

文章编号: 1000-7598 (2011) 03-899-06

有限元与改进单纯形法联合编程技术在位移反分析中的应用

肖铭钊¹, 周承豪¹, 程 芸², 冯晓腊^{3,4}, 杨俊梅⁴

(1. 武汉市市政建设集团有限公司, 武汉 430023; 2. 云南省建筑科学研究院, 昆明 650223
3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074; 4. 武汉丰达地质工程有限公司, 武汉 430074)

摘 要: 根据弹性地基梁法基本思想, 考虑基坑分步开挖和逐级加撑的动态施工因素, 通过有限元计算模拟基坑实际开挖过程。结合现场监测数据, 采用位移反分析方法反演各土层 m 值, 并准确预测后续工况支护体的变形。采用有限元通用软件 ANSYS 内嵌的 APDL 语言编程建立支护体有限元计算模型, 并应用数学软件 MATLAB 编制“改进单纯形法”优化程序, 编写了接口程序, 实现了 MATLAB 对 ANSYS 模型的实时循环调用和逐步寻优。武汉长江隧道武昌明挖段基坑工程算例证明, 基于单纯形法的联合编程技术能方便、高效地被应用于支护体位移反分析预测中。建立了基于本工况预测下一工况或相邻断面的扩展型位移反分析预测模型, 预测结果与实测结果拟合程度较高。

关 键 词: 改进单纯形法; 联合编程; m 值; 位移反分析

中图分类号: O242

文献标识码: A

Application of finite elements and modified simplex method jointed programming technology to displacement back analysis

XIAO Ming-zhao¹, ZHOU Cheng-hao¹, CHENG Yun², FENG Xiao-la^{2,3}, YANG Jun-mei³

(1. Wuhan Urban Construction Group Co., Ltd, Wuhan, 430023, China; 2. Yunnan Insitute of Building Research, Kunming 650023, China;
3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, 430071, China; 4. Wuhan Fengda Geo-engineering Co., Ltd., Wuhan, 430071, China)

Abstract: Based on the elastic foundation beam theory, the finite element method in which step excavation and support in stage is considered, is adopted to simulate the actual situation of excavation construction; and the displacement back analysis of m value of soils is carried out, according to field monitoring data, to provide reliable guarantee for predicting the deformations in succession construction stages. Firstly, support system FEM model is established by using APDL language embedded in ANSYS software. Then, the modified simplex optimization program is programmed by Matlab software, with calling the ANSYS FEM model circularly through original interface program in order to implement optimization inversion step by step. Through the calculation of deep foundation pit of Wuhan Yangtze River tunnel in Wuchang open excavation section, it is proved that the jointed programming technology based on modified simplex method can be easily and efficiently applied to the displacement back analysis and forecasting of retaining structure. Finally, an extended displacement back analysis and forecast model is established which can forecast the retaining structure displacement for the next working condition or adjacent sections based on the current condition. And the predicted results and measured results represent a high degree of fitting in the calculation example.

Key words: modified simplex method; jointed programming technology; m value; displacement back analysis

1 引 言

弹性地基梁法就是将支挡结构视为一竖置的地基梁, 支撑简化为与截面积和弹性模量、计算长度有关的二力杆弹簧^[1]。地基反力的大小按 m 法计算:

$$f_i = m_i z_i x_i \quad (1)$$

式中: f_i 为第 i 土弹簧土体反力; m_i 为第 i 土弹簧处土层反力比例系数 m 值, 可按相关规范表格查用; z_i 为第 i 土弹簧中心距挖面深度; x_i 为第 i 土弹簧处支护结构水平位移。

收稿日期: 2009-10-19

基金项目: 武汉市建设委员会科研基金资助项目 (No. 200837)。

第一作者简介: 肖铭钊, 男, 1970 年生, 本科, 高级工程师, 主要从事市政与隧道工程方面的研究工作。E-mail: wss.jz805@163.com

对于弹性地基梁方程的求解,多采用杆系有限元法求解,杆系有限元求解过程见文献[1]。弹性地基梁法计算中 m 值的取值是关键,而研究表明,土体 m 值是一个综合参数,它不仅仅是由土体性质决定,而且还是支护结构工作性状、土体受力状态等影响因素的综合反映^[2]。尽管各行业规范均给出了土层 m 值的一个范围,但实际设计中取值仍存在较大随意性^[3],如何科学合理地选取 m 值一直是基坑支护设计中的一个难题。

