

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.06.073

# 排桩内支撑支护结构深基坑冠梁侧压力分布分析

魏星<sup>1</sup>, 甘肃<sup>2</sup>

(1.中交第二航务工程勘察设计院有限公司,湖北 武汉 430060; 2.中国市政工程中南设计研究总院有限公司,湖北 武汉 430010)

**摘要:**冠梁在侧压力作用下,基坑支护结构将产生不同于刚性挡墙的水平位移,特别是在有支撑的基坑,将产生拱现象,引起土压力重新分布,因此传统设计中采用的矩形均布荷载分布形式不符合工程实际情况。结合武汉市某深基坑排桩内支撑支护工程现场监测数据与现象,总结出内支撑系统的冠梁位移变化规律;利用ANSYS有限元软件,运用平面整体分析法对内支撑平面框架进行数值模拟计算,计算时考虑了位移对土压力分布的影响。结合现场监测数据和现象,得出结论:采用梯形分布形式对支撑系统进行设计相对合理,而采用传统矩形分布形式进行设计偏于不安全,采用三角形分布形式进行设计则偏于保守。

**关键词:**冠梁;重新分布;数值模拟;分布形式

**中图分类号:** TU94+2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2024)06-0308-06

## 0 引言

冠梁在侧压力作用下,基坑支护结构将产生不同于刚性挡墙的水平位移,特别是在有支撑的基坑,将产生拱现象,引起土压力重新分布<sup>[1-3]</sup>。排桩内支撑结构中不同部位冠梁的支撑情况不同,导致不同部位冠梁产生的位移也不相同,应考虑到位移对冠梁外侧实际侧压力分布的影响。如果排桩作用于冠梁上的荷载仍采用均布荷载,就无法体现出支护结构与支撑体系之间的相互作用<sup>[4-8]</sup>。

本文在假设同一侧冠梁所受总压力相等的基础上,考虑位移对冠梁侧压力分布的影响。首先选取多种荷载分布形式分别作用于冠梁外侧,采用有限元软件ANSYS来分析内支撑体系的内力和变形规律,然后与工程实际监测数据进行对比,以此来寻求接近工程实际的荷载分布形式。

## 1 工程基本状况及监测数据

### 1.1 工程基本状况

武汉市某深基坑工程,其形状近似为150 m × 129 m的矩形,占地面积约19 350 m<sup>2</sup>。该项目地下室形状近似矩形,基坑四周开挖深度为-12.70~

-13.20 m,基坑中部主楼位置的最大开挖深度为-20.20 m,中部呈阶梯式下降。基坑周长为568 m,基坑面积为20 000 m<sup>2</sup>。根据基坑的形状和开挖深度,本工程选取排桩内支撑支护结构,又根据基坑施工工期及相关场地情况进一步选择桁架式大角撑支护,且在基坑长边两侧中间采用双排桩支护,以便作为运输通道。基坑平面布置图见图1。

