

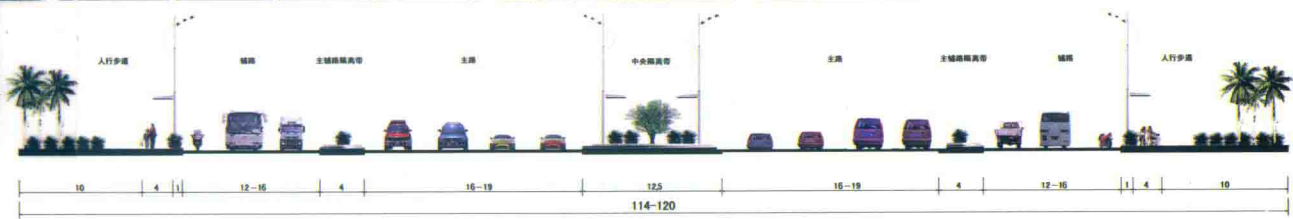
RUANRUO DIJI CHULI
XINJISHU JI GONGCHENG YINGYONG

软弱地基处理 新技术及工程应用

连峰 崔新壮 赵延涛 等著



非外借



中国建材工业出版社

软弱地基处理新技术及工程应用

连 峰 崔新壮 赵延涛 等著

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

软弱地基处理新技术及工程应用/连峰, 崔新壮, 赵延涛等著. --北京: 中国建材工业出版社, 2019.3

ISBN 978-7-5160-2528-4

I. ①软… II. ①连…②崔…③赵… III. ①软土地基—地基处理—研究 IV. ①TU471

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 054198 号

内 容 简 介

本书系统介绍了桩网复合地基、透水混凝土桩复合地基、爆夯动力固结法、电渗法、水载预压法等软弱地基处理新技术的机理研究、设计方法、施工工艺及工程应用, 具有一定的学术价值和工程指导意义。

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。

软弱地基处理新技术及工程应用

连 峰 崔新壮 赵延涛 等著

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: 北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 7.75

字 数: 180千字

版 次: 2019年3月第1版

印 次: 2019年3月第1次

定 价: 68.00元

本社网址: www.jcbs.com, 微信公众号: zgjcgycbs

请选用正版图书, 采购、销售盗版图书属违法行为

版权专有, 盗版必究。本社法律顾问: 北京天驰君泰律师事务所, 张杰律师

举报信箱: zhangjie@tiantailaw.com 举报电话: (010) 68343948

本书如有印装质量问题, 由我社市场营销部负责调换, 联系电话: (010) 88386906

《软弱地基处理新技术及工程应用》
撰写委员会

连 峰 崔新壮 赵延涛 李开防

刘 治 付 军 赵夫国 刘近龙

翟午琛 檀继猛 朱 磊 巩宪超

序

近年来，我国填海造陆取得重大进展，为临港经济的发展拓展了空间。以山东省为例，2011年1月初，国务院批复了《山东半岛蓝色经济区发展规划》，成为“十二五”开局之年第一个获批的国家发展战略。其中，建设山东半岛蓝色经济区的一个重要内容是到2020年将填海造地420平方公里，相当于再造一个海上陆域大县。填海陆域软土地层条件复杂、工程土质差、抗剪强度低，在其上兴建公路、铁路、机场等大型基础设施易产生较大的工后沉降，给后期正常使用带来严重影响。此类事故在国内外屡有发生，如建于填海陆域上的日本关西机场因软土地基处理不当，后期沉降量已达2m多，几乎成为“水下机场”；河北曹妃甸工业区、深圳宝安地区、天津滨海新区吹填造陆后地面基础设施均因软基处理不当出现过沉降过大，结构受损的情况。因此，根据山东半岛填海陆域软土特点，选择合适的软基处理方法进行有效控沉，保证大型基础设施安全运行就显得非常重要。虽然近年来随着国家建设规模的扩大，各种软基处理技术得到了有力推广和发展，但是仍然存在工后差异沉降控制困难、投资大、工期长等问题，亟待行业共同解决。

目前业内解决上述问题的主流思想是：在确保填海地基基础设施安全运行的前提下，结合其上部结构特点，从变形控制要求出发，采用相应的地基处理技术，以降低成本，提高效率，这就要求工程师不断地总结工程经验和进行技术创新。基于此，作者等一批长期从事软弱地基处理技术研究工作的专家教授结合自身研究特长和工程经验撰写了本书，书中对近年来涌现的桩网复合地基技术、透水桩复合地基技术、爆夯动力固结法等一批新技术的加固机理、设计方法、施工工艺进行了总结，并提供了工程实例。本书内容丰富，具有一定的学术价值和工程指导意义，可供同行参考。

本书撰写分工是这样的：第一章由山东省建筑科学研究院连峰、刘治、翟午琛撰写，第二章由山东大学土建与水利学院崔新壮撰写，第三章由济南城建集团有限公司赵延涛和山东省建筑科学研究院付军撰写，第四章由滕州市建筑安装工程集团公司李开防、赵夫国，山东省建筑科学研究院刘近龙撰写，第五章由山东省建筑科学研究院朱磊、巩宪超，济南市勘察测绘研究院檀继猛撰写，全书由翟午琛统稿，连峰审校。在本书撰写过程中，得到了诸多领导、专家及同事的指导和帮助，特此表示由衷的感谢。

