

带支腿地下连续墙的围护效果及工程应用分析

胡安峰¹, 饶 航^{1,2}, 袁 静³

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,
上海 200092; 3. 浙江省建筑设计研究院, 浙江 杭州 310006)

摘要:作为一种新型围护结构形式, 带支腿地下连续墙已经开始在深基坑工程中应用, 但目前国内外在这个方面的研究还比较匮乏。在杭州黄龙饭店改扩建工程中, 由于部分围护结构插入深度不能满足设计要求, 设计中采用带支腿地下连续墙成功地解决了整幅地下连续墙不能进入中风化基岩层问题, 保证了围护结构的嵌岩深度, 降低了施工难度, 取得了良好的社会效益和经济效益。针对该基坑工程实例, 利用有限元分析软件ABAQUS, 建立了单片带支腿地下连续墙作为围护结构的准三维有限元分析模型。在数值模拟中, 土体采用修正剑桥模型, 模拟实际开挖工况, 将基坑开挖中墙体侧向位移的数值计算结果和监测数据进行了对比, 分析了带支腿地下连续墙的围护效果和支腿中内插型钢的合理刚度问题。

关键词: 支腿; 地下连续墙; 三维有限元法; 墙体变形; 内插型钢; 合理刚度

中图分类号: TU476 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2012)S0-0603-05

作者简介: 胡安峰(1974-), 副教授, 主要从事桩基工程、基坑工程的研究工作。E-mail: anfenghu@zju.edu.cn。

Effectiveness and engineering application of outrigger-type diaphragm walls

HU An-feng¹, RAO Hang^{1,2}, YUAN Jing³

(1. Key Laboratory of Soft Soil and Environmental Geotechnical Engineering, Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design General Institute(Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China;
3. Zhejiang Province Institute of Architectural Design and Research, Hangzhou 310006, China)

Abstract: As a technique for protection of adjacent buildings, the outrigger-type diaphragm wall been applied in deep excavation engineering. But the worldwide researches in this area are still relatively scarce until now. In extension project of Hangzhou Huanglong Hotel, outrigger-type diaphragm walls are adopted to solve the problem of insufficient rock-socketed depth. And thus the rock-socketed depth of support structures in intermediary weathered rock is ensured. Moreover, the construction difficulty is reduced. Good social and economic benefits are gained. Based on the Huanglong excavation case, a 3-D finite element model is presented to simulate the behavior of outrigger-type diaphragm walls by using the software ABAQUS. The behavior of soil is assumed to conform to the modified Cam-clay model, and the actual construction sequence is simulated. The numerical results and monitoring data in the excavation of lateral displacement are compared. The reasonable stiffness of the section steel in the outrigger-type diaphragm walls is also analyzed.

Key words: outrigger; diaphragm wall; 3-D FEM; wall deformation; interpolation type steel; reasonable stiffness

0 引言

随着经济的发展, 高层建筑的地下结构要求越来越复杂, 基坑越来越深。作为一种基坑围护结构, 地下连续墙厚度加厚, 深度加深, 不仅会使工程造价攀升, 施工难度也日益加大。在特殊地层中, 通过在地下连续墙底端设置支腿, 用支腿承担部分水平荷载, 可降低造价和施工难度, 经济和社会效益显著。国外带支腿地下连续墙的设计较少, 国内仅广东省和浙江省开展过类似设计^[1-2], 其中广东省应用时支腿用作增加围护结构在深厚软土地基中的插入深度, 满足基坑

稳定性要求; 浙江省应用时由于基岩埋藏浅, 支腿除满足上述要求外, 还需承担较大的水平荷载。因此, 针对此类工程情况开展相关研究工作, 对类似工程设计理论、积累相应工程经验具有重要的理论和实践意义。

本文以杭州黄龙饭店改扩建工程的基坑为例, 利用有限元分析软件ABAQUS, 建立单片带支腿地下连

基金项目: 浙江省住房和城乡建设厅建设新技术、新产品研制科技推广项目

收稿日期: 2012-08-25

续墙作为围护结构的准三维有限元分析模型，模拟实际开挖工况，分析了带支腿地下连续墙的围护效果和支腿中内插型钢的合理刚度问题，最后对比了基坑开挖中墙体侧向位移的数值结果和监测数据。

1 工程概况

杭州黄龙饭店改扩建工程位于杭州市杭大路东侧，下设 3 层整体地下室，采用钻孔灌注桩基础。基坑呈长条形，尺寸约 $190\text{ m} \times 65\text{ m}$ （见图1）基坑开挖深度为 19.40 m 。

