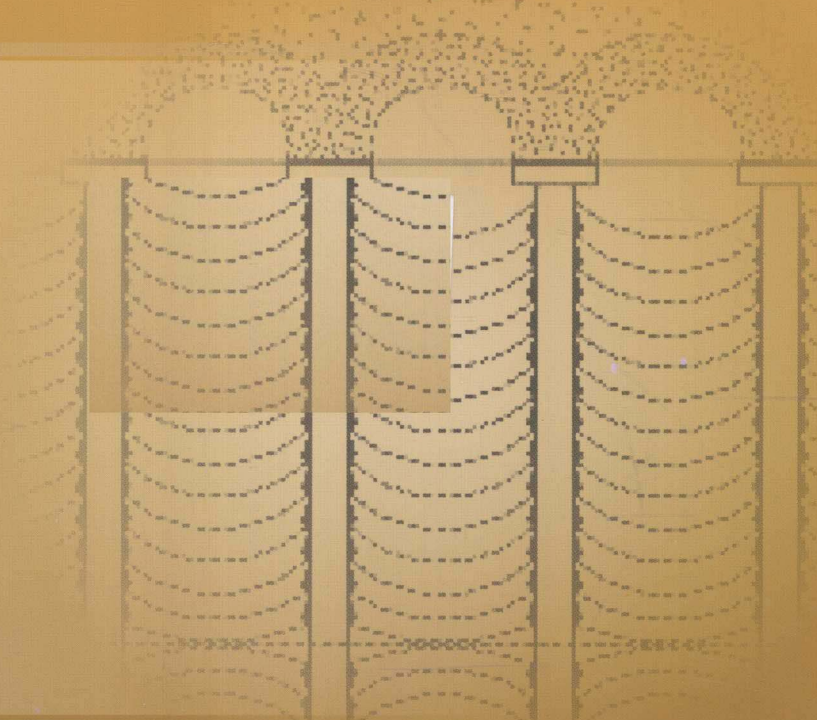


Bearing Mechanism and Design Method
of Pile-Reinforced Earth Composite Foundation

桩网复合地基承载机理 及设计方法

连 峰 宋双阳 楼 昕 著



中国建材工业出版社

桩网复合地基承载机理及设计方法

Bearing Mechanism and Design Method
of Pile-Reinforced Earth Composite Foundation

连 峰 宋双阳 楼 昕 著

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

桩网复合地基承载机理及设计方法 / 连峰, 宋双阳,
楼昕著. —北京: 中国建材工业出版社, 2014. 12

ISBN 978-7-5160-1015-0

I. ①桩… II. ①连… ②宋… III. ①人工地基—研
究 IV. ①TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 251786 号

内 容 简 介

本书系统介绍了桩网复合地基在国内外工程中的使用情况和研究现状, 在前人工作的基础上, 紧密结合工程实践, 通过室内模型试验、现场试验、数值模拟分析, 深入研究了桩网复合地基的承载机理和工作性状, 并与桩承式路堤承载机理作了比较分析。在桩网复合地基承载机理研究基础上, 著者提出了桩网复合地基设计方法, 并给出了桩网复合地基施工工艺和检测方法。本书在该领域进行了一系列创新成果的总结, 不仅对桩网复合地基设计和施工有指导意义, 更有助于桩网复合地基进一步推广的应用。

本书可供岩土工程专业研究人员、设计人员使用, 亦可供大专院校相关专业师生参考。

桩网复合地基承载机理及设计方法

连 峰 宋双阳 楼 昕 著

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市海淀区三里河路1号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 710mm × 1000mm 1/16

印 张: 10

字 数: 163 千字

版 次: 2014 年 12 月第 1 版

印 次: 2014 年 12 月第 1 次

定 价: 48.00 元



本社网址: www.jccbs.com.cn 微信公众号: zgjcgychs

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。联系电话: (010) 88386906

前 言

按目前的概念,复合地基可分为水平向增强体型和竖向增强体型两种基本型式,一般称之为单一型复合地基。但由于实际工程地质条件的复杂多变以及其他经济技术因素的制约,只采用其中一种形式往往不能满足要求。在这种情况下,工程设计中考虑采用“水平增强体型+竖向增强体型”的联合复合地基形式,取两种单一形式之长,从而达到最佳效果。桩网复合地基即是这样一种新型地基处理工法,它将单一的水平向增强体和竖向增强体进行组合,通过变形协调充分发挥桩、网、土各自的作用,有效控制工后沉降,从而达到综合加固的目的。近年来,虽然桩网复合地基在高等级公路和高速铁路工程中应用日益增多,但理论研究远落后于工程实践,开展桩网复合地基承载机理及设计方法研究既有理论意义,又有工程实用价值。

