

影响基坑变形的实质性状态变量分析

李云安¹, 钟玉芳², 张鸿昌³

(1. 中国地质大学工程学院, 武汉 430074; 2. 中国地质大学地球科学学院 430074;
3. 中南勘察设计研究院, 武汉 430071)

[摘 要]深基坑变形控制设计中,要考虑影响基坑变形的因素非常多,各因素又很复杂。用非线性数值分析方法进行基坑变形分析的工作量相当大,时间很长。为了快速准确地分析基坑变形的规律,必须筛选出主要的因素。为此视基坑数值分析范围为一个系统,基坑周边沉降、支护结构位移和坑底隆起为系统输出量,降水、开挖和支护施工各工况中变化的因素为系统输入量。通过多个基坑实测沉降、位移、隆起量时序数据的关联维数和实质性状态变量个数即基坑变形主要影响因素个数计算,结果其个数大为减少,极大地减少了数值分析的工作量,对指导变形控制设计和施工具有重要的理论和实践意义。

[关键词]基坑系统 基坑变形 变形控制 关联维数 实质性状态变量

[中图分类号]TU413.6⁺1 [文献标识码]A [文章编号]0495-5331(2000)02-0049-04

1 引言

随着城市高层超高层建筑的飞速发展,深基坑规模特别是基坑深度的不断增大,深基坑降水、开挖和支护施工引起的地层变形对周边建(构)筑物、管线、道路等的影响越来越严重,基坑降水、开挖、支护设计和施工除了要满足以控制强度设计的基坑稳定

性以外,还须满足以控制变形设计的基坑有效性,在软土地区后者往往占主导地位^[1、2]。

影响基坑变形的因素很多,概括起来有空间几何、水工地质、支护结构、施工工况、暴露时间、周边环境等 6 个大的方面,各大方面又细分为几十个小方面(表 1)。

表 1 影响基坑变形的因素

影响基坑变形的因素	具体因素	备注
空间几何因素	空间几何形状(包括各工况形状)和平面尺寸(长、宽或半径) 开挖深度	诸因素有 主要与次 要、内因 与外因、必 然与偶然 之分,视具 体情况 而定
水工地质因素	土层组成和结构及物理力学性质 地下土层数和孔隙水压力	
支护结构因素	围护结构类型、刚度和入土深度 支撑或锚杆刚度、道数、预应力	
施工工况因素	降水防渗、土方开挖和支护施工 施工工艺和质量	
暴露时间因素	基坑暴露时间 顺逆各工况时间	
周边环境因素	周边静、动超载 地表水和上下水管的渗漏	

面对如此众多的因素,若逐个分析起来十分不便,特别是不能快速准确地抓住主要因素进行基坑变形稳定性和有效性分析。根据当前深基坑开挖支护施工中采用信息化施工法,通过现场监测来修改、完善设计并指导施工。基于数值分析的变形监控法^[3],由于施工过程中土体力学性质的变化,预报结果与现场测量数据往往有较大的出入,另外非线性

反分析和正分析计算时间又相对较长,为达到快速准确分析基坑稳定性和有效性的目的,将从基坑作为一个系统的角度入手,影响基坑变形(沉降、位移、隆起)的因素为基坑系统的元素,通过对一段时间内基坑变形观测值的分形分析,来探讨基坑系统的力学性态,讨论影响基坑系统性态的实质性状态变量个数(即影响基坑变形的主要因素个数)。

[收稿日期]1999-12-08;[修定日期]2000-01-10;[责任编辑]王 梅。
[基金项目]成都理工大学国家重点(专业)实验室:滑坡学基础理论方法研究项目资助。

