DOI：10.11779/CJGE2019S1010

逆作法基坑支护结构三维 *m* 法及工程应用

应宏伟[1, 2, 3]，王小刚[4]，郭 跃[5]，胡亚元[1, 3]，杨学林[6]

（1. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心，浙江 杭州 310058；2. 河海大学岩土工程科学研究所，江苏 南京 210098；
3. 浙江省城市地下空间开发工程技术研究中心，浙江 杭州 310058；4. 中铁二院华东勘察设计有限责任公司，浙江 杭州 310004；
5. 汉嘉设计集团股份有限公司，浙江 杭州 310000；6. 浙江省建筑设计研究院，浙江 杭州 310006）

摘 要：逆作法技术广泛应用于软土地区敏感环境下的深大基坑工程施工。虽然基于连续介质力学的三维实体有限元方法已逐渐被用于分析评估深开挖对周围环境的影响，工程实用中支护结构的内力变形分析仍采用基于梁–土弹簧体系的弹性抗力法，而传统的支护结构弹性抗力法不能考虑逆作法基坑复杂施工因素的影响。以杭州某逆作法深大基坑工程为案例，结合现场实测数据，通过 PLAXIS 平面有限元分析与弹性抗力法反分析，得到逆作法深大基坑中盆边留土、坑底工程桩作用和蠕变影响的杭州软黏土等效水平基床比例系数 *m* 的拟合公式，提出了考虑逆作法复杂施工因素影响的基坑三维梁系有限元分析方法。研究表明，该方法的计算结果比现有方法更合理；对于深厚软黏土逆作法基坑工程，土体蠕变对基坑变形影响显著。

关键词：逆作法；盆边留土；工程桩；蠕变；三维弹性抗力法

中图分类号：TU435 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2019)S1－0037－04

作者简介：应宏伟(1971—)，男，博士，副教授，从事岩土工程的教学和科研工作。E-mail: ice898@zju.edu.cn。

Three-dimensional *m* method for retaining structures and its application for top-down construction of excavations

YING Hong-wei[1, 2, 3], WANG Xiao-gang[4], GUO Yue[5], HU Ya-yuan[1, 3], YANG Xue-lin[6]

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058,China; 2. Institue of Geotechnical Engineering Science, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Engineering Research Center of Urban Underground Development of Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 4. CREEC East China Survey and Design Co., Ltd., Hangzhou 310004, China; 5. Hanjia Desingn Group Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 6. Zhejiang Province Institute of Architectural Design And Research, Hangzhou 310006, China)

Abstract: The top-down method is widely used in construction of deep and large foundation pits under sensitive environment in soft soil areas. Although the three-dimensional finite element method based on the continuum mechanics has been gradually used to analyze and evaluate the impact of deep excavation on the surrounding environment, the elastic resistance method based on the beam-soil spring system is still used to analyze the internal force and deformation of retaining structures in engineering practice, while the traditional elastic resistance method cannot consider the influence of complex construction factors of foundation pits by the top-down construction method. Based on a deep and large foundation pit project with top-down method in Hangzhou, combined with the field measured data, the fitting formula for the equivalent horizontal resistance coefficient *m* is obtained through PLAXIS analysis of plane finite element and back analysis of elastic resistance method. The formula can consider the effect of the earth berm, the working pile close to the retaining wall and the creep of soft clay. A 3D finite element method for beam-spring system considering these complex factors due to top-down construction is proposed. It is shown that the calculated results of this method are more reasonable than those of the existing methods. For the deep soft clay foundation pits with top-down construction method, the creep of soils has a significant effect on the deformation of the retaining walls.

Key words: top-down method; earth berm; working pile; creep; 3D beam-spring model method

0 引 言

基坑变形控制是基坑支护结构设计的重要内容之一。逆作法施工技术因其能较有效地控制基坑变形等

基金项目：国家自然科学基金项目（51678523）；浙江省科技计划项目（2019C03103）
收稿日期：2019－04－30

优点，已成为软土地区深大基坑的常用施工方法。虽然基于连续介质力学的有限元方法已开始被广泛用于深基坑性状和开挖对周围环境的影响分析[1-4]，但土体模型参数的选取与行业基坑规程[5]要求的工程勘察试验指标不一致，目前工程实用中支护结构的内力变形计算仍采用基于梁–土弹簧的弹性抗力法。经典的平面弹性抗力法（m 法）应用于复杂基坑工程时，在设计中有可能会造成资源浪费或安全隐患。不少学者对传统的平面弹性抗力法做了改进[6-8]，并建立了三维或准三维计算分析模型。文献[9]改进了“空气单元法”，研制了可考虑分段施工影响的基坑三维有限元计算程序。

