

中国建筑学会地基基础分会2008年学术年会论文集

地基基础工程技术实践与发展

DIJI JICHU GONGCHENG JISHU SHIJIAN YU FAZHAN

(贵州贵阳 2008年6月)

主 编 滕延京
副主编 杨 军
袁志英

知识产权出版社

中国建筑学会地基基础工程分会 2008 年学术论文集

地基基础工程技术实践与发展

(贵州贵阳 2008 年 6 月)

主 编 滕延京

副主编 杨 军 袁志英

知识产权出版社

内容提要

本书收录了近年来我国地基基础领域的论文 76 篇, 这些论文大体反映了我国岩土工程科技人员近两年来在地基基础工程方面的理论研究、新技术开发及工程实践成果。论文集内容包括理论研究、试验研究与探讨、设计方法及应用、支护技术、处理及加固、施工技术开发与应用、检验与测试技术、综合评述共八个部分。

本书编辑委员会推荐 20 篇候选论文, 参加中国建筑学会地基基础分会 2006~2008 年度优秀学术论文评选。

本书可供从事地基基础工程的勘察、设计、施工及科研、教学人员参考。

责任编辑: 陆彩云 刘 爽

装帧制作: 段维东

责任出版: 杨宝林

图书在版编目(CIP)数据

中国建筑学会地基基础分会 2008 年学术年会论文集: 地基基础工程技术实践与发展/滕延京编.
—北京: 知识产权出版社, 2008. 6

ISBN 978-7-80247-306-5

I. 中… II. 滕… III. 地基—基础(工程)—学术会议—文集 IV. TU47-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 069987 号

中国建筑学会地基基础分会 2008 年学术年会论文集

地基基础工程技术实践与发展

主 编: 滕延京

副主编: 杨军 袁志英

出版发行: 知识产权出版社

社 址: 北京市海淀区马甸南村 1 号

网 址: <http://www.ipph.cn>

发行电话: 010-82000893 82000860 转 8101

责编电话: 010-82000860 转 81110

印 刷: 北京凯达印务有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

版 次: 2008 年 6 月第 1 版

字 数: 720 千字

邮 编: 100088

邮 箱: bjb@cnipr.com

传 真: 010-82000893

责编邮箱: lcy@cnipr.com

经 销: 新华书店及相关销售网点

印 张: 29.25

印 次: 2008 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 80.00 元

ISBN 978-7-80247-306-5/TU·267

版权所有 侵权必究

如有印装质量问题, 本社负责调换。

一、会议主办单位

中国建筑学会地基基础分会
贵阳建筑勘察设计有限公司

二、协办单位

贵州有色地质工程勘察公司
贵州省水利水电勘测设计研究院
贵州省建筑工程勘察院
贵州省冶金设计研究院
贵州能瑞电力岩土工程有限公司

三、会议组织委员会

主 任：滕延京

副主任：杨 军 袁志英 郝江南

委 员：钱力航 陶 玲 李勇刚 赵爱平 李卫民 沈志平
严景明 陈少勇 陈耀光 彭芝平 罗朝骏 洪 林

四、论文编辑委员会

主 编：滕延京

副主编：杨 军 袁志英

编 委：郝江南 钱力航 陈少勇 陈耀光 彭芝平 张东刚
姚智全 杨 敏 陈希泉 周同和 王卫东 汤小军

目 录

第一篇 理 论 研 究

单桩沉降计算方法综述分析	张忠苗 张广兴 黄茶英 张乾青	1
群桩沉降计算方法综述分析	张忠苗 张广兴 黄茶英 张乾青	13
基于优化 Pearl 模型的基坑周围地表沉降预测	李 宁 高广运	26
软土地区地下市政管道的抗震分析	陈林华 林 鹏 许镇鸿	32
基于前期观测和参数反演的复合地基变形预测	宋建学 王 辉 李战胜	38
* 存在软弱下卧层的大直径扩底桩竖向承载性状	高广运 阮 翔 张 婧	43
钉土作用力影响范围分析	王立峰	50
土钉与复合土钉支护的基底承载力问题讨论	周同和 郭院成	55
* 考虑支护结构作用与降水效应的地基变形计算	周同和 郭院成 宋建学	60
* 均质地基上填筑路堤的性状分析	刘开富 谢新宇 张继发 朱向荣	72