本文基于弹性地基梁法,结合基坑工程动态设计的思想,由施工过程中监测得到的支护结构的位移,反演获得各上层 m 值,并由反演的 m 值来预测下一工况或邻近地段支护结构位移,以便随时调整施工方法或进度,确保基坑的安全与稳定。

2 分步开挖、架设支撑的有限元实现

2.1 考虑分步开挖的计算方法

在基坑支护工程中,施工的不同阶段,支护结构、支撑和土体所形成的结构体系不断变化,能确切模拟分步开挖过程的受力状况和变形特点,并考虑各个施工阶段之间受力的连续性,基本方法有增量法和总量法两种^[4-5]。

其中增量法因为能够很好地模拟基坑分步开挖过程而得到广泛应用。该法的关键是如何确定在基坑开挖和回填过程中引起体系内力改变的每一个荷载增量^[6]。计算中荷载增量不仅局限于土压力增量,在此次开挖中开挖侧挖去的土体反力和对支撑施加的预应力都为荷载增量^[7],其一般计算模式如图1所示。图中 q 为基坑边均布荷载; N_1 为支撑轴力; q_1 、 q_2 为主动土压力增量; p_1 、 p_2 为土体反力增量; h_1 、 h_2 分别为基坑第1步、第2步开挖深度; k_1 、 k_2 为不同工况下土体水平反力系数。

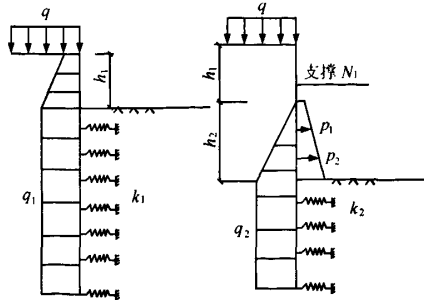


图1 增量法的一般计算简图
Fig.1 Calculation model of incremental method

2.2 分步开挖、架设支撑的有限元实现

弹性地基梁法将支护结构和土体的相互作用

简化成了梁和弹簧间的作用,即转化为结构体系;将主动土压力转化为分布荷载。因此,整个体系可以看作对荷载-结构体系进行结构分析。

2.2.1 分步开挖与逐级加撑过程的模拟

因此,可以利用 ANSYS 的不同荷载步来模拟基坑的分步开挖和逐级加撑等系列连续施工过程,并采用 ANSYS 中单元的“生死”来实现对土体开挖和逐级加撑的模拟。具体施工阶段与 ANSYS 荷载步对应情况如表1所示。

表1 分步开挖施工阶段与有限元计算对应表
Table 1 Corresponding table of step excavation with finite element method

工 况	施 工 阶 段	荷 载 步	单 元 状 态
1	开挖第1层土	1	杀死相应单元
2	加第1道支撑	2	激活支撑单元
3	开挖第2层土	3	杀死相应单元

2.2.2 “先变形后支撑”效应的模拟

基坑的开挖是分步进行的,支撑的施加也是在上步开挖变形之后实现的,即所谓“先变形后支撑”。本文采取在设置每层支撑的前后,都分为不同工况,且将后一工况的分析建立于前一工况的基础之上,同时通过打开大变形效应来实现自动修改被激活的支撑单元的节点坐标,使其适应变形后的结构体系。

2.2.3 预加轴力的施加

工程实践表明,给支撑施加预加轴力能够有效地控制支护结构的顶部位移。ANSYS 中施加预应力主要有以3种方式^[8]:初应变法、用集中荷载 F 加力,然后在分析时打开“prestress on”和用温度变化模拟。本文利用给支撑单元施加初应变的方法来实现预加轴力效果的模拟。预加轴力按式(2)计算转化为初始应变值。

$$\varepsilon = \frac{N}{AE_g}$$

(2)

式中: ε 为初始应变值; N 为预加轴力值; E_g 为钢支撑弹性模量; A 为支撑截面面积。

2.2.3 牛顿拉普森迭代法求解

基坑的分步开挖,是典型的非线性行为,计算中采取 ANSYS 中牛顿拉普森迭代法,它将荷载分成一系列的荷载增量,并迫使在每一个载荷增量的末端解达到平衡收敛(在某个容许范围内)。

