

肋式支护结构支护性能分析与位移预测

王彬铎¹, 张爱军¹, 付小蝶¹, 刘宏泰²

(1. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100; 2. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要: 肋式支护结构是由钢板桩和与钢板桩刚性连接的肋板组成的新型基坑支护结构, 已有工程案例证明其支护性能较好, 然而其支护机理尚缺乏深入研究及试验验证。运用有限元数值分析方法研究了肋式支护结构在基坑开挖过程中的变形和受力特征以及基坑的稳定性, 与实测数值进行了对比; 分析计算了不同肋板宽度和间距对结构水平位移和稳定性的影响规律, 提出了肋式支护结构最大水平位移预测公式, 可用来预估实际支护结构的可能位移值。研究表明: 对于同一个实例工程, 相较于传统钢板桩结构, 采用肋式支护结构时结构位移和内力显著减小, 在肋板宽度为 1.60 m、肋板间距为 0.80 m 时板桩最大水平位移可减小 71.56%, 板桩弯矩分布得以改变, 桩身弯矩大幅减小, 基坑稳定性更高; 增设肋板不仅使结构抗弯刚度大幅提高, 而且能够产生较大的锚固拉力来抵抗前排钢板桩所受的主动土压力。

关键词: 基坑支护; 肋式支护结构; 组合支护; 土体位移预测; 数值模拟; Plaxis 3D

中图分类号: TU753

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)02-0186-08

Analysis of support performance and deformation prediction of ribbed supporting structure

WANG Binhua¹, ZHANG Aijun¹, FU Xiaodie¹, LIU Hongtai²

(1. Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. China JIKAN Research Institute of Engineering Investigations & Design Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: Ribbed supporting structure is a new type of foundation pit supporting structure, which is composed of steel sheet piles and rib plates that rigidly connected with the piles. The existing engineering cases have proved that the supporting performance of the structure is satisfactory. However, the supporting mechanism of this structure is yet to be further investigated and proved by experiments. In the process of foundation pit excavation, the deformation and mechanical characteristics of the ribbed support structure and the stability of foundation pit are studied by finite element method, and the calculated results are compared with the measured values. Moreover, the influence of rib-width and rib-spacing on the horizontal displacement and stability of the structure is analyzed. According to the analysis, the maximum horizontal displacement prediction formula is proposed, which can predict the actual possible displacement of the support structure. The results showed that the displacement and internal force of the ribbed support structure are much smaller than those of the conventional support structure of steel sheet piles for the same project, for example, the maximum horizontal displacement of the sheet piles is decreased by 71.56% when the rib-width is 1.60 m and the rib-spacing is 0.80 m. In this case, the bending moment distribution of sheet piles is relocated, the bending moment of the sheet pile is greatly reduced, so the stability of the foundation pit is improved. Rib plates can not only greatly improve the bending stiffness of the structure, but also can produce a larger anchor tension for the structure to resist the soil pressure on the front row of steel sheet piles.

Key words: foundation pit supporting structure; ribbed supporting structure; combined supporting struc-

收稿日期: 2022-09-22; 修回日期: 2022-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978572); 2017年科技研发基金课题项目(CMEC)

作者简介: 王彬铎(1999—), 男, 四川泸州人, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程解析及数值分析。

通讯作者: 张爱军(1964—), 男, 山西阳高人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为特殊土土力学和岩土工程数值分析。

ture; soil displacement prediction; numerical simulation; Plaxis 3D software

1 研究背景

随着我国高层建筑和地下工程的大规模建设,出现了大量的基坑工程,基坑的安全和支护技术已成为重要的研究热点。基坑开挖形成的临空面会导致土体卸荷,破坏了其原有的应力平衡,从而造成较大的土体侧向位移,严重时可能导致滑坡甚至引起邻近建筑物的损坏,危及人民生命和财产安全^[1-5]。因此,有效控制基坑及其支护结构变形、确保基坑稳定、保证基坑及周围环境的安全、准确预测基坑开挖引起的土体和支护结构位移显得尤为重要^[6-8]。

目前基坑工程所采用的支护结构形式多样,通常可分为桩(墙)式支护体系和重力式支护体系两大类^[9],同时可分为挡土(挡水)及支撑拉结两部分^[10]。钢板桩支护由于施工简单而应用较广,但其本身柔性较大,当支撑或锚拉系统设置不当时会出现较大变形^[11]。对于不同地区的深基坑工程,单一的钢板桩支护形式很难满足复杂的基坑设计及施工要求,实践中为了减小和控制钢板桩支护结构的位移变形,提出了多种新型组合支护形式,张玉成等^[12]提出了双排桩支护结构,该结构克服了单排桩结构抗弯刚度小的缺点,且无需内撑,增加了施工工作面。焦卫峰^[13]提出在 Z 型钢板桩墙一侧设置 H 型钢板,构成 HZ 组合型钢板桩结构,提高了结构的整体刚度。郁雷^[14]将 H 型钢主桩和 U 形辅助钢板桩进行组合,提出了 HUC 组合型钢板桩结构,在考虑工程造价的基础上获得了更大的截面参数,提高了支护结构的刚度。Guo 等^[15]以大型沉管隧道工程为例,研究了双向腹板钢-混凝土-钢复合结构的抗剪强度。目前钢板桩组合支护的设计大多基于某一特定工程,侧重于满足该工程基坑的稳定性要求,尚未形成完整的设计方法,存在适用性低、设计尺寸难以灵活调整、重复利用率较小等缺点。因此,本文提出一种高适用性的肋式支护结构,通过数值模拟对其支护性能进行研究。