第二篇 试验研究与探讨

* 钉形水泥土搅拌桩复合地基承载力分析	易耀林 刘松玉 席培胜	78
* 螺旋桩承载力综合系数的确定	徐学燕 于琳琳 刘复孝	86
黄土试坑浸水试验中土层渗透特性对湿陷过程的影响 分析	刘争宏 郑建国 张 炜 戚长军	94
型钢水泥土复合构件界面握裹应力分布的试验研究	周燕晓 李丽丽 黄 新	102
强夯法加固地基的时效特性实测分析	陈耀光 杨 军 彭芝平 连镇营	108
水平荷载作用下桩、承台与基础梁协同工作设计研究	秦道益 葛家琪 宋春玲	112
夯实水泥土桩复合地基变形特性的试验研究	张振拴 孙永辉	117
* 嵌岩式灌注桩水平承载力的试验研究	程 寅 贺武斌 张循当 白晓红	121
饱和盐渍土地层强夯变形场试验研究	彭芝平 陈耀光 连镇营 杨 军 鲁克宇	127
地表试验条件下后压浆灌注桩桩侧阻力取值分析	郭院成 宋建学 周同和	135
* 桩—承台基础基底应力分布监测实例分析	宋建学 任慧志 郑仁清	142
* 上海软土地区桩端后注浆灌注桩的承载特性	王卫东 吴江斌 岳建勇 黄绍铭	146

第三篇 设计方法及应用

地下室底板分块独立结构设计与施工实践	唐孟雄	157
高层建筑基础构造防水底板设计初探	吴海胜 阚 明 张胜潭	163

A380 机库的基础设计	张俊杰	贾 洁	寇岩滔	168
大柱网单层厂房中人工挖孔桩基础设计	邹剑强	付桂宏	王 军	176
某科研综合楼的基础设计	刘子彦	汤小军	孙占军	182
柱下条形基础设计			司兴春	188

第四篇 支 护 技 术

树根桩+锚杆联合支护在土质基坑工程中的应用	何 昶	谢富林	雷 用	195
* 双排桩结构在软土地区基坑工程中的应用分析	王艳峰	林 鹏	刘绍伟	201
预应力锚索锚固角的最优化探讨及其在工程中的应用			黄嘉浩	207
* 预应力锚索在某高陡软质岩边坡永久性支护中的应用		赵福滨	郝江南	211
* 遵义某大厦深基坑支护实例	李光耀	孙 康	朱 彦	216
多种支护形式在同一工程中的应用——以乌江水电贵阳基地边坡 支护工程为例	宋 旭	伍锡举	杨朝发	222

第五篇 处理及加固

厦门地区孤石夹层上 PHC 管桩基础注浆处理技术与应用	黄雄平	杨安钦	227				
某高层建筑桩箱基础工程的加固处理	陈耀光	金唤中	233				
* 某地下车库上浮事故的分析与处理		王爱民	239				
* 某热源厂主厂房的地基处理		赵晓东	247				
天津碱厂碱渣土的工程利用研究	李显忠	滕延京	田学伟	赵志鹏	董海鸥	李德义	253
某工程斜桩病理事故分析及处理		孙晋川	韩选江	赵翔	王同华	259	
复杂环境条件软土地基处理与基坑工程实例		张中炜	周同和	郭院成	童怀峰	264	
振冲碎石桩在可液化地基加固处理中的应用				何志新	梅全亭	272	
* 某中学教职工住宅楼地基加固及纠偏实例			李光耀	孙康	叶波	276	
框筒结构复合地基设计计算分析	张东刚	马骥	张震	闫明礼	李钊	陆明华	282
大面积鱼塘新近填土处理工程实例		唐伟	王磊	谷二永	赵璧	289	

第六篇 施工技术开发与应用

浅谈螺纹桩施工技术.....	郜玉彬	首 蓉	294
* 水泥搅拌桩在真空一堆载预压防护工程中的			
应用	王景芸	郑俊杰 彭 劼	程美英 陈松山 299
管桩作桩身的复合载体夯扩桩在某工程中的应用	邓 燕	邹 宏	汤小军 石志民 304
微型钢管桩在首都机场专机和公务机楼中的应用	贾 洁	秦道益	310
* 深厚杂填土地基全套管灌注桩的试验研究与工程应用	柳建国	钟冬波	315
* 钻孔灌注桩承载力偏低的原因分析和对策	赵文艺	杨 武	郑俊杰 321
低能级强夯处理新填土地基的研究	袁凌云	李卫民	327
考虑施工过程的共同作用分析方法探讨	王曙光	滕延京	石金龙 333

帷幕灌浆在岩溶塌陷堵漏中的应用	安源远	339
用碎石垫层处理岩溶地区的淤泥及新近填土地基	谭庆洲 王 焱	342
苏州某地铁站基坑围护结构施工技术研究	吕 楠 史 亮 王 锦	345
宁波软土地区桩端后注浆技术的应用研究	方鹏飞 朱向荣 孔清华 张 寒	349

