



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

博士学位论文

软土基坑工程开挖对下卧已建盾构隧道的  
影响研究

(国家重点基础研究发展计划项目 (973 计划) 编号: 2011CB013802)

(上海市科学技术委员会科技创新行动计划项目 编号: 072112011)

姓 名 : 黄栩

学 号 : 0730020006

所在院系 : 土木工程学院

学科门类 : 工学

学科专业 : 隧道及地下建筑工程

指导教师 : 黄宏伟 教授

副指导教师 : 张冬梅 副教授

二〇一二年五月



同濟大學  
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for  
the degree of Doctor of Philosophy

**Study on influence of deep excavation on  
underlying existing shield tunnel in soft ground**

( Supported by *the National Basic Research Program of China (973 Program)*, Grant No.

2011CB013800 )

( Supported by *the Innovation Action Programm of Science and Technology Commission  
of Shanghai Municipality*, Grant No. 07DZ12065 )

Candidate: HUANG Xu

Student Number: 0730020006

School/Department: School of Civil Engineering

Discipline: Civil Engineering

Major: Tunnel and Underground Engineering

Supervisor: Prof. HUANG Hongwei

Assistant supervisor: Assoc. Prof. ZHANG Dongmei

May, 2012

软土基坑工程开挖对下卧已建盾构隧道的影响研究

同济大学

黄栩

## 学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

## 同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

## 摘要

由于城市中大量高楼、地下通道及地铁车站等的建造，产生了大量的深基坑工程。已运营的地铁、越江公路隧道上方的基坑工程施工必然使已建隧道产生附加变形以及附加内力。严重时，可能诱发隧道管片开裂、接缝张开及渗漏水，影响隧道结构安全及正常运营。论文以此为背景，针对基坑工程开挖对下卧已建盾构隧道的影响开展了离心机模型试验、解析分析及数值模拟等工作，主要研究内容及取得的成果如下：

进行基坑开挖对已建下卧盾构隧道影响的离心机模型试验，试验中模拟了基坑与隧道之间不同竖向距离，隧道不同尺寸大小的情况，通过量测隧道拱顶竖向隆起以及隧道衬砌应变，分析了盾构隧道在上方卸荷作用下的纵向变形及横断面内力变化特点。试验结果表明盾构隧道在上方基坑开挖影响下产生的纵向结构变形特征曲线为高斯曲线，曲线反弯点与卸荷中轴线之间的距离大约为 1.3 倍基坑宽度；同时基坑正下方隧道衬砌拱顶与拱底出现明显的弯矩变化，当隧道横断面距离基坑中轴线达到 1.5 倍基坑开挖深度时，横断面弯矩变化可以忽略。

通过 Mindlin 弹性解获得了基坑开挖引起的作用于隧道轴线上的附加应力，在此基础上将三参数弹性地基模型引入到盾构隧道纵向结构变形性态的分析中，隧道被视为 Kerr 地基上的无限长梁，建立平衡微分方程并求解了隧道受荷后的纵向变形与纵向内力。对地基参数的选取与修正进行了讨论，并对 Winkler、Pasternak 与 Kerr 三种地基模型的模拟结果进行了对比，验证了 Kerr 地基模型的优越性。基于以上结果，推导并求解了考虑盾构隧道侧向土体对隧道作用的平衡微分方程，获得了与实际更接近的上方卸荷引起的隧道纵向变形结果。

提出了基坑开挖引起下卧隧道横向响应的简化计算模型，假设隧道横断面上下方土体抗力的分布形式为不相等的三角形分布，利用力法求解了隧道横断面变形与内力，并分析了地基基床系数、隧道半径及隧道衬砌厚度等因素对隧道横断面响应的影响。

总结了盾构隧道发生纵向变形后可能引起的几种横向结构效应，根据 Brazier 效应原理提出了盾构隧道纵向变形后横断面将产生压扁效应的现象，并推导了压扁效应引起的隧道横向变形与内力。基于此，开展了典型隧道纵向变形模式条件下产生的压扁效应与纵向剪切传递效应的对比研究。

采用商业有限元软件 PLAXIS 2D 进行了数值模拟的土体本构模型选择分析，分别以摩尔库伦模型 (Mohr-Coulomb model)、土体硬化模型 (Hardening Soil model) 及小应变土体硬化模型 (Hardening Soil Small model) 进行计算，结果表

