

文章编号: 1000-7598-(2007)10-2178-05

土钉基坑支护的空间效应研究

吴志敏, 屠毓敏

(浙江大学土木工程学系, 杭州 310027)

摘 要: 利用三维弹塑性模型研究了土钉基坑支护的空间效应, 着重对深基坑工程中的阴角、阳角及分段分层开挖等问题进行了计算分析。结果表明, 基坑的阴角能大大降低基坑位移和土钉轴力, 其影响范围大于开挖深度, 直立开挖面的阴角效应比放坡开挖面时的要大; 阳角处的位移及土钉轴力明显增大, 其影响范围延伸至3倍基坑开挖深度; 分段分层开挖支护能充分利用土钉支护的空间效应, 其影响范围接近于基坑开挖深度。

关 键 词: 深基坑; 土钉支护; 空间效应; 有限元; 弹塑性分析

中图分类号: TU 472.99

文献标识码: A

Space effect of soil-nailing excavation protection

WU Zhi-min, TU Yu-min

(Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A three-dimension elastoplastic model had been developed to study the space effect of the soil-nailing excavation protection. The positive corner effect, negative corner effect and layered excavation were emphatically analyzed. The researches showed that: the negative corner of excavation could reduce the displacement of excavation and the force of soil-nail; and its influence was once more than the depth of the excavation; meanwhile, the displacement of the excavation and the force of soil-nailing were much larger in the positive corner; and its influence is near to 3 times of the depth of the excavation; the space effect of soil-nailing pit could be used plenarily by layered excavation; its influence was near to the depth of the excavation. It was proved that three-dimension numeric analysis of the soil-nail structure was very useable.

Key words: deep excavation; soil-nailing protection; space effect; finite element; elastoplastic analysis

1 概 述

深基坑土钉支护是一种以充分利用土体的自支能力为出发点, 通过在土体中按一定的间距和长度设置土钉, 辅以钢筋网喷射混凝土面层, 并与土钉和土体三者的协同工作来维持基坑或边坡稳定的支护结构型式, 它弥补了土体抗拉、抗剪强度低的弱点, 同时改变了基坑(或土坡)的变形和破坏性状, 以提高地基土的整体刚度和稳定性, 确保基坑的稳定。由于土钉墙具有造价低廉、施工迅捷、施工现场文明、支护质量高、能适用于多种地质条件等优点, 已在基坑支护和边坡加固中得到广泛应用。

在土钉墙基坑支护结构设计中, 一般均按《建

筑基坑支护技术规程》^[1](JGJ120-99)(简称《规程》)的要求进行稳定性分析和土钉抗拔承载力的验算, 但设计中均将基坑处理为平面应变问题。然而, 土钉基坑支护结构特点决定了其明显的三维特征, 同时工程中的基坑形状常存在着阴角和阳角, 在设计中应尽量避免直角阳角的产生, 而通常可利用阴角的空间效应以节省工程造价; 在基坑开挖时常采用分段分层开挖, 有利于基坑的稳定。严格地说, 基坑问题是一个三维问题, 应用三维的方法进行基坑设计。

土钉基坑支护结构的三维分析愈来愈多地受到工程界的关注, 张明聚、宋二祥等(1998年)^[2]利用三维非线性有限元模型模拟基坑开挖和土钉支护的施工过程, 揭示了土钉支护的加固作用和工作

性能；屠毓敏、金志玉（2005 年）^[3] 利用土拱效应原理研究了土钉支护结构的整体稳定性。然而对土钉基坑支护中普遍存在的问题，如基坑的分段分层开挖，基坑的阳角和阴角的空间效应等，则研究甚少。为此，本文利用三维有限元弹塑性模型模拟这些工程现象，以揭示土钉支护结构的空间效应，为工程设计提供理论依据，并供工程设计人员参考。

2 计算假定

在进行土钉支护结构三维有限元分析时，假定基坑开挖深度为 6.0 m，土钉长度为 8.0 m，直径为 100 mm，土钉垂直方向间距 1.5 m，水平间距 1.1 m，呈梅花型布置。研究对象为沿基坑周边（水平）方向的 40.0 m 范围，阳角和阴角两侧各 20.0 m，分段分层开挖时高低层的水平长度各为 10.0 m。

