

负摩阻力基桩的 理论与工程应用

FUMOZULI JIZHUANG DE
LILUN YANJIU YU GONGCHENG YINGYONG

● 夏力农 著

地质出版社

负摩阻力基桩的理论 研究与工程应用

夏力农 著

地 质 工 程 学 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书较全面地介绍了作者在基桩负摩阻力方面的研究成果。介绍了基桩负摩阻力的理论研究、现场试验和数值模拟方面取得的新进展,指出了现行的负摩阻力基桩设计和承载力检测评价方面存在的不足。修正了 Fellenius B. H. 提出的负摩阻力计算的图解法,以基桩的荷载-沉降试验曲线为基础,提出了基于沉降控制的负摩阻力基桩承载力计算的逐次逼近图解法并提供了算例。书中还对地下水位下降引起的复合地基承载性状的变化做了初步分析。

本书可供土木工程师和科研人员在负摩阻力基桩研究和设计时参考,也可作为土木工程类专业研究生的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

负摩阻力基桩的理论研究与工程应用/夏力农著.

—北京:地质出版社,2011.5

ISBN 978-7-116-07206-0

I. ①负… II. ①夏… III. ①负摩擦力:桩端阻力—研究 IV. ①TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 074239 号

责任编辑:蔡卫东 王 超

责任校对:李 玫

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

咨询电话:(010) 82324508 (邮购部);(010) 82324571 (编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京天成印务有限责任公司

开 本:787 mm×960 mm^{1/16}

印 张:11

字 数:200 千字

印 数:1—1200 册

版 次:2011 年 5 月北京第 1 版

印 次:2011 年 5 月北京第 1 次印刷

定 价:40.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-07206-0

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

在 20 世纪 30 年代，荷兰沿海一带出现了一些采用桩基础的建筑物因沉降（不均匀沉降）原因引起开裂而无法使用。Terzaghi K. 和 Peck R. B. 通过调查研究发现，桩周欠固结土体的沉降大于桩基沉降时，桩土界面的摩阻力不仅不能提供常规的正摩阻力，反而会出现与荷载作用方向相同的摩阻力。在此研究的基础上，他们第一次提出了“负摩阻力”概念。从此，基桩的负摩阻力一直是岩土工程师关注的热点课题。

负摩阻力的不利影响主要是使桩基础沉降增加、降低基桩承载力和减小桩身强度的安全储备。

基桩出现负摩阻力的基本条件是桩周土体沉降大于基桩沉降。这样的环境条件主要有：①当桩身穿过欠固结的土层，桩周土体因固结而产生的沉降大于桩的沉降时；②桩设置在受自重作用而完全固结的软粘土地基中，但当桩周土体受到大面积的地面荷载作用而大量下沉时；③在正常固结粘土或粉土地基中，当桩周土层因地下水位下降，上覆土自重增大及土中的有效应力增加导致桩周土体下沉时；④桩设置在易受环境影响而沉陷或重新固结而大量下沉的地层（自重湿陷性黄土、季节性冻土层或可液化土层）的地基中，当受水浸湿、溶化或受振液化导致地基土大量下沉时。

尽管国内外对负摩阻力基桩的桩土相互作用机理的研究持续了约 80 年，但其中许多问题还有待进一步的研究。现行的负摩阻力基桩设计与承载力检测方法也存在着诸多不合理的因素。

本书在国内外研究成果的基础上，通过理论分析、现场试验和数值模拟分析相结合的方法进行研究，对基桩的负摩阻力性状有了更全面和深入的认识。在对国内外设计与检测方法进行分析研究的基础上，提出了新的负摩阻力基桩设计与承载力检测方法。复合地基中加固桩体在长期使用条件下，极易因为桩周软土出现沉降而使得使用条件与计算时的假定之间出现较大差距，主要的问题也是加

固桩体中的负摩阻力而使得复合地基沉降增加,承载力下降。本书对桩周土体沉降条件下的复合地基性状做了粗略的分析。

本书针对负摩阻力桩和复合地基中加固桩体的负摩阻力开展研究工作,取得了以下主要成果:

(1) 分析桩基负摩阻力发生的实际加载过程,将加载次序分为桩顶荷载施加之后再出现负摩阻力和出现负摩阻力之后再施加桩顶荷载两种情况。在此基础上,首次提出考虑桩顶荷载及加载次序的负摩阻力桩的剪切荷载传递分析的解析方法。通过与有限元分析结果的对比,证明考虑加载次序的分析在理论上是可靠的,也是可行的。