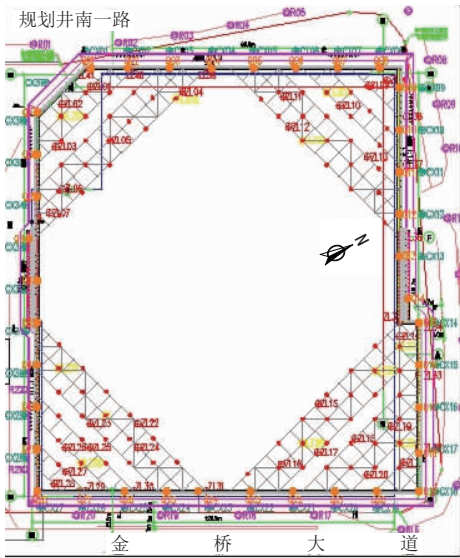


图1 基坑平面布置图

### 1.2 监测数据及分析

冠梁上监测点T1#(短边冠梁跨中部位)、T2#(长边冠梁跨中部位)、T3#(靠坑角部位)的位移图见图2。

由图2可知,冠梁的水平位移随着基坑的不断开挖而逐渐增大,且3个测点都在5月15日前后达到

收稿日期: 2023-06-04

作者简介: 魏星(1991—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计与研究工作。

通信作者: 甘肃(1991—),男,硕士,工程师,从事结构及岩土设计与研究工作。电子信箱: 891547107@qq.com

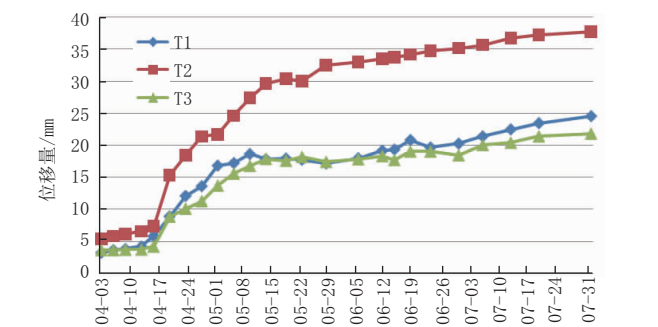


图 2 T1#、T2#、T3# 测点的位移

较大值。通过查看施工日志可知,基坑于 5 月 10 日开挖到底,此后 1 周内未进行施工,基坑处于暴露状态。在这段时间内冠梁又出现了较大的位移增量,不过随着基础结构的施工进展而逐渐稳定。因此,在基坑施工过程中应尽量缩短暴露时间。另外,位于长边冠梁跨中部位的 T2# 测点最大位移量达到了 37.67 mm,位于靠坑角部位的 T1# 测点最大位移量为 24.48 mm。由此可知,在本工程中,基坑冠梁跨中部位的位移量大于冠梁角部的位移量,总体呈现“中间大,两头小”的分布规律,最大水平位移量应出现在冠梁跨中部位附近<sup>[9]</sup>。

在本基坑支护结构设计中,设计方采用框架法对平面内支撑框架进行设计,即把水平支撑系统从排桩内支撑体系中隔离出来,将排桩传至水平支撑作用点处的荷载作为作用在水平支撑周围(冠梁)的均布荷载,然后人为添加一定的约束,使其成为静定或超静定结构,再进行内支撑框架的计算。该设计是在假设冠梁上的作用力均匀分布的情况下进行的,事实上,由于基坑的空间效应,冠梁各处的位移值并不相等,导致排桩在基坑不同平面位置作用在水平支撑(冠梁)上的力也不相等,呈现“中间大、两端小”的分布形式。

在该工程实例中,当基坑开挖至坑底时,混凝土内支撑与冠梁交接处普遍出现了裂缝。特别值得一提的是,在基坑东西两侧冠梁跨中及冠梁与内支撑交接处出现了较大的裂缝,具体表现为钢筋外露,出现了明显的破坏迹象。虽经及时采取加固措施,保证了基坑开挖的安全实施,但东西两侧冠梁跨中均出现了明显破坏现象,表明设计、施工对基坑所受压力估计不足,假设冠梁上的作用力为均匀分布是偏于不安全的。

2 问题分析

2.1 荷载分布形式

本文利用 ANSYS 有限元软件施加单位力求得

结构刚度,然后运用天汉桩墙撑锚软件进行基坑支护计算<sup>[10-15]</sup>,求得支撑的水平荷载为 252 kN/m。现将支撑的水平荷载按总压力相等的原则分别以下列 3 种荷载分布形式施加在冠梁上,采用有限元软件 ANSYS 求得支撑系统的变形和内力,然后与现场监测数据和现场现象进行对比分析,最终确定符合工程实际的荷载分布形式。本文采用的 3 种荷载分布形式见图 3~5,图中  $q$  为荷载。

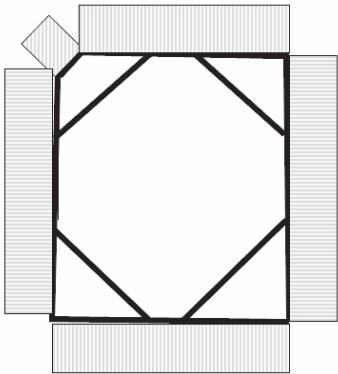


图 3 荷载分布形式一(矩形分布)

