岩土工程

复合式基坑支护结构抗弯刚度及

水平位移计算方法探讨

(1. 中国地质大学汉口岩土工程研究所,武汉 430030;2. 江西地质基础工程总公司武汉公司,武汉 430032)

[摘 要]根据钢筋混凝土结构理论,提出了后插筋旋喷桩与灌注桩复合式基坑支护结构截面抗弯 刚度计算的力学模型及截面抗弯刚度和水平位移的计算方法。

[关键词]复合式基坑支护结构 抗弯刚度 力学模型 水平位移

[中图分类号]TU432,TU433 [文献标识码]A [文章编号]0495 - 5331(2002)05 - 0081 - 05

1 工程概况及地质条件

武汉市第二医院科教综合楼占地面积 1101.1 m²,地面以上 14 层,地下室 1 层,为框架结构,基坑 开挖深度为 6.0 m,根据岩土工程勘察报告,基坑开 挖支护范围内由地表往下各土层性质如表 1。

表 1 基坑设计土层参数表

地层 编号	地层 名称	层底 深度 (m)	层厚 (m)	(kNm ³)	c (KPa)	()	地基土水平抗 力系数的比例 系数 m (kPa/m ²)
	杂填土	1.17	1.17	18.9	10	18	-
	素填土	2.81	1.64	18.9	15	18	-
	粉土	4.51	1.70	18.9	15	26	10000
	粉质粘土	9.67	5.16	18.9	20	15	10000
	粘土	13.04	3.37	18.7	30	12	12000

本基坑工程最突出的问题是局部基坑的施工场 地受到严格限制,有一边长为50m的基坑边处的承 台边距邻近围墙的水平距离仅2.0m(图1),施工期 间由于种种原因围墙又不能拆除和破坏,因此施工 场地异常狭小,其他基坑边所采用的钻孔灌注桩桩 排支护结构在该边无法施工。经理论分析和力学计 算,本工程在该边采用了如图1所示的后插筋旋喷 桩与灌注桩复合式基坑支护结构,即在两个承台之 间有较大施工场地处施工直径为 ϕ 800,混凝土强 度等级为 C25 的钻孔灌注桩;在承台外侧与围墙之 间施工场地狭小处施工直径 ϕ 600,水泥土无侧限 抗压强度 q₁ 2 MPa 的旋喷桩,并在旋喷桩水泥土 初凝前向桩中心插入规格为 $\phi_{48} \times 3.5 \text{ mm}$,材质为 钢材 Q235,长度与旋喷桩相等的脚手架用钢管;在 插入钢管的旋喷桩与钻孔灌注桩之间以及钻孔灌注 桩与钻孔灌注桩之间用 ∮600 旋喷桩连接;并在旋 喷桩和灌注桩桩顶设置混凝土冠梁,旋喷桩中的后 插筋(钢管)和灌注桩中的钢筋伸入桩顶冠梁之中, 使支护结构各部分能很好地共同承受侧向土压力、 增强支护结构的整体刚度和稳定性:支护结构截面 受弯时,一侧受拉而另一侧受压,将中间插有钢管的 旋喷桩布置在受拉侧,将钻孔灌注桩布置在受压侧, 靠旋喷桩内的钢管和水泥土承受拉力,靠钻孔灌注 桩的混凝土承受压力来抵抗截面弯矩。工程实践证 明,这种复合式基坑支护结构具有以下主要特点: 旋喷桩与灌注桩交错排列,与传统的桩排支护结构 相比,大大增加了支护结构截面的高度,即增大了抗 弯截面模量,故支护结构的抗弯能力强,抗弯刚度 大,基坑水平位移小; 钻孔灌注桩布置在两相邻承 台之间,相当于布置在传统钻孔灌注桩桩排支护结 构的基坑内,使钻孔灌注桩的施工不会受到围墙妨 碍,可大大节省施工空间,同时旋喷桩紧贴承台边缘 布置,将来浇注承台时还可省掉一边的模板: 旋喷 桩施工完成后,在水泥土初凝之前插入与旋喷桩等 长的钢管,用以在弯矩作用下承受拉应力,这种新的 方法 ,既施工方便 ,又可克服旋喷桩水泥土抗拉强度 低的不足: 灌注桩在弯矩作用下,主要承受压力, 可充分发挥混凝土抗压能力强的优点,灌注桩可只

