

抛支撑支点承载力和刚度特性的研究及应用

尹 骥, 董月英

(上海岩土工程勘察设计研究院有限公司, 上海 200070)

摘要: 总结了上海地区常用的抛支撑支点的型式。通过对抛支撑支点传力路径、承载力及变形模式的分析, 探讨了支点与周围土体共同作用的机理。基于支点为“刚体”的假定, 提出了计算支点水平承载力和刚度的简化计算方法。介绍了采用此方法设计的某抛支撑工程案例。工程实践表明, 采用建议的方法进行设计是基本可行的。

关键词: 基坑; 抛支撑; 支点; 承载力; 刚度; 简化计算方法

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0330-05

作者简介: 尹 骥(1980-), 男, 上海人, 工学博士, 注册土木(岩土)工程师, 主要从事岩土工程领域的设计、咨询和研究。E-mail: geofem@126.com。

Study and application of bearing capacity and stiffness of supporting point of slop strut

YIN Ji, DONG Yue-ying

(Shanghai Geotechnical Investigations & Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200070, China)

Abstract: The common styles of supporting point of slop strut used in Shanghai are introduced. Based on the analysis of its force transfer path, bearing capacity and deformation mode, the mechanism of interaction between soil and supporting point is discussed. A simplified method for calculating the horizontal bearing capacity and stiffness of supporting point of slop strut is proposed based on the assumption of rigid supporting point. A case is employed to validate the above method. The engineering practices prove the reasonableness of the proposed method.

Key words: excavation; slop strut; supporting point; bearing capacity; stiffness; simplified calculation method

0 引言

深厚软土地区基坑, 当开挖深度在 5.0~7.0 m 左右, 周边环境较复杂, 围护边线距离红线较近的时候, 可采用钻孔灌注桩结合止水帷幕或者 SMW 工法搅拌桩内插 H 型钢联合一道支撑的围护型式^[1]。当基坑面积较大时, 为避免支撑体系影响地下结构施工, 施工单位倾向于采用抛支撑。传统的抛支撑一般将支点设置在底板结构上, 这样虽然支点的刚度和强度可以得到保证, 但需要在底板结构上设置施工缝, 底板分两次浇筑, 对工期有较大影响。新型的抛支撑支点通过在基坑底施工水泥土搅拌桩重力坝或灌注桩, 形成一定刚度和强度的“实体基础”。型钢抛支撑直接作用在“实体基础上”, 底板一次浇筑, 仅需在型钢支撑穿越底板处设置止水钢板即可。虽然该种型式近来得到了大量应用, 但目前仍存在“机理不清、计算不明、设计盲目”的问题。

1 抛支撑支点的类型

抛支撑的支点类型主要有水泥土搅拌桩重力坝型

式、钻孔灌注桩排桩结合重力坝型式以及钻孔灌注桩门架结合重力坝型式。后两种型式是在对第一种型式应用经验总结、设计优化和改进的基础上提出来的。

“水泥土搅拌桩重力坝”型式如图 1 所示, 采用一定宽度、长度的水泥土搅拌桩重力坝加固土体, 并在重力坝上设置一定厚度的配筋混凝土盖板, 盖板浇筑时预埋焊接型钢支撑的预埋件。有时为了增加盖板与重力坝共同承受水平荷载的能力, 在重力坝与盖板之间设置钢管或者小型钢“插筋”, 或者将盖板与垫层一起浇筑。该种形式提供给抛支撑的水平承载能力较低, 比较适用于原状土为粉土或者砂土等具有一定承载力的土体。

“钻孔灌注桩排桩结合重力坝”型式如图 2 所示, 采用在重力坝中“套打”钻孔灌注桩。钻孔灌注桩顶采用钢筋混凝土压顶梁连接, 并在浇筑时预埋焊接型钢支撑的预埋件。该种型式由于采用了灌注桩, 具有较高的承载能力和刚度, 比较适用于软塑—可塑状态的黏土或者粉质黏土。