明：为获得较准确的结果，在计算中应尽量采用较高级的 HS 模型与 HS Small 模型作为土体本构模型。随即以上海延安东路隧道以及上海地铁隧道为研究对象，通过 PLAXIS 进行了基坑走向与隧道轴线相互平行工况（二维模拟）以及相互垂直交叉工况（三维模拟）的数值模拟参数敏感性分析，所分析的参数包括：隧道与基坑之间的相对位置、围护结构的刚度、基坑的尺寸（长度、宽度）、保护隧道的措施等。对上海外滩通道施工工程实例进行三维有限元分析，计算基坑开挖对下卧延安东路隧道影响，进行实测数据与有限元计算结果的比较，两者具有较好的一致性。在此基础上，将特定工况的离心机试验结果、解析计算结果及有限元计算结果进行对比，验证了本文提出解析模型的合理性。

在多种方法分析基坑开挖对下卧已建隧道影响的基础上，针对盾构隧道的纵向变形及横断面变形，选取隧道纵向变形曲率及横断面收敛为评价指标，建立了盾构隧道在上方基坑开挖影响下的定量易损性评价方法。

在软土地区已建盾构隧道受上方基坑工程开挖作用时，本文得到的主要结论对已建盾构隧道响应的预测及隧道保护措施制定具有指导意义。

关键词：软土，基坑工程，卸荷，盾构隧道，离心机模型试验，三参数弹性地基模型，压扁效应，数值模拟，易损性

## ABSTRACT

In urban areas, a large number of buildings, underground passages and metro stations are constructed, which often require deep excavations. When these excavations are in the vicinity of existing shielded tunnels, tunnels will inevitably be affected with respect to deformations and additional loads on the segment lining. Lining crack, joint open and leakage may further developed. The safety and normal operation of the tunnel is threatened. In order to improve the understanding of the behavior of the existing tunnels due to above deep excavations, centrifuge model test, analytical analysis and numerical analysis are conducted in this thesis. The main contents and conclusions are as follows:

A series of centrifuge model tests is carried out to investigate the influence of deep excavation on existing underlying shield tunnel. The longitudinal deflection of the tunnel and additional bending moments on the lining are recorded. Two factors that affect the behavior of tunnel are studied, the vertical distance between the tunnel and the excavation and the tunnel size. The results reveal that the longitudinal deflection of the tunnel can be described by a Gaussian curve. The inflection point is about 1.3 times of the excavation width away from the axis of the excavation. Considerable additional bending moments are observed at the crown and invert in the lining below the center of the excavation, but the additional moments rapidly decreases to be negligible when the tunnel cross section is 1.5 times of the excavation depth away from the axis of the excavation.

The simple two-stage method is adopted to study the longitudinal response of tunnel due to above unloading. In the first step, the additional load on the tunnel axis induced by the above excavation is obtained based on the Mindlin Solution. In the second step, the tunnel is simplified as an infinite beam on a Kerr-type three-parameter elastic foundation. Its governing differential equations are formulated and analytically solved. The parameters of the Kerr model from the simplifying elastic continuum method are adjusted by comparing results with Finite Element Models. Comparisons are also carried out among Winkler, Pasternak and Kerr models, which confirms the superiority of Kerr model. To obtain more reasonable results, the effects of the lateral soil beside the tunnel are considered, and the governing equations are modified and solved correspondingly.

A simplified model is proposed to study the circumferential response of tunnel

due to above excavation. Asymmetric triangle pattern of soil resistance is assumed above the tunnel crown and below the invert. The effect of soil resistance, tunnel diameter and lining thickness are studied.

The circumferential effects induced by the longitudinal deflection of shield tunnel are summarized. The flattening effect of the tunnel structure is firstly proposed. Analytical solutions for the flattening effect of a jointed segmental tunnel are presented. The influence of tunnel diameter, lining thickness, ground resistance, tunnel joints and original tunnel curvature on the flattening effect is examined. Then the flattening effect and longitudinal shear transfer effect for several typical longitudinal deflection modes of shield tunnel are compared.

A preliminary study on three constitutive models including Mohr-Coulomb model, Hardening Soil model and Hardening Soil Small model is firstly conducted in PLAXIS 2D. It is concluded that the advanced models should be adopted to obtain more reasonable results. Then scenarios when the direction of the excavation is parallel and perpendicular to the tunnel are simulated and parametric study of tunnel behavior caused by nearby deep excavation is presented. These parameters include relative position of the tunnel with respect to the excavation, tunnel size, stiffness of retaining structure, excavation dimensions, tunnel protection measures and etc. A simulation about the effect of the bund passage construction on the existing East Yan'an Road Tunnel is carried out, and a good agreement is achieved between the results from numerical analysis and on-site monitoring.

