

空间 m 法在深基坑支护结构分析中的应用

王建华¹, 范 巍¹, 王卫东², 沈 健²

(1. 上海交通大学土木工程系, 上海 200030; 2. 华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200002)

摘 要: 在有限元软件中进行二次开发实现了空间 m 法, 并应用该程序对上海银行深基坑工程支护结构进行了计算。为解决 m 值取值经验性较大及 m 值难以确定的问题, 本文结合前期工况实测资料运用非线性回归反分析方法进行了位移反分析, 得出较合理的各层土的 m 值, 并用该值对基坑开挖最终工况下的变形进行了分析预测。结果表明: 应用空间 m 法结合位移反分析算法可以反映围护结构变形性状及开挖的空间效应, 文中的计算结果与实测基本吻合。

关键词: 深基坑; m 法; 三维分析; 反分析

中图分类号: X705

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)S0-1332-04

作者简介: 王建华(1959-), 男, 上海交通大学博士生导师, 从事岩土工程的教学和科研工作。

Application of 3D m -method in analysis of retaining structures of deep excavation

WANG Jian-hua¹, FAN Wei¹, WANG Wei-dong², SHEN-Jian²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. East China Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

Abstract: 3D m -method was implemented by using FEM software, and applied to analyze the retaining structures of Shanghai Bank Deep Excavation Project. To solve the difficulties in empirically choosing the value of “ m ”, a nonlinear regression program was used to perform displacement inverse modeling, based on the monitoring data of early construction stages, in order to get reasonable values of “ m ” in different soil layers. The estimated parameters were used to forecast the lateral displacement of diaphragm walls during the final stage. Results show that the present method can properly reflect the deformation characteristics of retaining structures and 3D effect of deep excavation, and the simulated data shows good agreement with the monitoring data.

Key words: deep excavation; m -method; 3D analysis; inverse modeling

0 引 言

围护结构的强度与变形计算是基坑工程设计中的关键技术, 目前常用的 m 法是一种把挡墙作为弹性梁单元、用土弹簧模拟坑内被动土压力的竖向平面弹性地基梁法。 m 法以其计算参数少、模型简单、能模拟分步开挖、能反映被动区土压力与位移的关系等优点而被广泛应用于基坑开挖围护结构受力计算分析中。然而由于 m 法受其本身为平面分析方法的局限, 在应用于具有明显空间效应的深基坑工程中时不得不进行较大简化, 且不能反映实际支护结构的空间特征, 从而导致分析结果与实际情况存在差距。

目前深基坑空间效应分析方法^[1]主要包括简化空间分析方法、连续介质有限元法和三维杆系有限元法三类。近年来有学者针对一些特定平面形状的深基坑, 提出了分析其空间效应的简化方法。但这些简化方法只能针对特定平面形状和支护形式的基坑求得近似解, 且由于土压力等假设与实际情况差距较大, 导致

计算结果在一定程度上失真。连续介质有限元法是将包括地基土在内的整个基坑作为一个空间结构体系, 分析支护结构变形、内力及开挖对周围环境的影响等。该方法虽然理论上成熟, 但计算工作量大, 成本高。三维杆系有限元法认为深基坑支护结构具有明显的杆系结构特征, 因而将支护结构各构件离散成为三维杆(梁)单元。陆瑞明、赵锡宏等在平面弹性地基梁法的基础上发展了基坑支护结构空间设计计算方法^[2], 将挡土墙离散为竖直方向和水平方向的交叉梁系, 并且在模型中考虑内支撑的作用, 将支撑系统、挡土墙作为整体分析。该方法考虑了土体、支撑系统、挡墙三者之间的共同作用, 是值得关注的一种算法。

本文采用了可以考虑土与支护结构空间共同作用的简化有限元计算方法——空间 m 法^[3]。该方法基于弹性地基梁法中的 m 法原理, 将地基土体考虑为坑内

收稿日期: 2006-05-24

土弹簧和坑外的水土压力, 并建立支护结构和土弹簧的三维有限元模型来分析支护结构的整体内力与变形。该方法概念清晰, 计算参数少, 是一种实用的深基坑工程设计方法, 应用于上海几个深基坑工程中取得了良好效果。本文在大型有限元软件 ABAQUS 中进行二次开发实现了空间 m 法, 并应用该程序对上海银行深基坑工程支护结构进行了计算。

1 计算方法

1.1 空间 m 法计算原理

基坑支护结构三维分析模型如图 1 (以矩形基坑为例, 取 1/4 模型表示)。按实际支护结构的设计方案建立三维有限元模型, 挡土墙采用板单元模拟, 支撑系统采用梁单元模拟, 坑内设置土弹簧单元, 根据施工工况和工程地质条件确定坑外水土压力荷载, 进行支护结构的内力与变形计算。

