



申请同济大学博士学位论文

同 濟 大 學

博 士 学 位 论 文

土体的极限抗力与侧向受荷桩性状

(上海市宝山钢铁集团公司项目资助)

(上海市科委重点基础研究项目资助, 项目编号: 02DJ14062)

(教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助, 项目编号: 20020247003)

(澳大利亚科学研究委员会发现工程项目资助, 项目编号: DP0209027)

朱碧堂

指导教师姓名 杨 敏 教授 同济大学
GUO W.D. 博士 澳大利亚格里菲斯大学
黄强 研究员 中国建筑科学研究院

申请学位级别 博士 专业名称 岩土工程

学位授予单位和日期 _____

同济大学土木工程学院地下建筑与工程系

2005 年 02 月



A dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy at Tongji University

同濟大學

PhD Thesis

Limiting Force Profile and
Response of Laterally Loaded Piles

by Bitang Zhu

Financial Support by
Shanghai BaoSteel Group
Doctoral Research Funding of the Ministry of Education (No. 02DJ14062)
Shanghai Science and Technology Council (No. 20020247003)
Australian Research Council (No. DP0209027)

Supervisors Min Yang, Professor of Tongji University
Dr. Weidong Guo, Griffith University, Australia
Qiang Huang, Research Fellow of China Academy of Building Research

Degree Doctor of Philosophy Specialty Geotechnical Engineering

Graduation university and date Tongji University, March 2005

Department of Geotechnical engineering, School of Civil Engineering, Tongji University

February, 2005

声 明

本人郑重声明：本论文是在导师的指导下,独立进行研究工作所取得的成果，撰写成博士/硕士学位论文“土体的极限抗力与侧向受荷桩性状”。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表或未公开发表的成果。

本声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：朱碧堂

2005年 02 月 20 日

谨以此文

献给我勤俭、贫劳一生的父亲和母亲

致 谢

在论文付梓之际，我不禁又想起了 GUO W.D. (郭蔚东) 博士常常给我出的一个问题：给你一个工程，你有多大的把握把它算准？如果本文能够给出一个 70% 的答卷，才不会辜负老师、朋友和同学们的指导与帮助。

在同济的三年里，我以师从杨敏教授而自豪。杨敏教授敏锐的洞察力、对土木工程深刻的理解、学术上精深的造诣、纵横捭阖的处事能力让我叹为观止。他独到的见解，常常使我茅塞顿开；他理论与实践相结合、化科学为生产力的成果是我学习的榜样；他精心、耐心的五年指导和生活上无微不至的关心，是我一生的财富。

在访问澳大利亚格丽菲斯大学的两年里，我为能得到郭蔚东博士精心的指导而倍感荣幸。郭蔚东博士是岩土工程的专家，精美公式的雕塑家。他对岩土工程的深刻理解、丰富的实践经验以及化疑难问题为富有美感的理论公式的本领，都让我高山仰止。他手把手式的两年指导，使我领会到了岩土工程的可预测性与精妙之处，并将使我终身受益。

在读博期间还得到了我的副导师、中国建筑科学研究院黄强研究员的关心和指导，在此深表谢意。

感谢武汉大学冯国栋教授、刘祖德教授、我的硕士生导师刘一亮教授和其他老师和同事们，在武汉大学四年里，对我学术上的栽培、教学方式上的指导以及生活上的关心。

感谢熊巨华博士、师兄和周洪波师弟几年来在学业上和生活上多次为我的琐事而毫无怨言的奔波。感谢张宏鸣副教授、刘全林教授、裴健勇师兄、陈福全博士、王伟师弟等老师或师兄的鼓励和帮助以及在学术交流上的乐趣。感谢钱建固博士在生活上坦诚的鼓励和友谊，在学术上，特别是在土体的流变特性和本构模型上多次讨论和切磋。

感谢澳大利亚格丽菲斯大学博士生 Enghow Ghee 先生为我提供了大量的参考文献和岩土工程室内模型试验技术的大量知识，以及在土力学和侧向受荷桩理论上的讨论和生活上无微不至的关心。

感谢澳大利亚格丽菲斯大学访问学者、河海大学博士生秦红玉先生在岩土工程认识方面的交流和在土体极限分析方面的探讨，以及利用休息时间对我的论文进行了认真的阅读、修正了大量的错误、提出了宝贵的意见。

