

温州大剧院深基坑支护技术

屠毓敏¹, 阮长青², 赵向前³, 李士明³

(1. 浙江大学土木系, 浙江 杭州 310027; 2. 温州城市中心区建设指挥部, 浙江 温州 325003; 3. 中国建设集团第一工程局, 北京 100045)

摘要:温州大剧院深基坑位于深厚的淤泥土地层中, 开挖深度达 10.55 m, 在基坑支护结构设计时, 充分利用该工程的结构布置特点, 以土钉墙作为主要基坑支护结构型式, 分别采用土钉墙超前支护、土钉墙+疏排桩支护及土钉墙+排桩+支撑的复合式支护等多种支护结构。经现场监测, 实测最大水平位移仅为 80 mm, 且大部分监测点的最大水平位移均小于 40 mm, 其它监测指标均在设计的控制标准之内, 取得了令人满意的基坑支护效果和经济效益。本文详细介绍本工程基坑的设计思路及结构特点, 以供类似工程借鉴。

关键词:深基坑; 超前支护; 疏排桩; 土钉墙

中图分类号: TU473.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)01-0059-04

作者简介:屠毓敏(1965-), 男, 副教授, 主要从事岩土工程方面的教学和科研工作。

Protecting technique for deep excavation of Wenzhou Grand Theater

TU Yu-min¹, RUAN Chang-qing², ZHAO Xiang-qian³, LI Shi-ming³

(1. Civil Engineering Department of Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Headquarters of Wenzhou Urban Center Area Construction, Wenzhou 325003, China; 3. The First Engineering Bureau of China's Construction Groups, Beijing 100045, China)

Abstract: Deep excavation of Wenzhou Grand Theater was located in the deep silt layer, which was dug 10.55 m in depth. In the design of the protective structure of excavation, the characteristics of the engineering arrangement were well utilized. The soil-nailing wall was the main type of pit-protection structure, meanwhile, some compound types of protection were adopted, such as soil-nailing with bracing soil-nailing with scattered piles and soil-nailing with rows of piles and struts. The largest displacement monitored in the field, was only 80 mm. Other monitored indexes were all within the standard limit of the design. The design idea and the structural characteristics of the excavation engineering were presented in detail in order to provide reference for the similar engineering projects.

Key words: deep excavation; forepoling protection; scattering row piles; soil-nailing wall

0 工程概况

温州大剧院系浙江省“五大百亿”工程, 由加拿大 PPA 事务所和上海同济大学建筑设计研究院设计, 上海建浩工程顾问有限公司监理, 中建一局总承包。温州大剧院工程占地面积为 39 亩, 总建筑面积 30993 m², 地下 2 层, 地上 7 层; 整个建筑呈金鲤鱼尾部造型, 体型复杂、施工难度极大。

地下室基坑平面尺寸为 106 m×75 m, 基坑开挖深度分为 6.35、6.85、10.55、11.55 m, 其中开挖深度为 10.55 m 的深基坑占总开挖面积 1/3 以上, 局部集水井开挖深度为 11.55 m, 基坑开挖平面如图 1 所示。

在基坑开挖深度范围内土层剖面主要由素填土、粘土、淤泥土等地层组成。其中粘土为地表硬壳层, 层厚仅为 2.0 m 左右; 其下为深厚的淤泥, 淤泥土层厚达 20 m 以上, 土性呈流塑状、高压缩性、高灵敏度。

由工程地质勘察报告可得基坑开挖范围内的场地的主要物理力学性指标如表 1 所列。

表 1 土层的物理力学性指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soil

土层名称	层厚 /m	重度 γ /(kN·m ⁻³)	粘聚力 /kPa	内摩擦 角/(°)
粘土	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

根据本工程基坑开挖的深度、结构特点及温州市区基坑支护结构工程的应用情况, 确定本工程的基坑支护结构类型, 其结构选型如下: 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。本工程经过精心设计及精心组织施工,取得了圆满的基坑支护效果,与同类基坑支护结构工程相比,其工程费用节省约 40%,取得了相当可观的经济效益;同时在设计中,笔者将超前锚杆^[2]及疏排桩^[3]在土钉支护中的抗滑作用的设计理论应用于工程设计中,并得到工程实践的验证。为进一步认识土钉支护在淤泥土层深基坑支护中的应用,提高土钉支护结构的设计水准,本文介绍该工程的设计思路,以供岩土工程技术人员借鉴。

