。箱式挡墙顶面位于地坪标高以下1.0 m,地表均布荷载20 kN/m²。基坑开挖深度13.6 m,箱式挡墙高12.6 m,其中顶板、中下隔板和底板间距分别为4、4、3 m;坑内抗拔桩桩长33 m,桩间距平均3 m;箱式挡墙底板以下设有6 m厚加固区。

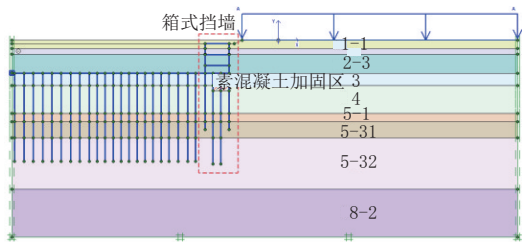


图5 箱式挡墙有限元模型

仿真模拟共设置7组工况,箱式挡墙宽度(前后墙中心间距,以下均简称宽度)分别为3.0、4.5、6.0、7.5、9.0、10.5、12.0 m,其中3 m宽箱体的下部只能容纳下一根桩,其他模型均两根桩,在结构宽度三等分处。

3.2 计算参数和步骤

根据工程的勘察报告,拟建场区地貌类型属于潮坪地貌,地坪标高+5.80 m,基坑降水,地下水位在坑底以下1.0 m,基坑东侧监测断面处的地层数据参见表2。有限元数值模拟中墙、板等构件的物理力学参数见如表3所示。数值模拟主要包括以下四个步骤:一是建立模型,划分网格,输入材料属性,建立边界条件,模型地应力平衡;二是激活基坑群桩、墙体,激活箱体回内填土和坑底加固土;三是分层开挖坑内土体直至坑底;四是数据分析。

3.3 计算结果与讨论

3.3.1 变形规律

不同箱体宽度时前、后墙变形曲线如图6所示,其中圆圈为实测测斜数据(箱体宽9.1 m)。数值模拟并未考虑箱式挡墙自身基坑的施工流程,因此,采用的对比测斜曲线为箱式挡墙内侧基坑开挖引起的测斜增量曲线。根据模拟结果,9 m宽箱体的前墙侧斜曲线与实测结果拟合较好,整体走势基本一致,后墙模拟所得变形趋势与实测情况吻合,但数值较实测值大。当结构宽度大于4.5 m时,前、后墙均向基坑内凸出,在坑底处水平位移最大;宽度小于4.5 m时,挡墙顶部变形较大,将坑底底板作为支撑点,挡

表 2 地层参数及对应地层灌注桩侧、端摩阻参数

编号	土层名称	厚度/m	重度/(kN·m ⁻³)	C'/kPa	φ'/(°)	E _{ref} /MPa	f _s /kPa	f _p /kPa	抗拔承载力系数λ
1-1	填土	3.2	18	10	10	25.8	15		0.65
1-3	冲填土	2	18.3	10	22.1	25.8	20		0.6
2-3	灰色砂质粉土	7.1	18.9	3.9	29.8	73	15		0.7
3	淤泥质粉质黏土	4.7	17.7	12.1	15.8	21.7	20		0.7
4	淤泥质黏土	10.5	17.1	12	13.1	16.8	30	300	0.7
5-1	灰色黏土	3.2	17.5	14.1	14.1	20.8	40	450	0.7
5-31	粉质黏土	6	17.9	15.2	19.5	43.6	45	750	0.65
5-32	砂质粉土	19.3	17.8	10.6	24.7	68.1	45	800	0.7
8-2	粉质砂土	17.7	17.9	9.5	26.2	39.6	60	1 300	0.7
0	素混凝土加固土	6	20	30	30	50			

表 3 墙、板构件参数

编号	结构名称	厚度/m	长/m	模量 E/GPa	泊松比μ
1	前墙(坑底以上)	0.95	11.0	30.0	0.2
2	前墙(坑底以下)	0.8	21.0	30.0	0.2
3	后墙	0.8	32.0	30.0	0.2
4	箱体顶板	0.4	w	30.0	0.2
5	箱体中层隔板	0.8	w	30.0	0.2
6	箱体下层隔板	0.8	w	30.0	0.2
7	箱体底板	2.0	w	30.0	0.2
8	抗拔群桩	0.866	33.0	30.0	0.2

注:w为箱式挡墙前后墙中心间距。

墙结构变形模式接近悬臂梁。

统计 7 组数值模拟结果中的侧土压力,桩顶的轴力、剪力,前(后)墙在坑底处轴力、剪力,底板摩阻力,地基反力等,详细数据见表 4。其中,模拟 4(前、后墙中心间距 7.5 m)与现场实际情况相似,故将表 4 模拟与图 6 中的数据进行对比分析,两者基本一致,

