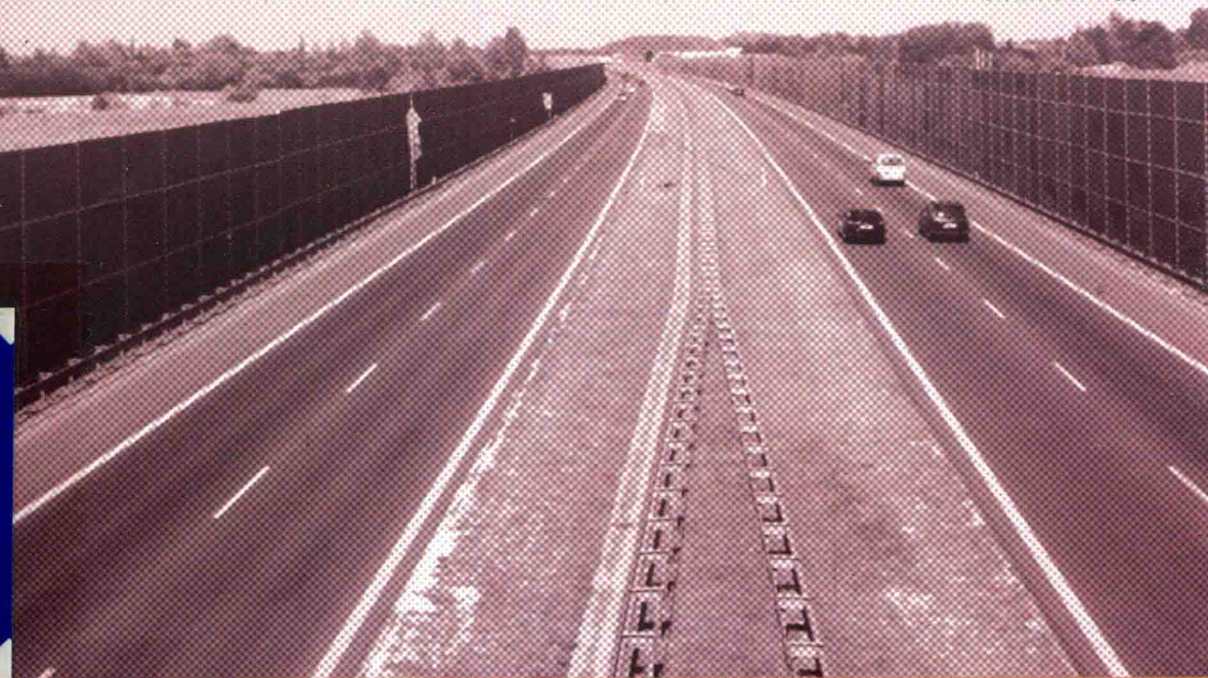


带帽有孔管桩复合地基 荷载传递特性试验研究

雷金波 著



中国建筑工业出版社

帶帽有孔管桩复合地基 荷载传递特性试验研究

雷金波 著

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

带帽有孔管桩复合地基荷载传递特性试验研究/雷金波著. —北京:中国建筑工业出版社,2018.3
ISBN 978-7-112-21923-0

I. ①带… II. ①雷… III. ①人工地基-荷载传递-试验-研究 IV. ①TU472-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 046000 号

带帽有孔管桩复合地基荷载传递特性试验研究

雷金波 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京京华铭诚工贸有限公司印刷

*

开本:787×960 毫米 1/16 印张:12 字数:250 千字

2018 年 6 月第一版 2018 年 6 月第一次印刷

定价:39.00 元

ISBN 978-7-112-21923-0
(31837)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

带帽有孔管桩复合地基作为一种新的复合地基技术，无论是其理论研究，还是工程实践，目前都还处于探索阶段。为此，本书是在前人研究工作的基础上，提出了有孔管桩技术，紧紧围绕桩身开孔引起桩体应力集中现象、有孔管桩极限承载力折减、带帽有孔管桩单桩复合地基承载特性和带帽有孔管桩群桩复合地基荷载传递特性等问题，采用室内模型试验和数值模拟试验相结合的方法，研究桩身开孔方式、开孔孔径对应力集中系数和桩体极限承载力折减的影响，研究竖向荷载下带帽有孔管桩复合地基桩土相互作用、荷载传递、沉降变形及群桩效应等工作性状，分析带帽有孔管桩复合地基工作性状的主要影响因素，达到揭示竖向荷载下带帽有孔管桩复合地基工作性状的目的，为带帽有孔管桩复合地基技术应用推广及其理论研究提供试验基础。本书是深厚软基处理领域中理论和实践相结合的研究成果，不仅对带帽刚性桩复合地基设计和施工有指导意义，而且更有助于带帽刚性桩复合地基进一步的推广应用。