肋式支护结构^[16]由前排钢板桩墙和与之刚性连接的后排肋板组成,如图 1 所示。该结构通过联合支护作用来抵抗土压力,肋板的协同作用能够充分发挥结构周围土体的自稳性能,使支护体系具有更大的结构刚度,能够更有效地控制基坑变形。与现有钢板桩组合支护结构相比,肋式支护结构的板桩和肋板采用相同的 U 型截面形式,结构对称,生产难度小,在实际工程中方便重复利用,降低了加工

和使用成本,再者,肋板通过各构件两侧边缘处的锁口相互连接咬合组成,肋板宽度和间距能够根据不同工程的基坑情况和施工要求变化,增加了结构设计和施工的灵活性。

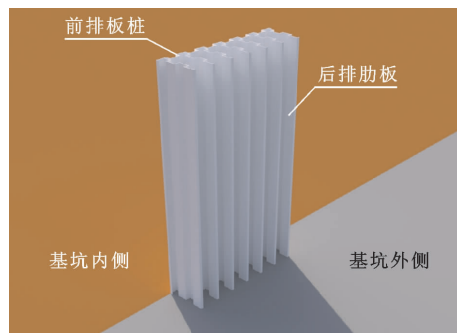


图 1 肋式支护结构示意图

本文利用有限元软件 Plaxis 3D 建立基坑模型,分析对比了基坑开挖过程中肋式支护结构和传统钢板桩支护结构的变形和受力特征等的变化规律,以及相应基坑的稳定性,在此基础上研究支护结构形式及尺寸对结构强度的影响规律,提出了适用于实际工程的肋式支护结构位移预测公式,研究成果将为基坑支护理论研究及工程应用提供参考。

2 肋式支护结构

2.1 肋式支护结构形式

肋式支护结构采用热轧钢板桩组合而成,热轧钢板桩具有高效、耐久、简捷、轻巧且密封渗透的极佳断面结构形状,具有满足工程结构需求、功能可靠、使用便利且安全环保等独特优势^[17],因此,肋式支护结构也同样具有以上优点。

肋式支护结构由前排钢板桩墙和与之刚性连接的后排肋板两部分组成。前排钢板桩墙通过钢板桩两侧边缘处的锁口相互连接咬合而成,后排肋板构件也由钢板桩扣合而成,但其前端与前排墙外侧钢板桩刚性焊接,实现了与前排墙的连接,肋式支护结构形式如图 2 所示。

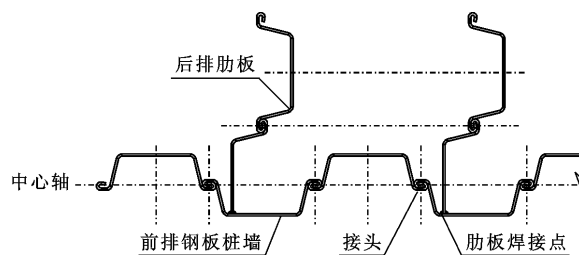


图 2 基坑肋式支护结构连接形式示意图

2.2 肋式支护结构作用机理

肋式支护结构是在单纯的钢板桩支护墙的外侧加装形式一致的肋板的一种支护形式,肋板将土体和支护结构连接成统一整体,能够有效增大支护结构的抗弯刚度。在基坑开挖过程中,肋板与钢板桩通过协同作用,改善板桩在悬臂状态下的受力情况,从而有效减小基坑和支护结构的变形。因此,肋式支护结构具有整体抗弯刚度大、侧向位移小、施工方便且速度快等优点。

肋式支护结构的受力变化过程为:随着基坑逐层向下开挖,基坑两侧土体会失去原来土体的支撑而产生卸荷,基坑内部土体的竖向和水平卸荷作用使支护结构受力不平衡,坑外土体挤压支护结构使其发生指向基坑内部的位移和变形^[18-19]。对于肋式支护结构而言,在这个过程中,前排钢板桩、肋板以及肋间土体形成了一个整体抗弯结构来阻止这种变形,其中,肋板的空间效应使肋间土体挤压产生反作用力,该作用力通过肋板以拉应力的形式传递给前排钢板桩;前排钢板桩受主动土压力和肋板传递的拉应力作用,而拉应力可以抵消一部分主动土压力,同时,肋板也增大了前排钢板桩的抗弯刚度,这两者的共同作用使得其整体稳定性更强。

2.3 肋式支护结构抗弯刚度

肋式支护结构在设计时应该重点关注板桩结构的弯曲变形。抗弯刚度是物体抵抗弯曲变形的能力,目前的钢板桩设计中采用截面抗弯强度来衡量钢板桩的变形性能,因此截面抗弯刚度成为钢板桩支护结构和肋式支护结构的主要刚度控制因素。

肋式支护结构板桩墙通过两侧边缘处的锁口相互连接咬合而成,锁口间剪力传递状态按照桩与桩间锁口的相互作用分为零剪力传递状态、剪力完全传递状态和部分剪力传递状态,肋式支护结构处于剪力完全传递状态下的弯曲力学性能最佳^[20]。本文的研究对象为剪力完全传递状态下的肋式支护结构,即支护结构的板桩和肋板锁口连接处不产生相对滑移,处于完全剪力状态。