第七篇 检验与测试技术

变截面桩完整性检测的研究	牛冬生	354
桩身轴力测试中“固定弹性模量”与“变弹性模量”算法比较研究	黄建军 赵丽娟	363
基于 CPTU 测试的桩基承载力预测方法研究	蔡国军 刘松玉 童立元 杜广印	370
对天津市津塔项目地连墙检测结果浅析	赵丽娟 黄建军 海宝权	377
瑞雷波在地基测试中的应用	耿光旭 孟薄萍 刘金川	382
探地雷达在西安城墙病害勘察中的应用	钱春宇 李俊连 郑建国 高术孝	389
CFG 桩复合地基低应变动力检测探讨	金唤中 冯德顺	393
贵阳山水黔城泥岩地基研究	冯朝富 周 尤	397
* 赤泥堆场岩溶防渗—全帷幕综合检测新技术的应用	李勇刚 李志成 伍锡举	403
自平衡法测试技术在贵阳地区的应用及研究	潘福炎 李勇刚 伍锡举 王贵彬	410
* 瞬态瑞雷波法在夯后软土地基检测中的应用	曾华健 张季超 陶建强	416
自平衡(奥氏法)静载测桩检测精度探讨	庄作成 孔清华 王文军 罗春波 孙金月	422
关于强风化岩地基强度及浸水后静载试验结果分析	白文胜	426

第八篇 综 合 评 述

* 浅析贵州山区地基特点及工程中应注意的一些问题	张文灏	429
岩溶强发育地基基础选型初探——以华城凯旋门广场浅基础方案 为例	谭庆洲 王 焱	433
浅谈广州城市地下空间开发利用现状与发展	张季超 李于辉 郑先昌 许 勇 曹军伟	436
浅议贵阳碳酸盐岩地区隧道施工变形监测的指导意义	刘友朋	444
万里长城山海关段城墙稳定性敏感因素分析	王 健	448
高陡岩土边坡绿色生态环境修复技术的探讨——以鑫三角生态 环保生态工程系统的示范工程为例	李卫民 袁凌云 钟 颖	454

注:带“★”的论文是候选优秀论文,共 20 篇。

第一篇 理论研究

单桩沉降计算方法综述分析

张忠苗¹ 张广兴¹ 黄茶英² 张乾青¹

(1. 浙江大学岩土工程研究所; 2. 浙江教育学院)

摘要:对单桩沉降计算的各种理论方法、规范经验方法以及数值计算方法进行了系统总结,阐明了各种方法的研究现状。通过对各种单桩沉降计算方法的基本原理、假定条件、本构关系的建立以及沉降计算过程的比较,分析了各种沉降计算方法的优缺点以及在工程及研究中的适用性。

关键词:单桩沉降计算;现有方法评述;分析

1 引言

众所周知,桩基的承载力与沉降是桩基设计中最重要内容。在过去漫长的时间里,人们为了精确计算和预测桩基的沉降,曾进行过大量的研究,提出一系列计算沉降的方法。但由于地下桩基础的复杂性和地基土的非均匀性,桩基沉降的计算理论还有待成熟。

对于一柱一桩的情况,单桩的沉降计算就是一个实际的工程问题^[1]。另一方面,某些群桩的沉降计算方法,是以单桩沉降为基础,通过经验关系或叠加的原理而得到^[1]。故对桩基沉降计算,有必要先分析单桩的沉降。本文通过对各种单桩沉降计算方法的基本原理、假定条件、本构关系的建立以及沉降计算过程的比较,分析了各种沉降计算方法的优缺点以及在工程及研究中的适用性。

2 单桩沉降的组成

在竖向工作荷载作用下的单桩沉降由以下两部分组成^[2]:

- (1) 桩身混凝土自身的弹塑性压缩 S_s ;
- (2) 桩端以下土体所产生的桩端沉降 S_b ;

单桩桩顶沉降 S_0 可表示为:

$$S_0 = S_s + S_b \quad (1)$$

现行规范通常假定桩身混凝土为弹性材料,用弹性理论进行桩身压缩计算。

桩端以下土体的压缩包括:土的固结压缩变形和钻孔桩的桩端沉渣压缩等。除了土体的固结变形外,有时桩端还可能发生刺入变形(土体发生塑性变形)。对固结变形可用土力学中的固结理论进行计算,固结变形产生的沉降,是随时间而发展的,具有时间效应的特征。当桩端以下土体的压缩与荷载关系近似为直线关系时,也可以把土体视作线弹性介质,运用弹性理论进行近似计算。对刺入变形目前还研究不够,无法很好预测^[1]。目前一般假定桩端位移和桩端力成线性关系。另外,钻孔桩桩端沉渣也会产生压缩变形。

在工程上可根据荷载特点、土层条件、桩的类型来选择合适的桩基沉降计算模式及相应的计算参数。沉降计算是否符合实际,在很大程度上取决于计算参数的选择是否正确。

目前单桩沉降的计算方法主要有以下几种:

- ①荷载传递法;
- ②剪切位移法;
- ③弹性理论法;
- ④分层总和法(建筑桩基技术规范方法);
- ⑤简化方法(我国路桥规范简化算法);
- ⑥数值计算法。

其中①、②、③为理论方法;④、⑤为规范经验方法;⑥为数值建模方法。

3 各种单桩沉降计算方法的原理^{[1][2][3]}

3.1 荷载传递法

3.1.1 荷载传递法的基本原理

荷载传递法是目前应用最为广泛的简化方法,该方法是先按基本假定建立荷载传递方程,其基本思想是把桩划分为许多弹性单元,每一单元与土体之间用非线性弹簧联系(图 1a),以模拟桩—土间的荷载传递关系。桩端处土也用非线性弹簧与桩端联系,这些非线性弹簧的应力—应变关系,即表示桩侧摩阻力 τ (或桩端抗力 σ)与剪切位移 S 间的关系,这个关系一般被称作为传递函数。

荷载传递法的关键在于建立一种真实反映桩土界面侧摩阻力和剪切位移的传递函数(即 $\tau(z)-S(z)$ 函数)。传递函数的建立一般有两种途径:一是通过现场测量拟合;二是根据一定的经验及机理分析,探求具有广泛适用性的理论传递函数。目前主要应用后者来确定荷载传递函数。

3.1.2 荷载传递法的假设条件

荷载传递法把桩沿桩长方向离散成若干单元,假定桩体中任意一点的位移只与该点的桩侧摩阻力有关,用独立的线性或非线性弹簧来模拟土体与桩体单元之间的相互作用。该方法是 Seed(1957)提出的。

3.1.3 荷载传递法本构关系的建立

为了求得传递函数法的基本微分方程,可根据桩上任一单元体的静力平衡条件得到(图 1b):

$$\frac{dP(z)}{dz} = -U\tau(z) \quad (2)$$

式中 U 为桩截面周长。

桩单元体产生的弹性压缩 ds 为:

$$ds = -\frac{P(z)dz}{A_p E_p} \quad (3)$$

或

$$\frac{ds}{dz} = -\frac{P(z)}{A_p E_p} \quad (4)$$

式中 A_p 、 E_p 为桩的截面积及弹性模量。

将式(3)求导,并以式(2)代入得

$$\frac{d^2 s}{dz^2} = \frac{U}{A_p E_p} \tau(z) \quad (5)$$

式(5)就是传递函数法的基本微分方程,它的求解取决于传递函数 $\tau(z)-s$ 的形式。

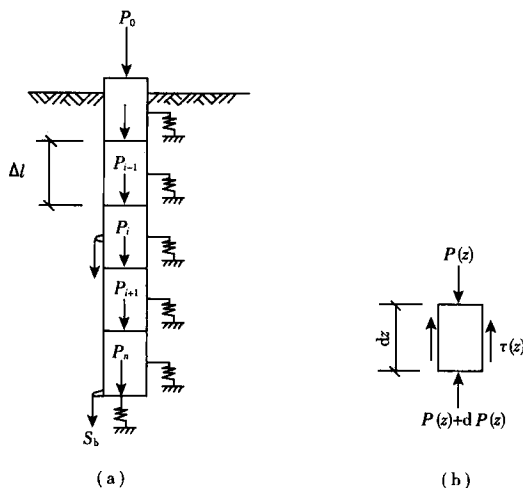


图1 荷载传递法计算模式

目前荷载传递法的求解有三种方法:解析法,变形协调法和矩阵位移法。解析法由 Kezdi (1957)、佐滕悟(1965)等提出,把传递函数简化假定为某种曲线方程,然后直接求解。Coyle (1966)提出了迭代求解的位移协调法,曹汉志(1986)提出了桩尖位移等值法,这两种变形协调方法可以很方便地考虑土体的分层性和非线性,因此应用比较广泛。矩阵位移法(费勤发, 1983)实质上是杆件系统的有限单元法。

3.1.4 荷载传递法的研究

Kezdi(1957)以指数函数作为传递函数对刚性桩进行了分析,对柔性桩,采用了级数法求解。佐滕悟(1965)提出了线弹性全塑性传递函数,并在公式中考虑了多层地基和桩出露地面的情况。