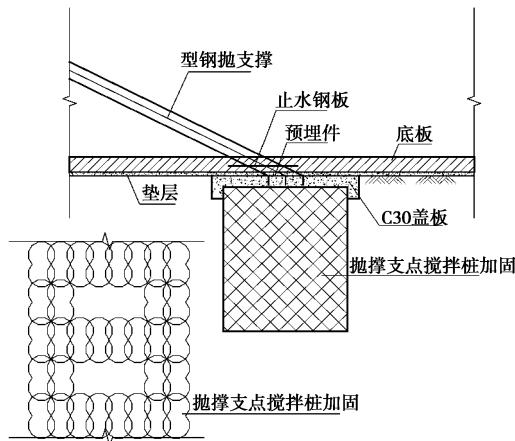


图 1 水泥土搅拌桩重力坝型式

Fig. 1 Gravity cement-soil wall

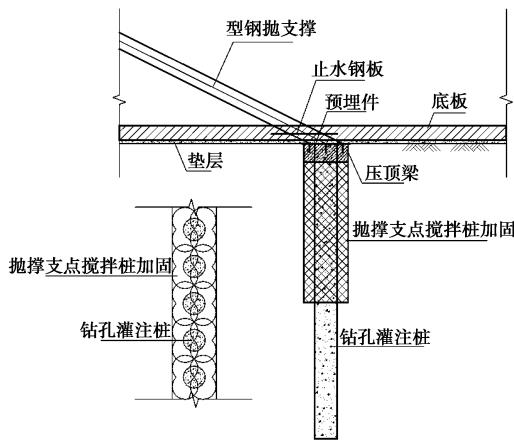


图 2 钻孔灌注桩排桩结合重力坝

Fig. 2 Bored pile combined with gravity cement-soil wall

“钻孔灌注桩门架结合重力坝”型式如图 3 所示, 采用一定宽度、长度的水泥土搅拌桩重力坝加固土体, 并在重力坝中“套打”前后排钻孔灌注桩。钻孔灌注桩顶采用钢筋混凝土压顶板连接, 形成“门架式”结构。该种型式较前两种型式, 具有更加高的承载能力和刚度, 比较适用于流塑状态的软土。本文将重点分析该种型式的支点体系。

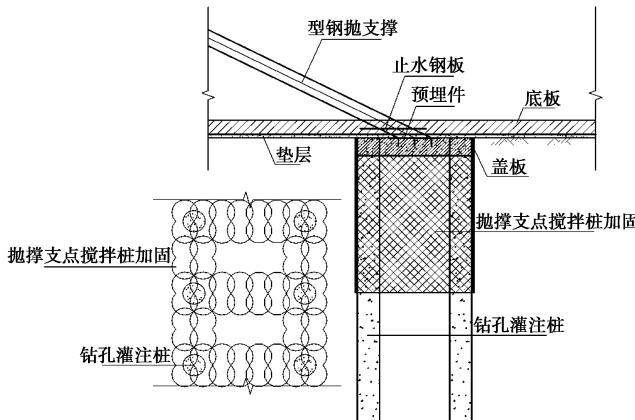


图 3 钻孔灌注桩门架结合重力坝

Fig. 3 Bored pile portal frame combined with gravity cement-soil wall

2 抛支撑支点的受力机理分析

2.1 抛支撑支点的传力路径

斜抛支撑支点体系的传力路径, 以较为复杂的“钻孔灌注桩门架结合重力坝”为例, 主要由 I、II、III、IV 四部分组成, 如图 4 所示。I: 由围护结构传递给抛支撑的水平分力及竖向分力; II: 水平、竖向分力传递给钢筋混凝土压顶板; III: 水平、竖向分力传递给钻孔灌注桩以及加固体, 灌注桩承担的水平力传递给加固体及土体; IV: 加固体将水平力传递给周边土体。

