

国家自然科学基金项目 (41002091) 资助浙江省钱江人才计划项目 (2009R10047) 资助

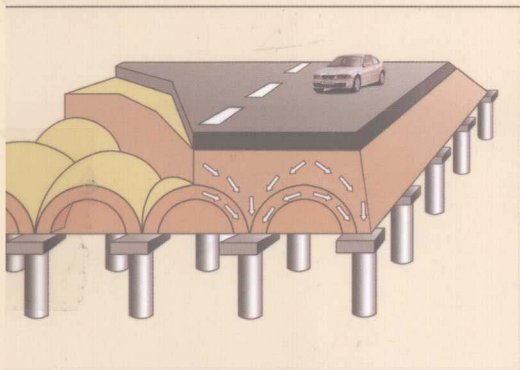
桩承式加筋路堤 理论及应用

Theory and Application of
Piled Embankments

余 闯 刘松玉 杜广印 著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



国家自然科学基金项目(41002091)资助浙江省钱江人才计划项目(2009R10047)资助

桩承式加筋路堤 理论及应用

Theory and Application of
Piled Embankments

俞 创 刘松玉 杜广印 著 YU Chuang LIU Songyu DU Guangyin



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

桩承式加筋路堤理论及应用/余闯等著. —上海:

同济大学出版社, 2010. 12

ISBN 978-7-5608-4430-5

I. ①桩… II. ①余… III. ①路堤—人工地基—研究
IV. ①U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 183057 号

桩承式加筋路堤理论及应用

余 闯 刘松玉 杜广印 著

责任编辑 季 慧 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 10.25

印 数 1—1100

字 数 255000

版 次 2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-4430-5

定 价 28.80 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究



前 言

QIANYAN

建于东部沿海地区的高速公路地基经常遇到淤泥、淤泥质粘土等饱和软粘土的不良地质条件。软土的物理、力学性质很差,具有高含水量、高压缩性、低强度等特点,在工程实践中必须采取特殊的地基处理方法进行处理。目前软土地基处理方法常用置换、排水固结、灌入固化物、振密挤密、加筋等,主要包含堆载法、真空预压、塑料排水板法、水泥土搅拌桩法、加筋法等。软土地基上桥头段沉降较大,形成桥面和路面的高差,产生“桥头跳车”现象。采用水泥搅拌桩等方法处理桥头段软土地基,对于深厚软土地基,其加固深度受到限制。桩承式加筋路堤具有施工质量易控制、施工速度快、工后沉降及不均匀沉降小、处理深度大、复合地基承载力大、造价比较适中等优点,在高速公路软基处理中得到了重视,并有初步的应用,但是缺乏较系统的理论分析研究。

鉴于上述情况,本书在国家自然科学基金“交通荷载下桩承式加筋路堤承载机理及变形规律研究”(41002091)、温州市国际合作项目“深厚软弱地基上桩承式路堤承载特性与变形规律研究”(H20100047)、第一作者博士学位论文《路堤荷载下刚性桩复合地基理论与应用研究》等研究成果基础上深化完成的。本书分析了桩承式加筋路堤在高速公路软土地基处理中的应用及研究现状,指出目前需要解决的关键问题。通过理论分析、数值模拟和现场试验对桩承式加筋路堤的性状进行了系统的研究。

本书共分7章。第1章总结了传统的刚性桩复合地基的研究现状,指出了路堤荷载下刚性桩复合地基和一般建筑物下刚性桩复合地基(复合桩基)的不同之处,分析了加固软土地基的应用现状,提出了桩承式加筋路堤中亟待解决的问题。第2章利用轴对称的有限元计算模型,分析桩承式加筋路堤中不带桩帽和带桩帽路堤桩单桩性状,计算结果表明路堤填料中存在“等沉面”和“土拱效应”的现象;计算结果还显示桩帽尺寸的大小与桩间距之间的比例关系是控制桩体荷载分担的关键因素,而桩端土层性质的变化对其影响不大。利用多拱理论,分别给出了桩间土应力和桩帽上部土体应力的解析解,推导了有加筋材料作用下的桩体荷载分担比的计算公式,同时给出了筋材的应力和变形计算公式,并讨论了桩体荷载分担比随各种因素的影响规律。模型试验和数值模拟的结果验证了本书提出计算公式的正确性。第3章建立了桩承式加筋路堤中桩-桩帽-土共同作用的有限层-有限元方程,并编制了相关计算程序。通过典型算例的计算得出了如下主要结论:通过柔性荷载和刚性荷载作用桩土共同作用的对比分析,得出了两种荷载作用的桩帽(承台)下土体反力分布特征有很大的不同,刚性荷载作用下桩帽下土体反力呈现出边上大的典型分布特征,而柔性荷载作用下,土体反力呈现出边上小,中间大的分布特征,特别是在在桩帽上部荷载水平较小的情况下尤为突出;在相同的桩帽荷载作用下,柔性荷载下桩侧摩阻力的发挥程度要大于刚性荷载下的情况,变形特性也具有相同的特点,且桩帽下土体荷载分担比要小。第4章分析了软土地基中路堤桩的承载特性。PTC 预应