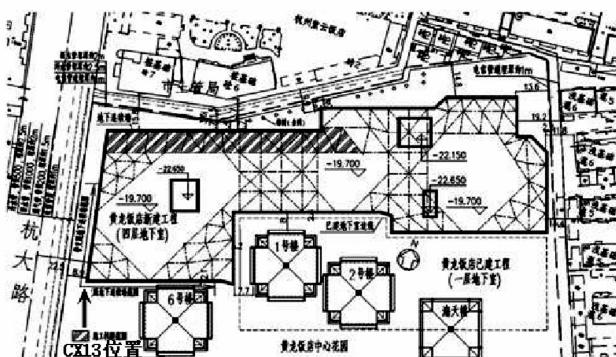


图 1 杭州黄龙饭店改扩建工程总平面图

Fig. 1 Arrangement of project

该地块中局部中风化岩层埋藏较浅，尤其是基坑西南侧位置，中风化基岩距离基坑底仅约 2 m 。同时中风化基岩面起伏较大，给地下连续墙施工带来一定难度。在基岩埋藏较浅部位，设计原要求地下连续墙须进入中风化基岩层不小于 1.18 m 。

综合考虑，在中风化岩层较浅部位采用带支腿地下连续墙方案，即在地下连续墙底下设 2 个支腿，保证支腿进入中风化基岩层一定深度，这样整幅地下连续墙可不进入中风化基岩层，从而减少围护结构的施工难度。图 2 为本工程带支腿地下连续墙围护结构的典型剖面图。

带支腿地下连续墙的设计型式为：全幅连续墙深 21.4 m ，支腿长度 4 m （带型钢），其中支腿嵌入基岩 2 m （见图3和图4）。

2 有限元分析模型

以上述工程实例为背景建立准三维有限元计算模型，取单片地连墙以及周围土体为分析对象，模型尺寸 $100\text{ m} \times 45\text{ m} \times 6\text{ m}$ ，其中开挖区域范围 $30\text{ m} \times 30\text{ m} \times 19.4\text{ m}$ ，有限元网格划分见图5。基坑深度为 19.4 m ，竖直方向设 3 层临时水平内支撑，按支撑施工的顺序分四层开挖，基坑剖面如图6所示，虚线表示每步开挖面，箭头表示支撑位置，支撑点假设在每步开挖面上方 0.45 m 处，支撑的截面积 0.036 m^2 。