2 基坑系统

基坑系统是指基坑开挖支护施工中,可能影响的平面和剖面有效立体空间范围,以数值分析范围为准。该系统以影响基坑变形的因素为系统元素,以基坑周边沉降、支护结构位移和坑底隆起为系统输出量,以降水、开挖和支护施工各工况中变化的因素为系统输入元素,该系统在整个施工过程中不断地与系统外部环境进行物质和能量的交换,因此基坑系统是个耗散系统。基坑系统的稳定性是指系统在不断输入和输出演化中不会导致系统功能失效。要研究基坑系统的稳定性,必须知道反映该系统的基本物理量。基坑监测结果表明,基坑沉降、位移和隆起都是非常明显的动态时间序列变量,基坑变形是基坑空间几何、水工地质、支护结构、施工工况、暴露时间、周边环境等复杂因素方面共同作用的结果。因此可分别利用基坑周边沉降、支护结构位移或坑底隆起等时间序列数据分析基坑系统的分维数、实质性状态变量个数及力学性态。

根据近代系统论中耗散结构吸引子理论:对于某一系统,其状态变量形成一个很大的状态空间即相空间。在相空间中,系统有多少个状态变量,相空间就有多少维数。对于耗散系统,系统演化使相空间收缩到一个比相空间本身维数低得多的子空间上来,如果我们能够判知系统最终收缩到一个不变的子空间,那么就完全消除了(对吸引子)或部分消除了(对混沌)系统演化的不确定性,获得系统演化的信息^[4]。影响基坑变形的各种因素均可看作基坑这个大系统的状态变量,基坑系统在降水开挖前、施工中及施工后期阶段的某一瞬时状态在相空间上对应某一个点,相空间点随时间在不断变化形成一条曲线即相空间轨道。随着土方开挖和支护结构施工的不断进行,这个相空间轨道收敛于一个不变的状态子集即子空间,该不变的状态子集又为状态空间吸引子。关于吸引子维数 d 的定义有多种,如相似维数、容量维数、关联数等^[5]。其中关联维数在本次研究中具有重大意义,有关联维数计算可得到描述基坑系统需要实质性状态变量个数的信息。对基坑系统,其输出元素(沉降、位移、隆起)在现场监测中获得,用这些实测的时序数据计算其关联维数的实质性状态变量数来确定基坑系统的状态空间吸引子。根据系统论,吸引子维数 d 可提供关于系统状态的有用信息。 d 等于 1 时,系统为自持周期振荡; d 等于 2 时,系统为具有两种不可匹配频率的准周期振

荡; d 为分数维时,系统为混沌不定性。

3 基坑系统关联维数和实质性状态变量个数的计算原理和方法

利用监测的沉降、位移或隆起时间序列数据计算基坑系统关联维数和实质性状态变量个数的过程如下:设一基坑某点沉降时间序列数据为(经过 Δt 时间插值):

$$S(t): S(t_1), S(t_2), \dots, S(t_i), \dots, S(t_N), \dots$$

它可以支起一个 M 维的相空间。从该时间序列中取头 M 个等时间间隔点数据: $S(t_1), S(t_2), \dots, S(t_M)$, 它在 M 维空间中确定出第一个点,把它记为 r_1 , 然后去掉 $S(t_1)$, 再依次取 M 个数据: $S(t_2), S(t_3), \dots, S(t_{M+1})$, 它在 M 维空间中确定出第二个点,把它记为 r_2 , 依此类推可以构造一大批相点:

$$r_3: S(t_3), S(t_4), \dots, S(t_{M+2})$$

$$r_4: S(t_4), S(t_5), \dots, S(t_{M+3})$$

...

$$r_i: S(t_i), S(t_{i+1}), \dots, S(t_{M+i-1})$$

...

$$r_N: S(t_N), S(t_{N+1}), \dots, S(t_{M+N-1})$$

设共生成 N 个相点 $r_1, r_2, \dots, r_N$, 任一给定一个数 r , 然后检查一遍有多少点对 (r_i, r_j) 之间的距离小于 r , 把距离小于 r 的点对数占总对数 $(\frac{N(N-1)}{2})$ 的比例记作 $C(r)$, 其公式为:

$$C(r) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}}^N \theta(r - |r_i - r_j|) \quad (1)$$

