



同濟大學 1907-2017
Tongji University



同濟博士論叢
TONGJI Dissertation Series

總主編 伍江 副總主編 雷星暉

朱碧堂 楊敏 著

土體的極限抗力 與側向受荷樁性狀

Limiting Force Profile and Response of
Laterally Loaded Piles



同濟大學出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



同济大学 1907-2017
Tongji University

【工学·土木工程】

学海无涯 同舟共济



微信: TJUPress

ISBN 978-7-5608-8231-4



9 787560 882314 >

定价: 90.00 元



总主编 伍江 副总主编 雷星晖

朱碧堂 杨敏 著

土体的极限抗力 与侧向受荷桩性状

Limiting Force Profile and Response of
Laterally Loaded Piles



内 容 提 要

本书基于统一极限抗力分布模型,讨论了现有极限抗力分布模式,介绍了一种基于该极限统一极限抗力分布模式的弹塑性理论解答和程序 GASLFP,并推导了基于这种分布模式的有限差分统一格式,编制了相应的程序 FDLLP。

本书适合土木工程专业的研究人员和高校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

土体的极限抗力与侧向受荷桩性状 / 朱碧堂等著

. 1—上海: 同济大学出版社, 2018. 12

(同济博士论丛/伍江总主编)

ISBN 978-7-5608-8231-4

I. ①土… II. ①朱… III. ①土体-极限-抗力-研究
②桩基础-侧向力-载荷-研究 IV. ①TU432

②TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 257466 号

土体的极限抗力与侧向受荷桩性状

朱碧堂 杨 敏 著

出 品 人 华春荣 责任编辑 司徒妙龄 蒋卓文

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 19.5

字 数 390 000

版 次 2018 年 12 月第 1 版 2018 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-8231-4

定 价 90.00 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 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

对于侧向受荷桩的分析,国外广泛采用非线性弹性地基梁,即 $p-y$ 曲线法(p 为桩身某点处的土体抗力, y 为研究点处桩的局部侧向变形)。侧向受荷桩的性状主要由上部 $5d$ (d 为桩径)深度内土体抗力 p 的极限值(即土体极限抗力)控制。只要能准确确定浅层土体极限抗力的分布模式,就能较准确预测桩基的所有性状。然而,由于土体条件的多样性、桩基结构和施工扰动以及不同的加载条件,目前还没有一种普遍适用的极限抗力理论解答。不过,通过三个参数 N_g, α_0 和 n ,几乎所有的极限抗力都可以表达为一种统一的形式。

基于这种统一极限抗力分布模型,本书讨论了现有极限抗力分布模式,介绍了一种基于该极限统一极限抗力分布模式的弹塑性理论解答和程序 GASLFP,并推导了基于这种分布模式的有限差分解统一格式,编制了相应的程序 FDLLP。采用 GASLFP 和 FDLLP,本书主要对如下问题进行了研究:

- (1) 统一抗力分布模式相应参数的选取;
- (2) 侧向受荷桩性状的影响参数分析;
- (3) 侧向受荷单桩的线性和非线性分析,并给出了土体和岩石中侧向受荷桩分析数据库;
- (4) 对群桩中各单桩的性状进行了初步研究,讨论了群桩效应;
- (5) 最后,对特殊海洋砂土中单桩的静力和循环特性进行了讨论。

上述分析表明：

(1) 采用统一极限抗力分布不仅能包括或近似拟合现有的极限抗力分布,而且通过选择合适的 N_g, α_0 和 n 组合值,还能够反映不同的土体、桩基和加载条件,如分层土体、循环荷载作用下桩土间隙形成、群桩效应等;

(2) 极限抗力参数对于同一种土体,变化范围较小,如对于均质砂土,一般有 $\alpha_0 = 0, n = 1.7$ 和 $N_g = (0.4 \sim 2.5)K_p^2$ (K_p 为被动土压力系数);对于均质黏土,一般 $\alpha_0 = 0 \sim 0.3, n = 0.7$ 和 $N_g = 0.8 \sim 3.2$;

(3) 侧向受荷桩的性状主要集中于上部 $10d$ 深度内,特别是受上部 $5d$ 深度内的土体极限抗力控制;

(4) 如果桩基为钻孔桩或其他钢筋混凝土桩,桩的结构非线性可以得到准确的预测;

(5) 在群桩中,各桩的性状与其位置有紧密的关系。一般前排桩的性状如同单桩。因此,如果能够准确预测单桩的性状,群桩的性状也可得到较准确的预测;

(6) 对于海洋砂土中桩的静载特性,除了其特有的胶结特性外,其他分析过程和参数选取与一般土体中的桩基相似。在循环荷载作用下,由于桩土界面裂隙和土体软化效应,其土体极限抗力为静载时的 $56\% \sim 64\%$ 。

结合本文基于统一极限抗力分布模式的弹塑性解答,上述结论推荐应用于侧向受荷桩的设计。

目 录

总序

论丛前言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究课题的提出	1
1.2 侧向受荷桩的应用	4
1.3 侧向受荷桩的研究现状	5
1.4 研究目的	6
1.5 主要研究内容	7
第 2 章 侧向受荷桩基本方程与荷载传递暨文献综述	8
2.1 侧向受荷桩(梁)的基本方程	8
2.1.1 侧向受荷桩描述参量	8
2.1.2 侧向受荷桩(梁)的基本方程	9
2.1.3 桩土相互作用性状的描述	12
2.2 有效桩长与侧向受荷桩的分类	13
2.3 线性荷载传递模型	16
2.3.1 与地基反力参数相关的土体参数	17
2.3.2 弹性地基反力模量 k 的经验值	20
2.3.3 k_h 的经验数值与计算式	21
2.3.4 n_h 的经验数值与计算式	22
2.3.5 k 值的理论计算	24



