



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

王伟 杨敏 著

控制差异沉降的 桩筏基础优化研究

Research of Piled Raft Foundation Optimization
Based on Minimum Differential Settlements



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

王伟 杨敏 著

控制差异沉降的 桩筏基础优化研究

Research of Piled Raft Foundation Optimization
Based on Minimum Differential Settlements



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书是研究有关控制差异沉降的桩筏基础优化理论的专著。本书将桩筏基础与数学优化理论相结合,采用 Poulos 桩基础分析与 Rendolph 桩基础分析方法,提出了相关理论,推出单桩位移函数关系式和群桩刚度矩阵表达式,建立了通用分析模型,克服了桩筏片基础优化分析中存在的诸多问题,是桩筏基础按变形控制设计的深化与发展。

本书可作为土木工程及相关专业师生参考,也可供学术研究者、工程设计人员及施工人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

控制差异沉降的桩筏基础优化研究 / 王伟,杨敏著.

—上海: 同济大学出版社, 2017. 8

(同济博士论丛 / 伍江总主编)

ISBN 978-7-5608-6990-2

I. ①控… II. ①王… ②杨… III. ①控制—不均匀沉降—桩筏基础—研究 IV. ①TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 093704 号

控制差异沉降的桩筏基础优化研究

王 伟 杨 敏 著

出 品 人 华春荣 责任编辑 葛永霞 卢元姗

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.tongjiupress.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 15.25

字 数 305 000

版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-6990-2

定 价 71.00 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	何品晶
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	钱梦騄
徐 政	徐 鉴	徐立鸿	徐亚伟	凌建明	高乃云
郭忠印	唐子来	閻耀保	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

桩筏基础的优化研究是桩基础和桩筏基础研究发展到高级阶段的必然产物。桩筏体系中桩、筏板、土体之间的相互作用和相互影响使得该体系的分析已颇为复杂,而在此基础上再结合优化算法进行分析将使整个分析体系复杂程度更高,难度系数更大。

目前,桩筏基础优化研究中存在的主要问题是:①多采用抽桩分析或多方案比较方法,缺乏完备性;②桩筏基础分析方法的限制,仅能分析等桩长或均匀布桩的基础,或采用其他不足以考虑体系间相互作用的简化算法,缺乏通用性和严密性;③经典规划类优化算法在解决大规模工程优化问题中暴露出越来越多的问题,缺乏易用性和高效性。

针对上述存在的诸多问题,本书从桩基础和桩筏基础通用分析方法的研究入手,结合国内外颇具活力的遗传优化算法,对桩筏基础优化研究中的几大要点均进行了深入分析和探讨。重点在于各研究点的深度,而不在于面的广泛。本书开展的研究工作如下:

(1) 将 Randolph 剪切位移方法中桩身位移与桩端位移的函数关系简化为一多项式,并将此与 Poulos 积分方程法中土体柔度系数矩阵相结合,提出了一种竖向受荷单桩弹性分析的改进计算方法。然后,将单

桩的改进计算方法应用于群桩分析。

(2) 提出一个包含两个待定参数的群桩中单桩的位移函数关系式, 由此利用变分原理和最小势能原理推导了群桩的分析过程, 最终得出群桩刚度矩阵的表达式, 进而可以求得群桩基础中任意单桩任意深度处的位移。

(3) 采用幂函数有限项级数的形式来反映桩侧摩阻力沿桩身的分布规律, 基于弹性理论中的变形协调关系、桩体物理方程和力的平衡关系, 推导了竖向荷载作用下桩基础的桩顶荷载和桩顶位移之间的刚度矩阵, 从而得出了一种分析竖向荷载下单桩和群桩基础的通用分析方法。群桩中各桩可具有不同的桩长、桩半径和刚度等特性。

(4) 在上述桩基础通用分析方法基础上, 提出了一种刚性板下桩筏基础的分析方法; 然后, 基于刚性板桩筏基础分析方法提出了一种竖向荷载下桩筏基础的通用分析方法。筏板分析采用有限单元方法, 以转角场和剪应变场独立插值的厚薄板通用四边形等参单元进行分析。该方法可以分析由任意桩长、桩半径和刚度特性的桩群, 任意厚度和几何外形的筏板组成的竖向受荷桩筏基础。

(5) 首先提出了桩基础面向对象分析的框架, 给出了群桩类和单桩类的实现过程, 针对 Poulos 分析方法、Chow 混合分析方法、Shen 变分分析方法和桩基础通用分析方法派生了各自的类分析; 然后提出了桩筏基础面向对象实现的框架, 在桩基础类的基础上派生出刚性板桩筏基础类, 结合有限元基类的派生类厚薄板通用分析类派生出桩筏基础通用分析类, 从而实现了桩筏基础的面向对象分析过程。给出的桩基础分析和桩筏基础分析实例验证了采用本书的面向对象分析方法是合理可行的。

(6) 根据竖向荷载作用下桩基础和桩筏基础通用分析方法, 结合包含 7 个遗传操作算子的改进遗传算法, 提出了控制差异沉降的桩筏基础

(包含桩基础)桩长优化分析模型,并给出了具体的分析步骤;然后进行了实例说明和参量分析。

(7) 根据竖向受荷桩筏基础通用分析方法和改进的遗传算法来实现控制差异沉降最小化的桩筏基础桩位优化设计。针对桩筏基础桩位优化这一特定的应用对象,提出了与之相适应的遗传代码表达方式和 6 个不同的交叉与变异算子,从而能更高效地实现桩位优化分析;然后进行了实例说明和参量分析。

