

文章编号:1673-9469(2014)01-0020-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2014.01.006

深基坑变形影响因素的正交分析

钱秋莹¹,张柱²,熊中华¹

(1 河海大学 岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098 ;2 安徽省人防建筑设计研究院,安徽 合肥 230022)

摘要:随着基坑向大、深方向发展,对变形控制也越来越严格,深基坑变形已成为基坑设计中的首要因素。综合深基坑设计中影响变形的多个常见因素,在单因素影响基坑变形基础上,进行了多因素组合下的8个因素4个水平的正交设计,分别对地面沉降、建筑物基础沉降差、围护结构水平位移、基坑隆起值4个指标进行考察,研究各因素的敏感性大小和显著性分析。分析结果表明,支撑间距、土体变形模量、开挖深度是基坑设计中较为重要的因素,其他因素对深基坑变形影响较小。

关键词:深基坑;基坑变形;正交试验设计;PLAXIS 软件

中图分类号: TG473

文献标识码: A

Orthogonal experimental analysis for influencing factors of deep excavation deformation

QIAN Qiu - ying¹, ZHANG Zhu², XIONG Zhong - hua¹

(1. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China; 2. Anhui Civil Air Defence Architectural Design and Research Institute, Anhui Hefei 230022, China)

Abstract: With the excavations developing for deep and large, the control of the excavations deformation become very stringent and the deformation control of excavation have become the primary factor in excavations design. This paper has analyzed multi-factors in excavations' design basing on the single-factor, an orthogonal design test of excavation deformation is carried out considering 8 factors and 4 levels in FEM simulation. Analysis of 4 indexes of the ground settlement, foundation settlement disparity, maximal lateral displacement of wall and upheaval in the bottom of the excavation are made, discussing the sensitivity and eminence of these factors. It is concluded that the strut distance, excavation depth and the soil stiffness are the main parameters which control the excavations deformation, while other parameters have little influence on excavations deformation.

Key words: deep excavations; deformation of excavations; orthogonal design; PLAXIS

基坑工程是个古老而又具有时代特点的岩土学科。随着我国城市人口密度的不断增加和城市建设速度不断加快,有限的城市地面空间已不再能满足人们的需求,基坑工程逐渐向着深大方向发展。深基坑工程设计与施工除要保证深基坑工程自身安全外,还要控制其施工对周边环境的影响,尤其在城市人口密集地区这种不利影响尤为突出。深基坑开挖所引起的基坑变形,是对周边环境造成不利影响的主因,因此城市人口密集地区对基坑变形控制的要求极为严格,基坑工程变

形的控制无疑是个十分重要的研究课题^[1]。

以往对深基坑变形影响因素的研究,往往是基于单个因素,而对于多因素组合影响下深基坑变形研究甚少,现有文献也仅考虑了少数几种因素组合。因此,研究深基坑在多因素影响下的变形规律是十分必要的。正交试验是处理多因素试验的一种科学方法,常用于对试验进行统筹安排,以便快速高效地区分各因素的影响程度^[2]。深基坑变形影响因素众多,影响程度不一。本文在单因素变形研究的基础上,借助有限元数值模拟软

收稿日期:2013-10-24

作者简介:钱秋莹(1989-),女,安徽天长人,从事土动力学、地下空间开发。(E-mail:qianqiuying826@126.com)

件,进行正交试验设计,来研究基坑变形对各影响因素的敏感程度,为基坑变形控制提供参考。

1 深基坑变形的影响因素

深基坑变形受众多因素的影响,大致可分为三类^[3]:

