

灌注桩与旋喷桩组合结构在支护工程中的应用

13

陈新纯

(河海大学设计院 南京 210098)

关键词 基坑开挖 灌注桩 旋喷桩 悬臂式 支护结构 组合结构

在港口码头、水工建筑、房屋建筑、市政工程、桥梁及坑道等施工中,常会遇到基坑开挖。当基坑开挖深度超过自然坡度稳定的临界深度时,就必须设置支护结构。支护结构的形式、材料多种多样,选取何种支护结构形式受多种条件的制约。本文结合老城改造中,新建带地下室(或地下商场)的多层或高层建筑,基坑深度在 3.5~6 m 的支护结构形式——悬臂式灌注桩与旋喷桩组合结构,并结合工程实际,提出此种支护结构的设计过程和方法。

由于旧城建筑物稠密,道路纵横交错,地下管网密布,在有限的建筑场地中进行基坑开挖,其支护结构的选择和设计,必须满足下述四方面的要求:①确保坑壁的稳定和施工的安全;②确保临近建筑物、构筑物、道路及地下管网的安全和正常使用;③便于基坑挖土、模板安装、钢筋绑扎和混凝土浇筑等道工序的顺利进行;④应做到经济合理、工期短和节省投资。

1 灌注桩与旋喷桩组合结构的组合形式

悬臂式支护结构可以单独采用灌注桩,也可单独采用旋喷桩。但是,灌注桩由于浇筑时施工机具的限制,以及成桩直径的偏差、桩位定位的偏差和施工垂直度的偏差,桩与桩之间必然存在空隙,不可能形成完整的连续墙体,这对于土质较好,地下水位又很低(低于基坑开挖深度)的情况,尚不存在漏土和止水问题。若土质较差,地下水位又较高时,则对桩间的空隙部分就必须作专门处理,以解决漏土和防渗问题。

旋喷桩在施工中,由于施工工艺的特殊,桩内不能配置钢筋,桩身的强度又较低,而悬臂式支护结构要承受较大的水平侧压力,为了保证支护结构的强度和稳定,需多排旋喷桩,形成很厚的旋喷墙体(如图 1),这就必然加大工程量,增加投资和延长工期。若只用一排旋喷桩(如图 2),就必须特别注意其强度问题。南京某工程曾出现过因支护结构强度不够而坍塌的实例。因此,在土质较差,地下水位又较高

时,基坑的支护结构一般需采用组合结构。根据目前所见大致有灌注桩与定喷(或摆喷)墙的组合和灌注桩与旋喷桩的组合两种组合型式。其组合原理为:由灌注桩作承重结构,旋喷(或定喷、摆喷)桩形成地下连续墙以止水防渗(如图 3 和图 4)。这种功能分明的组合当然是比较安全的,但如果考虑到灌注桩既可受力又具有很好的防渗性能,则防渗结构中不需要形成连续结构。基于这种考虑,笔者在南京夫子庙地下商场支护结构设计中,采用了如图 5 的布置组合形式。此种组合形式的特点正是利用混凝土灌注桩既是受力构件又具有很好的抗渗性能的特点,从而将桩后的旋喷桩间距加大,旋喷桩本身无需形成连续墙体,而使旋喷桩与灌注桩共同组成防渗帷幕结构,以减少旋喷桩数量,达到节省材料、缩短工期和节约投资的目的。实践证明,在同等条件下图 5 的组合形式在强度、稳定和防渗效果方面都能满足工程要求。以下介绍这种组合结构的设计方法。