Vijayvergiya(1977)采用抛物线为传递函数。

考虑到桩周土体在受荷过程中的非线性,Gardner(1975)、Kraft(1981)分别提出了两种表达形式不同的双曲线形式的传递函数。

潘时声(1993)根据实际工程地质勘测报告提供的桩侧土极限摩阻力和桩端土极限阻力,也提出了一种双曲线函数来模拟传递函数^[4]。

陈龙珠(1994)采用双折线硬化模型,分析了桩周和桩底土特性参数对荷载—沉降曲线的影响^[5]。

王旭东(1994)对 Kraft 的函数进行了修正,引入了一个控制性状的参数 M_t ^[6]。

陈明中(2000)用三折线模型作为传递函数,考虑了土体强度随深度增长的特性,推导了单桩荷载—沉降关系的近似解析解^[7]。

Guo(2001)提出了一种弹脆塑性模型,以考虑桩周土体的软化性状,这也是三折线模型中的一种。

辛公锋(2003)也提出了一个考虑桩侧土软化的三折线模型^[8]。

刘杰(2003,2004)则针对侧阻软化情况,用矩阵传递法推导了单桩在均质土和成层土中荷载沉降关系的解析解。

赵明华等人(2005)提出了一个侧阻统一三折线模型,能够考虑侧阻的非线性弹塑性,理想弹塑性以及侧阻软化情况,并用于单桩承载力研究^[9]。

3.2 剪切位移法

3.2.1 剪切位移法的基本原理

剪切位移法是假定受荷桩身周围土体以承受剪切变形为主,桩土之间没有相对位移,将桩土视为理想的同心圆柱体,剪应力传递引起周围土体沉降,由此得到桩土体系的受力和变形的一种方法。

Cooke(1974)通过在摩擦桩周用水平测斜计量测桩周土体的竖向位移,发现在一定的半径范围内土体的竖向位移分布呈漏斗状的曲线。当桩顶荷载小于30%极限荷载时,大部分桩侧摩阻力由桩周土以剪应力沿径向向外传递,传到桩尖的力很小,桩尖以下土的固结变形是很小的,

故桩端沉降 S_b 是不大的。据此Cooke认为评定单独摩擦桩的沉降时,可以假设沉降只与桩侧土的剪切变形有关。

图2所示为单桩周围土体剪切变形的模式,在桩土体系中任一高程平面,分析沿桩侧的环形单元 $ABCD$,桩受荷前 $ABCD$ 位于水平面位置,桩受荷发生沉降后,单元 $ABCD$ 随之发生位移,并发生剪切变形,成为 $A'B'C'D'$,并将剪应力传递给邻近单元 $B'E'C'F'$,这个传递过程连续地沿径向向外传递,传递到 X 点距桩中心轴为 $r_m = nr_0$ 处,在 X 点处剪应变已很小可忽略不计。假设所发生的剪应变为弹性性质,即剪应力与剪应变成正比关系。

3.2.2 剪切位移法的研究

Rondolph(1978)进一步发展了该方法,使之可以考虑可压缩性桩,并且可以考虑桩长范围内轴向位移和荷载分布情况,并将单桩解析解推广至群桩。

Kraft(1981)考虑了土体的非线性性状,将Rondolph的单桩解推广至土体非线性情况^[10]。

Chow(1986)将Kraft的解推广至群桩分析。

王启铜(1991)将Rondolph的单桩解从均质地基推广到成层地基,并考虑了桩端扩大的情况。

宰金珉(1993,1996)将剪切位移法推广到塑性阶段,从而得到桩周土非线性位移场解析解表达式。在该基础上,与层状介质的有限层法和结构的有限元法联合运用,给出群桩与土和承台非线性共同作用分析的半解析半数值方法^[11]。

剪切位移法可以给出桩周土体的位移变化场,因此通过叠加方法可以考虑群桩的共同作用,这较有限元法和弹性理论法简单。但假定桩土之间没有相对位移,桩侧土体上下层之间没有相互作用,这些与实际工程桩工作特性并不相符。

3.2.3 剪切位移法的假设条件

假定桩本身的压缩很小可忽略不计,受荷桩身周围土体以承受剪切变形为主,桩土之间没有相对位移,将桩土视为理想的同心圆柱体,剪应力传递引起周围土体沉降。

3.2.4 剪切位移法本构关系的建立与求解

根据上述剪应力传递概念,可求得距桩轴 r 处土单元的剪应变为 $\gamma = \frac{dS}{dr}$,其剪应力 τ 为:

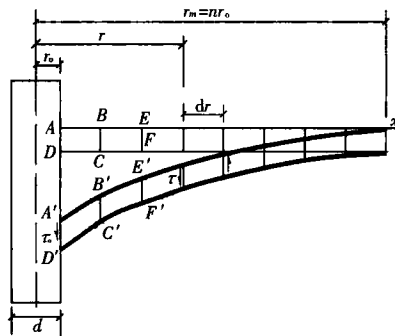


图2 剪切位移法计算模式

$$\tau = G_s \gamma = G_s \frac{ds}{dr} \quad (6)$$

式中 G_s 为土的剪切模量。

$$\text{根据平衡条件知 } \tau = \tau_0 \frac{r_0}{r} \quad (7)$$

由式(6)得

$$ds = \frac{\tau}{G_s} dr = \frac{\tau_0 r_0}{G_s} \frac{dr}{r} \quad (8)$$

若土的剪切模量 G_s 为常数,则由式(8)可得桩侧沉降 S_s 的计算公式为:

$$S_s = \frac{\tau_0 r_0}{G_s} \int_{r_0}^{r_m} \frac{dr}{r} = \frac{\tau_0 r_0}{G_s} \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) \quad (9)$$