逆作法基坑通常水平与竖向支护结构同时逐渐受荷，为控制基坑变形，还可能同时结合盆式挖土坑边预留土堤技术，与敞开挖土方式相比，逆作基坑挖土和支撑浇筑时间更长，软黏土蠕变更明显，主楼临近坑壁时坑底工程桩与被动土共同工作，目前已有的平面或空间弹性抗力法尚无法考虑逆作基坑这些复杂因素的影响。本文建立了考虑盆边留土、坑底工程桩及软土蠕变影响的逆作法基坑支护结构三维弹性抗力分析方法，并应用于杭州武林广场地下商城逆作法基坑工程。

1 工程概况

杭州武林广场地下商城位于繁华的市中心武林广场下方，用地面积为 3.98 公顷，为三层纯地下建筑，其中地下一、二层为商场，层高分别为 6.3 m 和 5.4 m，地下三层为停车库及地铁区间，除地铁 1 号线及 3 号线区间外，其余大部分层高为 7.5 m，基坑大面积开挖深度达 22.3 m。

基坑北侧紧临浙江省展览馆，最小净距 16.0 m。展览馆为地上 2～3 层框架结构，基础为筏型与条形相结合，基础下方设砂桩；其余三侧均为市政道路；西南角为既有体育场路地下过街通道，距基坑最小净距为 12.8 m。邻近道路分布大量的地下市政管线。基坑环境平面图见图 1 示。

场地浅部土层主要为为海相沉积的软黏土，厚度约 20 m，中部为河流湖相、海相和冲洪积相沉积的黏性土、砂性土和碎石类土，基岩为白垩系的泥质粉砂岩、侏罗系的凝灰岩。

2 基坑围护方案

地下结构采用周边盖挖逆作与中间部分明挖顺作相结合的施工方法，围护墙采用 1.2 m 厚地下连续墙，与内衬墙共同做为地下室结构的永久外墙。盖挖逆作利用各地下室楼板形成基坑围护结构的三道水平支撑（图 2），其中最下一大层土采用盆式挖土、坑边预留反压土堤，利用中部先浇筑的底板设置附加斜抛撑，然后再挖除反压土堤的措施。

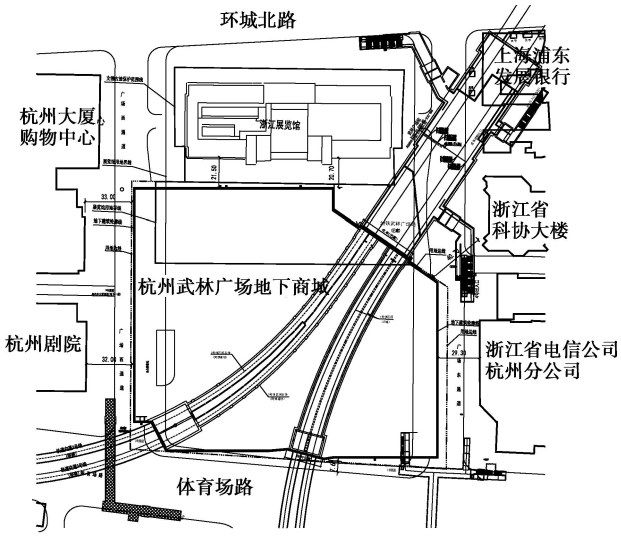

图 1 基坑环境平面图

Fig. 1 General layout of excavation

地下室底板采用平板式筏型基础，主体结构下基础采用柱下 AM 桩基础，一柱一桩，桩径 1.6 m，扩底直径均为 2.8 m，基础底板下另设直径 1.0 m 钻孔灌注桩作为抗拔桩。