[第一作者简介]段新胜(1962-),男,1985年毕业于武汉地质学院北京研究生部,获硕士学位,中国地质大学汉口岩土工程研究所所长, 副教授,现主要从事岩土工程教学与科研工作。

[[]收稿日期]2001 - 11 - 20;[修订日期]2002 - 01 - 05;[责任编辑]李石梦。

按构造要求配筋,减少配筋量; 旋喷桩与旋喷桩之间,以及旋喷桩与灌注桩之间相互啮合,能起到很好

的侧壁止水作用; 比传统的桩排支护结构节约投资 25 %左右。



图 1 后插筋旋喷桩 --灌注桩复合式基坑支护结构平面图(局部)

现代城市建筑物及地下设施密集,在很多情况 下基坑支护结构施工场地会受到限制,这种新型基 坑支护结构可广泛应用于施工场地受到限制的基坑 工程。由于新型支护具有很多优点,特别是抗弯截 面模量大且能节约投资,因此,这种新型支护结构也 可应用到其他内侧不要求平直的基坑工程。

传统的混凝土结构理论在计算截面抗弯刚度 时,截面形状可归结为矩形、T 形、倒 T 形和工形 4 种,一般只考虑钢筋和混凝土两种材料的相互作用, 而图 1 所示的支护结构截面是由水泥土、混凝土和 钢筋 3 种材料组成的,如何建立这种支护结构截面 的抗弯刚度计算力学模型和计算这种截面的抗弯刚 度,进而计算支护结构水平位移是设计和应用这种 新型基坑支护结构所要解决的关键问题。本文根据 钢筋混凝土结构理论,建立了这种复合式基坑支护 结构截面抗弯刚度计算的力学模型,提出了抗弯刚 度和水平位移的计算方法。

2 复合式基坑支护结构土压力计算

这种复合式基坑支护结构的土压力计算,可按 常规桩排支护结构的计算方法进行。如本基坑开挖 深度为6m,地面均布荷载取10kPa,对于图1所示 的挡土结构,可按悬臂式挡土墙的计算方法,先计算 每延米挡土结构的受力。

本工程计算出的每延米挡土墙土压力分布图见 图 2。其中,挡土墙最小插入深度为 $D_{mm}4.7 \text{ m}$,实 际插入深度应取 $D = (1.15 - 1.30) D_{m}$ 本工程取 D = 6 m;基坑底面以上每米挡土结构所受主动土 $压力的合力 <math>H_0 = 77.8 \text{ kN}$,力臂 $h_0 = 1.34 \text{ m}$, H_0 对 B 点的力矩 $M_0 = 104.5 \text{ kN} \text{ m}$;每延米基坑支护

82





图 2 支护结构每延米土压力图

3 截面抗弯刚度力学模型的建立和截面抗 弯刚度的计算

计算基坑位移时一般均用支护结构横截面短期 抗弯刚度。在现行的《混凝土结构设计规范》 (GBJ10-89)中提供了构件截面材料只有混凝土和 钢材,截面形状为矩形、"T'形、倒"T'形、"工'形(如 图 3 所示)的抗弯刚度计算公式,即(1)式:

$$B_{s} = \frac{E_{s}A_{s}h_{0}^{2}}{1.15 + 0.2 + 6\frac{E}{1 + 3.5 f}}$$
(1)
$$\vec{x} \mathbf{p} : E_{s} - \mathbf{g} \mathbf{\hat{z}} \mathbf{\hat{y}} \mathbf{\hat{y}} \mathbf{\hat{z}} \mathbf{\hat{z}}$$

 A_s —钢筋的截面积之和;

h₀ —截面的有效高度; —有效配筋率, 等于 抗弯截面中受拉钢筋截面积之和 A_s 除以有效受拉 区混凝土截面积 A_{te},对于受弯构件 A_{te} 为图 3 中阴



图 3 各种钢筋混凝土抗弯截面

影部分的截面面积。

_f—T形、工形截面受压翼缘面积与腹板有效 面积之比,即:

 $f = \frac{(b_f - b)h_f}{bh_0}$,其中: b_f 、 h_f 分别为受压翼 缘的宽度和高度;b为腹板宽度,当 $h_f > 0.2h_0$ 时, 取 $h_f = 0.2h_0$ 。

—构件受弯时,受拉侧混凝土裂缝之间混凝 土协助钢筋抗拉工作程度系数,按下式计算:

= 1.1 - $\frac{0.65 f_{tk}}{f_y}$,其中: f_{tk} 为混凝土抗拉强 度: f_y 为钢筋抗拉强度设计值:

_E—钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值。

在图 1 中取一个结构单元进行研究(如图 4), 即沿基坑边线方向取 7.2 m 长的一段复合式基坑支 护结构作为研究对象,其截面形状近似为倒 T 形, 能否直接用(1)式计算支护结构截面的短期抗弯刚 度呢?回答是否定的,因为图 4 所示的构件截面材 料有 3 种:水泥土、混凝土和钢材,这与《混凝土结构 设计规范》(GBJ 10 - 89)中(1)式的应用条件,截面 只有钢筋和混凝土两种材料不同,故不能直接应用 (1)式进行抗弯构件截面短期抗弯刚度计算。为此, 应首先从分析图 4 所示的截面抗弯受力特点入手, 进而对截面进行合理适当地简化,使之简化为符合 (1)式计算条件的的力学模型。



图 4 复合式基坑支护结构一个计算单元

支护结构悬臂受弯时,在图4所示的截面中,基

坑外侧旋喷桩中的水泥土和钢筋受拉,基坑内侧灌 注桩的混凝土受压,中间两根旋喷桩水泥土起连接 作用,这种截面抗弯的受力特点与图 3 中的" 工 "形 截面非常相似。我们可以把基坑外侧中间插有钢管 在一条轴线上的 10 根旋喷桩看作是" 工 "形截面的 受拉翼缘,将连接旋喷桩与灌注桩的中间两根旋喷 桩看作是"工"型截面的腹板,钻孔灌注桩看作是 "工"型截面的受压翼缘。按照保证截面抗弯时受拉 部分截面所能承受的总拉力相等,不改变截面的有 效高度(指受拉钢筋截面形心到受压区边缘的距离) 的原则,取基坑外侧10根旋喷桩外包矩形的宽度和 高度作为受拉翼缘的宽度和高度;取中间两根旋喷 桩直径的和作为腹板的宽度。受压翼缘虽然是混凝 土材料,但在承受的总压力不变的条件下,先将混凝 土材料转化为面积较大的水泥土材料,再按照保证 截面有效高度不变的原则,使转化为水泥土材料的 受压翼缘的高度等于灌注桩直径,受压翼缘宽度 b_f

由此,将本工程图 4 所示由 3 种材料组成的近 似为倒"T'形截面简化为只有水泥土和钢筋两种材 料的"工'形断面的力学模型,如图 3(d)所示,其断 面尺寸为:

受拉翼缘高度 $h_{f}=0.6 \text{ m}$,受拉翼缘宽度 $b_{f}=2$ ×2.55 = 5.1 m,截面有效高度 $h_{0}=1.25 \text{ m}$,截面 高度 h=1.55 m,腹板宽度 $b=2 \times 0.6 = 1.2 \text{ m}$,受 压翼缘高度 $h_{f}=0.8 \text{ m}$,受压翼缘宽度 $b_{f}=1.2 \text{ m}$,受

 $\frac{2 \times 4 \times 0.8^2 \times 25}{0.8 \times 2} = 15.7 \text{ m}$,受拉钢筋截面积之和 $A_s = 4.89 \times 10^{-3} \text{ m}^2;$

按混凝土结构设计规范,用(1)式计算截面短期 抗弯刚度 B。时,截面材料应是混凝土和钢筋。支护结 构截面简化成图 3(d) 形式后,截面材料为水泥土和 钢筋,若将水泥土看作强度较低的混凝土,就可按(1) 式计算基坑支护结构的截面短期抗弯刚度 *B*_s。

