



同济大学 1907-2017  
Tongji University



总主编 伍江 副总主编 雷星晖

木林隆 黄茂松 著

# 分层地基中地下工程开挖 对邻近桩筏基础的影响分析

Analysis of Responses of Pile-rafts Foundations  
Induced by Adjacent Excavation in Layered Soil



同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

 同济博士论丛  
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

木林隆 黄茂松 著

# 分层地基中地下工程开挖 对邻近桩筏基础的影响分析

Analysis of Responses of Pile-rafts Foundations  
Induced by Adjacent Excavation in Layered Soil

 同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

## 内 容 提 要

本书是关于复杂条件下主动桩和被动桩分析的著作,全书共6章。本书全面考虑桩-土-筏相互作用,基于对称与非对称分层弹性地基理论建立了多向荷载作用下桩筏基础计算方法。建立了隧道开挖对邻近桩筏基础影响的两阶段理论方法。建立基于梯度推断理论的反演分析技术,结合土体小应变有限元建立了基坑开挖诱发土体三维位移场的简化分析方法,进而建立了基坑开挖对桩筏基础影响的两阶段分析理论。

本书适合相关专业的研究人员阅读参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

分层地基中地下工程开挖对邻近桩筏基础的影响分析/  
木林隆,黄茂松著. —上海:同济大学出版社,  
2018.10

(同济博士论丛 / 伍江总主编)

ISBN 978 - 7 - 5608 - 8145 - 4

I. ①分… II. ①木… ②黄… III. ①地下工程 - 开  
凿 - 影响 - 桩筏基础 - 研究 IV. ①TU94②TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 208292 号

---

## 分层地基中地下工程开挖对邻近桩筏基础的影响分析

木林隆 黄茂松 著

出品人 华春荣 责任编辑 郁峰 熊磊丽

责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

---

出版发行 同济大学出版社 [www.tongjipress.com.cn](http://www.tongjipress.com.cn)

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

排版制作 南京展望文化发展有限公司

印 刷 浙江广育爱多印务有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 14.75

字 数 295000

版 次 2018 年 10 月第 1 版 2018 年 10 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5608 - 8145 - 4

---

定 价 70.00 元

---

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

## “同济博士论丛”编写领导小组

组 长：杨贤金 钟志华

副 组 长：伍 江 江 波

成 员：方守恩 蔡达峰 马锦明 姜富明 吴志强  
徐建平 吕培明 顾祥林 雷星晖

办公室成员：李 兰 华春荣 段存广 姚建中

## “同济博士论丛”编辑委员会

总 主 编：伍 江

副 总 主 编：雷星晖

编委会委员：（按姓氏笔画顺序排列）

丁晓强	万 钢	马卫民	马在田	马秋武	马建新
王 磊	王占山	王华忠	王国建	王洪伟	王雪峰
尤建新	甘礼华	左曙光	石来德	卢永毅	田 阳
白云霞	冯 俊	吕西林	朱合华	朱经浩	任 杰
任 浩	刘 春	刘玉擎	刘滨谊	闫 冰	关侗红
江景波	孙立军	孙继涛	严国泰	严海东	苏 强
李 杰	李 斌	李风亭	李光耀	李宏强	李国正
李国强	李前裕	李振宇	李爱平	李理光	李新贵
李德华	杨 敏	杨东援	杨守业	杨晓光	肖汝诚
吴广明	吴长福	吴庆生	吴志强	吴承照	何晶晶
何敏娟	何清华	汪世龙	汪光焘	沈明荣	宋小冬
张 旭	张亚雷	张庆贺	陈 鸿	陈小鸿	陈义汉
陈飞翔	陈以一	陈世鸣	陈艾荣	陈伟忠	陈志华
邵嘉裕	苗夺谦	林建平	周 苏	周 琪	郑军华
郑时龄	赵 民	赵由才	荆志成	钟再敏	施 骞
施卫星	施建刚	施惠生	祝 建	姚 熹	姚连璧