力管桩施工过程中的现场试验表明:海相软土中 PTC 预应力管桩采用锤击法施工会产生较大的超孔隙水压力。管桩的桩径、桩长以及有无桩靴对孔压及其消散规律都有很大的影响。单桩施工引起的孔压在初期消散较快,其后逐渐缓慢;群桩引起的孔压消散速率则缓慢得多。单桩和群桩施工后不同时间的桩周土体的现场静力触探试验表明:桩体施工后导致桩周具有强结构性的连云港天然沉积土的结构破坏,从而导致桩周土强度的降低,而且该土层强度短期内很难恢复。对典型软土层,锥尖阻力比主要在 $0.5 \sim 0.9$ 范围内变化。多组 PTC 预应力管桩静载试验结果的对比分析表明,桩帽对单桩复合地基的承载力有明显的提高作用,增幅达 18%。通过静载试验和高应变的对比分析,显示两种测试方法的结果具有相当的一致性。打桩后不同时间的高应变测试结果表明,海相软土中 PTC 预应力管桩的承载力随时间在增长,且增幅较大,单桩极限承载力增幅均大于 50%。在总结桩承式加筋路堤中路堤桩负摩阻力问题的基础上,对土体沉降采用 Terzaghi 一维固结理论,在假设桩及桩周土体变形规律的基础上得到了桩体轴力和变形的计算公式,与一个工程实例的测试结果具有良好的一致性。结合现场试验结果,提出了连云港地区考虑桩间土强度时间效应的系数 μ 和桩间土强度发挥度 λ 的取值范围,给出了合理的路堤刚性桩复合地基承载力的计算方法。第 5 章对桩承式加筋路堤的变形问题进行了探讨分析。从刚性荷载和柔性荷载作用下的刚性桩复合地基沉降不同特性出发,分别提出了桩间土应力减小比法、位移模式法和等沉面法等沉降计算方法。利用所提方法分别对 PTC 预应力管桩和 CFG 桩处理的试验段进行了计算,并与实测结果和其他计算方法进行了对比分析,探讨了本书所提方法的合理性和适用范围。探讨加载方式对路堤沉降性状的影响,采用考虑流变的 Merchant 土体本构模型解释了沉降—时间曲线与加载方式的关系,分析了瞬时加载、线性加载和分级加载情况下沉降的发展规律,在此基础上提出了符合各自沉降和沉降速率变化特征的指数、Gompertz 和分段 Gompertz 预测模型,多个工程实例的预测和分析证明了所提预测模型的科学性和实用性。最后从路堤荷载作用下地基的水平向应变的特征和大量观测资料分析入手,得出了坡脚处路堤侧向变形沿深度的变化规律,提出了预测模型并给出了参数的求解方法,应用到多个工程实例中,取得了较好的效果。第 6 章给出了桩承式加筋路堤的实用设计方法。基于卸荷减沉桩的概念,提出了桩体、桩帽和加筋材料的设计计算方法。并介绍了 PTC 预应力管桩加固连盐高速公路深厚软土地基的情况,两个试验路段填筑期观测资料表明该方法在处理同类地基上的适用性和优越性。第 7 章总结了本书的主要结论,并展望了桩承式路堤的研究难点、热点和需要进一步研究的工作。

书中许多观点与成果源于作者攻读博士学位期间所取得的成果,凝结了东南大学交通学院岩土工程研究所众多老师和同门师弟的智慧,也得到了南京工业大学土木学院有关老师和领导的帮助,同时也体现了作者在德国斯图加特大学岩土工程研究所访问研究所取得的最新成果,在此一并对给予作者关心和帮助的人们致以最诚挚的谢意。

感谢作者所在单位温州大学领导和同事的关心与支持!

同济大学季慧女士在审校、出版方面给予了很多帮助,在此表示感谢!

由于作者受实践经验和学术水平的限制,书中难免有疏漏和欠考虑之处,敬请读者不吝指教。

余 闾 于温州

2010 年 11 月



目 录

MULU

前言

1 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 桩承式加筋路堤在高速公路软基处理中的应用现状	(3)
1.2.1 刚性桩复合地基研究现状	(3)
1.2.2 桩承式加筋路堤加固高速公路软土地基应用现状	(4)
1.3 路堤荷载下刚性桩复合地基研究现状	(5)
1.3.1 桩(帽)-土之间荷载分配规律	(6)
1.3.2 柔性荷载下桩土共同作用分析	(6)
1.3.3 刚性桩复合地基承载特性分析	(8)
1.3.4 桩承式加筋路堤沉降计算	(9)
1.3.5 路堤荷载下刚性桩复合地基设计方法	(10)
1.4 存在的问题	(14)
1.5 研究思路及内容	(15)
参考文献	(16)
2 路堤桩力学性状与荷载传递规律分析	(22)
2.1 引言	(22)
2.2 路堤桩单桩性状分析	(22)
2.2.1 不带帽的单桩复合地基力学性状分析	(22)
2.2.2 带帽单桩复合地基性状分析	(25)
2.3 桩承式加筋路堤土拱效应研究	(31)
2.3.1 荷载传递机理分析	(31)
2.3.2 多拱计算理论	(31)
2.3.3 公式计算结果验证	(39)
2.3.4 三维有限元模型及结果分析	(42)
2.4 本章小结	(46)
参考文献	(47)
3 桩承式加筋路堤桩-桩帽-土共同作用分析	(48)
3.1 引言	(48)
3.2 有限层分析方法简介	(48)
3.2.1 物理模型和边界条件	(49)
3.2.2 层元分析	(49)