(8) 根据桩基础通用分析方法和桩筏基础通用分析方法,结合恰当处理线性约束和非线性约束条件的遗传算法,提出了控制差异沉降的桩筏基础(包含桩基础)桩径优化分析的模型和分析步骤,然后进行了实例说明和参量分析。

(9) 桩筏基础的筏板厚度分析中优化的目标既要求平均沉降和差异沉降最小,同时又要满足投资最省原则。针对传统的等桩长、等桩径和均匀布桩桩筏基础提出了一种多目标筏板厚度优化分析方法,分析中尚应满足基础承载力和筏板强度等约束条件;然后针对经过桩体特性优化后的桩筏基础提出了一种筏板厚度简洁分析方法;最后进行了参量分析,并给出了一具体的实例来说明筏板厚度的具体优化过程。

(10) 将桩筏基础桩长优化、桩径优化、桩位优化和筏板厚度优化等单变量优化问题结合到一起,针对传统的等桩长、等桩径、均匀布桩的传统桩筏基础和布置任意桩长、桩径的一般桩筏基础提出了各自的桩筏基础各变量优化分析步骤。在上述分析基础上,提出了最优桩数确定的方法,从而实现了桩筏基础中桩数、桩位、桩长、桩径和筏板厚度优化分析的全过程。

符号说明

A	桩的横截面面积或筏板的面积
$[A]$	线性等式约束的系数矩阵
A_e	单元面积
a_i	优化变量分布区间的上限
a_r	筏板长度
b	确定非均匀度的系统参数
b_i	优化变量分布区间的下限
b_r	筏板宽度
B	线性等式约束的常数向量
$[B_b]$	弯曲应变矩阵
B_s	单元剪切应变矩阵元素
c	排序第一个体的选择概率
C	线性不等式约束的系数矩阵
$[C]$	剪切弹性刚度矩阵
c_{ub}	桩端土体不排水抗剪强度
c_u	桩侧土体不排水抗剪强度
d	桩径

dist	最小桩距的规定值
D	线性不等式约束的常数向量
$[D]$	弯曲弹性刚度矩阵
E	板的弹性模量
E_p	桩的弹性模量
E_s	土体弹性模量或平均模量
E_{si}	位移计算点处土体的弹性模量
E_{sj}	荷载作用处土体的弹性模量
d_i	单元各边的长度
$f(c, z)$	Mindlin 基本解
$[F]$	桩周土体柔度矩阵
$[F_b]$	桩端土体柔度矩阵
Fit	个体适应度大小
Fit_0	初始种群中最优个体的适应度
$\text{flip}()$	随机产生 0 值或 1 值的函数
G_l	桩端处土体的剪切模量
G_r	筏板自重
G_s	土体剪切模量
G_z	深度 z 处的土体剪切模量
h	板的厚度
k	桩侧摩阻力函数关系式待定整型变量
$[K]$	单元刚度矩阵
$[K_b]$	单元弯曲刚度矩阵
$[K_{ps}]$	桩土体系刚度矩阵
$[K_R]$	板的整体刚度矩阵
$[K_s]$	单元剪切刚度矩阵
L	桩长

L	变量取值下限向量
L_p	基础中的总桩长
n	桩身划分单元的数目
$node$	筏板中可作为桩位的总节点数
np	群桩中桩的数量
$npoint$	离散点总数
ns	筏板下土节点的总数
N	种群大小
N_c	桩端承载因子
N_G	进化的当前代数
N_r	竖向承载力标准值
N_{si}	单元插值形函数
P_c	筏板承担的荷载
P_{out}	等效结点力
P_{os}	个体在种群中的序位
P_t	桩顶荷载
$[P_t]$	桩土反力矩阵
q_i	厚薄板通用四边形单元节点自由度
r	等效圆形区域的半径或区间 $[0,1]$ 之间的随机数
r_0	桩半径
r_m	剪切变形的影响半径
r_m	第 n 根桩 gauss 积分点与第 i 个土节点的水平距离
R	桩筏基础极限承载力
R_A	面积率
R_i	参照点
S	单桩的桩侧表面积

S_i	搜索点
s_{ij}	i 桩和 j 桩轴线之间的距离
SP	选择压力
T	最大进化代数
U	变量取值上限向量
V	单桩的体积
V_0	约束沉降对应的体积值
Volume	基础中桩体积或桩筏体积之和
W_0	规定的沉降限值
w_b	桩端位移
w_t	桩顶位移
Δw_z	深度 z 处桩体压缩量
ΔFit_i	第 i 代和第 $i-1$ 代种群中最优个体适应度的差值
x_i	第 i 桩位移函数待定系数
X_s	单元节点转换关系矩阵元素
y_i	第 i 桩位移函数待定系数
Y_s	单元节点转换关系矩阵元素
z_{bm}	第 n 根桩桩端处坐标
z_i	桩单元中心点的纵坐标
z_{nm}	第 n 根桩第 m 个 gauss 积分点纵坐标
ε	误差标准
ρ	土体不均匀系数
δ	桩身单元长度
τ	桩周摩阻力
$\tau_i(z)$	第 i 根桩深度 z 处的桩侧摩阻力
ν	土体泊松比
λ	桩土刚度比