Considering the above study, longitudinal bending curvature and circumferential convergence are chosen as the evaluation index for the longitudinal deflection and circumferential deformation of the shield tunnel separately. A quantitative vulnerability evaluation method about existing shield tunnels affected by above deep excavation is proposed.

The influence of deep excavation on the underlying existing tunnel can be perfectly understood by the work of this thesis. The main conclusions addressed here supply the guidance and help for the estimation of tunnel behavior and the determination of tunnel protection measures.

**Key Words:** soft soil, deep excavation, unloading, shield tunnel, centrifuge model test, three parameter elastic foundation model, flattening effect, numerical analysis, vulnerability

## 目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 概述.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 基坑开挖坑底回弹计算方法及土体卸荷特性研究现状.....	2
1.2.2 基坑开挖数值模拟研究现状.....	4
1.2.3 盾构隧道纵向变形计算方法研究现状.....	7
1.2.4 基坑开挖及隧道结构模拟的离心机模型试验研究现状.....	12
1.2.5 基坑开挖对已建隧道影响研究现状.....	13
1.2.6 盾构隧道结构安全性态评估方法研究现状.....	15
1.3 论文的主要研究内容.....	16
1.4 论文的主要创新点.....	18
第 2 章 基坑开挖对下卧盾构隧道影响的离心机试验研究.....	19
2.1 概述.....	19
2.2 土工离心机试验基本原理.....	19
2.2.1 土工离心机试验基本原理.....	19
2.2.2 相似准则.....	20
2.3 同济大学 TLJ-150 复合型岩土离心试验机介绍.....	21
2.4 工程背景.....	22
2.5 试验方案设计.....	24
2.5.1 基坑开挖模拟方法.....	24
2.5.2 试验假定.....	26
2.5.3 试验工况设计.....	27
2.5.4 模型布局.....	27
2.5.5 模型制作.....	29
2.5.6 试验假设的验证.....	34
2.5.7 试验测量.....	36

2.5.8 试验步骤 .....	39
2.6 试验结果与讨论 .....	42
2.6.1 工况一结果 .....	42
2.6.2 隧道与基坑之间距离的影响 .....	46
2.6.3 隧道尺寸的影响 .....	47
2.7 小结 .....	49
第 3 章 基坑开挖对下卧盾构隧道影响的解析分析 .....	51
3.1 引言 .....	51
3.2 基坑开挖引起的隧道纵向响应 .....	53
3.2.1 基坑开挖引起的隧道轴线上的附加应力 .....	53
3.2.2 不考虑侧向力作用的 Kerr 地基上的盾构隧道受荷变形 .....	61
3.2.3 地基模型的应用 .....	64
3.2.4 考虑侧向土体对隧道作用的 Kerr 地基上盾构隧道受荷变形 .....	73
3.3 基坑开挖引起的隧道横向响应 .....	81
3.3.1 隧道横向响应的简化计算模型 .....	81
3.3.2 基坑开挖引起的隧道横断面变形及内力 .....	82
3.4 小结 .....	94
第 4 章 盾构隧道纵向变形引起的横向效应 .....	97
4.1 引言 .....	97
4.2 盾构隧道纵向变形引起的横断面压扁效应 .....	98
4.2.1 Brazier 效应 .....	98
4.2.2 盾构隧道横断面压扁效应推导 .....	98
4.2.3 压扁效应的影响因素参数分析 .....	109
4.2.4 压扁效应应用实例 .....	120
4.3 盾构隧道纵向变形引起的纵向剪切传递效应 .....	123
4.3.1 纵向剪切传递效应的机理 .....	123
4.3.2 纵向剪切传递效应引起的隧道横向变形及内力 .....	125
4.4 典型隧道纵向变形模式的压扁效应与纵向剪切传递效应 .....	126
4.4.1 典型的隧道纵向变形模式 .....	126