由于作者水平所限，书中不足之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

著者

2018年11月于泉城济南

目 录

| | |
|---------------------------------|----|
| 第 1 章 桩网复合地基技术 | 1 |
| 1.1 概 述 | 1 |
| 1.2 加固机理及适用范围 | 2 |
| 1.3 设 计 | 4 |
| 1.4 施 工 | 13 |
| 1.5 质量检验 | 14 |
| 1.6 工程实例 | 14 |
| 1.7 发展展望 | 29 |
| 第 2 章 透水混凝土桩复合地基技术 | 31 |
| 2.1 概 述 | 31 |
| 2.2 加固机理及适用范围 | 32 |
| 2.3 设 计 | 33 |
| 2.4 施 工 | 36 |
| 2.5 质量检验 | 37 |
| 2.6 工程实例 | 38 |
| 2.7 发展展望 | 52 |
| 第 3 章 爆夯动力固结技术 | 54 |
| 3.1 概 述 | 54 |
| 3.2 设计与施工 | 57 |
| 3.3 路基填土施工 | 61 |
| 3.4 观测仪器埋设与监测 | 61 |
| 3.5 爆夯处理工程效果对比分析 | 82 |
| 3.6 本章结论 | 88 |
| 第 4 章 电渗加固技术 | 89 |
| 4.1 概 述 | 89 |
| 4.2 加固机理及适用范围 | 89 |
| 4.3 设 计 | 89 |
| 4.4 施 工 | 92 |

| | | |
|-------------|---------------------|------------|
| 4.5 | 试验成果分析 | 93 |
| 4.6 | 结 论 | 102 |
| 第5章 | 水载预压技术 | 104 |
| 5.1 | 概 述 | 104 |
| 5.2 | 加固机理及适用范围 | 104 |
| 5.3 | 设 计 | 106 |
| 5.4 | 施 工 | 107 |
| 5.5 | 试验成果分析 | 110 |
| 5.6 | 经济对比与推广应用 | 110 |
| 5.7 | 结 论 | 111 |
| 参考文献 | | 113 |

第1章 桩网复合地基技术

1.1 概述

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技术的工程实例，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，一般称之为“桩承堤”，英国、瑞典、德国、日本等国家还就此项技术出台了相关规范，其中以英国 BS 8006 规范和北欧 Nordic 规范为典型代表。近年来，国内沿海地区如上海、江苏、浙江、广东等地高速公路、铁路、机场建设中广泛采用该项技术解决软土路堤填筑、桥台跳车、新旧路段连接等技术难题，大都取得了较好的效果。在京沪高速铁路部分路段软基处理中为降低成本，加快工期，也采用了这一处理方法——布置成疏桩并严格控制其工后沉降量，以确保行车安全。表 1.1.1 是桩网复合地基技术的工程应用案例。

表 1.1.1 桩网复合地基技术在工程中的应用

| 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 | D400 管桩 @ 1400 | 地道地基 | 土工格栅 碎石垫层 | 上海市政工程设计研究院 |
| 2 | 深圳宝安国际机场停机坪扩建工程 | D300 管桩 @ 2000 | 停机坪 | 土工格栅 碎石垫层 | 铁科院深圳研究设计院 |
| 3 | 东莞五环路 | D300 管桩 @ 2000 | 桥头过渡段 | 土工格栅 碎石垫层 | 上海市政工程设计研究院 |
| 4 | 东莞东部快速路 | D400 灌注桩 @ 1800 | 公路路基 | 土工格栅 碎石垫层 | 上海市政工程设计研究院 |
| 5 | 浙江杭甬高速路 | D400 管桩 @ 2500 | 公路路基 | 土工格栅 碎石垫层 | 浙江交通规划设计院 |
| 6 | 京沪高铁京徐段 | D500 CFG 桩 @ 1800 | 铁路路基 | 土工格栅 碎石垫层 | 中铁第三勘察设计院集团有限公司 |
| 7 | 武广客运专线 | D500 CFG 桩 @ 1400 ~ 1800 | 铁路路基 | 土工格栅 碎石垫层 | 中铁第四勘察设计院集团有限公司 |

