

软土基坑复合土钉支护性状分析

黄伟达¹, 熊传祥¹, 陈福全²

(1. 福州大学 环境与资源学院, 福建 福州 350002; 2. 福建工程学院 土木工程系, 福建 福州 350007)

摘要: 在阐述福州市区地层分布特点及类型的基础上, 提出软土地基进行复合土钉支护必须考虑地层结构的影响, 并借助有限元对其工作性状进行数值模拟。通过参数敏感性分析, 研究和比较不同软土结构对于不同支护条件的位移响应, 得出双层基坑采用水泥搅拌桩、三层基坑采用木桩进行复合支护等有实际意义的结论, 并对软土基坑的工作机理和参数取值加以探讨, 最后对 2 个工程实例进行优化设计, 获得满意结果。

关键词: 基坑工程; 地层结构; 软土基坑; 复合土钉支护; 前置桩

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增 2 - 5835 - 05

ANALYSIS OF BEHAVIOR FOR COMPOSITE SOIL NAILING SUPPORT IN SOFT CLAY PIT

HUANG Wei-da¹, XIONG Chuan-xiang¹, CHEN Fu-quan²

(1. *College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China;*

2. *Department of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350007, China)*

Abstract: Based on the analysis of the stratum's location and composition in Fuzhou city, it is found that stratum structure is important and can be divided into two types. In order to get a further acquaintanceship about the pit's working behavior in soft clay, a planar strain finite element programme is employed for numerical analysis. Mohr-Coulomb model is used to simulate the soil's stress and strain relation. A series of calculations via FEM are executed for the displacement response of foundation pits when the type of stratum structure, length or obliquity of soil nailing are changed. Compared with the pit's parietal movement under different conditions, some significant conclusions are obtained that the prepositive pile is the most important affecting factor for composite soil nailing. The cement mixed pile should be chosen for the prepositive pile of double stratum, and timber pile for three stratum. Because of the clay's weaker properties and wider sliding route than those of the others, the length of the soil nailing should be added to two times of the pit's depth which is different from that of those located in favorable soil. Finally, two cases are optimized based on above analysis, indicating a good identicalness between the results of calculation and measurement.

Key words: pit engineering; stratum structure; soft clay pit; composite soil-nailed support; prepositive pile

1 引言

土钉支护作为一种主动加固技术, 一般认为只

适用于强度较好的粘性土等, 而不宜用于软弱土层。对于软土基坑, 如果将土钉与前置桩结合形成复合结构^[1~4], 采用土钉支护同样是可行的, 不仅基坑稳定性得以保障, 位移也能得到有效控制。

收稿日期: 2004 - 10 - 26; **修回日期:** 2005 - 01 - 26

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(F0210006); 福州大学人才基金资助项目(XJB - 00 - 06)

作者简介: 黄伟达(1979 -), 男, 2003年毕业于东南大学土木工程学院土木工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事基坑工程和桩基工程的研究工作。
E-mail: yellow5099108@126.com.

福州基坑开挖土层多属软土，开挖深度一般在4.0~6.0 m(计入0.5~1.5 m 承台或电梯井深度)，影响范围内主要是杂填土和淤泥，部分地区含有砂层，其物理力学性质见表1。一般可分为以下2类典型模式：(1) 双层软土结构，由杂填土(2.0~2.5 m)和淤泥(一般厚10~15 m，局部厚20~30 m)构成，主要分布于市区中心地带；(2) 三层软土结构，自上而下为杂填土、淤泥和砂层，主要位于闽江两岸。目前，福州地区基坑支护多数采用“土钉+前置桩”这种复合形式，前置桩普遍采用水泥搅拌桩或者木桩，支护效果良好^[5]。然而，由于前置桩类型选择不当或土钉参数选取不合理等因素导致基坑出现险情甚至失稳等问题依然存在^[6]，原因在于忽视了支护体系与地层结构之间的紧密关系，对复合土钉支护机理认识不够。

本文采用自己编制的平面应变有限元程序，分析地层结构对于不同前置桩复合土钉支护特性的影响，对其工作性状加以探讨，得出有实际意义的结论。

表1 土体典型物理力学性质

Table 1 Physico-mechanical properties of shallow soils

土层	w/%	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	c/kPa	$\phi/(^\circ)$	E_s/MPa	ν	q_{ju}/kPa
杂填土	-	18.0	20	15	3.0	0.3	20~40
淤泥	64	15.5	8~10	6~8	1.5	0.4	10~15
砂层	45	18.0	18	18	5.0	0.3	160~200

