

文章编号: 1005—0523(2006)01—0019—05

弹性地基有限元法在基坑工程中的应用

田海波, 许 恺

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 基于弹性地基有限元法, 利用等效文克尔弹性地基梁模型, 采用模块化处理方式模拟基坑开挖的各种影响因素, 编制 C 语言有限元分析程序对围护结构进行分析计算. 程序结合采用弹性法, 考虑其中的不足, 在迭代计算中对围护结构变形和支撑轴力进行修正, 以模拟围护结构随开挖过程变形对内力的影响, 简单方便的解决实际工程中围护结构受力分析. 结合上海地铁 M8 线嫩江路车站工程深基坑工程进行实例分析, 发现程序计算结果能够较好的与实测值吻合. 说明该法能够很好的应用于支撑结构内力变形计算, 并可以给三维通用有限元分析以借鉴.

关键词: 文克尔弹性地基梁; 支撑结构; 模块化; 程序

中图分类号: TU311

文献标识码: A

1 引言

随着计算方法的不断完善, 有限元技术由杆系、平面连续介质直到实体三维模拟, 日趋成熟. 有限元计算软件越来越多的被应用于基坑和地下工程^[1], 计算模拟也越来越力求接近实际, 但同时也存在诸多弊端, 大量计算参数拟定的模糊性, 且计算过程复杂不易控制, 导致结果不尽合理. 由于地下结构的复杂性及多样性等特点, 在模拟更多开挖因素时, 显得力不从心. 而弹性地基有限元法能有效模拟基坑开挖过程中的各种因素, 实用性强、计算简便, 至今仍被广泛采用^[2-4]. 以往的弹性地基有限元计算中未考虑围护结构变形和内力随开挖工况的相互影响^[5], 各个开挖工况是独立的, 显然与实际不符, 本文以弹性地基杆系有限元模型为例, 在修正弹性法基础上结合采用增量法, 编制有限元程序, 并结合工程实例计算分析, 介绍分析过程中的关键技术与解决方案, 以期推广至平面和空间有限元计算中.

2 模型选取与计算方法

关于围护结构的计算方法目前主要有: 山肩邦男法、弹性法、共同变形理论法、多支撑增量算法以及有限元法^[6]. 以往应用较多的是弹性法, 它主要基于日本的《日本建筑基础结构设计规范》^[7]. 该法主要是把围护结构看作无限长的弹性体, 主动土压力已知, 开挖面以下只考虑被动土抗力, 数值与墙体位移成正比. 国内同济大学曾对此假定作了修正^[8], 主要是将水土压力假定为三角形分布; 同时认为支撑点即为不动点, 原来支撑的轴力和墙体的变形保持不变. 显然弹性法未考虑支撑轴力的变化及墙体的变形对围护结构受力的影响, 这显然与实际不符, 特别是对于深大基坑, 围护结构变形对内力的影响不容忽视, 必须考虑.

程序采用弹性地基有限元法, 同时算法中增加了相应的处理模块以有效模拟各种开挖因素, 如随开挖深度的增加, 支撑架设数量变化; 支撑架设前挡土结构的位移; 支撑架设后支撑轴力随后续开挖

收稿日期: 2005—10—28

作者简介: 田海波(1982—), 男, 湖北襄樊人, 同济大学硕士生. 主要从事岩土及地下工程方面研究.

过程而逐渐的调整;支撑预加轴力对挡土结构内力和变形的影响。

弹性地基有限元法主要是把土体以及支撑对围护结构的约束等效为弹簧,而弹簧抗力与变形成正比。对于线形静力问题,有限元法的控制方程可以表达为 $[K]\{u\}=\{F\}$ 其中 $\{u\}$ 为节点位移向量, $\{F\}$ 为等效节点荷载向量, $[K]$ 为总刚度矩阵。

围护结构采用竖向文克尔弹性地基梁模型,作用在结构上的荷载包括土压力 P_s 及水压力 P_w ,上部超载为 q ,支撑等效为弹簧支座 K_b ,被动区土体假定为一列水平方向的土弹簧 K ,如图1所示。

