

桩基工程技术进展 2009

刘金砺 主 编
李大展 高文生 汪国烈 副主编

DEVELOPMENT
OF PILE FOUNDATION
TECHNIQUE

中国建筑工业出版社

桩基工程技术进展 2009

中国土木工程学会土力学及岩土工程分会桩基础学术委员会
中国工程建设标准化协会地基基础专业委员会
第九届全国桩基工程学术会议论文集
(2009年8月 甘肃兰州)

刘金砺 主 编
李大展 高文生 汪国烈 副主编

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

桩基工程技术进展 2009/刘金砺主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2009
ISBN 978-7-112-11109-1

I. 桩… II. 刘… III. 桩基础-技术发展-中国 IV. TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 112333 号

本书集中反映了近两年来我国桩基工程技术在试验研究、工程实践和新技术研发方面的新进展, 主要内容包括特殊土地与特殊环境下的桩基础、桩基础理论与试验研究、桩基础设计与工程实践、桩基施工技术与新桩型及基桩检测技术与质量控制五大方面。

本书可供从事岩土工程的科研、设计、施工、质检、勘察和教学人员使用和参考。

* * *

责任编辑 王 梅 戚大庆

责任设计 赵明霞

责任校对 孟 楠 关 健

桩基工程技术进展 2009

中国土木工程学会土力学及岩土工程分会桩基础学术委员会

中国工程建设标准化协会地基基础专业委员会

第九届全国桩基工程学术会议论文集

(2009 年 8 月 甘肃兰州)

刘金砺 主 编

李大展 高文生 汪国烈 副主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京市彩桥印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 38 字数: 948 千字

2009 年 8 月第一版 2009 年 8 月第一次印刷

定价: 80.00 元

ISBN 978-7-112-11109-1

(18353)

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)

前 言

由中国土木工程学会土力学与岩土工程分会桩基础学术委员会和中国工程建设标准化协会地基基础专业委员会联合召开的第九届全国桩基工程学术会议于2009年8月19日至21日在兰州召开。会议论文编审组对应征论文进行了选编,共有83篇论文入选本论文集。

本次会议是首次在西北地区召开的全国桩基学术会议,备受西北地区尤其是兰州地区岩土工程科技工作者的关注,他们撰写了多篇有关黄土、冻土地区桩基工程的论文,折射出我国西部大开发工程建设的发展和技术进步。本次会议论文的第二个特点是随着我国超高层建筑和桥梁工程的发展,超长、超深大直径桩的应用实践中反映出这类桩的荷载传递、沉降变形等的特殊性,由此提出了关于长桩桩基如何考虑其承载变形特点进行沉降计算及如何优化设计等问题。本次会议论文的第三个特点是反映出在桩基工程实践和研究持续发展过程中提出的一些有别于常规认知和值得深入探索的问题,如桩端土刚度对侧阻力的影响;基坑回弹和回弹再压缩对基桩受力和沉降的影响;扩底、侧注浆、后张预应力抗拔桩承载力增强机理;桩侧阻力的退化和异化机理等。本次会议论文的第四个特点是反映桩的施工与检测技术的研发和应用,如:预应力管桩沉桩挤土效应消减控制和深厚砂层中非取土引孔沉桩;全夯扩灌注桩的质量控制技术;后注浆技术的改进和不同土层中注浆增强机理;如何提高灌注桩桩身强度和质量稳定性与后注浆增强效果相匹配;承载力自平衡试桩法、高应变动测法和桩身完整性检测应力波反射法、声波透射法的应用与完善等。

本论文集基本反映了我国近年特别是近两年来桩基工程技术在试验研究、工程实践和新技术研发方面的概况,并在会前成功出版,这归功于广大作者踊跃投稿,岩土工程界大力支持,会议主办、承办、协办单位积极协助,中国建筑工业出版社通力合作,在此谨向论文作者和相关单位和个人表示谢意。限于我们的水平和经验,论文编辑中的缺点在所难免,请作者和读者批评指正。