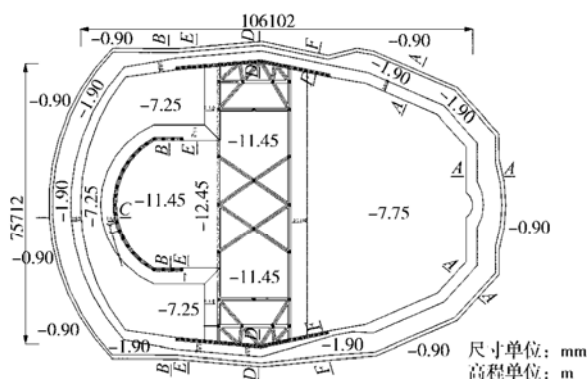


图 1 基坑支护结构平面布置图

Fig. 1 Arrangement of protective structure for excavation

1 土钉墙+超前锚杆支护技术

当基坑开挖深度为 6.35 m 和 6.85 m 时,采用土钉墙+超前锚杆支护的基坑支护结构型式,如图 1 中的 A—A、B—B、C—C 剖面,其土钉墙结构剖面如图 2、4 所示。

由图 2 可知,当基坑开挖深度为 6.85 m 时,土钉墙由上下 6 道土钉组成,其长度依次为 16.0、16.0、16.0、18.0、18.0、18.0 m,其垂直间距依次为 1200、1100、1000、900、800 mm,水平间距均为 1000 mm;当施工第 1 道和第 4 道土钉前,先后施工 2 道超前锚杆,其长度均为 9.0 m,间距为 1000 mm。土钉经注浆后的直径为 150 mm,对位于淤泥层中的长度为 15.0 m 的土钉,其设计极限抗拔力为 114 kN,为此应控制注浆质量,控制每米水泥用量为 25 kg。

由《建筑基坑支护技术规程》^[1]可得,当不考虑超前锚杆的抗滑作用时,开挖深度为 6.0 m 和 6.85 m 时的土钉墙稳定性安全系数依次为 1.195 和 1.152,当土钉墙施工完毕时,其整体稳定性安全系数为 1.211。

若考虑土钉墙中超前锚杆对土钉墙的抗滑作用,则由文献^[2]可得,作用于超前锚杆上的土压力式为

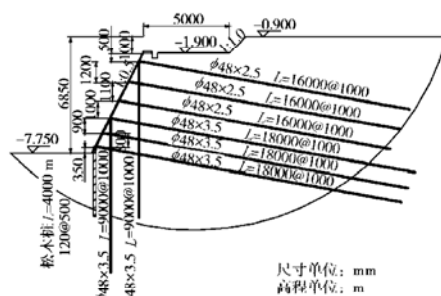


图 2 土钉墙超前支护剖面

Fig. 2 Protection of the soil-nailing wall

$$p(z) = cD_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{(N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1)} \left[\frac{1}{N_\phi \tan \phi} \right. \\ \left. \left\{ \exp \left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} N_\phi \tan \phi \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) \right) - \right. \right. \\ \left. \left. 2N_\phi^{1/2} \tan \phi - 1 \right\} + \frac{2 \tan \phi + 2N_\phi^{1/2} + N_\phi^{-1/2}}{N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1} \right] - \\ c \left\{ D_1 \frac{2 \tan \phi + 2N_\phi^{1/2} + N_\phi^{-1/2}}{N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1} - 2D_2 N_\phi^{-1/2} \right\} + \\ \frac{\gamma z}{N_\phi} \left\{ D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{(N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1)} \right. \\ \left. \exp \left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} N_\phi \tan \phi \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) \right) - D_2 \right\} \quad (1)$$

式中 $N_\phi = \tan^2(\pi/4 + \phi/2)$; D_1 、 D_2 分别为土钉的中心距及净距; c 、 ϕ 为地基土的抗剪强度指标; γ 为地基土的重度。

由此计算以上 3 种工况下的作用于超前锚杆上的土压力,其分布如图 3 所示,由其反作用力对土钉墙的抗倾覆力矩为 85.758、104.767 和 104.767 kN·m/m,则土钉墙的整体稳定性安全系数依次为 1.339、1.311 和 1.368,均能满足二级基坑侧壁支护的安全性要求。

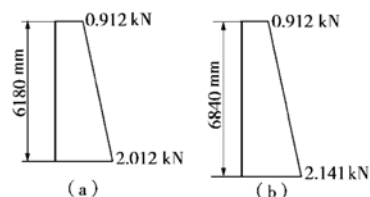


图 3 超前锚杆上的土压力分布

Fig. 3 Distribution of lateral earth pressure

2 土钉墙+疏排桩支护技术

当基坑开挖深度为 10.55 m、且在-7.25 m 高程存在平台时,则采用土钉墙+疏排桩的基坑支护结构型式,如图 1 中的 B—B 和 C—C 剖面。由图 1 可知,基坑平面呈圆拱形,其平台的宽度为从 6.527 m (拱顶) 至 13.459 m (拱脚) 渐变,且平台在拱顶较窄而在拱脚处较宽,这为基坑支护结构设计提供较为有利