自2005年起涉足桩网复合地基技术研究至今,著者深感这一新技术在软弱地基处理中有其独特的优势,也了解到这一技术的理论研究尚不成熟,现有的复合地基理论需要补充新的内容才能更好地指导工程实践。近十年来,依托R-(2006)013-611(铁道部科技计划开发项目)等多个基金课题,著者在模型试验、现场试验、理论研究、数值模拟等方面开展了一系列工作,取得一系列创新成果,部分成果取得了发明专利授权,部分成果被浙江、广东等地方规程所采纳,直接或间接推动了桩网复合地基技术在工程中的应用。本书即是这些研究成果的系统总结。

研究工作得到了中国工程院院士龚晓南教授、广东航盛公司刘吉福教授级高工的大力支持与帮助,他们是著者的引路人,在此一并表示感谢。

时间仓促,本书完成过程中瑕疵难免,不当之处,欢迎读者批评指正。

著 者

2014年10月于泉城济南

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 研究背景	1
1.2 桩网复合地基简介	3
1.3 桩网复合地基工程应用情况	4
1.4 桩网复合地基理论研究进展	9
1.5 本书的主要内容	18
第2章 桩网复合地基承载机理现场试验	20
2.1 引言	20
2.2 试验段概况	20
2.2.1 工程地质情况	20
2.2.2 各段处理形式	21
2.2.3 仪器埋设情况	22
2.3 试验成果分析	24
2.3.1 沉降分析	24
2.3.2 桩、土压力变化规律	25
2.3.3 桩土应力比分析	26
2.3.4 孔隙水压力分析	30
2.3.5 侧向位移分析	32
2.4 本章小结	33
第3章 桩网复合地基与桩承堤承载机理比较	35
3.1 引言	35
3.2 现场概况	36
3.3 试验设计	37
3.4 试验成果分析	38
3.4.1 沉降分析	38
3.4.2 桩、土压力变化规律及土拱作用分析	39
3.4.3 桩土应力比分析	44

3.4.4	桩间土工格栅变形分析	45
3.4.5	孔隙水压力分析	46
3.4.6	侧向位移分析	47
3.5	数值模拟分析	48
3.5.1	模型网格划分	49
3.5.2	荷载和边界条件	49
3.5.3	计算参数选取	50
3.5.4	计算结果分析	50
3.6	本章小结	57
第4章	桩网复合地基桩土应力比计算分析	59
4.1	引言	59
4.2	变形分析与基本假定	60
4.3	模型建立与公式推导	61
4.4	算例分析	64
4.4.1	桩土应力比与桩间距的关系	64
4.4.2	桩土应力比与桩端土体压缩模量的关系	65
4.4.3	桩土应力比与桩端土体压缩模量的关系	66
4.4.4	桩土应力比与加筋体抗拉刚度的关系	68
4.4.5	桩土应力比与桩长的关系	69
4.4.6	桩土应力比与荷载的关系	70
4.5	本章小结	71
第5章	桩网复合地基承载机理模型试验研究	73
5.1	引言	73
5.2	试验目的	73
5.3	模型试验理论基础及相似分析	73
5.4	模型试验准备工作	78
5.4.1	试验计划	78
5.4.2	试验装置	79
5.4.3	材料设备	83
5.4.4	试验步骤	86
5.5	试验结果分析	89
5.5.1	有加筋体与无加筋体的比较	89
5.5.2	垫层材料的影响	93

目 录

5.5.3 桩间泡沫弹性模量的影响	98
5.5.4 桩端泡沫弹性模量的影响	99
5.6 本章小结	100
第6章 桩网复合地基承载机理模型试验数值模拟	101
6.1 引言	101
6.2 计算模型建立	104
6.2.1 计算模型	104
6.2.2 计算参数	104
6.2.3 材料本构关系	105
6.3 计算结果分析	106
6.3.1 有无土工格栅对桩网模型应力变形的影响	107
6.3.2 土工格栅层数对桩网模型应力变形的影响	110
6.3.3 桩帽尺寸变化对桩网模型应力变形的影响	115
6.3.4 桩间距变化对桩网模型应力变形的影响	117
6.4 本章小结	118
第7章 桩网复合地基设计方法研究	123
7.1 引言	123
7.2 桩网复合地基设计方法及工艺总结	123
7.2.1 一般规定	123
7.2.2 设计	124
7.2.3 施工	128
7.2.4 检验与检测	128
7.2.5 补充说明	129
7.3 工程实例	133
7.4 本章小结	137
第8章 结论及展望	138
8.1 主要结论	138
8.2 进一步工作的建议	141
参考文献	143