(2) 无论是本书的解析分析方法结果,还是现场试验和有限元分析结果均得到了桩的负摩阻力随着桩顶荷载和土体固结时间变化的规律:①无桩顶荷载作用时,沉降最小、中性点位置最低的,下拽力最大;有桩顶荷载作用时,沉降明显增加、中性点的位置明显上升,下拽力减小。而且随着桩顶荷载的增加,这些指标的差距加大。②在土体固结初期,有桩顶荷载桩的中性点位置呈现由浅到深的变化,无荷载桩的中性点由较深的位置向较浅的位置变化。与无桩顶荷载时比较,桩顶荷载的作用推迟了负摩阻力出现的时间。

(3) 通过有限元分析,对影响负摩阻力桩特性的加载次序、桩身材料弹性模量等因素做了进一步分析研究。同时,还对端承桩的负摩阻力特性进行了研究,得到了一些负摩阻力桩基的荷载传递规律:①不同的加载次序会带来不同的结果,负摩阻力先出现时,中性点的位置比较低,桩基沉降比较小。这种差距随着桩顶荷载的增加而加大。负摩阻力先出现时,下拽力小于桩顶荷载先施加的情况,这种差距随着桩顶荷载的增加而增大。②桩身材料的弹性模量也是影响负摩阻力特性的重要因素。桩体材料弹性模量存在一个临界值,当桩体材料模量大于此值时,负摩阻力特性与常规桩相同。桩体材料模量小于此值时,桩身压缩变形增大,桩顶位移和桩端位移会有很明显的差异,会造成中性点位置上移,桩身中最大附加应力降低。③桩顶荷载的作用同样会使得端承桩的负摩阻力特性改变,而不是以往认为的基本不变。与无桩顶荷载时相比,荷载的作用使得端承桩的沉降增加、下拽力减小、中性点位置上升。随着荷载的增加,

负摩阻力特性的差距就越大。

(4) 在负摩阻力基桩理论研究和对国内外负摩阻力基桩设计方法研究的基础上,对负摩阻力基桩的设计和检测方法做了深入研究。体现如下:①提出了在控制沉降条件下,在一定的桩顶荷载作用下,负摩阻力基桩承载力分析的逐次逼近图解法。这种方法运用逐次逼近模拟桩-土的相互作用过程,克服了国内外现有设计方法存在的概念含糊,使用不方便的缺陷,可以用于工程实践解决负摩阻力基桩的承载力设计取值的问题。②分析了常用的现行基桩承载力检测评价方法,找出了其无法评价负摩阻力基桩承载力的原因,并指出现行方法是造成负摩阻力承载力评价不安全的隐患。首次提出了负摩阻力基桩承载力检测评价应当与其工作环境相适应,应当对静载试压和使用阶段分别取值,以满足承载力检测和使用阶段不同的技术要求。负摩阻力基桩承载力应当取以下两个值:一个是与承载力检测相适应的值,用于负摩阻力基桩的承载力评价;另一个是与基桩长期工作环境相适应的值,用于负摩阻力基桩的桩基础设计。

(5) 在国内外研究的基础上,首次提出了与桩土相互作用条件相适应的负摩阻力基桩的承载力设计方法和检测评价方法。具体如下:①针对负摩阻力基桩在承载力检测过程与长期使用阶段桩土相互作用的明显差异,提出了负摩阻力基桩承载力检测和评价应当与其桩土相互作用条件相适应的观点。②提出了在控制沉降的前提下,考虑桩顶荷载作用的负摩阻力基桩承载力计算的逐次逼近图解法。逐次逼近的过程与负摩阻力基桩的桩土相互作用的过程十分接近,图解法概念清晰,应用方便,结果合理。③与常规基桩承载力检测不同,对于负摩阻力基桩的承载力评价,应当取两个适应不同使用条件的承载力值。一个是与承载力检测过程相适应的值。这个承载力值不考虑负摩阻力的作用,与常规基桩承载力检测评价相同。这个值用做负摩阻力基桩承载力分析的基础,也是对岩土参数的再一次检验。另一个值是在第一次承载力值基础上,考虑桩顶荷载和负摩阻力的作用,通过图解法分析得到的承载力。这个值作为桩基础设计中的负摩阻力基桩的设计承载力值。

(6) 采用有限元法分析了复合地基中加固桩体在地下水位下降后的负摩阻力特性。地下水位下降后,复合地基中加固桩体的负摩

阻力比降水前明显增大，加固桩体和基础沉降增大，加固桩体的轴力增加，桩-土应力比提高。在地下水位下降条件下，带褥垫层复合地基和无褥垫层复合地基均表现相似的变化。在复合地基中，地下水位下降引起的加固桩体中负摩阻力的不利影响比正常使用时负摩阻力的影响大得多。