本人在同济大学期间得到了上海市科委重点基础研究项目“重复堆卸载软土地基与邻近桩基相互作用研究”，上海宝山钢铁集团公司项目“超载地基条件下工业钢结构厂房可靠性监控的研究”和教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目“长期反复堆卸载作用下地基土与桩相互作用研究”的资助；在访问澳大利亚期间，得到了澳大利亚科研委 (Australian Research Council) Discovery Project “The response of beams subjected to axial load and lateral soil movement”的资助。本人对上述资助表示由衷地感谢。

最后，我要感谢我的父母、妻子、兄弟姐妹们。他们过去是、现在是、将来也永远是我精神的支柱、奋斗的源泉。

朱碧堂

二零零五年除夕于黄金海岸

摘要

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,本文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。采用 GASLFP 和 FDLLP,本文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);对于均质粘土,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它钢筋混凝土桩,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,其它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 $0.56 \sim 0.64$ 倍。

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。

ABSTRACT

For design of laterally loaded piles, the non-linear Winkler foundation method has widely been used around the world based on the p-y concept, where p is soil resistance and y is local pile deflection. A number of p-y curves have been proposed but the pile response is mainly governed by the limiting value of the p , i.e. limiting force or soil ultimate resistance p_u , at shallow depths. Should the limiting force profile (LFP) have been accurately determined, the overall behavior of laterally loaded piles (including pile deflection, maximum bending moment, slope and bending moment distribution etc.) could be well predicted. Nevertheless, as the variability of soil profile and properties, pile size and installation method, and loading type would impose significantly influence on the pile behavior, none of LFPs has been widely accepted. Using three parameters of N_g , α_0 and n , however, a generic LFP can not only include all existing LFPs, but allows the aforementioned factors on pile response to be gauged through selecting the set of values of the three parameters.

Based on the generic LFP, existing LFPs for piles in soil and rock are discussed herein and closed form solutions and a program GASLFP are presented. And further, numerical methods involving finite difference approach are derived and implemented into a spreadsheet program FDLLP. Utilizing the programs of GASLFP and FDLLP, this thesis focuses on:

- (1) Examining the selection of the three parameters for the generic LFP;
- (2) Discussing the main factors on the behavior of laterally loaded piles;
- (3) Investigating the response of single piles involving linear and nonlinear structural behavior and presenting databases for laterally loaded piles in soil and rock;
- (4) Exploring the nonlinear response of individual piles in a group tentatively and discussing pile group efficiency;
- (5) Evaluating static and cyclic responses of single piles in calcareous sand.

Above analyses demonstrate that:

- (1) The generic LFP can integrate all existing LFPs and is capable of taking effects of layered soils, gap formation under cyclic loading and pile group action into consideration;
- (2) For one type of soil, the parameters for the generic LFP are rather consistent. For relatively uniform sand, $\alpha_0 = 0$, $n = 1.7$ and $N_g = (0.4 \sim 2.5)K_p^2$ ($K_p =$ coefficient of passive earth pressure); for relatively uniform clay, $\alpha_0 = 0 \sim 0.3$, $n = 0.7$ and $N_g = 0.8 \sim 3.2$;
- (3) The response of laterally loaded piles occurs mainly within the top $10d$ ($d =$ pile diameter) and is dominated by the LFP within the top $(5 \sim 7)d$;
- (4) For drilled shafts, the structural nonlinearity should and could be accurately considered, especially for higher load levels;
- (5) In a group, responses of individual piles are dependent of their relative position. Generally, the leading row piles behave as isolated single piles. The group response can be derived from the response of an isolated single pile in the same site if available;
- (6) The static response of piles in calcareous sand is similar to that of onshore piles except for effect of particle cementation. The magnitude of LFP under cyclic loading is about $0.56 \sim 0.64$ times that under static loading due to formation of gap.

Above conclusions are recommended for design of laterally loaded piles in conjunction with the elastic-plastic solutions using the generic LFP.