土弹簧的刚度系数按下式计算

$$K_H = k_h b h = m z b h, \quad (1)$$

其中 K_H 为弹簧单元的刚度系数; k_h 为土体水平向基床系数; m 为比例系数; z 为土弹簧距离开挖面的距离; b 与 h 则分别为三维模型中与土弹簧相连接的挡土结构的水平向和竖向的单元宽度。

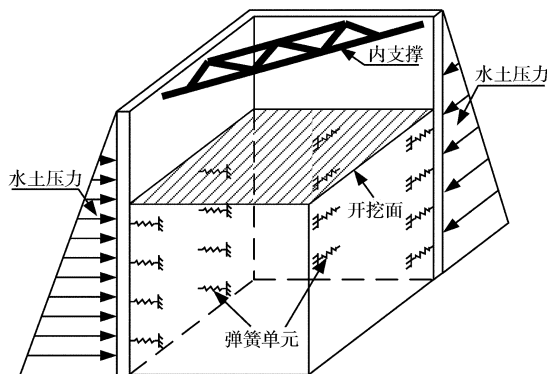


图1 基坑支护结构的三维分析模型

Fig. 1 3D analysis model of retaining structures

坑外水土压力可按上海市基坑工程设计规范^[4]相应规定根据工程实际情况采用水土分算或水土合算。以水土分算为例, 土压力分布模式可采用在基坑开挖面以上作用主动土压力, 而在开挖面以下土压力不随深度变化; 水压力分布模式则采用作用在支护结构上主动土压力侧的水压力在基坑内地下水位以上按静水压力三角形分布计算, 在基坑内地下水位以下水压力按矩形分布计算, 并不计算作用于支护结构被动土压力侧的水压力。在施工过程中, 坑外水土压力的分布随施工工况不断变化以模拟开挖过程。

1.2 主要步骤

(1) 按实际设计方案建立支护体系的三维模型, 围护结构采用板单元模拟, 水平支撑采用梁单元模拟。坑外土体对围护结构的水土压力作为荷载施加在围护结构上, 坑内开挖面以下的被动土压力采用弹簧模拟, 根据施工工况和工程地质条件确定坑外水土压力。根据工程经验初步确定各土层的 m 值。

(2) 计算过程中通过有限元软件中的“生死”单元功能模拟土体开挖及支护结构的施工。并根据施工工况更新坑外水土压力和坑内土弹簧刚度系数。

(3) 结合前期工况的围护结构变形实测资料进行土层参数 m 值反分析, 取得较为合理的 m 值。

(4) 应用反分析得到的 m 值预测最终工况围护结构变形情况。

2 工程实例

2.1 工程概况^[5]

上海银行大厦基坑开挖深度为主楼 17.15 m, 裙楼 14.95 m, 整个基坑面积为 7454 m²。基坑采用地下连续墙作为围护结构, 以减少围护结构和土体的位移。工程概况详见参考文献[4]。基坑平面图及连续墙测斜点位置见图 2。

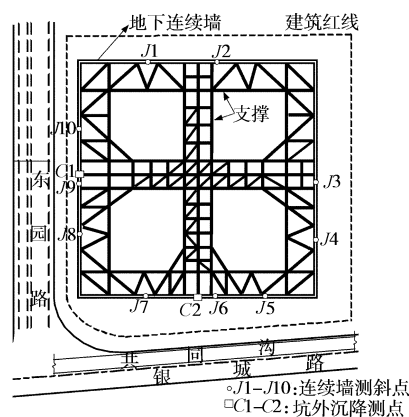


图2 基坑平面与测点布置图

Fig. 2 Plan view of the excavated area and instruments

2.2 有限元计算模型

在有限元软件 ABAQUS 中按实际设计方案建立支护体系的三维模型, 围护结构采用四节点空间板单元 S4 模拟, 每个板单元尺寸为 1 m × 1 m, 水平支撑采用三维梁单元 B31 模拟, 坑内设置土弹簧单元。模型总单元数 23172, 总节点数 22160, 有限元模型如图 3 所示。

根据地质勘察报告中的土层参数 (见表 1) 按水土分算计算坑外水土压力。假设坑外地表超载为 20 kPa。表中的 m 值为初始值, 具体取值有待位移反分析后确定。坑内土弹簧单元一端与连续墙板单元节点

耦合，另一端固定。由于地下连续墙埋深较深，墙底约束竖向位移。为了真实模拟支护结构与土体之间的共同作用及实际施工中的分步开挖的工况，将整个分析过程分为 4 个计算荷载步，采用了有限元程序中单元的“生死”功能来模拟土体开挖和支护结构的施工。