2009年6月

目 录

一、特殊土地与特殊环境下的桩基础	1
特殊土地桩基础研究与工程进展	汪国烈 滕文川 王 旭 张豫川 2
地表硬土层对饱和黄土中桩基地震动力特性的 影响研究	胡 伟 韩建刚 李光范 20
湿陷性黄土地基中桩基水平承载力的研究与分析	梁守信 莫 庸 滕文川 25
多年冻土桩基负摩阻力研究探讨	林永光 李元曦 32
饱和黄土场地压、拔桩桩身应力变化 的试验与分析	马安刚 张豫川 李 彬 张 斌 38
大厚度自重湿陷性黄土灌注桩负摩阻力沿桩身传递 特征试验研究	黄雪峰 张建华 李 佳 邱 爽 45
自重湿陷性黄土场地上高层建筑地基处理与桩基方案	李 靖 54
考虑震陷和液化时黄土桩基抗震设计的探讨	王兰民 莫 庸 59
兰州地区风化砂岩嵌岩桩竖向承载力的确定	张森安 项龙江 魏永孝 66
桩基在大厚度湿陷性黄土场地特殊性应用的 探讨	赵进堂 马安刚 张豫川 潘家国 71
静压预制桩复合地基在湿陷性黄土地区的 运用	温江红 邵 平 赖忠毅 王效龙 76
青藏铁路多年冻土区桥梁钻孔灌注桩抽芯试验、竖向承载力 分析及稳定性评价	王小军 米维军 曾辉辉 魏永梁 王 旭 85
抗滑桩的应用与发展	王恭先 92
饱和黄土场地基桩的静载试验研究	鲁海涛 王迎兵 滕文川 97
二、理论与试验研究	103
桩和桩基础若干机理与理论问题	刘金砺 104
扩底桩基础抗拔承载特性有限元分析	张金利 阮孝政 王彦合 116
厚填土区桩孔形状对冲孔灌注桩承载特性的影响	郭 杨 崔 伟 124
桩的水平承载力计算 NL 法的程序实现	罗 斌 凌 辉 131
竖直打入花岗土和黏土地基中的高强度混凝土桩的水平支撑力的 研究	李光范 卫 宏 胡 伟 王 宏 夏小兵 136
饱和土中桩的动刚度的 Green 函数解答	丁伯阳 党改红 袁金华 楼可城 140
考虑上部结构作用的桩筏基础非线性共同作用分析	戚科骏 宰金珉 王旭东 149

嵌岩桩竖向承载力分析与评价	续建新	夏小兵	李光范	杨舒	156	
软土地基超长灌注桩的荷载传递和承载力特点	章征				164	
南京江北地区由静力触探确定沉管灌注桩竖向承载力可靠度研究	黄小娟	赵新铭			170	
多支盘桩工作性状的有限元分析	王淑新	汪中卫	王旭东	宰金珉	176	
桩端后压浆对钻孔灌注桩极限侧摩阻力的影响	楼晓明	李德宁	葛宽飞	陈强华	183	
软土地区静压管桩的挤土效应分析	林鹏	张晓衡	黄伟忠	张良太	189	
桩端土刚度和桩长径比对桩侧阻力影响的试验研究	席宁中	刘金砺	于海成		196	
桩端持力层性质改变对桩基地震反应的影响分析研究	秋仁东	刘金砺	石玉成		204	
上海地区钻孔灌注桩桩侧分层土极限摩阻力统计分析	陶军亮	赵春风	楼晓明	蔚林	211	
上海地区悬浮预制桩极限承载力统计分析	蔚林	赵春风	楼晓明	陶军亮	218	
桩基变刚调平设计细则的试验研究与工程实践	王涛	陶玲			227	
沉渣对扩底桩竖向承载性状的影响	高广运	高盟	冯世进		236	
预制桩在砂性土中的侧阻疲劳退化问题	俞峰	史佩栋			241	
带横隔管桩抗弯性能试验研究	方鹏飞	吴佳雄	华锦耀		249	
沿海软土液化地基 PHC 管桩的抗震问题	许国平	张耀年			253	
抗拔灌注桩后张预应力技术试验研究与工程应用	迟铃泉	赵志民	刘金砺	张峰	孙宏伟	260
鄂尔多斯市东胜体育中心风化岩灌注桩承载性状试验研究	徐寒	胡纯炀	邹东峰	范重	钟冬波	268
天津津门桩端后注浆钻孔灌注桩承载特性分析	邓长茂	吴江斌				278

三、设计与工程实践					285
桩基的设计与工程实践	王卫东	吴江斌	李进军		286
杭州市软土震陷下的桩基负摩阻力估算	党改红	丁伯阳	楼可城	尹立奇	309
杭州市虚拟场地上的桩基承载力分析	党改红	丁伯阳	孙利伟		316
抗拔嵌岩灌注桩极限承载力计算	龙照	张恩祥	李兰香		324
桩基沉降计算模型对计算结果的影响分析	荆和平				329
基于 $p-y$ 曲线法的水平承载桩的计算比较	尤汉强	熊巨华	杨敏		335
汕头地区小高层复合桩基工程初探	黄上进	邓南			341
深厚软基超长桩荷载传递非线性迭代修正计算方法	谈永卫	李镜培			348
天津空客 A320 飞机总装线项目桩基基础设计	裴永忠	林伟	凌海君	张苛	354
大直径变截面桩水平向承载力及变形的					

