

文章编号: 1007-2993(2024)06-0655-07

# 深基坑大冠梁设计与变形监测分析

吕志刚 黄俊 杨剑维 王燕燕

(广东省城乡规划设计研究院科技股份有限公司, 广东广州 510220)

**【摘要】** 对于“支护桩+内支撑”基坑支护型式,为减少或避免使用边桁架撑及斜抛撑体系,提出一种通过增大冠梁截面来扩大主支撑间距的设计方法。对大冠梁设计进行基础理论研究,结合工程案例,应用理正深基坑设计软件及 MIDAS/GTS 有限元软件进行计算分析。结果表明,大冠梁设计可有效控制基坑变形。结合实际监测数据对比分析验证了大冠梁设计的可行性和可靠性,采用该种支护方案既能保证基坑自身安全,也能确保周边既有建筑物的正常使用。同时,支撑间距加大便于土方和地下结构施工,可缩短项目工期并降低工程成本,具有工程应用价值。

**【关键词】** 深基坑; 大冠梁; 支撑间距

**【中图分类号】** TU473

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.06.004

## Design and Deformation Monitoring Analysis of Large Crown Beam in Deep Foundation Pit

Lyu Zhigang Huang Jun Yang Jianwei Wang Yanyan

(Guangdong Urban & Rural Planning and Design Institute Technology Group Co., Ltd., Guangzhou 510220, Guangdong, China)

**【Abstract】** For pile+internal support, to reduce or avoid the use of side truss bracing and inclined bracing systems, a method of increasing the crown beam section was proposed to expand the main support spacing. This method can control the deformation of the foundation pit and ensure the safety and stability of the foundation pit. Based on the basic theory research of the design of the large crown beam, combined with the engineering case, the Lizheng software and MIDAS/GTS finite element software were used for calculation and analysis. The results indicate that the design of the large crown beam can effectively control the deformation of the foundation pit. By comparing and analyzing actual monitoring data, the feasibility and reliability of the design of the large crown beam have been verified. Adopting this support scheme can not only ensure the safety of the foundation pit itself but also ensure the normal use of surrounding buildings. Increasing the spacing between supports for earthwork and underground structure construction can shorten the project duration and reduce engineering costs, which has engineering application value.

**【Key words】** deep foundation pit; large crown beam; support spacing

### 0 引言

对于“支护桩+内支撑”基坑支护体系,当基坑存在单边开口时,对撑无法布设,若长边跨中部位支点间距太大(>15 m),常规设计会考虑采用边桁架或斜抛撑的支撑体系来解决对撑无法布设的难题。然而,边桁架方案支撑量相对较大,内支撑施工及拆除难度大,成本高,且后期拆撑需要先进行换撑施工;斜抛撑方案基坑开挖需要预留反压土台,土方需要二次开挖转运,基坑边底板需要分块浇筑,结构侧壁需要预留洞口确保斜抛撑穿越,且后期拆撑需要先进行换撑施

工。总之,边桁架或斜抛撑方案均存在施工繁琐,成本较高的问题。

为避免使用边桁架或斜抛撑复杂支撑体系,研究如何加大支撑间距也能保证基坑安全稳定,具有一定工程价值。对此学者开展了系列研究,许绮炎<sup>[1]</sup>通过将鱼腹梁结构简化成一次超静定的张弦梁结构,推导得出了鱼腹梁结构受力变形的解析解;胡廖琪<sup>[2]</sup>在  $p-y$  曲线基础推导了预应力鱼腹梁钢支撑体系的综合刚度建议值;毕平等<sup>[3]</sup>研究了鱼腹曲线模型、钢绞线数量、端部角度及跨度对鱼腹梁刚度的影响,

**基金项目:** 广东省城乡规划设计研究院有限责任公司专项科研项目(2022-KY3-018)

**作者简介:** 吕志刚,男,1989年生,汉族,湖南邵阳人,硕士,高级工程师,从事高层建筑结构设计及地下结构设计。E-mail: Elways@163.com

并给出鱼腹梁刚度的建议值;林焱等<sup>[4]</sup>引入鱼腹梁结构等效平均刚度概念提出了基于深基坑变形控制机理的大跨度鱼腹梁支撑的设计计算方法;庄诗潮等<sup>[5]</sup>引入鱼腹梁等效平均刚度的概念,推导装配式预应力鱼腹式钢支撑系统施加预应力前后刚度的简化表达式;易振华<sup>[6]</sup>结合上海地区工程案例介绍装配式预应力鱼腹梁钢支撑在深大基坑工程的应用及实施效果;杜常春等<sup>[7]</sup>结合2个装配式预应力鱼腹梁钢结构支撑体系工程案例,探讨了该支撑技术在深厚软土中存在的问题;刘杰<sup>[8]</sup>利用有限元软件MIDAS/GTS对支护方案进行了数值模拟,验证了鱼腹式钢支撑支护方案的合理性;谢河安<sup>[9]</sup>采用MIDAS/GTS有限元结合理论分析,研究了预应力鱼腹式混凝土冠梁-排桩的工作机理;彭浩等<sup>[10]</sup>通过理论计算与实际监测对比,得到了增大冠梁水平刚度后可以加大支撑水平间距结论,但未对此类新型支护设计方法归纳总结。