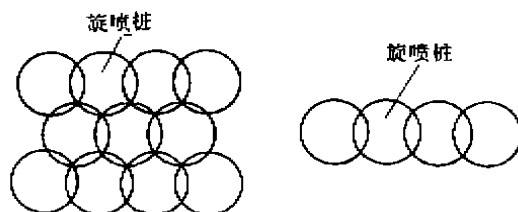


图 1 多排旋喷桩平面图

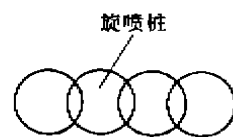


图 2 单排旋喷桩平面图

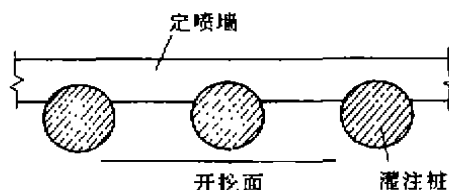


图 3 灌注桩与定喷墙的组合

2 灌注桩设计

2.1 桩径与孔距的估计

混凝土灌注桩因施工工艺、机械设备的不同,有

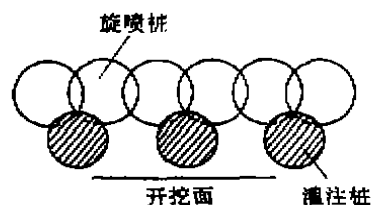


图4 灌注桩与旋喷桩的组合

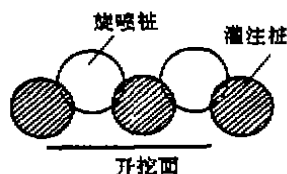


图5 夫子庙地下商场支护结构平面图

多种成桩形式。在老城改造中,由于原有建筑物稠密,又临近开挖基坑。因此,宜选用钻孔灌注桩,以减少振动。钻孔灌注桩直径的估定,应综合考虑下列因素:地质、水文资料、土层分布、土的物理力学性质、基坑开挖深度、临近建筑物的距离及其重要性、地面及地下沟、管网、地面堆载、拟定的灌注桩孔距以及施工机械设备能力和旋喷桩的施工机械设备能力等。

对悬臂式支护承重结构的灌注桩,由于受水平侧压力(侧压力的计算一般以支护承重结构为刚性体作计算基础),因此,灌注桩要有足够的刚度,其桩径一般不宜小于600mm。桩径的大小同孔距的大小有关,孔距大,作为单根灌注桩的受力范围就大,但孔距过大,又使桩后的旋喷桩桩径要大,甚至在两灌注桩间需设置两根旋喷桩,这就有可能使两灌注桩间的旋喷桩在侧压力作用下出现开裂,因此,孔距又不宜过大。基坑深度较深,桩径应大,反之可小些。另外,灌注桩桩径、孔距与土质条件、地下水情况有关,土质好,地下水位又较低,则桩径可适当小些,孔距可适当放大;土质较差,地下水又丰富,则桩径应取大些,孔距也应减少,总之,灌注桩的桩径与孔距的决定,必须综合考虑各种因素,因此就有一个经济比较的问题。桩径与孔距之间无论何种组合,均应使结构达到安全、稳定、可靠又经济合理的模式。根据已有工程的实践和经验,一般情况下常用的桩径和孔距如表1所示。

表1 悬臂式支护承重结构的常用桩径和孔距表

坑深/m	孔距/mm	灌注桩直径/mm	旋喷桩直径/mm
3.0~3.5	900	500	700
3.6~4.8	1000	600	800
3.6~4.8	1100	600	800
5.0~6.0	1100	700	900
5.0~6.0	1200	800	800

南京夫子庙地下商场施工支护结构选用了如图6的平面尺寸组合方案。实践证明,此种布置方案是经济、安全合理的。

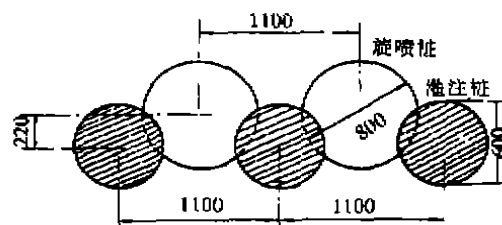


图6 夫子庙商场施工支护结构平面尺寸组合图(单位:mm)

2.2 灌注桩的计算

组合结构中,由于旋喷桩是水泥浆和土的固结体,其强度较低且不均匀(旋喷桩外围较密实,越接近桩中心,密实度与均匀性越差),因此,在组合结构强度计算中,以不考虑旋喷桩的作用为宜。

钻孔灌注桩的设计步骤如下(相当于一端固定的竖向悬臂梁,取两灌注桩中心距为计算单元):

a. 按朗肯-库仑土压力理论计算灌注桩所受侧压力,包括土压力、水压力和各种附加荷载产生的侧压力。土层不同,分层计算。在考虑土体重度时,对粘性土取天然状态的湿重度,对砂性土,地下水位以上采用天然重度,地下水位以下按浮重度计算,同时计入水的侧压力。最后绘制出灌注桩侧压力图(如图7)。