其中 $\theta(x)$ 是跃阶函数,当 x 大于零时 $\theta(x)$ 等于 1, 当 x 小于等于零时 $\theta(x)$ 等于 0。 $C(r)$ 称为关联函数。Nicolis 和 Prigogine (1986)^[6]证明了如果取适当的 r 值,则关联函数 $C(r)$ 与距离 r 的某个数 d 的幂次方有如下关系式:

$$C(r) = r^d \quad (2)$$

其中 d 是关联维数。对(2)两边取对数,则:

$$d = \ln C(r) / \ln(r) \quad (3)$$

由(3)式可方便地求出关联维数。对于给定一个 M 值,可以得到一条 $\ln C(r)$ 与 $\ln r$ 的曲线,变化 M 值,可以得出一批这样的曲线。当 M 大于等于某一值时,曲线中的直线部分的斜率不再变化,这一 M 值就是相空间中实质性状态变量个数即基坑变形主要影响因素个数。

4 利用基坑变形实测数据计算基坑系统的实质性状态变量个数和关联维数

根据以上分维数计算原理和方法,利用几个基坑监测资料及支护结构设计资料进行计算(中医院

位移 8 个点,沉降 13 个点;水果湖大厦位移 9 个点,沉降 8 个点;友谊广场位移 6 个点,沉降 6 个点;中南财经大学位移 5 个点,沉降 14 个点),结果如下(表 2,图 1)。

表 2 关联维数 (d) 和实质性状态变量个数 (M) 的计算结果

基坑名称	工程概况	实质性状态变量个数 (M)	关联维数 (d)	备注
武汉市中医院综合楼	基坑长 50 m,宽 24 m,深 7.45 m,地下连结墙加内支撑支护型式	位移: M = 3 ~ 5 沉降: M = 4 ~ 5	1.56 ~ 1.77 1.10 ~ 1.22	$\Delta t = 1$ $\Delta t = 1$
水果湖大厦	基坑长 93.3 m,宽 37.6 m,深 11.7 m,桩锚支护型式	位移: M = 3 ~ 5 沉降: M = 4 ~ 5	0.87 ~ 0.92 1.08 ~ 1.20	$\Delta t = 1$ $\Delta t = 2$
武汉友谊国际广场	基坑长 110 m,宽 41.4 m,深 10.4 m,桩锚支护型式	位移: M = 3 ~ 4 沉降: M = 4 ~ 5	0.56 ~ 0.74 1.02 ~ 1.18	$\Delta t = 1$ $\Delta t = 2$
中南财经大学办公楼	基坑长 46 m,宽 19.5 m,深 6.4 m,基坑东西两端悬臂桩排,北边中段上部卸荷下部悬臂桩排,东段悬臂桩排加角撑,南边放坡组合支护型式	位移: M = 3 ~ 4 沉降: M = 3 ~ 5	0.80 ~ 0.85 0.91 ~ 0.94	$\Delta t = 2$ $\Delta t = 2$