综上所述,现有研究主要集中在预应力鱼腹梁钢支撑技术上,并通过装配式手法来降低施工成本。然而,鱼腹梁钢支撑必须设置预应力钢绞线,且钢支撑体系架设于基坑内部,故现场施工需要增加预应力施加及换撑拆撑工序。基于此,针对内支撑基坑提出一种增大冠梁截面的新型设计方法,通过理论分析推导了内支撑基坑大冠梁的刚度及材料抗力的计算方法,结合工程案例进行有限元对比分析。结果表明,该设计方法可充分利用大冠梁自身截面刚度大的特点实现加大支撑间距并有效控制基坑变形,可确保基坑安全稳定。

## 1 大冠梁设计理论研究

### 1.1 大冠梁定义

无特别需求时,基坑支护桩钢筋混凝土冠梁通常按构造设置,冠梁宽度不宜小于支护桩桩径(通常较支护桩径宽约200 mm),且高度不小于桩径的0.6倍。当采用纯悬臂桩支护或大间距(>9 m)支撑方案时,且计算需要考虑冠梁刚度的有利作用时,常常需要加大冠梁截面(通常指冠梁水平向宽度)来提高冠梁刚度,达到控制基坑位移及整体稳定的目的。当冠梁宽度大于等于1.5倍支护桩桩径时,可定义为大冠梁。普通冠梁与大冠梁示意图如图1。

### 1.2 冠梁刚度计算

理正深基坑冠梁水平侧向刚度计算模型是在支护桩(墙)顶冠梁位置增加一个弹簧,弹簧的刚度等于冠梁的水平侧向刚度,其本质是假设在支护桩(墙)

的A点产生单位位移时,冠梁对桩顶产生的反力即为冠梁刚度,计算简图如图2所示。

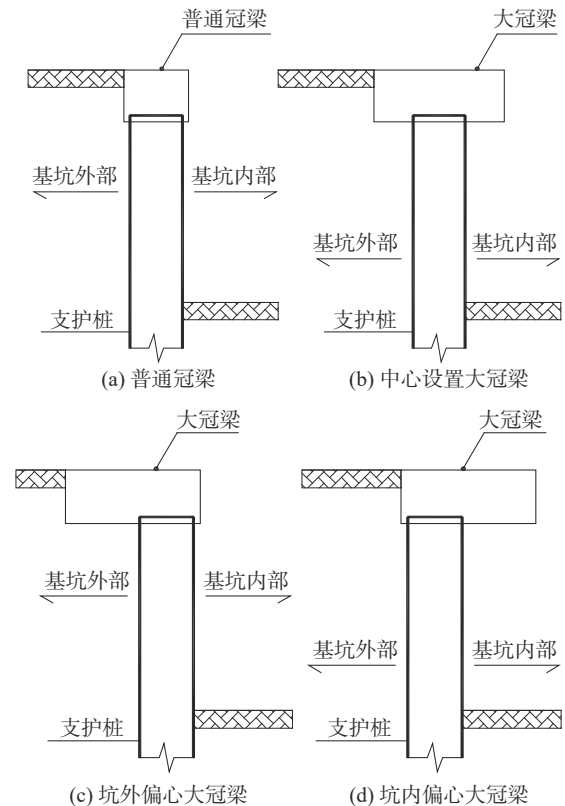


图1 普通冠梁与大冠梁示意图

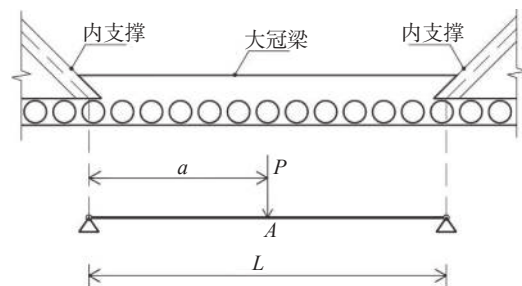


图2 集中力作用模式下的冠梁刚度计算简图

集中力作用下冠梁水平侧向刚度计算公式如下:

$$K_1 = \frac{3L \times EI}{a^2(L-a)^2} \quad (1)$$

式中:  $L$  为冠梁无支撑段跨度;  $a$  为计算点到冠梁端部支点的距离;  $EI$  为冠梁截面抗弯刚度。工程上通常偏安全考虑,取  $a=L/2$  处最下刚度进行单元计算,此时  $K_1 = 48 \frac{EI}{L^3}$ 。