地基土为 Mohr-Coulomb 材料，土钉和喷射混凝土面层均为线弹性材料。土的计算参数为：强度指标 $c = 10 \text{ kPa}$ ， $\varphi = 25^\circ$ ，天然重度 $\gamma = 19.0 \text{ kN/m}^3$ ，泊松比 $\mu = 0.35$ ，弹性模量 $E = 1.6 \text{ MPa}$ ，土钉及面层计算参数列于表 1。

表 1 土钉、面层计算参数表
Table 1 Parameters of soil-nail and surface

土钉参数		面层参数	
土钉直径/m	0.10	厚度/m	0.1
倾角/(°)	0	抗压强度/kPa	1.25e+4
弹性模量/kPa	2.0e+8	弹性模量/kPa	2.55e+7
屈服强度/kPa	3.1e+5	泊松比	0.25

土体和面层均采用 8 节点六面体等参单元。土钉采用杆系单元。为模拟土钉与土之间的黏结滑移，土钉节点与相邻的土体节点间采用了双弹簧联结单元。

3 土钉支护中的阴角效应

以下分析时假定阴角为 90° 。

3.1 基坑垂直开挖面的阴角效应

首先对垂直开挖面的基坑进行模拟分析，计算网格见图 1。基坑开挖至设计深度（6.0 m）时各剖面的水平位移如图 2 所示，第 2 排土钉的轴力分布如图 3 所示。

由图 2 可知，离基坑阴角越近的地方坑壁的水平位移越小，到离基坑阴角 7.0 m 以后，坑壁的水平位移相差很小；图 3 的轴力分布可知，土钉的轴力呈中间大、两头小的分布规律，距阴角愈近，土钉轴力愈小，当距阴角 6.0 m 时，轴力变化则较小。

也就是说基坑开挖面为垂直时阴角的空间效应影响范围可达 1.0 倍的开挖深度以上。

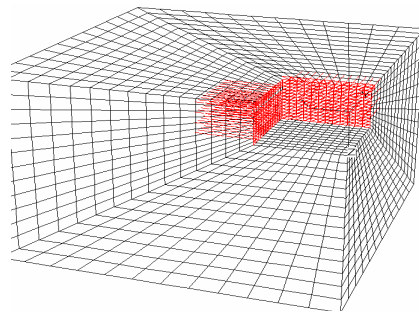


图 1 阴角基坑计算网格

Fig.1 The FEM mesh of negative corner pit

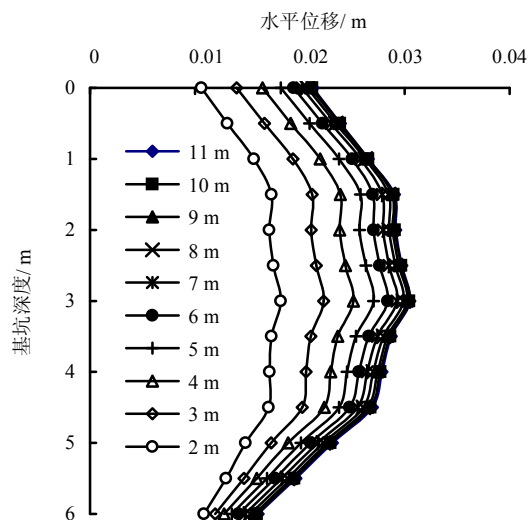


图 2 离开边角各处坑壁水平位移图

Fig.2 Horizontal displacements of the pit wall of the sections away from the corner