的平面布置型式。

图4为B—B(C—C)结构剖面图, 由图可见, 上一级基坑支护结构为土钉墙, 其由5道土钉和2道超前锚杆构成, 下一级基坑支护结构为土钉墙+疏排桩的基坑支护结构型式, 土钉的长度依次为9.0、12.0和9.0 m, 疏排桩采用桩径为800 mm的钻孔灌注桩, 其间距为2.419 m, 长度为13.4 m(10.4 m), 最下一道土钉锚固于疏排桩上的围檩内。

以下对平台宽度分别为6.527 m和13.459 m的情况进行整体稳定性分析, 计算下一级基坑开挖时的稳定性安全系数。

由式(1)可得, 作用于疏排桩上的土压力分布如图5所示。

当平台宽度为6.527 m、且无疏排桩时, 分层开挖至深度为8.15、9.35和10.55 m时的稳定性安全系数分别为1.141、1.032和0.947, 其整体稳定性安全系数为0.953; 若设置疏排桩, 则相应的稳定性安全系数提高至1.575、1.369、1.213和1.221。

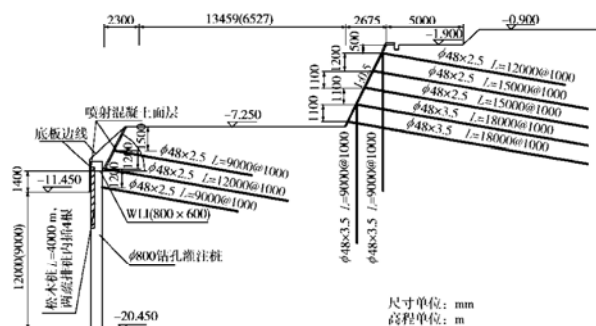


图4 疏排桩基坑支护剖面

Fig. 4 The section of the scattered piles

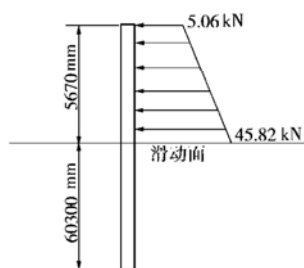


图5 疏排桩土压力分析

Fig. 5 Earth pressure on the scattered piles

当平台宽度为13.459 m、且无疏排桩时, 开挖深度为8.15、9.35和10.55 m的稳定性安全系数分别为1.340、1.208和1.107, 其整体稳定性安全系数为1.120; 若设置疏排桩, 则相应的稳定性安全系数提高至1.736、1.513、324和1.325。

由上分析可知, 当平台宽度为6.527 m时, 基坑支护结构的稳定性安全系数偏小, 而当平台宽度为13.459 m时, 其稳定安全系数稍大。根据基坑支护结

构的平面布置特点, 其基坑支护结构平面呈圆弧拱型, 而在圆弧拱顶处平台宽度最小(6.527 m), 在圆弧拱脚处平台宽度较大(13.459 m)。为此在基坑支护结构设计时可利用基坑支护结构的空间效应, 使整个体系协调工作, 从而达到基坑支护体系的整体稳定。

3 土钉墙+排桩+支撑支护技术

对于基坑开挖深度为10.55 m、且无卸载平台时, 则采用土钉墙+排桩+支撑的基坑支护结构体系。

图6为D—D剖面的基坑支护结构剖面图, 上部开挖深度6.35 m范围内采用土钉墙基坑支护结构, 下部则采用排桩加支撑的基坑支护结构型式。在基坑支护结构施工时, 先施工支护排桩, 由于排桩的存在, 在施工上部土钉墙时, 可不设置超前锚杆, 则上部土钉墙由6层土钉组成, 其长度依次为12、12、15、15、18和18 m, 其中最下层土钉锚固于支护排桩的围檩内; 排桩直径为800, 间距为1000 mm, 长度为20.0 m; 则各分层开挖阶段的稳定性安全系数依次为: 1.218、1.368、1.224、1.295、1.404、1.571和1.378。

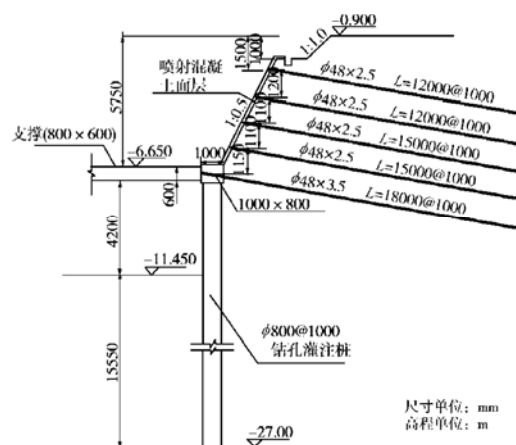


图6 土钉墙+排桩+支撑基坑支护结构剖面

Fig. 6 The protective structure of soil-nailing wall and with rows of piles and struts