地基土弹簧压缩系数 K 按上海地区通用经验取值,一般有考虑随深度变化的 M 法和随深度变化的 K 法^[9]。程序按 K 法取用,如下:

$$K=0\sim 10\,000\text{ kN/m}^3(h<5\text{m})$$

$$K=10\,000\text{ kN/m}^3(h>5\text{m})$$

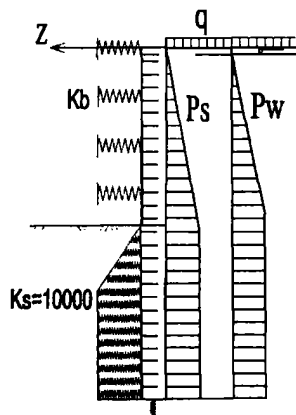


图1 弹性地基有限元法计算图示

在分析时,按梁单元对围护结构进行划分,如图2所示。

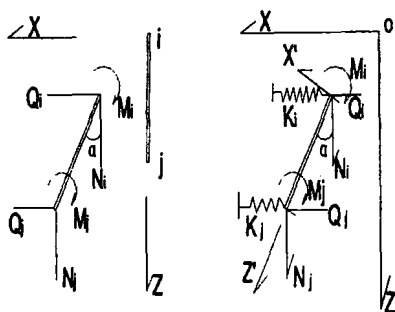


图2 平面梁单元

在局部坐标系中 $z'-x'$ 下梁单元的单元刚度矩阵为 α

$$[k']^e =$$

$$\begin{Bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & 0 & -\frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} & 0 & -\frac{6EI}{l^2} & -\frac{4EI}{l} \\ \frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} & 0 & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} & 0 & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} \end{Bmatrix}$$

式中 E 为梁单元的弹性模量(kPa), I 为梁单元截面对主轴的惯性矩(m^4), A 为梁单元的截面面积(m^2)

L 为梁单元的长度(m);

根据围护结构的受力特点,作用在梁单元上的荷载主要分布轴向荷载(自重荷载)和分布横向荷载,对于均布横向荷载和均布轴向荷载可以通过向节点移动得到等效荷载,如图3所示,此时单元等效节点荷载向量 $\{F'\}$ 为

$$\{F'\} = \{N_i', Q_i', M_i', N_j', Q_j', M_j'\} = \left\{ \frac{p_z l}{2}, \frac{p_x l}{2}, \frac{p_x l^2}{12}, \frac{p_z l}{2}, \frac{p_x l}{2}, -\frac{p_x l^2}{12} \right\}$$

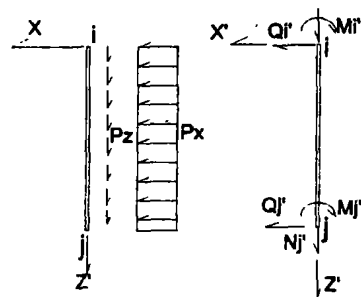


图3 节点等效荷载图示

然后需要实现从局部坐标系向整体坐标系的转换,以便集成总刚度矩阵和综合节点等效荷载向量。局部单元与整体坐标之间转换关系为:

$$[k']\{u'\} = \{F'\} \quad [k']\{u\} = \{F\}$$

其中转换矩阵为

$$[T] = \begin{Bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix}$$

由此可以得到整体坐标下的单刚为:

$$[k]^e = \left\{ \begin{array}{cccccc} A_1 & & & & & \\ A_2 & A_3 & & \text{对} & & \\ A_4 & A_5 & A_6 & \text{称} & & \\ -A_1 & -A_2 & -A_4 & A_1 & & \\ -A_2 & -A_3 & -A_5 & A_2 & A_3 & \\ A_4 & A_5 & \frac{1}{2}A_6 & -A_4 & -A_5 & A_6 \end{array} \right\}$$