故数值模拟结果与实际情况能够匹配。

3.3.2 稳定性分析及优化方案

箱式挡墙稳定性分析包含抗滑移、抗倾覆稳定性分析和地基承载力验算。坑底以上的结构部分,抗滑移力由前、后墙坑底处剪力与桩顶剪力和底板下土摩阻力构成。根据表 4 结果计算得到 3 个主要因素的抗滑移力占比如图 7 所示。结果表明,抗滑移力中前墙剪力占比最高,超过 50%;箱体变宽,前、后墙坑底处剪力占比线性降低,而摩阻力和桩顶剪力比例增长,其中墙体剪力之和(前、后墙)的占比由 90%下降至 65%。当箱体宽度大于 6 m 时,抗滑移力主要由前墙承担,桩顶剪力次之;箱体宽度小于 6 m 时,抗滑移力主要由前、后墙承担。值得注意的是,数值模拟时箱式挡墙结构并未完全破坏,因此各抗力占比为实际抗力发挥程度的分析结果,而不是峰值强度的分析结果。

表 4 数值模拟部分结果表

项目	模拟 1	模拟 2	模拟 3	模拟 4	模拟 5	模拟 6	模拟 7
墙中心间距/ m	3.00	4.50	6.00	7.50	9.00	10.50	12.00
桩数/根	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
桩间距/m	1.50	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00
外侧土压/(kN·m ⁻¹)	410.63	477.47	525.22	555.37	579.51	612.60	629.53
前墙坑底处轴力/(kN·m ⁻¹)	1 116.81	1 222.75	1 210.87	1 191.45	1 180.36	1 183.52	1 176.75
前墙坑底处剪力/(kN·m ⁻¹)	228.23	281.73	289.05	287.87	294.50	273.87	262.60
后墙坑底处轴力/(kN·m ⁻¹)	-284.33	-183.75	-73.93	34.64	137.15	190.30	258.54
后墙坑底处剪力/(kN·m ⁻¹)	98.88	62.90	67.36	68.01	50.11	74.63	76.35
近坑桩顶轴力/(kN·m ⁻¹)	-75.31	-96.64	-99.87	-99.71	-99.15	-93.70	-87.77
近坑桩顶剪力/(kN·m ⁻¹)	18.82	40.28	50.77	58.68	64.11	68.64	69.23
远坑桩顶轴力/(kN·m ⁻¹)	-96.64	-67.65	-61.55	-55.50	-48.48	-43.72	-38.38
远坑桩顶剪力/(kN·m ⁻¹)	0.00	10.63	18.02	23.91	30.56	34.88	38.02
地基反力/(kN·m ⁻¹)	683.35	1 018.05	1 362.75	1 696.99	2 038.94	2 380.13	2 726.39
底板摩擦力/(kN·m ⁻¹)	23.97	32.77	44.21	56.46	70.31	86.25	102.07
自重/(kN·m ⁻¹)	1 102.36	1 513.06	1 923.76	2 334.46	2 745.16	3 155.86	3 566.56

注:负号表示结构受拉。

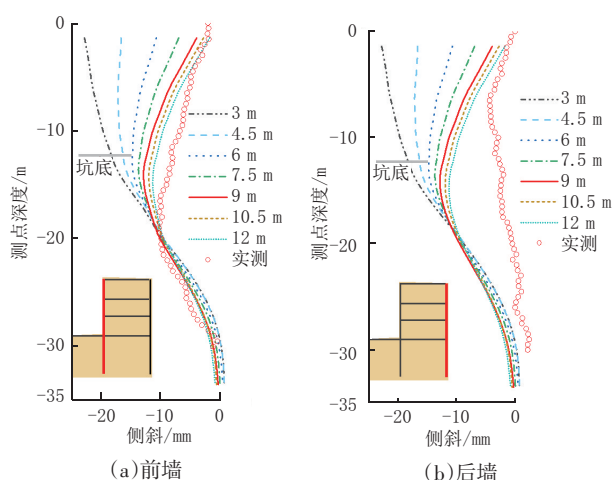


图6 测斜曲线模拟与实测值(单位:mm)