本书主要是在作者博士论文的基本框架基础上，结合新近对于负摩阻力基桩的设计与承载力检测方法的研究完成的。在本书撰写过程中，得到了作者的导师王星华教授的悉心指导。此外，在著书过程中，苗云东和谈铁强做了大量的工作，另外，还借鉴了国内外专家的研究成果，得到了许多同志的帮助。在此谨向所有支持和帮助我的老师、朋友致以诚挚的谢意！

本书可供工程一线的技术人员和管理人员阅读，还可供高等院校土木工程类专业师生及相关科研设计机构的科研、设计和检测方面的人员参考。

限于作者水平，书中难免存在不当之处，恳请读者批评指正，不吝赐教！

夏力农

2011年3月于长沙

目 录

前 言

第 1 章 绪论	(1)
1.1 桩基础发展概述	(1)
1.2 负摩阻力问题的国内外研究现状	(3)
1.2.1 桩的负摩阻力课题	(3)
1.2.2 复合地基中的负摩阻力课题	(9)
1.3 存在的问题	(10)
1.4 研究的目的与意义	(11)
1.5 本课题研究的主要内容和方法	(12)
第 2 章 承受竖向荷载负摩阻力桩的现场试验研究	(14)
2.1 概述	(14)
2.2 负摩阻力桩试验综述	(15)
2.3 不同桩顶荷载作用下桩负摩阻力试验	(19)
2.3.1 试验场地及工程地质条件	(20)
2.3.2 试验桩设计与施工	(21)
2.3.3 测试仪器与测点布置	(24)
2.4 影响测试结果的诸因素	(26)
2.4.1 桩身中的初始应力	(26)
2.4.2 地面堆载和地下水位下降产生的负摩阻力的差异	(27)
2.5 试验结果与分析	(28)
2.5.1 不同荷载作用下负摩阻力及沉降测试结果	(28)
2.5.2 堆载后不同荷载作用下桩身应力随时间的变化	(33)
2.6 本章小结	(38)
第 3 章 负摩阻力单桩荷载传递规律的理论分析	(40)
3.1 概述	(40)
3.2 地面堆载和桩顶荷载共同作用下的桩荷载传递分析	(41)
3.2.1 竖向荷载作用下单桩的荷载传递规律	(42)
3.2.2 地面堆载条件下的桩负摩阻力特性分析	(44)
3.2.3 堆载和桩顶荷载共同作用下的负摩阻力桩荷载传递分析	(46)
3.2.4 单桩弹性微分方程的数值解	(51)

3.2.5 与有限元分析结果的对比	(51)
3.3 影响荷载传递规律的因素分析	(53)
3.3.1 桩顶荷载的影响	(53)
3.3.2 桩身长度的影响	(55)
3.3.3 固结度的影响	(56)
3.4 本章小结	(58)
3.4.1 堆载和桩顶荷载共同作用下的负摩阻力桩荷载传递分析	(59)
3.4.2 影响负摩阻力桩荷载传递的因素分析	(59)
第4章 单桩负摩阻力特性的有限元分析	(61)
4.1 概述	(61)
4.2 弹塑性有限元分析基本原理	(62)
4.2.1 Mohr-Coulomb 屈服准则	(62)
4.2.2 Biot 固结理论	(63)
4.3 影响负摩阻力诸因素的有限元分析	(65)
4.3.1 桩顶荷载的影响	(66)
4.3.2 加载次序的影响	(70)
4.3.3 桩-土相对刚度的影响	(75)
4.3.4 负摩阻力特性随固结时间的发展	(81)
4.3.5 端承桩的负摩阻力特性	(86)
4.3.6 有限元分析与试验结果的比较	(90)
4.4 本章小节	(92)
4.4.1 桩顶荷载的影响	(92)
4.4.2 加载次序的影响	(92)
4.4.3 桩-土相对刚度的影响	(93)
4.4.4 负摩阻力特性随着固结时间的发展	(94)
4.4.5 端承桩的负摩阻力特性	(94)
第5章 负摩阻力基桩承载力的设计与检测	(95)
5.1 概述	(95)
5.2 现行负摩阻力计算方法存在的不足	(97)
5.2.1 《建筑桩基技术规范》中负摩阻力计算方法存在的不足	(98)
5.2.2 美国公路与交通协会 (AASHTO) 规范中负摩阻力计算方法存在的不足	(101)
5.3 基桩负摩阻力桩的计算与设计	(103)
5.3.1 确定负摩阻力基桩承载力的方法之一: 图解法	(105)
5.3.2 确定负摩阻力基桩承载力的方法之二: 解析法	(110)

