

杆系有限元法在武汉地铁 2 号线基坑工程中的应用

黄 辉, 段新胜, 李小园, 顾春杰

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要:以静力平衡法为依据的传统支护结构计算方法已难以满足工程的需要,而较为理想的连续介质有限元法又由于理论本身复杂、参数多、本构模型难以确定等多种因素而应用较困难。弹性地基梁杆系有限元法因能考虑支护结构的平衡条件和结构与土的相互作用、分析中所需参数简单等诸多优点在基坑工程中有着广泛的应用。根据杆件有限元法的基本原理对武汉地铁 2 号线某站点深达 15.31 m、采用 3 道水平支撑的复杂基坑支护结构进行了设计计算,并对所得计算结果进行了分析,推出了基坑支护结构的变形、内力随工况变化的规律。

关键词:杆系有限元; 基坑支护结构; 弹性地基梁; 弹簧; 支撑杆系

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2008)04-0039-04

Application of Bar System FEM in Excavation for Wuhan 2nd Subway / HUANG Hui, DUAN Xin-sheng, LI Xiao-yuan, GU Chun-jie (Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: The traditional maintaining structure calculation methods which are based on static equilibrium can hardly meet the needs of engineering, the ideal finite element method of continuous media also has a lot of difficulties in application because of its complexity in theories, parameters and the uncertain constitutive model selections. However, elastic bar system FEM has the advantages of considering the structural equilibrium conditions and interaction between maintaining structure and soils, simple parameter selection and so on, therefore, it has been widely used in foundation pit engineering. According to the principle of bar system FEM, a complicated maintaining structure in a station of Wuhan 2nd subway, which is 15.31 meters deep and has 3 horizontal braces, was designed and calculated with this method, in addition, some laws about deformation and internal force of maintaining structure during the construction conditions were deduced.

Key words: bar system FEM; maintaining structure of foundation pit; beam on elastic foundation; spring; braced bar system

0 引言

基坑支护结构计算的方法很多,常见的有平衡法、等值梁法、二分之一分担法、山肩邦南法等,这些方法都是以传统的静力平衡为依据进行结构的内力分析,不能准确计算基坑支护结构的变形^[1],不能考虑基坑支护结构与土的相互作用等,因此应用较少。近年来,以有限元法为代表的数值分析方法在基坑支护结构设计计算中得到迅速地发展,如典型的连续介质有限元法是将基坑支护结构与周围土层看作是相互联系的整体,考虑基坑支护结构与周围介质共同作用,同时将边界、初始条件、结构形状、岩土介质性质等复杂因素纳入其中,因而能很好地模拟基坑支护结构与周边介质的共同作用,然而因其理论复杂、所需参数多、本构模型难以确定等多种因素导致在实际工程中应用难度较大^[2]。而建立在弹性地基梁法基础上的杆系有限元法不仅继承了连续介质有限元法能考虑基坑支护结构的平衡条件和结构与土的相互作用的优点,而且分析中所需参数

简单并可有效考虑基坑开挖、回筑过程中各种基本因素和复杂情况对基坑支护结构内力和变形的影响,如作用在支护结构两侧土压力的变化、撑锚的数量变化以及撑锚预加轴力和撑锚架设前的桩墙位移对桩墙内力、变形变化的影响等,因而更适合于各类基坑支护工程的设计、计算。

1 杆系有限元法的原理及分析过程

图 1 为基坑支护结构的杆系有限元计算模型,其实以土体的线弹性本构关系为基础,假设地面上(基坑底以上)的支护结构为支撑在弹性支座上的梁;基坑底以下部分为弹性地基梁,用土弹簧模拟;将撑杆简化为弹性二力杆支承单元;荷载为主动侧的土压力和水压力。该模型既可考虑基坑支护结构、撑杆和被动侧土体的变形,又可以模拟基坑分步开挖、加撑和拆撑的施工过程。

采用杆系有限元法进行基坑支护结构分析的过程如下:

收稿日期:2007-10-10

作者简介:黄辉(1983-),男(汉族),湖北武汉人,中国地质大学(武汉)硕士研究生,地质工程专业,从事地基基础、深基坑工程方面的研究工作,湖北省武汉市洪山区鲁磨路中国地质大学(武汉)硕研 12006030 班,huangorhui@163.com。

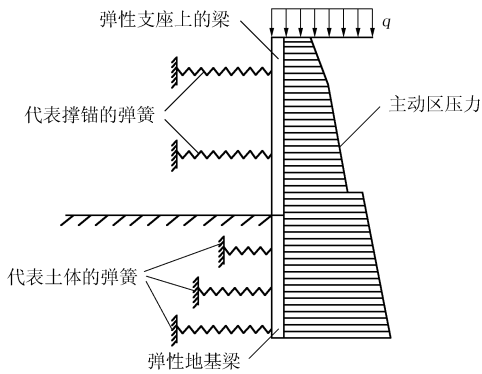


图1 杆系有限元计算模型

(1) 结构理想化。把基坑支护结构的各个组成部分,根据其结构受力特性,理想化为杆系单元,即将基坑底部以上部分支护结构简化为两端嵌固的梁单元、基坑底以下部分简化为弹性地基梁单元、撑杆简化为二力杆弹性支承单元等。