第一类:固有因素。

1) 水文地质条件:土体参数和地下水。

2) 基坑周边环境:建筑物和超载等。

第二类:与设计有关因素。

1) 围护结构特征:围护结构的刚度、支撑刚度和插入比等。

2) 开挖尺寸:开挖深度和宽度。

3) 支撑预应力。

4) 地基加固。

第三类:与施工有关参数。

包括施工方法、超挖、施工周期、楼板建造、施工人员水平等因素。

本文将重点讨论固有因素和设计因素对深基坑变形的影响。

1.1 插入比的影响

插入比是基坑工程设计中的重要参数,许多基坑事故的发生就是因墙体入土深度不足造成的。插入比定义为围护结构在坑底以下的深度与基坑开挖深度的比值。刘建航^[3]认为在保证墙体有足够的强度和刚度条件下,适当增大插入比,可以提高抗隆起稳定系数,同时可以减少墙体位移,并指出对于有支撑的围护结构,可按照部分地区的工程经验取值,当插入比大于0.9时,通过增加插入比来减小墙体位移的效果并不明显。Hashash^[4]通过有限元分析得出,只有当基坑开挖深度达到极限开挖深度,围护结构入土深度才对墙体的侧移产生较大影响,否则围护结构入土深度对围护结构侧移的影响可以忽略。

1.2 开挖深度的影响

基坑变形随着开挖深度的增加而逐渐增大,并且变形幅度也越来越大。通常在有内支撑的情况下,围护结构的最大侧移发生在开挖面附近,总体呈现“大肚”形。实践表明^[5],随着开挖深度的加大,围护体的侧移随深度成非线性增长,因此即便是基坑处于正常工作状态,围护结构侧移速率仍将超过现行规范的控制标准,故有必要控制开

挖速度和每层挖土厚度。

1.3 基坑与建筑物间距的影响

基坑的开挖对周边环境的影响包括对周围建筑物的影响,对地下管线的影响,对周围地表环境和道路交通的影响等等。基坑开挖引起地层扰动,周边土体应力应变发生变化,会导致土体的固结与沉降,这种影响扩展到周边建筑物地基,并由地基传递给建筑物的基础,然后往上传递到结构,引起结构的次生内力和变形,导致建筑物倾斜甚至倒塌^[6]。建筑物基础沉降差,是引起建筑物结构次生内力和变形的重要因素。因此,研究基坑开挖对建筑物基础沉降差的影响是十分必要的。建筑物与基坑距离的增加,建筑物对基础沉降差的影响逐渐减弱,基础沉降差也越来越小,靠近基坑一定距离内,建筑物沉降差很大,并存在一个安全距离,在不同土质下都存在一个基坑施工与周围建筑物的安全距离^[7]。

1.4 支护结构的影响

基坑支护结构包括围护结构和支撑,支护结构参数体现在围护结构刚度、支撑刚度、支撑预应力、支撑的间距。支护结构设计是控制基坑变形的重点,合理地选取支护结构参数是十分关键的。Clough^[8](1989年)引入系统刚度的概念, $p_s = \frac{EI}{h^4 \gamma_w}$, γ_w 为水的重度, h 为支撑间距。Addenbrook^[9](1994年)又引入位移柔度的概念, $\Delta = [\frac{h^5}{EI}]$,这和系统刚度参数一样,只是支撑间距指数不同。无论是系统刚度还是位移柔度,都和支撑间距具有高次方关系,所以在墙体厚度既定情况下,加密支撑可以有效控制基坑变形。虽然增加支撑刚度可以有效控制基坑变形,但是增加支撑刚度同时,支护结构的正负向弯矩值也明显增大。因此,设计中必须根据实际工程要求合理设置支撑刚度,在变形要求严格工程中,加大支撑刚度控制变形的同时也要增加截面来提高抗弯能力。本文不考虑对支撑上加预应力这一因素,仅分析支撑刚度对变形影响。