目 录

声明.....	i
致谢.....	ii
摘要.....	iv
英文摘要.....	v
目录.....	vi
表格目录.....	x
图表目录.....	xiii
本论文采用的符号.....	xviii
第一章 绪论.....	1
1.1 研究课题的提出.....	1
1.2 侧向受荷桩的应用.....	3
1.3 侧向受荷桩的分析方法.....	4
1.4 研究目的.....	4
1.5 主要研究内容.....	5
第二章 侧向受荷桩基本方程与荷载传递暨文献综述.....	6
2.1 侧向受荷桩（梁）的基本方程.....	6
2.1.1 侧向受荷桩描述参量.....	6
2.1.2 侧向受荷桩（梁）基本方程.....	6
2.1.3 桩土相互作用性状的描述.....	9
2.2 有效桩长与侧向受荷桩的分类.....	9
2.3 线性荷载传递模型.....	12
2.3.1 与地基反力参量相关的土体参数.....	12
2.3.2 弹性地基反力模量 k 的经验值.....	15
2.3.3 k_h 的经验数值与计算式.....	15
2.3.4 n_h 的经验数值与计算式.....	17
2.3.5 k 值的理论计算.....	18
2.4 线性模型理论解.....	22
2.4.1 Hentenyi (1946).....	22
2.4.2 Matlock & Reese (1960).....	23
2.4.3 Sun (1994).....	23
2.4.4 Guo & Lee (2001).....	25
2.4.5 其他理论解答.....	27
2.5 非线性荷载传递模型（ p - y 曲线法）.....	28
2.5.1 p - y 曲线的试验测定.....	29
2.5.2 试验 p - y 曲线模型.....	30
2.5.3 试验 p - y 曲线的局限性.....	31
2.6 非线性 p - y 模型的求解.....	32
2.7 小结.....	33
第三章 土体的统一极限抗力分布.....	34

3.1	引言.....	34
3.2	现有极限抗力分布 (LFP)	36
3.3	统一极限抗力分布	41
3.3.1	极限抗力统一表达式.....	41
3.3.2	现有 LFP 的 N_g , α_0 和 n 值	41
3.4	砂土中 n 与 α_0 值的初步确定	42
3.4.1	锚锭板的荷载—变形曲线与极限拉拔力	42
3.4.2	锚锭板极限拉拔力经验公式	43
3.4.3	砂土中侧向受荷桩与锚锭板的比较	45
3.5	粘土中 n 与 α_0 值的初步确定	45
3.5.1	由锚锭板极限拉拔强度上下限解确定	45
3.5.2	由锚锭板室内试验结果确定	50
3.6	小结.....	51
第四章	基于统一极限抗力分布的侧向受荷桩弹塑性解答.....	52
4.1	引言.....	52
4.2	基于统一极限抗力分布的理论封闭解 (Guo, 2001b, 2002, 2004)	52
4.2.1	弹性状态.....	52
4.2.2	弹塑性基本方程.....	53
4.2.3	桩头自由桩的封闭解 (Guo, 2001b, 2002)	54
4.2.4	计算步骤与程序 GASLFP	56
4.3	基于统一极限抗力分布的差分求解	56
4.3.1	控制方程.....	56
4.3.2	桩的离散与土体反应.....	57
4.3.3	差分求解统一格式.....	58
4.3.4	计算步骤和迭代求解.....	64
4.4	GASLFP, FDLLP 与 COM624P	65
4.5	桩头约束对桩基性状的影响.....	67
4.6	小结.....	69
第五章	N_g 值与侧向受荷桩的静载特性	71
5.1	引言.....	71
5.2	侧向受荷桩分析过程与参数选取.....	71
5.3	砂土中侧向受荷桩的性状	72
5.3.1	分析实例 SS1	72
5.3.2	砂土中侧向受荷桩的分析数据库.....	74
5.3.3	砂土中侧向受荷桩极限荷载的简化计算	77
5.4	粘土中桩的侧向受荷性状	80
5.4.1	分析实例.....	80
5.4.2	粘土中侧向受荷桩分析数据库.....	82
5.4.3	粘土中侧向受荷桩极限荷载的简化计算	86
5.4.4	上海粘土中侧向受荷桩性状.....	90
5.5	线性嵌岩桩的静载特性.....	91
5.5.1	嵌岩桩的地基反力参数.....	91
5.5.2	岩石中侧向受荷桩的线性性状—实例 RS1 和 RS2	93
5.5.3	侧向受荷嵌岩桩分析数据库.....	94