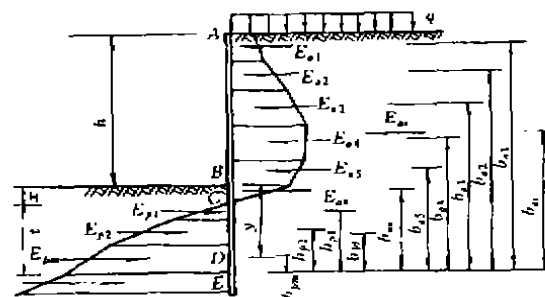


图7 灌注桩侧压力图

b. 确定桩的嵌固深度 t 。从图7由静力平衡条件,以嵌固深度 t 为未知量,通过各力对 E 点的力矩平衡试算求出 t ,即

$$\sum E_{a_i} b_{a_i} = \sum E_{p_j} b_{p_j} \quad (1)$$

式中 E_{a_i} 、 E_{p_j} 分别为主动、被动侧压力; b_{a_i} 、 b_{p_j} 分别为主动、被动侧压力到 E 点的距离。实际嵌固深度 t 应乘以1.2系数,以满足灌注桩嵌固段抵抗倾覆转动力的要求。灌注桩总长度为

$$L = h + x + 1.2t \quad (2)$$

式中 x 为基坑底到侧压力为零的 C 点距离。并校核倾覆稳定抗力分项系数 r_1 :

$$r_l = \frac{\sum_{j=1}^n E_{Nj} b_{Nj}}{\sum_{i=1}^n E_{ai} b_{ai}} \quad (3)$$

式中 $\sum_{j=1}^n E_{Nj} b_{Nj}$, $\sum_{i=1}^n E_{ai} b_{ai}$ 分别为被动、主动侧压力对桩底的力矩总和。 r_l 对一般工程为 1.2; 对重要工程为 1.4。

c. 通过试算求入土深度 y 处剪应力为零的截面点 D 。先假定 y , 使 D 点的剪应力为零, 则净主动侧压力与净被动侧压力相等, 即

$$\sum_{i=1}^n E_{ai} = \sum_{j=1}^n E_{Nj} \quad (4)$$

若假定的 y 不适合(上式不等), 则增大或减少 y 值, 重复计算, 一般试算两至三次可得到结果。

d. 求剪力为零的截面处(D 点)的最大弯矩 M_{max} 。按下式确定:

$$M_{max} = \sum_{i=1}^n E_{ai} y_{ai} - \sum_{j=1}^n E_{Nj} y_{Nj} \quad (5)$$

式中 y_{ai} 为剪力为零的 D 点以上各层土主动侧压力 E_{ai} 对 D 点的力臂; y_{Nj} 为被动侧压力 E_{Nj} 对 D 点的力臂 (y_{Nj} 有正负之分)。

e. 灌注桩强度计算。受水平侧压力的混凝土灌注桩, 其强度按普通钢筋混凝土圆形截面受弯构件计算。计算时按《混凝土结构设计规范》(GBJ 10-89)有关规定进行配筋时, 弯矩 M 值应乘以荷载分项系数 n ($n=1.15$), 并按弯矩图分段配筋。

圆形截面受弯构件的强度计算公式见文[1]。在设计中, 为计算简单和方便起见, 习惯上常预先假定钢筋截面面积(即直径和根数), 然后进行强度复核验算。其具体步骤可参见文[1]。为更有效地发挥钢筋的强度作用, 实际布筋时也有采用如图 8 所示的配筋形式。

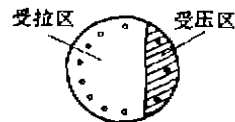


图 8 灌注桩配筋图

作为支护结构的灌注桩, 由于场地土层变化往往较多, 因此, 桩内主筋以通长配筋为宜, 保证有 6~8 根(桩径小时)或 8~10 根(桩径较大时)钢筋沿周边布置。