1.5 土体参数的影响

土体的物理力学性质虽然在固定的条件下不能够进行整体的改变。但是这些因素在深基坑设计过程中是重要的考察方面。有时可以通过土体

加固来改善局部土体的某些参数,进而改变基坑受力和变形^[10]。本文通过正交试验设计分别讨论土体模量、内摩擦角、黏聚力对基坑变形的影响。

2 深基坑变形正交试验分析

2.1 影响因素和水平数的确定

为了模拟各因素对深基坑变形影响,采用荷兰著名的岩土数值分析软件 PLAXIS 进行平面数值模拟分析。深基坑计算模型深 24 m,宽 50 m,围护结构采用地下连续墙。插入深度 16 m,如图 1 所示。

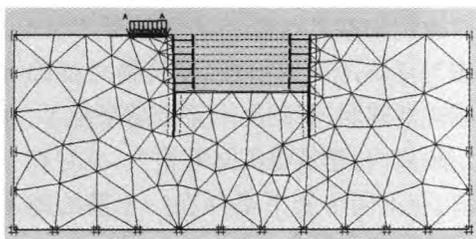


图 1 计算模型

Fig.1 Calculation Model

深基坑开挖对周围变形影响因素很多,选取 8 个主要影响因素进行分析:基坑的开挖深度 H 、建筑物与基坑的距离 d 、围护结构刚度 EI 、支撑间距 D 、支撑刚度 EA 、土体模量 E 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 。选取 9 个因素 4 个水平的正交表,即 $L_{32}(4^9)$,其中一列作为空列,检验误差水平。可以看出,采用正交试验可以由原来需做 $4^8 = 65\ 536$ 次全面试验,现在只需做 32 次试验,从而大大减少工作量,

很大程度上提高了试验效率。

土体本构采用适用变形硬化的 HS 模型。围护结构和建筑物采用梁单元模拟,并在地连墙附近设置一定范围的界面单元。内支撑采用弹簧单元模拟。并按实际用 60 kPa 力模拟建筑物的荷载。模拟中选取的支撑和地连墙刚度选取适中。

2.2 地面最大沉降的正交分析

通过对地面最大沉降的正交设计分析,得出表 2 的影响因素极差分析表(试验结果略)。各符号意义分别为:开挖深度(A)、基坑与建筑物间距(B)、围护结构刚度(C)、支撑竖向间距(D)、支撑刚度(E)、压缩模量(F)、内聚力(G)、内摩擦角(H)。在表 2 中, K 为计算所得的方差,通过正交表的极差可以得到各因素对地面最大沉降影响程度排序: $F > D > A > C > E > H > B > G$ 。但同时也可以看出,误差列的极差也相对较大,说明各影响因素之间存在不可避免的相互交叉作用。

利用方差分析表(表略)得出各个影响因素显著性水平评价,当 $\alpha = 0.05$ 时,即可靠度为 95%,基坑开挖对地面最大沉降影响因素中,各影响因素 F 比都没有达到 F 临界值,但可以看出压缩模量 E 、支撑间距 D 、开挖深度 H 显著性较大,但是影响都不是很显著,从方差分析表可以看出基坑与建筑物间距 d 、支撑刚度 EA 、黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的影响程度较小。通过分析,影响地面最大沉降因素较为复杂,各影响因素存在交互作用,不是相互独立的,无特别显著的影响因素。

表 1 各因素水平的编号及其数值

Tab.1 The horizontal serial numbers and the according value of each factor

因素水平	A	B	C	D	E	F	G	H
	开挖深度 /m	基坑与建筑物间距 /m	围护结构刚度 /kN·m ⁻² ·m ⁻¹	支撑竖向间距/m	支撑刚度 /kN	压缩模量 /MPa	内聚力 /kPa	内摩擦角 /°
水平 1	12	1	5.4e5	4.5	2e7	8	10	10
水平 2	16	3	1.28e6	6	4e7	12	20	15
水平 3	20	5	2.5e6	8	6e7	16	30	20
水平 4	24	7	4.3e6	12	8e7	20	40	25