5.3.3 负摩阻力基桩承载力验算算例	(110)
5.4 负摩阻力桩承载力检测方法	(115)
5.4.1 在湿陷性黄土地区基桩的承载力检测	(116)
5.4.2 现行的规范规程中关于负摩阻力基桩承载力检测规定的不足	(119)
5.4.3 负摩阻力基桩承载力检测实例	(123)
5.5 负摩阻力基桩承载力设计与检测的协调	(126)
5.6 本章小节	(127)
第6章 复合地基中桩体负摩阻力特性的有限元分析	(128)
6.1 概述	(128)
6.1.1 复合地基的定义与分类	(128)
6.1.2 复合地基的荷载传递特点	(129)
6.1.3 复合地基中的负摩阻力	(130)
6.2 复合地基的荷载传递特性	(131)
6.2.1 桩-土体系处于弹性变形状态	(133)
6.2.2 桩-土体系处于弹塑性变形状态	(135)
6.3 地下水位下降时有褥垫层复合地基中桩体负摩阻力特性分析	(136)
6.3.1 沉降特性的变化	(137)
6.3.2 中性点位置变化	(139)
6.3.3 桩身负摩阻力分布	(142)
6.4 地下水位下降时无褥垫层复合地基中桩体负摩阻力特性分析	(146)
6.4.1 沉降特性对比	(148)
6.4.2 中性点位置变化	(148)
6.4.3 桩身负摩阻力分布	(151)
6.5 本章小节	(154)
6.5.1 地下水位下降时有褥垫层复合地基的负摩阻力特性	(154)
6.5.2 地下水位下降时无褥垫层复合地基的负摩阻力特性	(155)
第7章 结论与展望	(156)
7.1 本书研究工作的总结	(156)
7.2 对今后研究工作的展望	(158)
参考文献	(160)

第1章 绪 论

1.1 桩基础发展概述

桩基础作为一种深基础，其作用是将上部结构荷载通过桩身传到地基深部强度较高、压缩性较小的岩（土）层上，从而提高基础的承载能力并减小基础沉降和不均匀沉降。由于桩基础具有承载力高、稳定性好、沉降变形小及抗震性强等优点，很早就被人类所认识和利用，是人类历史上在土木工程中最早使用的深基础之一。

有文献资料表明，在人类有历史记载以前，就已经在地基土条件不良的河谷及洪积地区采用桩基础来建造房屋。在许多不同地区、不同文化时期的初期，都可以找到桩基础的房屋。1982年在智利发掘的文化遗址所见到的桩，距今大约有12000~14000年。根据历史文物遗址的发掘研究揭示，我国最早的桩基础距今大约有7000多年，是在浙江宁波附近的河姆渡，作为古代干阑式木结构建筑的基础——由圆木桩、方木桩和板桩组成的桩基础。圆木桩直径在6~8 cm之间，板桩厚2.4~4.0 cm，宽10~50 cm，木桩均系下部削尖，入土深度最深达115 cm。这是我国最早的桩的雏形。桩基础用于桥梁，历史也极为悠久。据《水经注》记载，公元前532年在今山西汾水上建成的30墩柱木柱梁桥，即为桩柱式桥墩。我国秦代的渭桥、隋朝的郑州超化寺、五代的杭州湾大海堤、南京的石头城和上海的龙华塔等，都是我国古代桩基础的典范。

随着国民经济的快速发展，高层建筑越来越普遍，桩基础作为建筑物基础也更加普遍。尤其在软土地区和超高层建筑中，桩基础（包括以桩为主的基础）是主要的基础形式。已经建成的上海88层、高达420.5 m的金茂大厦所采用的桩基础入土深度超过80 m；在建的94层、高460 m的上海环球金融中心也是采用桩基础。

表1.1给出了桩基技术发展历史的简要概括。从中可见，桩基技术的内涵是如此的丰富，本书显然不能介绍桩基技术发展历史的全貌，主要从以下几个方面研究桩基技术发展的历史过程：

（1）桩基技术的发展受新型材料发展的影响极大。人类早期使用的天然材料桩（木桩），与当时的技术发展水平有关，更主要还是受到了材料的限制。随着人们认识自然、改造自然水平的提高，各种新型材料的出现（水泥的