3 基于改进单纯形法的位移反分析

本文将基坑分步开挖和非线性优化方法相结

合,建立土层 m 值的直接反分析方法。

3.1 目标函数的选取

通过给定初值 m , 然后由优化方法不断变换中间值来实现计算位移值与实测位移值的不断逼近, 从而得到最优 m 值。

为使计算位移值最大程度地与实测位移值吻合, 本文采用实测位移与计算位移值的最小二乘建立目标函数:

$$\min f = \min \left[\sum_{i=1}^n (u_i^* - u_i)^2 \right] \quad (3)$$

式中: f 为目标函数值; u_i^* 为第 i 点实测位移值; u_i 为第 i 点计算位移值 (m 值的隐函数); n 为监测点个数。

3.2 “改进单纯形”优化方法

对于式 (3) 这种隐式目标函数优化问题求解, 单纯形法是一种非常有效的求解方法。土层 m 值的取值是有一定范围的, 是一个典型的非线性约束优化问题, 采用单纯形优化方法求解前需先将问题转化为无约束问题, 在此可以采用等参数法将非线性约束优化问题转化为无约束问题。其原问题为

$$\min [f(m)], a \leq m_i \leq b \quad (4)$$

$$\text{令 } m_i = a + (b-a) \times \text{abs}[\sin(x_i)], x_i \in R \quad (5)$$

用 x_i 代替 m_i 进行单纯形寻优, 则转化为

$$\left. \begin{aligned} \min(f(m)) \\ m_i = a + (b-a) \times \text{abs}[\sin(x_i)] \\ x_i \in R \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: b 、 a 分别为土层 m 值的上、下限值; x_i 为自由变量; $f(m)$ 为目标函数。由此原问题转换为以 x 为自变量的最优化问题, 在式 (6) 中, 函数 f 取得最小值, 此时的 m 值即为最优值。

对于一般非线性规划问题, 都可以通过单纯形算法获得最优解。但对于复杂的非线性程度较高的问题, 在迭代过程中单纯形容易出现畸变或退化现象 (如二维问题, 3 顶点退化到一条直线上), 导致迭代无法继续进行。

为了避免这种现象, 本文采用了“改进单纯形”的方法^[9-10]。在单纯形计算过程中, 假设第 k 次得到了本阶段的最好点, 设为 v_i^k , 那么在第 $k+1$ 次迭代时, 按照下面的方法计算映射单纯形的各个顶点, 取 $v_{\text{mp}} = v_i^k$, 则有:

$$v_j^{k+1} = v_i^k + \gamma(v_j^k - v_{\text{mp}}) \quad (7)$$

式中: v_i^k 为第 k 次迭代前的最好点; v_j^k 为第 k 次迭

代的单纯形的各个顶点; v_j^{k+1} 为第 $k+1$ 次迭代的单纯形的各个顶点; γ 为映射因子, 对于复杂函数一般取 1~1.1。改进单纯形式意图见图 2。图中 v_h^k 为第 k 次迭代得到的最坏点, v_l^k 为第 k 次迭代得到的最好点, v_r^{k+1} 为第 k 次最坏点的映射点, v_i^{k+1} 、 v_j^{k+1} 为第 $k+1$ 次迭代单纯性各顶点。

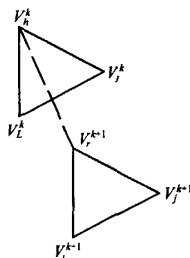


图2 改进单纯形示意图

Fig.2 Modified simplex mapping schematic

从图中可以清楚地看出, 改进单纯形和初始单纯形是相似的, 这样就可以避免搜索过程中单纯形的畸变和退化。收敛准则采用 Neld 和 Mead 准则^[10], 基于改进映射单纯形算法思想, 本文采用 MATLAB 软件自行编制优化程序。

4 地基土 m 值优化反演

本文土体 m 值的优化反演, 分 3 步完成: 一是采用 ANSYS 软件的 APDL 编程语言编制弹性地基杆系有限元计算程序; 二是采用 MATLAB 编制 m 值的优化反分析计算程序; 三是编写相应的接口程序, 实现 MATLAB 对 ANSYS 有限元的无缝连接和实时调用。具体步骤如图 3 所示。