3 旋喷桩设计

旋喷桩, 简单地讲就是利用钻机等设备, 把安装在注浆管(单管)底部侧面的特殊喷嘴置入土层预定深度后, 用高压泥浆泵等装置, 以 20 MPa 左右的压力, 把浆液(一般为水泥浆液)从喷嘴中喷射出去, 冲击破坏土体, 同时借助注浆管的旋转和提升运动, 使浆液与从土体上崩落下来的土搅拌混合, 经过一段

时间的凝固, 便在土中形成圆柱状带胶凝质的固结体。其渗透系数可达 $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ cm/s}$ 。

旋喷桩设计时除对地质、水文资料要有常规土工试验资料和水文分析资料外, 尚应摸清建筑场地附近有无明沟、暗塘、暗井、暗河及其流向、流量, 腐蚀质的成份和含量, 以便正确确定旋喷桩的直径和充填物(浆液)材料。必要时局部地方尚可补桩堵漏。

3.1 喷射直径的确定

喷射直径即旋喷桩的拟定直径。喷射直径估计正确与否直接关系到防渗堵漏的效果及工程投资。喷射直径由于喷射方法、工艺及机械设备的不同, 有单管喷射、双管喷射、三管喷射及多重管喷射。单管喷射是最简单的一种, 费用也较低, 但喷射直径相对要小些。另外, 土质组成复杂程度、浆液稠度、施工中压力控制的出入及注浆管提升速度等均影响喷射直径和质量, 其直径误差可在 $\pm 0.2 \text{ m}$ 。因此在拟定喷射直径时, 应充分考虑各种不利因素和机械设备可能的条件, 进行合理选择。对重要工程或场地附近有重要建筑物的, 尚应先进行试桩, 现场测试确定。对抗深在 3.5~6 m 的一般工程, 可根据土质和旋喷方法来选择, 如表 2 所示。

表 2 不同土质和旋喷方法时的旋喷桩直径 m

土质	标准贯入击数 N	单管法	双管法
粘性土	0~9	1.2 ± 0.2	1.6 ± 0.3
	10~19	0.8 ± 0.2	1.2 ± 0.3
	20~29	0.6 ± 0.2	0.8 ± 0.3
砂性土	0~9	1.0 ± 0.2	1.4 ± 0.3
	10~19	0.8 ± 0.2	1.2 ± 0.3
	20~29	0.6 ± 0.2	1.0 ± 0.3
砂砾	20~30	0.6 ± 0.2	1.0 ± 0.3

3.2 旋喷桩布孔位置

前述灌注桩孔距已经决定, 采用两灌注桩间设一旋喷桩。为使灌注桩与旋喷桩共同组成防渗帷幕结构, 则灌注桩与旋喷桩间必须有一定厚度的交圈范围(如图 9), 以保证达到防渗效果。据工程实践和已有资料, 其交圈最厚处在 100~140 mm, 足以达到防渗要求。此时, 两种桩之间的排距为 $0.75 R_1$ (R_1 为灌注桩半径), 其交圈厚度的计算公式为

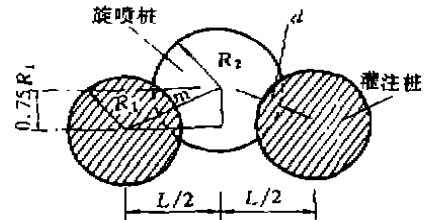


图 9 灌注桩与旋喷桩交圈图

$$d = R_1 + R_2 - m \quad (6)$$

式中 R_2 为旋喷桩半径; m 为灌注桩与旋喷桩两桩心间距, $m = \sqrt{(0.75R_1)^2 + (L/2)^2}$ 。

3.3 旋喷桩桩长及埋深

旋喷桩的桩长及埋深主要取决于地下水情况及坑底以下土层的性质和分布。一般情况下,旋喷桩桩顶与灌注桩顶一致,以防止地表水渗流至基坑。旋喷桩桩底应埋至坑底以下某层较好的粘土层或渗透系数相对小的土层内,以防止潜水渗流和涌水涌砂现象。