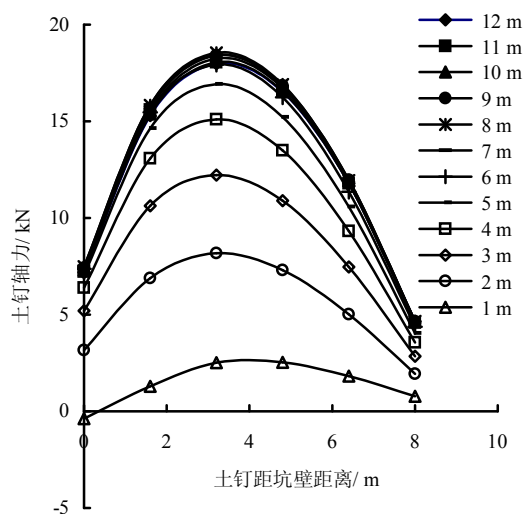


图 3 第 2 排土钉轴力分布

Fig.3 The soil-nail forces of the second row

3.2 基坑放坡开挖面的阴角效应

假定土钉墙的开挖边坡面的坡度为 1:0.5, 以下对此种阴角进行分析。

从图 4、图 5 可以看出, 放坡开挖的阴角影响范围和垂直开挖相差不大, 但是效果不如垂直开挖; 比较图 2~5 就可以看出, 垂直开挖土钉内力和水平位移沿基坑长度方向变化速率较大, 而放坡后则变化较缓; 这与放坡开挖本身能有效地减少基坑坑壁的水平位移有关。

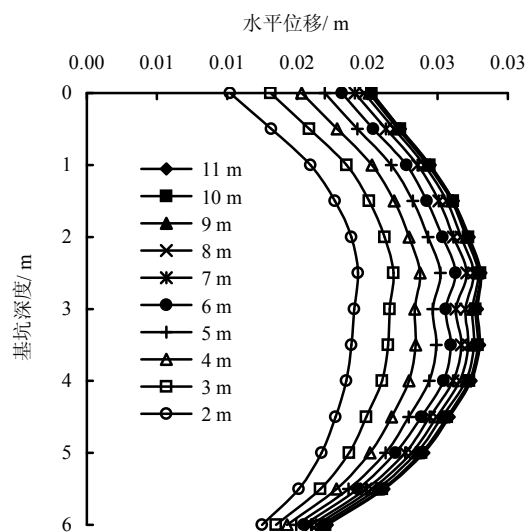


图 4 离开边角各处坑壁水平位移图

Fig.4 Horizontal displacement of the pit wall of the section away from the negative corner

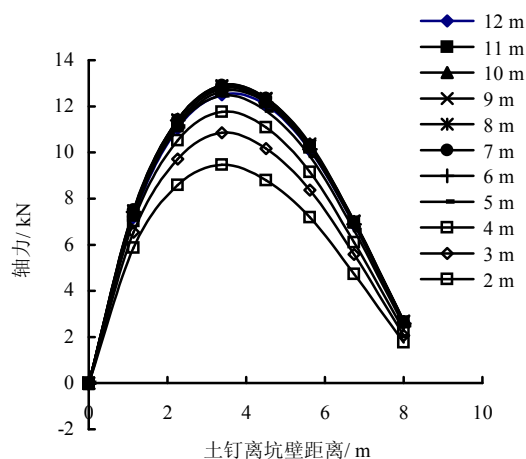


图 5 离开边角第二排土钉轴力图

Fig.5 The soil-nail forces of the second row

4 阳角效应研究

以下分析中假定阳角的角度为 90° , 其计算网格如图 6 所示。

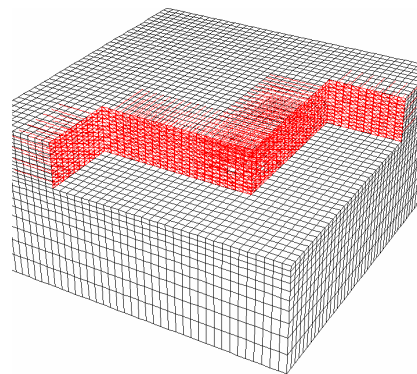


图 6 阳角基坑计算网格

Fig.6 The FEM mesh of positive corner pit

由前面的计算分析可知, 阴角效应有利于基坑支护结构的稳定。然而, 基坑的阳角则相反, 通常基坑阳角处是最危险的, 易发生张拉破坏。图 7、图 8 分别为开挖深度为 6.0 m, 阳角为 90° 时的位移和土钉轴力沿阳角的变化规律。