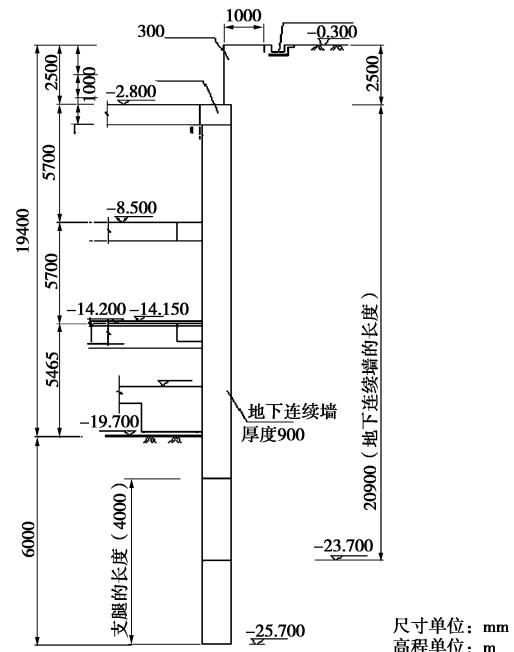


图 2 带支腿地下连续墙围护结构典型剖面

Fig. 2 Section of bracings of outrigger-type diaphragm walls



图 3 带支腿地下连续墙绑扎现场

Fig. 3 The binding site of the outrigger-type diaphragm wall

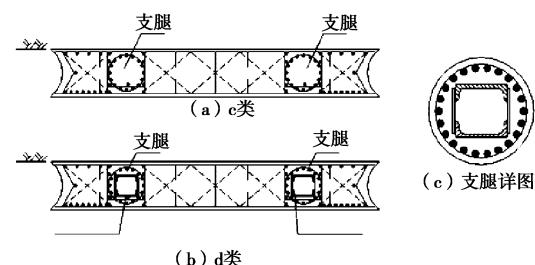


图 4 带支腿地下连续墙平面布置图

Fig. 4 Arrangement of outrigger-type diaphragm wall

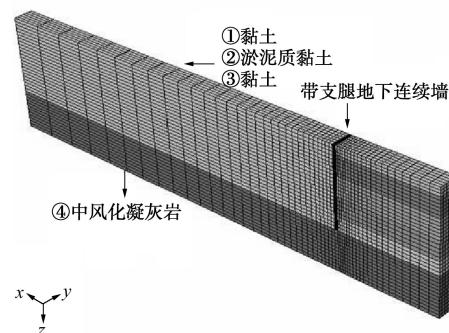


图 5 三维有限元网格图

Fig. 5 3D finite element meshes

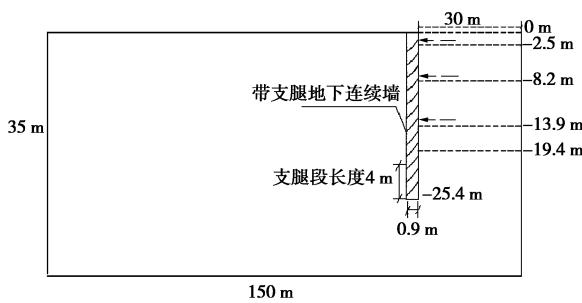


图 6 基坑开挖剖面图

Fig. 6 Cross-section and excavation sequence of pit

地连墙采用厚0.9 m、宽6 m、深度为23.4 m的实体单元, 支腿长度为4 m, 其中支腿采用0.9 m×0.9 m×4 m的方形桩腿。带支腿地下连续墙的模型网格图见图7。

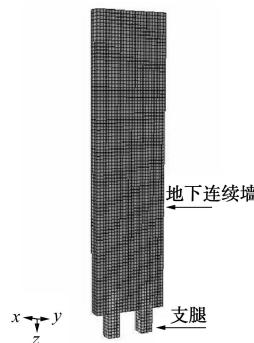


图 7 带支腿地下连续墙的有限元模型图

Fig. 7 Layout of outrigger-type diaphragm wall

2.1 基本假定

- (1) 采用总应効法分析, 不考虑土体固结和渗流的影响。
- (2) 不考虑地连墙施工对地基初始应力场的影响。
- (3) 不考虑沿地连墙宽度方向的土体位移, 假定为等效平面应变问题。

表 1 土体计算参数

Table 1 Soil parameters for computation

土层	厚度/m	$\gamma/(kN\cdot m^{-3})$	E/MPa	λ	M	κ	μ	β	K	e_0
①黏土	4	18.8	5.4	0.36	0.56	0.018	0.3	0.9	0.87	0.85
②淤泥质黏土	17	17.8	4.3	0.45	0.54	0.025	0.38	0.85	0.89	1.2
③黏土	2.4	19.0	5.6	0.32	0.52	0.022	0.28	0.85	0.84	0.9

表 2 基岩和围护结构计算参数

Table 2 Parameters of struts and retaining walls

结构	岩体厚度/m	$\gamma/(kN\cdot m^{-3})$	μ	E/MPa	单元类型
④中风化凝灰岩	11.6	20	0.3	2152	空间八节点实体单元
支撑			0.17	30000	空间2节点杆单元
地下连续墙		19	0.17	30000	空间八节点非协调单元
支腿		19	0.17	30000	空间八节点非协调单元

(4) 地基土体简化为3层土层, 采用修正剑桥模型; 基岩、带支腿地下连续墙、支撑假设为线弹性体。

(5) 为简化分析, 有限元模拟时仅模拟实际施工过程中的开挖工况, 而未考虑基础施工完成之后的临时支撑拆除和换撑等工况。

2.2 单元类型与计算参数

单元类型: 土体采用C3D8I(六面体八节点实体非协调单元)单元, 共划分12526个单元; 地下连续墙(包括支腿部分)也采用C3D8I单元, 共划分206个单元; 支撑部分采用T3D2单元, 共划分60个单元。连续墙和土体之间设置接触面单元, 接触面只传递压力。

模型的边界条件: 前侧XZ面是限制Y方向的位移, 右侧YZ关于Y对称, 左侧YZ面限制X方向的位移, 后侧XZ面限制Y方向位移, 底面限制X, Y, Z3个方向的位移。其中, 支撑和围护墙之间采用铰接约束, 不允许相对位移的出现, 支撑另一端则限制水平向的位移。

土体简化为3层土, 采用修正剑桥模型, 其计算参数如表1所示。基岩为强风化凝灰质砂岩, 与带支腿地下连续墙一样, 均采用线弹性模型, 其参数取值如表2所示。

3 计算结果与分析

3.1 普通地连墙与带支腿地连墙围护效果对比

为了分析带支腿地连墙替代普通地连墙作为围护结构的效果, 分别建立了普通地连墙和带支腿地连墙分别作为围护结构的三维有限元分析模型, 并对其围护效果进行了对比。

图8为带支腿地连墙和普通地连墙墙体的水平位移变化曲线。(exc1、exc2、edc3、exc4分别为基坑开挖第一、二、三、四层土的工况)由图可知, 开挖过程中两种地连墙的变形规律相同; 开挖结束后, 带支腿地连墙的最大水平位移为30.5 mm, 普