本书可供工程技术人员及管理人员使用，亦可以供高等学校土木工程类专业师生及相关科研人员参考。

责任编辑：杨 允

责任设计：李志立

责任校对：党 蕾

前 言

预应力混凝土管桩作为一种刚性桩,在20世纪80年代初,国外首先将其应用于铁路连接线工程和公路拓宽工程。从20世纪90年代末开始,国内也将预应力混凝土管桩应用于高速公路、高速铁路等深厚软基处理。工程实践证明,作为复合地基竖向增强体,预应力混凝土管桩适合于处理路堤荷载作用的软土地基,已成为深厚软土地基处理中经常选用的一种桩型。带帽刚性桩复合地基技术中的桩体一般采用PTC型或PHC型管桩,目前将管桩用于深厚软土地基处理工程,主要目的是控制地基沉降变形和不均匀沉降变形,提高地基承载力。管桩施工时,特别是采用锤击沉桩方式,地基将产生明显的挤土效应和超孔隙水压力,极易造成邻桩上抬、挠曲、偏移、断桩等一系列不良后果;如果周边存在构筑物(建筑物),还将对构筑物(建筑物)产生不良影响。在静压沉桩施工过程中经常发现,大多数管桩内腔均有水,特别是在一些含水率大的软土地基中,管桩内腔含水更多。分析其原因,主要是由于在管桩沉桩过程中,产生了超孔隙水压力。随着超孔隙水压力的消散,土中水可通过两节管桩的接桩缝隙进入管桩内腔。进入管桩内腔的水越多,地下水位下降越深。这种现象对加速超孔隙水压力消散、降低土中含水率、提高地基承载力、增强地基稳定性等方面均能产生积极作用。

土力学理论指出,饱和土地基产生沉降变形的主要原因是由于土体中孔隙水的排出,因此地基沉降量的大小在很大程度上取决于土中孔隙水排出量的多少。如果能在沉桩过程中,让更多的孔隙水排出、进入到管桩内腔中,一方面在沉桩过程中,可以减轻管桩挤土效应,改善邻桩上抬、偏移、断桩等不良现象,降低对邻桩造成的危害;另一方面也有助于增加沉桩施工期间地基沉降量,减少地基工后沉降量。

对修建于深厚软土地基的高速公路、高速铁路等工程来说,控制地基沉降变形,更多的是要控制其工后沉降量。倘若能在路堤施工期间产生更多的沉降量,即产生更多的施工期沉降量,则必将减小其工后沉降量,从而达到控制沉降变形和工后沉降量的目的。要想产生更多的施工期沉降量,应在管桩施工期间将土中孔隙水尽可能多地排出,降低土的含水率。同时,随着土体含水率减少,土的抗剪强度也可以得到提高,从而提高地基承载力,增强地基稳定性。

工程中通常采取设置应力释放孔、合理安排沉桩顺序,以及控制沉桩速率等手段来减轻静压沉桩超孔隙水压力的不利影响,但这些措施并没有从桩体自身结构上改进。事实上,可以通过改变桩身形状或桩身结构,有效减轻沉桩效应对周

围环境的不利影响。

如何才能更有效地减轻沉桩过程中的挤土效应、加速超孔隙水压力的消散、增加施工期间地基沉降量呢?如何让土体中更多的孔隙水进入管桩内腔?目前在带帽刚性桩复合地基研究中,无论是工程实践,还是理论研究,桩体均为常规预应力混凝土管桩(无孔)。由于桩、土刚度相差太大,桩体自身承载力一般不是主要问题。为了让沉桩过程产生的土中孔隙水更多地进入管桩内腔,可以采取适当降低管桩承载力的方案,对现有的常规预应力混凝土管桩结构进行改造。依照这种思路,作者提出采用有孔管桩替代常规无孔管桩的方案,提出了有孔管桩技术,目的就在于要进一步减轻管桩沉桩过程中的挤土效应和超孔隙水压力的不利影响。