就目前来讲,国内外学者对桩网复合地基的研究有:Hewlett & Randolph 通过假定桩间砂土土拱穹顶应力平衡条件,推导了土拱效应计算公式。Jones 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。Low 通过试验和理论研究了桩承土工织物路堤中填土的成拱性状以及土工织物所起的作用。Han 采用轴对称有限元法按单桩模型分析桩、地基土体、格栅、桩土应力比和路堤沉降,计算发现水平加筋体能有效地促进荷载传向桩顶,提高荷载分担比,减少桩顶和路堤表面的沉降和沉降差,但是分析中没有考虑盖板的作用,对存在软弱下卧层的情况也没有考虑。饶为国对桩网复合地基应力比分析及工后沉降计算作了初步研究,并分别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推导出了桩网复合地基桩土应力比计算公式;运用薄板变形理论和 Winkler 弹性地基模型推导出桩网复合地基加固区的工后沉降量计算公式。许峰根据路堤各部分的协调作用,考虑桩侧摩阻力沿深度的变化和土拱效应、负摩阻力对应力-应变的影响,推导得到桩、土的荷载传递基本方程,获得了关于荷载分担比、等沉面高度、沉降、桩身轴力、桩侧摩阻力的计算方法,但上述方法不能考虑格栅的作用,也没有考虑群桩的相互作用。连峰、龚晓南把桩网复合地基作为一种双向复合地基进行了机理分析,并依托广梧高速对四种形式的桩网复合地基进行了现场试验研究。周镜对国外桩承加筋土路基的计算方法进行了比较,他在算例中指出采用国外的方法进行加筋体拉力计算,其结果较实测值偏大。张良用离心试验来分析桩、帽、网在不同桩端持力层下的受荷性能。詹金林首次在大直径储罐基础下采用了大直径刚性桩网复合地基,对大直径刚性桩网复合地基的设计、数值模拟分析、优化设计进行了详细的论述。

综上所述,已有研究偏重于对桩网复合地基的承载特性进行分析,对桩网复合地基工后沉降发展规律等报道相对较少,实际上因设计不当,在一些工程中曾经出现过工后沉降过大等情况,因此结合上部结构特点,研究桩网复合地基沉降发展规律,分析沉降发展过程中的桩土荷载转移、分配规律十分重要。另外鉴于在国内实际工程中大规模的采用这种工法是近些年来事情,缺乏长期监测数据,且多数工程为工后沉降控制标准严格的高速公路、铁路、机场等大型基础设施,工后沉降的大小直接关系到其安全平稳运行,因此对桩网复合地基工后沉降控制理论及设计方法仍有深入研究的必要。

1.2 加固机理及适用范围

桩网复合地基一般由上部填土、加筋垫层、桩帽、刚性桩、桩间土、下卧持力层构成,其加固机理至少包括四种作用:路堤填土中的土拱效应、加筋垫层兜提效应、桩土相互作用以及下卧层土体的支承作用。由于填土中的土拱效应,作用在上部的一部分柔性荷载由桩来承担,剩余部分由桩间土来承担,然而由于桩与桩间土之间的刚度悬殊,造成两者之间产生差异沉降,使得加筋体变形受拉,将本应由桩间土承担的荷载又部分地传递给桩体,此外由于桩土差异沉降,由桩间土承担的一部分荷载又通过摩阻力传递给桩体,最终大部分荷载由刚性桩传递到下卧持力层,如图 1.2.1 所示。