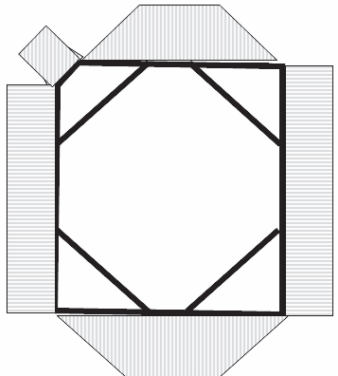


图 4 荷载分布形式二(梯形分布)

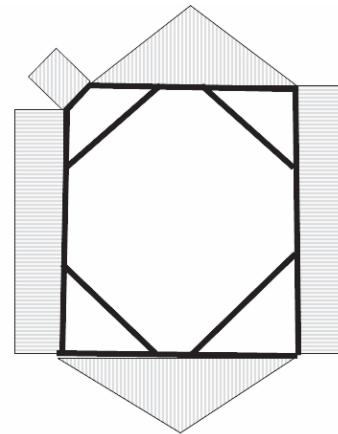


图 5 荷载分布形式三(三角形分布)

本文按总压力相等的原则选用的 3 种荷载分布形式,即矩形、梯形和三角形三者面积相等,其中矩形的高为支撑的水平荷载值 252 kN/m,梯形的高为 340 kN/m,三角形的高为 504 kN/m。

2.2 数值模拟分析与对比

2.2.1 荷载分布形式一分析

将图 3 所示的荷载施加在冠梁外侧,采用有限元软件 ANSYS 求得支撑系统的变形和内力,见图 6~9。

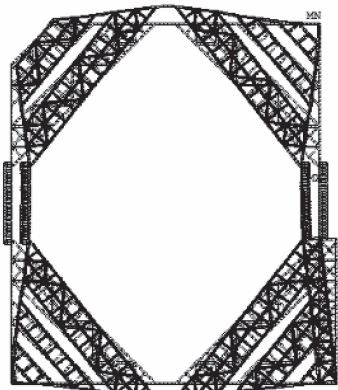


图 6 荷载分布形式一作用下的支撑系统变形图

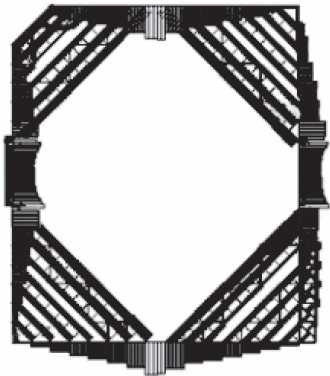


图 7 荷载分布形式一作用下的支撑系统轴力图

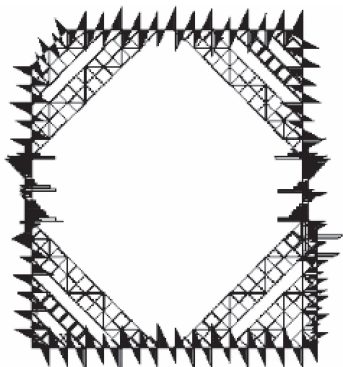


图 8 荷载分布形式一作用下的支撑系统剪力图

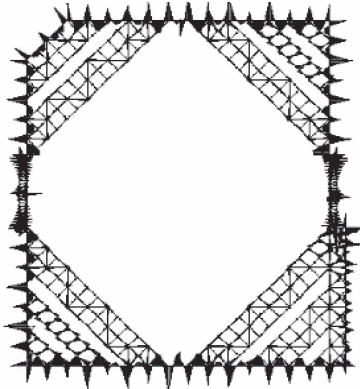


图 9 荷载分布形式一作用下的支撑系统弯矩图

由图 6 可知,支撑系统东西两侧冠梁出现了较大的反向位移。由相关文献可知,在没有严重不均衡不对称的情况下,冠梁一般不应出现反向位移<sup>[9]</sup>,且现场监测结果也表明基坑东西两侧冠梁向坑内移动,并未出现反向位移。因此,数值模拟结果与现场监测结果存在较大差异。

由图 7~9 可以看出,支撑系统中所有的支撑杆件所受剪力、弯矩都非常小,其中大部分杆件所受轴力也较小,仅东北处角撑所受轴力达到 5 640 kN。冠梁所受轴力呈“两端小,中间大”的分布形式,最大值出现在东西两侧冠梁跨中附近的截面,其值达到 18 800 kN;而冠梁上所受剪力和弯矩较为均匀,其最大值均出现在东西两侧冠梁跨中与角支撑交接处,其值分别为 2 120 kN、3 210 kN·m。

