

基坑变形影响因素与 有限元数值模拟^{*}

李云安 葛修润

张鸿昌

(上海交通大学建筑工程与力学学院, 上海 200030) (中南勘察设计研究院, 武汉 430071)

【摘要】 基坑变形影响因素是其变形控制的重要内容之一, 在自制深基坑工程变形控制优化设计及其有限元数值模拟系统(SDCDEFEM)的基础上, 重点对影响基坑变形的各因素进行了有限元数值模拟分析, 并对实测和计算的基坑周边最大沉降、支护结构最大水平位移和坑底最大隆起及其位置进行了统计分析, 得出了简明估算基坑最大变形及其位置的统计关系式, 提出了经济有效的变形控制对策。

【关键词】 基坑; 变形控制; 变形影响因素; 有限元; SDCDEFEM 系统

【中图分类号】 TU413.62

Factors Influencing Deformation of Excavation Pits and Numerical Simulation with Finite Element Method

【Abstract】 Factors influencing deformation of excavation pits are one of important contents of its deformation control, which are developed to simulate and analyze in detail with the system of the optimized design with deformation control and the numerical simulation with finite element method in deep excavation-pit engineering (SDCDEFEM). Measured and simulated data of maximum settlement, maximum displacement, maximum swell and their places are statistically analysed. The statistic formula estimating maximum deformations and their places of deep excavation pits are obtained. Economical and effective measures of deformation control are put forward.

【Key words】 excavation pit; deformation control; factors influencing deformation; finite element; system of SDCDEFEM

0 引言

为了进一步研究深基坑变形的实质性状态变量即深基坑变形的**主要影响因素**^[1,2], 达到变形控制优化设计的目的, 本文利用自制的深基坑工程变形控制优化设计及其有限元数值模拟系统(SDCDEFEM), 对深基坑开挖支护各施工工况进行全过程数值模拟, 重点分析影响深基坑变形的因素及其规律, 并对计算的周边最大沉降、支护结构最大水平位移和坑底最大隆起及其位置进行数据统计分析, 以期获

得简明估算深基坑最大沉降、最大位移和最大隆起及其位置的统计关系式, 用于生产实践, 这对深基坑工程变形控制理论研究和实践应用都具有重要的意义。随着开挖支护深度的增加, 基坑变形呈非线性变化, 开挖支护步骤与基坑变形的定量关系还有待进一步研究。

1 SDCDEFEM 系统简介

目前深基坑工程不但其数量越来越多、规模越来越大、深度越来越深, 而且其问题越来越复杂、要求越来越高、工作量越来越大。为

* 受到北京东大桥商业大厦、武昌水果湖大厦和厦门建设银行大厦深基坑支护大型生产项目资助。

作者简介: 李云安, 男, 1965年生, 汉族, 湖北安陆市人, 工学博士, 副教授。现主要从事地基基础岩土工程与滑坡灾害地质工程专业教学和科研工作。

了达到快速、准确、高效地进行深基坑支护设计的目的,国内有多家单位开发出了深基坑支护设计软件,比较有代表性的是上海同济大学的“启明星”、“超明星”和“曙光”;北京的“理正”;北京中航勘察设计研究院的“深基坑支护之星”和“大力神”;武汉中南勘察设计研究院的“天汉”等软件。这些软件可以对多种形式的支护结构进行设计、变形验算和多项稳定性验算,较新的“曙光”和“超明星”还具有数值模拟的功能,但对粘弹塑性本构模型应用与水土结构耦合数值模拟部分和全面的数据分析部分涉及不多。本文在深入分析深基坑支护结构体系及其设计计算和深基坑变形控制优化设计的基础上^[3~6],重点对二维非线性有限元程序(NCAP2D)进行了大量的修改、补充和完善^[7~11],并针对深基坑变形(沉降、位移和隆起)、应力和应变等数据,在应用数理统计理论和方法的基础上将分形理论、突变理论、灰色理论和神经网络引入到数据分析中来,形成了深基坑工程变形控制优化设计及其有限元数值模拟系统(SDCDEFEM)。该系统分四大部分十个模块:第一部分为支护结构设计部分(DRS),包括支护结构内力和配筋计算模块(CIFRS)、支护结构位移计算模块(CDISRS)和基坑稳定性验算模块(CSTARS);第二部分为有限元数值模拟部分(NSFEM),包括有限元前处理模块(PREDFEM)、主程序模块(MAJORFEM)和后处理模块(POSTDFEM);第三部分为数据分析部分(ADATA),包括沉降、位移和隆起分析模块(ASEDISW)、应变分析模块(ASTN)和应力分析模块(ASTR);第四部分为概预算模块(BEB)。该系统具有强度控制、变形控制、成本控制优化设计;变形预测、动态设计、基坑支护全过程数值模拟;数理统计、分形理论、突变理论、灰色理论、神经网络分析;支护结构、地基基础、上部结构协同计算;以及根据周边环境条件确定变形控制标准的功能。