计算方法研究	任士房	梁 韵	耿大新	上官兴	360
土体侧移作用下单桩计算方法对比及参数分析	于 峰	梁发云	黄茂松		366
抗拔桩荷载-位移曲线的一种非线性解析算法	刘 玮	陈龙珠	许海勇		371
灌注桩设计中桩身强度问题的探讨	李进军	吴江斌	王卫东		377
唐山南堡某住宅小区桩基础优化设计	邱明兵	王雨辰			382
关于人工挖孔混凝土灌注长桩纵向配筋设计的探讨	吕元光	魏崇昶	鲁雪莉	杨国江	387
微型桩在地基处理中的应用	汪新平	张 俊	杨志银		394
载体桩在呼和浩特地区技术经济优势	钱志东	钱国林			398
大直径桩在支挡体系设计中的应用	王战宏	陈奕柏	刘洪林	韩建刚	401
四、施工技术与新桩型					407
桩与深基础施工技术发展的时代特征	高文生				408
灌注桩桩端后注浆技术应用进展综述	张忠苗	张乾青	张广兴	邹 键	424
台湾桩基技术发展若干特点的浅识	史佩栋	俞 峰			445
对软塑流塑地层钻孔灌注桩旋挖钻机成孔的几点认识	张红卫	袁春海	任传宁	宋晓露	454
桩静压法施工的挤土效应	刘兴录	刘 瑱	毛广明	李国庆	458
GRF 桩基承载力增强技术及其应用展望	文松霖	徐文强	任佳丽		468
南通海外大厦采用非取土引孔沉桩技术的实例研究	於 果	徐雷云			472
苏州新城花园酒店采用非取土引孔沉桩技术的实例研究	张雪峰	徐雷云			477
全夯式扩底灌注桩施工工艺与承载特性分析	刘献江	熊孝波	桂国庆	许建聪	484
短螺旋挤土灌注桩(SDS 桩)施工新技术	刘 钟	李志毅	卢璟春		491
跨海长桥滩涂区桩基础成套技术研究	叶俊能	朱向荣			500
某软土地基后注浆灌注桩试验研究	杨生贵	姚智全	毛宗原		506
长螺旋钻压灌注混凝土灌注桩后插笼工艺和后注浆技术组合应用实例	张武	杨香福	卫海亮	杨道鹏	513
五、检测技术与质量控制					519
基桩检测技术的回顾与进展	李大展	关立军			520
论基桩声波透射测试中过滤法判定桩身缺陷	韩 亮				527
基桩倾斜时应力波检测法的振幅谱特征	邓业灿	林维芳	李毅臻	黄汉平	531
从静载试验结果看勘察报告的承载力取值	涂荫玖	王林辉	李冠男	孙 剑	538
管桩工程质量验收与检测	李国光	潘绍成	张 委	靳 峰	545
对自平衡试桩法几个关键问题的探讨	孔继东				548
	聂如松	冷伍明	赵 健	杨 奇	

高应变动测试验的现状和问题浅析	郑 建	季沧江	张林海	552			
关于声波透射法检测中对倾斜声测管管间距修正方法的 探讨	赵常要	楚华栋		560			
声波透射法在基桩检测中的分析和研究	赵守全	员宝珊	郑 震	568			
桩基动测法波速的合理确定		赵 伟		578			
Osterberg 法静载荷试桩技术分析及改进 研究	王文军	朱向荣	孔清华	罗春波	582		
基于多功能孔压静力触探测试的桩基承载力 预测方法探讨	童立元	苗永红	徐春明	蔡国军	刘松玉	杜广印	588
《基桩静载试验 自平衡法》交通行业标准介绍	龚维明	戴国亮	薛国亚				594

一、特殊土场地与特殊 环境下的桩基础

特殊土场地桩基础研究与工程进展

汪国烈 滕文川 王 旭 张豫川

(甘肃省土木建筑学会地基基础学术委员会, 兰州, 730030)

摘 要 针对特殊土地上的桩基础, 介绍了我国的研究与工程进展和取得的主要成果, 归纳了当前工程中的主要问题和解决途径。

关键词 特殊土; 桩基础; 规律; 工程环境; 设计工况; 基准年限; 湿陷性黄土; 多年冻土; 盐渍土

前言

特定条件下、具有特殊工程性质的土, 谓之特殊土。湿陷性黄土、膨胀土、冻土、红黏土、软土、盐渍土、污染土等, 皆为特殊土。

桩是具有悠久历史的一种基础工程, 在特殊土地上的应用, 可以追溯到史前人类。考古挖掘发现, 地处黄河流域上游、陇中黄土高原的甘肃秦安, 也就是中华先祖伏羲、女娲的故乡, 距今 7800~4800 年前、仰韶文化及其前后时期、人类从穴居向地面移居的过渡阶段, 人们在当时的“建筑物”内, 不但发现了最早的“水泥”和“混凝土”, 而且发现了最早的“夯实黄土地基”和“桩基础”。在欠密实的原生 Q_3 黄土及黄土填土中, 设置了 3m 左右长、加工简陋粗糙、近似圆形截面的竖向树干 (可视为“木桩”), “桩”顶上放着石墩或石板 (可视为“承台”), “承台”上支撑着建筑物的木柱, 这不就是我国湿陷性黄土地区最早的桩基础吗! 地处长江下游的浙江余姚河姆渡, 距今 7000~6000 年前、新石器时代、人类从巢居过渡到半巢居阶段, 人类先祖在“干阑式建筑”中用“木桩”作“房屋基础”, 木桩截面近似圆形、方形、“板”形, 且“桩”下端削尖、入土深度 1m 左右; 先祖还用原木“排桩”作竖井侧壁淤泥层的支护, 并用木框作水平支撑。这些不就是我国软土地区最早的桩基础吗! 两个遗址, 相距约两千公里, 跨越半个中国, 但都似乎在同一时期有了桩基础, 进一步说明长江、黄河是我国文明的两大发源地, 这些古老的桩世界罕见!