根据《建筑基坑支护技术规程》^[1]计算作用于灌注排桩上的土压力, 由此可得支撑点设计轴力为607.58 kN/m, 当基坑开挖至设计标高且加设支撑时, 作用于灌注桩上最大弯矩为307.031 kN·m/m, 位于基坑面以下12.75 m处; 当第二层地下室底板施工结束, 支撑系统拆除时, 桩身的最大弯矩为674.6 kN·m/m。支撑体系采用钢筋混凝土支撑, 按平面有限元进行计算。

4 基坑安全监测

由于本工程基坑支护结构设计时, 运用了新的设计方法, 为此在基坑施工时对其施工期的施工监测显

得更为重要。

为确保基坑支护结构的安全运行,在基坑支护结构施工过程中对基坑的深层位移、支护排桩桩身应力、支撑轴力分别进行了监测。其中深层位移布设 10 处,桩身应力布设 2 根排桩各 5 个断面,支撑轴力 2 点;同时对位于淤泥土层中的土钉进行了现场抗拔承载力试验。

由于设计疏排桩时,疏排桩的作用主要为满足其整体稳定性,而疏排桩上所产生的弯矩较小,为此不监测疏排桩桩身应力。

根据现场监测,对于开挖深度为 6.85 m 的基坑,采用土钉墙+超前支护的基坑支护结构型式,共布置 5 根测斜管,其测点的最大水平位移为 79.33 mm,其余 4 点的最大水平位移均小于 40 mm;就土钉墙+疏排桩的基坑支护结构而言(总开挖深度达 10.55 m),其最大水平位移为 80.2 mm,其余 2 点均小于 30 mm;对于土钉墙+排桩的基坑支护结构型式(总开挖深度为 10.55),其最大水平位移依次为 24.52 mm 和 55.25 mm。

分析以上实测结果,可得:就土钉墙+超前支护而言,其最大水平位移基本能控制在 0.5% 的开挖深度范围内,由于排桩(包括疏排桩)的存在,具有很大的刚度,能够有效控制基坑的水平位移。某些测点基坑水平位移偏大的原因主要在于基坑周边施工荷载的频繁作用、地下水的活动所致。

在基坑施工过程中,还对桩身应力和支撑轴力进行了监测,实测桩身最大弯矩为 468 kN/m(位于桩身下 15.0 m 处);实测支撑轴力为 3126 kN,实测应力均在设计的控制范围之内。

任意选取位于淤泥土层中的长度为 15.0 m 和 18.0 m 的进行现场抗拔承载力试验,其实测极限抗拔力依次为 118 kN 和 127 kN,而设计极限抗拔力分别为 114 kN 和 136 kN(此时土钉直径为 150 mm、土钉锚固体的极限摩阻力为 18 kPa),基本能满足设计要求。

5 结 论

本工程基坑开挖深度达 10.55 m,基坑支护结构设计时采用以土钉墙为主,根据不同的基坑平面布置及开挖深度,分别采用了土钉墙+超前支护、土钉墙+疏排桩基坑支护、土钉墙+排桩+支撑的基坑支护体系,设计中运用新的设计理论,并得到了工程实践的验证。

经过施工监测,基坑的深层位移基本能控制在 0.5% H_d (H_d 为基坑开挖深度) 范围内,说明此类基坑设计也能达到二级基坑以上的支护效果,从而进一步说明土钉超前支护能有效地控制基坑位移的产生,从而达到基坑支护结构的安全运行。

在基坑支护结构设计时,应充分利用基坑平面布置及剖面结构上的特点,充分利用基坑支护结构的空间效应,以达到基坑支护结构设计经济、合理。

土钉墙基坑支护结构施工控制是土钉墙基坑支护结构成败的关键,而土钉的注浆质量直接影响到土钉基坑支护的效果,在施工中应予以控制。

参考文献:

- [1] JGJ120-99 建筑基坑支护技术规程[S]. (JGJ120-99. Technical specification for retaining and protection of building foundation excavation[S].)
- [2] 屠毓敏. 土钉支护中超前锚杆的工作机理研究[J]. 岩土力学, 2003,(2):198 - 201,219. (TU Yu-min. Study on working mechanism of forepoling bolts in soil nailing protection[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003,(2):198 - 201,219.)
- [3] 屠毓敏,阮长青. 土钉墙基坑支护中疏排桩抗滑效应研究[J]. 岩土力学, 2005,(4):577 - 579,590. (TU Yu-min, RUAN Chang-qing. Study on anti-sliding effect of the scattered row piles in soil-nailing wall pit-protection[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005,(4):577 - 579,590.)