第1章 绪 论

1.1 研究背景

软土是软弱黏性土的简称，包括淤泥、淤泥质黏土等，多为海相、河相和湖相沉积层，在我国主要分布在沿海地区、内河两岸及湖泊等地区。软土一般具有高含水量、大孔隙比、低强度、高压缩性、灵敏性和触变性等特点，其物理力学性质变化较大，并且各地区的软土性质不尽相同。表 1.1 为软土的主要物理力学性质。

表 1.1 软土主要物理力学指标

含水量 $w/\%$	孔隙比 e	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	压缩系数 a_{v1-2}/MPa^{-1}	渗透系数 $k/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	凝聚力 c/kPa
35 ~ 60	1 ~ 2	30 ~ 50	18 ~ 25	0.5 ~ 1.5	$< 10^{-5}$	10 ~ 30

对于软土地基，在建筑物等长期荷载作用下的变形特征是竖向变形不均，且变形趋于稳定的时间长，工后沉降问题突出。如何控制软土地基的稳定性和变形量是工程界关注的主要问题，软土地基处理不当，将会给建筑物的使用造成很大影响和危害，如日本关西机场软土地基处理不当，后期沉降量已达 2m 多，给工程建设造成极大的危害。

随着社会经济的飞速发展，高速公路、铁路建设迅速发展，房屋建筑高度的不断增加，以及江、河、湖、海的防波堤、防洪堤和机场、码头、水库等设施的大量兴建，工程建设对地基承载力的要求越来越高，地基变形的控制越来越严。如高速公路路桥结合处工后沉降要求小于 10cm、高速铁路工后沉降要求小于 5cm、机场跑道工后沉降要求小于 5cm 等，因此，必须采用一定措施对软土地基进行处理，以满足建、构筑物对地基稳定和变形的要求。对于软土地基加固处理方法的选择、以及如何快速有效地提高软土的承载力，关系到整个工程的质量、进度和投资，是降低工程造价的重要途径之一。

为了提高软土地基的承载力，减少工后沉降量，必须对软土地基进行加固处理。软土地基加固的目的主要有：一是降低软土层的压缩性，尽量减少

在设计载荷作用下的沉降量；二是提高软土层的抗剪强度，使其尽可能满足地基承载力的要求。目前，快速有效经济的软土地基处理方法是工程中所急需的。

近几年来随着国民经济发展和科学技术进步，我国针对在软弱地基上修建公路、铁路、水利等土木工程，开展了大量的地基处理和加固技术的应用研究工作，各种软基处理工法和技术得到了较大的发展和推广，如堆载预压排水固结法、真空预压法、复合地基加固技术等等，这些加固处理方法取得了一定的成功经验，基本能控制道路的工后沉降变形，但是仍然存在不少问题，例如：

（1）差异沉降控制困难

由于地形及地质条件的复杂性，一条路往往交替采用多种处理方法，而不同加固工法之间会产生较大的差异沉降，路桥过渡带尤其如此。桥一般采用刚性桩基础，工后沉降很小，而路基经加固处理后往往存在或多或少的工后沉降，因此就会产生桥台过渡段的“跳车”这一公路技术难题。

根据调查，我国目前已投入使用的公路（尤其是东部地区，如环渤海、长三角、珠三角地区等），其桥台普遍存在“跳车”现象，有的非常严重，如珠海某市政道路，建成使用不到十年，桥台位置不到 30m 范围的工后沉降差高达 50~80cm，桥台位置数次翻修，已经形成明显的坡路，导致行车速度明显减缓，给交通安全带来隐患。