表 2 基岩和围护结构计算参数

Table 2 Parameters of struts and retaining walls

结构	岩体厚度/m	$\gamma/(kN\cdot m^{-3})$	μ	E/MPa	单元类型
④中风化凝灰岩	11.6	20	0.3	2152	空间八节点实体单元
支撑			0.17	30000	空间2节点杆单元
地下连续墙		19	0.17	30000	空间八节点非协调单元
支腿		19	0.17	30000	空间八节点非协调单元

通地连墙的最大水平位移为 27.4 mm, 相差仅 3.1 mm。这说明, 在该工程中, 采用带支腿地连墙替代普通地连墙作为围护结构, 对地连墙的墙体侧向变形不会产生过大的影响。

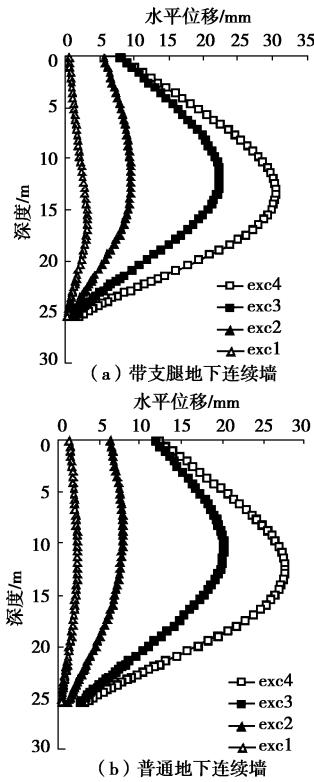


图 8 带支腿地连墙和普通地连墙墙体水平位移
Fig. 8 Horizontal displacements of retaining walls

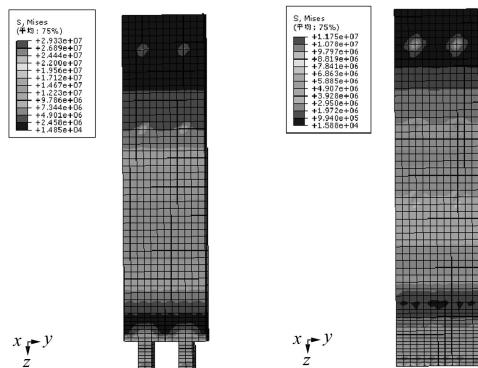


图 9 普通地连墙和带支腿地连墙在基坑开挖结束后的 mises 云图
Fig. 9 Mises stress of lateral walls after excavation

图 9 和图 10 分别为普通地连墙和带支腿地连墙 mises、竖向应力对比图。由图可知, 带支腿地连墙在截面突变处(支腿)会发生应力集中现象, 这可能会造成支腿处发生剪切或弯曲破坏, 从而造成墙体失稳。因此, 有必要在支腿中采取内设型钢等措施来保证支腿在交界面处的抗弯和抗剪性能。

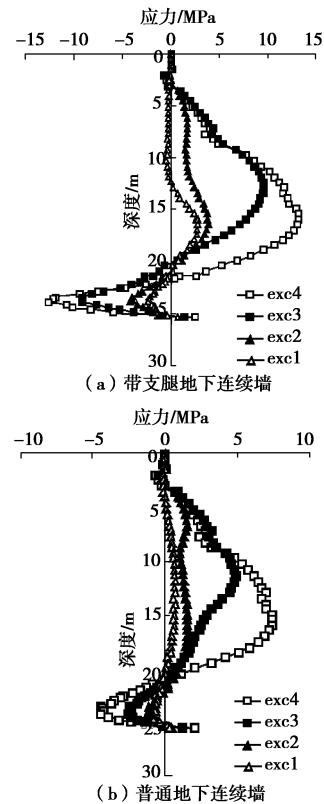


图 10 普通地连墙和带支腿地连墙在开挖中的竖向应力
Fig. 10 Vertical stress of lateral walls during excavation