2.2.2 荷载分布形式二分析

将图 4 所示的荷载施加在冠梁外侧,采用有限元软件 ANSYS 求得支撑系统的变形和内力,见图 10~13。

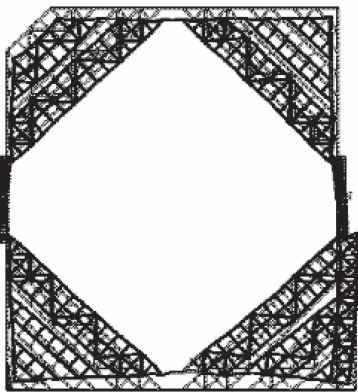


图 10 荷载分布形式二作用下的支撑系统变形图

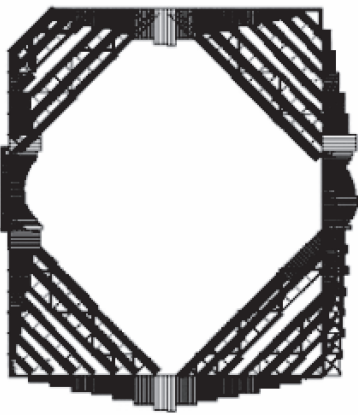


图 11 荷载分布形式二作用下的支撑系统轴力图

由图 10 可知:支撑系统东西两侧冠梁向坑内移动,总体呈现“中间大,两端小”的分布形式,位移最大值出现在东西侧冠梁跨中位置,大小为 41.99 mm;而通过冠梁水平位移监测数据发现,基

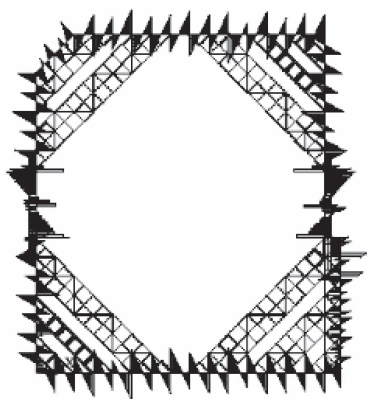


图 12 荷载分布形式二作用下的支撑系统剪力图

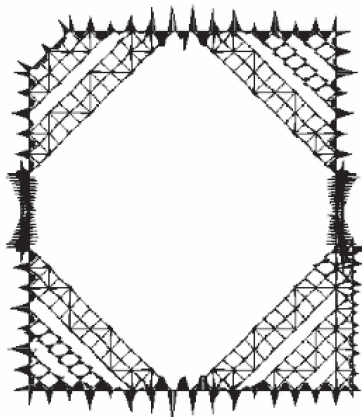


图 13 荷载分布形式二作用下的支撑系统弯矩图

坑东西侧冠梁整体向坑内移动,且冠梁中部的位移量大于角部位移量,东侧冠梁跨中位置附近监测点T2#的位移量为+37.67 mm(+表示向坑内移动)。由此可知,数值模拟结果与现场监测结果比较接近,在一定程度上验证了设计预测的准确性。

由图 11~13 可以看出,支撑系统中所有的支撑杆件所受剪力、弯矩都非常小,其中大部分杆件所受轴力也较小,仅东北处角撑所受轴力达到了 7 860 kN。冠梁所受轴力呈现“两端小,中间大”的分布形式,最大值出现在东西两侧冠梁跨中附近的截面,其值达到 20 400 kN;而冠梁上所受剪力和弯矩较为均匀,其最大值均出现在东西两侧冠梁跨中与角支撑交接处,其值分别为 2 240 kN、3 680 kN·m。

### 2.2.3 荷载分布形式三分析

将图 5 所示的荷载施加在冠梁外侧,采用有限元软件 ANSYS 求得支撑系统的变形和内力,见图 14~17。

由图 14 可知,支撑系统东西两侧冠梁向坑内移动,总体呈现“中间大,两端小”的分布形式,位移最大值出现在东西侧冠梁跨中位置,大小为 52.97 mm;而通过冠梁水平位移监测数据发现,虽冠梁总体变形的区域相近,但东西侧冠梁跨中的数值模拟结果