（2）软基加固处理投资大、工期长

目前，对于常用于公路和铁路软弱路基加固的方法来说，单一的加固工法技术比较成熟，应用经验丰富，但是存在投资大、土石方量大或工期长等缺点。

复合地基法一般采用搅拌桩、旋喷桩、素混凝土桩或 CFG 桩等，该类加固工法技术可靠，工后沉降小。根据现行行业规范和有关技术手册，当前的复合地基设计仅局限于桩和土共同承担上部荷载的承载力设计概念，由于软土承载力非常有限，通过设计计算，就需要桩来承担主要的荷载，这样对单桩承载力、布桩置换率或桩数有较高的要求，而桩往往造价不菲，因此，常规的复合地基加固法投资大，对于公路或铁路项目来说，单位里程投资中，软弱路基的加固处理费用大约占项目总投资的 30%~40%。过高的造价制约着复合地基的推广使用，目前一般只用于桥台过渡带等特殊部位。

堆载预压排水固结法虽然技术比较成熟、工后沉降也易控制，但是对于软弱、深厚的路基，减少工后沉降有时会付出较大的代价，如增加预压土石

方超载或延长预压期,加上堆载预压的填筑和卸除时间,堆载预压法,工期较长,尤其是近海滨,仅预压期就长达6~9个月,此外如土石方来源有限且运距长,同样会造成工程投资的增加。因此,较多的土石方或较长的工期往往制约建设项目对该工法的使用。

为了解决上述问题,岩土工程师正在尝试将单一的水平向增强体型和竖向增强体型两种基本型式进行组合,达到综合加固的目的,如“桩网复合地基”即是其中的一种经济、有效的工法,该工法通过变形协调,充分发挥桩、土和土工合成材料的各自作用,有效地控制工后沉降或工后沉降差。这种加固工法与常规地基处理方式不同之处在于:(1)布桩“小而疏”,即桩径小,距径比大;(2)桩顶垫层增设土工合成材料。该工法的最大优点就是在充分发挥土和土工合成材料功能的前提下,实现最大的桩间距,从而减小置换率,减少桩数,降低成本,对于解决复杂多变的工程地质条件、上部荷载条件等诸多不利工况的工程问题,效果更佳。

自20世纪70年代提出这一设计理念,1994年国内开始做试点工程并取得成功以来,“桩网复合地基”已逐渐被铁路、公路、水利等部门的工程师相继接受并积极应用,如深圳市的滨海大道(1999年通车)、东莞市东部快速路(2005年通车)等等。但由于桩网复合地基的工作机理十分复杂,理论研究远远落后于工程实践,目前国内主要是参考国外标准,并结合设计单位经验进行应用,尚无成熟的设计计算方法,带有很大的盲目性,在一定程度上限制了其推广应用,尤其是对更为复杂的地质条件(如淤泥较厚的情况)等新的工程项目,尚存在较多的不确定因素和工程风险,因此,很有必要对桩网复合地基的工作机理、变形沉降规律及工法的实施等方面进行系统的研究。

1.2 桩网复合地基简介

桩网复合地基是“桩-网-土”协同工作,桩和土共同承担荷载的人工地基体系。它能充分调动桩、网、土三者的潜力,具有桩体、垫层、排水、挤密、加筋、防护等综合功效;具有沉降变形小而且完成快、工后沉降容易控制、稳定性高、工期短、施工方便等优点,已有的研究及实践表明,桩网复合地基特别适合于在天然软土地基上快速修筑路堤或堤坝类构筑物,与其他地基处理方法相比,具有经济技术等多方面优势。国外已有许多应用这种地基处理形式的工程实例,如伦敦的 Stansted 机场的铁路连接线加宽工程、巴西圣保罗北部的公路拓宽工程、荷兰的部分高速公路等,而在英国、瑞典、

德国、日本等国家还相继出台了有关规程，其中以英国的 BS8006 为典型代表，对其承载机理的研究也呈方兴未艾之势，这些都有力地推动了这种地基处理形式的发展。近年来，国内沿海各地如浙江、广东等地高速公路建设中也开始采用这种工法，并取得了较好的效果。铁道部科学院、铁道部第四勘察设计院、湖南大学、浙江大学等科研院所也结合工程实践开展这方面的研究，并已有一些成果。因此，桩网复合地基的应用前景是非常广阔的。桩网复合地基与桩承堤如图 1.1 所示。