3.2.3	整体分析	(51)
3.3	桩土共同作用的模型	(52)
3.3.1	修正理论 $t-z$ 曲线	(52)
3.3.2	桩周土与桩身的有限层-有限元分割	(53)
3.3.3	桩身平衡方程	(53)
3.4	桩承式加筋路堤中群桩-桩帽-土非线性共同作用分析模式	(54)
3.4.1	桩土支承体系的分割方式	(54)
3.4.2	地基土支承体系非线性柔度矩阵的建立	(56)
3.4.3	非线性分析计算步骤	(57)
3.5	工程实例与算例模拟计算	(57)
3.5.1	刚性荷载和柔性荷载作用下群桩-土-承台共同作用的实例对比分析 ..	(57)
3.5.2	路堤荷载作用下桩-桩帽-土共同作用算例分析	(62)
3.6	本章小结	(64)
	参考文献	(64)
4	软土地基中路堤桩承载性能分析	(66)
4.1	引言	(66)
4.2	PTC 预应力管桩施工对桩周土性能影响的现场试验研究	(66)
4.2.1	施工过程中孔隙水压力现场试验研究	(66)
4.2.2	施工过程中对桩周土强度影响的现场试验研究	(84)
4.3	刚性桩承载性能试验分析	(87)
4.3.1	静载荷试验分析	(87)
4.3.2	高应变试验分析	(90)
4.3.3	高应变与静载试验对比分析	(94)
4.4	路堤桩桩身负摩阻力计算分析	(94)
4.4.1	负摩擦桩基性状研究	(94)
4.4.2	路堤荷载作用下刚性桩负摩阻力理论计算	(95)
4.4.3	工程实例计算分析	(98)
4.5	承载力计算方法探讨	(99)
4.5.1	概述	(99)
4.5.2	软土地基中 PTC 预应力管桩复合地基承载力的计算	(100)
4.5.3	路堤下 PTC 预应力管桩复合地基承载力计算方法	(102)
4.6	本章小结	(103)
	参考文献	(104)
5	桩承式加筋路堤的变形规律及其计算预测方法	(106)
5.1	引言	(106)
5.2	路堤下刚性桩复合地基的沉降计算分析	(106)
5.2.1	路堤荷载下刚性桩复合地基的沉降特征分析	(106)
5.2.2	沉降计算方法	(108)
5.2.3	工程实例沉降计算对比分析	(116)



5.2.4 各种计算结果对比分析·····	(117)
5.3 路堤沉降规律与预测·····	(118)
5.3.1 概述·····	(118)
5.3.2 路堤沉降影响因素分析·····	(118)
5.3.3 考虑加载方式的路堤沉降性状及其预测·····	(119)
5.4 路堤侧向变形性状与预测·····	(127)
5.4.1 概述·····	(127)
5.4.2 路堤荷载作用下侧向变形沿深度方向的分布特征·····	(128)
5.4.3 路堤侧向变形沿深度方向的性状及其预测·····	(129)
5.5 本章小结·····	(132)
参考文献·····	(133)
6 桩承式加筋路堤的设计方法与应用·····	(136)
6.1 引言·····	(136)
6.2 桩承式加筋路堤设计方法·····	(136)
6.2.1 桩体的设计·····	(136)
6.2.2 卸荷减沉桩的设计方法·····	(136)
6.2.3 桩帽的设计与计算·····	(140)
6.2.4 加筋材料的设计计算·····	(140)
6.2.5 路堤下 PTC 预应力管桩复合地基设计方法·····	(141)
6.3 桩承式加筋路堤加固高速公路软土地基效果的现场试验研究·····	(142)
6.3.1 概述·····	(142)
6.3.2 PTC 预应力管桩试验段 I·····	(143)
6.3.3 PTC 预应力管桩试验段 II·····	(147)
6.4 本章小结·····	(151)
参考文献·····	(151)
7 结论与展望·····	(152)
7.1 结论·····	(152)
7.2 展望·····	(154)



Index

Abstract(in Chinese)

Abstract(in English)

1 Introduction	(1)
1.1 General	(1)
1.2 State-of-the-art of the application of piled embankments	(3)
1.2.1 State-of-the-art of rigid pile composite foundation	(3)
1.2.2 State-of-the-art of the application of piled embankments in ground improvement in expressway engineering	(4)
1.3 State-of-the-art of rigid pile foundation under embankments load	(5)
1.3.1 Load sharing ration between pile(cap) and soil	(6)
1.3.2 Pile-Soil Interaction under flexible loads	(6)
1.3.3 Bearing capacity of rigid pile composite foundation	(8)
1.3.4 Settlement calculation	(9)
1.3.5 Design methods	(10)
1.4 Present questions	(14)
1.5 Research approach and main contents	(15)
Literatures	(16)
2 Mechanic behavior and load distribution of embankment piles	(22)
2.1 General	(22)
2.2 Behavior of single embankment pile	(22)
2.2.1 Behavior of single embankment pile composite foundation without cap	(22)
2.2.2 Behavior of single embankment pile composite foundation with cap	(25)
2.3 Soil arching of piled embankments	(31)
2.3.1 Load distribution	(31)
2.3.2 Multi-arching theory	(31)
2.3.3 Verfication of calculation method	(39)
2.3.4 Numecail simulations using 3-dimension Finite-Element-Method	(42)
2.4 Summary	(46)
Literatures	(47)
3 Embankment pile-cap-soil interaction of piled embankments	(48)
3.1 General	(48)
3.2 Introduction of Finite-Layer-Method	(48)
3.2.1 Phsical model and boundary condition	(49)
3.2.2 Layer unit	(49)