5.6	小结.....	97
第六章	桩的结构非线性.....	98
6.1	引言.....	98
6.2	极限弯矩与开裂后抗弯刚度.....	98
6.2.1	开裂弯矩 M_{cr}	98
6.2.2	有效抗弯刚度 $E_p I_p$	99
6.2.3	圆形和矩形截面桩的 M_{ult} 和 $(EI)_{cr}$	99
6.3	混凝土开裂对桩性状的影响及分析方法.....	103
6.3.1	混凝土开裂对桩性状的影响.....	103
6.3.2	考虑桩结构非线性的分析过程.....	104
6.3.3	与 COM624P 和 Florida-Pier 的比较.....	104
6.4	砂土中桩的结构非线性性状.....	107
6.4.1	台湾试验—实例 SN1 和 SN2.....	107
6.4.2	香港圆形桩试验—实例 SN3.....	111
6.4.3	香港方形桩试验—实例 SN4 和 SN5.....	113
6.5	粘土中桩的结构非线性性状.....	116
6.5.1	实例 CN1.....	116
6.5.2	实例 CN2.....	118
6.6	嵌岩桩的结构非线性性状.....	119
6.6.1	San Francisco 试验—实例 RN1.....	119
6.6.2	Islamorada 试验—实例 RN2.....	122
6.7	小结.....	124
第七章	群桩中各单桩的性状分析.....	125
7.1	概述.....	125
7.2	群桩性状与分析模型.....	125
7.2.1	群桩的试验性状.....	125
7.2.2	群桩的相互作用模型.....	128
7.2.3	群桩的分析方法.....	129
7.3	群桩中前排桩的特性.....	130
7.3.1	实例 GF1—大直径原位钻孔桩试验 (Brown 等, 2001).....	131
7.3.2	实例 GF2—群桩离心机试验 (McVay 等, 1998).....	132
7.3.3	实例 GF3—胶结砂土中的群桩 (Ismael, 1990).....	133
7.3.4	前排桩 LFP 的讨论.....	133
7.4	群桩中各单桩的特性与群桩效率系数.....	134
7.4.1	群桩中各单桩的性状—室内模型试验.....	134
7.4.2	群桩效率系数.....	139
7.4.3	群桩各单桩的性状—离心机试验.....	140
7.5	小结.....	141
第八章	海洋砂土中桩的静力和循环特性.....	143
8.1	概述.....	143
8.2	理想弹塑性 p - y 曲线与硬化 p - y 曲线的比较.....	143
8.3	海洋砂土中桩的静力和循环特性.....	145
8.3.1	Kingfish B 砂—陆上小尺寸试验 (实例 1 和 2).....	146
8.3.2	Kingfish B 砂—离心机试验 (实例 3).....	148

8.3.3	North Rankin B 砂—现场试验 (实例 4)	149
8.3.4	Bombay High 砂—室内模型试验 (实例 5 和 6)	149
8.4	小结	150
第九章	结论与展望	151
9.1	概述	151
9.2	地基反力模量与极限抗力分布参数	151
9.3	单桩的结构线性特性	152
9.4	单桩的结构非线性特性	153
9.5	群桩的性状与分析	153
9.6	进一步研究的课题	153
9.7	小结	154
参考文献		155
附录 A	GASLFP 界面	163
附录 B	FDLLP 界面	168
附录 C	砂土中线性单桩的静载特性	171
附录 D	砂土中桩头自由桩极限荷载	176
附录 E	砂土中桩头固定桩极限荷载	177
附录 F	粘土中线性单桩的静载特性	178
附录 G	粘土中桩头自由桩极限荷载	185
附录 H	粘土中桩头固定桩极限荷载	194
附录 I	岩石中线性单桩的静载特性	203
附录 J	圆形和矩形截面桩 M_c 计算	206
攻读博士期间撰写的学术论文		208