在有限元数值模拟部分(NSFEM)的主程

序模块(MAJORFEM)中,增加有梁单元与固体单元共同计算的功能,支护结构被离散成梁单元,作用于结构节点上的荷载和位移之间的关系以总刚度矩阵相联系。FEM可计算出单元的应力、应变和节点位移,利用节点的位移(角位移按结构力学方法而得)通过内力与刚度矩阵和节点位移的平衡方程求出梁单元内力(弯矩和剪力)。对于分步开挖模拟,如果某步开挖造成某个未被开挖的单元破坏,此时将其过量应力进行重新分配,并标记为不同类型破坏单元,下次开挖计算时,若为拉破坏则释放该单元应力进行重分布,若为塑性屈服则该单元应力不变,而单元应变和节点位移变化。

2 坐标系、参数及方案

深基坑数值模拟首先选取图1所示的坐标系,应力、应变以拉为正,压为负,位移与坐标轴正方向一致为正,反之为负。

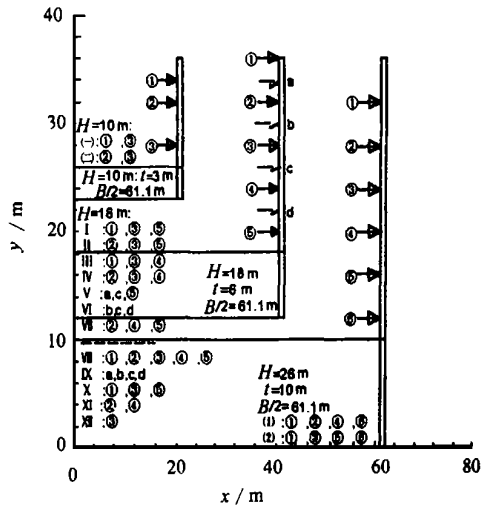


图1 有限元数值模拟坐标系及方案(A)

支护桩的弹性模量、抗拉强度、抗压强度、初始内摩擦角和初始粘聚力及土体的抗拉强度和抗压强度是用推导出来的公式(1)~(7)计算出来的。土体参数选用的一般粘土类土的指标,旨在寻找深基坑变形的规律,支护结构采用梁单元,节理单元采用强度等级为C7.5砼作近似,因支护桩和土之间有一层厚

度不大的水泥浆与土体混合层,是浇注支护桩时水泥浆向桩周围土体渗透形成的。根据变形协调条件推导出了求支护桩弹性模量 $E_{\text{桩}}$ 、抗拉强度 $\sigma_{\text{t桩}}$ 和抗压强度 $\sigma_{\text{c桩}}$ 的公式:

$$E_{\text{桩}} = \frac{E_{\text{筋}} \cdot A_{\text{筋}} + E_{\text{砼}} \cdot A_{\text{砼}}}{A_{\text{筋}} + A_{\text{砼}}} \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{t桩}} = \frac{E_{\text{桩}}}{E_{\text{砼}}} \cdot \sigma_{\text{t砼}} \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{c桩}} = \frac{E_{\text{桩}}}{E_{\text{砼}}} \cdot \sigma_{\text{c砼}} \quad (3)$$

式中: E 为弹性模量; A 为截面面积; σ_{t} 为抗拉强度; σ_{c} 为抗压强度。

在二维应力与莫尔库仑破坏准则条件下,推导出求支护桩的粘聚力 c 、内摩擦角 φ 和求土体的抗拉强度 σ_{t} 、抗压强度 σ_{c} 的公式:

$$c = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_{\text{c}} \sigma_{\text{t}}} \quad (\text{砼, 岩石}) \quad (4)$$

$$\varphi = \arctan \left[\frac{\sigma_{\text{c}} - \sigma_{\text{t}}}{2 \sqrt{\sigma_{\text{c}} \sigma_{\text{t}}}} \right] \quad (\text{砼, 岩石}) \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{t}} = 2c \sqrt{K_{\text{a}}} \quad (\text{土体}) \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{c}} = \frac{2c}{\sqrt{K_{\text{a}}}} \quad (\text{土体}) \quad (7)$$