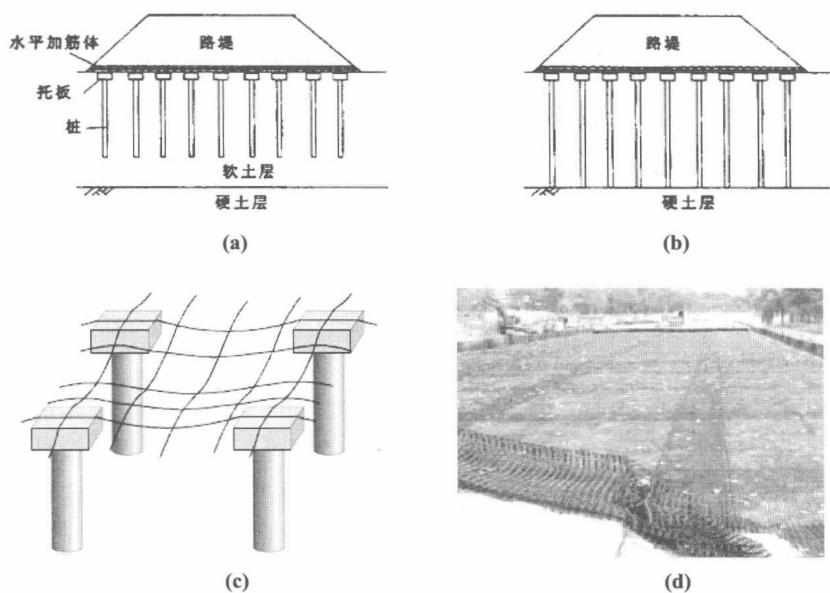


图 1.1 桩网复合地基与桩承堤

1.3 桩网复合地基工程应用情况

桩网复合地基利用桩把填土荷载传递到软弱土层下面更深处的硬土层或基岩上，减小路堤沉降。因此适用于以下情况：

- (1) 要求快速施工；
- (2) 对总沉降及不均匀沉降要求严格；
- (3) 硬土层或基岩上有软土；
- (4) 新填土厚度较大。

目前桩网复合地基已广泛应用于一些工程中，包括：引桥路堤，挡土墙，

路基拓宽,油罐地基,堤坝和建筑物地基处理。以下是桩网复合地基的部分工程应用情况。

为了刺激公共交通的发展,荷兰北部省决定拓宽 N247 公路,增设一条独立公交车道。所建公交车道长度超过 4.2km,并将在现有省边界以内建造。由于公交车道位置有 7m 深的软土(泥炭土和黏土),传统施工方法由于时间与空间的限制显得不可能。考虑几种可能的设计方案,桩网复合地基被选定为最合适的方案。尽管对此工程结构的长期响应进行测量的可能性有限,但根据其他类似工程的长期经验,这类结构可在短时期内完成可靠的施工以保证道路的耐久性。

伦敦第三大国际机场 Stansted 机场要扩建的一个关键工程之一就是修建一条连接已有干线的新铁路,路基所经之处是覆盖着原有洪积平原的一部分。交汇处地质条件为:地表下 5~13m 厚冲积土和泥炭土,1~10m 厚坚硬的冰河时期冰喷物,再下是白垩层。原有的伦敦——剑桥铁路路堤修建在 100 年之前的地基平面上,因此路堤非常稳定。对修建新机场铁路而言,要求在原有干道和新建路线之间的差异沉降达到一个最低值。因此为新建线路与原有铁路交汇处研究了许多地基处理技术方法(如超载、置换、灌浆、深层压实、桩式复合地基)。所有这些方法中,超载方法最经济,但是由于完成新线路又有时间限制,12 个月的超载期肯定过长,且由于其他方法技术上不可行,桩网复合地基被认为是最佳方案。

1994~1995 年因火车提速,德国一条百年旧双轨铁路需重建,铁路沿线横穿深层沉积有机软土。计划修建长达 30m 的桩网复合地基,桩是带混凝土桩帽的球墨铸铁桩。德国铁路要求论证足够的安全性和稳定性,因而需监测结构的力学行为,并已在两个测量仪器大量装备的观测段进行了观测。桩与三层土工网的加强体的行为用应变仪、杆伸长计、加速度传感器以及传统测量手段进行了监测。位移和应变测量表明结构安全可行。设计、施工和监测结果表明结构满足要求。同时研究了在交通荷载的动态影响下,由重复火车荷载引起的累积应变和施加预应力的效果。观测显示了这种新型结构的预期变形满足要求。