表 1.1 桩基技术的发展历史阶段

阶段	年代	主要桩型	特点
初期阶段	人类有历史记载以前（我国 7000 多年前）至 19 世纪	木桩 石桩	(1) 由天然材料制作而成，桩身较短，桩径小； (2) 桩竖直设置，主要用于传递竖向荷载； (3) 多设置于地基条件不良的河谷及洪积地区； (4) 采用简单人工锤打沉桩
发展阶段	19 世纪中叶至 20 世纪 20 年代	除天然材料做成的桩外，主要是混凝土桩和钢筋混凝土桩	(1) 受水泥工业出现及其发展的影响； (2) 桩型不多，开始使用打桩机械沉桩； (3) 桩基设计理论和施工技术比较简单，处于“萌芽”阶段； (4) 桩身尺寸有所扩大，桩径约 30 cm，桩长 9 ~ 15 m； (5) 土力学的建立为桩基技术的发展提供了理论基础
现代化阶段	第二次世界大战后至现在	除钢筋混凝土桩外，发展了一系列的桩系，如钢桩系列、水泥土系列、特种桩（超高强度、超大直径、变截面等）系列，以及天然材料的砂桩、灰土桩和石灰桩等	(1) 发展了众多的新型的桩型，形成现代桩基的各种不同体系； (2) 桩基技术和理论引进了其他学科的先进的研究成果，大大地拓宽了它的研究领域和深度，桩的应用范围大大扩展； (3) 人工沉桩被复杂的机械和专门化的工艺代替

问世、钢铁工业的发展和化学工业的崛起），都使桩基技术及其应用形成了一个独特的时期或阶段。20 世纪 20 年代，美国开始采用各种形式的钢桩。20 世纪 30 年代，随着混凝土和钢筋混凝土的发展，世界上出现了钢筋混凝土沉管灌注桩。第二次世界大战以后，美国和日本为了建造石油钻井平台和海港建筑等海洋结构物，开始采用大直径钢管桩和钢筋混凝土钻孔灌注桩。而且，由于某一地区或国家的历史及环境背景，往往出现古老的桩型和现代化的桩型同时共存，例如，至今在我国某些地区和工程中仍有使用木桩的情况。

(2) 施工技术的发展是桩基技术发展的重要方面。由于材料的不断更新和发展，与之相适应的机械工业的发展使得施工工艺及桩型不断推陈出新，而桩基理论的研究也为桩基技术的发展提供了保证。随着桩基理论、新材料和施

工技术与工艺的不断进步，在桩基的设计理论和概念上，在桩的使用上，都产生了许多实质性的变化，桩的应用及成桩工艺比过去更为多样化和复杂化，特别是在桩基的设计和施工领域中提出了许多新的概念。例如，桩土共同承担荷载的桩体复合地基、塑性支承桩概念、复合桩基理论以及桩基逆作法、热加固体成桩等。在桩的应用上，除了承受竖向荷载外，还用以承受斜向的甚至是水平向的荷载。

(3) 随着桩基理论研究的进步和桩基技术的改良，桩已经不只是单独地作为一种基础形式应用。在许多情况下，它与其他的基础形式或工艺联合应用，例如，化学灌浆排桩联合护壁等，用以适应上部建筑的超重荷载、深基坑开挖等的需要和桩锚技术在支挡结构中的应用等。这为桩基技术的发展提供了非常广阔的空间。此外，桩的发展趋势表明，桩身的超高强度、大直径、超长度、无公害沉桩工艺，以及更加完美的施工控制技术等已经成为未来桩基改良和发展的主要内容。

桩基础通常作为荷载较大的结构（建筑）物的基础，具有便于机械化施工、适应性强等特点。在下述情况下，一般可考虑选用桩基础或者复合地基方案：①地基上层土的土质太差而下层土的土质较好，或地基土软硬不均，或荷载不均，不能满足上部结构对不均匀变形限制的要求；②地基软弱或地基土性特殊，如存在较深厚的软土、可液化土层、自重湿陷性黄土、膨胀土及季节性冻土等，采用其他地基改良和加固措施不合适；③除承受较大竖向荷载外，尚有较大的偏心荷载、水平荷载、动力或周期性荷载作用；④上部结构对基础的不均匀沉降相当敏感，或建筑物受到大面积地面超载的影响；⑤地下水位很高，采用其他基础形式施工困难，或位于水中的构筑物基础，如桥梁、码头、采油平台等；⑥需要长期保存、具有重要历史意义的建筑物。

通常，当软弱土层很厚，桩端达不到良好地层时，桩基设计时不仅要考虑承载力，还应考虑基础沉降（不均匀沉降）问题。目前，桩基设计思想正在由过去单纯的承载力控制向承载力和变形双指标控制过渡，按地基容许沉降量大小设计桩基的思想正在逐步得到推广。