肋式支护结构加装锚固肋板后,结构中心轴位置发生了变化,且肋板结构在受到外侧土压力时也随前排钢板桩共同参与抵抗受弯,在假设整体肋式支护体系不破坏的前提下,其抗弯刚度大大提升。下面根据材料力学公式对肋式支护结构的抗弯刚度 K 进行计算^[21]:

$$K = EI_x \quad (1)$$

式中: K 为抗弯刚度, $\text{kN} \cdot \text{m}^2$; E 为弹性模量, MPa ;

I_x 为截面惯性矩, m^4 。

选取肋板宽度为 0.80 m ,肋板间距为 0.80 m 的肋式支护结构进行计算。假设整体结构的中心轴仍然位于板桩的中心,将锚固肋板部分抵抗弯曲变形的能力贡献给前排板桩结构,沿长度方向平均分配,计算简化模型如图3所示。

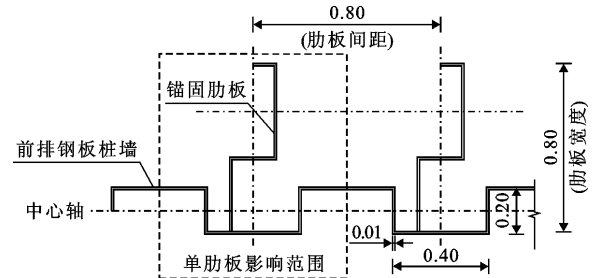


图3 肋式支护结构抗弯刚度简化计算模型(单位:m)

计算得出:板桩结构完全剪力状态时每延米理想桩墙截面惯性矩为 $I_x = 11803.2\text{ cm}^4$,每延米钢板桩截面抗弯刚度为 $K_0 = 247867.2\text{ kN} \cdot \text{m}^2$;加装锚固肋板后,肋式支护结构完全剪力状态时每延米理想桩墙截面惯性矩为 $I_x = 238889.7\text{ cm}^4$,每延米钢板桩截面抗弯刚度为 $K_0 = 5016683.7\text{ kN} \cdot \text{m}^2$ 。由以上计算结果可知,相较于传统钢板桩支护结构,肋板宽度为 0.80 m ,肋板间距为 0.80 m 的肋式支护结构抗弯刚度增大了 19.24 倍,抵抗弯曲变形的能力大幅提升。

3 数值模拟与验证

3.1 工程实例

本文的计算实例为河北省秦皇岛市污水提升泵站基坑工程^[22]。该工程位于北戴河A4路以北,场地平坦。基坑开挖几何形状长度为 12.00 m ,宽度为 5.50 m ,开挖深度为 10.09 m 。基坑安全等级为II级,采用钢板桩支护设计方案。

开挖现场的地质条件可以简化为砂土和粉质黏土的交替水平层以及上覆的填土层,开挖基坑及其地层分布剖面图如图4所示。

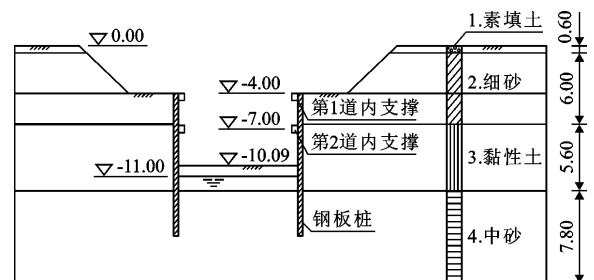


图4 实例工程开挖基坑及其地层分布剖面图(单位:m)

支护结构包括钢板桩和钢内支撑,钢板桩底部埋深为 16.60 m,共设置 2 道内支撑,第 1 道内支撑设置在 -4.00 m 位置,第 2 道内支撑设置在 -7.00 m 位置,内支撑平面图见图 5。泵站建设采用自上而下的方法,基坑施工顺序包括多阶段开挖和支护结构安装。

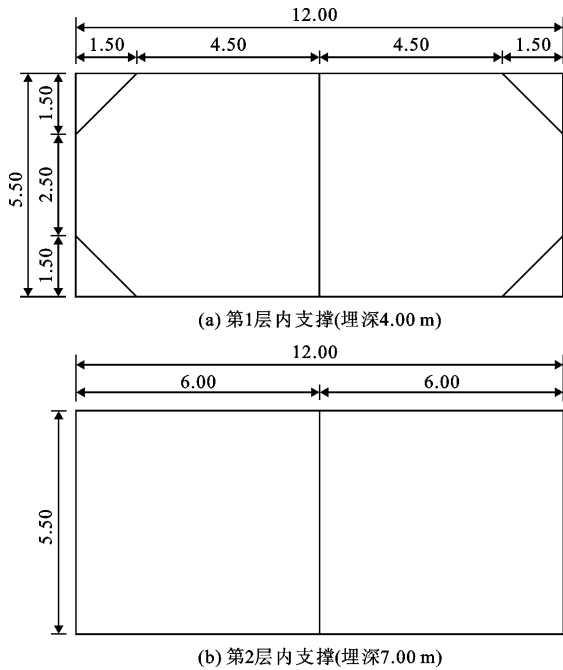


图 5 实例工程基坑支护结构内支撑平面图(单位:m)

3.2 数值模型及模拟方法

3.2.1 几何模型 使用有限元软件 Plaxis 3D 对该泵站基坑的开挖进行分析,以基坑为中心建立如图 6 所示的三维模型。为消除模型边界效应,模型边界与钢板桩的水平距离取约 3 倍基坑垂直开挖深

度,为 20.00 m。几何模型总尺寸为 52.00 m × 45.50 m × 20.00 m (x-y-z 轴)。模型底面设置固定约束,模型侧面设置法向约束。基坑每一步开挖前,开挖面以下的地下水水位均设置排水措施,基坑外部地下水水位保持不变。