工况一：开挖基坑第一层土至-2.7 m；工况二：施工第一层水平支撑，并开挖至-8.5 m；工况三：施工第二层水平支撑，开挖至-13.5 m；工况四：施工第三层水平支撑，开挖至坑底（主楼-17.4 m，裙楼-15.2 m）。每个计算荷载步中的水土压力调整通过编写 ABAQUS 用户子程序 DLOAD 来实现，土弹簧刚度调整通过 ABAQUS 中的场变量结合用户子程序 UFIELD 来实现。

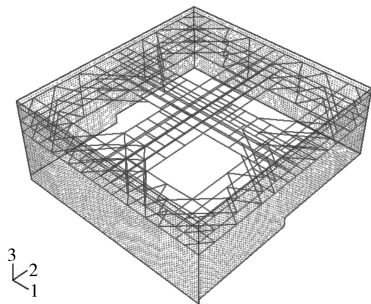


图 3 有限元模型图

Fig. 3 FEM mesh of retaining structures

表 1 土层计算参数

Table 1 Parameters of soils

土层	层厚/m	重度 (kN·m ⁻³)	φ/(°)	c/kPa	m/(kN·m ⁻⁴)
1-1 杂填土	2.7	18.8	31	6	1500
2-3 砂质粉土 夹粘质粉土	6.78	18.8	31	6	1500
4 淤泥质粘土	8.85	17.2	12	14	1500
5 粉质粘土	6.6	18.5	22	15	5000
6 粉质粘土	3.92	20.0	19	51	5000
7-1 砂质粉土 夹粉砂	4.48	18.9	22.8	3	10000
7-2 粉细砂	-	19.2	25.4	1	10000

表 2 反分析参数表

Table 2 Parameters of soils

参数名	对应土层编号	初始值 (kN·m ⁻⁴)	反分析计算 值/(kN·m ⁻⁴)
m_{12}	1-1、2-3	1500	3160
m_4	4	1500	1730
m_5	5	5000	5190
m_6	6	5000	3040
m_7	7-1、7-2	10000	334000

2.3 参数反分析

以往在空间 m 法使用中 m 值选取主要参考平面 m 法中取值。即使是平面 m 法中的 m 值选取也带有较大的经验性，这使得在空间 m 法中存在 m 值难以确定的问题。本文在确定 m 值时运用非线性回归反分析软件 UCODE^[6]结合工程实测资料进行位移反分析。位移反

分析就是通过基坑开挖各工况下支护结构位移实测值，建立合理的目标函数，采用最优化技术来反推待求的土层参数 m 值。本文在反分析中采用了目标函数

$$f = \sum_{j=1}^M \{ \sum_{i=1}^N [u(i,j)-u'(i,j)]^2 \} \quad (2)$$

其中 N 为测点总数； M 为工况总数； u 为第 i 测点在 j 工况下的水平位移实测值和计算值。

在本工程中，取 2, 3 荷载步对应工况中各测点的围护墙体侧移监测资料作为反推各层土 m 值的依据。为反映空间效应，本文选取了西侧墙体中间位置测点 J9 及角部测点 J8 处侧移作为研究对象。

首先利用 UCODE 中的参数敏感度析功能对 7 个土层的 m 值进行分析。分析表明，1-1 层土与 2-3 层土的 m 值相关系数为-0.98，7-1 层土与 7-2 层土的 m 值相关系数为-0.90，相关系数过大可能会造成参数反分析困难。考虑 1-1 层为杂填土缺少土性参数且层厚较小，可假设 m 值同 2-3 层。而 7-2 层土对围护墙体的约束范围很小仅为南侧墙体底端处 1.67 m，故取 7-2 层 m 值与 7-1 层相同。最终确定参与反分析的参数为 5 个。5 个 m 值的初始值取值参考上海市基坑规范对平面 m 法的推荐值。经过 10 次叠代反分析得到的最终 m 值见表 2。从表中可以看出经位移反分析得到的 m 值明显不同于用于平面 m 法的推荐值。造成这一差别的主要原因是规范中的 m 值是由侧向受荷桩试验得到的，其被动侧土体的应力状态与基坑开挖时连续墙内被动侧土体的应力状态有较大差别。

由初始值与反分析得到的 m 值计算得到的连续墙位移曲线与实测值比较见图 4。由图中可以看出，与初始值相比，经过反分析得到的连续墙位移曲线与实测值更加吻合。由反分析得到的 m 值计算开挖至坑底的工况，可以预测各测点最终变形，预测值与实测值比较见图 5。由于围护墙体中间位置有对撑的存在，J9 测点的侧向位移实测值略小于 J8 测点，预测值也反映出了同样的规律。而若不考虑支护结构的空间效应，采取平面分析难以反映这一现象。预测得到的地下连续墙整体变形图见图 6。从图中可以看出连续墙体变形具有明显的空间效应，呈现中间变形大角部变形小，无支撑位置变形大有支撑位置变形小的特征。相比常规平面方法凭经验选取典型断面的分析方法，按三维分析有助于从整体上分析结构受力变形特性，准确确定围护结构最危险断面，提供结构设计参考。