将 $E_s = 2.0 \times 10^5$ MPa、 $E_c = 13.5 q_u = 27$ MPa、 $f_{tk} = 0.2 q_u = 0.4$ MPa及图 3(*d*) 所示的截面几何参 数代入(1) 式,可求得图 4 所示复合式基坑支护结构 计算单元的短期抗弯刚度 $B_s = 1.255 \times 10^6$ kPa m⁴。

4 复合式基坑支护结构顶面水平位移计算

基坑支护结构顶面水平位移越大,对周边环境 造成的不良影响就越大,有关设计规范均要求限制 基坑支护结构顶面的水平位移。复合式基坑支护结 构顶面水平位移计算方法和步骤,可按悬臂式桩排 支护结构的计算方法进行。计算简图见图 5。



图 5 支护结构顶面水平位移计算简图

1) 假设基坑边长无限长,先确定计算单元在基坑 底面以上所受水平力合力 H₀,力臂 h₀和合力矩 M₀。 水平合力和合力矩分别等于支护结构每延米的水平 力和力矩乘以计算单元长度(本工程为7.2 m)。

由此,计算出本工程的 $H_0 = 7.2 \times H_0 = 560.$ 2 kN, $h_0 = 1.34$ m, $M_0 = 7.2 \times M_0 = 752.4$ kN · m。

2) 假定坑底为固定端,按悬臂梁先确定计算单 元的支护结构挠度 *f*:

$$f = \frac{H_0 h_0^2}{6B_s} (3 H - h_0)$$
 (2)

式中:H—基坑开挖深度, B_s —截面短期抗弯 刚度,将已知数据代入(2)式可求得本工程 $f = 2.2 \text{ mm}_{\circ}$

3)将一个计算单元看作一根异型桩,按《建筑桩 基技术规范》(JG194-94)推荐的"m"法,将基坑底 面以上土对桩的作用看作是荷载H₀、M₀作用于位 于坑底的桩顶上,首先计算基坑底和桩顶的水平位 移 x_0 和转角 $_0$ 。

按下列步骤计算:

确定桩的水平变形系数

$$5 \int \frac{mb_0}{B_s}$$

式中:m—为地基土抗力系数的比例系数,本 工程 $m = 10\ 000\ kPa/m^2$; b_{0} —桩身的计算宽度,本 工程 $b_{0}=7.2\ m$; B_{s} —桩身短期抗弯刚度,由此计算 出本工程 $= 0.565\ m^{-1}$ 。

计算基坑底面处桩的水平位移和转角

▲由于桩的嵌固深度 D = 6 m > 2.5/ = 4.42
 m,于是当 H₀=1 时,基坑底面处桩的水平位移 HH
 和转角 及当 M₀=1 时基坑底面处桩的水平位移 和转角 瓦分别按下列式子计算:

$$H = \frac{A_{f}}{{}^{3}B_{s}}$$

$$A = H = \frac{B_{f}}{{}^{2}B_{s}}$$

$$A = \frac{C_{f}}{{}^{2}B_{s}}$$

计算基坑底面处支护结构的水平位移 x₀ 和 转角 ₀

$$x_0 = H_0 _{\rm HH} + M_0 _{\rm HM}$$

$$_0 = H_0 _{\rm MH} + M_0 _{\rm MM}$$
(3)

表 2 桩支承在非岩石中或岩面上的 A_f、B_f、C 值

珔 = D	$A_{ m f}$	$B_{ m f}$	$C_{ m f}$
2.5	3.526	2.327	2.227
2.6	3.161	2.048	2.013
2.8	2.905	1.869	1.889
3.0	2.727	1.758	1.818
3.5	2.502	1.641	1.757
4.0	2.441	1.625	1.751

将已知数据代入(3)式,求得 $x_0 = 9.4$ mm、 $_0 = 4.209 \times^1 0 - 3$ rad。

计算基坑支护结构顶面水平位移 x

$$x = x_0 + {}_0 H + f \tag{4}$$

将已知数据代入(4) 式,计算出本工程的 x = 36.9 mm。该工程实测支护结构顶面水平位移为 35 mm,与理论计算结果相近,说明本文所介绍的计

算方法切实可行;该支护结构水平位移小于湖北省 一级建筑基坑支护结构水平位移允许值 40 mm。

5 结论

工程实践证明,图1所示的后插筋式旋喷桩— 灌注桩复合式基坑支护结构的抗弯刚度较大,在确 定一个结构计算单元截面的短期抗弯刚度时,可先 按本文的方法进行截面等效和简化,再按《混凝土结 构设计规范》(GBJ10-89)中提供本文中的(1)式进 行计算,并且可按本文所介绍的水平位移计算方法