3.2.3	Total unit	(51)
3.3	Model of pile-soil interaction	(52)
3.3.1	Modified $t-z$ curve	(52)
3.3.2	Division of pile and surrounding soil for Finite-Layer-Element method ...	(53)
3.3.3	Equilibrium equations for pile	(53)
3.4	Interaction mode for group piles-cap-soil in piled embankments	(54)
3.4.1	Division mode for the support of pile and soil	(54)
3.4.2	Flexibility Matrix for the support of ground	(56)
3.4.3	Non-linear calculation steps	(57)
3.5	Case study and numeral situations	(57)
3.5.1	Caparisons of the interaction for group piles-cap-soil under rigid loads and flexible loads	(57)
3.5.2	Case study of the interaction for pile-cap-soil under embankment loads ...	(62)
3.6	Summary	(64)
	Literatures	(64)
4	Bearing capacity of embankment piles in soft clay ground	(66)
4.1	General	(66)
4.2	Field tests of PTC pipe piles	(66)
4.2.1	Excess pore water pressure during pile driving process	(66)
4.2.2	Effects of strength changes for surrounding soil during pile driving process	(84)
4.3	Field tests on bearing capacity of rigid pile	(87)
4.3.1	Static load tests	(87)
4.3.2	High Strain load tests	(90)
4.3.3	Caparisons between high strain load tests and static load tests	(94)
4.4	Negative friction of embankment pile	(94)
4.4.1	Research on negative friction in pile foundation	(94)
4.4.2	Negative friction in rigid pile under embankment loads	(95)
4.4.3	Case study	(98)
4.5	Calculation methods for bearing capacity	(99)
4.5.1	General	(99)
4.5.2	Bearing capacity of PTC pipe pile in soft clay ground	(100)
4.5.3	Calculation method for bearing capacity of PTC pipe pile in soft clay ground under embankment loads	(102)
4.6	Summary	(103)
	Literatures	(104)
5	Deformation calculation and prediction for piled embankments	(106)
5.1	General	(106)
5.2	Settlement calculation	(106)



5.2.1	Settlement feature of piled embankments	(106)
5.2.2	Settlement calculation methods	(108)
5.2.3	Case study	(116)
5.2.4	Comparisons of different methods	(117)
5.3	Settlement feature and prediction for embankments	(118)
5.3.1	General	(118)
5.3.2	Influenced factors of embankment settlement	(118)
5.3.3	Settlement prediction considering load sequence	(119)
5.4	Feature and prediction of lateral deformation of embankments	(127)
5.4.1	General	(127)
5.4.2	Feature of lateral deformation with depth under embankment loads	(128)
5.4.3	Feature and prediction of lateral deformation with depth for embankments	(129)
5.5	Summary	(132)
	Literatures	(133)
6	Design method for piled embankments	(136)
6.1	General	(136)
6.2	Design method for piled embankments	(136)
6.2.1	Design of embankment piles	(136)
6.2.2	Design of plastically bearing pile	(136)
6.2.3	Design and calculation of pile cap	(140)
6.2.4	Design and calculation of geosynthetic materials	(140)
6.2.5	Design for PTC pipe pile composite foundation under embankments	(141)
6.3	Field tests of piled embankments on soft ground improvement in expressway engineering	(142)
6.3.1	General	(142)
6.3.2	Field test site I	(143)
6.3.3	Field test site II	(147)
6.4	Summary	(151)
	Literatures	(151)
7	Research conclusions and prospects	(152)
7.1	Conclusions	(152)
7.2	Prospects	(154)



1 绪论

1.1 引言

近年来,我国基础设施建设进入了快速发展的阶段,公路建设方兴未艾,截至 2008 年底全国公路通车总里程达 373 万公里,其中高速公路已超过 6 万公里。国家“十一五”规划指出,“我国将进一步完善公路网络。重点建设国家高速公路网,基本形成国家高速公路网骨架。继续完善国道、省道干线公路网络,打通省际间通道,发挥路网整体效率。”我国幅员辽阔,地质条件复杂,特殊地基处理是公路建设中的关键问题之一。建于东部沿海地区的高速公路地基经常遇到淤泥、淤泥质黏土等饱和软黏土的不良地质条件。软土的物理、力学性质很差,具有高含水量、高压缩性、低强度等特点,在工程实践中必须采取特殊的地基处理方法进行处理^[1-4]。

目前常用的软土地基处理方法有置换、排水固结、灌入固化物、振密挤密、加筋等^[5],主要包含堆载法^[6]、真空预压^[7,8]、塑料排水板法^[9,10]、水泥土搅拌桩法、加筋法^[11]等。软土地基上桥头段沉降较大,形成桥面和路面的高差,产生“桥头跳车”现象。采用水泥搅拌桩等方法处理桥头段软土地基,对于深厚软土地基,其加固深度受到限制。桩承式加筋路堤具有施工质量易控制、施工速度快、工后沉降及不均匀沉降小、处理深度大、复合地基承载力大、造价比较适中等优点,在高速公路软基处理中得到了重视,并有初步的应用,但是缺乏较系统的理论分析研究。

近些年来,国内外在地基处理技术方面发展很快,涌现出了一些新型的地基处理的思路和方法^[12-14],主要体现在以下两个方面:第一个方面是两种或两种以上的地基处理方法的综合应用,如水泥土搅拌桩与塑料排水板^[15]、桩与加筋土垫层^[16]、真空预压与堆载^[17]、碎石桩与 CFG 桩^[18]以及其他各种方法的联合使用^[19,20,22],因为每一种处理方法都有其适用范围和优缺点,且不是万能的,综合两种或两种以上地基处理方法,可以发挥各自的优点,达到最合理、最优的地基处理效果;第二个方面就是在技术不断发展的基础上,开发出新型的施工机械、施工工艺以及新型材料和监测检测技术,如夯扩桩^[23]、钉形水泥土搅拌桩^[24]、双向水泥土搅拌桩^[24]等。本书对第一个方面的四种处理方法概述如下。