有孔管桩技术功效主要是:在管桩施工期,由于管桩挤土效应产生了超孔隙水压力,土中孔隙水可以通过桩孔进入管桩内腔,降低超孔隙水压力最大值,减轻沉桩挤土效应和超孔隙水压力对邻桩造成的不利危害;在施工间歇期,随着超孔隙水压力的消散,土中孔隙水也可以通过桩孔进入管桩内腔,从而加速超孔隙水压力消散,节省工期。若地基含有淤泥质土层,淤泥也可通过桩孔流入管桩内腔;若是管桩内腔集水比较多,则可采取抽水方式将其排除。随着桩内水位降低,土中孔隙水又会进入管桩内腔,从而进一步降低土的含水率,提高土的抗剪强度,增强地基稳定性。因此,只要将有孔管桩代替 PTC 管桩,即可形成带帽有孔管桩复合地基技术。这种新型管桩复合地基技术,由于桩周土含水量的减少,其土体抗剪强度必定提高,从而增强带帽有孔管桩复合地基承载力。

本书采用室内模型试验和数值模拟试验相结合的方法,研究桩身开孔引起桩体应力集中现象、有孔管桩极限承载力折减、带帽有孔管桩单桩复合地基和带帽有孔管桩群桩复合地基荷载传递特性等问题,研究桩身开孔方式、开孔孔径对应力集中系数和桩体极限承载力折减的影响,研究竖向荷载下带帽有孔管桩复合地基桩土相互作用、荷载传递、沉降变形及群桩效应等工作性状,达到揭示竖向荷载下带帽有孔管桩复合地基工作性状的目的,验证桩身开孔有利于提高桩周土体抗剪强度,使其能主动承担更多荷载,从而提高带帽有孔管桩复合地基承载力,为带帽有孔管桩复合地基技术应用推广及其理论研究提供试验基础。

本书是作者近年来在有孔管桩技术、带帽有孔管桩复合地基等方面取得的一些研究成果和心得体会,在此感谢国家自然科学基金项目(51268048、51768047)、江西省自然科学基金项目(20171BAB206059)、江西省教育厅科研基金项目(GJJ170601、GJJ14527)和南昌航空大学基金项目(EA200500147)等资助!感谢陈科林、乐腾胜、周星、廖幼孙、李壮状、杨金尤、柳俊、易飞、杨康、万梦华、刘智、陈超群、段华雍和邢旭亮等研究生为本书付出的辛苦工作!感谢南昌航空大学土木建筑学院领导和老师的关心和帮助!感谢南昌航空大

学学术文库出版基金的资助！

感谢本文参考文献中出现的作者和机构，他们的成果是本书的基础！

由于作者水平有限，书中难免会有缺陷和错误，恳请广大读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 带帽刚性桩复合地基研究现状	2
1.2.1 室内外试验研究	2
1.2.2 理论研究	4
1.2.3 数值模拟研究	5
1.3 有孔管桩技术的提出	8
1.4 本书主要内容	11
1.5 研究思路	12
第 2 章 有孔管桩应力集中系数试验	14
2.1 概述	14
2.2 试验概况	14
2.2.1 试验目的	14
2.2.2 理论简述	14
2.3 模型桩设计	15
2.4 开孔方式	16
2.4.1 有孔管桩开孔方式	16
2.4.2 应变片布置方案	17
2.5 测试内容与试验方法	19
2.5.1 测试内容	19
2.5.2 试验方法	19
2.6 有孔管桩试验结果与分析	19
2.6.1 各桩型开 5mm 孔径应力集中系数分析	20
2.6.2 各桩型开 6mm 孔径应力集中系数分析	24
2.6.3 各桩型开 8mm 孔径应力集中系数分析	28
2.6.4 各桩型开 10mm 孔径应力集中系数分析	32
2.6.5 各桩型四种开孔孔径应力集中系数综合对比分析	36
2.7 本章小节	38