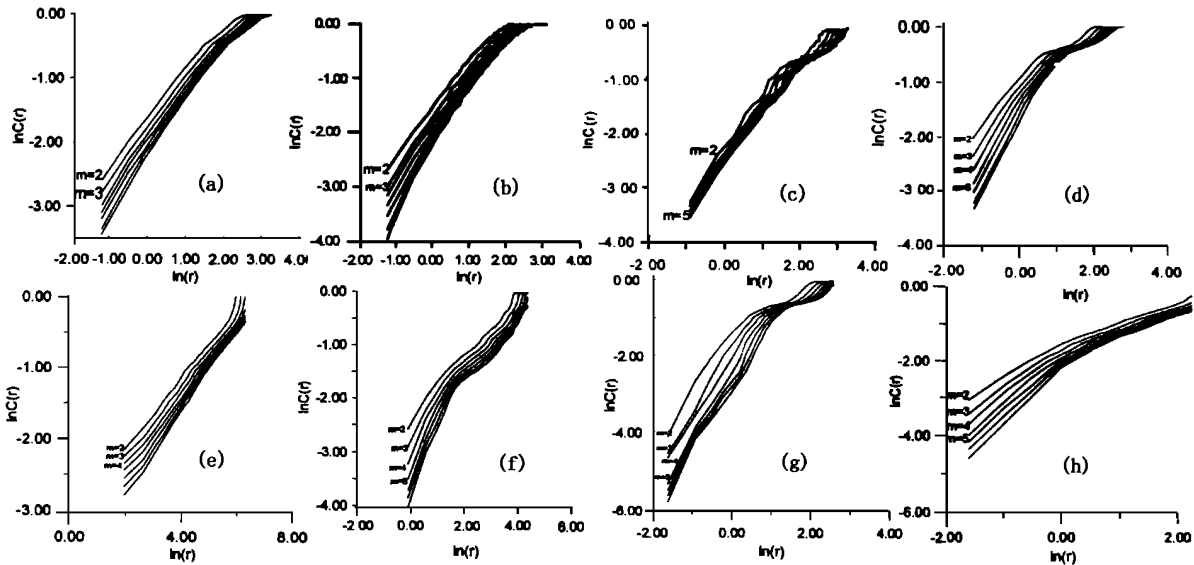


图 1 各工地位移、沉降曲线图

- (a) —中南财经大学办公楼(位移) $\ln C(r) - \ln(r)$ 曲线图($m = 3, d = 0.85$);
- (b) —中南财经大学办公楼(沉降) $\ln C(r) - \ln(r)$ 曲线图($m = 3, d = 0.94$);
- (c) —水果湖大厦(位移) $\ln C(r) - \ln(r)$ 曲线图($m = 5, d = 0.92$);
- (d) —水果湖大厦(沉降) $\ln C(r) - \ln(r)$ 曲线图($m = 5, d = 1.20$);
- (e) —友谊国际广场(位移) $\ln C(r) - \ln(r)$ 曲线图($m = 4, d = 0.56$);
- (f) —友谊国际广场(沉降) $\ln C(r) - \ln(r)$ 曲线图($m = 5, d = 1.02$);
- (g) —省人民医院综合楼基坑(位移) $\ln C(r) - \ln(r)$ 曲线图($m = 5, d = 1.77$);
- (h) —省人民医院综合楼基坑(沉降) $\ln C(r) - \ln(r)$ 曲线图($m = 5, d = 1.22$)

以上计算结果表明,在所测基坑变形数据的时间段内,基坑系统状态发展演化处于一个维数为分数维 d 的混沌吸引子状态,不同基坑 d 值不同,而且同一基坑对同一时序数据,Δt 取值不同,所计算出的 d 值不同,但 M 值不变。这些有力地说明了基坑

系统具有对开挖支护施工等系统输入元素及环境十分敏感性、本质易变性、不可预测性及混沌不定性。基坑系统分数维值还说明了随开挖支护施工的进行,该系统并不遵循一个固定的力学性态模式。对于同一基坑同一时序数据,尽管分数维 d 随 Δt 的不同

而变化,但其实质性状态变量 M 值不变,而基坑变形不同类型(位移、沉降、隆起)时序数据计算出的 d 和 M 值是不同的,这说明同一基坑其影响基坑变形的主要因素个数因变形类型不同而不同。不同的基坑其影响基坑变形的主要因素个数不一定相同。但 M 最小值均在 3~5 这个范围内。