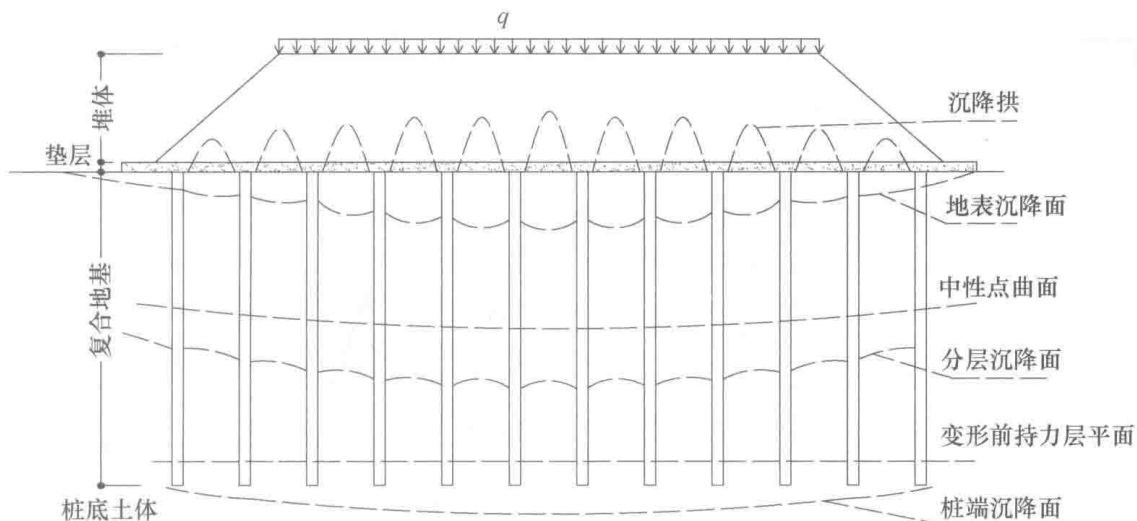


图 1.2.1 桩网复合地基加固机理示意图

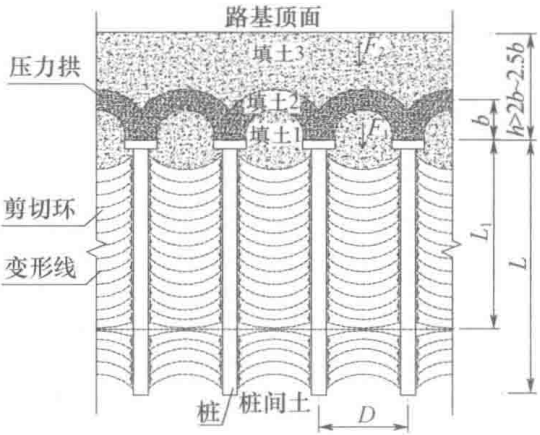
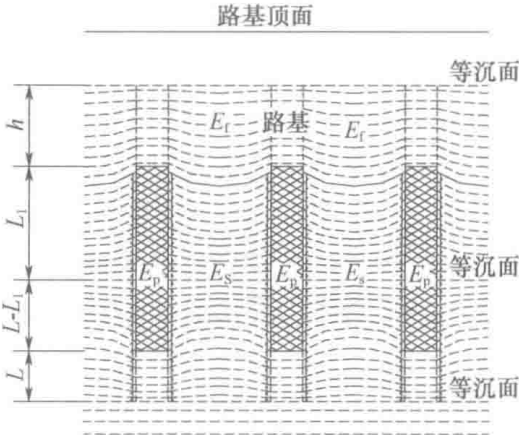
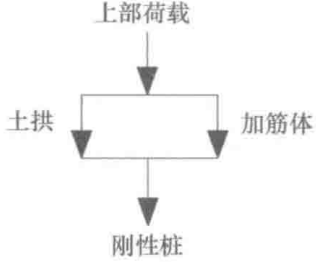
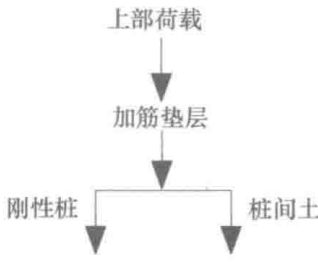
桩网复合地基一般用于填土路堤、柔性面层堆场和机场跑道等构筑物的地基加固与处理，适用于处理黏性土、粉土、砂土、淤泥、淤泥质土地基，也可用于处理新近填土、湿陷性土和欠固结淤泥等地基，但能否形成复合地基要根据现场实际情况确定，如沿海某高速公路管桩间距 2.3 ~ 2.8m，管桩直径 300mm 和 400mm，桩顶设置加筋垫层，但未设桩帽，因部分路段软土为有机质含量较高的软黏土，在高填方作用下，桩间土沉降达到 80cm。另外一条高速公路某标段采用直径 400mm 的 PHC 管桩进行软基处理，管桩间距 1.5m。填土高度达到 6m 时，路基发生滑塌，被迫路改桥。因此，对桩网复合地基工程实践经验较少的地区，需要进行现场试验，验证其可行性。

工程设计中应特别重视桩网复合地基和桩承堤的区别。在桩承堤中荷载通过土拱作用和土工格栅加筋垫层兜提作用传递到刚性桩上，桩间土不直接参与承担荷载，荷载全部由桩承担，因此桩承堤中的桩应是端承刚性桩。桩网复合地基中加筋垫层下桩间土直接参与承担荷载，荷载由桩和桩间土共同承担，桩网复合地基中的桩一般应是摩擦型桩，如采用端承桩则应根据加筋垫层的协调能力，保守估计桩间土分担荷载。表 1.2.1 是对桩承堤和桩网复合地基加固机理及适用范围的简要总结。

表 1.2.1 桩承堤、桩网复合地基加固机理及适用范围比较

| 名称 | 桩承堤 | 桩网复合地基 |
|----|-----|--------|
| 简图 | | |

续表

| 名称 | 桩承堤 | 桩网复合地基 |
|--------|--|---|
| 加固机理模型 |  |  |
| 传力路线 |  |  |
| 桩 | 端承桩 | 摩擦桩/端承桩 |
| 桩间土 | 设计中不考虑桩间土承载力 | 充分利用桩间土的承载力, 如为端承桩则应保守估计桩间土分担荷载 |
| 桩端土 | 不可压缩层 | 性质相对较好土层 |
| 特点 | 长桩、大板、强网, 加固机理简单明确 | 加筋垫层刚度适当, 桩土变形协调, 加固机理较复杂 |
| 设计要点 | 土拱设计、加筋体设计、桩帽设计、刚性桩设计、沉降计算、边坡稳定计算 | 加筋垫层设计、刚性桩复合地基设计、桩帽设计、沉降计算、边坡稳定计算 |
| 应用范围 | 工后沉降控制严格, 适用于基岩埋深较浅地域的高速铁路、高等级公路建设、旧路拓宽等, 对于不能形成复合地基的情况, 如新近填土、湿陷性土和欠固结淤泥等工后沉降较大的地基类型, 应按桩承堤设计 | 有一定工后沉降量, 适用于深厚软弱地基上修建公路、机场、堆场、储罐、粮库、城市假山等 |