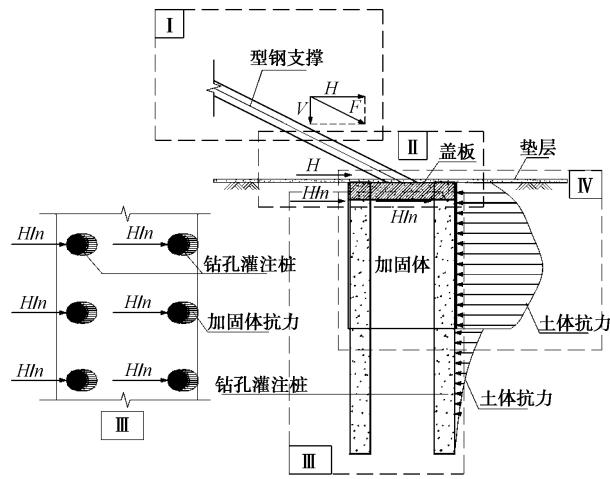


图 4 抛支撑支点的传力路径示意图

Fig. 4 Sketch map of force transfer path of supporting point of slop strut

2.2 抛支撑支点的承载力来源

根据斜抛支撑支点体系的传力路径分析, 最终所有的水平分力均由支点体系周边的土体承担, 如传递路径 IV 所示。因此, 支点体系的承载力和刚度很大程度上取决于周边土体的承载力和刚度。为防止整个支撑体系水平力“传递链”的断裂, 应确保 I~IV 路径的可靠。一般来说, I 和 II 仅涉及到钢结构和混凝土结构的计算问题, 较为容易确定这两个环节的承载力。III 涉及到灌注桩和加固体的共同作用以及“门架式”结构抗侧能力的问题, 较难准确预计灌注桩的实际受力情况, 但从概念设计上, 应确保支点体系具有足够的整体性。最终, 当荷载传递至 IV 阶段时, 可采用土力学的计算原理分析加固体的承载能力。

此外, 由于斜抛支撑的角度较小, 竖向分力较小, 因此不作为支点体系设计的控制因素考虑。

2.3 抛支撑支点的位移模式

抛支撑支点在正常工作状态下的位移模式, 兼有灌注桩的弯曲型位移模式以及加固体的剪切型位移模

式, 为“弯剪型”位移模式, 如图 5 (左) 所示。土体每一点提供的抗力, 可通过该处的侧向位移与土体基床系数值获得。“弯剪型”位移模式虽然比较符合实际, 但是一方面设计支点系统时, 其位移值是未知量, 需通过迭代多次获得, 这样处理计算代价太大。另一方面, 土体承受被动土压力, 当达到极限状态时, 位移模式可以简化为“平移型”, 如图 5 (右) 所示。因此, 可采用极限状态时“平移型”位移模式计算被动土压力, 然后给以一定的安全系数作为储备。

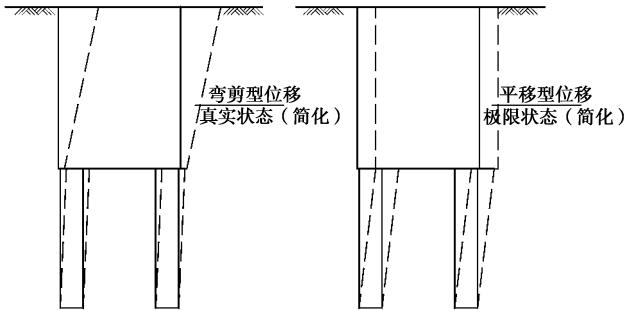


图 5 抛支撑支点的位移模式

Fig. 5 Displacement mode of supporting point of slop strut

3 抛支撑支点承载力与刚度分析

3.1 抛支撑支点的水平承载力

支点的承载力主要由加固体处于极限状态的被动土压力、加固体底部及侧面的摩擦力组成, 如图 6 所示。灌注桩应在构造上确保加固体的刚度和完整性。加固体以下部分灌注桩水平承载能力作为安全储备。被动土压力可由 Rankine 土压力公式计算, 则作用于整个加固体的被动土压力可由下式计算:

$$R_p = E_p L = \left(\frac{1}{2} k_p \gamma H_2^2 + 2c \sqrt{k_p} H_2\right) L \quad (1)$$

加固体底部及侧面的摩擦力可由下式计算:

$$R_s = 2f_s B H_2 + G \tan \bar{\varphi} \quad (2)$$

式中, k_p 为被动土压力系数, f_s 为加固体与土体的侧壁摩擦强度, 可采用桩侧摩阻力标准值, G 为加固体的重量, $\bar{\varphi}$ 为土体的外摩擦角。