1) 粉喷桩联合塑料排水板处理方法

粉喷桩复合地基处理方法自从瑞典工程师 Kjeld Paus 1967 年发明以来,在各类软土地基加固工程中得到了广泛的应用^[25]。大量工程实践表明,粉喷桩法具有施工简单,快速,振动小等优点,能有效地提高软土地基的稳定性,减少和控制沉降量。然而粉喷桩价格昂贵,深部处理效果不佳(有效加固深度一般 $<15\text{m}$),因而限制了该方法的大量应用,另一方面,在施工过程中常出现意想不到的问题,如:①当存在临空面时,粉喷桩施工会引起边坡失稳;②在已有构筑物附近施工,会引起地面开裂,构筑物受损等现象;③施工完后的粉喷桩会突然下沉等。

排水固结法也是一种加固软土地基经济有效的方法,它是先在软土地基中设置排水板或砂井,增大软土的渗透性并形成排水通道,在上覆荷载作用下软土地基排水固结,从而提高软土地基的强度。该方法简单、经济,但排水速度慢、工期长、效率低。



把排水固结法和粉喷桩法两种独立的软土地基技术有机结合起来,变不利因素为有利,同时发挥各自优点,形成一种新的实用地基处理工法^[15]。刘松玉教授等^[26-29]在现场及室内试验、理论分析和数值模拟的基础上对该课题进行了系统分析,得出了以下结论:利用粉喷桩施工时短时的侧向压力排水,提高桩周土的强度;利用粉喷桩施工时的扩张作用,产生劈裂作用、增大桩周土的渗透性,加快复合地基强度的提高;利用排水板的排水排气作用,提高深部粉喷桩施工的有效性(强度);提高粉喷桩和桩周土组成的复合地基强度;可较大幅度加大粉喷桩间距,从而节省工程投资。该方法已成功在江苏淮盐高速公路上得到应用,同济大学叶观宝等^[30]也开展了这方面的研究工作。

2) 真空预压联合堆载处理方法

堆载预压加固软基的效果取决于堆载的大小和超静孔压的消散程度,有时为了达到加固效果,需要较大的堆载,但一次施加的堆载又不能超出软基的强度,因而堆载速度不能太快,预压时间相对较长。同时考虑到路堤的稳定性问题,不能快速加载,应制约工程的进度,因此施工工期很长,影响了工程投资的经济性^[31,32]。

真空预压联合堆载法是在真空预压和堆载预压法基础上发展起来的^[33,34],通过真空压力(负压)和堆载(正压)使土体中的孔隙水压力产生不平衡的水压力,孔隙水在这种不平衡力的作用下通过竖向排水体逐渐排出,使土体产生固结变形,具有真空预压和堆载预压的双重加固效果。堆载过程中,地基土会发生侧向挤出变形,但在真空荷载作用下,地基产生侧向收缩变形,与堆载产生的侧向挤出变形相抵消。另一方面,真空荷载作用下地基土已发生固结,强度有所增长,可以使堆载速度很快而不发生失稳破坏。真空预压联合堆载的方法因其明显优点在高速公路软基处理中得到较多的使用^[35]。

3) 粉喷桩联合土工格栅处理方法

单纯用土工织物垫层来处理软土地基,其沉降控制效果并不理想,仅用水泥土桩复合地基,要使桩承担主要上部荷载,桩必须紧密布置,否则路堤顶面可能产生高低不平,影响路面的使用性能。水泥土桩作为复合地基中的竖向增强体,分担大部分外荷载并将荷载传到深层土中,而在水泥土桩顶平铺土工织物形成的复合土体垫层,可以促进桩土共同作用,强化群桩的整体效果,提高地基承载力,有效阻止地基土体的侧向滑移,从而可增大桩间距,达到良好的技术效果和经济效益^[36,37]。Reid^[38]和Buchanan^[39]首先介绍了用这种技术解决软土地基桥头跳车问题,Card^[40]也报道了类似的方法在某桥头软基处理中的应用。韩杰^[41,42]介绍了该方法在美国的应用现状,并进行了总结分析。国内也有类似处理方法应用的报道^[14,43-45]。

4) 桩承式加筋路堤法

对于一些特殊条件下的软基处理情况,如深厚软土地基,工后沉降要求严格(高速公路、高速铁路)、工期要求紧、不均匀沉降要求高(扩宽工程)以及其他环境各方面要求比较严格的时候,上述的地基处理方法都受到了一定程度的限制,因此以预应力管桩、CFG桩、低强度素混凝土桩等为代表的刚性桩复合地基受到广泛的重视,并得到了初步的应用。通常这种刚性桩复合地基要配以碎石加筋垫层,充分利用刚性桩的承载性能,这种复合地基充分利用了一般刚性桩复合地基和加筋地基的优点,可以称为加筋刚性桩复合地基,本书简称为桩承式加筋路堤体系。桩承式加筋路堤具有施工质量易控制、施工速度快、工后沉降及不均匀沉降小、地基处理深度大、复合地基承载力大、造价比较适中等优点。