第 3 章 有孔管桩轴向极限承载力试验	40
3.1 试验概况	40
3.1.1 试验目的	40
3.1.2 模型桩设计	40
3.1.3 开孔方式	40
3.2 测试内容与试验方法	40
3.2.1 测试内容	40
3.2.2 试验方法	40
3.3 试验结果与分析	41
3.3.1 各桩型开 5mm 孔径极限承载力分析	41
3.3.2 各桩型开 6mm 孔径极限承载力分析	43
3.3.3 各桩型开 8mm 孔径极限承载力分析	44
3.3.4 各桩型开 10mm 孔径极限承载力分析	45
3.3.5 各桩型四种开孔孔径轴向极限承载力综合对比分析	46
3.4 本章小结	52
第 4 章 有孔管桩室内静载荷模型试验	53
4.1 概述	53
4.1.1 试验依据	53
4.1.2 试验目的	54
4.2 试验内容	54
4.2.1 模型试验箱制备	54
4.2.2 土样制备	54
4.2.3 模型桩制备	56
4.3 仪器测试原理与测点布置	57
4.3.1 桩身应力应变测试原理	57
4.3.2 PVC 管模型管桩力学参数测定	58
4.3.3 桩身应变片布置	60
4.3.4 桩身轴向应变测定	61
4.3.5 百分表的布置	62
4.4 试验方法	62
4.4.1 加载装置	62
4.4.2 加载方法	63
4.5 试验数据成果与分析	63
4.5.1 各种管桩荷载沉降	63
4.5.2 各桩型桩身轴力	67

4.5.3 各桩型桩侧摩阻力	70
4.6 本章小结	72
第5章 带帽有孔管桩单桩复合地基承载特性模型试验	74
5.1 概述	74
5.2 试验目的	74
5.3 试验装置和试验材料	74
5.3.1 试验装置	74
5.3.2 试验材料	76
5.4 试验量测设备和测点布置	78
5.4.1 试验测设设备	78
5.5 试验步骤	81
5.5.1 桩身应变片的粘贴	81
5.5.2 软土地基填筑	83
5.5.3 复合地基静载荷试验	85
5.6 试验成果与分析	88
5.6.1 荷载沉降分析	88
5.6.2 桩身轴力分析	94
5.6.3 桩周土压力分析	97
5.6.4 桩侧摩阻力分析	101
5.6.5 桩土荷载分担比与桩土应力比分析	102
5.7 本章小结	105
第6章 带帽有孔管桩单桩复合地基承载特性数值模拟试验	107
6.1 概述	107
6.2 FLAC3D 软件简介	107
6.3 计算模型的建立	108
6.3.1 模型简介	108
6.3.2 模型边界条件和初始条件	112
6.3.3 模型加载	113
6.4 数值模拟结果分析	118
6.4.1 荷载沉降分析	118
6.4.2 桩身轴力分析	120
6.4.3 桩周土压力分析	123
6.4.4 桩侧摩阻力分析	128
6.4.5 桩土荷载分担比与桩土应力比分析	130
6.5 模型试验结果与数值模拟结果对比	132

6.5.1	荷载沉降对比	132
6.5.2	桩身轴力对比	133
6.5.3	桩周土体压力对比	134
6.5.4	桩土荷载分担比与桩土应力比对比	134
6.6	本章小结	136
第7章	带帽有孔管桩群桩复合地基承载特性试验	138
7.1	室内模型试验	138
7.1.1	试验概况	138
7.1.2	试验结果分析	143
7.2	数值模拟试验	160
7.2.1	模型的建立及求解	160
7.2.2	模拟试验数据后处理	162
7.2.3	数值模拟结果分析	162
7.3	室内模型试验与数值模拟成果对比分析	169
7.3.1	荷载沉降对比	169
7.3.2	桩身轴力对比	170
7.3.3	桩帽间土压力对比	171
7.3.4	桩土应力比对比	171
7.4	本章小结	172
参考文献		174

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

从 20 世纪 80 年代初,带帽刚性桩复合地基在国外的一些公路和铁路工程中首先得到应用,例如伦敦 Stansted 机场的铁路连接线加宽工程^[1]、巴西圣保罗北部的公路拓宽工程^[2]以及荷兰的部分高速公路^[3,4]等。从 20 世纪 90 年代末,国内开始将带帽刚性桩复合地基应用于高速公路拓宽工程,例如沪杭甬高速公路(红垦至沽渚段)拓宽工程^[5]和沪宁高速公路(昆山段)拓宽工程^[6],之后在京珠高速公路(广东段)^[7]、苏州绕城高速公路(太仓段)^[8]等新建高速公路中得到了推广应用。在公路、铁路和水利工程建设中,带帽刚性桩复合地基作为一种有效的地基处理方法得到了越来越广泛的应用,逐渐成为一种主导的深厚软土地基处理方式。由于带帽刚性桩复合地基主要应用于路堤软基处理,故有时也将这种路堤称为桩承式加筋路堤。