Reid 和 Buchanan (1984) 介绍了桩网复合地基技术应用于软土桥头段与长桩处理的桥墩间不均匀沉降处理的情况,如图 1.2 所示。桥墩处沉降几乎为零,而软土路堤沉降较大,设计采用变桩长和变间距的办法协调桥头段不均匀沉降,还铺设了土工材料以降低路堤表面处不均匀沉降。Broms 和 Wong (1985) 介绍了两个使用木桩和土工织物进行桥头处理的类似工程情况。

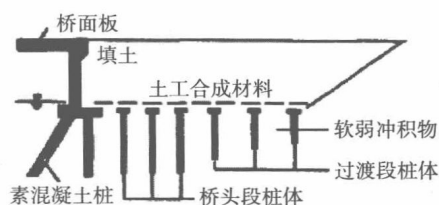


图 1.2 桩头段处理

巴西圣保罗北部的一条高速公路拓宽，需要修建高度为 2.0m 到 8.2m 不等的五段加筋土挡墙（SRW）。挡墙填土为细粒土，为避免加筋填土中产生孔隙水压力，铺设无纺土工布带作为排水体系。一部分挡土墙建造在 9m 厚标准贯入试验击数为 0~1 间的有机质淤泥和黏土层上，选用喷射注浆法形成的搅拌桩加固该软弱土体。原设计要求桩的直径为 1.2m，间距 2.0m。引入土工格栅加筋填土平台后，将间距扩大到 3.0m。对这些挡土墙进行了监测，开工后 90d 内的沉降和侧向位移都进行了监控，如图 1.3 所示。

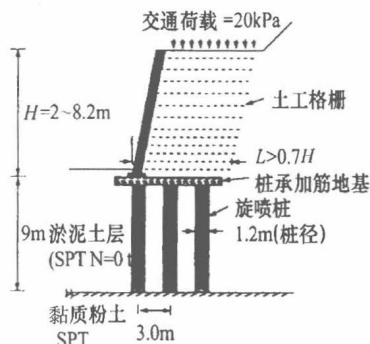


图 1.3 加筋土挡墙

原有公路旁修建新的路堤进行路基拓宽时，不均匀沉降通常是一个关键问题。大多数情况下老路堤沉降已完成，新建路堤不仅本身会产生较大的沉降，而且会使老路堤也产生沉降。图 1.4 介绍了北欧某工程中采用桩网复合地基防止软土上新建路堤和已停止沉降的老路堤间出现的不均匀沉降的情况。该工程不仅拓宽原有公路，还抬高路基高度使之与桥相连，工程中采用了扩冲桩头的振冲混凝土桩。

在桩上修建堤坝面临的主要问题是承台间的不均匀沉降会引起路堤表面沉降差，交通荷载对沉降的影响也很重要，这一问题在低路堤的填筑中最为明显。日本某软土地基上修建一条双车道 10m 宽的道路，每边各有一条 2m

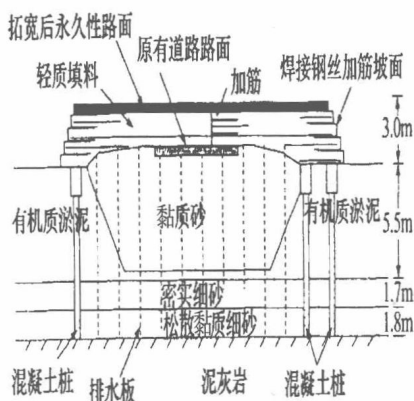


图 1.4 路基拓宽

宽的人行道，软弱地基由4m厚含水量为500%的泥炭层和4m厚黏土层组成。用深层混凝土搅拌桩加固软土地基，如图1.5所示，混凝土搅拌桩直径为800mm，间距2.1m，无侧限抗压强度为1MPa，混凝土搅拌桩顶上铺设了单层土工格栅，其上建造了一条1.5m高的路堤。该工程加固置换率为11%，与Rathmayer（1975）统计的同样高度路堤承台覆盖率50%~70%相比要小得多。15个月时间内，对桩顶处和桩顶高程跨间中点处的沉降进行了监测。监测结果发现不均匀沉降产生在桩间，最大不均匀沉降达到了15mm；此外，测得土工格栅应变随不均匀沉降增加而增大，但不超过0.5%。