PTC 预应力薄壁管桩是由专业厂家采用先张法预应力工艺和离心成型。蒸汽养护而成,



是一种细长空心等截面预制混凝土构件。预应力管桩是预应力技术和离心制管技术相结合的产物,有如下一些突出优点^[46]:①单桩承载力高,造价低,经济性好;②管桩的规格多,配桩极为方便,设计选用范围广,对桩端持力层起伏变化大的地质条件适应性较强;③工厂内部生产,流水线制造,产品质量稳定可靠,标准化程度高;④桩身混凝土强度高,耐压耐锤击性好,贯穿能力强,贯入性好,特别适应在复杂岩土地基工程中的应用;⑤施工文明,现场整洁,可以减少对周围环境的污染。

CFG 桩(Cement Fly-ash Gravel Pile)是水泥粉煤灰碎石桩的简称^[47]。它是由水泥、粉煤灰、碎石、石屑或砂加水拌和形成的高黏结强度桩,和桩间土、褥垫层一起形成的复合地基。

CFG 桩复合地基可以通过改变桩长、桩距、褥垫层厚度和桩体材料配比来调整软土工程性质,可调性高、变形小、施工简单、造价低。它能最大限度地利用 CFG 桩本身的单桩承载力的作用,充分发挥桩体材料的潜力,达到控制沉降的目的,又可充分发挥天然地基土的作用,达到疏化桩基,有效地降低工程造价的目的。这种复合地基的缺点在于:一是造价高,二是施工扰动大。不过只要通过合理设计,精细施工,就可以避免这些缺陷,达到经济合理的目的。

1.2 桩承式加筋路堤在高速公路软基处理中的应用现状

1.2.1 刚性桩复合地基研究现状

本书所指桩承式加筋路堤中所采用的刚性桩指 PTC 预应力管桩复合地基、CFG 桩复合地基和低强度素混凝土桩复合地基等。刚性桩复合地基在工业与民用建筑工程中得到了广泛的应用,并取得了大量研究成果。与常规桩基不同,刚性桩复合地基考虑了土体的承载作用,龚晓南教授^[5]对刚性桩复合地基进行了如下定义:刚性的桩与土共同承担上部荷载,考虑了桩土的共同作用的复合地基。宰金珉教授^[48]将这类地基定义为复合桩基,即按大间距(5~6 倍桩径甚至以上)稀疏布置的低承台摩擦群桩或端承作用较小的端承桩与承台底土体共同承载的、纯桩基与天然地基之间的过渡型的新型基础形式。

刚性桩复合地基的发展同复合地基的发展一样也是逐步发展起来的。在国际上,Burland^[49]首先提出“减沉桩”的概念:认为桩距扩大,利用少数桩就可以把筏沉降减小到可以接受的程度。Hain 和 Lee^[50]用理论的方法验证了这一设计思想的可行性。Hooper^[51]用有限元分析表明具有较大竖向刚度的地基中桩体并不是越多越好。Cooke^[52]作了模型试验,验证了减沉桩的设计思想。Fredriksson 和 Rosen^[53]报道了在软黏土中考虑桩、承台共同承担荷载的桩筏基础设计实例,承台始终承担着一一定的荷载。瑞典的 J & W 设计咨询研究院将减沉桩的设计思想大力推广,并应用于工程中。H. G. Polous^[54]就减沉桩提出了沉降计算方法。

在我国,黄绍铭、裴捷等^[55,56]将减沉桩的设计思想用于多层建筑工程中,并提出一套适用于软土的设计计算方法。赵锡宏、董建国等^[57]将沉降控制理论应用于高层建筑中,提出了高层建筑桩箱(桩筏)基础沉降计算简易方法、半理论半经验方法。管自立^[58]在实际工程中应用“疏桩基础”,使摩擦桩体采用大桩距,充分发挥其承载力,同时又可达到沉降控制的目的。侯学渊、杨敏^[59]为“减沉桩”的设计思想在工程中的推广与应用作了大量的工作。

宰金珉^[60,61]根据大尺寸模型试验和桩土承台非线性数值模拟分析的结果得出:对于大间距桩基,单桩的非线性工作性状在群桩的非线性性状中占主导地位,以单桩 P - S 曲线的特征来反映群桩中各桩的非线性性状不仅可行而且偏于安全,并提出对单桩取用极限承载力的设



计思想,形成桩土荷载分担明确的整体承载力与沉降量双重控制下的复合桩基设计方法。还对基于条形和圆形基础下的极限承载力的研究,结合滑动土体绕桩时极限阻滑力的理论解答,导出了复合桩基承台底土的极限承载力由于桩的遮帘作用而获得提高值的理论解,并对复合桩基的沉降计算进行了研究。按塑性支承桩概念设计的某图书馆工程,其桩基础将桩承受到极限荷载,充分利用地基土承担荷载,桩基础工程成本共节省 30%,说明复合桩基运用的经济合理性。对于竖向静荷载作用下刚性桩复合地基的研究已取得了丰硕的研究成果,郑刚^[62]、武思宇^[63]等学者还开展了水平荷载和动荷载作用下刚性桩复合地基性状的研究工作。