式中: K_{a} 为朗肯主动土压力系数,其它符号同上。

3 有限元数值模拟

数值模拟选用深度 H 为 18 m,长 L 、宽 B 均大于 $3H$ 的深基坑,通过随机搜索优选方案并模拟,按类似的办法对深度为 10 m 和 26 m 的深基坑作了设计计算和模拟。数值模拟工作如下:首先确定模拟范围和剖分网格(见图 2),坑内取 $B/2$,坑外取 $5H$,坑底以下取 $3H$;然后确定边界条件,左边界为 x 方向固定, y 方向可以滑动的滑移支座,底边界为 x 方向和 y 方向均固定的固定支座,右边界为 y 方向固定, x 方向可以滑动的滑移支座,上边界为有地表超载的自由边界;最后选取材料参数和非线性本构模型,按分步开挖模拟,数值模拟方案见表 1 和图 1,数值模拟结果见表 2、表 3 及图 3。

表 1 有限元数值模拟方案(B)

| 序号 | 模 拟 方 案 | 方案代码 |
|----|--|---------------------------|
| 1 | 模拟方案(A)中的 I ~ VII 即三道锚杆为基础,变化锚杆的排列方式(7种)。 | I ~ VII |
| 2 | 以 I 为基础,变化锚杆的道数即从 5 道到 1 道。 | VIII ~ XII |
| 3 | 以 I 为基础,分别对 I 方案中的锚杆①,③,⑤加同样大小的力。 | j0, j1, j3, j5 |
| 4 | 以 I 为基础,同时对 I 中的①,③,⑤乘以加载系数 75%, 85%, 95%, 100%, 120%。 | b75, b85, b95, b100, b120 |
| 5 | 以 I 为基础,分别用 Druck-Prager(D-P)、Mean-Cone(M-C)、Expanding-Cone(E-C)模型。 | dp, pj, kz |
| 6 | 以 I 为基础,变化桩的入土深度 t : 6 m, 8 m, 10 m, 12 m。 | t6, t8, t10, t12 |
| 7 | 以深度 $H=18$ m 中的最佳方案 VII 为基础,对 $H=10$ m 和 $H=26$ m 的深基坑分别进行优化设计和模拟。 | (一), (二), (1), (2) |
| 8 | 以 VI 为基础,保持 φ_0 不变,将 c_0 值从 14.7 kPa, 按 5 递增变化到 34.7 kPa。 | c1 ~ c5 |
| 9 | 以 VI 为基础,保持 c_0 不变,将 φ_0 从 10.8° 按 5 递增到 30.8°。 | fa ~ fe |
| 10 | 以 VII 为基础,将 c_0 、 φ_0 分别从 14.7 kPa、10.8° 按 5 递增同步变化分别到 34.7 kPa、30.8°。 | i1 ~ i5 |
| 11 | 以 VI 为基础,将土体的变形模量从 7.35 MPa, 按 0.5 递增到 9.35 MPa。 | e1 ~ e5 |
| 12 | 以 VI 为基础,将土体重度从 17.1 kN/m ³ 按 1.0 递增到 21.1 kN/m ³ 。 | g1 ~ g5 |
| 13 | 以 VI 为基础,将地表超载 q_0 从 0.0 kN/m ² 按 10 递增到 40 kN/m ² 。 | q1 ~ q5 |
| 14 | 以 VI 为基础,将泊松比 u 从 0.25 以 0.05 递增到 0.45。 | m1 ~ m5 |