表格目录

表 2-1	侧向受荷桩常用参量与定义	6
表 2-2	有效桩长的计算	10
表 2-3	无粘土的分类与指标 (Teng, 1962)	12
表 2-4	粘土不排水剪强度 (Terzaghi & Peck, 1948)	13
表 2-5	粘性土 I_r 的经验值	14
表 2-6	α_1 值 (粘性土与无粘性土)	15
表 2-7	A 值 (Audibert & Nyman, 1977)	16
表 2-8	砂土 n_h 值 (MN/m ³)	17
表 2-9	采用 Bhushan & Askari 经验公式计算 n_h 值 (MN/m ³)	18
表 2-10	荷载传递系数 γ 的参数 (Guo & Lee, 2001)	19
表 2-11	均质地基桩头自由桩弹性解答无量纲系数	27
表 2-12	Gibson 地基桩头自由桩弹性解答无量纲系数	28
表 2-13	典型 p - y 曲线模型	30
表 3-1	现有砂土的极限抗力	37
表 3-2	现有 S_u 一粘土的极限抗力	38
表 3-3	现有 c - ϕ 土体的极限抗力	39
表 3-4	O-G LFP 极限抗力折减系数 (O' Neill & Gazioglu, 1984)	40
表 3-5	Gluskov LFP 抗力折减系数 (Gluskov, 1977)	40
表 3-6	现有 LFP 对应的 N_g , α_0 和 n 值	42
表 3-7	砂土中侧向受拉锚锭板试验数据库	43
表 3-8	不考虑 γ_s 影响时锚锭板极限抗力的拟合参数	47
表 3-9	考虑 γ_s 时土体锚锭板极限抗力下限解的拟合参数	49
表 3-10	粘土中锚锭板试验拉拔强度拟合参数	50
表 4-1	侧向受荷桩差分法统一方程 (Gleser, 1984)	60
表 4-2	GASLFP, FDLLP 与 COM624P 程序的区别	65
表 4-3	分析假想实例时采用的不同 LFP	66
表 5-1	砂土中侧向受荷桩数据库一桩参数	73

表 5-2	砂土中侧向受荷桩数据库—土体参数.....	74
表 5-3	砂土中侧向受荷桩数据库—桩的计算性状.....	75
表 5-4	Manor 现场试验土体组成 (Reese & Van Impe, 2001)	81
表 5-5	粘土中侧向受荷桩数据库—桩参数	83
表 5-6	粘土中侧向受荷桩数据库—土体参数.....	84
表 5-7	粘土中侧向受荷桩数据库—桩的计算性状.....	85
表 5-8	E_m 值的经验关系式	91
表 5-9	M5: E_m 与 RQD 经验关系值(Sabatini 等, 2002).....	92
表 5-10	采用方程(3-3) 准确拟合现有嵌岩桩的 LFP ($d = 1.0 \text{ m}$, $q_{ur} = 3.45 \text{ MPa}$ 和 $\gamma_m = 23 \text{ kN/m}^3$).....	92
表 5-11	嵌岩桩的计算参数	95
表 5-12	岩石的强度和分类指标	96
表 5-13	岩石的其它力学指标	96
表 5-14	嵌岩桩的侧向受荷特性	96
表 6-1	不同规范建议的设计参数	101
表 6-2	实例 1 计算结果	102
表 6-3	实例 2 计算结果	103
表 6-4	M_{ult} 的计算过程	105
表 6-5	考虑桩结构非线性计算桩顶位移	105
表 6-6	土体和岩石中桩基非线性分析时桩的计算参数.....	108
表 6-7	砂土的计算参数	108
表 6-8	砂土中桩的 M_{ult} 计算.....	108
表 6-9	桩 B7 非线性性状的预测.....	110
表 6-10	桩 P7 非线性性状的预测	110
表 6-11	粘土特性参数	116
表 6-12	桩 D 非线性性状的预测	118
表 6-13	桩 E 非线性性状的预测	119
表 6-14	岩石特性参数	120
表 6-15	嵌岩桩的特性参数	120
表 6-16	用于预测桩基性状的其他参数	120
表 6-17	San Francisco 试验实例中 M_{ult} 的计算.....	122

表 6-18	Islamorada 试验实例中 M_{ult} 的计算.....	124
表 7-1	并联排桩的效率系数 (资料来源 Reese & Van Impe, 2001)	126
表 7-2	串联排桩的效率系数 (资料来源 Reese & Van Impe, 2001)	127
表 7-3	实测的荷载分配系数	129
表 7-4	由试验资料反分析得到的 f_m 值.....	130
表 7-5	前排桩实例分析的桩参数	131
表 7-6	前排桩实例分析的土体参数	131
表 7-7	土体分布与 COM624P 分析时采用的参数 (Brown 等, 2001).....	131
表 7-8	群桩模型试验分析中采用的土体参数.....	137
表 7-9	松砂群桩的预测与实测 η_g 值比较.....	139
表 7-10	3×3 群桩效率系数 η_g 的比较	140
表 7-11	$s_v/d = 4$ 的 3×3 群桩性状再分析.....	140
表 7-12	离心机试验中各桩的 $R (=N_g / P11 \text{ 的 } N_g)$ 值	141
表 8-1	静载钙质砂中侧向受荷桩的 p - y 模型	143
表 8-2	海洋钙质砂中桩的计算参数	146
表 8-3	海洋钙质砂中土的计算参数	146