1.2 负摩阻力问题的国内外研究现状

1.2.1 桩的负摩阻力课题

20 世纪 30 年代，在荷兰沿海一带出现了一些采用桩基础的建筑物因沉降（不均匀沉降）原因引起开裂而无法使用的现象，其中，有些桩的设计承载力高出实际使用荷载的若干倍。按照当时的桩基础设计理论无法解释这种现象，也无法找出出现事故的原因。为了解决这个问题，Terzaghi K. 和 Peck R. B. 通

过调查研究发现，桩周欠固结土体的沉降大于桩基沉降时，桩土界面的摩阻力不仅不能提供常规的正摩阻力，反而会出现与荷载作用方向相同的摩阻力，这个摩阻力会增加实际作用在桩上的荷载。这种方向向下的摩阻力正是造成上述基础失效的主要原因。在此研究的基础上，他们第一次提出了桩基的“负摩阻力”概念。

在一般情况下，承受负摩阻力的桩只是桩身的上部部分桩周土体沉降大于桩身沉降，因而只有一段桩身作用有负摩阻力的。桩周土体的沉降是相对独立的，一般是因为地面堆载、地下水位下降和欠固结土体的固结沉降等原因引起的。负摩阻力作用的长度取决于桩侧土层的欠固结度和欠固结层的厚度、桩底持力层的刚度、沉桩后外部条件的变化、桩的长径比和截面、刚度等条件。在同一根桩上由负摩阻力过渡到正摩阻力存在一个摩阻力为零的断面，该断面上的点称之为中性点，它是摩阻力、桩土相对位移、桩轴向压力和下拉荷载沿桩身变化的特征点。在桩身的中性点以上，土体的沉降大于桩的位移；在中性点以下，土体的沉降小于桩的位移；而在中性点位置，土体的沉降和桩的位移相等。因而在中性点以上，桩周作用着方向向下的负摩阻力作用，桩身轴向压力随深度递增；而在中性点以下，桩周作用着方向向上的正摩阻力作用，桩轴向压力随深度递减；在中性点位置处，作用于桩的表面摩阻力为零，这个位置的桩身轴向压力最大（图 1.1）。

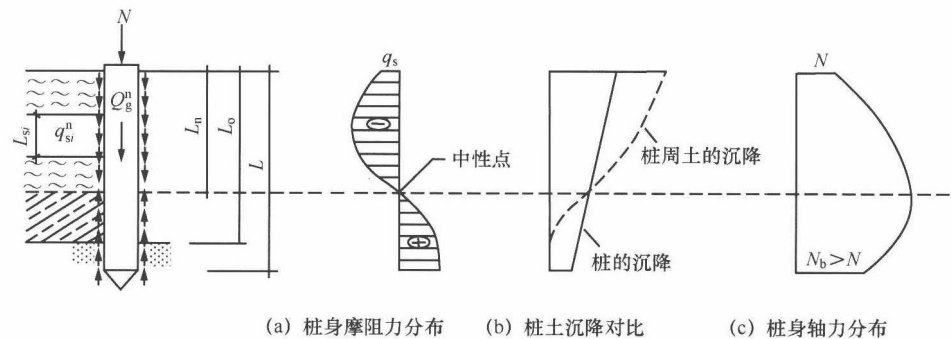


图 1.1 基桩负摩阻力特性示意图

N —桩顶荷载； Q_g^n —负摩阻力引起的下拉荷载； q_{si}^n —第 i 层土桩侧负摩阻力标准值； L —桩的全长；

L_{si} —第 i 层土的厚度； L_n —自桩顶算起的中性点深度； L_0 —自桩顶算起的桩周沉降变形

土层下限深度； q_s —桩身摩阻力； N_b —桩端轴力

基桩桩侧出现负摩阻力的环境条件主要有：①当桩身穿过欠固结的土层（河口与海岸的新沉积土层或松散填土）而支承于较硬土层中，桩周土体因固结而产生的沉降大于桩的沉降时；②桩设置在受自重作用而完全固结的软粘土

地基中，但当桩周地面受到大面积的地面荷载（堆载或码头后方的快速吹填）作用而大量下沉时；③在正常固结粘土或粉土地基中，当桩周土层因抽水或其他原因导致大面积地下水位下降，上覆土自重增大及土中的有效应力增加以致大范围内出现地区性下沉时；④桩设置在易受环境影响（浸水、解冻、动力振动或地震等）而沉陷或重新固结引起大幅度下沉的地层（自重湿陷性黄土、季节性冻土层或可液化土层）的地基中，当受水浸湿、溶化或受振液化导致地基土幅度下沉时；⑤在采用打桩法或者振动沉桩的桩基中，由于桩身上段在压力解除后将会产生向上的回弹，此一回弹作用将使桩周土体产生负摩阻力，此一负摩阻力虽可由桩身下段的正摩阻力所抵消而不致引起桩工作状态的异常，但在桩正式承载时将会使桩的承载力有所降低。