袁万城 莫天伟 夏四清 顾 明 顾祥林 钱梦騷  
徐 政 徐 鉴 徐立鸿 徐亚伟 凌建明 高乃云  
郭忠印 唐子来 闫耀保 黄一如 黄宏伟 黄茂松  
戚正武 彭正龙 葛耀君 董德存 蒋昌俊 韩传峰  
童小华 曾国荪 楼梦麟 路秉杰 蔡永洁 蔡克峰  
薛 雷 霍佳震

秘书组成员：谢永生 赵泽毓 熊磊丽 胡晗欣 卢元姗 蒋卓文

# 总序

在同济大学 110 周年华诞之际，喜闻“同济博士论丛”将正式出版发行，倍感欣慰。记得在 100 周年校庆时，我曾以《百年同济，大学对社会的承诺》为题作了演讲，如今看到付梓的“同济博士论丛”，我想这就是大学对社会承诺的一种体现。这 110 部学术著作不仅包含了同济大学近 10 年 100 多位优秀博士研究生的学术科研成果，也展现了同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色，向建设世界一流大学的目标迈出的坚实步伐。

坐落于东海之滨的同济大学，历经 110 年历史风云，承古续今、汇聚东西，秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念，发扬自强不息、追求卓越的精神，在复兴中华的征程中同舟共济、砥砺前行，谱写了一幅幅辉煌壮美的篇章。创校至今，同济大学培养了数十万工作在祖国各条战线上的人才，包括人们常提到的贝时璋、李国豪、裘法祖、吴孟超等一批著名教授。正是这些专家学者培养了一代又一代的博士研究生，薪火相传，将同济大学的科学研究和学科建设一步步推向高峰。

大学有其社会责任，她的社会责任就是融入国家的创新体系之中，成为国家创新战略的实践者。党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央高度重视科技创新，对实施创新驱动发展战略作出一系列重大决策部署。党的十八届五中全会把创新发展作为五大发展理念之首，强调创新是引领发展的第一动力，要求充分发挥科技创新在全面创新中的引领作用。要把创新驱动发展作为国家的优先战略，以科技创新为核心带动全面创新，以体制机制改

革激发创新活力,以高效率的创新体系支撑高水平的创新型国家建设。作为人才培养和科技创新的重要平台,大学是国家创新体系的重要组成部分。同济大学理当围绕国家战略目标的实现,作出更大的贡献。

大学的根本任务是培养人才,同济大学走出了一条特色鲜明的道路。无论是本科教育、研究生教育,还是这些年摸索总结出的导师制、人才培养特区,“卓越人才培养”的做法取得了很好的成绩。聚焦创新驱动转型发展战略,同济大学推进科研管理体系改革和重大科研基地平台建设。以贯穿人才培养全过程的一流创新创业教育助力创新驱动发展战略,实现创新创业教育的全覆盖,培养具有一流创新力、组织力和行动力的卓越人才。“同济博士论丛”的出版不仅是对同济大学人才培养成果的集中展示,更将进一步推动同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色、明确大学定位、培养创新人才。

面对新形势、新任务、新挑战,我们必须增强忧患意识,扎根中国大地,朝着建设世界一流大学的目标,深化改革,勠力前行!

万 钢

2017年5月

# 论丛前言

承古续今,汇聚东西,百年同济秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念,注重人才培养、科学研究、社会服务、文化传承创新和国际合作交流,自强不息,追求卓越。特别是近20年来,同济大学坚持把论文写在祖国的大地上,各学科都培养了一大批博士优秀人才,发表了数以千计的学术研究论文。这些论文不但反映了同济大学培养人才能力和学术研究的水平,而且也促进了学科的发展和国家的建设。多年来,我一直希望能有机会将我们同济大学的优秀博士论文集中整理,分类出版,让更多的读者获得分享。值此同济大学110周年校庆之际,在学校的支持下,“同济博士论丛”得以顺利出版。