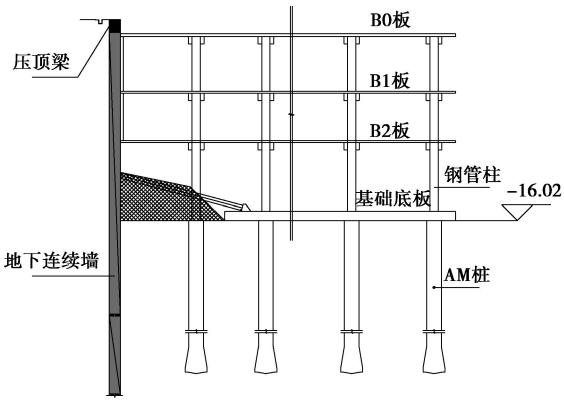

图 2 基坑支护剖面图

Fig. 2 Profile of retaining structures

为确保逆作法楼板浇筑质量及施工开挖土方便，结构顶板及地下一、二层楼板均开设东西两个大洞。

3 考虑逆作法施工的三维弹性地基梁法

在笔者已有三维梁系有限元法[9]的基础上，为实现逆作法施工条件下竖向和水平结构的施工模拟分析，做以下改进：

（1）增加竖向与水平向内力及变形协同计算

逆作法工程中，竖向荷载除了结构梁、板自重外，还有大量的施工荷载，支护体系的竖向变形对整个结

构的受力有很大的关系。立柱主要受轴力以及弯矩作用，因此可将立柱简化成空间梁。立柱桩端设置弹性支座约束或固定约束，具体视桩端支承情况而定。

（2）增加时空效应的计算

逆作法施工时间长，施工工况复杂，在逆作法基坑三维弹性地基梁法计算中，增加了考虑坑边留土、工程桩作用及无支撑暴露时间等因素的影响。

（3）坑外土压力采用与变形有关的土压力

逆作法基坑对变形控制严格，坑外土体一般较难达到主动极限状态，采用与围护墙变形有关的中间土压力更符合实际。基于文献[10]提出的土压力计算方法，初始步采用静止土压力计算围护体变形，然后进行主动土压力与围护体变形的迭代计算，即得到当前工况的土压力和墙体变形。

4　考虑逆作法施工特点的杭州软黏土等效 *m* 参数

以上述基坑实例为背景，为简化问题，采用 Plaxis2D 分析软件建立二维有限元模型，把多层地基简化为双层地基，上层土厚 20 m，为淤泥质黏土，下层土厚度 30 m，土体的本构模型采用土体硬化（HS）模型，和规范推荐的平面弹性抗力杆系有限元法的支护墙水平变形分析结果相结合进行正分析和反分析，获得反映逆作法基坑盆边留土、坑内工程桩作用和无支撑暴露时间等复杂施工因素影响的杭州软黏土等效地基水平基床比例系数 *m* 值拟合公式：

$$m=\left(1.97\mathrm{e}^{0.3983\left(\frac{b}{h_0}\right)}+0.7877\left(\frac{h}{h_0}\right)^2+0.1634\frac{h}{h_0}+0.248n-1.714+\left[1.208\left(\frac{S}{D}\right)^{-1.318}\right]\times\frac{h_i}{H}-0.094\ln(1+6.71\frac{t}{t_0})\right)m_0。\quad(1)$$

其中　m_0 为杭州淤泥质黏土初始基床系数的比例系数，一般 m_0=1.0　MN/m^4；h_0 为当前工况基坑开挖深度；b 为盆边留土的顶宽（m）；h 为盆边留土高度（m）；n 为留土坡率；　S 为工程桩间距（m）；D 为桩径（m）；h_i 为当前第 i 个工况的基坑深度（m），H 为基坑最终开挖深度（m）；t 为某开挖工况无支撑暴露时间（d），t_0 为单位时间（1 d）。

5 计算结果分析

根据本文案例实际的施工工况，用上述逆作法基坑三维弹性地基梁法进行全过程计算分析，计算模型见图 3。

图 4 为开挖至基底、基础底板全部完成、拆除斜支撑的工况计算得到的地下连续墙最大水平位移的平面分布图。周边墙体计算变形在 87.5～106.8 mm，其中地下室角部约 90 mm，各边中部以及靠近洞口附近计算变形为 101.4～106.8 mm。根据监测资料，实测最大位移普遍在 83～117 mm 之间，计算值与实测资料较为吻合。