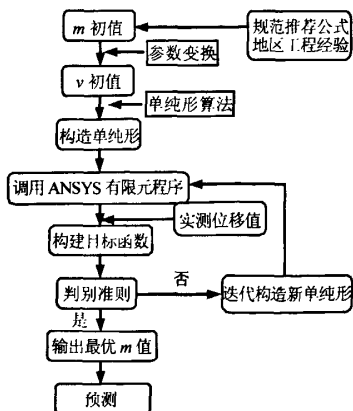


图3 m 值优化反演流程图

Fig.3 Flow chart of m optimization inversion

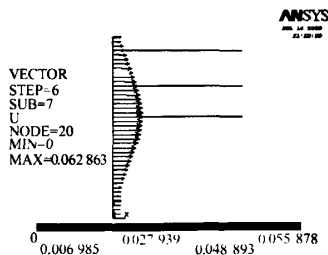


图 8 桩身位移矢量图
Fig.8 Pile displacement vector diagram

5.4 位移反分析

土层 m 初始值根据相关工程经验和地方规范取值。由于基坑底进行了抽条加固处理，加固深度为 3 m，间隔为 3 m。此处基底加固范围处于淤泥质粉质黏土土层中，对该范围内土层 m 值做相应提高，暂取值 $3\,000\text{ kN/m}^4$ 。目标函数参见 3.1 节式 (3)。收敛精度 $\varepsilon=1\times10^{-6}$ 。

采用自行编制的 ANSYS 有限元程序和 MATLAB 优化程序，进行优化反演计算，不同工况反演结果见表 3。

表 3 武汉长江隧道武昌明挖段 LK5+470 处
主要土层分工况优化反演 m 值

Table 3 Optimum result of m in different excavation conditions in Wuchang open excavation section of Wuhan Yangtze River tunnel

层号	名 称	待反演 土层 m	不同开挖深度(m)下的反演 m 值		
			-6	-9.5	-11.5
①	填土				
④-2	粉质黏土	m_1	2 000	3 300	2 000
④-5	淤泥质粉 质黏土	m_2	1 270	2 500	1 200
④-1	黏土	m_3	4 340	3 600	3 350
④-4	粉质黏土	m_1	2 000	3 300	2 000
④-6	粉土	m_4	5 700	5 100	5 900

取 LWPH190 号测斜管监测数据，将各工况反演得到的 m 值及相关参数代入有限元模型中进行正算，得到的位移计算值与实测值比较如图 9~11 所示。

由图可知，随着基坑开挖越来越深，各工况反演计算位移与实测位移拟合程度逐渐升高，特别是至工况 5、7 中两者最大差值始终被控制在 4 mm 以内。说明随着开挖的不断进行，反演计算精度是令人满意的，整个计算思路是可行的。

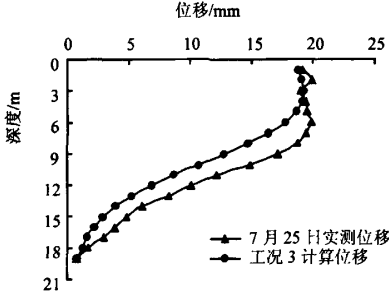


图 9 开挖至-6 m 时桩身计算位移和实测位移对比曲线
Fig.9 Pile displacement curves comparison between calculated and measured data when excavated to -6 m

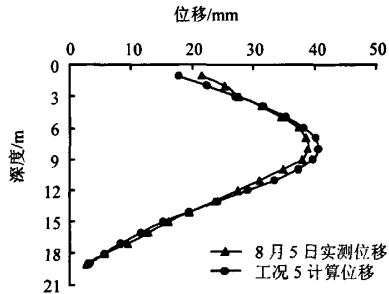


图 10 开挖至-9.5 m 时桩身计算和实测位移对比曲线
Fig.10 Pile displacement curves comparison between calculated and measured data when excavated to -9.5 m

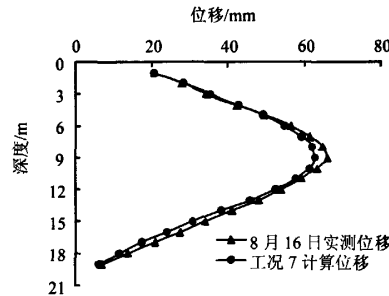


图 11 开挖至-11.5 m 时桩身计算和实测位移对比曲线
Fig.11 Pile displacement curves comparison between calculated and measured data when excavated to -11.5 m

5.5 扩展型位移反分析预测模型

5.5.1 在同一断面上由前一工况预测下一工况位移

如图 12 所示，由工况 5 反演得到的 m 值，预测工况 7 支护结构的位移，可以看出，预测及反演计算位移（即 5.4 所述正算）趋势与实测值高度一致，但位移值整体稍有偏小，考虑到施工过程中的不规范因素，总体预测精度能基本满足生产要求。