若假设桩侧摩阻力沿桩身为均匀分布,则桩顶荷载 $P_0 = 2\pi r_0 L \tau_0$,土的弹性模量 $E_s = 2G_s(1 + \nu_s)$ 。当取土的泊松比 $\nu_s = 0.5$ 时,则 $E_s = 3G_s$,代入式(9)得桩顶沉降量 S_0 的计算公式:

$$S_0 = \frac{3}{2\pi} \frac{P_0}{LE_s} \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) = \frac{P_0}{LE_s} I \quad (10)$$

其中

$$I = \frac{3}{2\pi} \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) \quad (11)$$

Cooke 通过试验认为,一般当 $r_m = nr_0 > 20r_0$ 后,土的剪应变已很小可略去不计。因此,可将桩的影响半径 r_m 定为 $20r_0$ 。

Randolph 和 Wroth(1978)提出桩的影响半径 $r_m = 2.5L\rho(1 - \nu_s)$,其中 ρ 为不均匀系数,表示桩入土深度 $l/2$ 处和桩端处土的剪切模量的比值,即 $\rho = \frac{G_s(l/2)}{G_s(l)}$ 。因此,对均匀土 $\rho = 1$,对 Gibson 土 $\rho = 0.5$ 。在上述确定影响半径的两种经验方法中,Cooke 提出 r_m 只与桩径有关比较简单,而 Randolph 等提出 r_m 与桩长及土层性质有关,比较合理。

上述 Cooke 提出的单桩沉降计算式(9)和式(10),由于忽略了桩端处的荷载传递作用,因此对短桩误差较大。Randolph 等提出将桩端作为刚性墩,按弹性力学方法计算桩端沉降量 S_b ,即

$$S_b = \frac{P_b(1 - \gamma_s)}{4r_0 G_s} \eta \quad (12)$$

式中 η 为桩入土深度影响系数,一般 $\eta = 0.85 \sim 1.0$ 。

对于刚性桩,则根据 $P_0 = P_s + P_b$ 及 $S_0 = S_s + S_b$ 的条件,由式(9)及式(12)可得:

$$P_0 = P_s + P_b = \frac{2\pi L G_s}{\ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right)} S_s + \frac{4r_0 G_s}{(1 - \gamma_s)\eta} S_b \quad (13)$$

$$S_0 = S_s + S_b = \frac{P_0}{G_s r_0 \left[\frac{2\pi L}{r_0 \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right)} + \frac{4}{(1 - \gamma_s)\eta} \right]} \quad (14)$$

3.3 弹性理论法

3.3.1 弹性理论法的基本原理

弹性理论计算方法用于桩基的应力和变形是 20 世纪 60 年代初期提出来的,Poulos、Davis 和 Mattes 等人做了大量的工作。他们的基本思路是:为了对桩土性状做系统化的分析,首

先将实际问题予以理想化,并使它成为数学上容易处理的模型。当对这个简单模型的数学性状获得经验之后,就可以把这个理想化模型不断的加以改进,使之更加趋近于实际问题。Poulos 等人所考虑的最简单问题是均质的、各向同性的半无限弹性体中的单个摩擦桩,从这个基本点出发,对问题的理想化加以改进。

Poulos 对单根摩擦桩的分析,是把桩当作在地面处受有轴向荷载 P ,桩长为 L ,桩身直径为 D ,桩底直径 D_b 的一根圆柱。为了便于分析,假设桩侧摩阻力为沿桩身均匀分布的摩擦应力 q ,桩端阻力为在桩底均匀分布的垂直应力 P_b (见图 3)。

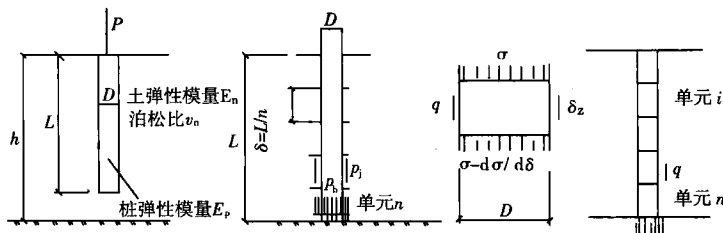


图 3 摩擦桩分析示意图

分析中假定桩侧面为完全粗糙,桩底面为完全光滑,并认为土是理想的、均质的、各向同性的弹性半空间,其杨氏模量为 E_s ,泊松比为 ν_s ,它们都不因桩的存在而改变。若桩—土界面条件为弹性的,且不发生滑动,则桩和其邻接土的位移必然相等。