实际工程中,支护桩对冠梁的荷载,可近似为均布作用,且冠梁两端为支撑作为支点的连续支座,故实际冠梁刚度计算可等效为两端固接、荷载均匀分布模型(见图3)。

均布力作用下冠梁水平侧向刚度计算公式

如下:

$$K_2 = \frac{384EI}{L^4} = \frac{384}{L} \times \frac{EI}{L^3} \quad (2)$$

当  $L \geq 8.0$  m 时,  $K_2 \leq K_1$ 。实际工程中采用大冠梁设计后的支撑间距通常都大于 8 m, 此时若仍采用理正深基坑软件中推荐的刚度计算方法, 见式(1), 会使计算偏于不安全。因此当采用大冠梁设计时, 建议采用式(2)计算刚度。

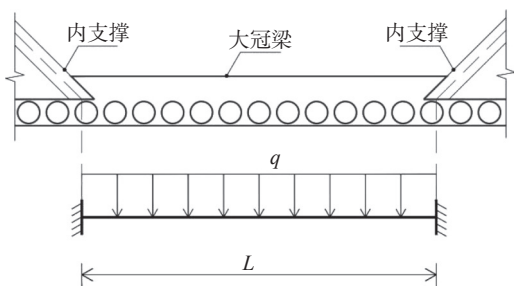


图3 均布力作用模式下的冠梁刚度计算简图

### 1.3 冠梁材料抗力计算

对于两端固定的超静定梁, 考虑变形限制及预留安全度, 可假定极限状态为两端支座出现塑性铰情况, 对应计算简图如图4所示。

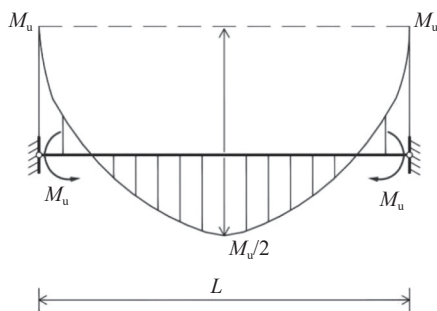


图4 冠梁材料抗力计算简图

由极限平衡条件可按式(3)求得极限荷载:

$$q_u = \frac{12M_u}{L^2} \quad (3)$$

式中:  $M_u$  为冠梁支座截面的极限弯矩, 可根据混凝土处于界限受压平衡状态, 按下式计算:

$$M_u = \alpha_1 f_c b \xi_b h_0^2 (1 - \xi_b / 2) + f_y A_s' (h_0 - a_s') \quad (4)$$

式中:  $h_0$  为冠梁截面有效高度(水平向);  $\xi_b$  为混凝土相对界限受压区高度;  $b$  为冠梁截面宽度(竖向);  $f_c$  为冠梁自身混凝土轴心抗压强度设计值;  $f_y$  为冠梁内受压钢筋强度设计值;  $A_s'$  为冠梁内受压钢筋面积。

对于采用大冠梁设计基坑, 材料抗力建议按以下方法复核:

(1)按大冠梁两端约束支点间距及支撑截面配筋

情况, 根据规范公式计算材料抗力  $q_1$ ;

(2)按大冠梁自身截面参数根据本文式(3)计算材料抗力  $q_2$ ;

(3)取实际材料抗力  $q_u = \min(q_1, q_2)$ 。

### 1.4 大冠梁应用场景

#### (1)悬臂桩支护

通常适用于地质条件较好时(可塑状黏土地层)的一层地下室基坑( $H \leq 5$  m), 或地质条件非常好(硬塑状黏土或基岩揭露高于基底地层)的一层半地下室基坑( $H \leq 8$  m)。此时采用悬臂桩支护, 可结合桩顶大冠梁设计, 充分利用冠梁刚度, 达到控制支护结构水平位移的目的。且无需水平向支撑或拉锚, 对主体结构施工带来极大的便利。

#### (2)支护桩+单道钢筋混凝土内支撑支护

通常适用于地质条件较差(深厚软土地层)一层地下室基坑( $H \leq 6$  m), 或地质条件较好(可塑状黏土地层)的二层地下室基坑( $H \leq 12$  m)。此时采用支护桩+单道钢筋混凝土内支撑, 可结合桩顶大冠梁设计, 充分利用冠梁刚度, 可实现加大支撑间距( $\geq 2$  倍规范限值), 也能控制支护结构水平位移的目的, 基坑内部支撑间距加大为主体地下结构施工带来极大便利。

### 1.5 大冠梁设计建议

针对大冠梁设计采用理正深基坑软件进行单元计算, 提出如下建议:

(1)若按支护桩+内支撑模式计算变形时, 作用在竖向支护结构上每延米等效刚度应按冠梁刚度与内支撑支点刚度中较小值进行计算; 支撑材料抗力应按冠梁自身材料抗力与支撑材料抗力中较小值取值。