(2) 结构离散化。把支护结构沿竖向划分成有限个单元,一般每隔1~2 m划分一个单元。为计算方便,尽可能将节点布置在支护结构的截面、荷载突变处、弹性地基基床系数变化段及支撑或锚杆的作用点处,各单元以边界上的节点相连接。

(3) 确定单元刚度矩阵及总刚度矩阵。单元所受到的荷载和位移之间的关系,以单元刚度矩阵 $[K]^e$ 来确定,即:

$$\{F\}^e = [K]^e \{\delta\}^e \quad (1)$$

式中: $\{F\}^e$ ——单元节点力; $[K]^e$ ——单元刚度矩阵; $\{\delta\}^e$ ——单元节点位移。梁单元、Winkler 弹性地基梁单元的刚度矩阵可查阅文献[3]。

单元刚度矩阵 $[K]^e$ 确定后,还需根据变形协调条件,通过相应的矩阵变换将其集成为总体刚度矩阵 $[K]$,并将代表地基弹簧的弹性系数值叠加到总刚度矩阵中^[3]。

(4) 建立结构平衡方程并求解。基本平衡方程为:

$$[K]\{\delta\} = \{R\} \quad (2)$$

式中: $[K]$ ——结构总刚度矩阵; $\{\delta\}$ ——结构节点位移矩阵; $\{R\}$ ——结构节点荷载矩阵。根据静力平衡条件,作用在结构节点的外荷载必须与单元内荷载相平衡,单元内荷载由未知节点位移和单元刚度矩阵求得。如外荷载给定,可以求得未知的结构节点位移,进而求得单元内力。对于弹性地基梁的地基抗力,可由结构位移乘以地基系数求得。

(5) 位移修正。对于采用支撑杆系的基坑支护结构而言,在支撑架设之前,支撑点处的基坑支护结

构因上一工况的基坑开挖已经发生了较大的变形,而支撑架设后该点的变形是很小的,即基坑支护结构的位移在支撑架设之前已经发生并会影响基坑支护结构的内力,所以必须对式(2)进行修正。设在支撑安装前,支撑点处基坑支护结构因上一工况的开挖已经发生位移值为 δ_1 (图2a),则支撑安装后开挖到下一步支撑点时的计算图如图2b,即对相应的支撑杆系背离基坑支护结构的支座处进行位移修正,修正量为 δ_1 ,在这种条件下的计算结果可方便地计入由于杆系受力不同而发生相对变形时对基坑支护结构的内力影响。

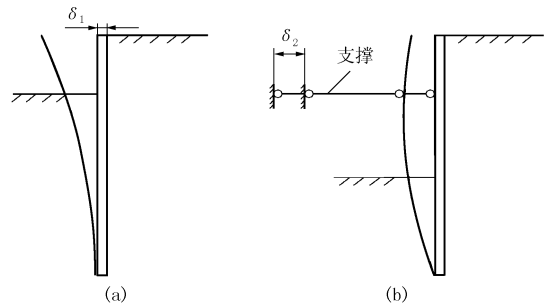


图2 支撑处的位移修正图

2 工程设计计算

2.1 设计概况

武汉地铁2号线某站点基坑围护结构如图3。

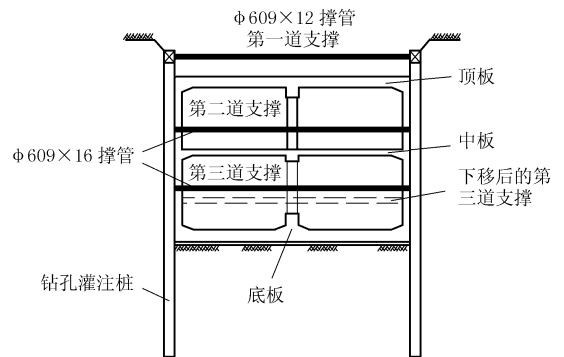


图3 围护结构横剖面图

该基坑总开挖深度为15.31 m,基坑外围超载取15 kPa,静止水位埋深2.0 m,土体计算参数见表1。设计时采用 $\text{O}1000@1200$ 、长为25.5 m的钻孔灌注桩作为车站主体围护结构,桩顶埋深1.0 m,采用3道型号为 $\text{O}609 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 、 $\text{O}609 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ 、 $\text{O}609 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ 的钢管作为支撑方式。灌注桩和地下车站顶板、中板和底板均采用C30混凝土,顶板厚800 mm、中板厚400 mm、底板厚900 mm;基坑底部垫层采用C20混凝土,厚为200 mm。该基坑分层开挖深度分别为桩顶以下0.9、5.9、