注： q_{ju} 为锚固体极限摩阻力。

2 有限元计算模式

为展开软土基坑的性状分析，设计如图1所示的标准算例，基坑开挖深度为6.0 m，宽度为50 m。

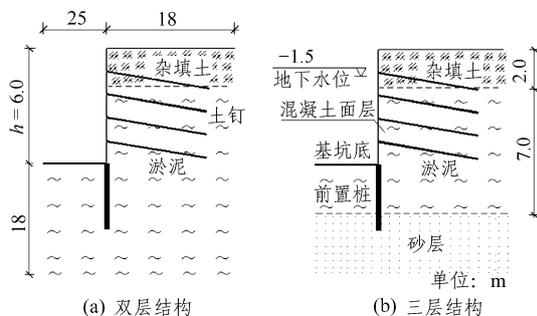


图1 标准算例

Fig.1 Profile for standard calculation case

2.1 模型选用

土体采用1 290个4节点等参元模拟，假设本

构关系符合 Mohr-Coulomb 理想弹塑性模型， $E \approx 2.5 \sim 5.0E_s$ ；土钉($\phi 48 \text{ mm} \times 3.5 \text{ m}$)简化为2节点弹性杆单元，在软土中的极限摩阻力见表1。混凝土面层和木桩设为弹性梁，水泥搅拌桩拟为4节点等参元， $c = 350 \text{ kPa}$ ， $\phi = 25^\circ$ ，其他参数见表2。

表2 支护构件参数表

Table 2 Parameters of retaining components

构件	规格	E/MPa	泊松比 ν	面积 A/m^2
锚管	4排, 1.2 m \times 1.2 m	20 000	0.20	0.007 85
混凝土面层	厚度 100 mm	25 000	0.17	0.120 00
搅拌桩	$\phi 500 \text{ mm}$	500	0.25	-
木桩	$\phi 120 \text{ mm}$, 3根/m	10 000	0.30	0.120 00

2.2 接触面单元

由于土体与结构体变形特性的差异，选用 Goodman 单元对两者的位移关系进行协调，其应力与相对位移的关系式为

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \sigma_r \end{Bmatrix} = [k_0] \{\omega\} = \begin{bmatrix} k_n & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中： $k_n = 50\,000 \text{ kPa/m}^3$ ， $k_s = 150 \text{ kPa/m}^3$ 。

2.3 开挖方式的模拟

本文对软土基坑随支随挖的岛式开挖方式进行模拟，开挖至预定位置后打入锚管，喷射混凝土面层，最后开挖基坑中间土方。水泥搅拌桩一般开挖前预先施工，木桩则在预定深度喷射混凝土面层后直接压入。

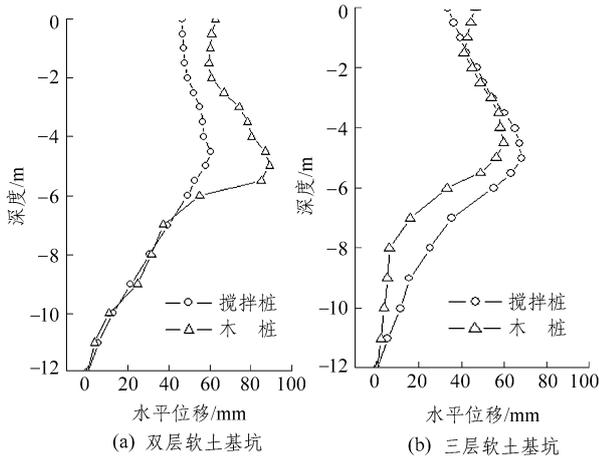
3 性状分析

本文仅针对软土基坑的变形响应展开讨论，通过参数敏感性分析探讨复合土钉支护的工作机理。

3.1 前置桩类型的选择

图2给出在双层软土结构和三层软土结构中分别采用水泥搅拌桩和木桩时的水平位移。对于双层基坑，两者位移差异主要集中于基坑底部，水泥搅拌桩的最大位移要比木桩小30%左右；对于三层基坑，基坑顶部的位移差距不明显，这可能与土钉加固作用的充分发挥有关。

可见，水泥搅拌桩对于深厚淤泥的加固效果要优于砂土，而对于三层结构，木桩的侧限作用得以充分发挥，适宜作为三层基坑的前置桩。上述区别的原因主要在于：前置桩作用主要有“桩体效应”和“重力式挡墙效应”2种，不同前置桩在不同地