1.3 设计

从国内文献及工程实践两方面来看, 桩网复合地基设计理论严重滞后于工程实践, 其发展大致经历了桩承堤→刚性桩复合地基→双向复合地基→桩承堤+刚性桩复合地基这一过程, 体现了对该技术加固机理的认识是逐渐深入的。目前国内有代表性的设计方法有浙江省《复合地基技术规程》(DB 33/1051—2008) 推荐方法, 《广东省公路软土地基设计与施工技术规定》(GDJTG/TE 01—2011) 推荐方法, 《复合地基技术规范》(GB/T 50783—2012) 推荐方法。这里重点介绍《复合地基技术规范》(GB/T 50783—

2012) 推荐设计方法。

1.3.1 浙江省《复合地基技术规程》(DB 33/1051) 推荐方法

该方法基于双向复合地基理论提出:桩网复合地基的设计包括刚性桩复合地基设计和加筋土垫层设计两部分,这是区别于其他类型复合地基的一个主要特点。刚性桩复合地基和加筋垫层的承载力均需满足使用要求。刚性桩复合地基控制地基总沉降,加筋垫层减小桩土差异沉降。将桩承堤视为桩网复合地基的一个特例,即 $\beta_s=0$ 的情况。桩帽的设计应满足抗弯、抗冲切和抗剪强度要求。

1.3.2 《广东省公路软土地基设计与施工技术规定》(GDJTG/TE 01) 推荐方法

该方法按基于桩土应力比的刚性桩复合地基理论进行桩网复合地基设计,也涵盖了桩承堤的设计方法。设计流程为:选取桩间距、桩帽尺寸→根据经验确定桩土应力比或桩土荷载分担比→根据填土高度、填料重度及桩土应力比确定桩、桩间土承受的荷载→桩长设计、桩帽设计、地基承载力验算、沉降计算→如地基承载力、沉降不满足要求重新选取桩间距、桩帽尺寸。

1.3.3 《复合地基技术规范》(GB/T 50783) 推荐方法

该方法糅合刚性桩复合地基理论与桩承堤设计理论,将桩网复合地基和桩承堤的设计统一起来。工程设计中要特别注意桩承堤与桩网复合地基两者的适用条件,对二者的作用机理有明确的认识。

1. 准备工作

设计前应通过勘察查明土层的分布和基本性质、各土层桩侧摩阻力和桩端阻力,以及判断土层的固结状态和湿陷性等特性。桩的竖向抗压承载力应通过试桩绘制 $p \sim s$ 曲线确定,并应作为设计的依据。桩型可采用预制桩、就地灌注素混凝土桩、套管灌注桩等,应根据施工的可行性、经济性等因素综合比较确定桩型。桩网复合地基的桩间距、桩帽尺寸、加筋层的性能、垫层及填土层厚度,应根据地质条件、设计荷载和试桩结果综合分析确定。

2. 桩网复合地基承载力设计

(1) 桩径宜取200~500mm,加固土层厚、软土性质差时宜取较大值。

(2) 桩网复合地基宜按正方形布桩,桩间距应根据设计荷载、单桩竖向抗压承载力计算确定,方案设计时可取桩径或边长的5倍~8倍。

(3) 单桩竖向抗压承载力应通过试桩确定,在方案设计和初步设计阶段,单桩的竖向抗压承载力特征值应按现行行业标准《建筑桩基技术规范》(JGJ 94)的有关规定计算。

(4) 当桩需要穿过松散填土层、欠固结软土层、自重湿陷性土层时,设计计算应考虑负摩阻力的影响;单桩竖向抗压承载力特征值、桩体强度验算应符合下列规定:

① 对于摩擦型桩,可取中性点以上侧阻力为零,可按式(1.3.1)验算桩的抗压承载力特征值:

$$R_a \geq A p_k \quad (1.3.1)$$

式中 R_a ——单桩竖向抗压承载力特征值 (kN), 只计中性点以下部分侧阻值及端阻值;

p_k ——相应于荷载效应标准组合时, 作用在地基上的平均压力值 (kPa);

A ——单桩承担的地基处理面积 (m^2)。

② 对于端承型桩, 应计及负摩擦引起基桩的下拉荷载标准值 Q_n^s , 并可按式 (1.3.2) 验算桩的竖向抗压承载力特征值:

$$R_a \geq A p_k + Q_n^s \quad (1.3.2)$$

式中 Q_n^s ——桩侧负摩阻力引起的下拉荷载标准值 (kN), 按现行行业标准《建筑桩基技术规范》(JGJ 94) 的有关规定计算。

③ 桩身强度应符合式 (1.3.3) 要求:

$$R_a = \eta f_{cu} A_p \quad (1.3.3)$$

式中 η ——桩体强度折减系数, η 可取 0.33 ~ 0.36, 灌注桩或长桩时应用低值, 预制桩应取高值;