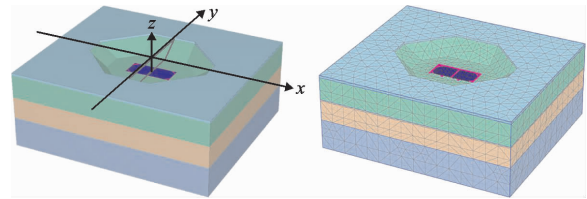


图 6 基坑有限元数值分析模型

3.2.2 场地土体模拟 采用土体硬化小变形模型(HSS)来模拟场地土体。HSS 模型是以 HS(Hong and Stein)模型为基础,考虑应变历史影响并结合修正的 Hardin - Drnevich^[23]剪切模量关系式提出的一种能反映土体小应变特征的本构模型^[24],该模型能够更合理地模拟卸荷条件下围护结构的形变及坑外土体的位移^[25]。

土体的计算参数均应通过试验确定,缺乏试验数据时,也可以根据勘察报告中提供的土体压缩模量结合相关经验关系进行估算,参考文献[17]确定的土层计算参数如表 1 所示。

3.2.3 支护结构模拟 采用板单元和梁单元模拟支护结构,结构单元均假定为线弹性材料,各支护结构的单元类型、几何尺寸及相关参数如表 2 所示。由于支护结构与周围土体刚度差异较大,沿板单元创建了零厚度界面单元,以模拟结构-土壤相互作用,界面的强度折减系数 Rinter 取值为 0.6。

表 1 基坑场地土层相关计算参数

模型参数	素填土	细砂	黏性土	中砂
重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	18	18.5	19.6	19.5
割线刚度 $E_{50}^{\text{ref}}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	6000	12880	6800	22000
切线刚度 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	6000	12880	6800	22000
卸载重加载刚度 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	30000	38640	34000	88000
幂指数 m	0.65	0.5	0.5	0.5
卸载重加载泊松比 ν_{ur}	0.33	0.33	0.33	0.33
参考围压 $p^{\text{ref}}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	100	100	100	100
有效黏聚力 $c'_{\text{ref}}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	5	0	22.3	1
有效摩擦角 $\varphi'/(^{\circ})$	25	28	26.8	32
剪切应变水平 $\gamma_{0.7}$	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001
初始小应变模量 $G_0^{\text{ref}}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	60000	77280	68000	132000

表2 基坑支护结构相关计算参数

结构	单元	材料性质	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	规格
钢板桩	板	线弹性	78	200	0.2	12 m × 5.5 m
围檩	梁	线弹性	78	200	0.2	双拼 H 型钢
钢支撑	梁	线弹性	78	200	0.2	0.4 m × 0.4 m
肋板	板	线弹性	78	200	0.2	0.4 m × 0.1 m

3.2.4 施工过程模拟 设定5组共14种计算工况,如表3所示。组号1~4的计算工况旨在研究后排肋板宽度和间距对肋式支护体系支护效果的影响,组号5为对比计算工况,研究支护类型对支护体系支护效果的影响。

表3 基坑支护结构模型计算工况

工况编号		肋板设置	
组号	序号	宽度/m	间距/m
1	1	1.6	0.8
	2		1.6
	3		2.4
	4		0.8
2	5	1.2	1.6
	6		2.4
	7		0.8
3	8	0.8	1.6
	9		2.4
	10		0.8
4	11	0.4	1.6
	12		2.4
5	13	钢板桩(无肋板)	
	14	钢板桩(有内支撑)	

根据该泵站基坑的实际施工过程,建立了11个模拟步骤:(1)生成初始应力场;(2)放坡开挖4.00 m;(3)钢板桩(及肋板)施工;(4)坑内降水至-4.50 m;(5)基坑垂直开挖至4.50 m深度;(6)第1层内支撑施工;(7)坑内降水至-7.50 m;(8)基坑垂直开挖至7.50 m深度;(9)第2层内支撑施工;(10)坑内降水至-10.09 m;(11)基坑垂直开挖至10.09 m深度。

为了研究基坑开挖对基坑和周围环境的影响,消除了土层固结沉降引起的变形。开挖现场的初始地下水水位为-4.00 m,随着基坑的逐步开挖,坑内地下水水位同步下降。由于钢板桩止水性能良好,且场地土层渗透性差,因而设置坑外地下水位保持不变。

3.3 数值模型验证

为验证本文中有限元模型对钢板桩支护下的基坑开挖卸荷作用模拟的准确性,将基坑工程实际监测数据与数值模型模拟结果进行了比较。图7为计算工况14的有限元模拟与实际工程中基坑开挖至10.09 m深度时监测的钢板桩桩身水平位移随深度的变化曲线对比。由图7可见,有限元模拟得到的钢板桩桩身水平位移与实际监测值总体分布基本一致,由于内支撑提供的强大侧向约束,第1和第2道内支撑处的桩身水平位移在数值上存在一定差异,而在内支撑影响范围外,有限元模拟结果与实际监测结果趋于一致,说明本文采用的数值模拟方法能够很好地模拟钢板桩支护结构的位移。