我国近代特殊土场地桩基础的发展, 从木桩、铸铁桩到钢桩、钢筋混凝土桩, 也就是百余年历史。其中, 软土和湿陷性黄土地上桩基工程的应用与研究比较早、也比较深入, 而多年冻土、盐渍土等特殊土地上的桩基础, 它们的研究与工程应用在近半个世纪内得到发展, 特别是中国西部随着公路、铁路、电力建设和西电、西油、西气东输工程的发展, 特殊土地上的桩基础工程进入了一个飞速发展的时代。

桩基础, 一般作为穿越较软弱或不稳定地层、将上部及侧向荷载传递到下部较深、较稳定地层的工程手段, 甚至通过桩基础结构的特殊功能维持岩土原有较好的力学性能, 桩基础国内外的的发展随着建设规模的扩大日新月异, 桩基础的设计理论和工程实践也愈来愈

艳丽多姿。

特殊土地上的桩基础，它远远不只是承载力和桩身强度、配筋等问题，也不只是常规意义上的变形问题，它涉及桩基础与上部结构、桩间土体的共同作用，涉及这个“系统”的长期稳定性、耐久性，涉及这个“系统”与“环境”的融洽协调！与一般桩基础相比，特殊土地上的桩基础与环境 and 特殊工况关系的分量就重得多。长期以来，人们对软土地区桩基的研究与应用较多，近十年人们更加重视桩基础与建（构）筑物之间的变形协调；人们在关注红黏土大气影响急剧层和膨胀土大气影响深度的基础上，结合胀缩裂缝和地裂缝的状况，以桩基础方式解决了不少工程问题；季节性冻土地上的桩基础，以冻胀、抗拔为出发点在确定桩基的选型、深度、桩身受拉计算及隔冻措施等方面做了不少工作。这些特殊土，均在《建筑桩基技术规范》（JGJ 94）及某些相关标准中有了一定反映，本文不再赘述。

鉴于湿陷性黄土场地上的桩基工程比较复杂，多年冻土及盐渍土地上的桩基础近些年在工程中特别突出，故将它们作为本文的重点加以介绍。

1 湿陷性黄土场地上的桩基础

1.1 概述

全球黄土，主要分布在中纬度干旱、半干旱地带，面积约 1300 万 km^2 ，我国黄土面积约 70 万 km^2 ，其中湿陷性黄土约 50 万 km^2 。据陕、甘、宁、青部分工程建设项目资料统计，在大型工业、道路桥梁、高层建筑等项目建设中，桩基础的应用达到 30%~40%，仅甘肃每年工程用桩将超过 10 万根，其中有人工挖孔灌注桩、机械成孔灌注桩、预制打入桩、静压桩及载体桩等，每年工程试桩近万根，低应变测桩最多、高应变测桩一般占 20%左右，单桩静载荷试验数百根，大多数为自然含水量状态下静压桩试验，水平荷载试验较少，桩基浸水试验则更少。

20 世纪 70 年代初开始，我国对自重湿陷性黄土场地的浸水变形规律及桩基础特殊性质的试验研究，进入了可喜的发展阶段。甘肃省建筑科学研究院、甘肃土木工程研究院等单位，先后在兰州东岗、焦家湾、河口、沙井驿、二热、天水甘里铺、宁夏固原、甘肃连城、榆中和平等十几个场地，做了近三十个试坑浸水试验和五十余根桩的浸水试验，其中包括用悬吊法和脱底法测桩侧的正负摩阻力；在桩底埋设压力盒和用桩侧土体隔离法等测试桩底端阻力；在桩身设滑动测微计及钢筋应力计等测试桩身应力、应变变化；还做了不同桩径、不同桩长、灌注桩与打入桩、混凝土桩与钢桩、不同桩端持力层以及小坑浸水与大坑浸水对桩体受力变形影响等的对比试验；甘肃省院、西北市政院、中铁西北研究院、天水市设计院和兰州大学、兰州理工大学、兰州交通大学等单位，也做了不少工作。20 世纪 90 年代初，西北电力设计院、中国建筑科学研究院地基所、陕西省建研院、西北综合勘察院、西安建筑科技大学等单位，在蒲城电厂、宝鸡二电及西安、富平、耀县等地，做了不少试坑浸水试验和桩基浸水试验，试验内容和测试手段都比较丰富、先进；2005~2006 年间，针对郑西铁路客运专线建设，中铁西北科学研究院、机械工业勘察设计研究院和铁道第一、第二、第三、第四勘察设计院等在河南、陕西铁路专线沿线共做 8 个试坑浸水试验，并在其中的两个试坑中做了桩基浸水试验。此外，山西、青海、宁夏、辽西、

内蒙古、河南、河北、山东、新疆等地，也做了一定工作。

当今，湿陷性黄土研究最热门的话题是大厚度湿陷性黄土的浸水变形规律与工程措施。随着人们对湿陷性黄土浸水、变形规律认识的深化，人们对湿陷性黄土地上的桩基础的认识也在逐步深入。对湿陷性黄土地上的桩基础，最主要的问题是应按怎样的“水环境”设计桩基础？比较合理而又概括的回答是，应按工程设计基准年限（50~100年）内桩底和桩周土体可能出现的、不利的含水状态设计桩基础！现分五个方面，逐一回答这个问题。