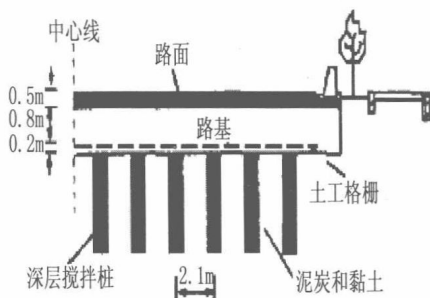


图 1.5 低路堤填筑

Han 和 Akins（2002）介绍了在填土面严重不均的地基上采用桩网复合地基技术修建建筑物的情况。由于已有填土高度变化很大，新填土要按不同厚度填埋，不均匀沉降成了这项工程关注的主要问题。采用桩网复合地基技术，在有问题的下卧土体上铺设了加筋平台，连接到桥头，减小了不均匀沉降。

1990年由浙江大学土木工程系和南京金陵石油化工公司炼油厂合作，

采用“横向土工布 + 砂垫层 + 竖向砂井”方法处理一座 2 万 m^3 容积的油罐软基, 获得了预期效果, 满足了设计要求。这在国内是完成比较早的一例。

1998 年江苏省泰州市工程技术人员, 首次利用“土工编织布 + 加筋垫层 + 水泥粉喷搅拌桩”的方案, 修复处理该市引江河嘶马码头下的软土地基, 成功解决了原设计中单一的水泥粉喷搅拌桩复合地基方案处理后所出现的桩体被剪断、偏斜、移位、码头基塘边坡滑动、桩间土翻砂冒泡等多种问题, 提高了地基承载力, 减少了沉降, 增加了码头稳定性, 降低了工程造价。修复处理方案的技术经济效益明显。

上海 F1 赛车场的设计将桩承式路堤与 EPS 材料结合起来, 提出了分层次承载的控沉观点, 即采用特别的施工方法将桩间土与桩体分担的荷载区分开来, 以达到满足不同工后沉降的要求。其施工做法简述如下: 原地面平整加固后填用二灰土、砂土组成的多层次垫层填筑至桩帽板标高, 厚度 2m 左右, 最多不超过 3m, 以加强路基结构的整体刚度, 打入 25 预制方桩穿透软土层达到粉质黏土层, 按正方形布设, 每根桩顶灌注 $1.75\text{m} \times 1.75\text{m}$ 倒杯形桩帽板 (轻型承台)。当路基填高 2 ~ 4m 时, 在桩帽板以上填二灰土至路基面标高; 当路基填高大于 4m 时, 上下各铺一定高度的二灰土, 中间铺设 EPS (聚苯乙烯泡沫塑料) 砌块代替土质填料。设计构造如图 1.6 所示。



图 1.6 上海 F1 赛车场桩承式路堤构造

拟建的京沪高速铁路上海 (沪) —— 南京 (宁) 段, 距离约 300km, 其中必须进行加固处理才能作为路基的典型软土段达 100km, 设基底宽 20m, 假定全部用深层搅拌桩法, 桩间距为通常的 1.2m, 则需用桩 140 万根, 仅桩一项就需投资 7 亿元人民币; 但若按桩网复合地基设计, 在保证行车安全的情况下把桩间距适当调大, 则地基处理费用即可大幅度降低。据铁道部科学院 (2005) 测算, 间距调至 2.0m, 可减少投资率 50%。表 1.2 是国内近年来完成的一些典型工程的设计情况。

第1章 绪 论

表 1.2 国内近年来完成的部分典型工程

序号	工程名称	桩型	用途	垫层结构	设计单位
1	深圳西部通道侧接线	D480 管桩@1400	地道地基	碎石垫层	上海市市政院
2	深圳后海路	D400 灌注桩@1800	挡土墙基础	土工格栅 碎石垫层	铁科院
3	深圳宝安大道南段	D400 灌注桩@1800	路基	土工格栅 碎石垫层	北京市市政院 铁科院
4	东莞五环路	D300 管桩@2000	桥头过渡段	桩帽 碎石垫层	北京市市政院
5	东莞东部快速路	D400 灌注桩@1800	路基	土工格栅 碎石垫层	北京市市政院
6	浙江杭甬高速路	D400 管桩@2500	路基	土工格栅 碎石垫层	浙江交通规划设计院