1.2.2 桩承式加筋路堤加固高速公路软土地基应用现状

以上主要阐述了刚性桩复合地基在工业与民用建筑中的应用,这种情况下通常采用桩筏(板)的形式,通过筏(板)将上部荷载充分传递给桩,如果直接将这种形式应用到路堤上,则造价过于昂贵。所以刚性桩复合地基应用到高速公路中通常会采用两种形式:第一种形式,在桩顶(通常是预应力管桩、CFG 桩等刚度较大的桩)设置一个桩帽,增加承受路堤荷载的面积,将路堤填土的大部分荷载通过填土中的土拱效应传递到桩体,再传递到下卧土层中;第二种形式,为了尽可能的将桩间距拉大,在上部填土和桩头之间可以设置一层或多层加筋材料以将更多的荷载传递到桩上,如图 1-1(a)所示,这种基础可以称之为桩承式路堤(Piled embankment)^[41,42]。这种地基处理形式在国外有较广的应用,尤其是在英国、美国、德国、日本、瑞典和挪威等发达国家有着较广泛的应用。

1970 年,日本北海道的堤岸改造工程中就采用了混凝土桩和木桩加土工织物的复合地基形式。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,地基所经之处有一片地下水位很高、承载力很低的深厚软黏土,为使新地基与既有干线地基间的沉降差保持最小,考虑到工期及其他地质条件的影响,经多方案试验比较,最终决定采用“带帽钢筋混凝土预制桩+土工织物(geotextiles)”的路堤填筑技术,并且取得了非常好的技术经济效果^[64]。

Card 等^[64]介绍了在伦敦港区陆域采用“带帽钢筋混凝土桩+土工织物以及散粒材料复合垫层”的技术处理路堤下深达 7m 的冲积层软土的情况,该路名为 Albet Dock Spine,修建于港区轻便铁路旁边,设计的复合垫层用来将 85% 的路堤荷载转移到桩帽上。采用这种方法处理后的地基非常稳定,保证了路堤的快速填筑,经过 12 个月,路堤即全部填筑完成。这种地基处理方法在 1987 年到 1997 年期间在美国也有大量的应用^[65],都取得了非常好的技术经济效果。

Alexiew 等^[66,67]报道了这种桩承式加筋路堤在德国高速铁路地基处理中的大量应用。1994—1995 年修建的 Magdeburg 到 Berlin 的高速铁路,设计时速为 160~210km/h,采用桩承式加筋路堤,还有 Rathenow(1997),Harper-Mühlenbach(1988-1999),Paulinenaue(2003)和 Büchen(2003)等高速铁路工程都采用了这种刚性桩复合地基。

在国内,沪宁高速公路拓宽工程^[68]、杭甬高速公路拓宽工程的一期工程^[69],上海 F1 赛车场软土地基^[70]也都采用了桩承式加筋路堤的处理形式。饶为国等^[71]就桩-网复合地基的沉降机理和设计方法进行了试验研究和理论分析;刘汉龙、费康^[72]等对现浇混凝土薄壁管桩在高速公路软基处理中的应用进行了系统的研究和分析;陈云敏、贾宁^[73]通过对土拱效应的理论分析、许峰^[74]通过模型试验对桩承式加筋路堤的性状作了较深入的分析。



另一种形式,就是采用 CFG 桩(或低强度素混凝土桩),通过合理的设置垫层的材料、厚度以及调整桩间距,将更多的荷载传递到桩体中去,如图 1-1(b)所示。

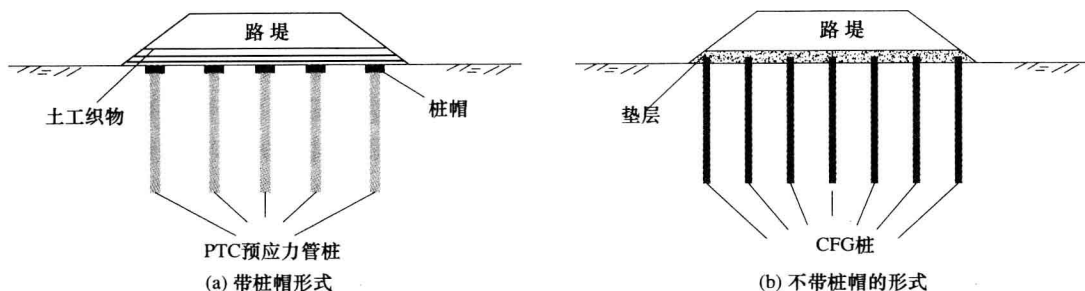


图 1-1 桩承式加筋路堤的基本形式

曾开华等^[75]报道了杭(杭州)宁(南京)高速公路低强度混凝土桩处理的情况。通过路堤填筑过程中的现场试验观测,发现这种复合地基处理效果良好,达到了控制差异沉降的目的。梁兵^[66]报道了广东新台高速公路某段拓宽工程中这类型复合地基应用情况。采用 CFG 桩复合地基处理设计方案,通过现场试验分析发现这种复合地基的承载力能在短时间内迅速提高,大大缩短了工期。刘恒新等^[44]介绍了利用低强度混凝土桩处理“桥头跳车”问题的工程实例。该工程位于浙江省台州市路桥至泽国一级公路淡里陈大桥桥头段,软基深厚,地下水位较高,经采用低强度混凝土桩处理,地基总沉降及侧向变形明显减小,复合地基强度增长较快。洪宝宁^[76]、李海芳^[77]、谢晓华^[78]等均报道了多处采用 CFG 桩成功处理软土地基的实例。

桩承式加筋路堤在高速公路中的应用还刚刚起步,国内还没有统一的设计规范,多凭经验设计,理论远落后于工程实践,因此本书将对此进行全面的理论研究,并提出相关的设计方法。

