

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.02.015

# 基坑工程隆起变形研究综述

李 平<sup>1,2</sup> 杨 挺<sup>3</sup> 王 义<sup>3</sup> 陈育民<sup>1,2</sup>

(1.河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;

2.河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098;3.南京市市政设计研究院有限责任公司,江苏 南京 210008)

**摘要**:通过对基坑隆起变形产生的原因、抗隆起稳定性、回弹量计算、基坑开挖的时空效应及基坑工程穿越既有建筑物造成的隆起变形等进行分析,指出了基坑隆起变形问题研究中存在的理论分析不够完善,且远落后于工程实践等不足,并对今后有待于开展的工作,如建立适应不同区域土性变化的回弹量计算公式、理论优化基于时空效应的开挖参数、系统化分析开挖对既有建筑物变形的影响等进行了展望.

**关键词**:基坑工程;隆起变形;回弹量;研究现状;稳定性

**中图分类号**:TU433 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-1980(2010)02-0196-06

随着城市建设的高速发展,各类用途的地下空间已在世界各大城市中得到开发和利用,由此产生了大量的基坑工程,且规模和深度不断加大.尤其是地铁作为现代化都市的重要标志,其安全和变形稳定性直接关系到国计民生,处理不当会造成重大灾害.如杭州地铁路面出现裂纹与隧道开挖变形过大而引起的明挖基坑坍塌事故、深圳地铁 1 号线明挖车站由于变形严重酿成的滑坡坍塌事故等.

基坑工程中由于开挖卸荷,必然产生一定的隆起变形,其回弹量的大小是判断基坑变形和稳定的重要依据,也是基坑工程设计与施工的主要控制指标.在基坑开挖之前及开挖过程中如何正确、有效地预测隆起变形并采取相应的处理措施,在工程中已越来越受到重视.本文通过对基坑隆起变形产生的原因、抗隆起稳定性、回弹量计算、基坑开挖的时空效应及基坑工程穿越既有建筑物造成的隆起变形等进行分析,指出基坑隆起变形问题研究中存在的不足,并对今后有待于开展的工作进行探讨.

## 1 基坑隆起变形产生的原因

基坑开挖基底土体的应力将发生改变,其隆起变形一般认为主要是由以下几个因素<sup>[1-2]</sup>引起的:(a)土体开挖卸载产生的回弹变形;(b)基底以下部分支护墙体由于土压力的作用向基坑方向变位挤推坑内土体造成的隆起;(c)基坑底部由于软弱层的存在,产生塑性流,形成不可逆的土体变形引起的位移;(d)地下水的浮力及渗流作用导致的土体上抬;(e)开挖过程中周边既有建筑物累积应力二次释放引发的变形.此外,基坑回弹量的大小还与地质条件、卸荷大小、基坑尺寸、暴露时间、挖土顺序及机械设备等诸多因素有关,对这些影响因素进行分析,将有助于对基坑隆起变形机理的进一步认识.

## 2 基坑隆起变形的研究现状

基坑开挖是一个综合性的岩土工程难题,既涉及土力学中的典型强度与稳定问题,又包含了变形问题<sup>[1]</sup>.

### 2.1 基坑抗隆起稳定性研究

基坑工程的稳定性研究通常包括整体稳定性分析(围护结构抗倾稳定性和踢脚稳定性)和抗隆起稳定性分析两部分,后者对于保证基坑稳定和控制基坑变形意义重大,一般用基坑抗隆起安全系数  $F_s$  来表示.

收稿日期:2009-03-03

基金项目:江苏省 333 高层次人才培养项目(B08003)

作者简介:李平(1982—),男,江苏徐州人,博士研究生,主要从事地基基础及基坑工程研究.E-mail:lipings0110@yahoo.com.cn

国外很多学者基于圆弧滑动理论的极限分析法对  $F_s$  进行了研究. Bjerrum 等<sup>[3]</sup>曾对长条形、方形和长宽比为 2 的矩形基坑的隆起稳定性展开分析,发现方形基坑的抗隆起安全系数  $F_s$  比  $H/B = 1$  及  $B/L < 0.1$  ( $H$  为基坑深度,  $B$  为基坑宽度,  $L$  为基坑长度)的条形基坑大 21%,得到当抗隆起安全系数较大时,基坑回弹量较小,当抗隆起安全系数较小时,基坑回弹量较大的结论. Clough 等<sup>[4-5]</sup>则根据板桩墙围护基坑的实测资料和有限元分析,研究了地面最大沉降、墙体最大水平位移与基坑抗隆起安全系数之间的相互关系. 近年来, Cai 等<sup>[6]</sup>基于强度折减法,应用有限元分析了圆形支护开挖基坑的抗隆起稳定性,指出坚硬下卧层越靠近基底,以及支护结构插入基底越深,圆形基坑稳定性越好. 随后, Feheem 等<sup>[7-8]</sup>采用同样的方法研究了矩形基坑开挖的基底稳定状态,推导了几种情况下基底抗隆起稳定闭合解.