负摩阻力的不利影响主要是降低桩基承载力、使桩基础沉降增加和减小桩身强度的安全储备。当桩周出现负摩阻力时，中性点以上部分不仅不能提供荷载抗力，还会增加作用于桩身的荷载总量。这样既减少了提供正摩阻力的桩周面积，减小了桩侧正摩阻力的总量，又额外增加了桩基荷载。与常规基桩相比，负摩阻力从这两个方面使桩基承载力下降。作用于桩侧表面的总负摩擦力（下拉荷载）会使桩的负荷增大。这可能引起三个方面的问题：一是桩基的沉降量加大；二是桩身抗压强度的安全度下降，严重的会出现桩身受压破坏；三是桩身的最大轴力位置下移，桩身的最大轴力不在桩顶，而是出现在中性点的位置，这一点与常规桩基最大轴力出现在桩顶不同，也需要在桩身强度的设计中给予重视。

在 20 世纪 30 年代，荷兰沿海桩基础由于负摩阻力的原因导致建筑物失效之后，国外学者工程师在桩基负摩阻力研究方面做了很多工作，取得了许多成果，但是负摩阻力基桩的桩-土相互作用问题是极其复杂的，仍然有很多问题值得我们做进一步深入研究。直到现在，基桩负摩阻力问题的研究仍然是国内外桩基础的研究热点课题之一。国内外对于负摩阻力基桩的研究主要是从理论研究和试验研究两个方面进行的。

在理论研究方面：Poorooshasb H. B. 和 Bozozuk M. 于 1967 年采用线性协调方法分析了承受负摩阻力桩总体上力的平衡，提出了平衡方程。作者本人后来认为线性假定过于简单，研究结果实用价值不大。Poulos H. G. 和 Davis E. H. , Kuwabara F. 和 Poulos H. G. , Chow Y. K. , Chin J. T. 和 Lee S. L. , 以及 Lim C. H. , Chow Y. K. 和 Karunaratne G. P. 等根据力的平衡原理对负摩阻力桩做了分析，而 Poorooshasb H. B. , Alamgir M. 和 Miura N. 根据变形协调的几何条件，得到了地面堆载条件下桩的平衡方程，以此为基础，可以分析桩基的负摩阻力特性。

1969 年，Poulos H. G. 和 Mattes 基于 Mindlin 解，提出了弹性理论计算负

摩阻力的方法。弹性理论分析方法最基本的原理是把桩分为若干单元，在土满足弹性条件下，每个单元处桩土位移相等，从而获得沿桩身分布的剪应力。其中土体任意点的竖向位移来自两个方面，即沿桩身的剪应力及土层的固结。桩-土-桩相互作用是基于半无限弹性空间内部一点荷载的 Mindlin 解。在计算刚性持力层上端承单桩的最终负摩阻力时，假定桩长范围内土体固结产生的位移沿深度呈线性衰减，且桩端处土体位移为零。在这一方法中，为了满足桩尖边界条件，采用了镜像单元（mirror-image element）的处理手段，该方法仅适用于端承桩。1972 年，他们在上述方法的基础上，根据太沙基一维固结理论导出了单桩负摩阻力与时间的关系。1975 年，他们又用此方法计算了几个实例与原位测试结果进行对比，证实了理论方法的合理性。

1965 年，Johannesson L. J. 和 Bjerrum L. 发现负摩阻力与桩周围土体的有效应力成正比，这就是计算负摩阻力的有效应力法。这种方法公式简单，便于应用，但它基本上属于极限分析法，对桩土相对位移较小的情况，该方法计算所得结果往往偏大。此外，计算涉及的一个重要参数——中性点的位置，往往是用经验的方法确定。后来 Bjerrum L. et al. (1969)，Bozozuk M. (1972) 证实了有效应力法的正确性。Zeevaert L. (1959, 1972) 提出了一种基于有效应力法的负摩阻力计算方法，并在此方法的基础上提供了设计图表。