从国内外积累的 50 多项工程实例来看, 桩网复合地基目前最为常见的处理形式为: 管桩 + 桩帽 + 土工格栅碎石垫层, 桩体除管桩外, 振冲桩、深层搅拌桩、夯实墩、碎石桩等作为竖向增强体也已广泛用于设计中。桩和竖向增强体有许多相似之处, 但也有如下不同: (1) 竖向增强体直径大, 大多数情况不需要承台, 其顶部所起的作用相当于桩基中的承台; (2) 桩基中, 桩承受了路堤大部分荷载, 并传递到深部持力层, 此外, 桩间土的变形会在桩侧产生负摩阻力, 因此很有必要将桩打入坚硬持力层。相反, 竖向增强体和土体形成了复合地基, 它们共同承担荷载, 则竖向增强体可打入持力层或为悬浮设置。(3) 竖向增强体可灵活布置成各种形式, 尤其对深层搅拌桩, 可视不同目的布置成柱体、墙体、块体或格构形式。(4) 竖向增强体, 如碎石桩、深层搅拌桩, 振冲桩, 其刚度差异很大, 且低于桩的刚度。(5) 路堤荷载下, 竖向增强体会发生剪切破坏、弯曲破坏或弯剪破坏; 桩体破坏则一般由承载力不足引起。

1.4 桩网复合地基理论研究进展

Jones (1990) 假定水平加筋体中的拉力由桩间土沉降和路堤边缘土体侧向位移引起, 给出了预制钢筋混凝土端承桩情况下水平加筋体中拉力的计算公式和桩土应力比公式。

Terzaghi (1943) 最早研究平面土拱效应, Low (1993) 通过模型试验比较了设与不设水平加筋体的两种情况下砂填料桩梁 (桩顶用梁连接) 中的土拱发挥情况, 并在此基础上进行了理论分析, 结果表明水平加筋体能够有效地增强荷载向桩上的转移, 提高桩体荷载分担比。

阎明礼 (1995) 根据室内试验模型和现场原位试验, 对混凝土粉煤灰碎

石桩复合地基褥垫层的作用,垂直荷载作用下桩、土荷载的分担,复合地基变形性状进行了探讨,结果表明刚性桩复合地基承载力提高具有很大的可调性,沉降变形低。

Hewlett (1998) 用模型试验分析了砂填料在方形布置的桩网复合地基中空间土拱效应,并获得荷载分担比的计算公式。分析过程中假定填料处于极限状态,但该假定不能满足受力平衡条件。

牛志荣(2000)等基于“编织土工布—粉喷桩”处理桥头过渡段,桩间编织土工布的弯曲性状为抛物面等情况,根据力的平衡条件,推得了编织土工布中的拉应力计算式。

吴慧明(2000)设计了刚性基础与柔性基础下混凝土搅拌桩复合地基模型对比试验,对不同刚度基础下的复合地基试验有所借鉴。试验结果表明刚性基础与柔性基础的桩土荷载分担比无论发展规律还是量值均存在较大差异。刚性基础下桩土变形一致,桩体先承受较大荷载,并率先进入极限状态;柔性基础下桩土变形可相对自由发展,土首先承受较大荷载,并随荷载增大率先进入极限状态。

冯瑞玲(2000)采用平面应变有限元分别分析了柔性均布荷载和路堤荷载作用下的复合地基受力、变形。计算表明土体、桩体及路堤的变形模量是影响复合地基的主要因素;土体粘聚力、内摩擦角、泊松比对复合地基的受力与变形性状有一定程度的影响,而桩体和路堤的粘聚力、内摩擦角、泊松比对其受力与变形性状几乎没有影响。

曾开华、俞建霖(2002)等对杭宁高速公路通道软基处理中的低强度桩复合地基进行现场试验研究,结果表明:低强度混凝土桩在顶部一定的深度形成负摩擦区,通过上、下贯入变形的变化,以调整桩、土的荷载分担;桩体的遮拦效应明显,从而限制了地基土体的侧向变形;垫层刚度的增加,桩土应力比增加,地基中最大沉降量减少,到达某一值后,这种变化趋于平缓;不仅对承载力,对复合地基变形来说都存在着临界桩长。

方磊(2002)对带褥垫层刚性基础复合地基和柔性基础复合地基才进行室内试验,分析表明:柔性基础复合地基中柔性桩和半刚性桩的桩土应力比随持力层刚度增大而增大,随上部荷载的增加而逐渐趋于稳定;柔性基础复合地基中桩体有效长度不是定值,它不仅与桩土模量有关,而且随上部荷载增加而增加。

饶为国(2002)认为这种“桩网复合地基”形式既不属于“水平向增强体型”也不属于“竖向增强体型”,而是博采两种单一形式之长,宜单独划