



同济大学 1907-2017
Tongji University



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

黄栩 黄宏伟 著

软土基坑工程开挖 对下卧已建盾构隧道的 影响研究

Study on Influence of Deep Excavation on Underlying
Existing Shield Tunnel in Soft Ground



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

黄栩 黄宏伟 著

软土基坑工程开挖 对下卧已建盾构隧道的影晌研究

Study on Influence of Deep Excavation on Underlying
Existing Shield Tunnel in Soft Ground

 同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书通过离心机模型试验、解析分析及数值模拟等手段,针对已建盾构隧道在上方基坑开挖作用下产生的纵横向变形与隧道衬砌内力变化的特点与规律,各种因素对隧道响应的影响,盾构隧道纵向变形后引起的横向效应展开研究。

本书适合相关专业高校师生、研究人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

软土基坑工程开挖对下卧已建盾构隧道的影响研究 /
黄栩,黄宏伟著. —上海: 同济大学出版社, 2018. 11

(同济博士论丛 / 伍江总主编)

ISBN 978 - 7 - 5608 - 8176 - 8

I. ①软… II. ①黄… ②黄… III. ①软土地基—基
础(工程)—影响—隧道—盾构法—研究 IV. ①U455. 43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 228554 号

软土基坑工程开挖对下卧已建盾构隧道的影响研究

黄 栩 黄宏伟 著

出 品 人 华春荣 责任编辑 熊磊丽 助理编辑 吴敬醒

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

(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 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 17

字 数 340 000

版 次 2018 年 11 月第 1 版 2018 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5608 - 8176 - 8

定 价 80.00 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	闾耀保	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

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。本书以此为背景,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,验证了本书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,本书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。

目 录

总序
论丛前言
前言

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	5
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	14
1.2.6 盾构隧道结构安全性态评估方法研究现状	16
1.3 主要研究内容	17
1.4 主要创新点	19
第 2 章 基坑开挖对下卧盾构隧道影响的离心机试验研究	20
2.1 概述	20
2.2 土工离心机试验基本原理	20
2.2.1 土工离心机试验基本原理	20
2.2.2 相似准则	21
2.3 同济大学 TLJ-150 复合型岩土离心机介绍	22

2.4	工程背景	23
2.5	试验方案设计	25
2.5.1	基坑开挖模拟方法	25
2.5.2	试验假定	28
2.5.3	试验工况设计	29
2.5.4	模型布局	29
2.5.5	模型制作	29
2.5.6	试验假设的验证	36
2.5.7	试验测量	38
2.5.8	试验步骤	40
2.6	试验结果与讨论	44
2.6.1	工况一结果	44
2.6.2	隧道与基坑之间距离的影响	49
2.6.3	隧道尺寸的影响	51
2.7	本章小结	52
第3章	基坑开挖对下卧盾构隧道影响的解析分析	54
3.1	引言	54
3.2	基坑开挖引起的隧道纵向响应	56
3.2.1	基坑开挖引起的隧道轴线上的附加应力	56
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	65
3.2.3	地基模型的应用	69
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	79
3.3	基坑开挖引起的隧道横向响应	88
3.3.1	隧道横向响应的简化计算模型	88
3.3.2	基坑开挖引起的隧道横断面变形及内力	90
3.4	本章小结	102

第 4 章 盾构隧道纵向变形引起的横向效应	105
4.1 引言	105
4.2 盾构隧道纵向变形引起的横断面压扁效应	106
4.2.1 Brazier 效应	106
4.2.2 盾构隧道横断面压扁效应推导	107
4.2.3 压扁效应影响因素参数分析	119
4.2.4 压扁效应应用实例	129
4.3 盾构隧道纵向变形引起的纵向剪切传递效应	133
4.3.1 纵向剪切传递效应的机理	133
4.3.2 纵向剪切传递效应引起的隧道横向变形及内力	135
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	136
4.4.1 典型的隧道纵向变形模式	136
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	138
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	141
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	145
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	148
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	148
4.5 本章小结	154
第 5 章 基坑开挖对邻近隧道影响的数值模拟分析	156
5.1 引言	156
5.2 有限元程序 PLAXIS	156
5.3 基坑走向与隧道轴线相互平行工况二维模拟分析	157
5.3.1 本构模型的选择	157
5.3.2 隧道位于基坑下方的工况	165

5.3.3	隧道位于基坑侧方的工况	171
5.4	基坑走向与隧道轴线相互垂直工况模拟三维分析	176
5.4.1	分析模型及参数介绍	176
5.4.2	计算结果及讨论	178
5.5	工程实例分析	196
5.6	离心机试验、解析分析与有限元计算的对比分析	198
5.7	本章小结	199
第6章	基坑开挖对下卧盾构隧道影响的易损性评价	202
6.1	引言	202
6.2	已建盾构隧道受上方基坑开挖影响的易损性评价	204
6.2.1	易损性评价模型	204
6.2.2	盾构隧道纵向变形的易损性评价	206
6.2.3	隧道横断面变形的易损性评价	218
6.2.4	降低隧道易损性的措施	224
6.2.5	基坑开挖对下卧盾构隧道影响的易损性评价流程	226
6.2.6	实例分析	226
6.3	本章小结	231
第7章	结论与展望	232
7.1	研究结论	232
7.1.1	基坑开挖引起的已建盾构隧道变形与内力	232
7.1.2	隧道响应的影响因素	233
7.1.3	盾构隧道纵向变形引起的横向效应	235
7.2	存在的问题与展望	236
参考文献	238
后记	251