1.3 路堤荷载下刚性桩复合地基研究现状

桩承式加筋路堤是一个由桩(桩帽)、水平加筋材料和垫层、路堤填土和地基土等几部分组成,这几部分互相作用,互相影响,其工作机理和沉降特性非常复杂,存在以下几个关键问题:桩(帽)-土之间的荷载分配规律;柔性荷载下桩土共同作用的性状;沉降特征、侧向变形特性;刚性桩复合地基承载性能以及设计方法等。

路堤荷载下刚性桩复合地基的性状研究方法目前主要集中在数值模拟、现场试验和模型试验以及简化的理论分析方法。

数值模拟的分析方法主要有轴对称的有限单元方法、二维有限单元法和有限差分方法以及相应三维数值分析方法。Han^[65]采用快速轴对称拉格朗日方法对单桩轴对称模型进行了分析,综合分析了桩、地基土体、格栅和路堤受力系统中格栅拉力、桩土应力比和路堤沉降等,陈仁朋、贾宁等^[73]则针对 Han 计算中未能考虑桩帽的作用以及软土固结这一因素的不足,沿用单桩轴对称计算模型考虑桩体打穿及未打穿软土层情况下地基土固结及桩托板对路堤桩体系承载和变形特性的影响。晏莉^[79]利用快速拉格朗日方法建立了采用搅拌桩的桩承式路堤的平面应变模型,分析了桩的弹性模量、软土的弹性模量、土工合成材料的拉伸模量、桩净间距和土工合成材料的铺设层数这个五个影响因素下的复合地基力学和变形性状。刘红岩^[80]采用 Abaqus 通用有限元分析程序,分别采用轴对称平面有限元方法和平面应变有限元方法,考



虑了桩土界面的摩擦接触,对柔性基础下的刚性单桩复合地基和刚性群桩复合地基进行了数值模拟,并运用模拟的结果对影响复合地基力学性状的因素进行了分析。分析结果显示,柔性荷载下刚性桩复合地基的工作性状同刚性基础下的情况有很大的区别,复合地基中的各个因素对其的力学性状有着直接的影响,并提出了适用于刚性桩复合地基的基础相对刚度系数来比较基础相对于复合地基的刚度。江璞^[81]利用 Ansys 商业软件建立了平面的有限元分析模型,开展了柔性基础下刚性桩复合地基的工作形状研究。考虑到基础的高度、半径和模量,垫层、土体和桩体的模量,置换率以及桩长等因素的影响,并在分析单桩复合地基性状的基础上,进一步采用数值方法分析了路堤荷载下刚性桩复合地基的沉降特性,得到了路堤高度、宽度和模量以及置换率等因素对复合地基沉降特性的影响规律。Jie Huang 和 Jie Han^[82]利用三维的 FLAC 程序建立了典型路段下的带桩帽的刚性桩复合地基的三维数值分析模型,对一个典型工程实例进行了模拟分析。同样,李海芳^[83]也利用典型路段下的三维模型,分析了路堤荷载下刚性桩复合地基的性状。G. Kempton 和 D. Russell 等^[84]利用有限差分法对桩承式路堤分别进行了二维和三维数值计算,分析不同桩帽尺寸下桩体荷载分担比随填土高度的变化规律。

试验的研究方法主要有现场试验和模型试验两种,曾开华等^[75,85]对低强度混凝土桩在高速公路的应用进行了现场试验分析,并提供一些有意义的现场观测结果;许峰等^[74]通过室内模型试验,对带桩帽的桩承式路堤进行了试验研究。J. Martini^[86]、R. Gangakhedkar^[87]、姚红英^[88]、雷金波^[89]等报道了多处类似工程的应用。

简化的理论分析方法主要集中在对桩(帽)-土之间的荷载分担比的计算上,具体如下。

1.3.1 桩(帽)-土之间荷载分配规律

简化的理论分析方法主要有两种基本分析方法。

一是 Hewlett 和 Randolph 提出的土拱理论。土拱效应是由于土介质的不均匀位移引起的。土拱的形成改变了介质中的应力状态,引起应力重新分布,把作用于拱后或拱上的压力传递到拱脚及周围稳定的介质当中。太沙基最早研究了平面土拱效应^[90],他采用活门拱试验(trap door)验证了土拱效应现象,并于 1943 年首先将这种应力转移的现象称之为“土拱效应”。在 Liang 和 Zeng 以及 Chen 和 Martin 等人工作的基础上,Low^[91]曾经用模型试验研究了砂填料在桩梁(桩顶用梁连接)上部的平面土拱效应。Hewlett 和 Randolph^[92]通过模型试验,分析了砂填料在正方形布置下,路堤中的空间土拱效应,给出了解析公式。陈云敏、贾宁等^[73]从单桩有效处理范围内路堤受力平衡出发,改进了 Hewlett 的空间土拱极限分析方法,研究了桩帽大小、桩间距和填料内摩擦角对桩体荷载分担比的影响,并与 Hewlett 的极限分析方法结果作了对比,绘制了桩体荷载等值线图。

另一种解析分析的方法就是基于等沉面假设的 Marston 埋管土压力计算公式^[93],英国规范 BS8006^[94]就是以这种方法为基础给出了桩帽上部土压力计算公式,刘吉福等推导出桩土应力比的公式^[95],许峰等综合考虑桩身侧摩阻力的分布可以得到桩体荷载及沉降计算表达式^[96]。

1.3.2 柔性荷载下桩土共同作用分析

对于一般荷载作用下桩土之间的相互作用。分析方法主要可分为如下几种^[97,98]。