3.3.2 弹性理论法的研究

D'Appolonia(1963)用 Mindlin 解系统研究了桩基础的沉降,并对下卧层是基岩的情况进行了修正,最早提出了弹性理论法。

Poulos(1968a,1968b,1969)从弹性理论中的 Mindlin 公式出发,系统地导出了单桩和群桩的计算理论以及表格。

Butterfield(1971)认为 Poulos 的假设,比如桩端光滑、桩端阻力均布、忽略桩侧径向力等假定影响了计算的精度,因此他对桩单元进行了细分,考虑了不同径向距离处桩端阻力不一致的情况,并引入桩侧径向力,采用虚构应力函数的方法求解,计算表明,径向力对竖向位移影响以及竖向力对径向位移的影响都比较小。

费勤发(1984)基于 Mindlin 应力解,提出用分层总和法来形成地基的柔度矩阵,这样能方便地考虑不同的土层分布^[12]。

杨敏(1992)采用边界积分法,分析层状地基中桩基沉降问题,基于 Mindlin 应力解,引入一个沉降调整系数进行修正,从而适用于分析各种非均匀土。

金波(1997)基于轴对称弹性力学基本方程,采用 Hankel 变换,利用传递矩阵方法得出层状地基在内部轴对称荷载作用下的位移解,建立了层状地基中单桩沉降的计算方法。

吕凡任(2004)提出了考虑桩土相对位移的“广义弹性理论法”,从而可以考虑桩周土的塑性,并将其应用于斜桩分析。

王伟(2006)将 Randolph 模型中桩身位移与桩端位移的函数关系简化为一多项式,并与 Poulos 积分方程中土体柔度系数矩阵结合,提出了一种竖向受荷单桩弹性分析的改进计算方法,从而避免了为集成桩身柔度矩阵而进行的差分运算^[13]。

3.3.3 弹性理论法的假设条件

弹性理论法假定土为均质的、连续的、各向同性的弹性半空间体,土体性质不因桩体的存

在而变化。采用弹性半空间体内集中荷载作用下的 Mindlin 解计算土体位移,由桩体位移和土体位移协调条件建立平衡方程,从而求解桩体位移和应力。

3.3.4 弹性理论法本构关系的建立与求解

考虑图 3 中的典型桩单元 i ,由于桩单元 j 上的侧摩擦力 p_j 使桩单元 i 处桩周土产生的竖向位移 ρ_{ij}^s 可表示为:

$$\rho_{ij}^s = \frac{D}{E_s} I_{ij} p_j \quad (15)$$

式中 I_{ij} 为单元 j 剪应力 $p_j=1$ 时在单元 i 处产生的土的竖向位移系数。

由所有的 n 个单元应力和桩端应力使单元 i 处土产生竖向位移为:

$$\rho_i^s = \frac{D}{E_s} \sum_{j=1}^n I_{ij} p_j + \frac{D}{E_s} I_{ib} p_b \quad (16)$$

式中 I_{ib} 为桩端应力 $p_b=1$ 时在单元 i 处产生的土的竖向位移系数。

对于其他的单元和桩端可以写出类似的表达式,于是,桩所有单元的土位移可用矩阵的形式表示为:

$$\{\rho^s\} = \frac{D}{E_s} [I_s] \{p\} \quad (17)$$

式中 $\{\rho^s\}$ 为土的竖向位移矢量; $\{p\}$ 为桩侧剪应力和桩端应力矢量; $[I_s]$ 为土位移系数的方阵,由下式给出。

$$[I_s] = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & \cdots & I_{1n} & I_{1b} \\ I_{21} & I_{22} & \cdots & I_{2n} & I_{2b} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ I_{n1} & I_{n2} & \cdots & I_{nn} & I_{nb} \\ I_{b1} & I_{b2} & \cdots & I_{bn} & I_{bb} \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中 $[I_s]$ 中各元素表示半空间体内单位点荷载产生的位移,可以由 Mindlin 方程的数值积分求得。

根据位移协调原理,若桩土间没有相对位移,则桩土界面相邻的位移相等,即:

$$\{\rho^p\} = \{\rho^s\} \quad (19)$$

式中 $\{\rho^p\}$ 为桩的位移矢量。

若考虑桩是不可压缩的,则上式中的位移矢量是常量,等于桩顶沉降。根据静力平衡条件及式(17)和式(19),联立解之即可求得 n 个单元的桩周均布应力 p_j 、桩端均布应力 p_b 以及桩顶沉降 s 。Mattes 和 Poulos 在计算各单元的位移时,还考虑了桩的轴向压缩。