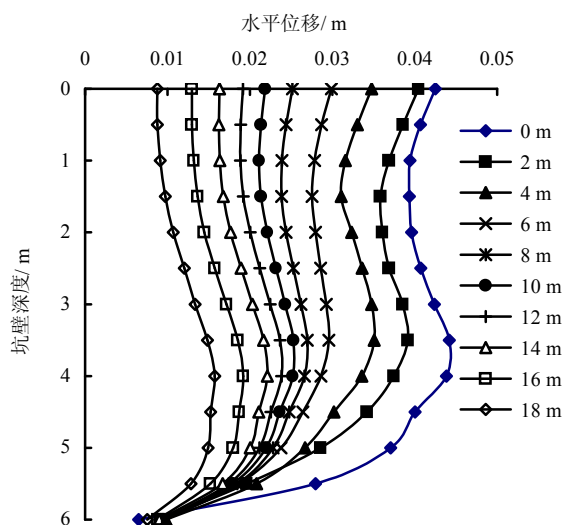


图 7 离阳角各处坑壁水平位移图

Fig.7 Horizontal displacement of the pit wall of the sections away from the positive corner

图 7 为离阳角各断面的位移分布, 其位移分布曲线与阴角情况不同, 在地表面处也产生较大的水平位移, 与基坑最大水平位移相当, 这与在阳角处局部产生张裂破坏有关。与阴角效应相比, 阳角效应的影响范围更大, 其影响范围可达 3.0 倍的开挖深度以上。从土钉的轴力分布规律分析, 在阳角处, 土钉所受的轴力明显增大, 阳角处土钉的最大轴力为距阳角 6.0 m 处的 1.8 倍。

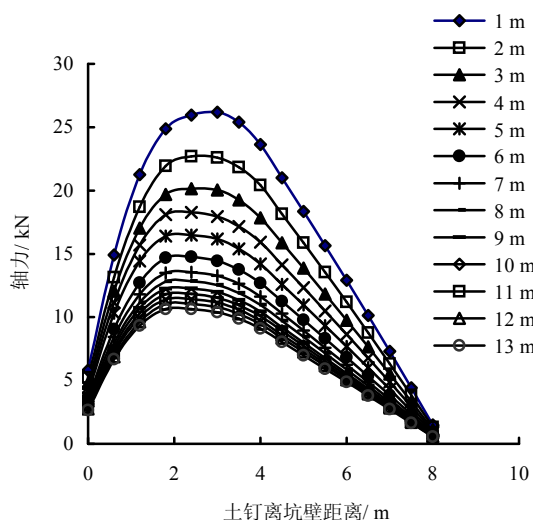


图 8 第 2 排土钉轴力图

Fig.8 The soil-nail forces of the second row

5 分段分层开挖模拟

对于位于软弱地基中的土钉基坑支护结构，土钉墙需分层施工，只有当土钉支护结构达到一定强度后，方可开挖下一层土体，即所谓的基坑分层开挖；另一方面，对于位于软弱地基中的土钉支护结构，由于地基土的自承载能力极差，在基坑开挖时常需充分利用基坑支护结构的空间效应，进行分段开挖，基坑的分段分层开挖常作为确保土钉墙基坑支护结构稳定的必要施工措施，分段长度的确定与地质条件、基坑开挖深度及土钉支护结构密切相关，一般需根据施工现场的实际情况进行确定和调整。基于土钉支护结构的分段分层的施工特点，以下进行分段分层开挖的模拟，计算时取开挖长度为 20.0 m，分段长度为 10 m。计算网格见图 9。

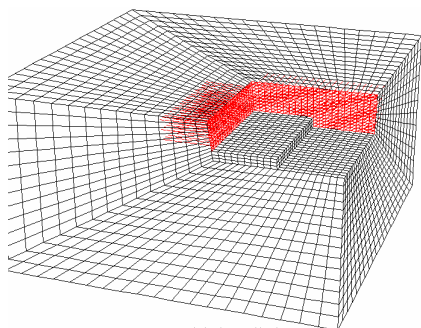


图 9 基坑分段分层开挖计算网格

Fig.9 The FEM mesh of layered excavation pit

图 10，图 11 为分段分层开挖时基坑水平位移和土钉轴力分布，图中 10 m 表示分段分层开挖的分界线，即小于 10 m 时开挖深度为 4.8 m，大于 10 m 时开挖深度为 6.0 m。由图中可知，开挖深度