式中

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{EA \cos^2 \alpha}{l} \\ A_2 &= \left(\frac{EA}{l} - \frac{12EI}{l^3} \right) \sin \alpha \cos \alpha \\ A_3 &= \frac{EA}{l} \sin^2 \alpha + \frac{12EI}{l^3} \cos^2 \alpha \\ A_4 &= -\frac{6EI}{l^2} \sin \alpha \\ A_5 &= \frac{6EI}{l^2} \cos \alpha, A_6 = \frac{4EI}{l} \end{aligned}$$

在对围护结构进行单元划分时, 为方便起见, 一般在开挖面以及支撑处设置节点.

弹性地基和支撑对结构的刚度贡献为弹簧刚度 k_i 与 k_j , 其中地基基床系数 $k_i = k_j = \frac{l_i}{2} m\alpha$; 计算出各个节点的等效节点刚度 K_s , 然后叠加送入单刚就得到如下修正后的单刚:

$$[k]^e = \left\{ \begin{array}{cccccc} A_1 & & & & & \\ A_2 & A_3 + k_i^s & & \text{对} & & \\ A_4 & A_5 & A_6 & \text{称} & & \\ -A_1 & -A_2 & -A_4 & A_1 & & \\ -A_2 & -A_3 & -A_5 & A_2 & A_3 + k_j^s & \\ A_4 & A_5 & \frac{1}{2}A_6 & -A_4 & -A_5 & A_6 \end{array} \right\}$$

单元等效荷载计算如图 4 所示, 各单元荷载为:

$$\{F\} = \{F'\} = \left\{ \frac{W_e}{2}, \frac{(p_s + p_w)}{12} l^2, \frac{(p_w + p_w)}{12} l^2, \frac{W_e}{2}, \frac{(p_s + p_w)}{12} l^2, -\frac{(p_s + p_w)}{12} l^2 \right\}$$

其中 W_e 为单元自重, kN ; p_s 为作用在单元 i 中点的土压力强度, kPa ; k_s 为朗肯主动土压力系数; p_w 为作用在单元 i 中点上的水压力强度, kPa ;

然后, 将各单刚对号入座叠加送入总刚, 即得到整体坐标下的总刚. 将各单元荷载叠加送入总荷载, 即得到总的节点荷载向量.

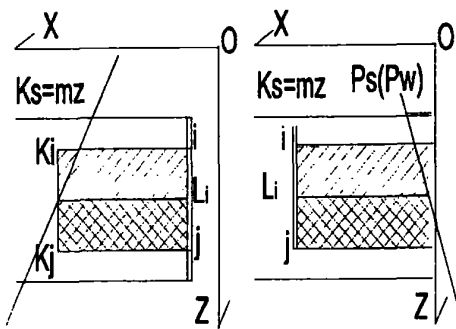


图 4 地基等效节点刚度与水土压力等效节点荷载

3 程序结构与实现

计算模型采用文克尔竖向弹性地基梁, 程序采用 C 语言编制, 并采用模块处理方式.

求解方法采用高斯主元消去法, 程序中引入浮点运算控制精度, 以保证计算快速收敛和精度.

程序由原始数据建立应力应变关系, 进入开挖循环后, 对结构和土体划分单元, 并自动生成编号, 组成单刚, 然后由节点单元定位向量汇入总刚, 支撑刚度则由截面算出后作为等效结构刚度进入修改后的总刚, 同样, 墙后被动土压力也由程序计算出抗力系数后作为结构等效刚度修正总刚. 墙前主动土压力按前述方法得出等效荷载集成总荷载向量, 然后由高斯消去法求解方程, 最后回代求出各截面内力并输出结果. 然后自动进入下一工况, 由变形处理模块将上一工况位移矩阵叠加到该工况初始矩阵中, 然后计算该工况刚度和载荷矩阵, 求解并输出结果, 直至工况循环结束. 程序结构和算法如图 5 所示.