1.2 什么是对桩基础的最不利状态？

当湿陷性黄土浸水湿陷时，桩周土体沉降大于桩身沉降或有这种趋势，桩侧将受到方向向下的摩阻力作用，即负摩阻力，且随着桩周土对桩体侧压力的增加而增大。

当浸水范围的直径或“折算圆直径”等于或大于湿陷性土层的下限深度时，自重湿陷可以完全产生，将达到最大的自重湿陷量，见图1、图2。

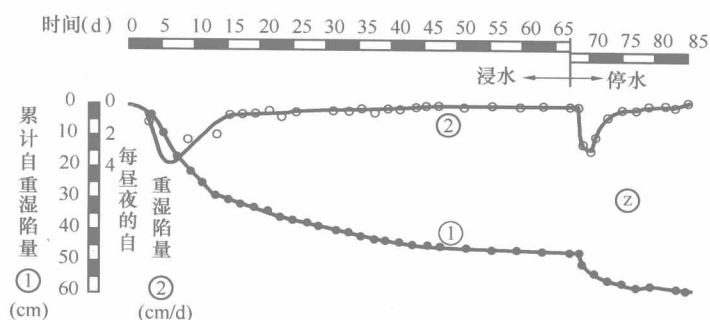


图1 湿陷发展过程与停水变形

同一场地、同样的浸水面积和浸水条件，只要浸水坑内有桩，则自重湿陷将不能充分产生，甚至不及无桩试坑浸水自重湿陷量的一半，见图3。要想达到无桩试坑同样大小的自重湿陷量，则必须继续加大浸水范围，至少使桩边与浸水坑坑边的距离大于湿陷性土层的厚度。

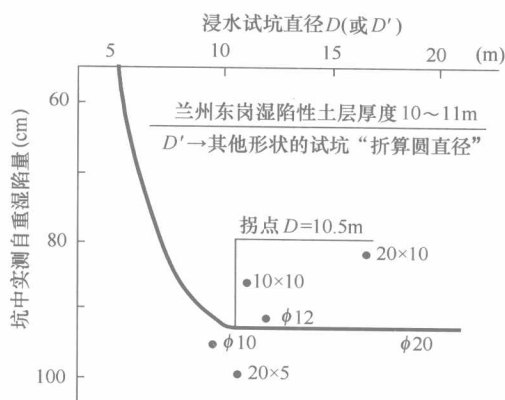


图2 浸水试坑直径与自重湿陷量的关系

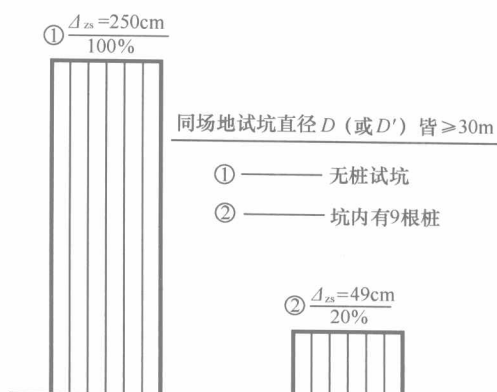


图3 无桩与有桩试坑浸水自重湿陷量对比

国家标准《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB 50025)表 5.7.5 规定中反映,自重湿陷量大的桩侧平均负摩阻力较大;而梁守信等在“自重湿陷性黄土地基中单桩负摩阻力的研究与分析”中,反映兰州钢厂场地负摩阻力试桩时出现直径 5m 圆坑浸水比 20m×13m 矩形坑浸水所得的平均单位负摩阻力和最大下拉荷载大的情况,并得出“桩周土体沉降达到最终稳定湿陷量的 2/3 以上”是负摩阻力充分发生、发展并使下拉荷载达到最大值的条件。我们在试桩试验中发现,在桩侧比较“粗糙”、土体对桩的侧压力较大、当土体相对桩体有“下沉趋势”且“欲动未动”的时候,将产生较大的单位面积上的负摩阻力作用,这种“欲动未动”的桩段,会随着桩周土体浸水力度的增大,逐步由上向下、由浅入深地发展下移,但土对桩总的下拉荷载不会超过最不利状态下的总下拉荷载,只有在自重湿陷充分发生后、且停水下沉完成后,桩体才能逐步受到最大的总下拉荷载作用,此时土对桩的附着下拉力才是最大的。甘肃建科院在固原大面积试坑浸水桩基试验中测得人工挖孔灌注混凝土桩,在自然含水量时桩侧平均极限正摩阻力为 63kPa,最大单位面积积极限值可达 80kPa;浸水 56d 时,自重湿陷量 37cm,试桩中性点位于 15m 深度,平均负摩阻力 11kPa,最大桩侧负摩阻力 15kPa,发生在 10m 深度处;停水后,桩周土发生固结变形,桩侧负摩阻力迅速增大,停水 12d,桩外土体附加下沉 7cm,试桩中性点深度增大到 19m,最大桩侧负摩阻力为 33kPa,平均负摩阻力为 22kPa,为《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB 50025)表 5.7.5 推荐值的 1.5 倍。此时,试桩所受到的下拉荷载是整个测试过程中最大的,为浸水时最大下拉荷载的 2.5 倍,见图 4、图 5。