国内的研究则多是偏向于对大量工程实践的总结分析,认为基坑抗隆起安全系数  $F_s$  的大小直接影响基坑的回弹量,而维护结构的插入深度  $D$  和超载  $q$  的大小,是决定抗隆起安全系数  $F_s$  的 2 个主要方面. 文献[9]通过模型试验系统,研究了插入深度  $D$  与基坑回弹量  $\delta$  之间的关系:插入深度  $D$  越小,基坑的回弹量越大,且呈非线性关系;基坑周边超载  $q$  越大,基坑的回弹量越大,同样呈非线性关系. 此外,王洪新等<sup>[10]</sup>在文献[9]的基础上,修正了圆弧滑动法的假设,重新推导了圆弧滑动法的计算公式,研究了各公式对土层参数的敏感性,并通过数值模拟分析了  $F_s$  与基坑变形的关系,得到了一些对工程有指导意义的结论.

2.2 基坑回弹量的计算

基坑开挖过程中,必然引起坑内一定范围内的土体回弹. Tergzaght<sup>[11]</sup>早在 20 世纪 40 年代就注意到小的开挖段产生的回弹量比大的开挖段要小的事实. 50 年代 Bjerrum 等<sup>[3]</sup>给出了分析深基坑地板隆起的方法,60 年代开始在奥斯陆和墨西哥城市软黏土深基坑中使用仪器进行监测,此后的大量实测资料提高了预测的准确性,并从 70 年代起产生了指导基坑开挖的法规<sup>[1]</sup>. 我国 20 世纪 70 年代以前的基坑都比较浅,80 年代后期广东、北京、上海、天津、南京以及其他各大城市修建的深基坑工程陆续增加,在设计和施工中不断积累经验,各种回弹量计算理论的研究也相继得到了重视,出现了大量的计算公式<sup>[1-2,12-18]</sup>.

a. 国家规范法：

$$\delta = \phi_c \sum_{i=1}^n \frac{P_c}{E_{ci}} (z_i \bar{a}_i - z_{i-1} \bar{a}_{i-1})$$

式中： $\delta$ ——基底隆起量； $\phi_c$ ——回弹经验系数，一般取 1； $P_c$ ——基底以上土的自重压力，地下水位以下扣除水浮力； $E_{ci}$ ——土的回弹模量。

b. 日本规范法：

$$\delta = \sum \frac{HC_r}{1 + e} \lg \left( \frac{P_N + \Delta P}{P_N} \right)$$

式中： $C_r$ ——回弹指数； $P_N$ ——原地层有效上覆荷重； $\Delta P$ ——挖去的荷重； $H$ ——计算土层厚度； $e$ ——孔隙比。

c. 同济经验法：

$$\delta = -29.17 - 0.167 \rho g H' + 12.5 \left( \frac{D}{H} \right)^{-0.5} + 5.3 \rho g c^{-0.04} (\tan \varphi)^{0.54}$$

式中： $H$ ——基坑开挖深度； $P$ ——地表超载； $C$ 、 $\varphi$ 、 $\rho$ ——土的黏聚力、内摩擦角、密度； $D$ ——围护结构入土深度。

d. 残余应力法：

$$\delta = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_0 (1 - \alpha_i)}{E_i} h_i$$