(2)若采用悬臂桩模式计算, 冠梁刚度应按式(2)进行计算修正, 并且可在抗倾覆验算时考虑冠梁自身材料抗力的有利作用, 手算复核并优化支护桩嵌固长度。

## 2 案例工程背景

### 2.1 基坑工程概况

项目位于广东省梅州市某医院院内, 项目原设计主体结构含2层地下室, 当主体地下室施工至正负零后, 因建设需求变化, 需要在已建地下室与南侧既有门诊医技楼间增设一处纯地下大型设备机房。增建基坑平面近矩形, 平面尺寸为 47.3 m(长)×16.5 m(宽), 基坑周长约 90.5 m, 基坑竖向投影面积约 806 m<sup>2</sup>, 基坑开挖深度约 8.65 ~ 9.05 m。增建基坑东南西三侧均为院区用地, 其中南侧距既有门诊医技楼(地上6层, 独立基础)最近处约 5.70 m, 基坑北侧

与已施工主体地下室衔接。基坑平面及周边环境如图5所示。

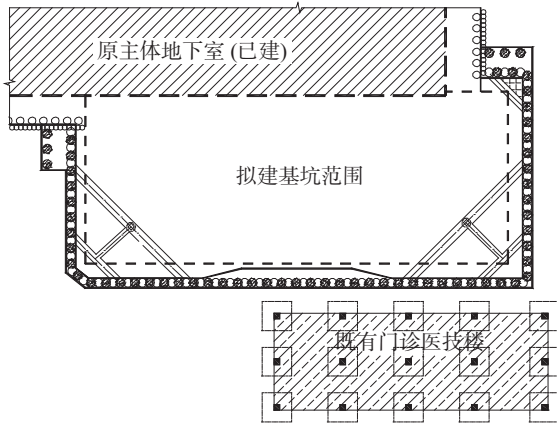


图5 基坑及周边环境平面图

### 2.2 工程地质条件

场地地层自上而下依次为素填土(松散状)、粉质黏土(可塑—硬塑状)、强风化泥质粉砂岩(极软岩)、中等风化泥质粉砂岩(极软岩—软岩)。场地上层滞水赋存于填土中,主要接受大气降水补给,透水性良好;基岩裂隙水主要赋存于基岩风化裂隙中,赋水性较弱。场地稳定水位标高为 75.02~78.55 m,年水位变幅约 1~1.5 m。典型工程地质剖面图见图6,基坑支护设计岩土参数取值见表1。

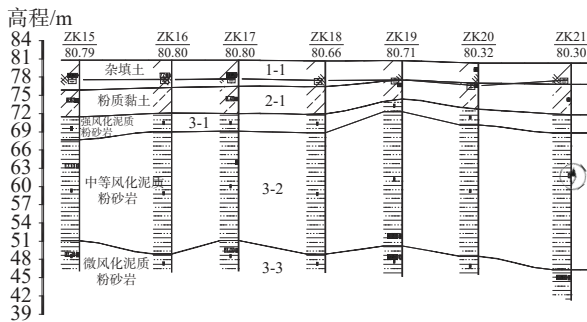


图6 地质剖面图

表1 基坑支护设计岩土参数取值

土层	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 $c_k/\text{kPa}$	内摩擦角 $\phi_k/(\text{°})$
素填土(1-1)	17.0	9.0	6.0
粉质黏土(2-1)	18.7	27.5	11.3
强风化泥质粉砂岩(3-1)	22.0	100.0	25.0
中等风化泥质粉砂岩(3-2)	23.0	200.0	26.0
微风化泥质粉砂岩(3-3)	23.5	400.0	28.0

## 3 基坑支护设计与计算分析

### 3.1 项目特点及难点

新建基坑工程特点及难点如下:

#### (1) 基坑开口

新建基坑北侧与已建主体地下室衔接,基坑为开口基坑。因主体结构顶板标高差异及基坑肥槽暂未回填,新建基坑无法采用对撑体系。

#### (2) 基坑紧邻周边建筑物

新建基坑南侧紧邻既有门诊医技楼,新建地下室边线距门诊医技楼边线仅约 5.0 m,实地调查显示门诊医技楼为独立基础、框架结构,基础边线超出建筑轮廓线约 1.5~2.0 m,因此基坑南侧施工作业空间较为紧张。支护结构施工及土方开挖必须确保南侧门诊医技楼的正常使用及安全。