3 结 论

(1) 空间 m 法计算既继承了常规的基坑支护结构分析的思路，概念明确、原理简单、计算参数少，又

克服了传统平面竖向弹性地基梁法模型过于简化, 无法考虑支护结构空间效应的缺点。采用全三维有限元分析可以从整体上把握结构的受力特性, 得到支护结构随施工工况的变形与内力变化, 计算结果较为合理, 通过在有限元软件中进行二次开发可以实现计算工作量小使用方便, 易于在实际工程中使用。

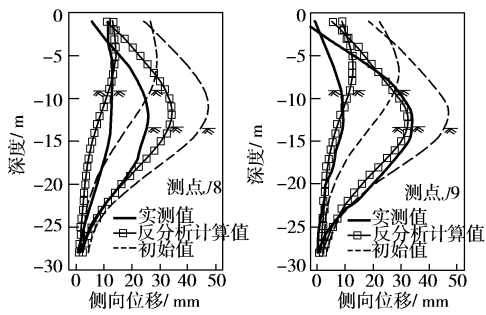


图 4 测点水平位移比较

Fig. 4 Comparison among lateral displacements

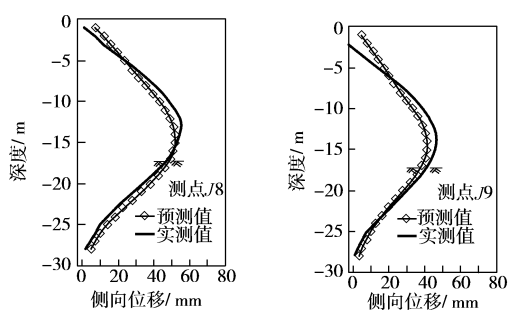


图 5 测点水平位移比较 (工况 4)

Fig. 5 Comparison among lateral displacements (Step 4)

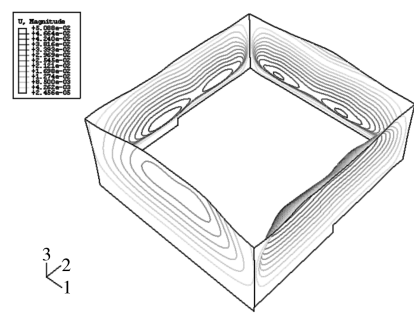


图 6 地下连续墙位移云图

Fig. 6 Displacement contour of diaphragm walls

(2) 为解决 m 值取值经验性较大, m 值难以确定的问题, 可采用位移反分析法, 从而求得较为合理的土层参数 m 值。经位移反分析得到的 m 值计算结果与

实测值较为吻合, 可以基本反映支护结构变形规律。今后经过大量实际工程的反分析, 可逐步积累各土层 m 值的取值经验, 以达到指导工程设计的目的。

(3) 空间 m 法虽能在一定程度上反映围护结构的 空间效应, 但是实际工程中往往由于施工工况复杂, 土体流变等因素的影响, 造成计算结果与实际情况有一定差距。因此, 如何考虑较为复杂的施工工况以及土体的流变还有待进一步的研究。

参考文献:

[1] 邓子胜.深基坑空间效应分析方法研究与应用进展[J].岩土工程界,2005,8(2):29 - 30.(Deng Zi-sheng. Progress of research and application of analysis methods of space effect in deep excavation[J]. Geotechnical Engineering World, 2005,8(2):29 - 30.)

[2] 陆瑞明,赵锡宏,等.组合式挡墙的基坑围护非线形的空间设计计算理论和方法[J].土木工程学报,2001,34(6):82 - 87.(LU Rui-ming, ZHAO Xi-hong, et al. Nonlinear space computation method for support structure of combined retaining wall[J]. China Civil Engineering Journal, 2001,34 (6):82 - 87.)

[3] 沈健,王建华,等.基于“ m ”法的深基坑支护结构三维分析方法[J].地下空间与工程学报,2005,1(4):530 - 533.(SHEN Jian, WANG Jian-hua, et al. 3-D analysis method of retaining structure of deep excavation based on “ m ” method[J]. Underground Space, 2005,1(4):530 - 533.)

[4] DBJ08—61—97 上海市基坑工程设计规范[S].(DBJ08—61 —97 Shanghai standard code for design of excavation engineering[S].)

[5] 徐中华,王卫东,王建华.上海软土地区某深基坑工程的实测与分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(S1):4639 - 4644.(XU Zhong-hua, WANG Wei-dong, WANG Jian-hua. Monitoring and analysis of a deep foundation pit in Shanghai soft ground[J]. China Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(S1):4639 - 4644.)

[6] CALVELLO Michele. Inverse analysis of a supported excavation through chicao glacial clays[D]. Evanston, Illinois. 2002.