A_p ——单桩截面积 (m^2);

f_{cu} ——桩体材料试块抗压强度平均值。

(5) 桩网复合地基承载力特征值应通过复合地基竖向抗压荷载试验或综合桩体竖向抗压荷载试验和桩间土地基竖向抗压荷载试验, 并结合工程实践经验综合确定。当处理松散填土层、欠固结软土层、自重湿陷性土等有明显工后沉降的地基时, 应根据单桩竖向抗压荷载试验结果, 计及负摩阻力影响, 确定复合地基承载力特征值。

(6) 初步设计可采用式 (1.3.4) 确定复合地基承载力特征值:

$$f_{spk} = \beta_p m R_a / A_p + \beta_s (1 - m) f_{sk} \quad (1.3.4)$$

式中 f_{spk} ——复合地基承载力特征值 (kPa);

m ——复合地基置换率;

f_{sk} ——桩间土地基承载力特征值 (kPa);

β_p ——桩体竖向抗压承载力修正系数, 宜综合复合地基中桩体实际竖向抗压承载力和复合地基破坏时桩体的竖向抗压承载力发挥度, 结合工程经验取值, 其中 β_p 可取 1.0;

β_s ——桩间土地基承载力修正系数, 宜综合复合地基中桩间土地基实际承载力和复合地基破坏时桩间土地基承载力发挥度, 结合工程经验取值。当加固桩属于端承型桩时, β_s 可取 0.1 ~ 0.4, 当加固桩属于摩擦型桩时, β_s 可取 0.5 ~ 0.9, 当处理对象为松散填土层、欠固结软土层、自重湿陷性土等有明显工后沉降的地基时, β_s 可取 0。

3. 桩帽设计

(1) 正方形布桩时, 可采用正方形桩帽, 桩帽上边缘应设 20mm 宽的 45°倒角。采用钢筋混凝土桩帽时, 其强度等级不应低于 C25, 桩帽的尺寸和强度应符合下列规定:

① 桩帽面积与单桩处理面积之比宜取 15% ~ 25%;

② 桩帽以上填土高度, 应根据垫层厚度、土拱计算高度确定;

③ 在荷载基本组合条件下, 桩帽的截面承载力应满足抗弯和抗冲剪强度要求;

④ 钢筋净保护层厚度宜取 50mm。

桩帽作为结构构件, 采用荷载基本组合验算截面抗弯和抗冲剪承载力 (图 1.3.1)。

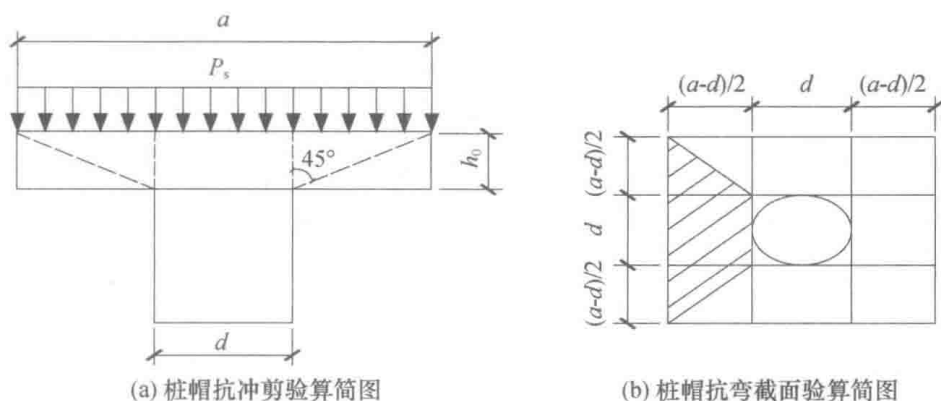


图 1.3.1 桩帽计算

桩帽抗冲剪按下列公式计算:

$$V_s / u_m h_0 \leq 0.7 \beta_{hp} f_t / \eta \quad (1.3.5)$$

$$V_s = P_s a^2 - (\tan 45^\circ h_0 + d)^2 \pi P_s / 4 \quad (1.3.6)$$

$$u_m = 2 (d/2 + \tan 45^\circ h_0 / 2) \pi \quad (1.3.7)$$

式中 V_s ——桩帽上作用的最大冲剪力 (kN);

u_m ——距桩边缘 $h_0/2$ 处冲切临界截面的周长 (m);

P_s ——相应于荷载基本组合时, 作用在桩帽上的压力值 (kPa);

β_{hp} ——冲切高度影响系数, 取 1.0;

f_t ——混凝土轴心抗拉强度 (kPa);

η ——影响系数, 取 1.25。

桩帽截面抗弯承载力按下列公式计算:

$$M_R \geq M \quad (1.3.8)$$

$$M = \frac{1}{2} P_s d \left(\frac{a-d}{2} \right)^2 + \frac{2}{3} P_s \left(\frac{a-d}{2} \right)^3 \quad (1.3.9)$$

式中 M_R ——截面抗弯承载力 (kN·m);

M ——桩帽截面弯矩 (kN·m)。

4. 土拱设计

(1) 采用正方形布桩和正方形桩帽时, 桩帽之间的土拱高度可按下列公式计算:

$$h = 0.707 (S - a) / \tan \varphi \quad (1.3.10)$$

式中 h ——土拱高度 (m);