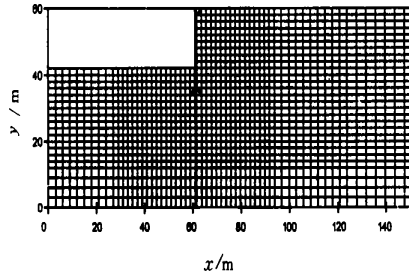
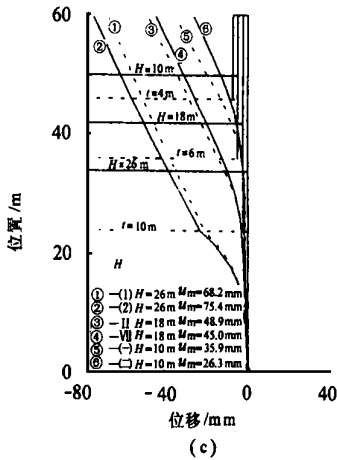
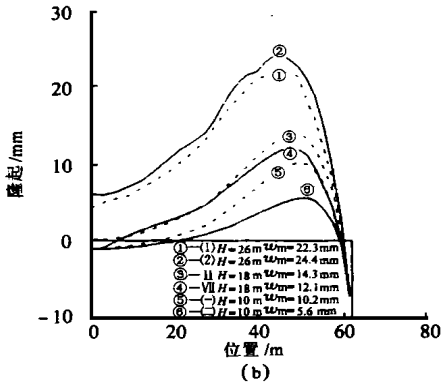
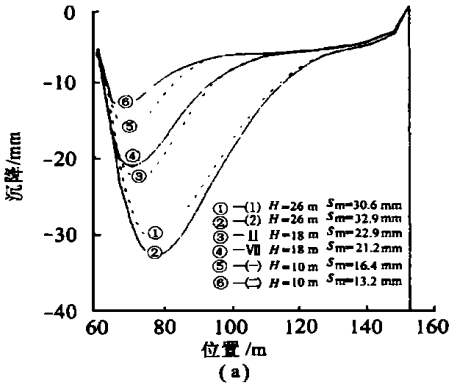
图2 有限元数值模拟网格剖分图($H=18\text{m}$, $t=6\text{m}$)

表2 有限元数值模拟外因结果表(A)

| 方案 代码 | u_m /mm | s_m /mm | w_m /mm | y_{um} /m | x_{sm} /m | x_{wm} /m | s_m / u_m | w_m / u_m | w_m / s_m |
|----------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|------------------|
| I | 49.8 | 23.4 | 13.7 | 0.0 | 12.4 | 14.4 | 0.47 | 0.28 | 0.59 |
| II | 48.9 | 22.9 | 14.3 | 0.0 | 12.4 | 12.4 | 0.47 | 0.29 | 0.62 |
| III | 54.9 | 25.3 | 18.4 | 0.0 | 12.4 | 16.4 | 0.46 | 0.33 | 0.73 |
| IV | 57.8 | 25.2 | 17.2 | 0.0 | 12.4 | 14.4 | 0.44 | 0.30 | 0.68 |
| V | 50.3 | 22.7 | 12.1 | 0.0 | 10.4 | 14.4 | 0.45 | 0.24 | 0.53 |
| VI | 81.9 | 23.7 | 14.0 | 0.0 | 10.4 | 14.4 | 0.46 | 0.27 | 0.59 |
| VII | 45.0 | 21.2 | 12.1 | 0.0 | 10.4 | 14.4 | 0.47 | 0.27 | 0.57 |
| VIII | 49.4 | 22.7 | 12.9 | 0.0 | 10.4 | 14.4 | 0.46 | 0.26 | 0.57 |
| IX | 49.5 | 23.3 | 16.1 | 0.0 | 12.4 | 14.4 | 0.47 | 0.33 | 0.69 |
| X | 49.8 | 23.4 | 13.7 | 0.0 | 12.4 | 14.4 | 0.47 | 0.28 | 0.59 |
| XI | 49.7 | 22.6 | 12.7 | 0.0 | 10.4 | 12.4 | 0.46 | 0.26 | 0.56 |
| XII | 44.6 | 21.4 | 13.0 | 0.0 | 10.4 | 14.4 | 0.48 | 0.29 | 0.61 |
| j0 | 49.8 | 23.4 | 13.7 | 0.0 | 12.4 | 14.4 | 0.47 | 0.28 | 0.59 |
| j1 | 44.8 | 21.1 | 12.9 | 0.0 | 12.4 | 14.4 | 0.47 | 0.29 | 0.61 |
| j3 | 41.9 | 20.6 | 12.0 | 0.0 | 10.4 | 14.4 | 0.49 | 0.29 | 0.58 |
| j5 | 47.0 | 22.7 | 15.7 | 0.0 | 12.4 | 14.4 | 0.48 | 0.33 | 0.69 |
| t6 | 49.8 | 23.4 | 13.7 | 0.0 | 12.4 | 14.4 | 0.47 | 0.28 | 0.59 |
| t8 | 48.2 | 22.0 | 14.0 | 0.0 | 12.4 | 16.4 | 0.46 | 0.29 | 0.64 |
| t10 | 40.7 | 19.6 | 11.0 | 0.0 | 12.4 | 14.4 | 0.48 | 0.27 | 0.56 |
| t12 | 35.6 | 18.4 | 11.0 | 0.0 | 12.4 | 14.4 | 0.52 | 0.31 | 0.60 |
| b75 | 49.8 | 23.4 | 13.7 | 0.0 | 12.4 | 14.4 | 0.47 | 0.28 | 0.59 |
| b85 | 51.3 | 23.8 | 15.0 | 0.0 | 12.4 | 14.4 | 0.46 | 0.29 | 0.63 |
| b95 | 43.7 | 20.9 | 13.1 | 0.0 | 12.4 | 14.4 | 0.48 | 0.30 | 0.63 |
| b100 | 45.8 | 21.4 | 12.9 | 0.0 | 12.4 | 14.4 | 0.47 | 0.28 | 0.60 |
| b120 | 38.0 | 19.2 | 9.2 | 0.0 | 12.4 | 12.4 | 0.51 | 0.24 | 0.48 |
| q1 | 44.7 | 20.9 | 9.9 | 0.0 | 8.4 | 12.4 | 0.47 | 0.22 | 0.47 |
| q2 | 43.6 | 20.3 | 10.6 | 0.0 | 10.4 | 12.4 | 0.47 | 0.24 | 0.52 |
| q3 | 48.6 | 21.9 | 14.4 | 0.0 | 10.4 | 12.4 | 0.45 | 0.30 | 0.66 |
| q4 | 48.6 | 22.3 | 14.3 | 0.0 | 10.4 | 14.4 | 0.46 | 0.29 | 0.64 |
| q5 | 47.9 | 22.1 | 13.9 | 0.0 | 10.4 | 14.4 | 0.46 | 0.29 | 0.63 |