注：(1) 搅拌桩厚度 0.5 m，深入基坑底 4 m，土钉长 12 m，倾角 10°；
 (2) 木桩直径 120 mm，进入坑底 4.0 m，3 根/m。

图 2 软土基坑采用不同桩型时的位移比较

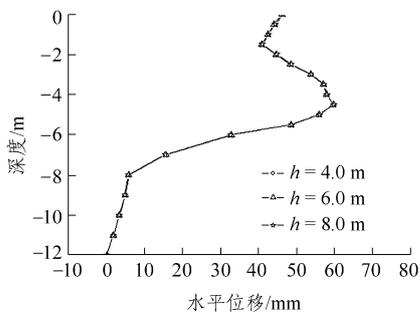
Fig.2 Comparison of pit movements with different piles in soft clay pit

层中发挥的效应不一致。在深厚软土基坑中，木桩“悬浮”在土体中，土体提供的抗力极其有限，起不到抗滑桩的作用；在三层地基中，桩体插入砂层一定深度，相当于有固定端的“悬臂桩”，桩端提供大部分土抗力。对于水泥搅拌桩，在深厚软土中虽然具有一定的桩体效应，更主要的还是重力式挡墙效应，所以其加固优于木桩；而在三层结构中，从性价比来看，不具优越性。

基于上述特点，本文后面分析中，二层软土基坑只分析采用水泥搅拌桩的性状，三层软土基坑只分析采用木桩的性状。

3.2 前置桩长度的影响

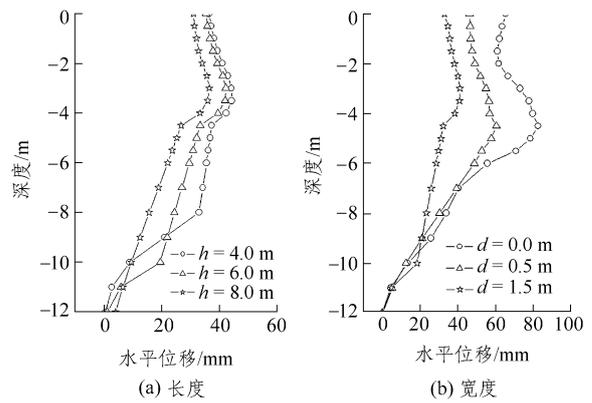
不同地层结构中前置桩的长度对围护结构性状的影响见图 3, 4。从图 3 可以看出，对于三层软土结构，加长木桩并没有使基坑变形得到有效控制，位移减小幅度几乎为 0，这是因为当木桩穿透淤泥层进入砂层中一定深度后，砂土对木桩的嵌固能力



注：(1) 木桩直径 120 mm，3 根/m；(2) 锚管长 12 m，倾角 10°。

图 3 木桩桩长对三层结构变形的影响

Fig.3 Influence of timber-pile length on three-structure movement



注：(1) 水泥搅拌桩厚度 0.5 m；(2) 锚管长 12 m，倾角 10°。

图 4 水泥搅拌桩长度和宽度对软土基坑位移的影响

Fig.4 Effects of movements for foundation pit in soft clay with different length or width of cement-soil mixing pile

不再提高，桩体抵抗土体变形的能力也相应达到极限。因此，工程中应结合位移控制和稳定性需要，合理选择木桩的插入深度，一般可取 4.0~6.0 m。

图 4(a)为增加水泥搅拌桩长度对双层基坑位移的影响。可见，桩长对基坑变形有一定改善作用，淤泥加固越深，基坑侧壁的位移也随之减小。但是，水泥搅拌桩仍然存在“界限长度”问题，即在一定深度后对基坑变形的控制不太明显^[7, 8]。

实际上，增加搅拌桩的深度并不如增加桩的宽度。图 4(b)为增大水泥加固的宽度以考察围护结构变形的特征图。可以看出：当仅采用土钉支护时 ($d = 0$)，基坑变形明显偏大，底部位移鼓出分布；当采用水泥搅拌桩加固时，位移明显减小，这种效果随着桩厚的增加而逐渐增强，这是由于搅拌桩的重力式挡墙效应得到充分发挥， $d = 0.5$ m 时的位移要比 $d = 0$ 时小 25% 左右，而比 $d = 1.5$ m 时大 30% 左右。