4 工程实例

上海地铁 M8 线嫩江路车站位于中原路、嫩江路交叉口, 为地下一层侧式车站, 站台层设在地下, 站厅层设在地面, 为地上二层框架结构, 站台下设人行联络通道和电缆通道及通风通道. 车站标准段基坑深度约 13.23~13.57 m, 出入口通道和风井开挖深度约为 10.4 m. 围护结构选用厚 600 mm 的地下连续墙结构, 并以直径 609 mm, 壁厚 16 mm 钢管作为内撑.

地面超载取 20 kN/m^2 , 地下水位取地面以下 0.5 m, 考虑到开挖深度范围内主要为粉土, 故作用在围护桩上的水土侧压力本设计采用水土分算, C、 φ 取固

计算值与实际值基本吻合,说明是有效可行的.特别是对于不考虑时空效应的围护体一维分析计算中,弹性地基有限元法仍具有实用性强、计算简便有效的优势.

2) 程序采用文克尔竖向弹性地基梁模型,即把墙体看作是竖向放置的梁体,将墙前土压力作为弹簧加在梁体上,将墙后土压力作为荷载,钢支撑也看作等效弹簧约束加在墙体上.但对水土压力的处理中不能根据水位进行计算,是程序一个不足之处.

3) 从结果来看,采用水土压力分算法是较为合理的.在基坑工程中,当情况不是很明朗时,建议用水土分算.一般对于透水性差的黏性土,可以用水土合算处理,但可能会使荷载比实际情况小.因此,用水土分算是偏于安全的.

4) 墙体开挖面以下内力变形较大,主要是被动侧土体弹簧压缩系数采用 K 法取值,这也是计算值偏于保守的原因之一.一般还可以采用 m 法和 c 法.在后续研究中将进一步对此作以探讨.

5) 程序对总纲处理做了简化,即没有采用变带宽处理,这在解方程时将会增加计算量.采用高斯

消元法求解矩阵时,由于浮点型数据所以不可能完全清零,此时精度的控制可能会影响计算的收敛以及结果的精度.

参考文献:

[1] 杭州市建筑业管理局.深基坑工程实践与研究[C].北京:中国水利水电出版社,1999.
[2] 陈 原,钱 江.含模糊参数弹性地基梁及桩的有限元分析[J].工程力学. 2004,21(1):125—130.
[3] 陈天愚,张克绪,等.修正刚度矩阵法求解弹性地基梁板体系[J].哈尔滨建筑大学学报. 2001,34(3):40—44.
[4] 夏 雄,周德培.Winkler 弹性地基上预应力锚索地梁内力的计算方法[J].铁道标准设计,2005,(1):46—48.
[5] 肖宏彬,王永和,王星华.多支撑挡土结构考虑开挖过程的有限元分析方法[J].岩土工程学报. 2004,26(1):47—51.
[6] 赵锡宏,陈志明,胡中雄,等.高层建筑深基坑围护工程实践与分析[M].上海:同济大学出版社,1996.
[7] 史佩栋,等.高层建筑基础工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.
[8] 陈忠汉,黄书秩,程丽萍.深基坑工程[M].北京:机械工业出版社,2002.
[9] DBJ 08—68—97,上海市基坑工程设计规程[S].

FEM on Elastic Foundation and Its Extend Application to Excavation Engineering

TIAN Hai-bo,XU-Kai

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Shanghai 200092, China)

Abstract:Based on the principle of finite element method on elastic foundation , using equivalent model of winkle beam on elastic foundation, a computing program has been programmed by turbo C. And modular simulation is adopted for simulating different factors to affect the excavation. The analysis is based on elasticity method. Considering its drawback, the deformation and the axils force are modified in the solving progress which is for simulation the affect by the deformation of the reinforcing system. Combine with analysis of the excavation of the station of Neng-Jiang road, it is found that the result is coincided with the field testing value which shows the applicability of the method. And also, it could be referenced by the 3-D FEM analysis.

Key words:winkle beam on elastic foundation;supporting and retaining;modular;programe