

桩—网

复合地基原理及实践

ZHUANG-WANG FUHEDIJI YUANLI JI SHIJIAN

饶为国 著

Zhuang-Wang
Fuhe Diji
Yuanli Ji
Shijian

桩—网复合地基原理及实践

中国博士后科学基金资助项目 (2004035436)

中国地震局地球物理研究所博士后科研资助项目

郑州市公路管理局 2004 科研资助项目

饶为国 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

• 内 容 提 要 •

桩—网复合地基的理论与应用研究可以说是一个较新的有价值的课题。本书将桩—网复合地基作为一个相对独立的地基处理技术体系,进行了较系统的阐述。全书共分六章,给出了桩—网复合地基的定义,揭示了桩—网复合地基的特点和应用前景,分析了桩—网复合地基的组成和协同工作机理,推导了桩—网复合地基桩土应力比计算公式、工后沉降量计算公式,通过实际工程验证了本书提出的计算公式的合理可用性及其所反映规律的正确性。基于“按沉降控制设计”和“疏桩”观点,提出了“路基控制工后沉降的疏桩设计法”,结合算例说明了详细设计步骤和基本施工工艺。

本书可供工程一线的技术人员及有兴趣的管理人员阅读,还可供高等学校土木工程类专业师生及相关科研机构的研发人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

桩—网复合地基原理及实践/饶为国著. —北京:中国水利水电出版社, 2004.6
ISBN 7-5084-2105-1

I. 桩... II. 饶... III. 人工地基—研究
IV. TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 044722 号

书 名	桩—网复合地基原理及实践
作 者	饶为国 著
出版发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心) 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
经 售	
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	850mm×1168mm 32 开本 7 印张 140 千字
版 次	2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0001—3100 册
定 价	25.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有 · 侵权必究

序

人们在征服自然界、从必然王国走向自由王国的过程中，会想出很多办法。譬如，在土木工程中常见的软基处理问题，迄今为止的各式处理方法不下几十种，复合地基就是经常用的方法。然而，传统意义上的复合地基，多为竖直向增强体和水平向增强体这两种基本形式，当这两种基本形式仍然不能满足工程需要时，又促使人们去探索研究开发新的更有效的软基处理技术。

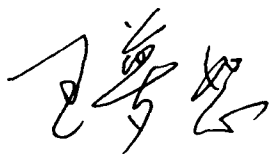
桩—网复合地基便是一种新型的软基处理理论和技术，其基本组成有三大块，即上部加筋土、中间网、下部桩土加固区。它能较充分地调动网、桩、土三者的潜力，协同作用，共同承担荷载；具有桩体、垫层、排水、挤密、加筋、防护等综合效能；具有沉降变形小而且完成快、工后沉降较易控制、稳定性高、不需预压期、工期短、施工方便等优点；具有可布置成疏桩、减少用桩数量，进而大幅度降低工程建设成本的长处。有限的研究和实践表明，桩—网复合地基技术很适合于在天然软土地基上快速修筑铁路、公路、城市道路、长大堤坝、大面积填方类工程，应用前景广阔。

本书系统地阐述了桩—网复合地基的特点和工艺；分析了其组成和协同工作机理；推导出了网、桩、土三者协同作用下两个重要的理论公式，即桩土应力比计算

公式和工后沉降量计算公式，并以实际工程数据加以验证，发现具有很好的规律性；最后提出了“路基控制工后沉降的疏桩设计法”，具有进一步推广应用的价值。

本书的最大特点是理论与实践相结合，而更注重实践操作。通观全书，除了严谨的理论推导与论证外，其细致的工艺描述和详实的现场测量过程，体现了令人亲切的浓烈工地氛围。本书表明作者饶为国博士的深厚理论功底和丰富实践经验。本人现乐于为此书《桩—网复合地基原理及实践》作序，并推荐给有兴趣的广大读者。

中国工程院院士

A stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to the Chinese Academy of Engineering member mentioned in the text.

前 言

桩—网复合地基，是指天然地基在地基处理过程中，下部土体得到竖直向增强体——“桩”的加强从而形成桩土复合地基加固区，而在该区上部得到水平向增强体——“网”的加强从而形成加筋土复合地基加固区，并能使网—桩—土三者协同作用、共同承担荷载的人工地基。

桩—网复合地基具有桩体、垫层、排水、挤密、加筋、防护等综合效能；具有沉降变形小而且完成快、工后沉降较易控制、稳定性高、不需预压期、工期短、施工方便等优点；具有可布置成疏桩、减少用桩数量，进而大幅度降低工程建设成本的长处。桩—网复合地基技术很适合于在天然软土地基上快速修筑铁路、公路、城市道路、长大堤坝、大面积填方类工程，应用前景广阔。