5 基坑系统实质性状态变量讨论

通过武汉市 4 个基坑 69 个点的位移和沉降时序数据的关联维数 (d) 和实质性状态变量个数 (M) 的计算,得出了不同基坑系统其分数维不同和实质性状态变量个数不一定相同但 M 最小值范围为 3~5 的结论。这说明要描述一个基坑系统至少需要 3~5 个状态变量,也就是说至少用 3~5 个影响基坑变形的因素来分析基坑变形。那么这 3~5 个因素具体是什么呢?通过对前人对基坑变形分析资料的分析和总结及作者对基坑开挖支护全过程数值模拟,发现在同一基坑中,在满足强度控制设计和正常施工的前提下,围护结构刚度 (EI)、入土深度 (t);支撑或锚杆刚度 (EA)、道数 (n)、预应力 (T_a)、土体变形模量 (E) 这六方面对基坑变形的影响较为显著,这其中以围护结构入土深度 (t)、支撑或锚杆道数 (n) 和预应力 (T_a) 因素尤为突出。尽管基坑深度较大,但适当增加入土深度、支撑或锚杆道数,提高

预应力水平,可非常有效地控制基坑变形。另外根据工程实践经验,围护结构刚度、入土深度、支撑或锚杆刚度、道数、预应力这五方面的因素对基坑坑底隆起、支护结构位移、周边沉降的影响较为显著,施工中常用增加支撑或锚杆的补救办法来有效地控制位移。值得说明的是:以上分析是在基坑正常施工情况下,支撑或锚杆道数这个因素包含了土方开挖分步数的意思。改良土体性质常常是不经济的。增加入土深度、支撑或锚杆道数和提高预应力水平是有限度的,这些将在后续的文章中详细讨论。因此适当增加入土深度、支撑或锚杆道数和预应力水平可有效地控制基坑变形。

[参考文献]

- [1] 侯学渊,杨敏. 软土地基变形控制设计理论和工程实践[M]. 上海:同济大学出版社,1996. 64~68.
- [2] Simpson B. Retaining Structures. Displacement and Design[J]. Geotechnique (GB), 1992, 42 (4): 541~576.
- [3] 黄宏伟. 城市地下铁道的概率监控施工法[A]. 第七届全国土木工程年会论文集. 上海:同济大学出版社,1995:478~482.
- [4] 曾文曲,王向阳. 分形理论与分形的计算机模拟[M]. 沈阳:东北大学出版社,1993. 6~31.
- [5] 仪垂祥. 非线性科学在地质学中的应用[M]. 北京:气象出版社,1995. 46~85.
- [6] Nicolis, Prigogine. 探索复杂性[M]. 成都:四川教育出版社,1986. 305~312.

ANALYSIS OF SUBSTANTIAL STATE VARIABLES INFLUENCING DEFORMATION OF FOUNDATION PIT

LI Yun - an, ZHONG Yu - fang, ZHANG Hong - chang

Abstract: In deformation control design of deep foundation pit, many complicated factors influencing foundation pit deformation need to be considered. Analyzing these factors with nonlinear numerical method need long time. To rapidly and accurately analyze deformation law of foundation pit, the number of main factors must be determined. Regarding foundation - pit scope of numerical analysis as a system; settlement of foundation - pit boundary, displacement of retaining structure and swell of foundation - pit bottom as output of the system; factors during construction of draining water, earth excavation and retaining structure as input of the system. Relevant dimension and the number of substantial state variables which are main factors influencing foundation - pit deformation, are calculated with measured time - sequence data of the settlement, the displacement of several foundation - pits, the number of substantial state variables is far less than that of the factors influencing foundation - pit deformation, the work of nonlinear numerical analyses is greatly reduced, it is of important theoretical and practical significance in guiding design and construction of deformation control.

Key words: system foundation pit, foundation pit deformation, deformation control, relevant dimension, the number of substantial state variables



第一作者简介:

李云安(1965年-),男,讲师,博士。从事岩土工程教学和研究工作。

通讯地址:湖北省武汉市 中国地质大学勘建学院 邮政编码:430074