S ——桩间距 (m);

a ——桩帽边长 (m);

φ ——填土的摩擦角, 黏性土取综合摩擦角 (°)。

当处理松散填土层、欠固结软土层、自重湿陷性土等有明显工后沉降的地基时, 确定土拱高度是填土高度设计的前提, 也是计算确定加筋体的依据。实用的土拱计算方法

主要有英国规范法、日本细则法和北欧规范法等。

英国规范 BS 8006 (1995) 根据 Hewlett、Low 和 Randolph 等人的研究成果, 假定土体在压力作用下形成的土拱为半球拱, 提出了桩网土拱临界高度的概念, 认为: 路堤的填土高度超过临界高度 $H_c = 1.4(S - a)$ 时, 才能产生完整的土拱效应。该规定忽视了路堤填土材料的性质, 在对路堤填料有严格限制的条件下, 英国规范的方法方便实用。

北欧规范引用了 Carlsson 的研究成果, 假定桩网复合地基平面土拱的形式为三角形楔体, 顶角为 30° 。可计算得到土拱高度为 $H_c = 1.87(S - a)$ 。

日本细则采用了应力扩散角的概念, 同样假定桩网复合地基平面土拱的形式为三角形楔体, 顶角为 2φ , φ 为材料的内摩擦角, 黏性土取综合内摩擦角如图 1.3.2 所示。

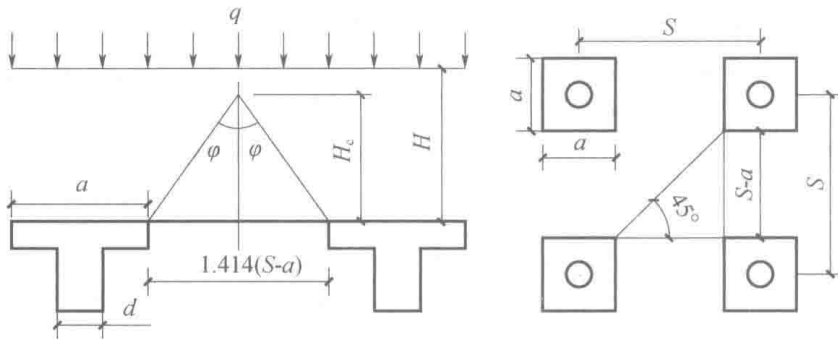


图 1.3.2 土拱高度计算

桩网复合地基采用间距为 S 的正方形布桩, 正方形桩帽边长为 a , 土拱高度计算应考虑桩帽之间最大的间距, $H_c = 0.707(S - a) / \tan\varphi$ 。当 $\varphi = 30^\circ$ 时, $H_c = 1.22(S - a)$; 日本细则另外规定土拱高度计算取 1.2 的安全系数, 设计取值时, $H_c = 1.46(S - a)$ 。

目前, 各国采用的规范方法略有不同, 但是考虑到路堤填料规定的差异, 各国关于土拱高度计算方法实质上差异较小。

(2) 为避免路面出现不均匀沉陷, 规定桩帽以上的最小填土设计高度按下式计算:

$$h_2 = 1.2(h - h_1) \quad (1.3.11)$$

式中 h_2 ——垫层之上最小填土设计高度 (m);

h_1 ——垫层厚度 (m)。

5. 加筋体设计

(1) 加筋层设置在桩帽顶部, 加筋的经纬方向宜分别平行于布桩的纵横方向, 应选用双向抗拉同强、低蠕变性、耐老化型的土工格栅类材料。

(2) 当桩与地基土共同作用形成复合地基时, 桩帽上部加筋体性能应按边坡稳定需要确定。当处理松散填土层、欠固结软土层、自重湿陷性土等有明显工后沉降的地基时, 加筋体的性能应符合下列规定:

① 加筋体的抗拉强度设计值 (T) 可按下式计算:

$$T \geq \frac{1.35\gamma_{cm}h(S^2 - a^2)\sqrt{(S-a)^2 + 4\Delta^2}}{32\Delta a} \quad (1.3.12)$$

式中 T ——加筋体抗拉强度设计值 (kN/m);

γ_{cm} ——桩帽之上填土的平均重度 (kN/m³);

Δ ——加筋体的下垂高度 (m), 可取桩间距的 1/10, 最大不宜超过 0.2m。

② 加筋体的强度和对应的应变率应与允许下垂高度值相匹配, 宜选取加筋体设计抗拉强度对应应变率为 4% ~ 6%, 蠕变应变率应小于 2%。

③ 当需要铺设双层加筋体时, 两层加筋应选同种材料, 铺设竖向间距宜取 0.1 ~ 0.2m, 两层加筋体之间应铺设与垫层同样的材料, 两层加筋体的抗拉强度宜按下式计算:

$$T = T_1 + 0.6T_2 \quad (1.3.13)$$

式中 T ——加筋体抗拉强度设计值 (kN/m);