3.3 锚管长度的影响

图 5 为不同锚管长度对软土基坑变形的影响。从图中可以看出：土钉长度对 2 类基坑的影响程度具有相似性，加长土钉均使变形显著减小，从 8 m 增大到 12 m 时分别减小 25% 和 40% 左右，但是 12 m 以后继续加长土钉，基坑位移减小微弱。对于软土地基，土钉极限摩阻力较低，潜在滑动面亦宽于一般地基^[4, 9]，土钉应当适当加长至 2 倍基坑开挖深度。

3.4 锚管倾角的影响

图 6 描述了锚管倾角对软土基坑位移的影响，变化趋势与文[10]基本一致。倾角为 10°时双层基坑

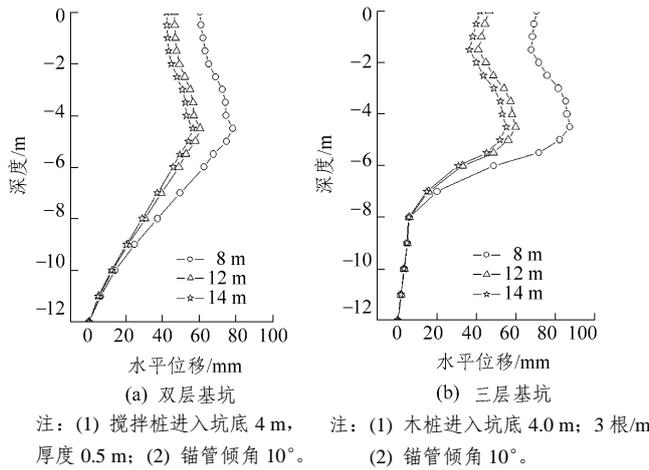


图 5 锚管长度对软土基坑变形的影响

Fig.5 Influence of soil anchor length on foundation pits

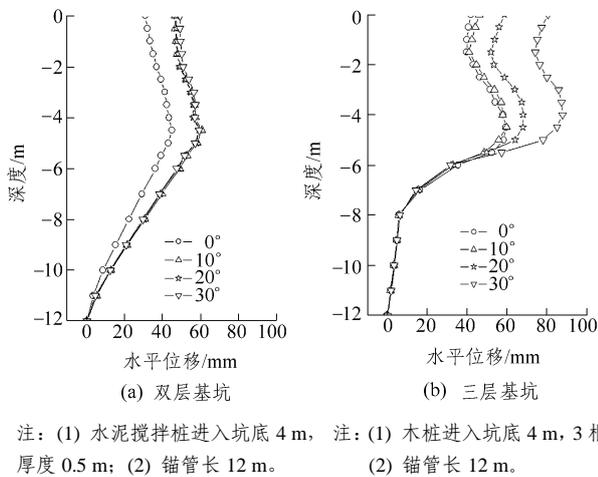


图 6 锚管倾角对软土基坑变形的影响

Fig.6 Influence of soil anchor obliquity on foundation pits

的位移要比倾角为 0°时大 50%左右, 继续增大倾角时位移变化不大, 这与深厚淤泥的存在有关。三层基坑的变形受倾角影响较明显, 随土钉的进一步倾斜而逐渐恶化。计算结果与实际情况存在一定差别, 工程中土钉倾角常取 10~15°左右, 这种差别一方面是施工工艺导致的; 另一方面是计算模式的“理想性”导致的; 实际上土的参数随深度都有一定程度的变化, 本文的程序不能考虑这一点, 认为只要土钉的强度足够, 即可具有一定的角度。

4 工程实例分析

工程一: 福州某 18 层大厦开挖面积 60 m×55 m, 基坑深度约 6.0 m, 土层主要是厚约 2.5 m 的杂填土和 22.4~34 m 厚的流塑淤泥。

工程二: 福州某 16 层住宅楼地下室开挖深

5.8 m, 地质条件为硬壳层 2.0~2.5 m, 淤泥层厚约 8.0 m, 底下为中砂层。

下面根据本文得出的相关结论, 对上述软土基坑进行支护结构选型和优化设计。对于工程一, 地质条件属于双层软土结构, 宜采用“土钉+水泥搅拌桩”复合支护体系, 设置 3 排搅拌桩(ϕ 500), 搭接 100 mm, 进入坑底 4 m; 对于工程二, 由地层结构可采用完成喷锚支护后将木桩压入基坑底部的形式, 木桩桩径 ϕ 120 mm, 3 排/m, 进入坑底 4 m。这两个工程的土钉均采用 ϕ 48 mm×3.5 m 注浆锚管, 第 1~3 排 12 m, 第 4 排 10 m, 倾角取为 10°。