3.2 抛支撑支点的刚度

由支点传力路径可知, 支点的刚度主要由加固体的刚度、门架式结构的刚度以及周边土体的刚度所确定的。由于涉及到上述三者之间复杂的共同作用关系, 实际分析时, 除用数值分析工具, 较难分离出每部分的确切刚度。为便于计算, 现做如下假定: ①将水泥土搅拌桩加固体视作刚体, 即忽略其剪切变形对刚度的影响; ②支点的位移模式是“平移型”, 即加固体各点具有相同的侧向位移; ③不计加固体以下灌注桩提

供的抗侧刚度。

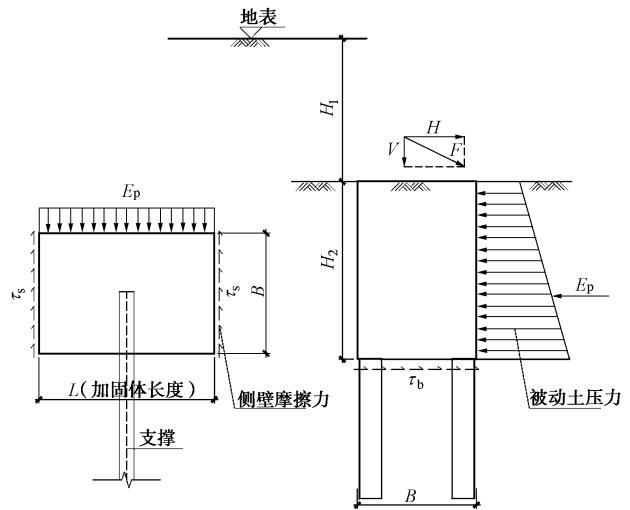


图 6 抛支撑支点承载力计算示意图

Fig. 6 Sketch map for bearing capacity calculation of supporting point of slop strut

周边土体对支点暗墩的作用可以用土弹簧模拟, 如图 7 所示。刚性的加固体本质上起到了“聚集”土体刚度的作用, 即将各点的土弹簧相并联。

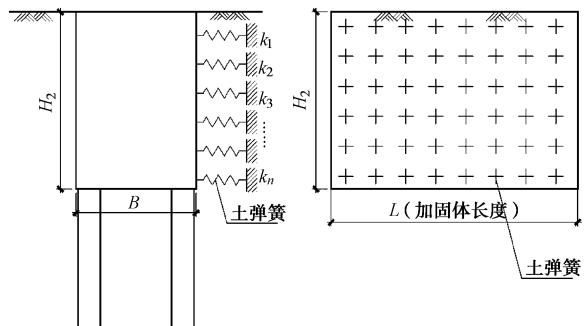


图 7 抛支撑刚度计算简图

Fig. 7 Simplified diagram for stiffness calculation of throwing support pivot

根据刚度的定义, 当加固体产生单位位移时, 土体提供的抗力即为刚度, 即

$$F = H_2 L k_H \cdot 1 \quad (3)$$

式中, H_2 为加固体的高度, L 为加固体的长度, k_H 为土体的基床系数。如将支点的刚度均摊到每延米的刚度, 即

$$k_z = F / D = H_2 L k_H / D \quad (4)$$

式中, D 为抛支撑之间的水平间距。

抛支撑与支点体系的总体刚度可看做抛支撑弹簧与支点弹簧串联后的系统刚度, 可由下式表示:

$$k_T = \frac{1}{1/k_z + 1/k_s} \quad , \quad (5)$$

式中, k_T 为抛支撑与支点体系的总体刚度, k_s 为抛支

撑的水平刚度。

根据《上海市地基基础规范》^[2], 上海地区淤泥质土的基床系数约为 $3000\sim 15000 \text{ kN/m}^3$ 。一般加固体的尺寸为 $L=4.2 \text{ m}$, $H_2=4.0 \text{ m}$, $D=8.0 \text{ m}$, 则支点的刚度 $k_z=6.3\sim 31.5 \text{ MN/m}^4$ 。一般型钢支撑的刚度约为 50.0 MN/m^4 , 则钢支撑与支点体系的总体刚度为: $5.6\sim 19.3 \text{ MN/m}^4$ 。