4.4.2	隧道双曲线模式变形的压扁效应与纵向剪切传递效应	128
4.4.3	隧道指数型模式变形的压扁效应与纵向剪切传递效应	131
4.4.4	纠偏荷载作用下隧道变形的压扁效应与纵向剪切传递效应	134
4.4.5	长期沉降曲线模式隧道的压扁效应与纵向剪切传递效应	137
4.4.6	邻近施工影响下隧道的压扁效应与纵向剪切传递效应	137
4.5	小结	142
第 5 章	基坑开挖对邻近隧道影响的数值模拟分析	144
5.1	引言	144
5.2	有限元程序 PLAXIS	144
5.3	基坑走向与隧道轴线相互平行工况二维模拟分析	145
5.3.1	本构模型的选择	145
5.3.2	隧道位于基坑下方的工况	153
5.3.3	隧道位于基坑侧方的工况	158
5.4	基坑走向与隧道轴线相互垂直工况模拟三维分析	162
5.4.1	分析模型及参数介绍	163
5.4.2	计算结果及讨论	164
5.5	工程实例分析	181
5.6	离心机试验、解析分析与有限元计算的对比分析	184
5.7	小结	185
第 6 章	基坑开挖对下卧盾构隧道影响的易损性评价	187
6.1	引言	187
6.2	已建盾构隧道受上方基坑开挖影响的易损性评价	189
6.2.1	易损性评价模型	189
6.2.2	盾构隧道纵向变形的易损性评价	190
6.2.3	隧道横断面变形的易损性评价	202
6.2.4	降低隧道易损性的措施	207
6.2.5	基坑开挖对下卧隧道影响的易损性评价流程	209
6.2.6	实例分析	209
6.3	小结	213

第 7 章 结论与展望.....	215
7.1 研究结论.....	215
7.1.1 基坑开挖引起的已建隧道变形与内力.....	215
7.1.2 隧道响应的影响因素.....	216
7.1.3 盾构隧道纵向变形引起的横向效应.....	217
7.2 存在的问题与展望.....	219
致谢.....	220
参考文献.....	224
个人简历 在校期间发表的学术论文及研究成果.....	235

# 第 1 章 绪论

## 1.1 概述

从上个世纪 90 年代开始，由于各大城市人口数量急剧增加，城市规模不断扩大，我国一直处于城市大规模建设的高潮时期。高楼大厦毗邻而起，地下空间的开发方兴未艾，同时为了实现“Better Life, Better City”，让城市的生活更加美好，必须解决城市交通问题，因此地铁与地下通道的建设也在紧锣密鼓之中。明挖法由于施工方便，费用较低，被广泛地应用于地下空间的开发之中，由此产生了大量的深基坑工程。随着城市的发展，基坑工程的深度与规模不断加大，深基坑工程施工必然将对周围环境产生影响，如何评价这种影响，如何控制这种影响成为城市建设必然要面对的重大问题之一。

地铁隧道及城市地下道路是现代城市的交通命脉，其安全性极其重要。数量极多的地面基坑开挖将不可避免得与地下隧道相邻、交错或者跨越，表 1-1 列举了近十余年来上海地区部分已建盾构隧道附近大面积基坑工程开挖的典型工程实例。建设项目朝着“深、大、近”的方向发展，即基坑的开挖越来越深，基坑的开挖范围越来越大，基坑与隧道的距离越来越小，同时在许多工程中已建隧道往往位于基坑工程正下方，这些都使隧道安全的保护变得更为困难。

基坑工程施工将对基坑周围的土体产生扰动，当基坑下方存在已建隧道时，坑底土体通过竖向变形进而将卸荷作用传递给下方已建的盾构隧道。在软土地区，无论是地铁隧道还是越江公路隧道大部分都是采用盾构法施工而成。盾构隧道多采用拼装式衬砌结构，衬砌的刚度相对较小，一方面基坑开挖卸荷容易引起盾构隧道的纵向变形，另一方面，由于水土压力变化及纵向变形的荷载传递，盾构隧道衬砌横断面受力也将发生变化。当隧道变形与受荷到了一定程度时，不仅有可能使隧道内行车安全性与舒适性遭到威胁，更有可能产生管片接缝张开，渗漏水，甚至衬砌开裂、破坏，造成不可估计的经济损失与无法弥补的社会影响。

随着城市建设的发展，将会有越来越多的基坑在盾构隧道上方施工开挖，如何预测基坑开挖对下卧已建隧道的影响，如何评估由于基坑开挖产生的对下卧盾构隧道的影响，这不仅在设计与施工方面具有一定的理论价值，而且具有相当大的实用价值，对国家的经济和社会发展具有深远的意义。