桩—网复合地基的基本组成部分为：①上部路堤填土；②上部网或由网组成的加筋土；③中间砂石褥垫层或由网组成的复合网垫；④下部一般为非刚性桩组成的桩土加固区；⑤最下部的天然软土层或持力层。

桩—网复合地基较传统的复合地基形式而言，是一种新型的地基处理理论与方法，这种复合地基形式相对来讲，目前不仅实际应用不多，而且理论研究更是滞

后,其原因就在于桩—网复合地基的工作机理目前国内尚不十分清楚,既没有现成的设计理论和设计方法,也没有成熟的施工工艺和控制措施,处于边实践应用边摸索总结的状态。但是,其有限的应用却显示出非常良好的技术经济效益,有开展进一步深入研究的巨大价值,从而促使理论及实践工作者对此孜孜以求。有鉴于此,可以说桩—网复合地基的理论探讨与应用研究基本上是一个新课题。

本书针对桩—网复合地基这一新课题开展研究工作,取得了以下主要成果:

(1) 在总结现有工程实践经验和理论研究成果的基础上,给出了桩—网复合地基的定义,揭示了桩—网复合地基的特点和应用前景,分析了桩—网复合地基的组成和协同工作机理,认为桩—网复合地基应是一个独立的地基处理技术体系。

(2) 根据网单元的受力平衡条件、路堤荷载特点及工后沉降机理,提出了桩—网复合地基桩土应力比计算公式;经理论分析发现:当上部荷载增大、桩间距增大、网垫刚度增大、桩间天然地基土承载力减小、工后沉降量减小时,应力比增大;反之则应力比减小。

(3) 基于薄板变形理论和 Winkler 弹性地基模型,提出了桩—网复合地基桩土加固区的工后沉降量计算公式;经理论分析发现:当上部荷载增大、桩间天然地基土刚度(或承载力)减小、桩间距增大、网垫刚度减小时,工后沉降量将增大;反之则工后沉降量减小;而以上部荷载及桩间天然地基土刚度对工后沉降的影响最为

显著，桩间距等因素的影响不甚明显。

(4) 在深圳工地进行了工程现场试验，总结了观测仪器布置和网材铺设的工艺；现场试验结果和另外两个已竣工使用的实际工程，验证了本文提出的桩土应力比、工后沉降量计算公式的合理可用性及其所反映规律的正确性。

(5) 把基于建筑地基的“按沉降控制设计”和“疏桩”观点，推广到路基情形，提出了“路基控制工后沉降的疏桩设计法”，结合算例说明了详细设计步骤。

本书主要是循着作者博士学位论文的基本框架和研究思路并结合博士后的研究工作和干线公路建设实践而著成的。博士学位论文得到了清华大学博士生导师宋二祥教授、中国铁道科学院博士生导师徐祯祥研究员的主审；当然，无可质疑地得到作者的博导——北京交通大学赵成刚教授、中国铁道科学院周神根研究员的精心指导；此外，还得到作者博士后所在设站单位——中国地震局地球物理研究所及合作导师李小军研究员的指导和帮助。

此书的出版得到了郑州市公路管理局李明光、徐大庆等主要领导的大力支持和帮助。

中国工程院王梦恕院士在百忙中为本书作了序，北京交通大学赵成刚教授为本书写了跋。

著书过程中学习、参考了许多专家学者的新成果，另外，还有若干名同志做了必不可少的文字录入、排版、校对、绘图等辅助性工作。

在此谨向他们致以诚挚的谢意！

本书可供工程一线的技术人员及有兴趣的管理人员阅读，还可供高等学校土木工程类专业师生及相关科研机构的研发人员参考。

限于作者水平，书中难免存在不妥乃至错误之处，恳请专家和读者批评指正，不吝赐教。

作 者

2004 年 8 月

目 录

序

前 言

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 桩—网复合地基工程应用进展	3
1.3 桩—网复合地基理论研究进展	10
1.4 本书的研究背景和研究意义	24
1.5 主要工作目标	29
1.6 主要研究手段和方法	30
第二章 桩—网复合地基的组成和协同作用	31
2.1 桩—网复合地基概述	31
2.2 桩—网复合地基的组成	40
2.3 网的含义与基本性状	41
2.4 桩的含义与基本性状	49
2.5 桩—网复合地基的协同作用	67
2.6 小结	80
第三章 桩—网复合地基的沉降机理	81
3.1 工后沉降过程分析	81
3.2 工后总沉降量的构成	85
3.3 应力比分析与计算	86
3.4 工后沉降量的计算	108
3.5 承载力计算	120