图 7 为工程一、二分别按有限元计算与现场监测得到的基坑水平位移, 通过比较可以看出: 两者最大位移分别相差 2%和 12%, 基本上相吻合, 说明这 2 个工程采用不同前置桩类型都取得了成功。

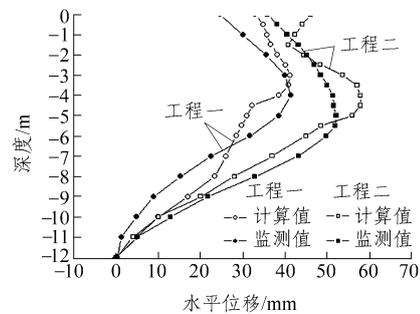


图 7 有限元计算与实测位移比较

Fig.7 Movements comparison between FEM and field-test

5 结论

(1) 借助有限元对软土基坑的复合土钉支护与地层结构相关关系进行非线性分析是可行的。

(2) 前置桩是影响软土基坑变形性状的最主要因素, 水泥搅拌桩的“重力式挡墙效应”在深厚淤泥中效果甚佳, 适用于双层软土结构, 且增加桩厚要比桩长更有利于控制位移; 而三层软土结构能促进木桩“桩体效应”的发挥, 宜以木桩为前置桩。

(3) 对于软土地基, 由于锚固力较低, 土钉长度应适当加长, 建议取 1.5~2 倍的基坑开挖深度。

参考文献(References):

[1] 吴铭炳. 软土地基土钉支护研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 687 - 690.(Wu Mingbing. The study for soil nailing in soft clay foundation excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 687 - 690.(in Chinese))

[2] 宋二祥, 邱 玥. 基坑复合土钉支护的有限元分析[J]. 岩土力学,

- 2001, 22(3): 241 - 244.(Song Erxiang, Qiu Yue. Finite element analysis of composite soil nailing for excavation support[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(3): 241 - 244.(in Chinese))
- [3] 龚晓南. 土钉和复合土钉支护若干问题[J]. 土木工程学报, 2003, 36(10): 80 - 83.(Gong Xiaonan. Some problems on soil nailing and composite soil nailing[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(10): 80 - 83.(in Chinese))
- [4] Wurster D W. Soil nailing walls of many facades[J]. Geosupport, 2004, 135(2): 66 - 68.
- [5] 吴铭炳, 罗河炎, 林胜天. 土锚在福州深基坑支护中的应用[J]. 福建建筑, 1996, 51(增刊): 86 - 88.(Wu Mingbing, Luo Heyan, Lin Shengtian. Application of the soil nailing for deep foundation pit in Fuzhou[J]. Fujian Construction, 1996, 51(Supp.): 86 - 88.(in Chinese))
- [6] 熊传祥, 黄伟达. 某软土基坑复合土钉支护结构失稳分析与处理[J]. 岩土力学, 2004, 25(增 2): 468 - 471.(Xiong Chuanxiang, Huang Weida. Instability analysis and treatment of a landslide of composite soil nailed wall in soft clay excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Supp.2): 468 - 471.(in Chinese))
- [7] Suksun H, Norihiko M, Nagaraj T S. Clay-water/ cement ration identity for cement admixed soft clays[J]. J. Geotech. and Geoenviron. Eng., 2005, 131(2): 187 - 192.
- [8] Minura N, Horpibulsuk S, Nagaraj T S. Engineering behaviour of cement stabilized clay at high water content[J]. Soils and Foundations, 2001, 41(5), 33 - 45.
- [9] 吴铭炳, 侯伟生. 软土基坑土钉支护设计计算方法[A]. 见: 史佩栋编. 21 世纪高层建筑基础工程[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. 572 - 579.(Wu Mingbing, Hou Weisheng. Design and calculation method for soil nailing support of soft clay[A]. In: Shi Peidong ed. Foundation Engineering of High-rise Building in 21st Century[C]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000. 572 - 579.(in Chinese))
- [10] 俞季民, 邹 勇. 土钉支护结构的模型试验研究[J]. 土工基础, 1998, 12(1): 14 - 19.(Yu Jimin, Zou Yong. Investigation of soil nailing by laboratory tests[J]. Soil Engineering and Foundation, 1998, 12(1): 14 - 19.(in Chinese))