表 1-1 近十余年来上海地区基坑开挖邻近已建盾构隧道典型工程实例

工程	建设年代	基坑面积	基坑深度	已建隧道	隧道与基坑位置关系
东方路立交工程	2003	53×18m	6.7m	上海地铁 2 号线	基坑下方，拱顶距离坑底 9.5m，与宽度方向成 45 度角
淮海路基坑工程	2004	50×30m	9.1m	上海地铁 1 号线	基坑下方，拱顶距离坑底 7.9m，斜穿
杨高路立交工程	2001	280×34m	7.4m	上海地铁 2 号线	基坑下方，拱顶距离坑底 6.9m，与宽度方向成 10 度角
上海广场基坑工程	2001	120×80m	6.7m	上海地铁 1 号线	基坑下方，拱顶距离坑底 7.7m，斜穿整个基坑
大上海会德丰广场	2006	110×93m	20m	上海地铁 2 号线	基坑侧方，与基坑最近距离 5.4m，隧道覆土深度 8.5m
豫园地下大通道工程	2010	177×25m	11m	上海地铁 10 号线	基坑下方，拱顶距离坑底 6.2m，平行于基坑长边
越洋广场基坑工程	2006	60×60m	8.3m	上海地铁 2 号线	基坑侧方，与基坑最近距离 5.8m，隧道覆土深度约 12m 基坑下方，北线隧道拱顶距坑底 5.5m，与基坑长边成约 75 度，南线隧道距离坑底 7.1m，与基坑走向垂直
外滩通道	2010	50×10m	11m	延安东路隧道	

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 基坑开挖坑底回弹计算方法及土体卸荷特性研究现状

基坑开挖必然导致坑底隆起，坑底隆起是判定基坑稳定性的一个重要标志，同时坑底隆起的大小与基坑对周边环境的影响也有重要的关系。在基坑开挖之前及开挖过程中如何有效地预测坑底回弹的大小，并采取相应的坑底回弹措施在工程中十分重要。

对于基坑开挖坑底隆起的问题，相关研究在国外开展得比较早，如：Terzaghi (1943) 在 20 世纪 40 年代就提出小的开挖段产生的回弹量比大的开挖段小的现象；而 Bjerrum (1956) 在 50 年代给出了分析深基坑坑底隆起的方法；另外也有许多学者关注坑底隆起与基坑稳定性之间的关系，如 Clough (1977)、Feheem

(2003, 2004) 等。

具有代表性的坑底回弹计算方法是日本规范法与我国的规范法, 两者的思想都是分层总和法。根据日本《建筑基础构造设计基准》(日本建筑学会, 1974) 规定, 坑底隆起回弹量的计算公式如 (1.1) 所示:

$$\delta = \sum_1^i \frac{C_{si} h_i}{1 + e_{oi}} \lg \left( \frac{P_{Ni} + \Delta P_i}{P_{Ni}} \right) \quad (1.1)$$

其中  $C_{si}$  为通过回弹试验的  $e-p$  曲线或者  $e-\lg p$  曲线获得的第  $i$  层土的回弹指数;  $e_{oi}$  为相应于  $P_{Ni}$  应力条件下的第  $i$  层土的孔隙比;  $h_i$  为第  $i$  层土的厚度,  $P_{Ni}$  为第  $i$  层土层中心的原有土层上覆荷重,  $\Delta P_i$  为挖去的第  $i$  层土的荷载。

我国《建筑地基基础设计规范》(2002) 提出的坑底回弹  $\delta$  计算公式为:

$$\delta = \psi_c \sum_{i=1}^n \frac{p_c}{E_{ci}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \quad (1.2)$$