3.4 注浆材料及掺加剂

旋喷桩注浆材料最常用的为水泥,一般用 325 号或 425 号硅酸盐水泥。对仅有抗渗要求无抗冻要求者,也可用火山灰水泥,但不宜用矿渣水泥。为降低成本,仅对抗渗有要求者,可在水泥内掺入一定量的粉煤灰,但不宜超过水泥用量的 15%。注浆用水灰比常为 1:1。纯水泥浆的凝结体其 28 d 强度约在 8.2~8.9 MPa。为提高凝结体的抗渗能力可在水泥浆液中掺入 2%~4% 的水玻璃。

4 组合结构的整体验算

4.1 组合结构的变形验算

由于旋喷桩具有一定的刚度,因此,变形验算时,考虑组合结构的组合刚度较符合实际。组合刚度换算是用其弹性模量之比来换算。把不同材料换算到相当于灌注桩混凝土的同一种材料。得到换算后的构件截面积,再进行刚度计算。

组合结构顶端的位移变形值与组合结构的刚度及土层的刚度有关,一般包括组合结构的弹性变形 δ ; 刚性平移 Δ ; 及刚性转动 $(h+x)\tan\theta$ 三者之和如图 10。其总变形为^①

$$S = \delta + \Delta + (h+x)\tan\theta \quad (7)$$

4.2 组合结构稳定验算

稳定验算中,对于以砂性土为主的场地土,根据

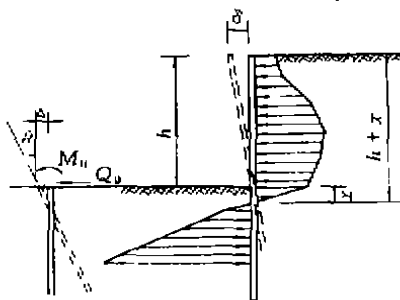


图 10 灌注桩在侧压力作用下的变形

① DB32/112-95, 南京地区地基基础设计规范。

土层性质按折线滑动面进行验算;而以粘性土为主的场地土常用条分法圆弧滑动面进行验算^①。并应取最不利滑动面进行计算,求得最小稳定抗力分项系数 γ_s 。对一般工程 γ_s 取 1.15,对重要工程取 1.3。

5 设计与施工中几点必要措施

a. 混凝土灌注桩浇筑完后应在桩顶设一圈构造联系梁,将所有灌注桩顶连成整体,以加强支护结构的整体性和刚度。联系梁宽不小于灌注桩直径,梁高 25~30 cm,配置构造筋。

b. 灌注桩内纵向钢筋应露出桩顶 40~50 cm,以便伸入桩顶封闭构造梁内。

c. 灌注桩浇筑 28 d 后方能进行旋喷桩施工,以免高压喷射损伤灌注桩表面混凝土。

d. 基坑开挖前必须做出开挖方案、开挖顺序的施工计划。应分段分层开挖,不宜一个地方开挖深度一次到位。

e. 基坑开挖前及开挖过程中,应随时观察临近建筑物、构筑物、道路、地坪及沟管等有无开裂、变形和异常情况,并作好记录和草图,以便及时采取措施。

f. 基坑开挖过程中,应严密监测桩顶水平变位。并作详细记录。量测误差不应大于 3 mm。

g. 坑壁顶部一定范围内切忌堆放建筑材料、施工机械、土方和其它任何重物。

6 结 语

a. 本文就 3.5~6 m 坑深悬臂支护组合结构形式、经理论计算作了多种布置方案比较并在工程实践中应用后,较顺利地完成了预定功能。这种组合结构比灌注桩后采用连续旋喷墙或桩后连续定喷墙的形式,其帷幕结构的工程量减少约 1/4;投资节省 15% 左右。

b. 有关灌注桩桩径、孔距与坑深、地质、水文资料内在关系成何种规律,以及旋喷桩的桩径和其它因素的关系,都有待更多的实践资料为基础作进一步探讨。

参考文献

- 1 张岐宜. 混凝土结构设计. 南京:江苏科学技术出版社,1994
- 2 曾国熙等. 地基处理手册. 北京:中国建筑工业出版社,1988
- 3 黄熙龄. 建筑地基基础设计规范 GBJ7-89. 北京:中国建筑工业出版社,1989

(收稿日期:1995-09-30)