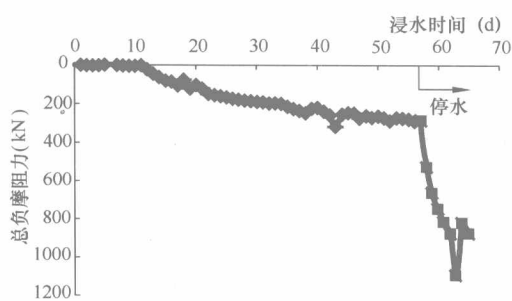


图4 固原试桩5总负摩阻力-浸水时间变化曲线

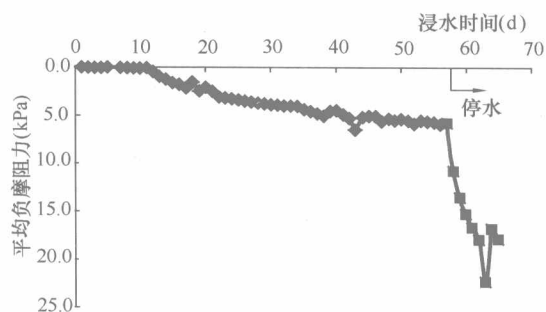


图5 固原试桩5平均负摩阻力-浸水时间变化曲线

通过上述得出结论:当基桩处于大面积浸水并使桩周土体充分浸水、自重湿陷量充分产生,此为桩基的最不利状态,在这种状态下桩周土体停止浸水并逐步排水固结下沉,浅部土层的含水量低于液限含水量并逐渐趋向塑限含水量,此时将会逐步出现基桩的中性点最深、桩侧的平均负摩阻力和单位面积上的负摩阻力都将是最大的现象,基桩也将受到桩周土体最大的附着下拉力的作用,受力水平会达到浸水时最大值的 1.5 倍左右。

甘肃建科院在兰州西变电所工程中,在强夯场地上做试桩浸水试验,测得桩侧强夯层下土体下沉引起桩周土对桩侧的负摩阻力作用,其中桩体上部强夯有效处理厚度内的桩侧平均负摩阻力达到 100kPa,此时强夯段土体的含水量为 11%~17%。所以,

国家行业标准《建筑桩基技术规范》(JGJ 94) 的第 3.4.7—3 条规定,“对于自重湿陷性黄土地基,可采用强夯、挤密土体等先行处理,消除上部或全部土的自重湿陷”,对消除上部自重湿陷的工况是有条件的,要具体分析。

1.3 施工工艺和桩土接触条件对单桩负摩阻力的影响

桩型、成桩工艺、桩土间的接触条件等,均可影响桩侧负摩阻力的大小和分布。

我们通过兰州及其附近地区浸水试坑中基坑同条件的对比试验,初步得出如下规律:

①大直径挖孔混凝土灌注桩,直径 1.0~1.2m 的中性点以上桩侧单位面积上的平均负摩阻力,是直径 0.8m 的 70%左右;

②直径 0.4m 钻孔混凝土灌注桩的平均负摩阻力,是直径 0.8m 挖孔混凝土灌注桩的 1.5 倍左右;

③小直径($\leq 0.4\text{m}$)混凝土桩,挤土桩(预制桩)的平均负摩阻力,是非挤土桩(钻孔桩)的两倍左右;

④小直径($\leq 0.4\text{m}$)挤土桩,钢管桩的平均负摩阻力,是预制混凝土桩的 80%左右;

⑤处于稍湿、硬可塑状态自重湿陷性黄土层中的单桩,在模拟地震作用下桩周土发生震陷后的桩侧平均负摩阻力,是大面积浸水不利状态时的 2 倍左右。

1.4 湿陷性土层下限深度和单桩中性点的确定

大量的桩基础设计,不可能先做试坑浸水试验和桩基浸水试验,而一般是根据探井的土工试验资料分析计算确定。

国家标准《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB 50025)是以 δ_{zs} (δ_s) < 0.015 确定湿陷性土层下限深度的,也是确定基桩中性点深度的基本因素;国家行业标准《建筑桩基技术规范》(JGJ 94)在考虑自重湿陷性黄土时,基本上保持了与《黄土规范》的一致性,且考虑了桩底持力层和桩土间沉降差的部分影响;郑西铁路专题报告中,将按自重湿陷系数 $\delta_{zs} = 0.015$ 为界得到的湿陷性土层下限深度乘以修正系数 $\eta = 0.34 \sim 1.11$ 。

《甘肃省大厚度湿陷性黄土场地工程处理措施暂行规定》(送审稿),按表 1 规定确定湿陷性土层下限深度。

表 1

基础(承台)底面下深度(m)	不参加 Δ_{zs} 计算的土层 δ_{zs} 值	基础(承台)底面下深度(m)	不参加 Δ_{zs} 计算的土层 δ_{zs} 值
< 15	< 0.015	20~25	< 0.025
15~20	< 0.02	> 25	< 0.03