表3 有限元数值模拟内因结果表(B)

| 方案 代码 | u_m /mm | s_m /mm | w_m /mm | y_{um} /m | x_{sm} /m | x_{wm} /m | s_m / u_m | w_m / u_m | w_m / s_m |
|----------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|------------------|
| dp | 49.8 | 23.4 | 13.7 | 0.0 | 12.4 | 14.4 | 0.47 | 0.28 | 0.59 |
| pj | 44.4 | 20.9 | 11.7 | 0.0 | 10.4 | 12.4 | 0.47 | 0.26 | 0.56 |
| kz | 33.8 | 16.5 | 5.9 | 0.0 | 10.4 | 10.4 | 0.49 | 0.18 | 0.36 |
| c1 | 47.8 | 22.5 | 16.7 | 0.0 | 12.4 | 16.4 | 0.47 | 0.35 | 0.74 |
| c2 | 46.7 | 22.4 | 16.4 | 0.0 | 12.4 | 12.4 | 0.48 | 0.35 | 0.73 |
| c3 | 48.6 | 21.9 | 14.4 | 0.0 | 10.4 | 12.4 | 0.45 | 0.30 | 0.66 |
| c4 | 48.0 | 22.1 | 12.2 | 0.0 | 10.4 | 14.4 | 0.46 | 0.25 | 0.55 |
| c5 | 40.8 | 19.4 | 8.9 | 0.0 | 10.4 | 12.4 | 0.48 | 0.22 | 0.46 |
| fa | 93.7 | 62.0 | 47.1 | 0.0 | 20.4 | 46.4 | 0.66 | 0.50 | 0.76 |
| fb | 67.2 | 34.3 | 24.2 | 0.0 | 12.4 | 14.4 | 0.51 | 0.36 | 0.71 |
| fc | 48.6 | 21.9 | 14.4 | 0.0 | 10.4 | 12.4 | 0.45 | 0.30 | 0.66 |
| fd | 26.4 | 13.1 | 4.2 | 0.0 | 8.4 | 12.4 | 0.50 | 0.16 | 0.32 |
| fe | 13.6 | 8.6 | 1.3 | 0.0 | 10.4 | 10.4 | 0.63 | 0.10 | 0.15 |
| il | | | 76.6 | | | 20.4 | | | |
| i2 | 72.3 | 35.9 | 25 | 0.0 | 12.4 | 16.4 | 0.50 | 0.35 | 0.70 |
| i3 | 48.6 | 21.9 | 14.4 | 0.0 | 10.4 | 12.4 | 0.45 | 0.30 | 0.66 |
| i4 | 23.7 | 12.4 | 4.0 | 0.0 | 8.4 | 10.4 | 0.52 | 0.17 | 0.32 |
| i5 | 11.5 | 8.1 | 0.6 | 0.0 | 8.4 | 10.4 | 0.70 | 0.05 | 0.07 |
| e1 | 17.0 | 13.0 | 4.9 | 0.0 | 10.4 | 14.4 | 0.77 | 0.29 | 0.38 |
| e2 | 46.2 | 19.0 | 9.9 | 0.0 | 12.4 | 16.4 | 0.41 | 0.21 | 0.52 |
| e3 | 48.6 | 21.9 | 14.4 | 0.0 | 10.4 | 12.4 | 0.45 | 0.30 | 0.66 |
| e4 | 80.3 | 22.9 | 18.6 | 0.0 | 16.4 | 16.4 | 0.29 | 0.23 | 0.81 |
| e5 | 92.9 | | 12.6 | 2.0 | | 14.4 | | | |
| g1 | 42.8 | 19.8 | 11.4 | 0.0 | 10.4 | 12.4 | 0.46 | 0.27 | 0.58 |
| g2 | 42.0 | 19.6 | 11.7 | 0.0 | 10.4 | 14.4 | 0.47 | 0.28 | 0.60 |
| g3 | 48.6 | 21.9 | 14.4 | 0.0 | 10.4 | 12.4 | 0.45 | 0.30 | 0.66 |
| g4 | 44.6 | 20.7 | 9.9 | 0.0 | 10.4 | 14.4 | 0.46 | 0.22 | 0.48 |
| g5 | 47.5 | 22.0 | 13.5 | 0.0 | 10.4 | 12.4 | 0.46 | 0.28 | 0.61 |
| m1 | 54.6 | 23.2 | 4.9 | 0.0 | 10.4 | 14.4 | 0.43 | 0.09 | 0.21 |
| m2 | 93.5 | | 17.4 | 6.0 | | 18.4 | | | |
| m3 | 48.6 | 21.9 | 14.4 | 0.0 | 10.4 | 12.4 | 0.45 | 0.30 | 0.66 |
| m4 | 34.4 | 17.0 | 14.9 | 0.0 | 14.4 | 14.4 | 0.49 | 0.43 | 0.88 |
| m5 | | | | | | | | | |
| (一) | 35.9 | 16.4 | 10.2 | 0.0 | 8.4 | 12.4 | 0.46 | 0.28 | 0.62 |
| (二) | 26.3 | 13.2 | 5.6 | 0.0 | 8.4 | 10.4 | 0.50 | 0.21 | 0.42 |
| (1) | 68.2 | 30.6 | 22.3 | 0.0 | 14.4 | 16.4 | 0.45 | 0.33 | 0.73 |
| (2) | 75.4 | 32.9 | 24.2 | 0.0 | 16.4 | 16.4 | 0.44 | 0.32 | 0.74 |