其中  $\psi_c$  为回弹经验系数;  $p_c$  为第  $i$  层土体的卸载量;  $E_{ci}$  为第  $i$  层土体回弹模量。

从 20 世纪 80 年代开始, 我国各大城市深基坑开挖工程数量增多, 在设计与施工中积累了丰富的经验, 也提出了许多坑底回弹的计算方法。

夏明耀 (1984) 通过模型试验寻找了坑底回弹量与土层性质 ( $c$  与  $\varphi$ )、围护墙插入深度、地面超载等之间的关系, 并运用数理统计的方法得到了坑底隆起的经验公式。同济大学的刘国彬和侯学渊 (1996) 根据大量实测资料, 提出残余应力概念, 建议了一个应用残余应力原理和应力路径方法建立的基坑隆起变形计算模型, 并用实例进行了对比分析; 刘国彬等 (2000) 提出一种基坑回弹的简化计算方法, 可以计算出残余深度内任何深度的回弹量, 同时能考虑开挖的面积、基坑的放置时间、围护结构的插入深度、开挖深度、超载等因素对基坑回弹的影响。吉茂杰等 (2001) 从理论分析入手, 针对矩形基坑研究了开挖时间、空间对坑底回弹的影响规律, 对残余应力法中的卸荷模量进行了修正。郑列威与胡蒙达 (2004) 从弹性力学解析方法入手, 建立了坑底土体回弹的理论计算公式, 该方法可计算成层地基土体的坑底回弹。

除了以上各种解析分析模型外, 数值模拟也成为一种广泛采用的分析基坑回弹的方法。李佳川 (1992) 利用三维有限元对某采用地下连续墙及钢支撑作为围护结构的基坑周围位移场进行了计算, 对坑底位移场的分布规律进行了探讨。陆培毅等 (2006) 利用三维有限元模型模拟了深基坑分步开挖的过程, 分析了基坑形状、基坑开挖面积及开挖深度等因素与基坑坑底回弹量的关系。孙冰等 (2008) 基于 ABAQUS 软件对上海某基坑坑底隆起变形量进行有限元分析, 发现坑底隆

起最大变形发生在离基坑侧壁约以 SMW 围护桩入土深度为半径的圆内侧。吴传波（2011）利用二维与三维有限元，通过对比不同宽深比基坑坑底隆起的数值，分析了基坑宽度效应对坑底隆起的影响。

总体而言，基坑回弹的计算模型与方法较多，然而要得到相对准确的计算结果仍旧十分困难，主要原因是：基坑开挖坑底回弹受众多因素影响，不仅仅与基坑本身几何尺寸、围护结构形式等相关，同时还与坑底是否经过加固处理、基坑分块开挖面积大小及开挖结束后坑底暴露时间等相关。当坑底有已建运营隧道等结构物后，情况则变得更为复杂，一方面基坑开挖将使已建隧道产生变形，另一方面已建隧道也将对坑底土体位移场产生影响。如果采用数值模拟进行坑底回弹的计算，虽然计算过程方便可行，然而本构如何选取、参数如何确定、土体各向异性如何考虑等问题都导致数值模拟能够定性地体现坑底回弹分布规律，却较难给出准确的预测。

土体在卸荷状态下有其特殊的性质，许多研究者展开室内试验对其进行研究，针对的主要问题是土体卸荷模量的数值以及土体卸荷影响深度的大小。刘国彬与侯学渊（1996）通过大量软土室内应力路径试验，模拟基坑开挖和软土隧道施工过程中的应力路径，研究了上海地区的几种典型软土的卸荷变形模量与应力路径的关系表达式。程玉梅（2001）在室内用多套直剪仪进行卸荷后立即剪切试验，探求开挖面以下粘性土体强度变化的规律性，用以确定开挖卸荷影响深度；何世秀等（2003）对武汉地区某深基坑工程的 20 个粉质粘土原状饱和试样进行不排水卸荷试验，对其应力-应变关系进行分析研究，研究表明：卸荷条件下该土的试验应力-应变曲线仍可用双曲线形式模拟，且与常规三轴压缩试验应力-应变曲线相似。秦爱芳和蒋晨旭（2008）通过大量的卸荷应力路径试验，模拟了基坑开挖时坑底被动区土体的受力过程，分析了竖向卸荷条件下土体竖向变形及侧应力的变化，最后得出了基坑开挖工程中卸荷影响深度的估算方法。李建民与滕延京（2011）采用卸荷比-回弹模量分析法通过对砂土、粘土、淤泥及淤泥质土的压缩回弹试验发现，不同性质土体卸荷深度不同，回弹变形随时间的发展也不同。

### 1.2.2 基坑开挖数值模拟研究现状

数值模拟是分析基坑开挖引起土体位移、围护结构变形的重要手段，这个领域的研究主要集中在以下几个方面：利用数值模拟对基坑开挖后的围护结构变形及土体位移进行预测，并将数值模拟结果与实际监测数据对比；利用实测数据进行参数反分析，确定更合理的数值模拟输入参数，并预测进一步施工或者类似工