图表目录

图 1-1	某厂房屋顶坍塌时的情况	1
图 1-2	厂房屋顶坍塌中心	1
图 1-3	厂房屋顶刚架节点破坏图	1
图 1-4	厂房破坏区域及塌落中心位置	1
图 1-5	柱子侧移图(单位: mm).....	2
图 1-6	厂区地层条件.....	2
图 1-7	堆载作用下邻近桩基的侧向受力模式(De Beer, 1977).....	2
图 1-8	受土体引起侧向荷载的侧向受荷桩应用实例.....	3
图 2-1	侧向受荷桩示意图	7
图 2-2	侧向受荷桩单元体受力模型(修改自 Hetenyi, 1946)	7
图 2-3	桩头自由侧向受荷桩性状示意图	9
图 2-4	桩头固定侧向受荷桩性状示意图	10
图 2-5	桩头自由刚性短桩破坏机理 (Fleming 等, 1992; Broms, 1964a, 1964b)	11
图 2-6	桩头自由柔性长桩的破坏机理 (修改自 Fleming 等, 1992; Broms, 1964a, 1964b)	11
图 2-7	桩头固定桩破坏机理 (Fleming 等, 1992; Broms, 1964a, 1964b)	12
图 2-8	无粘性土内摩擦角与相对密度关系 (修改自 Schmertmann, 1978)	13
图 2-9	粘土刚性指数 I_r 与 OCR 和 PI 的关系 (修改自 Duncan & Buchignani, 1976)	14
图 2-10	API 和 U.S.ACE 推荐的砂土 n_h 值.....	17
图 2-11	不同地基反力模量公式的比较	21
图 2-12	桩与位移及应力柱坐标系统 (Sun, 1994)	24
图 2-13	桩土相互作用系统 (Guo & Lee, 2001)	26
图 2-14	土体应力在桩受荷前后的变化 (Reese & Van Impe, 2001)	28
图 2-15	侧向受荷桩各深度处 p - y 曲线与地基反力模量示意图 (Reese & Cox, 1969)	29
图 2-16	简化 p - y 模型	33
图 3-1	弹性、弹塑性有限元分析得到的桩周法向应力分布 (Trochanis 等, 1991b)	34
图 3-2	桩与桩周土体的变形模式 (Kishida 等, 1985)	34