3.6 小结	123
第四章 工程现场试验与分析	126
4.1 试验目的和拟测项目	126
4.2 试验方案	127
4.3 工程概况	134
4.4 各种材料性能及其参数测量	141
4.5 应力测量结果与分析	155
4.6 沉降观测结果与分析	166
4.7 小结	174
第五章 桩—网复合地基设计方法	175
5.1 按沉降控制设计理论	175
5.2 疏桩观点	178
5.3 桩—网复合地基设计思想	181
5.4 桩—网复合地基设计步骤	183
5.5 设计注意事项	198
第六章 回顾与总结	200
6.1 基本结论	200
6.2 值得进一步开展的工作	203
符号注释	205
参考文献	207
跋	211

第一章

绪 论

1.1 引言

在工程建设中，当天然地基不能满足结构物对地基的要求而又不能另选其他场地时，就需对天然地基进行处理，形成人工地基，以保证结构物的安全与正常使用。在人工地基中，复合地基已与浅基础（或称均质地基）和桩基础一道，成为工程中常用的三种地基基础型式，形成三分天下有其一的局面，而且由于复合地基良好而独特的技术经济性能，其应用有日益增多的趋势。

复合地基是指天然地基在地基处理过程中部分土体得到增强，或被置换，或在天然地基中设置加筋材料，加固区是由基体（天然地基土体）和增强体两部分组成的人工地基。按目前的概念，复合地基有水平向增强体型和竖直向增强体型这两种型式，见图 1.1 - 1 和图 1.1 - 2。

以上两种型式的复合地基各有其长处和短处，但由于实际工程地质条件的复杂多变性，加上控制地基沉降、保持地基稳定、加快工期、节约投资等其他技术经济因素的制约，只采用其中一种型式往往仍然不能满足

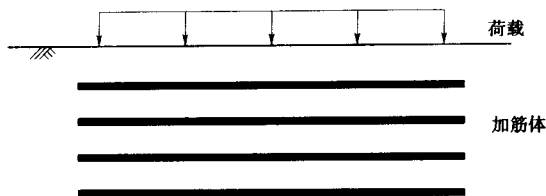


图 1.1-1 水平向增强体复合地基

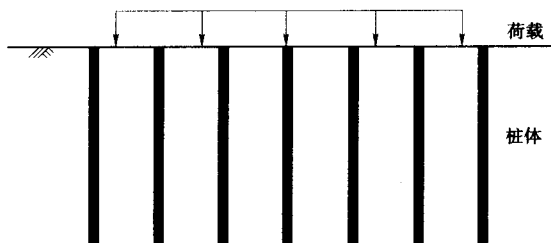


图 1.1-2 竖直向增强体复合地基

要求。在这种情况下，可考虑采用“水平向增强体型+竖直向增强体型”的联合复合地基型式，博采两种单一型式之长，从而取得最佳的技术经济效益。本书将这种联合复合地基型式称为“桩—网复合地基”。国内外曾有过成功应用这种地基型式的工程实例，但由于桩—网复合地基的工作机理十分复杂，人们对其不甚明了，主要靠经验进行设计计算，从而限制了其推广应用，因此与其他地基处理方法相比，实例尚不多见，现有例子多以介绍工法为主，理论分析较少。

鉴于以上分析可知，若按增强体的方向来给复合地基分类，则“桩—网复合地基”显然既不属于“水平向增强体型”，也不属于“竖直向增强体型”，本书认为，

宜将其单独分成一类较为合理。

1.2 桩—网复合地基工程应用进展

1.2.1 在加筋土复合地基方面

1963 年法国工程师亨利·维达尔 (Henri Vidal) 首次提出加筋土 (Reinforced Earth) 的概念, 并提出了土的加筋方法与设计理论, 于 1965 年在法意高速公路法国境内的普拉哥尔斯 (Prageres) 成功地建成了世界第一座加筋土挡墙。加筋土的大量应用和良好效能, 使它获得了像钢筋混凝土一样称之为“造福于人类的复合材料”的评价。维达尔于 1966 年对加筋土技术申请并获得专利权。

此后, 筋材由初期的钢筋、钢带、混凝土、钢筋混凝土等逐渐发展成为抗拉强度高、摩擦系数大、耐腐蚀性强等性能更高的带状、网状、板状土工合成材料 (geosynthetics)、金属材料等产品类型, 其应用也很快由欧洲向日、美等世界各地推广, 日本于 1967 年将加筋土技术取名为“补强土工法”。

真正意义上的土工合成材料是 20 世纪 50 年代末兴起的。在国外, 最初是以土工织物 (geotextile) 和土工膜 (geomembrane) 分别作为用于岩土工程的透水性和不透水性合成纤维材料的总称, 此外还有其他各种名称。由于定义上的不明确和应用上的交织, 加上产品种类越来越多, 在叫法和应用上出现了一定程度的混乱与不便。为此, 1983 年 J.E. Fluet 建议使用“土工合成材