式中： $n$ ——计算厚度的分层数； $\sigma_0$ ——总卸载应力； $E_i$ ——第  $i$  层土的卸荷模量； $h_i$ ——第  $i$  层土厚度； $\alpha_i$ ——第  $i$  层土残余应力系数。

e. 简易估算法：

$$\delta = \sum \left( \frac{P_{\max}}{E_r} \right)_i R_i H_{0i}$$

式中： $P_{\max}$ ——初始上覆荷载； $E_r$ ——回弹模量； $R$ ——卸荷比或卸荷水平； $H_{0i}$ ——计算土层厚度。

f. 理论解析法：

$$\delta = \frac{1}{E} \left[ \frac{3}{2} ax^2y^2 - \frac{8\tau + ah^3 + 4ph}{8h} y^2 + qy + \nu \left( \frac{a}{4} y^4 + \frac{b}{2} y^2 + cy \right) + \frac{1}{2} bx^2 + \nu \left( \frac{a}{4} x^4 - \frac{8\tau + ah^3 + 4ph}{8h} x^2 \right) \right] - \frac{2(1+\nu)}{E} \left( \frac{a}{4} x^4 - \frac{8\tau + ah^3}{8h} x^2 \right) + B$$

式中： $h$ ——基坑宽度； $\tau$ ——维护墙与接触面土体的剪应力； $E$ ——土体的压缩模量； $a, b, c, B$ ——待定系数； $p$ ——土体的残余应力集度； $q$ ——坑内土体自重应力； $\nu$ ——泊松比。

目前,GB 50007—2002《建筑地基基础设计规范》认为,基坑的变形计算比较复杂,且不够成熟,只是作为一般性的要求提出.工程实际中基坑回弹量计算应用较多的是由刘国彬等<sup>[12]</sup>提出的残余应力法,并有许多学者对其进行了验证和改进.如刘国彬等<sup>[19]</sup>在残余应力法的基础上,考虑开挖面积、基坑暴露时间、围护结构插入深度、基坑开挖深度、超载等因素对回弹量的影响,提出了一种半经验、半理论的回弹量简化计算方法,吉茂杰等<sup>[20]</sup>从理论分析着手,研究了规则矩形基坑的开挖时间、空间对基底土体回弹的影响规律,对残余应力法中的卸荷模量进行了修正,徐方京等<sup>[2]</sup>则在分析基坑隆起变形机理和大量现场监测数据的基础上,对公式中弹性参数  $E$  的选取进行了评估,指出  $E$  值的选取要考虑坑内土体侧向挤压效应及开挖后坑底土体超固结的影响,并给出了相应的计算公式.

2.3 基坑开挖的时空效应

基坑开挖的时空效应是指开挖过程中暴露部分的土体位移随着自由暴露时间和空间的增大而增大的现象.时空效应法是刘建航院士结合上海软土深大基坑工程,参考新奥法隧道施工面时空效应理论而提出的一种控制基坑变形的办法,其施工工艺已在实际工程中得到了成功的应用并取得了显著的经济效益.随后,刘国彬等<sup>[15 21-25]</sup>对时空效应法开展了进一步的研究,并在大量工程实践的基础上,指出以“分层、分块、对称、平衡、限时”为原则的时空效应法施工,可明显减小基坑沉降.在软土基坑开挖中,适当减小每步开挖土方的空间尺寸,并减少每步开挖基坑的暴露时间,是考虑时空效应、科学利用土体自身控制地层变形潜力、解决软土深基坑稳定和变形问题的基本对策.

a. 时间效应. 基坑隆起变形时间效应的研究多是通过弹性地基梁理论中的等效基床系数来反映.值得关注的是,已有学者<sup>[26]</sup>应用三维有限元计算方法,并通过对实测位移的反分析及所得数据曲线的回归,给出了基床系数与时间的关系式：

$$K = aK_0 \frac{1}{(N + 1)^b}$$

式中： $K$ ——基床系数； $K_0$ ——初始基床系数； $N$ ——暴露天数； $a, b$ ——回归系数,分别为 0.8425、0.5184.当然,还有许多其他创新性的研究成果,如贾付波等<sup>[27]</sup>应用三轴流变试验仪,模拟基坑开挖时坑底土体的应力路径,对基坑隆起变形的时间效应进行了卸载流变试验,并提出用一个五元件模型对试验结果进行模拟,取得了较为满意的结果.

b. 空间效应. 基坑空间效应与开挖过程中坑内土体的划分形式及施工方式等密切相关,它是利用土体结构自身的抵抗力来限制土层变形、提高基坑稳定性的一种有效方法.目前,已经形成了分条开挖、分段开挖、分层开挖、盆式开挖、岛式开挖等多种开挖方式.同时施工顺序也得到了一定的优化,如矩形基坑从两边到中间跳挖,角点部沿垂直于支撑方向向坑内分步施工等.

实际上,时间效应和空间效应是相互协同作用的,然而其协同作用原理目前尚不清楚,还有待于进一步的研究.工程应用中一般按经验估算或以有限元法进行理论探讨.