由 4.8 m 时，过渡到 6.0 m 时，各剖面的位移逐渐递增，当开挖深度为 4.8 m、离分层剖面 8.0 m 处的最大水平位移为 2.06 cm。而开挖深度为 6.0 m 时，离分层剖面 8.0 m 处的最大水平位移为 3.02 cm，相差约 47 %。图 11 揭示了土钉轴力也具有类似的规律。综合图 10 和图 11，进一步发现分层开挖的空间效应的影响范围在 5.0 m 左右。

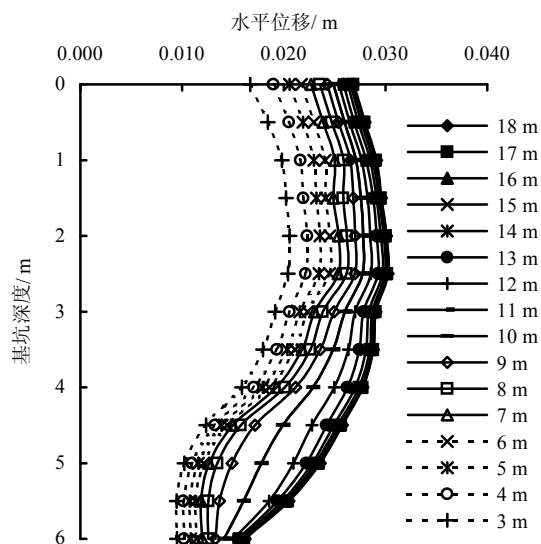


图 10 分段开挖离开边角各处坑壁水平位移

Fig.10 Horizontal displacement of the pit wall of the sections away from the layered excavation corner

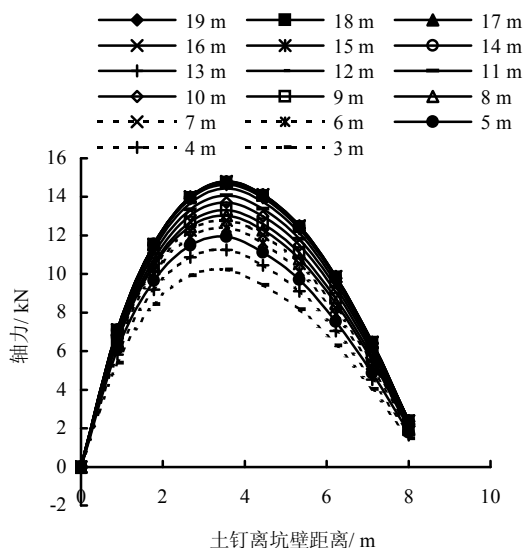


图 11 分段开挖第二排土钉轴力图

Fig.11 The soil-nail forces of the second row of layered excavation

6 工程实例分析

温州大剧院基坑开挖深度分为 6.35, 6.85, 10.55, 11.55 m，其中开挖深度为 6.35 m 和 6.85 m 的采用土钉墙+超前锚杆支护，对开挖深度为

10.55 m 的采用土钉墙+灌注排桩的基坑支护结构型式,当基坑开挖深度为 10.55 m,且在基坑开挖至标高-7.25 m(即开挖深度为 6.35 m)处存在平台时,则采用土钉墙+疏排桩的基坑支护结构型式^[6]。

由工程地质勘察报告可得基坑开挖范围内的场地土的主要物理力学性指标如表 2 所列。

表 2 土层的物理力学性指标

Table 2 Physico-mechanical property of field soils

土层名称	层厚 / m	重度 $\gamma / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	凝聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)
黏土	1.9	18.83	7.3	16.2
淤泥	14.4	16.58	5.7	10.5
淤泥	7.0	16.63	6.5	12.4