在软土地基中按一定间距打设刚性桩(桩体主要采用预应力混凝土管桩),桩顶通过钢筋笼配置桩帽,再在桩帽顶面铺设一定厚度的碎石褥垫层或加筋垫层,从而形成带帽刚性桩复合地基。带帽桩与传统建筑上的桩基础相比,取消了桩顶承台,而以面积较小的桩帽代替,如图 1-1、图 1-2 所示。

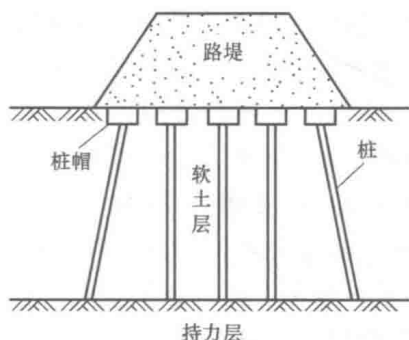


图 1-1 常规带帽桩路堤

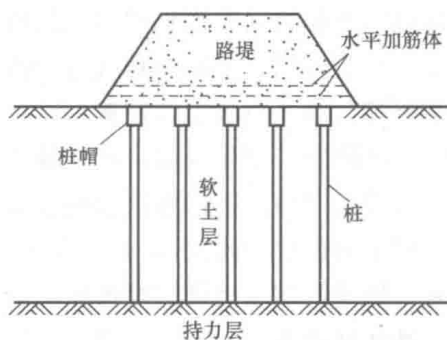


图 1-2 带帽桩加筋路堤

经过近 50 年的发展,带帽刚性桩复合地基技术已成功应用于路堤拓宽工程、新建高速公路工程以及桥头、通道、涵洞等结构物与软基相连的地基处理工程,它适合于处理柔性荷载(如路堤荷载)作用的深厚软土地基,是交通工程一种具有良好应用前景的地基处理方法。尽管带帽刚性桩复合地基工程目前应用较多,

但其工作性状研究还不够成熟, 仍需加大研究力度, 同时也需要对地基处理新技术进行探索。

1.2 带帽刚性桩复合地基研究现状

1.2.1 室内外试验研究

Terzaghi 最早研究了平面土拱效应, 通过试验证明了土拱的存在并得到了土拱存在的条件, 受力分析时假设位于净跨度的两边缘点沿着竖向平面传递剪应力^[9]。Hewlett 等用室内模型试验也验证了土拱的存在, 并进行了三维土拱效应极限状态分析^[10], 陈云敏等(2004)改进了 Hewlett 的极限分析方法^[11], 并于 2007 年结合室内模型试验分析了平面土拱效应、路堤的沉降变化规律和桩体荷载分担情况^[12]。Vega-Meyer 结合现场测试分析了加筋路堤的沉降变化规律, 并讨论了筋材的应变变化规律和土体应力分布规律^[13]。夏元友等结合现场实测结果分析了采用刚性桩加固软土地基时路堤中的土拱效应, 研究了孔隙水压力和路堤沉降变化规律^[14]。丁桂伶等对柔性基础下带帽 CFG 桩复合地基工作特性进行了试验研究, 得到了带帽桩复合地基沉降变形及桩土荷载分担特性^[15]。高成雷等依托沪宁高速公路(上海段)拓宽工程试验段, 进行了拓宽路堤下带帽刚性疏桩复合地基应力特性的现场试验, 根据试验数据分析了桩-土应力水平和分布特征^[16]。

何良德等结合苏-沪高速公路疏桩复合地基处理工程, 进行了带帽 PTC 管桩和带帽 PTC 管桩复合地基的现场足尺试验研究^[17]。根据试验结果, 研究了桩身桩帽桩间土的相互作用机理和承载特性, 分析了桩帽、桩间土和桩端承载的滞后效应, 以及桩帽、桩间土对桩身的消减作用。认为管桩复合地基的第 1 阶段桩身控制沉降, 第 2 阶段土体控制沉降, 探讨了桩帽-桩间土荷载分担比及应力比在不同沉降阶段的变化规律。雷金波等开展了带帽和无帽单桩复合地基现场足尺试验, 对带帽 PTC 管桩复合地基承载能力、荷载传递、桩侧土压力、桩侧摩阻力、桩土荷载分担比及桩-土应力比等力学性状进行了讨论, 研究了带帽刚性疏桩复合地基的荷载沉降、载荷板与桩体的沉降差、地表土应力分布特征、剖面沉降等性状规律^[18-20]。试验结果表明: 带帽长桩型复合地基较带帽短桩型复合地基易于控制地基沉降变形和提高地基承载力, 在设计荷载下带帽短桩型复合地基较带帽长桩型复合地基更能发挥地基土承载作用, 桩帽下土体与桩帽间土体承载性能及发挥程度不同。由于桩帽能均化桩顶应力, 起到刚性板作用, 带帽桩体与桩帽下土体能产生近似等量的竖向变形, 同时保证了垫层的整体效应。试验结果能为带帽 PTC 管桩复合地基理论研究提供合理的试验依据, 完善带帽刚性疏桩