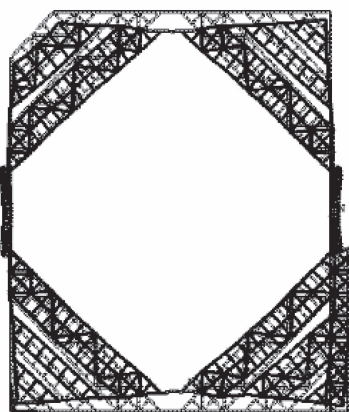


图 14 荷载分布形式三作用下的支撑系统变形图

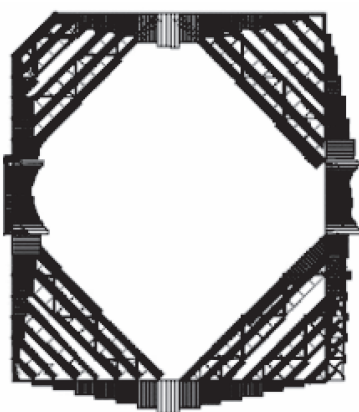


图 15 荷载分布形式三作用下的支撑系统轴力图

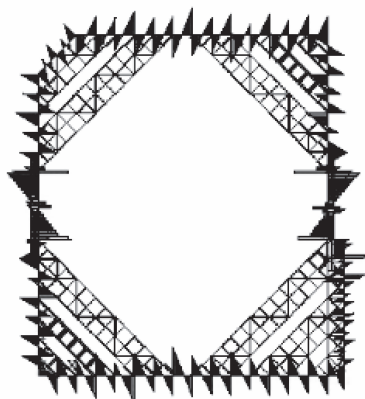


图 16 荷载分布形式三作用下的支撑系统剪力图

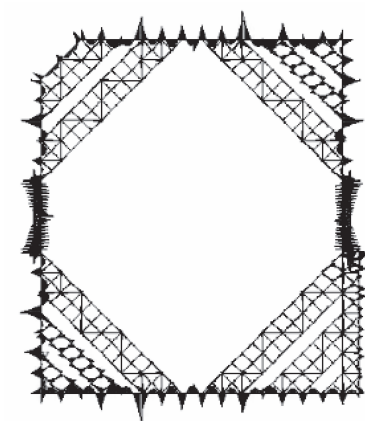


图 17 荷载分布形式三作用下的支撑系统弯矩图

远大于现场监测值(37.67 mm)。

由图 15~17 可以看出,支撑系统中所有的支撑杆件所受剪力、弯矩都非常小,其中大部分杆件所受轴力也较小,仅东北处角撑所受轴力达到了 8 030 kN。冠梁所受轴力呈现“两端小,中间大”的分布形式,最大值出现在东西两侧冠梁跨中附近的截面,其值达到 21 200 kN;冠梁上所受剪力较为均匀,其最大值出现在东西侧冠梁跨中与角支撑交接处,其值为 2 380 kN;冠梁上所受弯矩分布不均匀,冠梁约 1/3 跨处出现弯矩最大值 5 750 kN·m,东西侧冠梁跨中位置弯矩值也达到 4 470 kN·m。

2.3 不同荷载分布形式作用下计算结果对比与分析

通过分析对比上述 3 种荷载分布形式下的内力图可以看出,在各种荷载形式作用下,支撑系统所受轴力和剪力相差不大,而弯矩变化较大。下面选取 3 个控制截面进行分析。

3 种荷载分布形式下,支撑系统控制截面的内力见表 1,支撑系统不同截面的内力设计值见表 2。

表 1 3 种荷载分布形式下支撑系统控制截面的内力

| 荷载分布形式         | 截面位置      | 轴力 /kN | 剪力 /kN | 弯矩 /(kN·m) |
|----------------|-----------|--------|--------|------------|
| 形式一<br>(矩形分布)  | 冠梁跨中      | 18 800 | 2 120  | 3 210      |
|                | 冠梁 1/3 跨处 | 11 200 | 1 890  | 2 730      |
|                | 角支撑       | 5 640  | 410    | 620        |
| 形式二<br>(梯形分布)  | 冠梁跨中      | 20 400 | 2 240  | 3 680      |
|                | 冠梁 1/3 跨处 | 13 400 | 2 030  | 3 250      |
|                | 角支撑       | 7 860  | 490    | 730        |
| 形式三<br>(三角形分布) | 冠梁跨中      | 21 200 | 2 380  | 4 460      |
|                | 冠梁 1/3 跨处 | 14 200 | 2 170  | 5 750      |
|                | 角支撑       | 8 030  | 530    | 810        |