T_1 ——桩帽之上第一层加筋体的抗拉强度设计值 (kN/m);

T_2 ——第二层加筋体的抗拉强度设计值 (kN/m)。

(3) 目前国内外规范关于加筋体拉力的计算方法主要有下列 4 种:

① 英国规范 BS 8006 法

将水平加筋体受竖向荷载后的形状近似看成双曲线, 假设水平加筋体之下脱空, 得到竖向荷载 (W_T) 引起的水平加筋体张拉力 (T) 按下式计算:

$$T = \frac{W_T (S - a)}{2a} \sqrt{1 + \frac{1}{6\varepsilon}} \quad (1.3.14)$$

式中 S ——桩间距 (m);

a ——桩帽宽度 (m);

ε ——水平加筋体应变;

W_T ——作用在水平加筋体上的土体重量 (kN)。

当 $H > 1.4(S - a)$ 时, W_T 按下式计算:

$$W_T = \frac{1.4S\gamma (S - a)}{S^2 - a^2} \left[S^2 - a^2 \left(\frac{C_c a}{H} \right)^2 \right] \quad (1.3.15)$$

对于端承桩:

$$C_c = 1.95H/a - 0.18 \quad (1.3.16)$$

对于摩擦桩及其他桩:

$$C_c = 1.5H/a - 0.07 \quad (1.3.17)$$

式中 C_c ——成拱系数。

② 北欧规范法

北欧规范法的计算模式采用了三角形楔形土拱的假设 (图 1.3.3), 不考虑外荷载的影响, 则二维平面时的土楔重量 (W_{T2D}) 按下式计算:

$$W_{T2D} = \frac{(S - a)^2}{4 \tan 15^\circ \gamma} \quad (1.3.18)$$

该方法中, 水平加筋体张拉力的计算采用了索膜理论, 也假定加筋体下面脱空, 得到二维平面时的加筋体张拉力 (T_{r2D}) 可按下式计算:

$$T_{r2D} = W_{T2D} \left(\frac{S - a}{8\Delta} \right) \sqrt{1 + \frac{16\Delta^2}{(S - a)^2}} \quad (1.3.19)$$

式中 Δ ——加筋体的最大挠度 (m)。

瑞典 Rogheck 等考虑了三维效应, 得到三维情况下土楔重量 (W_{T3D}) 可按下式计算:

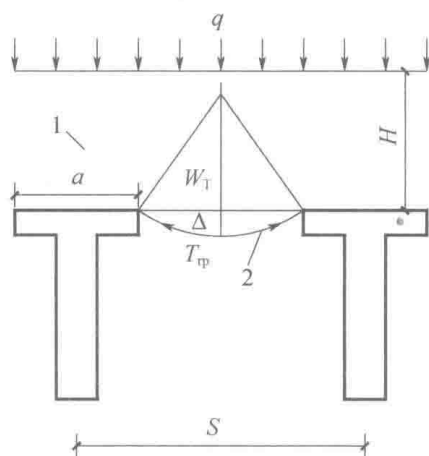


图 1.3.3 加筋体计算

1—为路堤；2—为水平加筋体

$$W_{T3D} = \left(1 + \frac{S-a}{2}\right) W_{T2D} \quad (1.3.20)$$

则三维情况下水平加筋体的张拉力 (T_{T3D}) 可按下式计算：

$$T_{T3D} = \left(1 + \frac{S-a}{2}\right) T_{T2D} \quad (1.3.21)$$

③ 日本细则方法

日本细则方法考虑拱下三维楔形土体的重量，假定加筋体为矢高 Δ 的抛物线，土拱下土体荷载均布作用在加筋体上，推导出加筋体张拉力可按下式计算：

$$W = \frac{1}{2} h \gamma \left(S^2 - \frac{1}{4} a^2 \right) \quad (1.3.22)$$

格栅上的均布荷载：

$$q = \frac{W}{2(S-a)a} \quad (1.3.23)$$

加筋体的张力：

$$T_{\max} = \sqrt{H^2 + \left(\frac{q\Delta}{2}\right)^2} \quad (1.3.24)$$

$$H = q(S-a)^2 / 8\Delta \quad (1.3.25)$$

④ 中国 GB/T 50783 方法

本方法采用应力扩散角确定的土拱高度，考虑空间效应计算加筋体张拉力 (图 1.3.4)。

土拱设计高度 $h = 1.2H_c$ ， $H_c = 0.707(S-a) / \tan\varphi$ (图 1.3.4)。加筋体张拉力产生的向上的分力承担图中阴影部分楔体土的重量，假定加筋体的下垂高度为 Δ ，变形近似于三角形，土荷载的分项系数取 1.35，则加筋体张拉力可按下式计算：

$$T \geq \frac{1.35\gamma h(S^2 - a^2)\sqrt{(S-a)^2 + 4\Delta^2}}{32\Delta a} \quad (1.3.26)$$

⑤ 不同方法计算结果的对比

此处以一个算例对比上述不同规范计算土拱高度和加筋拉力的结果。算例中：布桩