10.9 及 14.31 m(基坑底),并在前 3 次开挖面以上 0.5 m 处架设钢管支撑,同时施加相应的预压力。整个施工过程的具体工况如下(其中 1~7 工况为正工况;8、9 工况为逆工况):

表 1 土体计算参数

土层名称	土层厚度 /m	重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	压缩模量 /MPa	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /($^\circ$)	渗透系数 /($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	泊松比
杂填土	2.5	17.5	8	5	20	0.5	0.3
粘土	1.7	18.7	6.88	21	12	1.98×10^{-5}	0.35
粉质粘土	7.5	17.7	3.8	35	16	6.88×10^{-5}	0.3
粉质粘土	14.3	19.2	4.67	33	11	1.04×10^{-3}	0.3
夹粉土							
粉细砂	-	18.0	13.2	0	33	15.8	0.3

工况 1:开挖土体至桩顶以下 0.9 m;

工况 2:在桩顶以下 0.4 m 处施加第一道钢管支撑,预加轴力为 54 kN/延米;

工况 3:开挖土体至桩顶以下 5.9 m;

工况 4:在桩顶以下 5.4 m 处施加第二道钢管支撑,预加轴力为 530 kN/延米;

工况 5:开挖土体至桩顶以下 10.9 m;

工况 6:在桩顶以下 10.4 m 处施加第三道钢管支撑,预加轴力为 825 kN/延米;

工况 7:开挖土体至桩顶以下 14.31 m 处(基坑底);

工况 8:完成车站底板浇注、侧墙浇注到第三道支撑下面,并将第三道支撑下移 1.5 m,支撑于侧墙位置;

工况 9:在桩顶以下 7.15 m 处施做车站中板并拆除第二道支撑。

2.2 计算方法及计算结果

采用湖北地区《基坑工程技术规程》(DB 42/159-2004)所推荐的“弹性抗力法”分工况计算基

坑支护结构的土压力、位移、弯矩和剪力。从一个工况进入下一个工况的荷载增量用“反转荷载法”确定,即将加深开挖引起的上一工况的抗力损失改变方向作为下一工况的荷载增量。对于逆工况,则将拆除支撑的抗力损失反转为荷载,基坑回填和增加支撑(换撑)作为增加的抗力项。

按杆系有限元法通过编制的相应程序对该工程进行计算,土压力理论选择朗肯土压力理论,并考虑对砂质土层水土分算,非砂土层采用水土合算。计算中所用到的土水平向抗力系数随着深度变化的比例系数 m 和支撑杆系水平刚度系数 k_T 分别按如下方法^[4,5]确定:

$$m_i = \xi(1/\Delta)(0.2\varphi_{ik}^2 - 0.2\varphi_{ik} + c_{ik}) \quad (3)$$

式中: φ_{ik} 、 c_{ik} ——分别为第 i 层土固结不排水(快)剪摩擦角和粘聚力的标准值; Δ ——基坑底面处位移量,mm; ξ ——经验系数,一般粘性土、砂性土取 1.0,老粘性土、中密以上砾卵石取 1.8~2.0,淤泥、淤泥质土取 0.6~0.8。

$$k_T = 2\alpha EAS_m / (LS) \quad (4)$$

式中: k_T 、 E 、 A 、 L 、 S ——分别为支撑结构的水平刚度系数、弹性模量、截面积、受压计算长度及水平间距; α ——与支撑松弛有关的系数,取 0.8~1.0; S_m ——计算宽度。

图 4 为采用杆系有限元法得到的各施工工况不同深度处土压力、位移及内力计算结果。其中每个工况的位移、弯矩和剪力最大值及其出现处相对于桩顶距离的计算结果如表 2 所示。

根据计算结果:桩身位移最大值为 16.18 mm,满足规范对于一级基坑不大于 40 mm 的要求,可见设计是合理的。桩身最大弯矩标准值的绝对值为 937.77kN·m,考虑桩间距的影响并乘上分项系数