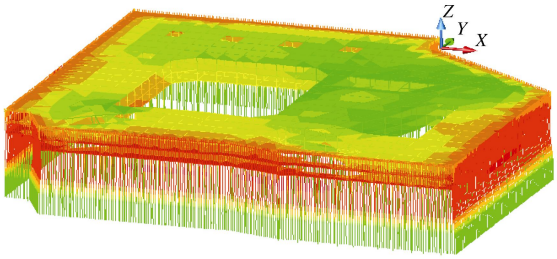

图 3 实例三维计算模型图

Fig. 3 3D model

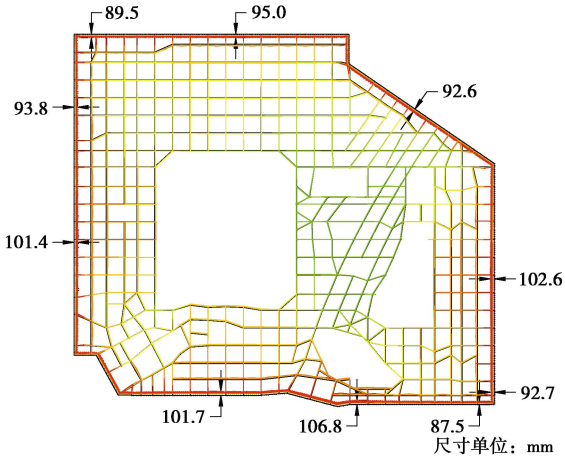

图 4 墙体最大变形平面分布图

Fig. 4 Plane distribution of maximum wall deformation

图 5 为本文方法得到的基坑西侧中部附近围护墙变形和弯矩与现有方法及实测值的对比。从图中可以看出，现有方法未能考虑逆作法施工复杂的施工因素影响，特别是忽略了逆作基坑楼板支撑有效形成之前土体蠕变的影响，计算变形最大值仅约 57 mm，与实测值差距巨大。本文方法计算变形最大值约 101 mm，除墙顶部附近外，计算位移与实测值比较接近。

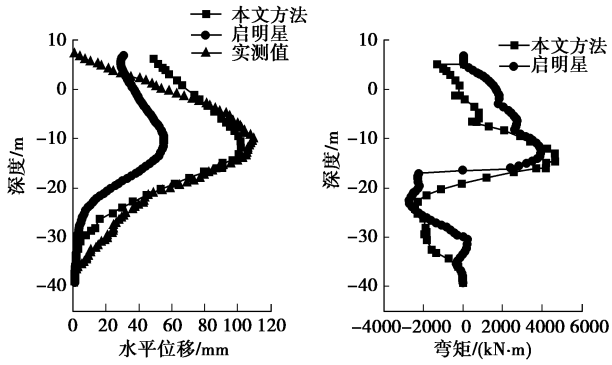

图 5 西侧中部墙体变形、弯矩计算结果与实测值的对比

Fig. 5 Comparison between computed and measured wall deflections and bending moments at west side of excavation

6 结 论

（1）结合工程实例，通过连续介质平面有限元法和弹性地基梁杆系有限元分析与反分析，得到了考虑盆边留土、坑底工程桩及软土蠕变影响杭州软黏土等效 m 值拟合公式，提出了逆作法基坑支护结构三维弹性地基梁分析方法，应用于杭州武林广场地下商城基坑工程的实例分析，与现有方法相比，计算结果更为合理。

（2）深厚软黏土逆作法基坑工程中土体蠕变对基坑变形影响显著。

参考文献：

[1] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analyses of retaining wall behavior[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE,1971, **97**(12): 1657－1673.

[2] CLOUGH G W, DENBY G M. Stabilizing berm design for temporary walls in clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1977, **103**(GT2): 75－90.

[3] GOURVENEC S M, POWRIE W. Three-dimensional finite element analysis of embedded retaining walls supported by discontinuous earth berms[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, **37**(5): 1062－1077.

[4] POWRIE W, DALY M P. Centrifuge model tests on embedded retaining walls supported by earth berms[J]. Géotechnique, 2002, **52**(2): 89－106.

[5] JGJ120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 2012. (JGJ120—2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. 2012. (in Chinese))

[6] 陆培毅, 刘 畅, 顾晓鲁. 深基坑支护结构支撑系统简化空间分析方法的研究[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(4): 471－474. (LU Pei-yi, LIU Chang, GU Xiao-lu. Researches on bracing system of foundation pit using simplified space analytical method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(4): 471－474. (in Chinese))

[7] 陆新征, 宋二祥, 吉 林, 等. 某特深基坑考虑支护结构与土体共同作用的三维有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(4): 487－491. (LU Xin-zheng, SONG Er-xiang, JI Lin, et al. 3-Dimensional FEA for the interaction between supporting structure of excavation and soil in a very deep pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(4): 487－491. (in Chinese))

[8] 王建华, 范 巍, 王卫东, 等. 空间 m 法在深基坑支护结构分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(增刊): 1332－1335. (WANG Jian-hua, FAN Wei, WANG Wei-dong, et al. Application of 3D m method to analysis of retaining structures of deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(S): 1332－1335. (in Chinese))

[9] 应宏伟, 郭 跃. 某梁板支撑体系的深大基坑三维全过程分析[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(11): 1670－1675. (YING Hong-wei, GUO Yue. 3D analysis on a deep beam-slab braced foundation pit considering effect of construction process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(11): 1670－1675. (in Chinese))

[10] 应宏伟, 朱 伟, 郑贝贝, 等. 柔性挡墙的主动土压力计算及分布研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(增刊 2): 1－6. (YING Hong-wei, ZHU Wei, ZHENG Bei-bei, et al. Calculation and distribution of active earth pressure against flexible retaining walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(S2): 1－6. (in Chinese))

（责编：黄贤沙）