(a) 沉降 (b) 隆起 (c) 位移
图3 基坑变形曲线图

4 有限元数值模拟结果统计分析

从表2可以看出,同一基坑桩锚支护体系,在土性参数不变的前提下,无论支护方案如何变化,虽然各方案模拟出来的最大沉降 s_m 、最大水平位移 u_m 和最大隆起 w_m 各不相

同,但最大沉降与最大水平移位的比值,最大隆起与最大水平位移的比值很稳定,即 $s_m/u_m=c_1$ (常数), $w_m/u_m=c_2$ (常数),同时最大沉降点 x_{sm} 和最大隆起点 x_{wm} 的位置也很固定。为了进一步研究它们之间的相互关系,作者利用SDCDEFEM系统的ASEDISW模块对表2中后6项作了统计分析(见表4)。统计分析结果有力地证明了: $s_m/u_m=c_1$ (常数), $w_m/u_m=c_2$ (常数), $x_{sm}/H=c_3$ (常数), $x_{wm}/H=c_4$ (常数)。因此以上各式可以用于估算深基坑最大变形值及其位置,其中 $c_1=0.47$, $c_2=0.28$, $c_3=0.63$, $c_4=0.79$,由于 $c_1\sim c_4$ 是在土质为一般粘土类土,桩锚支护体系的条件下得出的,因而这些条件均应成为常数 $c_1\sim c_4$ 的应用条件。为了进一步证明这一点,作者对表3又作了类似的统计分析,其结果见表5,可以看出,在基坑土性参数变化的条件下,其平均值相近,但极差和标准方差都偏大,因而 $c_1\sim c_4$ 常数是变化的,也就是说不同基坑因土性参数不同其 $c_1\sim c_4$ 是不同的。