### 3.2 基坑支护方案选型分析

#### (1) 竖向支护

考虑南侧既有建筑物的保护及施工场地限制,设计考虑竖向采用咬合灌注桩支护,兼做挡土及止水结构(见图7)。

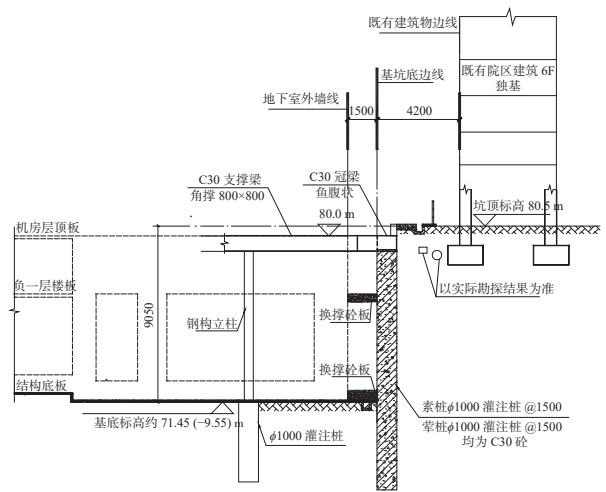


图7 支护方案剖面图(单位:mm)

#### (2) 水平支撑体系

受周边环境限制,基坑支护无法采用预应力锚索方案。基坑形状为长矩形,角部采用角撑支护后,长边跨中部位存在约 24 m 宽度无支撑段(北侧为开口边,对撑无法布设),此宽度范围若采用斜抛撑,因基坑短边尺寸小,施工繁琐,施工效率太低,故排除。为应对长边跨中无支撑段跨度大的难题,传统的支撑方案为边桁架体系,此法能够有效控制支护结构变形,确保基坑安全稳定,但存在支撑量相对较大,内支撑施工及拆除难度大,成本高,且后期需先换撑再拆撑等劣势。为此,提出一种增大冠梁截面的大冠梁体系来取代传统的边桁架支撑体系,此时,除无支撑段冠梁加宽外,无任何额外支撑,施工便利性将大大提高,并利于缩短施工工期及降低工程成本。

### 3.3 计算分析

为验证大冠梁体系的可行性,设计阶段采用 MIDAS/GTS 建立三维有限元仿真模型进行分析,并与理正深基坑单元计算结果进行对比研究。模型中土体、灌注桩、冠梁采用三维实体单元,基坑立柱、内支撑、连梁等采用梁单元模拟。模型中土体采用理想弹塑性模型,遵循 Mohr-Coulomb 屈服准则,上述相关结构采用弹性模型。总体计算模型含 85120 个单元,43201 个节点(见图 8)。

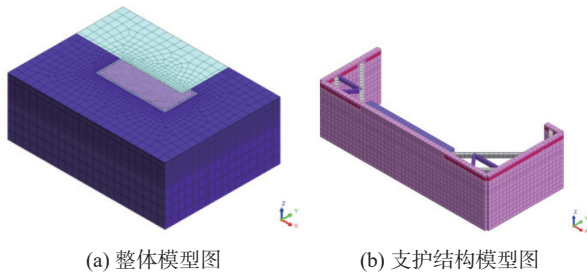


图 8 有限元模型图

#### 3.3.1 抗倾覆稳定性计算

对于安全等级为一级的基坑,按悬臂桩模式计算时,满足抗倾覆计算要求的支护桩嵌固深度按下式计算:

$$\frac{E_{pk}a_{p1}}{E_{ak}a_{a1}} \geq K_s = 1.25 \quad (5)$$

式中:  $E_{ak}$ ,  $E_{pk}$  分别为基坑外侧主动土压力、基坑内侧被动土压力标准值;  $a_{a1}$ ,  $a_{p1}$  分别为基坑外侧主动土压力、基坑内侧被动土压力合力作用点至挡土构件底端的距离。根据基坑及土层参数计算得出式(5)所需计算参数,按式(5)计算并推求,得出支护桩嵌固深度  $l_d=7.75$  m。

按排桩+内支撑模式计算时,抗倾覆计算可考虑支点材料抗力的有利作用,相关材料抗力按下式计算:

$$\frac{E_{pk}a_{p1} + q_{zc}a_0}{E_{ak}a_{a1}} \geq K_s = 1.25 \quad (6)$$

式中:  $q_{zc}$  为支点处内支撑材料抗力;  $a_0$  为支点距排桩底的距离。材料抗力  $q_{zc}$  计算如下:

$$q_{zc1} = 0.9\varphi(f_c A + f'_y A'_s) \cos\theta / s \quad (7)$$

式中:  $f_c$  为混凝土材料抗压强度设计值;  $f'_y$  为受压钢筋抗压强度设计值;  $A$  为支撑截面面积;  $A'_s$  为受压钢筋面积;  $s$  为支撑间距;  $\theta$  为支撑与冠梁法线的夹角。

将内支撑相关设计参数带入式(7)计算得到  $q_{zc1}=270$  kN。

按基坑设计参数,分别取冠梁截面水平向有效高度  $h_0=0.975, 1.475, 1.975, 2.475$  m 代入本文式(3)、式(4)计算得到:  $q_{zc2}=96, 202, 362, 567$  kN。