开挖深度为 6.85 m 的土钉墙基坑结构剖面如图 12 所示。

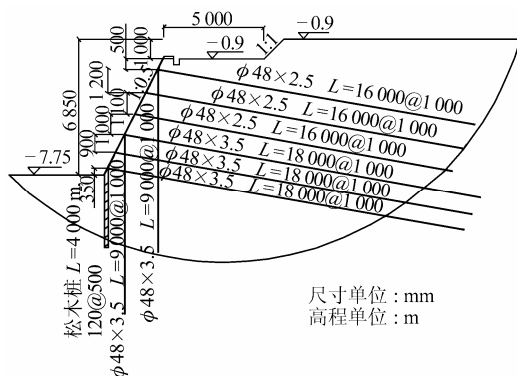


图 12 土钉墙超前支护剖面

Fig.12 Forpoling protection section of the soil-nailing wall

地基土为 Mohr-coulomb 材料,土的计算参数参见表 2,模量 $E=2.0 \text{ MPa}$,泊松比 $\mu=0.45$;土钉采用 cable 单元模拟,面层采用 shell 单元模拟,均为线弹性材料。

图 13 为三维数值分析所得的土钉墙基坑支护结构水平位移分布,由图可知,基坑水平位移具有很好的一致性,实测最大水平位移为 80.59 mm,而三维数值分析所得值为 87.0 mm,其相对误差仅为 8%。

7 结 论

本文对基坑工程中常见的阴角和阳角的空间效应问题以及分段分层开挖的空间效应问题进行了三维有限元分析,通过计算分析,可得出如下结论:

(1) 基坑支护中的阴角有利于基坑的稳定,其空间效应的影响范围在 1 倍开挖深度以上,直立开挖面的空间效应更为显著。

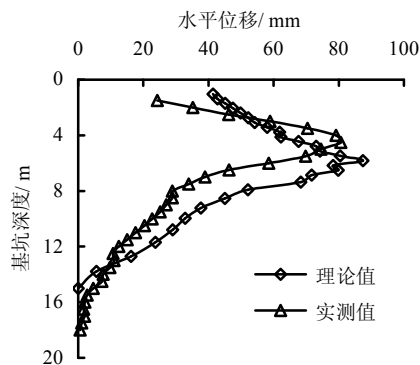


图 13 土钉支护结构水平位移比较

Fig.13 Comparison of horizontal displacements of the soil-nail structure

(2) 基坑开挖中阳角的存在对基坑的稳定性极为不利,而且阳角的影响范围很大,在本文的算例中,影响范围达 3 倍开挖深度,为此在工程中应尽量避免。

(3) 采用分段分层开挖,可以充分利用基坑开挖的空间效应。这已被工程界所公认,而大量的基坑支护结构的失事也证明了这点。

通过工程实例分析可知,三维数值分析结果与实测值具有很好的一致性,利用三维数值分析方法进行土钉墙分析是可行的。

参 考 文 献

- [1] JGJ120-99, 建筑基坑支护技术规程[S].
- [2] 张明聚, 宋二祥, 陈肇元, 等. 土钉支护的三维非线性有限元分析[J]. 工程力学, 1998, (增刊): 341-346. ZHANG Ming-ju, SONG Er-xiang, CHEN Zhao-yuan, et al. 3-D nonlinear analysis of soil-nailing protection[J]. Engineering Mechanics, 1998, (Supp.): 341-346.
- [3] 屠毓敏, 金志玉. 基于土拱效应的土钉支护结构稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2005, (7): 792-795. TU Yu-min, JIN Zhi-yue. Soil-nailing protection structure stability analysis based on the soil-arch effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, (7): 792-795.
- [4] 俞建霖, 龚晓南. 深基坑工程的空间性状分析[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 21-25. YU Jian-ling, GONG Xiao-nan. Spatial behavior analysis of deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, (1): 21-25.
- [5] 杨雪强, 刘祖德. 论深基坑支护的空间效应[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 74-78. YANG Xue-qiang, LIU Zu-de. Research about spatial effect of deep pit supposing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(2): 74-78.
- [6] 屠毓敏, 阮长青, 赵向前, 等. 温州大剧院深基坑支护技术[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 59-62. TU Yu-min, RUAN Chang-qing, ZHAO Xiang-qian, et al. Protecting technique for deep excavation of Wenzhou Grand Theater[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, (1): 59-62.