2.4	线性模型理论解	29
2.4.1	Hetenyi(1946)	29
2.4.2	Matlock & Reese(1960)	31
2.4.3	Sun(1994)	31
2.4.4	Guo & Lee(2001)	33
2.4.5	其他理论解答	35
2.5	非线性荷载传递模型($p-y$ 曲线法)	37
2.5.1	$p-y$ 曲线的试验测定	38
2.5.2	试验 $p-y$ 曲线模型	39
2.5.3	试验 $p-y$ 曲线的局限性	42
2.6	非线性 $p-y$ 模型的求解	43
2.7	本章小结	44
第3章	土体的统一极限抗力分布	45
3.1	引言	45
3.2	现有土体极限抗力分布(LFP)	48
3.3	统一极限抗力分布	53
3.3.1	极限抗力统一表达式	53
3.3.2	现有 LFP 的 N_g, α_0 和 n 值	54
3.4	砂土中 n 与 α_0 值的初步确定	55
3.4.1	锚锭板的荷载—变形曲线与极限拉拔力	55
3.4.2	锚锭板极限拉拔力经验公式	56
3.4.3	砂土中侧向受荷桩与锚锭板的比较	58
3.5	黏土中 n 与 α_0 值的初步确定	59
3.5.1	由锚锭板极限拉拔强度上下限解确定	59
3.5.2	由锚锭板室内试验结果确定	66
3.6	本章小结	67
第4章	基于统一极限抗力分布的侧向受荷桩弹塑性解答	69
4.1	引言	69
4.2	基于统一极限抗力分布的理论封闭解(Guo, 2001b, 2002, 2004)	70

4.2.1	弹性状态	71
4.2.2	弹塑性基本方程	71
4.2.3	桩头自由桩的封闭解(Guo,2001b,2002)	72
4.2.4	计算步骤与程序 GASLFP	75
4.3	基于统一极限抗力分布的差分求解	75
4.3.1	控制方程	76
4.3.2	桩的离散与土体反应	76
4.3.3	差分求解统一格式	78
4.3.4	计算步骤和迭代求解	86
4.4	GASLFP,FDLLP 与 COM624P	87
4.5	桩头约束对桩基性状的影响	91
4.6	本章小结	94
第 5 章	N_g 值与侧向受荷桩的静载特性	96
5.1	引言	96
5.2	侧向受荷桩分析过程与参数选取	96
5.3	砂土中侧向受荷桩的性状	97
5.3.1	分析实例 SS1	97
5.3.2	砂土中侧向受荷桩的分析数据库	99
5.3.3	砂土中侧向受荷桩极限荷载的简化计算	105
5.4	黏性土中桩的侧向受荷性状	109
5.4.1	分析实例	109
5.4.2	黏性土中侧向受荷桩分析数据库	112
5.4.3	黏性土中侧向受荷桩极限荷载的简化计算	119
5.4.4	上海黏土中侧向受荷桩性状	124
5.5	线性嵌岩桩的静载特性	125
5.5.1	嵌岩桩的地基反力参数	125
5.5.2	岩石中侧向受荷桩的线性性状——实例 RS1 和 RS2	128
5.5.3	侧向受荷嵌岩桩分析数据库	131
5.6	本章小结	134



第 6 章	桩的结构非线性	136
6.1	引言	136
6.2	极限弯矩与开裂后抗弯刚度	137
6.2.1	开裂弯矩 M_{cr}	137
6.2.2	有效抗弯刚度 $E_p I_p$	137
6.2.3	圆形和矩形截面桩的 M_{ult} 和 $(EI)_{cr}$	138
6.3	混凝土开裂对桩性状的影响及分析方法	144
6.3.1	混凝土开裂对桩性状的影响	144
6.3.2	考虑桩结构非线性的分析过程	145
6.3.3	与 COM624P 和 Florida—Pier 的比较	146
6.4	砂土中桩的结构非线性性状	149
6.4.1	台湾试验——实例 SN1 和 SN2	151
6.4.2	香港圆形桩试验——实例 SN3	157
6.4.3	香港方形桩试验——实例 SN4 和 SN5	159
6.5	黏土中桩的结构非线性性状	163
6.5.1	实例 CN1	164
6.5.2	实例 CN2	166
6.6	嵌岩桩的结构非线性性状	168
6.6.1	San Francisco 试验——实例 RN1	169
6.6.2	Islamorada 试验——实例 RN2	173
6.7	本章小结	176
第 7 章	群桩中各单桩的性状分析	178
7.1	概述	178
7.2	群桩性状与分析模型	179
7.2.1	群桩的试验性状	179
7.2.2	群桩的相互作用模型	184
7.2.3	群桩的分析方法	185
7.3	群桩中前排桩的特性	189
7.3.1	实例 GF1——大直径原位钻孔桩试验(Brown 等,2001)	190
7.3.2	实例 GF2——群桩离心机试验(McVay 等,1998)	191