表 2 支撑系统不同截面的内力设计值

| 截面位置 | 轴力 /kN | 剪力 /kN | 弯矩 /(kN·m) |
|------|--------|--------|------------|
| 冠梁   | 21 800 | 2 458  | 2 340      |
| 角支撑  | 9 860  | 730    | 650        |

由表 1、表 2 可知,支撑系统各截面所受剪力都小于相应截面的抗剪承载力,所以下面仅分析各截面在轴力和弯矩作用下的效应。根据上述分析可得,荷载分布形式一、荷载分布形式二作用下冠梁的最不利截面为跨中截面;荷载分布形式三作用下冠梁的最不利截面可能为跨中截面或 1/3 跨处截面。

下面对 4 种最不利情况进行分析。

偏心受压构件的  $M-N$  相关曲线见图 18。图 18 中:点 A、B、C 处分别表示在荷载分布形式一、二、三作用下冠梁跨中截面的内力组合值,点 D 处表示在

荷载分布形式三作用下冠梁 1/3 跨处截面的内力组合值; $M_b$ 、 $N_b$  分别为此处截面在纯受弯和纯受压作用下达到的破坏的最大值。

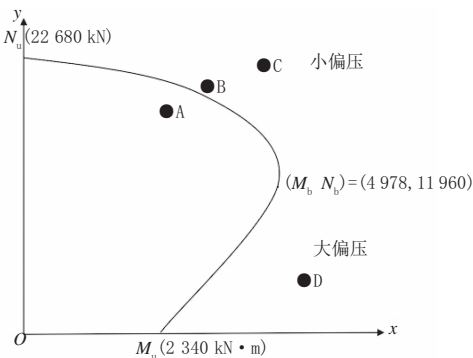


图 18 偏心受压构件的  $M-N$  相关曲线

由图 18 可知,以荷载分布形式一作用在支撑系统上时,最不利位置处(冠梁跨中)处于安全状态;以荷载分布形式二作用在支撑系统上时,最不利位置处(冠梁跨中)处于破坏的临界位置附近,可能发生破坏;以荷载分布形式三作用在支撑系统上时,冠梁跨中和 1/3 跨处发生破坏。

在本工程实例的施工过程中,东西两侧冠梁跨中位置及跨中与角支撑交界处产生了不同程度的破坏,经施工方采用钢板加固处理后基坑处于正常使用状态,基坑施工顺利往下开展。

本工程实际由设计单位取基坑平面框架的 1/4 结构并按荷载分布形式一进行设计。由图 18 可以看出,在荷载分布形式一作用下,最不利截面处于安全状态,但实际施工过程中却发生了破坏,由此可以得出冠梁外侧实际侧压力分布形式并不是常规的矩形分布(荷载分布形式一),而且按荷载分布形式一对支撑系统进行设计是偏于不安全的。

由图 18 还可知,点 C、D 位于安全区域外,表明在荷载分布形式三作用下,跨中和 1/3 跨处截面均发生了破坏,与基坑实际施工过程中发生的现象不相符。所以冠梁外侧侧压力分布形式也不是三角形分布(荷载分布形式三)。

由于点 B 处于临界位置附近,该截面可能发生破坏。而基坑实际施工过程中,西侧跨中与角支撑交界处、东侧跨中均出现了不同程度的破坏,后经加固得到缓解,没有发生进一步的破坏。所以冠梁上侧压力的分布形式可能为荷载分布形式二(梯形分布),按荷载分布形式二对内支撑系统进行设计是相对合理的。