复合地基工作性状研究以及优化工程设计。赵阳采用模型试验方法,对带帽刚性桩桩身轴力以及桩侧摩阻力分布情况进行了研究,得出在桩帽以下的桩体存在负摩阻力区域,并在桩长约三分之一的位置出现等沉面^[21]。吴燕泉通过室内模型试验获得了带帽刚性桩在竖向荷载作用下桩身轴力、桩侧摩阻力的分布变化情况以及在极限荷载作用下桩周土体的破坏模式,揭示了带帽刚性桩与土体的作用机理^[22]。

余闯通过现场试验对路堤荷载下 PTC 刚性桩复合地基的性状进行了研究,并指出海相软土中 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^[23]。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。

高成雷等依托沪宁高速公路(上海段)拓宽工程试验段,进行拓宽路堤下带帽刚性疏桩复合地基应力特性的现场足尺试验^[24]。研究结果表明:桩体应力集中效应与路堤填筑高度和桩的位置有关。桩帽底土承载能力的发挥要求桩体具有较强的应力集中效应;桩帽顶应力与桩帽底应力的显著差异,表明桩帽底土接近脱空状态。路堤填筑过程中桩-土应力不断调整,实测桩-土应力比的变化范围为1~12。实测桩-土应力比不能准确地反映拓宽路堤下带帽刚性疏桩复合地基的应力特性,建议采用桩土应力比作为桩体应力集中效应的评价指标。

王虎妹对三个不同地点的带帽刚性疏桩复合地基工程进行试验监测,根据试验监测数据结果进行分析,可见褥垫层不同厚度对带帽刚性桩承载力和沉降变形的影响:设计褥垫层在某一合适的厚度,能有效降低桩身承载力,提高桩间土的承载力,使桩和桩间土合理共同承担荷载,降低复合地基沉降变形,减少地基对基础的应力集中,对工程实际有一定的指导意义^[25]。

黄生根根据现场试验结果,研究了承受柔性荷载的带桩帽 CFG 桩复合地基中桩的承载特性、土的受力特性以及桩帽、桩和土之间相互作用规律^[26]。试验结果表明:极限状态下,带桩帽的 CFG 桩复合地基中桩承载力的发挥程度比地基土承载力的发挥程度略大;正常使用状态下,桩承载力的发挥程度远大于土承载力的发挥程度,桩的安全储备小于土的安全储备。

万年华结合武汉某高速公路软基处理的实际情况,从设计和施工两方面重点介绍预应力管桩在公路软基应用中需注意的内容。由于构筑物处反开挖施工桩帽、承台或构筑物一侧土方填筑高度高出管桩施工作业面,在重型施工机械行走碾压时,极易造成边坡失稳,出现预应力管桩的偏位、倾斜甚至断裂等各类施工质量问题^[27]。

谭儒蛟等基于原位监测数据,系统分析了带帽 PTC 桩网复合路基的锤击成桩扰动效应、复合桩土应力比、超孔隙水压力、施工期路基沉降及水平变形特征等规律。分析结论可供类似工程刚性桩复合地基的成桩工艺选择、桩型设计参数优化、路基填筑速率及变形控制等的设计、施工借鉴参考^[28]。

段晓沛等认为桩土荷载分担比是 PTC 管桩复合地基设计中的重要参数。结合天津软土地区 3 组 PTC 管桩复合地基静载试验,对复合地基在工作状态及极限状态下侧摩阻力和端阻力承担外荷载的比例进行了研究,分析了桩土荷载分担比,讨论了垫层厚度对桩土荷载分担比的影响,提出了实际工程的垫层厚度,对类似工程具有借鉴意义^[29]。