3.2 支腿内插型钢对围护结构的影响

支腿内设型钢后, 支腿端的整体刚度会明显增大。以下分别对不同支腿刚度下的地连墙的受力和变形性状进行了分析。

图 11 为不同支腿刚度的地连墙在基坑开挖结束后的墙体水平位移随墙体深度的变化曲线。等墙体刚度中的支腿采用与墙体相同的弹性模量, $E = 30 \text{ GPa}$; 1.5 倍墙体刚度的支腿采用的弹性模量为 $E = 45 \text{ GPa}$; 2.5 倍墙体刚度的支腿采用的弹性模量为 $E = 75 \text{ GPa}$ 。由图可知, 不同支腿刚度的地连墙在基坑开挖结束后的墙体水平位移曲线基本重合, 这说明支腿刚度的变化对墙体的水平位移影响较小。

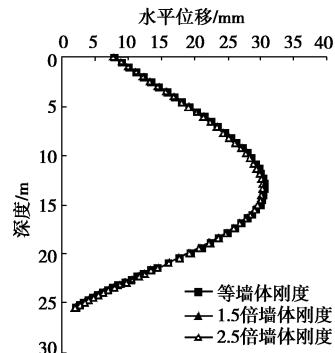


图 11 不同支腿刚度的地连墙在开挖结束后的水平位移
Fig. 11 Horizontal displacements of retaining walls with different leg rigidities after excavation

图 12 为不同支腿刚度的地连墙在基坑开挖结束后的墙体竖向应力随墙体深度的变化曲线。通过对比可以发现, 等墙体刚度的支腿地连墙与 1.5 倍墙体刚度的支腿地连墙的竖向应力比较接近, 而 2.5 倍墙体刚度的支腿地连墙会在支腿处发生明显的应力集中现象, 这对支腿的受力十分不利, 容易引起支腿外部混凝土开裂。因此, 在实际工程中, 支腿中设置的型钢的尺寸大小应适宜, 过大的型钢尺寸会使支腿的整体刚度增加过大。

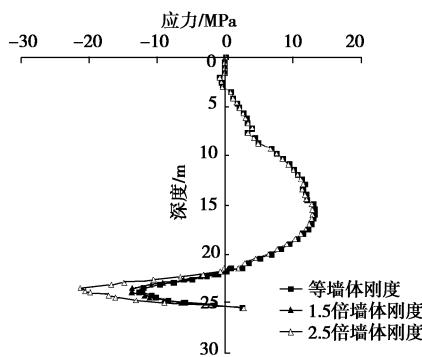


图 12 不同支腿刚度的墙体竖向应力

Fig. 12 Vertical stress under different leg rigidities

3.3 墙体水平位移模拟值与实测值对比

开挖至 19.4 m 深度时, 计算点 CX13 的深层水平位移模拟值和实测值的比较见图 13。由图可以看出, 水

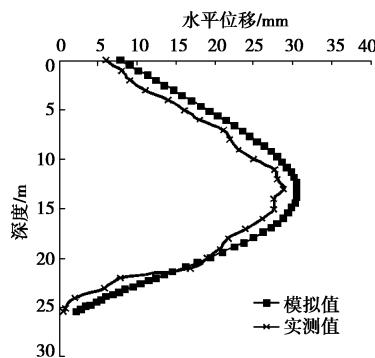


图 13 水平位移计算值和实测结果的比较

Fig. 13 Comparison between calculated and measured horizontal displacements

平位移的模拟值与实测值比较吻合, 模拟值略微偏大。这也验证了有限元模拟的有效性。

综上所述, 在岩石埋深较浅的地基中, 采用适当刚度的支腿嵌入岩层的地连墙作为基坑围护结构可以满足变形和受力要求。

4 结 论

通过对杭州黄龙饭店改扩建工程基坑围护实例的有限元分析, 得出以下结论:

与普通地下连续墙相比, 支腿代替整体墙体嵌入岩体对墙体的水平位移影响较小, 但支腿在变截面处的受力会增加很大。实际工程设计中, 通过在支腿内设合理刚度的型钢, 可以保证支腿地连墙的抗弯和抗剪刚度。

由实际工程效果可知, 采用带支腿地连墙成功的解决整幅地下连续墙不能进入中风化基岩层问题, 保证了围护结构嵌岩深度, 降低了施工难度, 取得良好的社会效益和经济效益。

参考文献:

- [1] 黄琦, 夏继君. 带支腿的地下连续墙的设计与施工[J]. 建筑施工, 2001, 22(1): 7 - 9. (HUANG Qi, XIA Ji-jun. Design and construction of leg-supported diaphragm wall[J]. Building Construction, 2001, 22(1): 7 - 9. (in Chinese))
- [2] 袁静, 刘兴旺, 曹国强. 带支腿地下连续墙设计和应用[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 245 - 248. (YUAN Jing, LIU Xing-wang, CAO Guo-qiang. Design and application of leg-supported diaphragm walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 245 - 248. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)