3 结 语

(1) 基坑冠梁跨中部位的位移量大于冠梁角部

的位移量,总体呈现“中间大,两头小”的分布规律,最大水平位移量应出现在冠梁跨中部位附近。这主要是由于冠梁和角撑对排桩桩顶位移具有明显的限制作用。

(2)采用平面整体分析法,对内支撑平面框架进行数值模拟计算,并通过改变冠梁上的荷载分布形式,对不同荷载分布形式作用下的计算结果进行对比分析,再结合现场监测数据和现象,探索冠梁外侧实际的侧压力分布形式。通过 ANSYS 有限元软件对武汉市某基坑支撑系统的平面支撑框架进行数值模拟计算,对比分析了 3 种荷载分布形式作用下支撑系统的变形和内力,同时结合现场监测数据与现象,得出采用梯形分布形式对支撑系统进行设计相对合理,而采用矩形分布形式进行设计偏于不安全,采用三角形分布形式进行设计则偏于保守。

参考文献:

[1] 丁翠红.深基坑支护结构上的土压力分布问题研究现状探讨[J].浙江工业大学学报,2009(1):64-68.  
[2] 黄院雄,刘国彬,侯学渊.软土有支护深基坑主动土压力研究[J].地下工程与隧道,2000(3):7-11.  
[3] 陈书申.经典土压力理论的局限与小变位土压力计算的建议[J].土

工基础,1997,11(2):15-21.  
[4] 陆培毅.基坑支护结构的空间分析[J].岩土力学,2004,25(1):121-124.  
[5] 徐日庆.考虑位移和时间的土压力计算方法[J].浙江大学学报(工学版),2000,34(4):370-375.  
[6] 梅国雄,宰金珉.考虑位移影响的土压力近似计算方法[J].岩土力学,2001,22(1):83-85.  
[7] 杨光华.深基坑开挖中多支撑支护结构的土压力问题[J].岩土工程学报,1998,20(6):113-115.  
[8] 俞建霖,龚晓南.深基坑工程的空间性状分析[J].岩土工程学报,1999,21(1):21-25.  
[9] 何昌荣,陈群,富海鹰.两种支挡结构的实测和计算土压力[J].岩土工程学报,2000,22(1):55-60.  
[10] 赵春.深基坑工程的有限元分析及变形预警值的研究[D].南京:南京航空航天大学,2012.  
[11] 刘畅.基坑支护体系空间分析与可视化程序设计[D].天津:天津大学,2000.  
[12] 宋克选.排桩内支撑联合土钉支护体系的数值模拟[D].郑州:郑州大学,2010.  
[13] 施晋.基于 ANSYS 多支点排桩围护结构的计算模拟[D].合肥:合肥工业大学,2006.  
[14] 王英豪.复杂边界条件下多体结构的瞬态热分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.  
[15] 杨振钧.深基坑平面支撑框架等效刚度的研究和计算[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.

(上接第 303 页)

程为 500 mm,单次的下滑高度为 2 800 mm,总共循环次数为 6 次。

锁定就位:支撑模块下放至规定标高,操作穿心千斤顶的上锚固和下锚固紧。

6 结 语

依靠智能同步穿心千斤顶,该工程在 17 min 内安全、顺利完成了快速支撑的同步滑降;滑降完成后支撑吊点的高差小于 5 cm,快速支撑的倾斜角小于 1%,满足滑降支撑的施工要求。

实践证明,穿心千斤顶整体滑降技术的应用保障了快速支撑的质量和安

全,为快速支撑在地铁基

参考文献:

[1] 成雯桢.滑降式快速预支撑体系设计在深基坑工程中的应用[J].建筑科技,2022(6):78-82.  
[2] 张伟泉.滑降式快速预支撑体系在超深基坑中的应用研究[J].城市道桥与防洪,2022(10):158-161,169.  
[3] 许方方,张文,刘军廷,等.穿心式千斤顶吊放桥梁大底模平台的施工技术[J].建筑施工,2019,41(3):421-423.  
[4] 李孟辉,张申,於波.穿心千斤顶在钢梁架设中的应用[J].云南科技管理,2018,31(5):38-40.  
[5] 杨婧文.穿心千斤顶整体提升技术在钢管桁架整体吊装中的应用[J].节能,2017,36(7):77-80.