对比  $q_{zc1}$  与  $q_{zc2}$  可知,采用等截面大冠梁时,冠梁材料抗力存在较大富余,故在实际设计过程中可将冠梁两端设置小段变截面梁(见图 9),这样使得大冠梁受荷达到极限状态时,实际出现塑性铰的位置即为支座位置,确保计算假定的准确性。

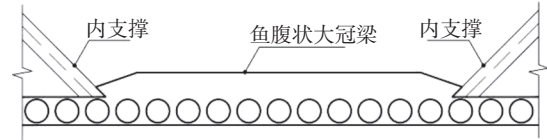


图 9 实腹式类鱼腹状大冠梁示意图

选取冠梁截面水平向宽度  $h=1.5$  m,此时取  $q_{zc1}$  与  $q_{zc2}$  二者较小值,即  $q_{zc}=200$  kN/m,并将其与式(6)所需其他参数式(6),按式(6)计算并推求,得出支护桩嵌固深度  $l_d=6.50$  m。

综上,采用排桩+内支撑计算模式,考虑冠梁的材料抗力作用,可有效降低排桩嵌固深度,从而降低工程成本。

#### 3.3.2 桩身变形、内力计算

按悬臂桩模式,考虑大冠梁自身截面刚度计算的桩身变形、内力分布情况如图 10 所示。

按排桩+内支撑模式,支点刚度取大冠梁自身截面刚度与内支撑支点刚度二者中的较小值计算得到桩身变形、内力分布情况如图 11 所示。

按有限元建模仿真实体模型分析计算得到桩身变形、内力图见图 12。

对比图 10—图 12 可知,考虑大冠梁刚度及材料抗力,采用排桩+内支撑计算模式进行理正单元计算,其结果与有限元分析结果相符,从而表明大冠梁刚度及材料抗力计算公式具有一定的合理性。

#### 3.3.3 冠梁刚度对控制桩顶变形的影响研究

维持冠梁截面竖向尺寸(1.20 m)不变,通过改变冠梁截面水平向尺寸来改变冠梁水平侧向刚度,并采用有限元软件研究冠梁刚度对桩顶变形的影响,相应支护桩位移及弯矩变化情况如图 13 所示。

由图 13 可知,冠梁刚度对桩顶水平位移控制效果显著,对桩身弯矩影响较小。为有效控制基坑冠梁部位水平变形,大冠梁跨高比建议取 8~12,具体应结合顶部水平位移控制要求进行取值。

为便于地下结构施工,通常深基坑会设置 1.0~2.0 m 的肥槽。为避免换撑、拆撑作业,大冠梁

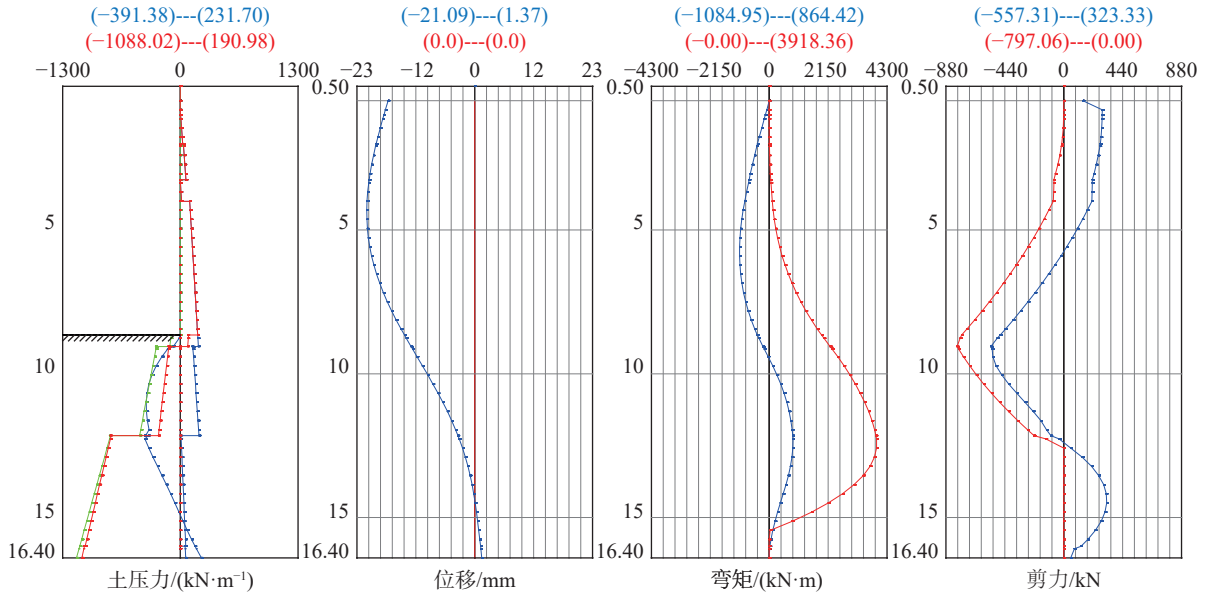


图 10 理正单元计算内力位移图(悬臂桩)