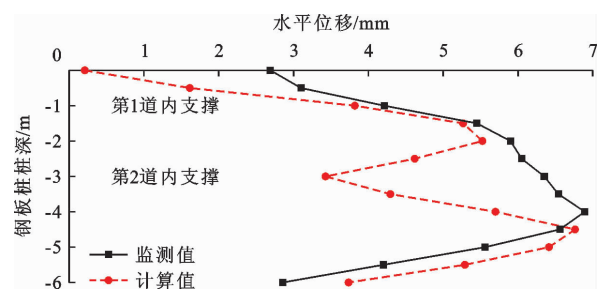


图7 钢板桩支护水平位移数值模拟与实际监测结果对比

4 结果与分析

4.1 基坑的水平位移

分别在钢板桩和肋板宽度1.60 m、肋板间距0.80 m的肋式支护作用下,开挖至10.09 m深度时的基坑周围土体水平位移云图如图8所示。受基坑开挖卸载及周边自重压力的影响,基坑周围土体的水平位移指向基坑内侧,水平位移的大小反映了基坑周围土体向内侧移动的程度,可以用来判断基坑稳定性和支护结构的支护效应。由图8可以看出,钢板桩支护与肋式支护作用下的基坑周围土体水平位移分布不同,肋式支护作用下的土体水平位移等值线分布更均匀,且数值大幅减小,钢板桩支护作用下的土体水平位移极值为23.88 mm,而肋式支护作用下的土体水平位移极值为6.90 mm,减小了

71.11%,其余区域的土体水平位移数值也相应减小,说明基坑周围土体的水平位移主要由支护结构的强度和刚度控制,肋式支护结构对于基坑开挖引起的土体侧向变形有良好的控制作用。

4.2 基坑的竖向位移

与水平位移相同的计算工况下,两种支护的基坑周围土体竖向位移云图如图 9 所示。由图 9 可以看出,钢板桩和肋式支护作用下基坑周围土体的竖向位移大致表现为:基坑放坡开挖段的坑顶土体竖向位移指向下侧,表现为较小的沉降变形;基坑放坡开挖段的坑底土体竖向位移指向上侧,表现为较大的隆起变形;基坑垂直开挖段的坑底土体竖向位移指向上侧,表现为较小的隆起变形。这是因为基坑

开挖破坏了区域原土体的应力平衡状态,再加上周边土体的自重压力,使放坡开挖段的坑底土体出现较大的回弹变形。由于基坑排水能够显著抑制基坑底部土体回弹,使垂直开挖段的坑底土体位移大幅减小,出现较小的隆起变形。肋式支护作用下的基坑垂直开挖段的坑外土体隆起幅度大于钢板桩作用下的基坑,这是因为肋式支护的肋板发挥了桩-土协同作用,在抵抗水平位移的同时也增大了竖向变形作用,因此在实际工程中,应该对肋式支护基坑的坑外隆起进行重点监测和控制。