1.2.2 理论研究

王想勤等在分析路堤荷载作用下刚性桩复合地基中桩帽效应的基础上,通过理论分析、有限元计算、室内模型试验以及现场测试等方法,研究了桩帽以及桩帽尺寸的大小,对刚性桩复合地基中桩土分担比、加筋垫层的应力以及整体沉降特性等的影响^[30]。研究表明:桩帽的存在增加了桩顶与垫层之间的接触面积,起到均化桩顶集中力、减小桩顶向垫层刺入量的作用,使带帽刚性疏桩复合地基控制沉降的能力远好于不带帽刚性疏桩复合地基;桩帽尺寸逐渐增大,桩间土的应力明显减小, Q_s 曲线由“陡降型”向“缓变型”转变,有助于带帽刚性疏桩复合地基整体承载力的发挥,从而提高了刚性桩复合地基的利用效率。

刘苏弦等在对路堤荷载下刚性桩复合地基桩土变形特点进行分析的基础上,针对前人桩间土位移模式存在的不足,提出了改进的位移模式;对桩体和土体进行受力分析,建立了路堤荷载下刚性桩沉降计算方法,该方法能同时考虑桩土相对滑移的因素和土体变形的非同步性;算例分析表明了该方法的合理性与可行性^[31]。

陈昌富等为了给高路堤下带帽刚性疏桩复合地基提供设计依据,针对高路堤下带帽刚性疏桩复合地基荷载传递特点,将带帽桩和桩帽下部分土体视为复合桩体,同时假定复合桩体间土体的位移模式,并考虑高路堤填土的土拱效应和桩帽间土体的成层性,基于变形协调原理,建立了高路堤-复合桩体-桩帽间土体相互耦合的荷载传递模型,推导得到了高路堤荷载作用下带帽刚性疏桩复合地基的桩土应力比和桩土差异沉降计算公式,以工程实例验证了该计算方法的合理性,并分析了桩长、桩间土压缩模量、桩帽截面尺寸、桩间距等因素对桩土应力比的影响^[32]。研究结果表明:桩长、桩间土压缩模量和桩帽截面尺寸对桩土应力比影响显著,而桩间距、填土内摩擦角、填土黏聚力和填土压缩模量对桩土应力比影响较小。

陈仁朋针对桩承式路堤工作性状比较复杂、对路堤-桩-土之间共同工作机理的认识还不是十分清楚的问题,建立了考虑土-桩-路堤变形和应力协调的平衡方程,分析了三者协调工作时路堤、桩、土的荷载传递特性,获得了路堤的土拱效应、桩土荷载分担、桩和土的沉降等结果^[33]。与弹塑性有限元计算结果进行了对比,验证了该计算模型的合理性,同时应用所提出的方法,对杭甬高速公路拓

宽工程进行了分析。

赵明华等根据路堤荷载下复合地基的荷载传递机理及变形特征,综合考虑路堤填土的土拱效应和桩、土的荷载传递性状,采用假定的桩间土位移模式,同时考虑桩土界面的相对滑移和同一深度处桩间土沉降的非同步性,基于典型单元体建立考虑路堤-桩土加固区-下卧层三者变形与应力协调的平衡方程,并求解获得表征桩土复合地基工作性状的桩土应力比及沉降变形解析公式^[34]。

1.2.3 数值模拟研究

吕伟华等采用二维有限元数值计算方法对刚性桩网复合地基加固拓宽道路下软土地基的工作性状进行系统分析。利用经现场实测数据合理性验证过的数值计算模型,分别改变桩网复合地基体系中桩体与加筋体的几何、材料力学条件,考虑不同地基处理方式和加筋布置形式,以路堤顶面新老拼接结合部的横坡改变率为差异沉降控制指标,进行设计参数敏感性量化分析^[35]。

陈富强基于群桩复合地基承载变形特性的数值模拟,研究了群桩复合地基中整体效果的形成条件,获得了考虑桩土共同作用效果的桩的合理间距^[36]。通过改变桩间距、桩长、褥垫层厚度、桩端土性等参数对 CFG 桩群桩复合地基的整体性问题进行了数值模拟。模拟结果表明:桩与桩间土形成整体效果与桩长及桩间距有关,桩长较短时,则要求桩间距比较小。从提高桩间土的承载力看,桩长并不是越长越好,存在一个临界桩长的问题。