表 2 地面最大沉降的极差分析表

Tab.2 Analysis of range in maximal ground settlement

方差	因素								误差列
	A	B	C	D	E	F	G	H	
K_1	21.78	26.44	28.98	22.50	25.97	30.32	25.28	26.51	28.77
K_2	23.14	25.68	25.17	24.30	27.18	25.67	25.49	25.60	24.44
K_3	28.09	24.33	24.03	24.61	24.51	24.82	25.23	24.31	23.98
K_4	29.40	25.98	24.25	31.01	24.75	21.61	26.42	25.99	25.22
极差	7.62	2.11	4.94	8.51	2.67	8.71	1.19	2.19	4.78

表 3 建筑物基础沉降差的极差分析表

Tab. 3 Analysis of range in foundation settlement disparity

方差	因素								误差列
	A	B	C	D	E	F	G	H	
K1	13.99	28.87	17.02	15.03	16.97	20.45	17.51	16.94	17.02
K2	15.44	19.32	15.69	15.40	17.65	17.05	18.00	16.18	15.7
K3	17.38	11.95	18.68	17.08	16.04	16.03	15.98	16.67	17.8
K4	21.58	8.250	16.99	20.87	17.74	14.87	16.90	18.60	17.8
极差	7.58	20.63	2.98	5.83	1.70	5.58	2.01	2.42	2.03

表 4 围护结构最大水平位移的极差分析表

Tab. 4 Analysis of range in maximal lateral displacement of wall

方差	因素								误差列
	A	B	C	D	E	F	G	H	
K1	40.82	49.61	50.17	38.37	44.25	61.87	49.04	45.36	50.50
K2	46.44	48.59	48.08	39.73	50.30	46.29	47.92	48.79	47.04
K3	47.99	41.58	45.72	48.36	43.41	39.70	42.56	47.92	42.48
K4	51.14	46.61	42.42	59.93	48.43	38.53	46.86	44.33	46.37
极差	10.31	8.02	7.75	21.56	6.89	23.34	6.48	4.46	8.02

表 5 最大隆起值的极差分析表

Tab. 5 Analysis of range in maximal heave in base of pit

方差	因素								误差列
	A	B	C	D	E	F	G	H	
K1	80.07	88.43	91.94	74.69	85.73	92.65	86.19	85.40	84.28
K2	85.89	87.26	85.83	82.26	86.79	87.51	87.10	83.65	84.68
K3	87.91	84.69	83.96	86.59	86.64	86.20	87.70	87.23	87.30
K4	92.05	85.53	84.19	102.37	86.75	79.55	84.92	89.63	89.6
极差	11.98	3.737	7.985	27.69	1.054	13.10	2.786	5.983	5.37

2.3 基础沉降差的正交分析

对建筑物基础沉降差进行正交数值模拟分析,得出表 3 影响因素的直观分析表(试验结果略)。通过极差大小比较,得出各因素对建筑物基础沉降差的影响程度排序: $B > A > D > F > C > H > G > E$ 。

而利用方差分析表(表略)可得到各因素的显著性评价结果,当 $\alpha = 0.05$ 时,即可靠度为 95% 时,对围护结构最大侧移值各因素中,建筑物与基坑的间距 d 和开挖深度 H 最为显著。所以在减小建筑物基础差设计时,应该重点考虑控制基坑开挖深度和建筑物与基坑间距这两个重要因素。

2.4 围护结构最大水平位移的正交分析

在有限元软件计算结果中分析了围护结构最大水平位移和各因素关系,得出正交极差分析结果见表 4(实验结果略),可以看出各因素的影响程度大小排序: $F > D > A > B > C > E > G > H$ 。误差列相对较大,可以判定,各影响因素之间存在较

大的交叉作用。

利用方差分析(表略)得到各因素的显著性评价结果,当 $\alpha = 0.05$ 时,即可靠度为 95% 时,对围护结构最大侧移值各因素中,压缩模量 E 和支撑间距 d 最为显著。