3 基坑工程穿越既有建筑物的隆起变形研究

随着城市地下空间开发与利用的快速发展,基坑工程穿越既有建筑物的情况越来越多,且建设项目越来越向“深、大、近”方向发展,施工带来的风险也越来越大.基坑施工时,既要保证既有建筑物的安全,又要确保工程本身的安全和进展顺利,因此针对不同情况采取有效的措施显得尤为重要.这一方面的技术主要有:桩基托换法、筏基托换法、桩梁托换法、桩板支护法、桩底注浆法、预先加固法、冻结法、综合施工法等<sup>[28]</sup>.需要强调的是,开挖过程中必须加强监控量测和信息反馈,一旦出现异常情况,要及时调整设计参数,并改进施工

方法和施工工序。

目前,对于该类问题的理论研究还远远落后于工程实践,且计算分析仍多以弹性解和数值模拟为主。如由 Mindlin 经典理论解出发,推导出由基坑开挖引起的卸荷应力,进而通过弹性地基梁理论给出既有建筑物回弹变形的定量计算方法<sup>[29]</sup>,或通过对施工工况进行数值模拟,动态地分析施工过程中开挖卸荷对既有建筑物隆起变形的影响等<sup>[30-32]</sup>。

## 4 有待于进一步研究的问题

由以上分析可见,对基坑工程中隆起变形的研究已经取得了一定的进展,然而仍有许多问题尚未形成完善的理论,还需要进一步的探讨。

a. 基坑回弹量的计算多是基于弹性理论的经验、半经验公式,且带有一定的区域局限性,如何建立起适应不同区域土性变化的实用理论公式,是今后研究的重点。

b. 基坑维护结构的插入深度、刚度等对基底回弹量的影响,目前只有少量的定性说明,尚未形成一套完整的理论公式来进行定量的计算。

c. 基坑开挖的时空效应理论还不够成熟,基坑开挖中所选择的尺寸和层次,开挖后的无支撑暴露时间等均是根据经验取值,采取何种措施对考虑时空效应的基坑开挖参数进行理论优化,对于节约工程投资,增加基坑安全稳定性意义重大。

d. 对基坑隆起变形的有限元计算和模拟尚不多见,且计算中大都应用弹性或弹塑性模型,没有考虑基坑土体的流变特性。

e. 基坑开挖对周边环境的影响较为复杂,尤其是对基坑工程穿越既有建筑物隆起变形的研究理论还远远落后于工程实践。如何通过理论分析、施工工艺和数值模拟相结合对既有建筑物的变形机理进行系统的分析,还有待于广大岩土工作者的共同努力。

## 5 结 语

城市基坑工程中对地下管线、周边构筑物等环境的保护逐渐成为其施工的主导控制因素,基坑工程的设计也逐步由稳定控制转向变形控制。本文对基坑隆起变形产生的原因、抗隆起稳定性、回弹量计算以及基坑开挖的时空效应等进行了论述,同时对目前较为关注的基坑工程穿越既有建筑物的隆起变形进行了分析探讨,指出了基坑隆起变形问题研究中存在的不足以及今后有待于进一步开展的工作。随着我国城市建设的发展,基坑工程隆起变形的研究应当引起土木工程界及政府有关部门的高度重视,以确保工程和人民财产的安全。

参考文献:

- [1] 刘建航,侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997:1-5.
- [2] 徐方京,侯学渊. 基坑回弹性状分析与预估[C]//首届全国岩土工程博士学术讨论会论文集. 上海:同济大学出版社,1990:239-246.
- [3] BJERRUM L, EIDE O. Stability of strutted excavations in clay[J]. Geotechnique, 1956, 6: 115-128.
- [4] CLOUGH G W, SCHMIDT B. Design and performance of excavations and tunnels in soft clay[D]. Palo Alto: Stanford University, 1977.
- [5] WONG K S. Lateral wall deformation of braced excavation in clay[J]. Asce, 1981, 107(6): 252-260.
- [6] CAI F, UGAI K, HAGIWARA T. Base stability of circular excavation in soft clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(8): 702-706.
- [7] FEHEEM H, CAI F, UGAI K. Two-dimensional base stability of excavations in soft soils using FEM[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(2): 141-163.
- [8] FEHEEM H, CAI F, UGAI K. Three-dimensional base stability of rectangular excavations in soft soils using FEM[J]. Computers and Geotechnics, 2004, 31(1): 67-74.
- [9] 刘国彬,黄院雄,侯学渊. 基坑工程下已运行地铁区间隧道上抬变形的控制研究与实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 202-207. (LIU Guo-bin, HUANG Yuan-xiong, HOU Xue-yuan. The prediction and control of rebound deformation of the existed tunnels right under excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(2): 202-207. (in Chinese))