“同济博士论丛”的出版组织工作启动于2016年9月,计划在同济大学110周年校庆之际出版110部同济大学的优秀博士论文。我们在数千篇博士论文中,聚焦于2005—2016年十多年间的优秀博士学位论文430余篇,经各院系征询,导师和博士积极响应并同意,遴选出近170篇,涵盖了同济的大部分学科:土木工程、城乡规划学(含建筑、风景园林)、海洋科学、交通运输工程、车辆工程、环境科学与工程、数学、材料工程、测绘科学与工程、机械工程、计算机科学与技术、医学、工程管理、哲学等。作为“同济博士论丛”出版工程的开端,在校庆之际首批集中出版110余部,其余也将陆续出版。

博士学位论文是反映博士研究生培养质量的重要方面。同济大学一直将立德树人作为根本任务,把培养高素质人才摆在首位,认真探索全面提高博士研究生质量的有效途径和机制。因此,“同济博士论丛”的出版集中展示同济大

学博士研究生培养与科研成果,体现对同济大学学术文化的传承。

“同济博士论丛”作为重要的科研文献资源,系统、全面、具体地反映了同济大学各学科专业前沿领域的科研成果和发展状况。它的出版是扩大传播同济科研成果和学术影响力的重要途径。博士论文的研究对象中不少是“国家自然科学基金”等科研基金资助的项目,具有明确的创新性和学术性,具有极高的学术价值,对我国的经济、文化、社会发展具有一定的理论和实践指导意义。

“同济博士论丛”的出版,将会调动同济广大科研人员的积极性,促进多学科学术交流、加速人才的发掘和人才的成长,有助于提高同济在国内外的竞争力,为实现同济大学扎根中国大地,建设世界一流大学的目标愿景做好基础性工作。

虽然同济已经发展成为一所特色鲜明、具有国际影响力的综合性、研究型大学,但与世界一流大学之间仍然存在着一定差距。“同济博士论丛”所反映的学术水平需要不断提高,同时在很短的时间内编辑出版110余部著作,必然存在一些不足之处,恳请广大学者,特别是有关专家提出批评,为提高同济人才培养质量和同济的学科建设提供宝贵意见。

最后感谢研究生院、出版社以及各院系的协作与支持。希望“同济博士论丛”能持续出版,并借助新媒体以电子书、知识库等多种方式呈现,以期成为展现同济学术成果、服务社会的一个可持续的出版品牌。为继续扎根中国大地,培育卓越英才,建设世界一流大学服务。

伍 江

2017年5月

# 前言

随着我国城市化进程的推进,特别是在东部沿海软土地区,由于人口集中,建筑密集,而土地资源有限,地下空间开发成为城市基础建设的重要部分,因此有必要考虑地下工程开挖(典型的地下空间开挖包括隧道开挖和基坑开挖两个主要部分)对周边既有建筑的影响。桩筏基础承载力较高,被认为是软土城市地区最为经济实用的基础形式,在软土城市地区高层建筑建设中得到广泛使用。所以,分析地下工程开挖引起的地层位移以及对邻近桩筏基础的影响成为地下工程设计的重要部分,针对该课题的研究可以为隧道和基坑设计提供设计依据和适当的设计方法。而目前对于被动桩的研究主要集中在均质地基中,分层地基中的研究凤毛麟角,且被动桩研究大部分都局限于群桩基础,因此有必要分析在分层地基中地下工程开挖引起的邻近桩筏基础的承载特性。同时,目前针对基坑开挖对邻近桩筏基础的研究主要靠试验方法和有限元分析,缺乏可行的简化方法,这主要是因为基坑开挖引起的墙后地表以下土体位移缺乏合理的计算方法。而且,有限元分析的计算结果的准确性依赖于输入参数,确定合理的输入参数是有限元较准确地计算基坑周边土体变形的基础。针对这些问题,本书的主要研究工作归纳如下。

(1) 目前桩筏基础的研究局限于均质地基中且往往仅限于单一荷载的作用,本书建立了分层地基中复杂荷载耦合作用下刚性桩筏基础的分析方法。本书首先推导了弹性层状体系中轴对称和非轴对称问题的基本解,在此基础上,采用差分方法建立了层状地基中复杂荷载耦合作用下桩筏基础的分析方

法。该方法考虑了桩桩相互作用、加筋效应、桩土相互作用、筏板对桩顶的约束作用和筏板—土相互作用。并通过与既有方法计算结果和有限元方法计算结果验证了该方法的正确性。并进一步研究了各项荷载比例变化时桩筏基础的承载特性的变化。