2.5 最大隆起值的正交分析

从表 5 最大隆起值的极差分析表(试验结果略)可以看出,基坑底部隆起值往往较大,且变化范围较小。并得出最大隆起值的影响因素程度大小排序: $D > F > A > C > H > B > G > E$ 。从误差列的极差分析效应曲线看出,其值相对较小,说明影响基底隆起的各影响因素相互交叉作用不大。

利用方差分析(表略)得到各因素的显著性评价结果,当 $\alpha = 0.05$ 时,即可靠度为 95% 时,对基坑隆起最大值各因素中,支撑间距 d 最为显著。

3 结语

基坑不同位置的变形虽有不同因素主次排序,但是通过极差和方差分析数据可以得出,在对

基坑整体变形影响中,支撑间距、土体模量、开挖深度较其它因素具有突出贡献,这是基坑设计中的主要控制指标。基坑变形是受到多种因素组合影响,正交试验很适合在基坑设计中分析多因素组合下基坑变形,但是本文也有局限性。本文仅仅通过设置一系列空白列来考虑各影响之间相互交叉作用,只能判断影响因素间相对作用大小,并没有细致考虑每个因素之间相互作用关系,这还需进一步细致研究。

参考文献:

- [1] 龚晓南. 关于基坑工程的几点思考[J]. 土木工程学报, 2005, 38(9): 99-102.
- [2] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [3] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M], 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [4] HASHASH Y M A. Analysis of deep excavation in clay [D]. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute

of Technology (MIT), 1992.

- [5] 张如林, 徐奴文. 基于 PLAXIS 的深基坑支护设计的数值模拟[J]. 结构工程师, 2010, 26(2): 131-136.
- [6] 马威. 深基坑开挖对邻近建筑物影响的数值分析[J]. 施工技术, 2007, 36(10): 97-99.
- [7] 赵静毅. 深基坑开挖对周边环境的变形与技术控制研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2011.
- [8] CLOUGH G W, SMITH EM, SWEENEY B P. Movement control of excavation support systems by iterative design [A]. Current Principles and Practices, Foundation Engineering Congress [C]. USA: American Society of Civil Engineers, 1989.
- [9] ADDENBROOKE T I. A flexibility number for the displacement controlled design of multi propped retaining walls[J]. Ground Engineering, 1994, 27(7): 41-45.
- [10] 徐中华, 王建华, 王卫东. 上海地区深基坑工程中地下连续墙的变形性状[J]. 土木工程学报, 2008, 41(8): 81-86.

(责任编辑 刘存英)

(上接第 12 页)

参考文献:

- [1] FORSBERG T. Multi-span suspension bridges [J]. International Journal of Steel Structures, 2001, 1(1): 63-73.
- [2] GIMSING N J. Cable supported bridges [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.
- [3] YOSHIDA O, OKUDA M, MORIYA T. Structural characteristics and applicability of four-span suspension bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(5): 453-463.
- [4] MASASHI Y, TORU F, KAZUO S. Design of Tatara bridge [J]. Engineering Review, 2003, 25, (3): 55-62.
- [5] MANABU ITO. The cable-stayed Meiko Grand bridges,

Nagoya [J]. Structural Engineering International, 1998, 8(3): 168-171.

- [6] 叶爱君, 胡世德, 范立础. 超大跨度斜拉桥的地震位移控制[J]. 土木工程学报, 2004, 37(12): 38-43.
- [7] VADER T S, MCDANIEL C C. Influence of dampers on seismic response of cable-supported bridge towers [J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(3): 373-379.
- [8] 聂利英, 李建中, 胡世德, 等. 西堠门大桥 3 种梁端约束体系比较[J]. 桥梁建设, 2006(6): 73-78.
- [9] HOSAM-EDDIN M, AHMED M. ADBEL-GHAFFAR. Seismic energy dissipation for cable-stayed bridges using passive devices [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1994, 23(8): 877-893.

(责任编辑 刘存英)