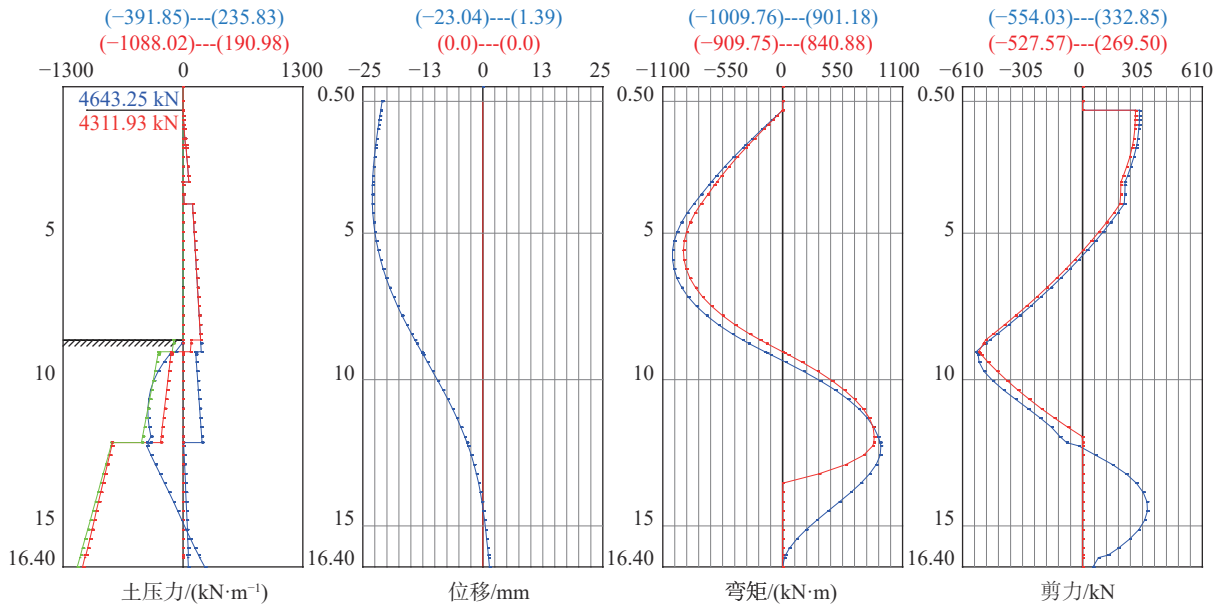


图 11 理正单元计算内力位移图(排桩+支撑)

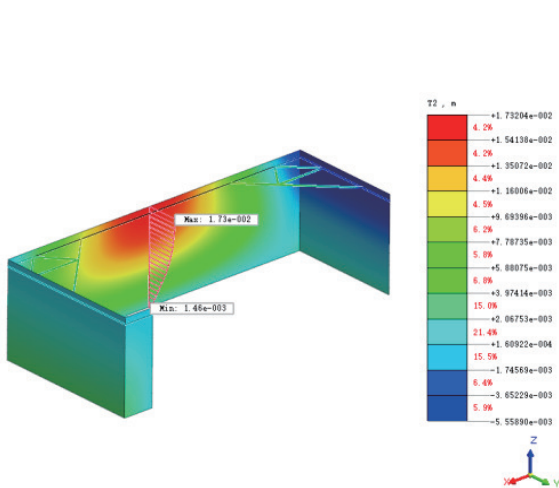


图 12 有限元计算变形图

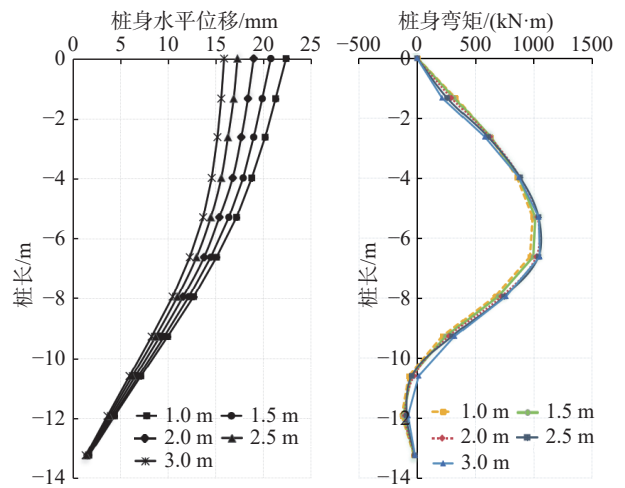


图 13 有限元计算支护桩位移及弯矩图

设计可充分利用基坑肥槽空间,让大冠梁仅布置在肥槽空间内。

### 3.4 实践结果与理论对比

为保护南侧既有医技门诊楼,案例工程采用宽度 2.5 m、支点宽度约 25 m(跨高比约为 10)的大冠梁设计,并采用房屋自动化监测系统对基坑边既有门诊楼进行安全监测,确保危大工程实现动态化设计、信息化施工。基坑监测数据表明,实测桩身范围水平位移均小于并接近理论计算值(见图 14)。周边建筑物沉降观测结果均小于规范限值(见图 15),工程现已完工,周边既有建筑物变形控制效果较好。