4.3 支护结构板桩水平位移

基坑开挖至 10.09 m 深度时,不同计算工况支护结构板桩的水平位移随深度的变化曲线见图 10。

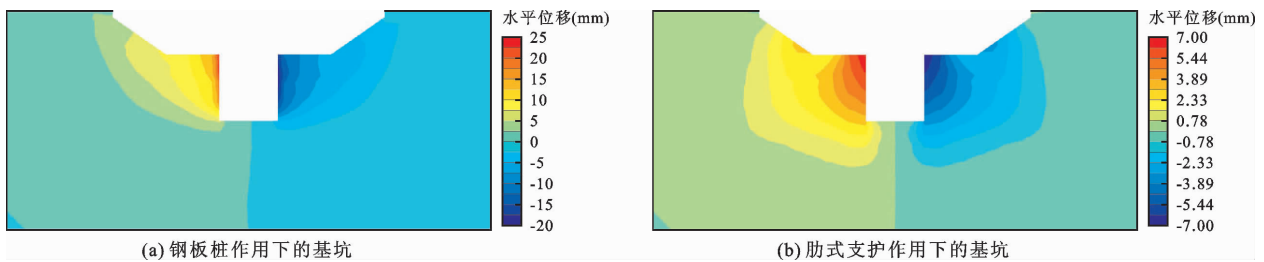


图 8 基坑开挖至 10.09 m 深度时两种支护作用下的土体水平位移云图

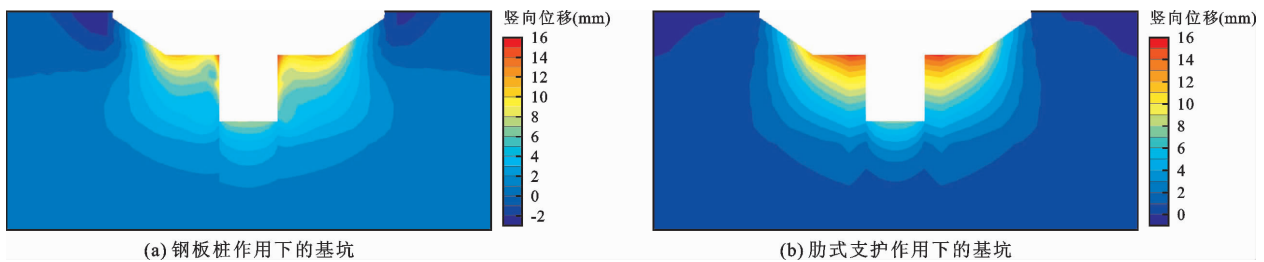


图 9 基坑开挖至 10.09 m 深度时两种支护作用下的土体竖向位移云图

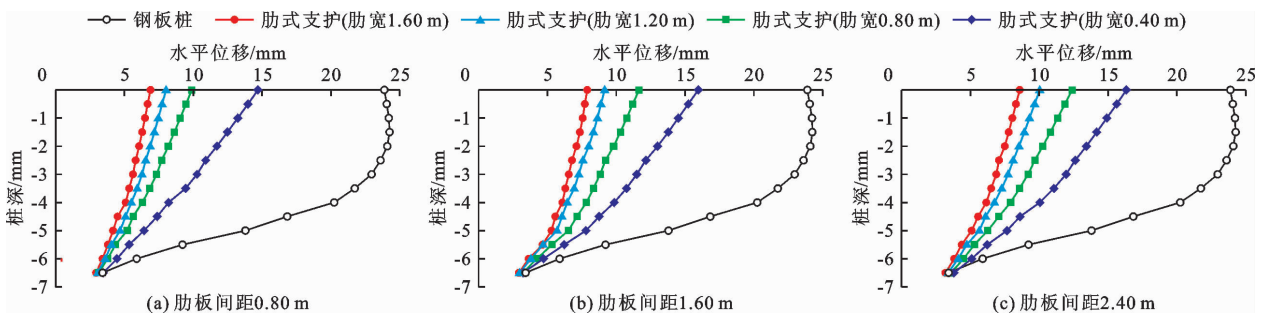


图 10 基坑开挖至 10.09 m 深度时不同计算工况板桩水平位移随桩深的变化曲线

如图 10 所示,受基坑开挖的卸荷作用影响,钢板桩和肋式支护的板桩均出现向基坑方向的“悬臂式”变形,相同开挖深度时,肋式支护的板桩水平位移小于钢板桩,且板桩水平位移分布曲线相较钢板桩结构更为平滑,说明肋式支护结构整体性更好。加装肋板结构后,板桩顶部位移显著减小,如肋板宽

度为 1.60 m、肋板间距为 0.80 m 的肋式支护结构板桩顶部位移比钢板桩结构减小了 71.56%。受放坡开挖和垂直开挖的竖向和水平卸荷作用影响,传统钢板桩最大水平位移出现在基坑顶部下方 1.50 m 处,肋式支护板桩最大水平位移出现在基坑顶部。随着肋板宽度的增大和肋板间距的减小,板桩

最大水平位移减小,抵抗弯曲变形的能力增大,支护结构抵抗卸荷作用的能力增强,基坑土体的承载力提高。这是由于在一定范围内,肋板宽度越大或肋板间距越小,肋式支护结构相对于钢板桩支护结构的每延米惯性矩增加值越大,抗弯刚度增加值也越大,结构抵抗水平方向弯曲变形的能力也越大。

4.4 支护结构板桩弯矩

钢板桩和肋板宽度为 1.60 m、肋板间距为 0.80 m 的肋式支护作用下,基坑开挖至 10.09 m 深度时的板桩整体弯矩云图如图 11 所示。

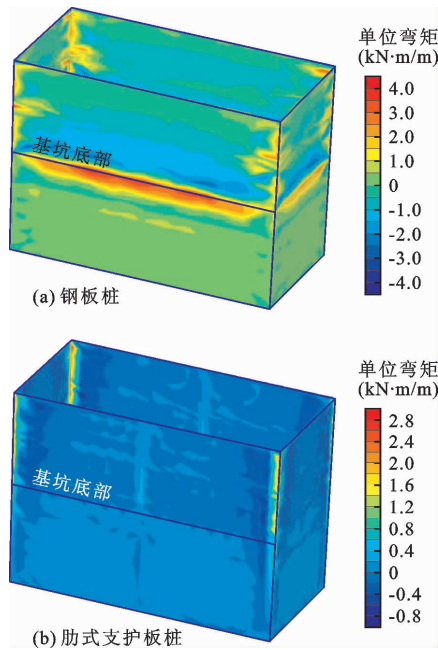


图 11 基坑开挖至 10.09 m 深度时两种支护结构板桩的弯矩云图

由图 11 可以看到,传统钢板桩的弯矩分布较为均匀,在板桩端部位置出现反向弯矩,体现了板桩间互相约束的三维效应;桩身弯矩集中在基坑底部,在基坑底部位置出现反向弯矩,说明计算的钢板桩桩身弯矩符合工程实际。肋式支护结构的弯矩分布均匀,在板桩端部位置出现反向弯矩,桩身弯矩没有明显的反弯线。肋式支护的板桩弯矩极值相比钢板桩降低了 40.59%;板桩桩身范围内弯矩显著减小,近似为 0。

4.5 肋式支护结构板桩侧向位移预测公式

肋式支护结构是一种柔性支护结构,在设计时应该重点关注板桩的弯曲变形和水平位移大小,将本文实例工程基坑模型计算结果进行拟合,可以得出在 12.00 m 开挖宽度、10.09 m 开挖深度条件下考虑肋板宽度和间距的肋式支护板桩水平位移计算