表4 有限元数值模拟外因部分
结果的数理统计分析(A)

| 统计量 | y_{um}/m | x_{sm}/m | x_{wm}/m | s_m/u_m | w_m/u_m | w_m/s_m |
|------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| 平均值 | 0.0 | 11.5 | 14.3 | 0.47 | 0.28 | 0.60 |
| 极差 | 0.0 | 4.0 | 4.0 | 0.08 | 0.11 | 0.25 |
| 标准方差 | 0.0 | 1.1 | 0.9 | 0.02 | 0.03 | 0.06 |
| 相 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 关系 | 0.00 | 1.00 | 0.56 | 0.24 | 0.52 | 0.42 |
| 系数 | 0.00 | 0.56 | 1.00 | 0.08 | 0.51 | 0.47 |
| 数 | 0.00 | 0.24 | 0.08 | 1.00 | 0.08 | -0.27 |
| 矩 | 0.00 | 0.52 | 0.51 | 0.08 | 1.00 | 0.94 |
| 阵 | 0.00 | 0.42 | 0.47 | -0.27 | 0.94 | 1.00 |

表5 有限元数值模拟内因部分
结果的数理统计分析(B)

| 统计量 | y_{um}/m | x_{sm}/m | x_{wm}/m | s_m/u_m | w_m/u_m | w_m/s_m |
|------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| 平均值 | 0.0 | 11.4 | 14.3 | 0.49 | 0.27 | 0.56 |
| 极差 | 0.0 | 12.0 | 36.0 | 0.48 | 0.45 | 0.80 |
| 标准方差 | 0.0 | 2.7 | 6.0 | 0.09 | 0.09 | 0.19 |
| 相 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 关系 | 0.00 | 1.00 | 0.74 | -0.09 | 0.63 | 0.61 |
| 系数 | 0.00 | 0.74 | 1.00 | 0.23 | 0.56 | 0.34 |
| 数 | 0.00 | -0.09 | 0.23 | 1.00 | -0.06 | -0.48 |
| 矩 | 0.00 | 0.63 | 0.56 | -0.06 | 1.00 | 0.88 |
| 阵 | 0.00 | 0.61 | 0.34 | -0.48 | 0.88 | 1.00 |

其中: c_1 的变化范围为 0.4~0.8; c_3 的变化范围为 0.45~0.75, 这一点可从两方面得到佐证: 其一是上海地区实测值统计^[3], $u_m = 1.4s_m$; 其二是武汉市 17 个不同类型深基坑实测沉降与位移比值和最大沉降点与基坑深度比值变化范围为 0.4~0.8。另外值得注意的: 最大沉降点和最大隆起点位置具有关系式为:

$$x_{sm} = (H - t) \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (8)$$

$$x_{wm} = (H + t) \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (9)$$

本文利用北京东大桥商业大厦、武昌水果湖大厦、厦门建设银行大厦深基坑实测变形来验证以上统计关系(见表 6)。

表 6 三个工程实例数值模拟值、实测值、模拟统计值之比较表

| 模 型 | 变 形 | 北京东大桥商业大厦 | | | 武昌水果湖大厦 | | | 厦门建设银行大厦 | | |
|------------------------------|-------------------|-----------|-------|-------|---------|-------|------|----------|-------|------|
| | | 计算值 | 实测值 | 误差 | 计算值 | 实测值 | 误差 | 计算值 | 实测值 | 误差 |
| Dnick-Prager | u_m / mm | 24.3 | 25.0 | -0.7 | 29.7 | 29.0 | 0.7 | 13.3 | 13.5 | -0.2 |
| $a_0 = (s_m / u_m)_0 = 0.47$ | s_m / mm | 11.9 | 13.0 | -1.1 | 16.2 | 15.0 | 1.2 | 10.4 | 9.5 | 0.9 |
| | w_m / mm | 5.9 | | | 14.0 | | | 2.7 | | |
| $b_0 = (w_m / u_m)_0 = 0.28$ | s_m / u_m | 0.49 | 0.52 | -0.03 | 0.55 | 0.52 | 0.03 | 0.78 | 0.70 | 0.08 |
| | w_m / u_m | 0.25 | | | 0.47 | | | 0.21 | | |
| $a = s_m / u_m$ | $(a - a_0) / a_0$ | 4.3% | 10.6% | | 17.0% | 10.6% | | 66.0% | 48.9% | |
| $b = w_m / u_m$ | $(b - b_0) / b_0$ | -10.7% | | | 67.9% | | | -25.0% | | |

5 结 论

1) 在影响基坑变形的内因中, 土体的变形模量 E 、泊松比 μ 和内摩擦角 φ 对基坑变形的影响较为显著, 而重度 γ 、粘聚力 c 则影响较小, 且强度参数与变形参数是相互匹配的。对于重要工程项目, 在选择土体的 E 、 μ 和 φ 值时要慎重, 尤其要有符合实际应力状态的实验、试验作支持。