我们用此方法,对几十个工程、其中包括对郑西铁路的试坑浸水试验进行了计算对比,结果还是比较符合与恰当的。我们认为,按表 1 确定的自重湿陷性土层的下限深度,可以作为桩基设计中单桩可能出现的中性点的最大深度。当桩底下沉,中性点位置上移;当桩身压缩变形,中性点位置也会上移;当桩体振动或桩周土体发生振动或液化,也

会产生中性点位置的变化和调整。

根据试验分析,初步发现如下规律:凡桩长每增加 10m 或桩底沉降每增加 1cm,一般可使单桩中性点的位置上移原中性点深度的 5%,见表 2。

单桩中性点上移量 (%)

表 2

桩长 (m) \ 桩底沉降 (cm)	10	20	30	40
0	5	10	15	20
1	10	15	20	25
2	15	20	25	30
3	20	25	30	35
4	25	30	35	40
5	30	35	40	45
6	35	40	45	50

1.5 群桩设计中如何考虑负摩阻力影响?

国家行业标准《建筑桩基技术规范》(JGJ 94)推荐按等效圆法计算桩距较小群桩的群桩效应,即独立桩基单位长度的负摩阻力由相应长度范围内等效圆半径(r_e)形成的土体重量与之等效,得出负摩阻力群桩效应系数 $\eta_n \leq 1$,来修正基桩的下拉荷载。对于一根单桩,桩侧负摩阻力的总和,即为基桩的下拉荷载;但有若干基桩形成桩群或群桩,则各根基桩所受到的负摩阻力总和或下拉荷载就不相同或相近了。首先,群桩中的角桩和边桩所受到的负摩阻力作用,要大于芯桩;在基桩数量多、桩的排数行数多的群桩中,处于中部的芯桩其所受到的负摩阻力作用将极其有限。桩体对浸水土体的支撑作用,使土体的自重湿陷不能充分产生,桩的中性点位置将明显偏浅,负摩阻力作用和土对桩的下拉荷载也随之变小。即使在大面积充分浸水条件下,群桩中也只有角桩和边桩才有可能受到比较大的负摩阻力和下拉荷载的影响,而芯桩受到周围基桩的围护支撑,实际所受到的负摩阻力和下拉荷载的影响将明显减小,在桩周土不能发生明显自重湿陷的条件下,也就谈不上桩间土对芯桩的负摩阻力作用有多大,桩间土下沉趋势引起的对桩侧负摩阻力的影响深度也不可能很深。

对一般工程桩基,其所处的水环境,很少出现最不利的恶劣工况,即使对群桩中的角桩和边桩,也难处于最不利的水环境中,如果一切皆按最不利考虑,必将形成工程设计的过于保守,而工程设计基准期(50~100年)内,往往是不可能出现人为的假设工况。

我们主张,应按工程设计基准期(50~100年)内可能出现的不利的水环境设计桩基础。起码应按最不利状态、根据不同的实际工况,作不同程度的“打折”处理。对一般水环境工程的群桩设计,如高层建筑的桩箱(筏)基础,按现行的《黄土规范》和《桩基规范》计算的负摩阻力和下拉荷载对半考虑,可能较为合理。具体设计桩基时,应对角桩和边桩适当加强,而对芯桩可适当放松。

1.6 特殊工程设计的启示

甘肃捡财塘风电场工程,是我国“陆上三峡”风电规划的首批工程。该工程场地,距兰州 185km,处陇中黄土高原黄土丘陵地带,年平均降水量 250mm、蒸发量 1700mm。场地地势平缓开阔、波状起伏,海拔 1750~1910m,主要地层为 Q_3 马兰黄土、属粉土,在钻孔深度 49m 内未见地下水,最大探井取样试验深度 30m,天然含水量 3.3%~9.9%、平均 5%~6%,自重湿陷系数 (δ_{zs}) 和湿陷系数 (δ_s) ≤ 0.112 ,最大计算自重湿陷量 $\Delta_{zs} > 1.9m$,最大计算湿陷量 $\Delta_s > 2.2m$,皆为自重湿陷性黄土场地,湿陷等级皆为 IV 级,50m 深度内无桩基可靠持力层,湿陷性土层厚度大于 30m,其中上部 11m 湿陷性强烈、11~30m 湿陷性中等、30m 以下无取样试验资料。

该工程有 1.5MW 风电机 30 台,风电机型号东汽 FD77-1500、叶轮直径 77m、轮毂高度 61.5m,皆属高耸构筑物,承受的主要荷载为风荷载,按 50 年一遇阵风及风向极端变化等不利工况考虑风机传至基础环顶部的荷载设计基础,其中竖向力 2110kN、水平力 600kN、扭矩 3220~ -1160kN·m、弯矩很大达到 28000kN·m、分项系数 1.5。风电机基础,采用正八边形钢筋混凝土基础,对边距离 14m,基础厚 1.3~2.2m,中厚边薄;要求地基承载力特征值 250kPa。风电机基础,皆在黄土崩梁顶部,崩顶相对高度 10~20m,相邻区域最大高差 30~40m。