5.5.2 在不同断面上由本断面预测相邻断面位移

尝试由 LK5+470 处支护结构位移反演得到的 m 值预测 LK5+420 处支护结构位移，对比该断面

LWPH96 号测斜管监测数据, 预测位移与实测位移曲线拟合程度较高, 最大差值控制在 3.5 mm 内, 如图 13 所示。

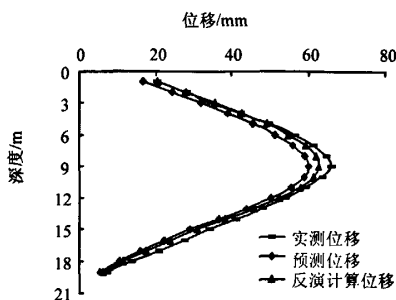


图 12 桩身预测、计算、实测位移曲线对比
Fig.12 Pile displacement curves comparison among predicted, calculated and measured data

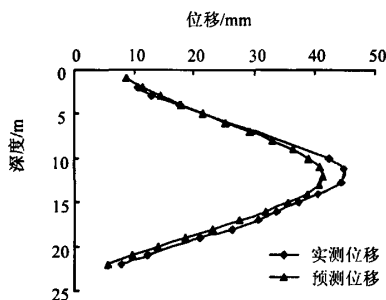


图 13 LK5+420 处预测位移与实测位移对比
Fig.13 Pile displacement curves comparison between predicted and measured data in section LK5+470

6 结论

(1) 将分步开挖计算思想引入杆系有限元计算方法中, 采用 ANSYS 软件内嵌的 APDL 语言编程, 实现了考虑分步开挖的有限元计算分析, 而且可通过 ANSYS 软件后处理功能达到可视的效果。采用 MATLAB 软件编制了单纯形优化算法的程序, 并编制相应接口程序, 实现对 ANSYS 有限元程序的实时循环调用, 整个优化反演实现过程方便快捷、智能高效, 且具有很强的可扩展性。

(2) 由反分析计算得到的 m 值及相关参数代入有限元程序中进行正算, 得到支护结构位移值与实测位移值差值控制在 4 mm 内, 说明反分析计算精度是令人满意的。

(3) 建立了扩展型位移反分析预测模型, 在同一计算断面上, 由前一工况预测下一工况位移; 在不同计算断面上, 由本断面预测相邻断面位移。计算表明, 实测位移与预测位移曲线拟合程度较高,

证明该反分析预测模型具有较高的实用价值。

参考文献

- [1] 刘建航. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [2] 冯俊福, 俞建霖, 杨学林, 等. 考虑动态因素的深基坑开挖反演分析及预测[J]. 岩土力学, 2007, 26(4): 455—460.
FENG Jun-fu, YU Jian-lin, YANG Xue-lin, et al. Back analysis and prediction of deep pit foundation excavation considering dynamic factors[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 26(4): 455—460.
- [3] 张军平, 邹银生. 基坑位移反分析方法的对比研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2005, 32(1): 52—56.
ZHANG Jun-ping, ZOU Yin-sheng. A comparative research of the reverse analyses of deep pit displacement[J]. *Journal of Hunan University(Natural Science)*, 2005, 32(1): 52—56.
- [4] 杨光华, 陆培炎. 深基坑开挖中考虑施工过程的多撑或多锚地下连续墙的增量算法[J]. 建筑结构, 1994, (8): 28—47.
YANG Guang-hua, LU Pei-yan. The incremental calculation method for the diaphragm wall with multi-brace or multi-anchor in deep excavation[J]. *Building Structure*, 1994, (8): 28—47.
- [5] 王元湘. 关于深基坑支护结构计算的增量法和总量法[J]. 地下空间, 2000, 20(1): 43—46.
WANG Yuan-xiang. Increment and total volume methods for calculation of support in deep foundation pit[J]. *Underground Space*, 2000, 20(1): 43—46.
- [6] 周运斌. 增量法在深基坑支护结构计算中的应用[J]. 地下空间, 1999, 19(1): 40—46.
- [7] 冯世进, 陈晓霞, 高广运, 等. 迭代增量法分析地下连续墙的受力性状[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 226—230.
FENG Shi-jin, CHEN Xiao-xia, GAO Guang-yun, et al. Analysis of underground diaphragm wall by iterative incremental method [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(1): 226—230.
- [8] 王一鸣. 有限元理论在基坑工程中的应用理论[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- [9] 耿忠娟. 对非线性规划单纯形算法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [10] 孔锐睿, 仇汝臣, 周田惠. 非线性单纯形的修改算法[J]. 青岛大学学报, 2002, 15(3): 41—44.
KONG Rui-rui, QIU Ru-chen, ZHOU Tian-hui. Modified nonlinear simplex method[J]. *Journal of Qingdao University(Natural Science Edition)*, 2002, 15(3): 41—44.