料 (geosynthetics)”一词来概括各种类型的材料, 得到响应和接受, 并被各国规范所采用。

20 世纪 60 年代中期, 我国铁路部门开始研究利用土工合成材料防治翻浆冒泥和包石材料作盲沟排水。20 世纪 80 年代初开始将土工合成材料用于软土地基加固。与此同时, 我国公路部门在公路路基、路面、地基处理等工程中广泛应用土工合成材料进行加筋、排水、护坡等。另外, 水利、电力、建筑、港口等部门和行业开始应用土工合成材料进行有关建筑物和构筑物的设计与施工。1998 年在三江 (长江、松花江、嫩江) 流域抗洪抢险中大显身手, 当年用量超过 4 亿 m^2 , 为世界之最。1984 年成立了全国性的“土工织物科技情报协作网”, 1995 年改名为“中国土工合成材料工程协会 (CTAG)”。目前, 我国经贸、建设、铁路、交通、水利等部门已先后制定了 50 余项国家和行业规范, 生产、设计、施工、试验等环节基本做到有章可循。

1.2.2 在深层搅拌桩复合地基方面

美国于第二次世界大战后首先研发成功一种就地搅拌桩 (mixed-in-place, 简称 MIP)。

日本清水建设株式会社 1953 年从美国引进此法, 1974 年日本港湾技术研究所等单位研发成功水泥搅拌固化法 (CMC), 此后又有所发展。目前其主要的搅拌桩工法有: CDM (Cement Deep Mixing method, 即水泥深层搅拌处理) 工法; DJM (Dry Jet Mixing method, 即粉体喷射搅拌处理) 工法; DCS (Deep Cement Stabi-

lization method, 即水泥深层稳定处理) 工法; SMW (Steel Mixing Wall method, 即型钢混合挡墙处理) 工法。现在已发展到单桩最大施工直径超过 1.8m, 一次最大加固截面面积超过 9.5m^2 , 最大加固深度接钻杆式超过 60m, 塔架式可达 30m 以上。日本在搅拌桩技术领域的潜心开发和研究终于结出丰硕成果, 目前引导着世界搅拌桩技术的新潮流, 迄今为止, 无论是施工机械、工程应用、设计方法、室内试验、质量控制与检测均处于世界领先地位。

瑞典于 1967 年开始研制喷石灰粉搅拌法。

原苏联在 1970 年研发成功一种类似于美国 MIP 的淤泥水泥土桩。

1977 年 10 月, 我国冶金部建筑研究总院和交通部水运规划设计院进行了室内试验和机械研制工作, 于 1978 年底制造出国内第一台 SJB—1 型深层搅拌机; 1980 年在上海宝山钢铁总厂三座卷管设备基础的软基加固中获得成功; 1981 年在天津造纸厂蒸煮锅改扩建工程中应用并获得成功; 1983 年浙江大学土木工程系与联营单位开发了 DSJ 型单轴搅拌桩机; 同年铁道部第四勘测设计院开发了粉喷桩技术; 1984 年铁道部武汉工程机械研究所试制 PH—5 型粉喷桩机并投入实践; 1988 年铁道部第四勘测设计院和上海探矿厂联合研制成功 GPP—5 型粉喷桩机并很快投入批量生产。当前, 我国广泛使用的粉喷桩机大部分是由上海探矿厂和铁道部武汉工程机械研究所生产的, 其他各种类型的粉喷桩机生产厂家不计其数, 有的是专业厂家生产的, 有的是

改装的,有的是自行装配的,遍布全国各地。目前我国国产搅拌桩机的最大施工直径已达 1.2m,一次最大加固截面面积超过 2.1m^2 ,加固深度多在 15~30m 之间或以上。

值得一提的是,1985 年中国建筑科学研究院地基所在碎石桩基础上开发出水泥粉煤灰碎石桩 (Cement Flyash Gravel, 简称 CFG 桩),很快得到推广应用。历经 10 余年的科研和工程实践,CFG 桩系列技术先后被国家科委、建设部列为全国重点推广项目、国家级工法。

“深层搅拌法”是相对于早期“浅层搅拌法”而言的,通常其搅拌加固深度在 5m 以上。

1.2.3 在桩—网复合地基方面

1.2.3.1 国际概况

1975 年,日本在北海道石狩河的堤岸改造工程中,因雨季防汛需赶工期,又考虑软土地基等其他技术条件的影响,经反复研究决定采用“桩—网工法”,其桩为混凝土桩或经防腐处理的木桩,网材为土工织物 (geo-textiles) 或经防腐处理的钢筋,这是世界上首次提出并应用此法,见图 1.2-1。因效果好,随后日本迅速将该工法推广应用于铁路、公路、建筑等领域。

20 世纪 80 年代英国扩建伦敦第三大国际机场——Stansted 机场,作为扩建的关键工程之一,要修建一条连接既有 London-Combridge 干线的新铁路,路基所经之处有一片地下水位很高、承载力很低的深厚软粘土,为使新路基与既有干线路基间的沉降差保持最小,考虑