- [10] 王洪新,陈建军,刘冀山.基坑抗隆起稳定安全系数实用计算分析与应用[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增刊):3223-3230.(WANG Hong-xin, CHEN Jian-jun, LIU Ji-shan. Practical calculation analysis and application of safety[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S): 3223-3230. (in Chinese))
- [11] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[J]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1943.
- [12] 刘国彬,侯学渊.软土基坑隆起变形的残余应力分析[J].地下工程与隧道,1996,(2):2-7.(LIU Guo-bin, HOU Xue-yuan. Residual stress analysis method of soft soil pit heave[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1996, (2): 2-7. (in Chinese))
- [13] 郑列威,胡蒙达.长条形深基坑开挖引起基坑底土体的回弹解析理论计算[J].建筑施工,2004,26(3):196-199.(ZHENG Lie-wei, HU Meng-da. Analytic calculation of bottom soil resilience caused during excavation of a long strip foundation pit[J]. Building Construction, 2004, 26(3): 196-199. (in Chinese))
- [14] 潘林有,胡中雄.深基坑卸荷回弹问题的研究[J].岩土工程学报,2002,24(1):101-104.(PAN Lin-you, HU Zhong-xiong. Experimental study on the resilience of pit under unloading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(1): 101-104. (in Chinese))
- [15] 杨挺,王心联,许琼鹤,等.箱形隧道基坑下已建地铁盾构隧道隆起位移的控制分析与设计[J].岩土力学,2005,26(增刊):187-192.(YANG Ting, WANG Xin-lian, XU Qiong-he, et al. The analysis and design aiming at the control of rebound deformation of the existed tunnel under new tunnel's excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(S): 187-192. (in Chinese))
- [16] 青二春.地铁隧道上方大面积卸载下的变形及控制模式研究[D].上海:同济大学,2007.
- [17] 刘国彬,侯学渊.软土的卸荷模量[J].岩土工程学报,1996,18(6):18-23.(LIU Guo-bin, HOU Xue-yuan. Unloading modulus of the Shanghai soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(6): 18-23. (in Chinese))
- [18] 刘国彬,侯学渊.软土的卸荷应力-应变特性[J].地下工程与隧道,1997(2):16-23.(LIU Guo-bin, HOU Xue-yuan. Unloading stress-strain behaviour of soft clay[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1997(2): 16-23. (in Chinese))
- [19] 刘国彬,黄院雄,侯学渊.基坑回弹的实用计算法[J].土木工程学报,2000,33(4):61-67.(LIU Guo-bin, HUANG Yuan-xiong, HOU Xue-yuan. A practical method for calculating a heave of excavation foundation[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(4): 61-67. (in Chinese))
- [20] 吉茂杰,刘国彬.开挖卸荷引起地铁隧道位移的预测方法[J].同济大学学报,2001,29(5):531-535.(JI Mao-jie, LIU Guo-bin. Prediction method of displacement of subway tunnel due to excavation[J]. Journal of Tongji University, 2001, 29(5): 531-535. (in Chinese))
- [21] 蒋洪胜,刘国彬,刘建航.地铁车站软土基坑开挖过程中的时空效应分析[J].建筑技术,1999,30(2):80-82.(JIANG Hong-sheng, LIU Guo-bin, LIU Jian-hang. Analysis of time-space effect during the soft soil foundation pit excavation in a subway station project[J]. Architecture Technology, 1999, 30(2): 80-82. (in Chinese))
- [22] 蒋洪胜,刘国彬.软土深基坑支撑轴力的时空效应变化规律研究[J].岩土工程学报,1998,20(6):105-107.(JIANG Hong-sheng, LIU Guo-bin. Time-space effect on strut force in deep excavation of soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(6): 105-107. (in Chinese))
- [23] 刘建航,刘国彬,范益群.软土基坑工程中时空效应理论与实践[J].地下工程与隧道,1999(3):7-12.(LIU Jian-hang, LIU Guo-bin, FAN Yi-qun. Theory and practice of time-space effect soft soil excavation[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1999(3): 7-12. (in Chinese))
- [24] 范益群,孙巍,刘国彬,等.软土深基坑考虑时空效应的空间计算分析[J].地下工程与隧道,1999(2):2-8.(FAN Yi-qun, SUN Wei, LIU Guo-bin. The space analysis of soft soil excavation by using the rule of TSE[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1999(2): 2-8. (in Chinese))
- [25] 刘纯洁,刘国彬,侯学渊.考虑时空效应的软土深基坑墙后土体水平位移场计算[J].地下工程与隧道,1999(3):20-24.(LIU Chun-jie, LIU Guo-bin, HOU Xue-yuan. Horizontal displacement distribution behind the retaining wall of soft soil deep excavation by considering of time-space effect[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1999(3): 20-24. (in Chinese))
- [26] 李惠平,范庆国,夏明耀.基床系数时间效应的三维分析[J].同济大学学报,1999,27(6):648-651.(LI Hui-ping, FAN Qing-guo, XIA Ming-yao. Three-dimension analysis of time-depending about foundation modulus[J]. Journal of Tongji University, 1999, 27(6): 648-651. (in Chinese))
- [27] 刘国彬,贾付波.基坑回弹时间效应的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增刊):2040-2044.(LIU Guo-bin, JIA Fu-bo. Test research on time effect of foundation pit rebound[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S): 2040-2044. (in Chinese))
- [28] 杨挺.城市地下工程穿越既有建筑物加固技术及工程应用[J].江苏建筑,2008,124(6):22-25.(YANG Ting. Technology and it's applying in reinforcement for urban underground structure intersecting another existed structure[J]. Jiangsu Construction, 2008, 124