朱筱嘉对带帽刚性疏桩复合地基进行数值分析,提出了通过调整桩体中心间距和桩帽尺寸,改变带帽桩复合地基复合桩土应力比的大小,改变桩帽间土体所分担荷载的大小,达到桩帽间土体沉降量的大小满足高速公路工后沉降控制标准的目的,以此作为优化设计的依据,提出了带帽桩复合地基优化设计的一些思路和方法^[37]。

杨德健等采用 ANSYS 有限元软件分析了垫层模量、桩间土模量以及桩间距等因素对复合地基沉降变形的影响^[38]。研究表明:桩间土模量的变化对刚性桩复合地基的整体沉降量影响比较显著,复合地基的整体沉降量随桩间土体模量的增加而减小;桩间距是控制刚性桩复合地基整体沉降量的主要因素之一,地基沉降量随桩间距的减小而减小,但桩间距过小时,对减少刚性桩复合地基整体沉降量的作用并不明显。

郑俊杰等采用数值模拟方法分析了承载板刚度、载荷大小、桩体刚度对应力扩散模式及扩散角的影响,在规范给出的地基沉降计算方法的基础上,考虑复合地基附加应力的实际扩散模式,提出了一种新的复合地基沉降计算模式,并给出了应力扩散角的取值建议^[39]。通过与实测数据的对比,证明该方法比其他方法计算结果更加准确。

吴慧明利用 Algor 有限元程序,对不同刚度基础下复合地基位移场和应力场进行了初步分析。通过现场模拟试验和有限元分析发现,在基础刚度较小的情况下,复合地基中桩和桩间土不再满足协调变形,对复合地基的承载力和沉降变形得出了一些定性的观点,并对柔性基础下复合地基的设计进行了一定的探讨^[40]。但作者对复合地基中桩和桩间土的塑性变形及其三维空间效应未能考虑,使模拟的精确度得不到保证,并且对柔性基础下复合地基中的桩和桩间土竖向变形的不协调性也没有研究。龚晓南等指出在现有的复合地基理论中,大都以刚性基础为前提,没有考虑基础刚度的影响,利用数值方法研究了在不同刚度基础下复合地基中应力场和位移场的差异^[41]。

冯瑞玲等利用 MARC 软件,选择弹塑性本构模型并以线性 Mohr-Coulmb 屈服准则作为屈服条件,将平面问题有限元法用于对路堤荷载作用下的桩体复合地基受力与变形性状研究,分别分析了本构模型中各参数(桩间土、桩体、路堤的变形模量、泊松比、黏聚力及内摩擦角)对复合地基性状的影响^[42]。

张忠坤等通过对路堤下复合地基沉降发展计算方法的探讨,提出了将可考虑填土荷载宽度及桩土非均质性的半解析元法与沉降随时间发展的指数法相结合,进行沉降随时间发展的预测,并将计算结果与实际沉降曲线及根据 Biot 固结平面有限元数值分析结果进行对比,发现半解析元法的数值分析结果是有价值的^[43]。

朱云升等通过有限元方法,考虑复合地基中各种材料的非线性特性,对柔性基础下复合地基的力学性状作了初步的数值模拟分析,找出了柔性基础下复合地基桩土间的荷载分担、荷载沿深度变化和传递、桩土间相互作用、变形特性等力学性状的一些基本规律^[44]。

曾远^[45]、刘国明^[46]等利用 Biot 固结理论,采用非线性有限元法分析了高速公路下复合地基桩长、置换率、桩土刚度比、施工进度对复合地基变形的影响,并从减少差异沉降出发,提出了合理布桩方式。

杨虹等利用弹性、Duncan-Chang 非弹性两种本构模型,将平面问题有限元用于填土路堤下复合地基性状的研究,对复合地基的桩土刚度比、置换率、桩长及路堤刚度对复合地基沉降、侧移及桩土应力比分配的计算结果进行比较和研究^[47]。

王欣等考虑路堤柔性荷载作用下粉喷桩桩身与土上部的位移不协调即桩顶及桩端的刺入变形,采用弹性力学中的 Mindlin 和 Boussinesq 解联合求解粉喷桩复合地基内附加应力和地基沉降,计算结果与工程实例的实测结果吻合较好^[48]。张忠苗等也对柔性承台下复合地基应力和沉降的计算进行了研究,也是利用 Mindlin 解和 Boussinesq 解联合求解柔性承台下复合地基的附加应力,可以得到与实际较为符合的应力分布,同时利用 Vesic 小孔扩张理论计算桩体刺入柔性承