(2) 首次基于严格的层状弹性理论基本解,建立了分层地基中隧道开挖对刚性桩筏基础影响的两阶段分析方法。第一阶段采用 Loganathan-Poulos 方法计算隧道开挖引起的土体自由场位移。第二阶段采用层状地基中弹性理论法,计算桩和土、桩和桩之间的相互作用,并考虑刚性筏板对桩基和土的约束作用,提出了一套能够分析层状地基中隧道开挖对刚性筏板基础影响的理论方法。将本书方法计算结果与离心试验结果、现有方法计算结果及位移控制有限元计算结果进行对比,得到了较好的一致性,验证了本书方法的正确性。并首次对分层地基中被动桩筏基础承载特性进行了分析,讨论了隧道埋深、隧道与桩距离、地层损失比、土层分布与桩基分布对邻近隧道的被动桩筏基础的影响,并分析了桩基变形对遮拦效应的削减作用。

(3) 考虑土体的小应变特性(基于 HSS 模型),采用反分析法与有限元耦合的算法,解决了参数选取问题,较为准确地计算了基坑开挖引起周边土体的变形。准确地计算基坑开挖引起的土体自由场位移是估算基坑开挖对邻近桩筏基础影响的基础。目前,基坑开挖引起的土体自由场位移的计算缺乏合理的理论方法,主要还是采用有限单元法,而要利用有限单元法较为准确地计算土体的位移场,除了对有限单元法理论以及土体本构知识有较为充足的储备外,模型参数的选取也是重要因素,反分析方法可以有效地解决模型参数的选取问题。且研究表明,土体的小应变特性对基坑周边土体的变形具有重要的影响,要准确计算基坑周边土体的位移,这也是必须要考虑的因素之一。基于梯度推断理论,结合考虑土体小应变特性的有限元分析技术建立了 HSS 模型的参数反演分析方法。基于不同路径下室内带弯曲元的三轴试验结果和基坑周边土体变形实测结果,利用反分析法和有限元耦合的方法,确定了土体刚度

和小应变的合理参数,较为准确地计算了基坑开挖引起的周边土体位移,为下一步研究奠定了基础。

(4) 基于前述有限元计算结果,本书首先建立了基坑开挖引起的土体自由场位移的计算公式,并进一步建立了计算基坑开挖对邻近刚性桩筏基础影响的两阶段方法。基于反分析有限元计算结果,本书总结了墙后土体位移衰减规律,结合围护墙变形和墙后地表沉降的经验计算方法,建立了基坑开挖引起的自由土体三维位移场的简化计算公式。并在此基础上,基于两阶段方法,建立了层状地基中基坑开挖对邻近刚性桩筏基础影响的分析方法。通过与 FEM 方法和实测结果的对比,验证了此方法的正确性,并采用本书方法对基坑开挖深度、围护墙最大水平位移、桩筏与基坑距离以及土层分布对邻近基坑的刚性桩筏基础的影响进行了分析。

最后,总结本书的主要工作以及结论,并指出进一步研究的方向。

# 目 录

总序

论丛前言

前言

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 桩筏基础研究现状 .....	2
1.2.1 竖向桩筏基础研究现状 .....	2
1.2.2 水平向桩筏基础分析现状 .....	5
1.3 隧道开挖引起的土体位移场研究现状 .....	6
1.3.1 经验方法 .....	7
1.3.2 整体数值方法 .....	9
1.3.3 解析方法 .....	11
1.4 基坑开挖引起的土体位移研究现状 .....	12
1.4.1 经验方法 .....	12
1.4.2 小应变对基坑变形的影响 .....	15
1.4.3 基坑变形特性的反分析 .....	17
1.5 被动桩研究现状 .....	18
1.5.1 试验研究 .....	19
1.5.2 整体分析方法 .....	20
1.5.3 两阶段分析方法 .....	22
1.6 研究目的 .....	24
1.7 本书内容 .....	24