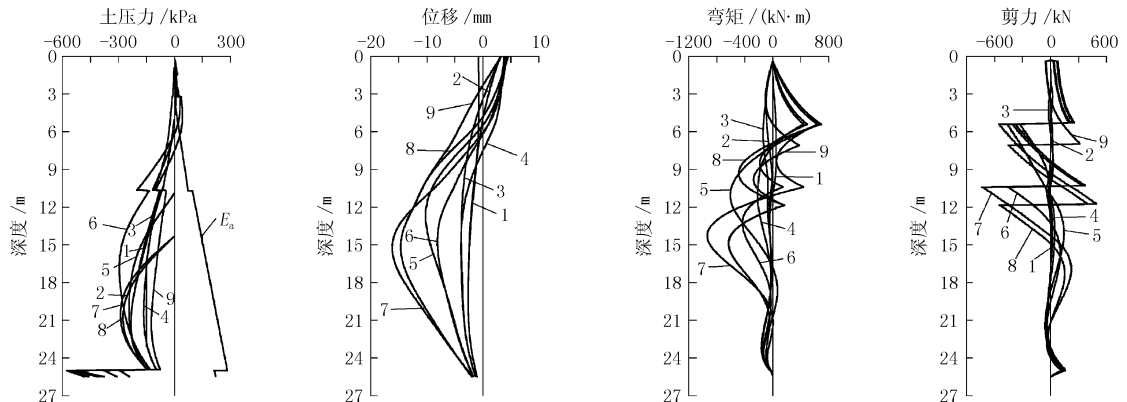


图 4 支护桩在各工况下的土压力、位移、弯矩和剪力图
1~9—第 1~9 工况; E_a —基坑开挖前桩所受的主动土压力

表 2 各工况的最大位移、弯矩和剪力及所在的位置

工况	位移最大值 /mm	位移最大值处相对桩顶深 /m	弯矩最大值 /(kN·m)	弯矩最大值处相对桩顶深 /m	剪力最大值 /kN	剪力最大值处相对桩顶深 /m
工况 1	-2.59	19.31	-155.51	23.22	-46.31	10.70
工况 2	3.32	0	-155.08	23.22	-53.35	0.40
工况 3	-3.82	14.36	-162.27	23.22	-48.81	0.40
工况 4	-3.91	15.30	439.22	5.40	-330.64	5.40
工况 5	-10.20	12.70	677.25	5.40	-467.93	5.40
工况 6	-8.16	14.76	491.62	5.40	-463.24	10.40
工况 7	-16.18	15.21	-937.77	14.31	-738.27	10.40
工况 8	-14.66	15.19	692.28	5.40	-557.10	5.40
工况 9	-14.66	15.19	-633.01	14.90	-547.97	11.85

后得到弯矩设计值为 $1.2 \times 1.35 \times 937.77 = 1519.19 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 采用均匀布置的方式配置 $22\Phi 28$ 钢筋。

2.3 计算结果分析

(1) 桩身最大位移、弯矩及剪力值均在正工况中出现; 桩身各工况中的最大位移出现处大多处于桩的下半部分, 并靠近基坑底部 ($d = 14.31 \text{ m}$), 这与文献[6]的结论是吻合的; 且正工况中(1~7 工况) 桩身位移基本上呈现逐渐增大的趋势。

(2) 桩身较大弯矩值集中在后几个工况中, 且最大值在最后一个正工况(7 工况) 中出现并处在基坑底部 ($d = 14.31 \text{ m}$); 且负弯矩出现处明显比正弯矩出现处的位置要低。

(3) 除第 1、9 个工况外, 其它所有工况的桩身的剪力最大值均是出现在施加支撑的地方 ($d = 0.4, 5.4$ 及 10.4 m 处)。

(4) 在正工况(1~7 工况) 中, 随着工况的进行桩身的最大位移、弯矩及剪力均呈逐渐增大趋势, 因而在实际工作中随着基坑深度的加大, 出现危险和质量问题的概率也随之加大。此外, 上述所有工况中桩身位移、弯矩及剪力的最大值均出现在第 7 工况和第 8 工况, 可见这 2 个工况对工程有较大影响;

对于更一般的情况即是出现在最后一次开挖和第一次移撑(换撑)的工况。

3 结语

杆系有限元法避开了静力平衡法不能准确计算基坑支护结构变形和连续介质有限元法复杂的缺点, 因其自身的优势在工程设计计算中应用越来越广泛。本文运用弹性地基梁杆系有限元法对武汉地铁 2 号线一个站点基坑支护工程进行了设计计算; 对计算结果的分析表明该设计是合理的, 该基坑支护结构的变形、内力随工况变化的规律可为其他类似基坑支护工程提供借鉴。

参考文献:

- [1] 张尚根, 华瑞平, 等. 基坑支护结构内力及变形动态分析[J]. 工程勘察, 2003, 22(3): 462-466.
- [2] 张强勇. 弹性地基梁杆系有限元法在深大基坑工程支护设计中的应用[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(3): 114-117.
- [3] 陈忠汉, 程丽萍. 深基坑工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [4] DB 42/159-2004, 基坑工程技术规程[S].
- [5] JGJ 120-99, 建筑基坑支护技术规程[S].
- [6] 谭志勇, 王余庆, 周根寿. 支护结构内力和变形的影响因素分析[J]. 工业建筑, 1999, 29(5): 12-15.