和步骤,计算复合式基坑支护结构的水平位移。

[参考文献]

- [1] 地基处理手册编委会,地基处理手册[M].北京:中国建筑工业 出版社,1988.
- [2] GBJ10-89,混凝土结构设计规范[S].
- [3] JGJ94 94 建筑桩基技术规范[S].
- [4] 武汉市基础工程协会等. 深基坑工程技术规定[S]. DB42/159 - 1998.
- [5] 沈蒲生. 混凝土结构[M]. 武汉:武汉工业大学出版社, 1993.
- [6] 段新胜. 悬臂式桩排支护结构水平位移分析示例[J]. 工程勘 察,1997(6)1417.

DISCUSS ON THE METHODS TO DETERMINE THE BENDING RIGIDITY AND HORIZONTAL DISPLACEMENT

DUAN Xin - sheng¹, GU Xiang¹, CHEN fei², LIU Yi - jie¹

Hankou Geotechnical Engineering Institute of China University of Geosciences, Wuhan 430030;
 Wuhan Branch of Jiangxi Geotechnical engineering Company, Wuhan 430032)

Abstract :According to the theory of concrete structure, the mechanical model and calculating procedure to determine the bending rigidity and horizontal displacement of the bored piles - jet grout piles compound protecting structure of foundation pit are discussed and presented in this paper. Key words compound protecting structure of foundation pit, mechanical modal, bending rigidity, horizontal displacement

(上接第 77 页)

(3) 可多角度钻孔 此系统可有效地钻进任意 角度孔,包括垂直方向和水平方向角度孔。而且空 心的扩孔钻头,可提供柔顺平稳的钻速。

(4)有效的套管内排碴 压缩空气由中心钻头端孔排出后,在钻杆与套管间形成的环空,把岩粉气举上升排到地面,可保证高速排碴效率,减少孔内沉碴,避免了钻头由于重复破碎而减少使用寿命。

(5)钻杆轻易解扣提出 钻孔完成后,把钻杆稍 作少量反转,就可把中心钻头与空心钻头解扣分体, 轻易在套管内把钻杆与中心个别头一同提出。由于 中心钻头为实体结构,且口径小于套管内径,因此不 会产生卡钻。

(6)若需提出取回套管,利用钻机自身的起拨能 力可以顺利拨出套管重复使用,若不取回套管,还可 以换用其它适合口径的常规潜孔锤钻头钻进,用作 其它用途。

我公司计划引进一套 CAR 503 系统对心扩孔 跟管钻进风动潜孔锤,单价人民币 380,000 元,在同 类地层的工程中使用。

3) 其他钻进工艺试验 本工程施工中还进行了 冲击钻孔成孔引孔工艺,孔径 600 mm,单孔成孔时 间 7 天,效率很低,没有选用。

APPLICATION OF GUIDED - BORING TECHNOLOGY OF PNEUMATIC DOWN- THE- HOLE HAMMER IN MEGALITHIC AND COARSE- SAND SEE RECLAMATION

WAN G Ping , PEN G Xiao - yang , J IN G Ming , L IU Guang - zhong

(Engineering Exploration Branch, Shanxi Bureau of Geology and Mineral Resource Exploration, Taiyuan 030001)

Abstract :Testing researchers of guided - boring technology have been carried out in megalithic and coarse - sand see reclamation using different pneumatic down - the - hole hammers. Problems facing H - type pile submergence in the second - stage foundation works of Shenzhen Mawan Electric Power Plant has been successfully solved. This paper analysis pneumatic down - the - hole hammer technology and tool utilization , and suggests improving steps of technology during utilization of pneumatic down - the - hole hammer.

Key words pneumatic down - the - hole hammer, foaming agent, megalithic see reclamation