该工程按乙类建筑考虑。设计难点是,既无法按《黄土规范》进行地基处理,根本做不到满足规范规定的剩余湿陷量 $\leq 15cm$ 要求,也无法进行正常的桩基础设计,50m 深度内无法找到规范规定的桩底可靠持力层。经甘肃省和全国专家的认真论证,认为构筑物基础皆处在梁崩顶部,50m 深度内无地下水上升可能,整个场地自然坡度大,只要强调做好一定范围内的地面封闭,刻意做好场地的竖向设计和地面排水,基本不改变原场地的地形地貌和雨水排泄系统,这样即可确保风机基础和地基不可能形成以构筑物基础为中心的聚水区,既无地下水上升的不利影响,也无地基基础侧向浸水之可能,又无雨水、地面水浸入地基的可能性。众所周知,湿陷性黄土不浸水即无湿陷,天然土体的强度和变形是可满足工程要求的。

经过大面积的地面工程覆盖,地基土因水分的长期气态转移,含水量可能增大,但绝不会超过土的塑限含水量。所以,设计时地基土的环境含水量可按塑限含水量考虑地基土的强度和变形参数。

工程中采用了两种地基基础形式。有 15 个风电机构筑物,按《甘肃省大厚度湿陷性黄土场地工程处理措施暂行规定》(送审稿)设计了以整片垫层为主的工程措施;有 15 个风电机构筑物采用了桩基础。这 30 个高耸构筑物,均已建成投入使用。该工程的地基基础费用,至少比原设计节省了一半,将满足业主要求 25 年内的安全正常使用。

该工程桩基础设计时,必须确保 5 个条件:

- ①要求桩基础穿越上部 11m 的强烈湿陷性土层,进入下部中等湿陷性土层中;
- ②桩周、桩底土体,均按塑限含水量状态对应的力学指标设计桩基础,且有大于 2 的安全系数;
- ③排除每个构筑物桩基础所在场地地下水上升和侧向浸水的可能性;

④基坑素土夯(压)填,密实度达到垫层要求;

⑤每个风电机基础中心为圆心、50m 半径范围内,确保基础中心地面的标高应是最高的、且向四周的地面坡度必须大于 2%;基础为中心、直径 30m 范围内,要用混凝土封闭地面。

通过这个特殊的工程设计,说明加强对建(构)筑物所处水环境的研究是极其重要的。这既确保建(构)筑物在设计基准年限(一般 50~100 年)内的安全正常使用,又使工程设计可行、合理、经济。

该工程,给人们的启示是什么?工程设计,既要科学严谨的遵守规范规定,又要不断探索、掌握规律、谨慎分析、安全合理科学地解决工程难题!

2 多年冻土地地上的桩基础

2.1 历史与现状

我国多年冻土面积,占国土面积的 22.4%、约 210 万 km^2 。主要分布在黑龙江省和内蒙古北部,西藏的中部和北部,青海大部,新疆的帕米尔高原、天山山脉、阿勒泰,甘肃的祁连山区等。所谓冻土,是指含有冰的土(岩);多年冻土,是指冻结状态持续二年及二年以上的土(岩)。随着在多年冻土区工程建设的大规模开展,多年冻土地区已成为人类生产生活和工程建设的场所。尤其是近些年来青藏铁路、青藏公路、西油西气西电东输和东北、甘肃、青海、新疆地区的工程建设,多年冻土区桩基础工程的研究和工程取得了显著业绩,丰富了我国多年冻土地地上桩基础的设计理论。

冻土学,首先在俄罗斯发展成为一门独立学科,M·B·罗门诺索夫在 1757 年曾发表“冻土地”的科学综述,对“冻土地”的形成及其与气候、地形的关系提出看法。19 世纪上半叶已初步获得西伯利亚冻土层的温度、厚度、埋藏条件和分布情况等资料。国际上在多年冻土区修建房屋已有数百年历史,修筑铁路也已有百余年历史,俄罗斯在世界上修建了第一条横贯西伯利亚冻土区的铁路,在铁路桥梁基础工程中广泛使用了钻孔灌注桩;美国、加拿大、北欧等国,在 20 世纪 40 年代后,对冻土性质、分布、与建筑物的关系等进行了大量研究,成功地在多年冻土区建成了一批重要建筑物,如输油管道、铁路、公路、矿山、水电站、房屋建筑等。美国陆军部寒区研究与工程实验室,出版了多年冻土区基础工程设计规范(1986 年);1990 年前苏联国家建委,颁布了新修改的建筑规范《多年冻土上的地基和基础》(2·02·04—88),该规范是对 1976 年制定的冻土规范实施 14 年来工程实践的总结和理论研究成果的进一步推广,对多年冻土地地区地基基础的设计、施工和科学研究起到了极大的推动作用。

我国从 20 世纪 50 年代中期,就大体确认了东北地区多年冻土分布的南北区间。针对东北地区的建筑工程、公路、铁路以及川藏公路、青藏公路的高原冻土进行了一系列研究。70 年代初,结合青藏高原特殊地理环境条件,对青藏公路沿线的多年冻土开展了试验研究,进行了桥涵基础工程、房屋建筑基础及路基工程等与多年冻土地基