在试验研究方面：Bjerrum L. et al. (1965, 1969)，Walker L. K. 和 Darvall P. L. (1973)，Endo M. et al. (1969)，Clemente F. M. (1979, 1981)，Bozozuk M. (1981)，Leung et al. (1991) 分别在现场试验中测量了负摩阻力基桩中负摩阻力分布和中性点位置。Fellenius B. H. 和 Broms (1969)，Fellenius B. H. (1972, 1984) 针对基桩负摩阻力沿着桩身的分布、中性点的位置等问题做了试验研究。Endo M. 等测量了桩径为 610 mm、桩长 43 m 的打入式钢桩在没有桩顶荷载作用时的负摩阻力分布和中性点位置，以及桩和桩周土体在 672 d 时间内的沉降及其相应的负摩阻力变化。所有这些试验研究为理论研究提供了依据，推进了负摩阻力基桩理论和实践的发展。

正负摩阻力发挥发展所需要的桩-土相对位移对于负摩阻力基桩的研究具有重要的意义。对于负摩阻力发挥所需要的位移量国外也做了一些研究。Walker L. K.，Darvall P. L. (1973) 的试验表明，单桩周围 3 m 高的地面堆载在地面产生的 35 mm 沉降能够使负摩阻力发展到地下 18 m 的位置。遗憾的是，没有测量土体沉降沿着深度的变化。Bjerin L. (1977)，Bozozuk M. (1981) 也在这方面做了试验研究，得到了相近的结果。他们的试验结果都表明，只需要很小的桩土相对位移负摩阻力就会出现。在无桩顶荷载作用的情况下，很小的土体沉降就能在桩身中产生负摩阻力。

对于长桩而言，负摩阻力引起的下拉荷载可能大到影响桩身强度。Johan-

neson L. J. , Bjerrum L. 1965 年的试验发现, 不仅在有 2 m 新近填土的场地上沿着桩身存在负摩阻力, 在相距不远处的试验场地上, 同样深度的 70 年的老填土, 同样的土层分布, 在施工工艺相同的桩上也测量到了与新填土作用下大小几乎相同的负摩阻力, 而后者在桩施工完毕之后并没有发现土体新的沉降。Bjerrum L. et al. (1969) 测量到桩径为 500 mm, 穿过 50 m 土层嵌入基岩的钢桩在新近地面堆载的作用下产生的负摩阻力, 负摩阻力引起了高达 4000 kN 的下拉荷载。Bozozuk M. 于 1972 年所做的基桩负摩阻力的试验中, 在桩身测量到超过正常使用状况下作用在桩顶允许荷载的下拉力。

由于负摩阻力引起的下拉力对于基桩的不利影响很大, 人们开始研究如何减小负摩阻力的不利影响。在中性点以上部分桩周涂刷沥青可以明显减小负摩阻力值。Bjerrum L. et al. (1969) 通过对比试验研究了桩身涂刷沥青涂层可以减小负摩阻力的效率问题, 认为沥青涂层能够大幅度地减小负摩阻力值。Walker L. K. 和 Darvall P. L. (1973) 比较了钢桩桩身涂刷沥青涂层和没有涂刷沥青涂层条件下负摩阻力分布的差异 (图 1.2)。Clemente F. M. (1981) 比较了混凝土桩桩身涂刷沥青涂层和没有涂刷沥青涂层条件下的下拉力的变化。Fellenius B. H. (1972, 1984) 以试验为基础并结合其他试验成果对用于减小负摩阻力的桩身涂刷沥青涂层的实用方面的一些问题做了研究。

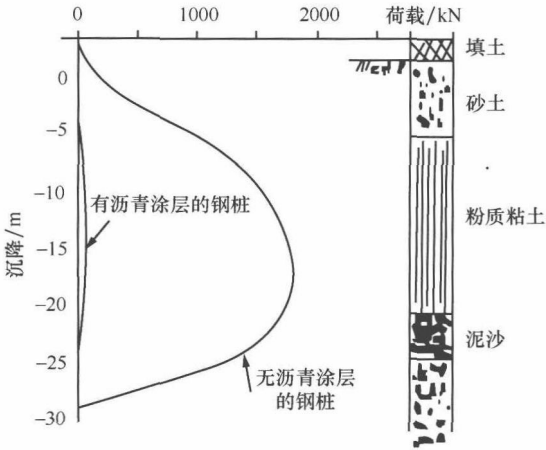


图 1.2 有无沥青涂层的负摩阻力对比

根据现场测试结果, 人们对于负摩阻力随时间发展变化的趋势做了研究。Broms et al. (1969), Fellenius B. H. 报道了桩径为 300 mm 的混凝土打入桩的荷载测试结果。在沉桩完成后不久, 桩中应力很小, 基本上等于桩的自重产生的应力。沉桩之后的黏性土的再固结大约用了 5 个月。在这期间, 桩身负摩阻