( 6 ) 22-25.( in Chinese ))

[ 29 ] 陈郁 李永盛. 基坑开挖卸荷引起下卧隧道隆起的计算方法[ J ]. 地下空间与工程学报 , 2005( 1 ) :91-94.( CHEN Yu ,LI Yong-sheng. Calculation of tunnel heaving due to unloading of pit excavation[ J ]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering 2005 ( 1 ) :91-94.( in Chinese ))

[ 30 ] 王卫东 吴江斌 翁其平. 基坑开挖卸载对地铁区间隧道影响的数值模拟[ J ]. 岩土力学 , 2004 25( 增刊 ) :251-255.( WANG Wei-dong ,WU Jiang-bin ,WENG Qi-ping. Numerical modeling of affection of foundation pit excavation on metro tunne[ J ]. Rock and Soil Mechanics 2004 25( S ) :251-255.( in Chinese ))

[ 31 ] 陈敏华 陈增新 张长生. FLAC 在基坑开挖分析中的应用[ J ]. 岩土工程学报 , 2006 28( 增刊 ) :1437-1440.( CHEN Min-hua , CHEN Zeng-xin ,ZHANG Chang-sheng. Application of FLAC in analysis of foundation excavation[ J ]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2006 28( S ) :1437-1440.( in Chinese ))

[ 32 ] 刘润 闫澍旺 张启斌 等. 天津地区地铁深基坑施工安全控制标准研究[ J ]. 岩土力学 , 2007 28( 7 ) :1511-1517.( LIU Run , YAN Shu-wang ,ZHANG Qi-bin ,et al. A study of control criterion for safe construction of deepfoundation pit of underground in Tianjin area[ J ]. Rock and Soil Mechanics 2007 28( 7 ) :1511-1517.( in Chinese ))

Summary of heave deformation of foundation pit engineering

LI Ping<sup>1 2</sup> , YANG Ting<sup>3</sup> , WANG Yi<sup>3</sup> , CHEN Yu-min<sup>1 2</sup>

- ( 1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
2. Geotechnical Research Institute , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
3. Nanjing Municipal Design and Research Institute Co. , Ltd. , Nanjing 210008 , China )

**Abstract** : The causes for heave deformation of foundation pits , the heave stability , the calculation of rebound , the time-space effects during excavation of foundation pits as well as the heave deformation of the existing buildings intersected by pit excavation were analyzed. It was put forward that the existing theoretical analysis for the heave deformation of foundation pits was deficient and far behind the engineering practices. Some new ideas for further studies were proposed as follows : how to establish formulas for rebound of different soils , theoretical optimization based on excavation parameters of time-space effects , systematic analysis of the influences of excavation on the deformation of the existing structures , etc .

**Key words** : foundation pit engineering ; heave deformation ; rebound ; research status ; stability