4 工程实例

4.1 工程概况

某项目位于上海市杨浦区, 基坑呈矩形。东西向长约 300 m , 南北向长约 250 m , 面积约 11 万 m^2 , 周长约 1400 m , 开挖深度 $5.5\sim 6.5 \text{ m}$ 。基坑围护型式主要采用水泥土搅拌桩重力坝, 车库坡道处, 由于距离红线距离较近, 改为钻孔灌注桩结合斜抛支撑, 围护结构平面图、剖面图及现场施工照片如图 8~10 所示。

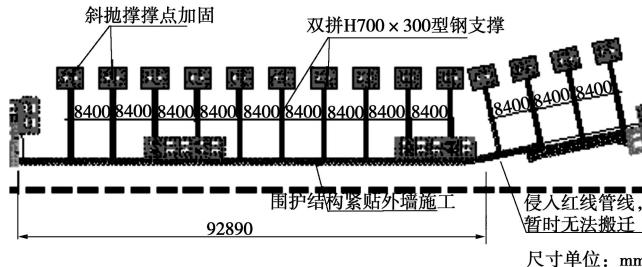


图 8 基坑围护平面图

Fig. 8 Plan view of excavation

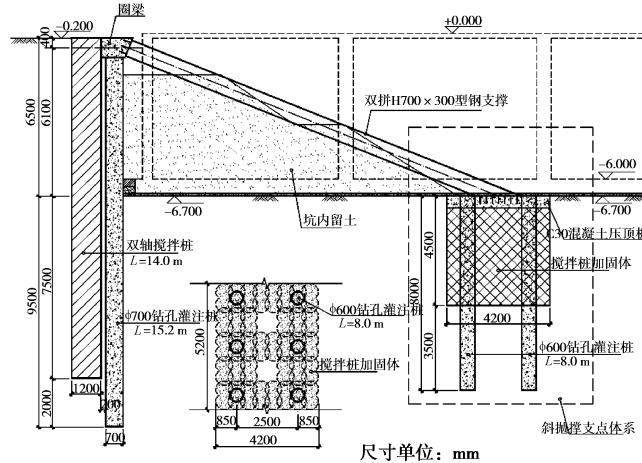


图 9 基坑围护剖面图

Fig. 9 Section view of excavation

4.2 工程地质条件

第①₁层填土, 层厚为 $0.40\sim 2.80 \text{ m}$, 以黏性土为主, 夹少量碎石、贝壳碎屑及植物根茎。

第①₂层浜填土, 在拟建场地北侧及西侧分布, 厚度 $0.20\sim 0.60 \text{ m}$ 。含黑色有机质和腐植物根茎, 具臭味。

第②层褐黄—兰灰色粉质黏土, 层厚为 $0.40\sim 2.30 \text{ m}$, 层顶埋深 $0.40\sim 1.70 \text{ m}$ 。土质自上而下逐渐

变软。呈可塑—软塑状态, 压缩性中等—高。



图 10 抛支撑安装照片

Fig. 10 Constructing photo of supporting point of slop strut

第③层灰色淤泥质粉质黏土, 层厚为 $4.40\sim 6.90 \text{ m}$, 层顶埋深 $1.80\sim 3.40 \text{ m}$ 。含云母、有机质条纹, 夹薄层粉性土, 土质较均匀。呈流塑状态, 压缩性高, 场地内遍布。

第④层灰色黏土, 层厚为 $2.00\sim 5.80 \text{ m}$, 层顶埋深 $7.0\sim 9.30 \text{ m}$ 。呈流塑—软塑状态, 压缩性高。

第⑤₁₋₁层灰色黏土, 一般层厚为 $1.90\sim 7.70 \text{ m}$, 层顶埋深 $11.0\sim 13.50 \text{ m}$ 。呈流塑—软塑状态, 压缩性高。

第⑤₁₋₂层灰色粉质黏土, 层厚为 $1.40\sim 9.10 \text{ m}$, 层顶埋深 $15.0\sim 18.9 \text{ m}$ 。局部夹粉性土, 土质较均匀。呈软塑—可塑状态, 压缩性高—中。各土层的物理力学性质列于表 1 和表 2。

表 1 土层特性表 (一)

Table 1 Parameters for soil layers (1)