图 3-3	桩周土体破坏机理 (Randolph & Houlsby, 1984)	35
图 3-4	极限状态时的侧向受荷桩的性状	35
图 3-5	R-S LFP 极限抗力折减系数 A	36
图 3-6	R-C LFP 极限抗力折减系数 A	36
图 3-7	砂土 LFP 的比较 ($\gamma_s = 8.0 \text{ kN/m}^3, d = 0.36 \text{ m}$)	40
图 3-8	粘土 LFP 比较 ($d = 0.5 \text{ m}$)	40
图 3-9	典型的锚锭板荷载—变形曲线 (修改自 Neely 等, 1973)	42
图 3-10	砂土中锚锭板 $P_u / \gamma_s A H K p^2$ 与 H^2 / A 的试验与拟合曲线	44
图 3-11	粘土中侧向受拉锚锭板平面分析模型 (Merifield 等, 2001)	46
图 3-12	不考虑 γ_s 时上下限解的拟合及其参数 A_q, β_0 和 n 值与 $\rho d / S_{u0}$ 的关系	47
图 3-13	考虑 γ_s 时下限解的拟合参数 A_q, β_0 和 n 值与 $\rho d / S_{u0}$ 的关系	49
图 3-14	锚锭板极限拉力强度实测与拟合曲线	50
图 4-1	桩头自由长桩的分析模型和荷载传递曲线 (Guo, 2002)	53
图 4-2	桩头固定长桩的分析模型和荷载传递曲线 (Guo, 2004)	53
图 4-3	统一差分法计算桩的性状	57
图 4-4	桩的离散和各点处的理想弹塑性 p - y 曲线	58
图 4-5	极限抗力分布与不同计算模型对桩基性状的影响	66
图 4-6	LFP 和 G_s 值对桩基性状影响的比较	67
图 4-7	桩头约束对桩基性状的影响	68
图 4-8	桩头约束对桩头变形和最大弯矩的影响	69
图 5-1	Mustang 试验的 LFP 与桩基性状	72
图 5-2	$P_t / \gamma_s d^3 \sim d$ 关系	76
图 5-3	$M_{max} / \gamma_s d^4 \sim d$ 关系	76
图 5-4	砂土中桩头自由长桩极限荷载简化计算	77
图 5-5	桩头自由 P_t (或 P_{ult}) / $\gamma_s d^3 \sim n_p$ ($e/d = 0$)	78
图 5-6	桩头自由 P_t (或 P_{ult}) / $\gamma_s d^3 \sim M_{max}$ (或 M_{ult}) / $\gamma_s d^4$	78
图 5-7	砂土中桩头固定长桩极限荷载简化计算	79
图 5-8	桩头固定 P_t (或 P_{ult}) / $\gamma_s d^3 \sim n_p$ ($e/d = 0$)	79
图 5-9	桩头固定 P_t (或 P_{ult}) / $\gamma_s d^3 \sim M_{max}$ (或 M_{ult}) / $\gamma_s d^4$	79
图 5-10	Sabine 试验 LFP 与桩基性状	81

图 5-11	Manor 试验 LFP 与桩基性状.....	82
图 5-12	$P_t/S_u d^2 \sim d$ 关系.....	83
图 5-13	$M_{max}/S_u d^3 \sim d$ 关系.....	83
图 5-14	粘土中桩头自由长桩极限荷载计算简图.....	87
图 5-15	桩头自由 $P_t/S_u d^2 \sim n_p$ ($e/d = 0$).....	88
图 5-16	桩头自由 $P_t/S_u d^2 \sim M_{max}/S_u d^3$ ($e/d = 0$).....	88
图 5-17	粘土中桩头固定长桩极限荷载简化计算.....	89
图 5-18	桩头固定 $P_t/S_u d^2 \sim n_p$ ($e/d = 0$).....	89
图 5-19	桩头固定 $P_t/S_u d^2 \sim M_{max}/S_u d^3$ ($e/d = 0$).....	89
图 5-20	Kansas 砂质页岩中嵌岩桩的性状.....	93
图 5-21	Kansas 砂质页岩中嵌岩桩的 LFP.....	94
图 6-1	简化矩形应力块模型.....	100
图 6-2	开裂后抗弯刚度降低对桩性状的影响.....	104
图 6-3	桩的结构示意图(未按比例).....	106
图 6-4	桩的线性分析和非线性分析比较.....	106
图 6-5	桩 B7 和 P7 结构组成与钢筋布置图.....	107
图 6-6	桩 B7 的实测与拟合 LFP.....	109
图 6-7	桩 B7 实测计算 $P_t - y_t$ 曲线的比较.....	109
图 6-8	桩 B7 的实测与计算 $P_t - M_{max}$ 曲线.....	109
图 6-9	桩 B7 的 $E_p I_p \sim M_{max}$ 关系.....	109
图 6-10	桩 P7 的实测与拟合 LFP.....	111
图 6-11	桩 P7 实测与计算 $P_t - y_t$ 曲线的比较.....	111
图 6-12	桩 P7 实测与计算 $P_t - M_{max}$ 曲线.....	111
图 6-13	桩 P7 的 $E_p I_p \sim M_{max}$ 关系.....	111
图 6-14	桩 P1 的实测与拟合 LFP.....	112
图 6-15	桩 P1 的实测与计算 $P_t - y_t$ 曲线.....	112
图 6-16	桩 P1 的实测与计算 $P_t - M_{max}$ 曲线.....	112
图 6-17	桩 P1 的 $E_p I_p \sim M_{max}$ 关系.....	112
图 6-18	桩 DB1 主方向加载的 LFP.....	114
图 6-19	桩 DB1 主方向加载实测与计算 $P_t - y_t$ 曲线.....	114