公式。通过分析,不同肋板宽度下板桩最大水平位移可采用对数模型拟合,拟合曲线如图 12 所示,拟合计算公式为:

$$\delta_{h \max} = a \ln B + b \quad (2)$$

式中: $\delta_{h \max}$ 为板桩最大水平位移,mm; B 为肋式支护结构的肋板宽度,m; a 、 b 为拟合参数。

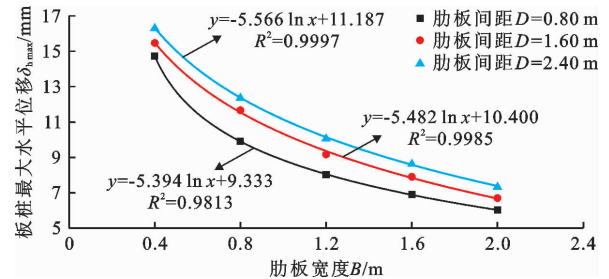


图 12 肋式支护结构板桩最大水平位移 - 肋板宽度关系拟合曲线

将拟合参数 a 、 b 分别与肋板间距 D 采用线性模型进行拟合,两者的拟合优度 R^2 均大于 0.97,即拟合参数 a 、 b 与肋板间距 D 之间近似呈线性关系,采用线性模型拟合效果较好。再将拟合参数 $a = cD + d$ 、 $b = nD + m$ 代入公式(2)中得到考虑肋板宽度和间距的板桩最大水平位移拟合计算公式为:

$$\delta_{h \max} = (c \cdot D + d) \ln B + n \cdot D + m \quad (3)$$

式中: D 为肋板间距,m; $c = -0.1075$; $d = -5.3087$; $n = 1.1589$; $m = 8.4896$ 。

采用公式(3)绘制板桩最大水平位移拟合曲线如图 13 所示。

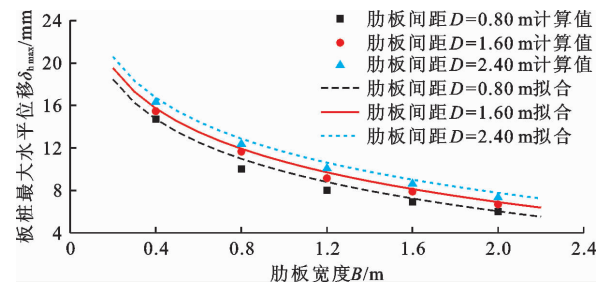


图 13 考虑肋式支护结构肋板宽度和间距的板桩最大水平位移拟合曲线

图 13 表明,公式(3)的拟合结果与实际计算结果的差值均在 1 mm 以内,拟合效果较好,充分证明了公式(3)可以很好地拟合肋式支护结构不同肋板宽度和间距尺寸下的板桩最大侧向位移。在实际工程中,可以根据肋式支护设计尺寸来计算或预测支护结构的可能位移值;也可以根据工程的基坑侧向位移限值,计算肋式支护结构肋板的设计宽度和间距,确定肋式支护结构的设计参数。

5 讨论

大量的理论研究和工程实践证明,在钢板桩墙外侧加装锚拉式结构可以增大支护结构的截面抗弯刚度,提高结构的整体稳定性^[14,26]。肋式支护结构将前排板桩与后部的肋板焊接,较锚拉式结构整体性更强。加装肋板结构后,支护结构截面抗弯刚度显著增大,在基坑开挖过程中,前排钢板桩、肋板以及肋间土体形成整体抗弯结构,基坑稳定性得到显著提升。肋式支护结构具有与锚拉式支护结构相同的原理和与组合支护结构相同的优点,其结构紧凑,施工速度快,可以在基坑开挖前施工完成,具有较多的优点。

肋式支护结构的肋板在基坑外部设置,因而需要占用基坑外部一定宽度的空间,但肋板宽度一般在0.40~1.60 m之间,可以满足一般情况下基坑与已有建筑物之间的间距要求,对于基坑边缘与相邻的已有建筑物间距极小的工程,需要选用其他形式的支护结构。

肋式支护结构非常适合线性基坑支护工程,如综合管廊基坑、箱涵或者管道开挖基坑等,对于较深的基坑,若配合顶部横撑结构和腰撑结构效果更好。

6 结论

肋式支护是一种新型的基坑支护结构,本文应用有限元软件 Plaxis 3D 建立了 14 种计算工况的基坑数值模型,对比了模型板桩的位移和受力分布情况以及相应基坑的稳定性,分析了肋板宽度和间距对肋式支护结构强度的影响,得出以下结论:

(1) 基坑开挖过程中,肋式支护结构的前排钢板桩、肋板以及肋间土体形成了一个整体抗弯结构。肋板起到了锚杆的作用,其空间效应使肋间土体挤压产生反作用力,该作用力通过肋板以拉应力的形式传递给前排钢板桩,抵消了一部分主动土压力,增强了结构的整体稳定性。

(2) 肋式支护结构在加装肋板后,抗弯刚度大幅提升,如在肋板宽度为 0.80 m、肋板间距为 0.80 m 时,其结构抗弯刚度比传统钢板桩支护结构增大 19.24 倍。

(3) 肋式支护形式与传统钢板桩支护相比,板桩水平位移和弯矩均明显减小且分布得到优化,在肋板宽度为 1.60 m、肋板间距为 0.80 m 时,板桩最大水平位移可减小 71.56%。说明在传统支护结构上加装肋板能够有效提升支护结构的整体刚度和稳

定性,显著增强支护性能。

(4) 通过计算分析得出了考虑肋板宽度和间距的肋式支护结构最大水平位移的预测公式,可根据肋式支护结构的设计尺寸来预估支护结构的可能水平位移值。

参考文献:

- [1] GU Xin, CHEN Fuyong, ZHANG Wengang, et al. Numerical investigation of pile responses induced by adjacent tunnel excavation in spatially variable clays[J]. *Underground Space*, 2022, 7(5): 911-927.
- [2] LI Yongqin, ZHANG Wengang, ZHANG Runhong. Numerical investigation on performance of braced excavation considering soil stress-induced anisotropy [J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 17: 563-575.
- [3] 王立新,王强,李炳龙,等. 基坑卸载对临近地铁车站影响的数值模拟研究[J/OL]. *西安理工大学学报*, 2021, (2022-06-14) [2022-11-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20220610.1404.002.html>
- [4] 董利虎,宋丹青,唐高杰,等. 超大深基坑开挖对周围环境变形影响及对策分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(1): 199-205+224.
- [5] 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+201.
- [6] 闫芙蓉,岳小丹,胡雪源,等. 考虑土体卸荷力学特性的基坑变形分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(2): 554-561.
- [7] 冯志,沈正龙,孟庆亮,等. 泵站深基坑支护结构的离心模型试验研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(4): 183-188.
- [8] 余莉,张钰,王维玉,等. 基坑装配式可回收支护和桩锚支护结构的受力与变形分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(6): 1789-1800.
- [9] 甄精莲,段仲源,贾瑞晨. 深基坑支护技术综述[J]. *工业建筑*, 2006(S1): 691-694+713.
- [10] 李钟. 深基坑支护技术现状及发展趋势(一)[J]. *岩土工程界*, 2001(1): 42-45.
- [11] 陶莉. 基坑支护方案优选研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007.
- [12] 张玉成,杨光华,姜燕,等. 软土地区双排钢板桩围堰支护结构的应用及探讨[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(S1): 659-665.
- [13] 焦卫峰. 曹妃甸煤码头“HZ”组合型钢板桩沉桩施工工艺[J]. *水运工程*, 2008(6): 137-140.
- [14] 郁雷. HUC 组合钢板桩新工艺在某地下综合管廊施工中的应用[J]. *施工技术*, 2014, 43(17): 33-35+76.

(下转第 201 页)

- [13] 骆旭锋. 砂土和粘土直剪试验的颗粒流数值模拟与湿颗粒吸力研究[D]. 南宁:广西大学,2019.
- [14] 叶功勤,曹函,高强,等. 颗粒对比对岩石力学特征影响的数值模拟研究[J]. 地质力学学报,2019,25(6):1129-1137.
- [15] 孙闯,敖云鹤,张家鸣,等. 花岗岩细观破裂特征及宏观尺度效应的颗粒流研究[J]. 岩土工程学报,2020,42(9):1687-1695.
- [16] 丛宇,王在泉,郑颖人,等. 基于颗粒流原理的岩石类材料细观参数的试验研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(6):1031-1040.
- [17] 张志华,张国栋,李泯蒂,等. 颗粒流模型中细观参数对粗粒土宏观力学特性的影响分析[J]. 水利学报,2014,45(S2):215-220.
- [18] 尹成薇,梁冰,姜利国. 基于颗粒流方法的砂土宏-细观参数关系分析[J]. 煤炭学报,2011,36(S2):264-267.
- [19] 董建鹏,李辉. 黄土颗粒流宏细观对应关系与参数标定方法研究[J]. 水利水电技术(中英文),2022,53(4):180-191.
- [20] 周杰. 模型维数对岩土离散元试验影响的宏-微观研究[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(1):84-88+97.
- [21] 吴旭阳,徐峰,任明洋,等. 基于轴向压裂法的重塑黄土抗拉试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(S2):747-751+778.
- [22] 吴旭阳. 黄土拉、压异性及冻融过程对边坡剥落病害的影响研究[D]. 兰州:中国科学院大学(兰州),2018.
- [23] 尹思雨. 基于轴向压裂试验重塑黄土抗拉强影响因素与破坏模式研究[D]. 西安:西安科技大学,2021.
- [24] WU Xuyang, NIU Fujun, LIANG Qingguo, et al. Study on tensile strength and tensile-shear coupling mechanism of loess around Lanzhou and Yanan City in China by unconfined penetration test[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23: 2471-2482.
- [25] 许江波,曹宝花,余洋林,等. 基于PFC3D的黄土三轴试验细观参数敏感性分析[J]. 工程地质学报,2021,29(5):1342-1353.

(上接第193页)

- [15] GUO Yutao, TAO Muxuan, NIE Xin, et al. Experimental and theoretical studies on the shear resistance of steel-concrete-steel composite structures with bidirectional steel webs[J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(10): 2-5.
- [16] 张爱军. 膨胀土地区综合管廊基坑支护新技术研究结论报告[R]. 西安:机械工业勘察设计研究院有限公司,2020.
- [17] 麦桂林. U型钢板桩墙抗弯刚度试验研究与数值分析[D]. 广州:华南理工大学,2018.
- [18] 李广信. 基坑支护结构上水土压力的分算与合算[J]. 岩土工程学报,2000,22(3):348-352.
- [19] 刘维宁,张弥,华成. 开挖作用对基坑周围地层工程性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(1):60-64.
- [20] 游锦坚. U型钢板桩弯曲力学特性试验研究[D]. 广州:华南理工大学,2020.
- [21] 刘磊. U型组合钢板桩抗弯性能试验研究[D]. 广州:华南理工大学,2019.
- [22] 刘德用. 深基坑钢板桩支护体系力学特征研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2021.
- [23] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1972, 98(7): 667-692.
- [24] 邵羽,江杰,陈俊羽,等. 基于HSS模型与MCC模型的深基坑降水开挖变形分析[J]. 水利学报,2015,46(S1):231-235.
- [25] 徐中华,王卫东. 敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J]. 岩土力学,2010,31(1):258-264+326.
- [26] 赵志孟,郑伟锋. HUC组合钢板桩的受力性能分析[J]. 施工技术,2017,46(S2):270-274.