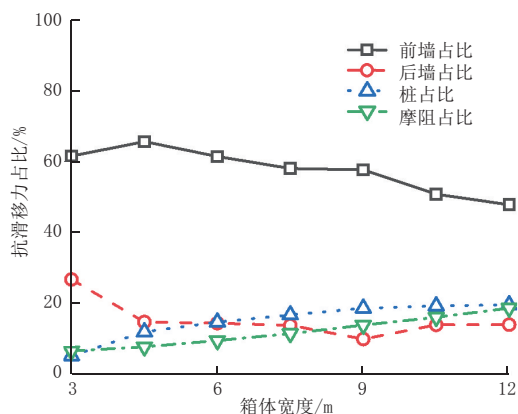


图7 抗滑移力各组分占比

对箱式挡墙结构进行抗倾覆稳定性分析,视挡墙近坑侧脚为倾覆转动圆心。此时,抗倾覆力由后墙轴向应力、结构自重和桩顶轴力组成,占比情况如图8所示。结果表明,抗倾覆力矩主要由结构自重产生的力矩承担;当箱体宽度小于7 m时,后墙受拉,也会产生抗倾覆力矩;桩顶虽然受拉力,但应力水平较低,对抗倾覆稳定性无明显影响。为充分利用结构自重,同时减少侧墙及桩基的拉应力,箱式挡墙宽度不宜小于6 m。

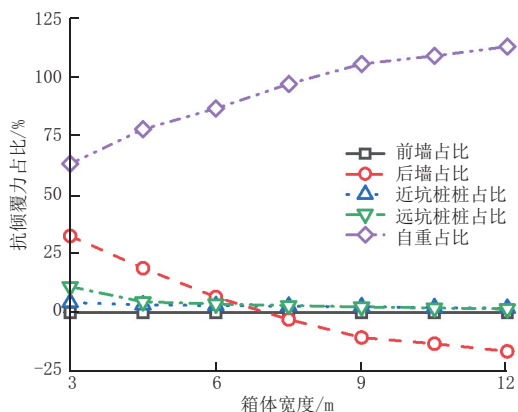


图8 抗倾覆力矩各组分占比

当挡墙底板以下所在土层的地基承载力不足时,可在挡墙底设置承载桩基。承载力由前后墙、桩基和地基土共同提供,各组占比如图9所示。可见,箱式挡墙结构的荷载主要由地基土和前墙承担,当结构宽度较窄时,桩顶、后墙均出现拉力,呈现抗拔,整体来看,箱式挡墙底板地基压力约为220 kPa,当坑底加固后可以满足承载力要求。根据侧斜及抗倾覆稳定性分析结果,箱式挡墙结构有向坑内倾斜的趋势,因此前墙受压力较大。

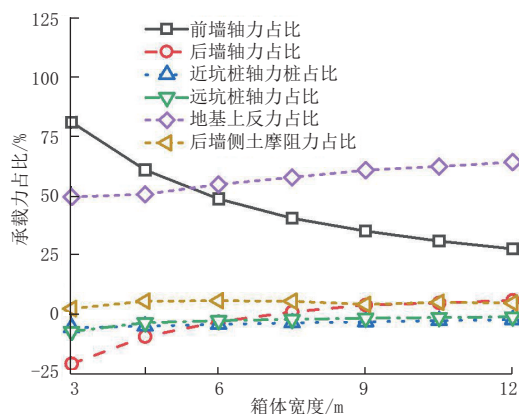


图9 承载力各组分占比

稳定性分析结果表明,对于常用宽度范围内的箱式挡墙,前、后墙和桩顶抗剪力对结构抗滑移稳定性贡献最大,结构自重和后墙轴向拉应力对抗倾覆稳定性贡献最大,地基反力和前墙轴力对承载力贡献最大。为了便于计算分析箱式挡墙结构的安全性,得到较为经济合适的箱式挡墙宽度,可将安全系数计算方式适当简化。

考虑不同挡墙构件对安全性的贡献度,将贡献率较低的部分视作安全储备,仅考虑贡献率高的构件并进行稳定性计算。简化计算公式忽略了部分构件的安全余量,故计算所得的安全系数要比按规范计算所得的小。具体如下。

(1)当箱体结构宽度适中时,抗滑移力可简化为每延米前墙坑底处抗剪承载力和桩顶抗剪承载力之和,即:

$$K_{\text{抗滑移}} = \frac{T_{\text{前墙}} + \sum T_{\text{桩}}}{\int \sigma \cdot dH} \quad (1)$$

式中: σ 为后墙外侧土压,kPa; dH 为地层厚度,m; T 为每延米抗剪承载力,kN/m。

(2)抗倾覆力矩可简化为每延米结构自重和后墙抗拉力力矩之和,即:

$$K_{\text{抗倾覆}} = \frac{G \frac{w}{2} + N_{\text{后墙}} w}{\int \sigma H \cdot dH} \quad (2)$$