层序	γ $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c $/\text{kPa}$	φ $(^\circ)$	直剪 固快		三轴试验			
				c_u $/\text{kPa}$	φ_u $(^\circ)$	c_{cu} $/\text{kPa}$	φ_{cu} $(^\circ)$	c' $/\text{kPa}$	φ' $(^\circ)$
②	18.4	17	13	37	0	21	21.8	3	31.8
③	18.0	14	13	40	0	14	19.9	4	30.7
④	17.8	14	11	33	0	20	19.8	5	31.1
⑤ ₁₋₁	17.4	16	10	29	0	15	17.3	5	29.2
⑤ ₁₋₂	17.9	15	14	29	0	16	17.0	7	28.9

表 2 土层特性表 (二)

Table 2 Parameters for soil layers (2)

层序	基床系数建议值	
	k_v $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	k_h $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
②	8000	10000
③	5000	5000
④	5000	5000
⑤ ₁₋₁	6000	6000
⑤ ₁₋₂	7000	8500

4.3 围护结构设计分析^[3-5]

采用本文建议的简化计算方法先计算出支点承载力、刚度。然后将刚度参数输入同济启明星 FRWS 软件(弹性地基梁法), 计算带支撑围护结构的位移、内

力。

加固体参数: $L=7.2\text{ m}$, $H_2=4.0\text{ m}$, $B=4.2\text{ m}$ 。土层参数: 侧壁摩擦强度 $f_s=15\text{ kPa}$, 水平向基床系数 $k_h=5000\text{ kN/m}^3$ 。型钢支撑参数: $k_s=68.2\text{ MN/m}^4$, 间距 $D=8.4\text{ m}$ 。上述参数代入本文计算公式, 得支点的极限承载力为 2698.2 kN , 抛支撑与支点体系的总体刚度折合到每延米约为 13.6 MN/m^4 。根据上述支撑体系的刚度值, 计算所得的围护结构的位移、内力如下图 11 所示。

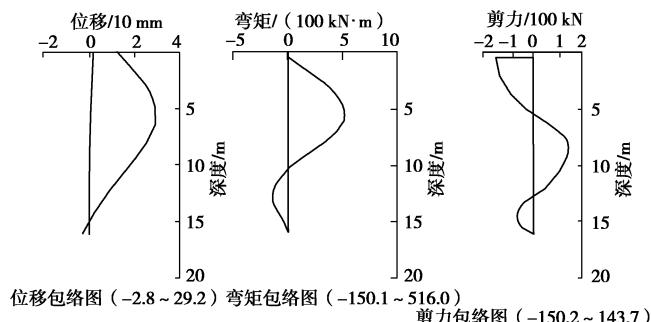


图 11 围护结构位移和内力

Fig. 11 Displacement and internal force of retaining structures

根据计算结果, 斜抛支撑轴力的水平方向分量约为 $167.1\text{ kN/m} \times 8.4\text{ m}=1403.6\text{ kN}$, 支点承载力安全系数为 $2698.2/1403.6=1.92$ 。

5 结 论

总结了上海地区常用的抛支撑支点的型式。通过

对抛撑支点传力路径、支点承载力及变形模式的分析, 探讨了支点与周围土体共同作用的机理。本文基于支点为“准刚体”的假定, 提出了计算支点水平承载力和刚度的简化方法。同时, 还介绍了采用此方法设计的某斜抛支撑案例。工程实践表明, 采用本文建议方法进行设计是基本可行的。

参 考 文 献:

- [1] DG/TJ08—61—2010 基坑工程技术规范[S]. 2010. (DG/TJ08—61—2010 Technical code for excavation engineering[S]. 2010. (in Chinese))
- [2] DGJ08—11—2010 地基基础设计规范[S]. 2010. (DGJ08—11—2010 Foundation design code[S]. 2010. (in Chinese))
- [3] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 2008. (JGJ 94—2008 Technical code for building pile foundations[S]. 2008. (in Chinese))
- [4] JGJ 120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 1999. (JGJ 120—99 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. 1999. (in Chinese))
- [5] GB50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 2002. (GB50007—2002 Code for design of building foundation[S]. 2002. (in Chinese))

(本文责编 明经平)