<b>第 2 章</b>	<b>分层地基中复杂荷载作用下桩筏基础分析</b>	26
2.1	弹性层状半空间对称与非对称问题解析解	26
2.1.1	均质地基中基本解	26
2.1.2	轴对称荷载下层状弹性半空间的分析	28
2.1.3	非轴对称荷载下层状弹性半空间的分析	33
2.1.4	数值积分方法	40
2.1.5	基本解和程序的验证	42
2.2	分层地基中桩筏基础的计算方法	43
2.2.1	分层地基中单桩计算方法	44
2.2.2	分层地基中群桩计算方法	50
2.2.3	分层地基中桩筏基础计算方法	54
2.3	方法验证与分析	59
2.4	本章小结	64
<b>第 3 章</b>	<b>分层地基中隧道开挖对邻近桩筏基础的影响分析</b>	65
3.1	隧道开挖对桩筏基础影响分析的 DCFEM 法	65
3.2	隧道开挖引起的土体自由场位移解析解	69
3.3	分层地基中隧道开挖对桩筏基础的竖向影响	71
3.3.1	计算方法的建立	71
3.3.2	计算方法的验证	75
3.3.3	竖向影响参数分析	84
3.4	分层地基中隧道开挖对桩筏基础的水平向影响	96
3.4.1	计算方法的建立	97
3.4.2	计算方法的验证	100
3.4.3	水平影响参数分析	105
3.5	考虑水平与竖向耦合的隧道开挖对桩筏基础的影响	112
3.5.1	计算方法的建立	113
3.5.2	计算方法的验证	115
3.6	本章小结	117
<b>第 4 章</b>	<b>基于反分析法的基坑开挖对周边环境的影响分析</b>	119
4.1	反分析方法	119

4.1.1	控制方程与收敛准则	119
4.1.2	模型拟合程度的统计	121
4.1.3	输入参数的统计量	122
4.1.4	测量值权重	123
4.1.5	优化过程中对参数的限制	124
4.2	Block 37 基坑概况	125
4.2.1	工程场地概况	125
4.2.2	地质条件	125
4.2.3	施工设计和围护系统	127
4.2.4	测量仪器	128
4.3	HSS 模型简介	130
4.3.1	HS 模型	130
4.3.2	HSS 模型	132
4.4	基于三轴试验利用反分析法确定土体参数	135
4.4.1	芝加哥黏土的三轴试验	135
4.4.2	基于三轴试验确定土体参数	144
4.5	基于 Block 37 基坑实测利用反分析法确定土体参数	152
4.5.1	实测数据	152
4.5.2	基坑开挖的有限元模型	154
4.5.3	基于基坑实测的反分析	157
4.6	基于三轴实验和现场实测确定的土体参数的讨论	160
4.7	本章小结	162
<b>第 5 章</b>	<b>分层地基中基坑开挖对邻近桩筏基础影响简化分析</b>	<b>164</b>
5.1	基坑开挖引起周边土体自由场位移的简化计算方法	164
5.1.1	围护墙位移与墙后地表沉降经验方法	164
5.1.2	基坑周围土体位移场计算方法	166
5.1.3	计算方法验证	172
5.2	分层地基中基坑开挖对邻近桩筏基础的影响分析	175
5.2.1	基坑开挖对邻近单桩影响的验证	175
5.2.2	基坑开挖对邻近桩筏影响的分析	177
5.3	分层地基中基坑开挖对邻近桩筏基础的影响参数分析	179

5.3.1	开挖深度的影响	179
5.3.2	最大围护墙水平变形的影响	181
5.3.3	桩基与围护墙的距离的影响	182
5.3.4	土层分布的影响	183
5.4	本章小结	185
<b>第6章</b>	<b>结论与展望</b>	<b>187</b>
6.1	主要研究内容及结论	187
6.2	展望及进一步研究方向	190
<b>附录1</b>	<b>室内三轴试验反分析结果</b>	<b>191</b>
<b>附录2</b>	<b>Block 37 基坑周边各截面实测水平位移值</b>	<b>194</b>
	<b>参考文献</b>	<b>200</b>
	<b>后记</b>	<b>216</b>