式中: G 为结构自重, kN/m ; w 为结构宽度, m ; N 为抗拉承载力特征值, kN/m 。

(3)地基承载力可简化为每延米地基承载力和前墙坑底处抗压承载力之和,即:

$$K_{\text{承载力}} = \frac{N_{\text{前墙}} + f_a w}{G} \tag{3}$$

式中, N 为抗压承载力, kN/m ; f_a 为地基承载力特征值, kPa ;按规范考虑深度修正,不考虑宽度修正。

根据表 2 地层参数及桩端、摩阻力参数,和表 3 结构参数计算,可得地墙坑底处抗剪强度 791 kN/m ,抗压承载力特征值 959 kN/m 、抗拔承载力特征值 455 kN/m ;桩基桩顶抗剪强度 128 kN/m 。

图 10 为不同箱式挡墙宽度时结构的抗滑移、抗倾覆、承载力安全系数变化规律图。整体上,箱式挡墙结构的抗倾覆安全系数与结构宽度呈正相关,而抗滑移及承载力安全系数与宽度呈负相关。当宽度较大时,抗滑移安全系数会趋近于定值,但均大于 1;承载力安全系数会逐步降低至 1。由图可知,当箱式挡墙结构宽度约为 6.2 m 时,抗滑移、抗倾覆和承载力三项安全系数接近 1.5,满足规范要求;考虑到抗滑移和承载力两项安全系数计算时忽略了部分构件的贡献,故实际上图 10 中该两项安全系数曲线往上平移,综合可取箱式挡墙结构宽度为 $0.45H$ (H 为基坑深度 13.6 m),即 6.2 m 。可见,箱式挡墙结构宽度可适当优化至 0.45 倍基坑深度 ($0.45H$),即 6.2 m ,箱式挡墙各构件(墙体,隔板,底板)的承载力可以充分发挥,从抗滑移、抗倾覆和承载力等安全性方面考虑,既能满足规范要求,也提高了各构件的利用率,可以节约工期,具有较好的经济性。

4 结 语

本文对上海某污水处理厂下沉式厂区箱式挡墙支护结构的工作性状结构开展原位监测和有限元仿真分析,模拟分析不同宽度的箱式挡墙的抗滑移、抗倾覆稳定性并验算其承载能力,从安全性和经济性综合最优的角度对箱式挡墙结构进行优化,主要结论如下。

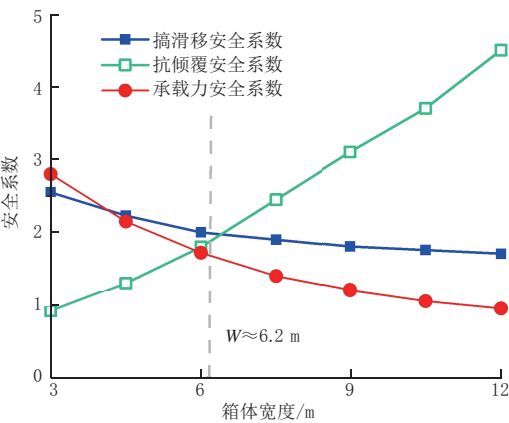


图 10 不同挡墙宽度时稳定安全系数变化趋势图

(1)箱式挡墙支护结构在软土地区深基坑工程中具有良好的应用前景,可实施无支撑开挖、便于施工,同时减少了废弃工程量,降低了碳排放。

(2)对于常用宽度范围的箱式挡墙 (3.0 、 4.5 、 6.0 、 7.5 、 9.0 、 10.5 、 12.0 m),前、后墙和桩顶抗剪力对结构抗滑移稳定性贡献最大,结构自重和后墙轴向拉应力对抗倾覆稳定性贡献最大,地基反力和前墙轴力对承载力贡献最大。

(3)箱式挡墙结构宽度取 0.45 倍基坑深度时,箱式挡墙各构件(墙体,隔板,底板)的承载力可以充分发挥,从抗滑移、抗倾覆和承载力等安全性方面考虑,既能满足规范要求,也提高了各构件的利用率,节约了工期,具有较好的经济性。

参考文献:

[1] 郑刚,朱合华,刘新荣,等.基坑工程与地下工程安全及环境影响控制[J].土木工程学报,2016(6):1-24.
[2] 郑刚,程雪松,刁钰.无支撑多级支护结构稳定性与破坏机理分析[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2013,46(4):304-314.
[3] 翁其平,王卫东.多级梯次联合支护体系在上海虹桥综合交通枢纽基坑工程中的设计与实践[J].建筑结构,2012,42(5):172-176.
[4] 郑刚.软土地区基坑工程变形控制方法及工程应用[J].岩土工程学报,2022,44(1):1-36.
[5] 汪金龙.考虑挡墙位移土压力分布规律及箱式挡墙稳定分析研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2010.
[6] 王颂.箱型重力式混凝土挡土墙优化设计研究[D].西安:长安大学,2012.
[7] SL 379—2007,水工挡土墙设计规范[S].