2) 在影响基坑变形的内因中, 在其它因素不变的前提下, 同道数锚杆的排列方式与基坑变形关系密切, 以基坑下部密布和上部疏布方式较好, 不但最大弯矩和最大剪力较小, 变形(位移)符合要求, 而且桩入土深度较短, 锚杆轴力总和与其它方式的几乎相等, 不仅可达到变形控制优化设计的目的, 而且可降低成本, 减少投资。

3) 数值模拟的结果表明: 同一基坑在满足强度控制的前提下, 基坑变形与锚杆道数的关系不大, 而与锚杆所施加的预应力关系密切, 施加的预应力越大, 基坑变形越小, 在支护桩中部加力, 变形控制效果较为显著。若锚杆改

为内支撑, 即数值模拟中给定了非零已知位移的边界条件, 内支撑道数对基坑变形控制效果的影响较大。

4) 同一基坑桩锚支护体系, 无论支护方案如何变化, 最大沉降与最大水平位移的比值, 最大隆起与最大水平位移的比值很稳定, 即 $s_m / u_m = c_1$ (常数), $w_m / u_m = c_2$ (常数), 同时最大沉降点和最大隆起点的位置分别与基坑深度的比值为: $x_{sm} / H = c_3$ (常数), $x_{wm} / H = c_4$ (常数)。以此可以估算基坑的最大沉降、最大水平位移或最大隆起及其位置, 并指导土方开挖, 坑底最大隆起处留土反压, 变形控制经济有效。以上统计关系式是有条件的, 并不是各处可用, 但在一般粘土类土和桩锚支护体系的基坑条件下, 变形估算和最大变形位置的预估对设计和施工都具有一定的参考和应用价值。

5) 数值模拟结果表明: 对于桩锚支护体系, 增加支护桩入土深度 t , 可以减小基坑变形, t 以每 4 m 增加, 变形减小效果较为显著,

(下转第 85 页)

7 结 语

1) 工程实践表明: 采用夯扩桩作为高层建筑软土地基中的桩基础只要设计和施工处理得当, 同样是安全可靠的, 且具有明显的经济效益。

2) 为避免夯扩桩易产生断桩、缩颈等质量问题, 保证桩身混凝土质量可靠, 在施工时应采取有效措施。

(上接第 68 页)

但当 $t/H \geq \alpha$ (近于 1 的常数) 时, 增加入土深度对变形控制效果不显著。

6) 给出了计算支护桩弹性模量、抗拉强度、抗压强度、粘聚力、内摩擦角的公式和求土体的抗拉强度、抗压强度的公式。

参 考 文 献

- 1 李云安. 深基坑工程变形控制优化设计及其有限元数值模拟系统研究: [学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2000
- 2 李云安, 钟玉芳, 张鸿昌. 影响基坑变形实质性状态分析. 地质与勘探, 2000, 6(2): 49~52
- 3 刘建航, 侯学渊主编. 基坑工程手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. 75~321
- 4 黄强. 基坑土体稳定性无量纲分析. 见: 潘家铮等主编. 岩土工程青年专家学术论坛文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. 182~189
- 5 侯学渊, 杨敏主编. 软土地基变形控制设计理论和工程实践. 上海: 同济大学出版社, 1996. 64~217

参 考 文 献

- 1 中国建筑科学研究院. JGJ94-94. 建筑桩基技术规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995
- 2 杨家丽. 夯扩桩的施工与质量控制. 见: 刘金砺主编. 桩基工程设计与施工技术. 北京: 中国建材工业出版社, 1994

收稿日期: 2000-11-13

- 6 朱合华, 杨林德, 桥本正. 深基坑工程动态施工反演分析与变形预报. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 30~35
- 7 潘别桐, 黄润秋主编. 工程地质数值法. 北京: 地质出版社, 1994. 23~123
- 8 Chang Yu-ou, Associate Member, ASCE, et al. Threedimensional Finite Element Analysis of Deep Excavations. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(5): 337~345
- 9 N. Markris, G. Gazetas, Delis. Dynamic Soil-foundation Structure Interaction; Records and Predictions. Geotechnique, 1996, 46(1): 33~50
- 10 Charles W. W. Ng, B. Simpson, M. L. Ling, D. F. T. Nash. Numerical Analysis of a Multipropped Excavation in Stiff Clay. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35: 115~130
- 11 H. G. Poulos, Fellow, ASCE, L. T. Chen. Pile Response due to Excavation - Induced Lateral Soil Movement. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(2): 94~99

收稿日期: 2001-01-09