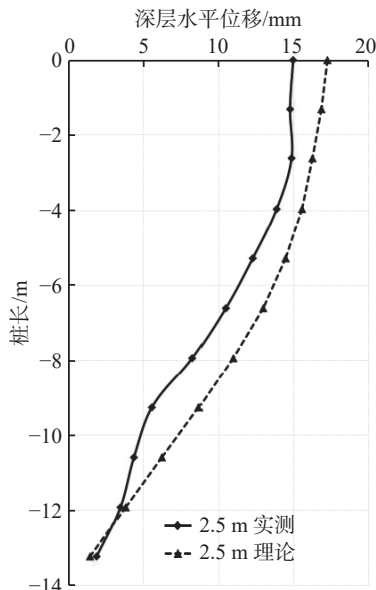


图 14 支护桩深层水平位移图

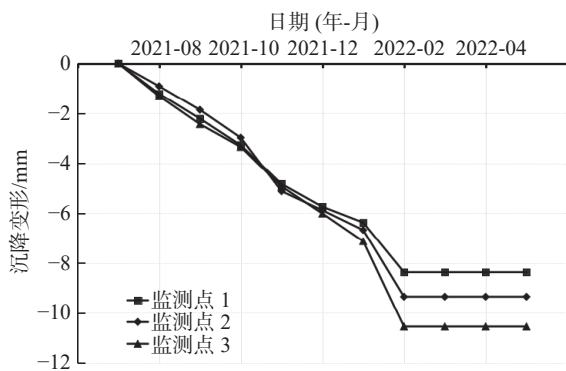


图 15 周边既有建筑物沉降观测结果图

## 4 结论

(1)对于无法设置对撑的基坑,采用大冠梁设计可增加内支撑的支点间距,便于基坑与地下结构

施工。

(2)基坑大冠梁设计建议采用排桩+内支撑计算模式,考虑冠梁的材料抗力作用,可有效降低排桩嵌固深度。

(3)基坑设计计算时,大冠梁刚度建议按本文式(3)进行计算修正,大冠梁段支点材料抗力建议按本文式(4)进行包络取值。在大冠梁材料抗力满足计算要求时,冠梁两端可设置小段变截面梁,形成实腹式类鱼腹状冠梁。

(4)为避免换撑、拆撑作业,大冠梁宽度可综合桩墙厚度和肥槽空间取值,为有效控制基坑水平变形,大冠梁跨高比建议按 8~12 取值。

采用大冠梁设计可使支撑间距加大,能给施工带来较大便利性,利于缩短项目工期及降低工程成本,并通过实际工程及监测数据验证了可行性,具有一定的推广应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] 许绮炎. 鱼腹梁结构受力变形的解析解及合理预应力值的确定 [J]. 建筑结构, 2020, 50(S2): 783-788.
- [2] 胡廖琪. 预应力鱼腹梁钢支撑控制围护桩变形理论研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(S1): 141-149.
- [3] 毕平均, 许绮炎. 鱼腹梁刚度的影响因素分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1): 165-171.
- [4] 林 焱, 林思远, 贾书岭. 基于深基坑变形控制机理的大跨度鱼腹梁支撑的设计方法 [J]. 中国港湾建设, 2022, 42(7): 37-42.
- [5] 庄诗潮, 张建霖, 张灿辉, 等. 装配式预应力鱼腹式钢支撑系统的刚度研究 [J]. 土木工程学报, 2021, 54(4): 18-25.
- [6] 易振华. 鱼腹梁钢支撑在基坑工程中的实践与分析 [J]. 岩土工程技术, 2022, 36(1): 26-30.
- [7] 杜常春, 杜治国, 郭 安. 预应力鱼腹梁钢支撑在深基坑围护中的应用 [J]. 岩土工程技术, 2020, 34(5): 254-259.
- [8] 刘 杰. 预应力鱼腹式钢支撑在深基坑支护方案优化设计中的应用 [J]. 建筑结构, 2018, 48(9): 103-107, 54.
- [9] 谢河安. 深基坑鱼腹式混凝土冠梁—支护桩的力学性状及找形分析 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [10] 彭 浩, 黄俊光, 林祖镨. 增大冠梁水平刚度的基坑支护新方式 [J]. 广东土木与建筑, 2018, 25(7): 46-48.

收稿日期: 2023-03-15