对于有相同的 m 根桩的群桩,将每根桩分为 n 个单元,则类似于单根摩擦桩的方程式,可得土的位移方程为:

$$\{\rho^s\} = \frac{D}{E_s} [IG] \{p\} \quad (20)$$

式中 $\{\rho^s\}$ 为所有桩的全部单元的 $m \times (n+1)$ 个土的竖向位移矢量; $\{p\}$ 为 $m \times (n+1)$ 个桩单元的桩侧应力和桩端应力矢量; $[IG]$ 为土的位移系数的 $m \times (n+1)$ 阶方阵。

矩阵 $[IG]$ 中的每一项如前单桩情况所述,可由 Mindlin 方程的数值积分求得。

根据位移协调原理,利用与前述单桩相同的方法,求得 $m \times n$ 个未知桩侧应力, m 个未知桩端应力。对于低承台群桩基础,还应考虑承台与土界面的位移协调性。Butterfield 和 Banerjee 基于上述思想分析了带刚性承台的可压缩性群桩,认为所采用的方法可以用于任意性状

的低承台群桩基础。

以上群桩分析中要解的未知数的数目很多,但 Poulos 另辟蹊径,利用对称性来减少群桩中方程的数目。这种简化的方法只需对群桩中受荷相同的两根桩进行上述分析,从这种分析中可导出如下的相互作用系数 α :

$$\alpha = \frac{\Delta \rho_a^0}{\rho_a^0} \quad (21)$$

式中 $\Delta \rho_a^0$ 为该桩由邻桩引起的附加沉降; ρ_a^0 为该桩在自身荷载作用下的沉降。

变化两根桩的桩距,可以得到无量纲形式表示的 α 与桩距的关系。根据这种相互作用系数以及叠加原理,原则上可以分析任意桩距的任何规模的群桩基础。

综上所述,弹性理论方法概念清楚,运用灵活。但受其假设的限制,与很多工程情况不符,且土性参数难以确定,计算量很大,故在实际工程应用中较少,但其适合用于程序开发。

3.4 路桥桩基简化方法

根据当地的特定地质条件和桩长、桩型、荷载等,经过对工程实测资料的统计分析可得出估算单桩沉降的经验公式。由于受具体工程条件限制,经验公式虽然具有局限性,不能普遍采用,但经验法在当地很有用处,可以比较准确估计单桩沉降,并对其他地区亦可做比较与参考。

将桩视为承受压力的杆件,其桩顶沉降 S_0 由桩端沉降 S_b 与桩身压缩量 S_s 组成,且侧阻与端阻对 S_b 、 S_s 均有影响。根据简化方法的不同和考虑角度的不同,有不同的单桩沉降简化计算方法。下式是我国《铁路桥涵设计规范》(TBJ2—85)和《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ024—85)中计算单桩沉降 S_0 的公式。

$$S_0 = S_s + S_b = \Delta \frac{PL}{E_p A_p} + \frac{P}{C_0 A_0} \quad (22)$$

式中 P 为桩顶竖向荷载; L 为桩长; E_p 、 A_p 分别为桩弹性模量和桩截面面积; A_0 为自地面(或桩顶)以 $\varphi/4$ 角扩散至桩端平面处的扩散面积; Δ 为桩侧摩阻力分布系数,对打入式或振动式沉桩的摩擦桩, $\Delta=2/3$,对钻(挖)孔灌注摩擦桩, $\Delta=1/2$; C_0 为桩端处土的竖向地基系数,当桩长 $L \leq 10m$ 时,取 $C_0 = 10m_0$,当 $L > 10m$ 时,取 $C_0 = Lm_0$,其中 m_0 为随深度变化的比例系数,根据桩端土的类型从表 1 查取。

表 1 土的 m_0 值

土的名称	土的 m_0 值/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-4}$)
流塑黏性土, $I_L > 1$, 淤泥	1000~2000
软塑黏性土, $1 > I_L > 0.5$, 粉砂	2000~4000
硬塑黏性土, $0.5 > I_L > 0$, 细砂、中砂	4000~6000
半干硬性的黏性土, 粗砂	6000~10000
砾砂, 角砾土, 碎石土, 卵石土	10000~20000

3.5 单桩沉降计算的分层总和法

单桩沉降分层总和法计算公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zi} \Delta Z_i}{E_{si}} \quad (23)$$

假设单桩的沉降主要由桩端以下土层的压缩组成,桩侧摩阻力以 $\frac{\varphi}{4}$ 扩散角向下扩散,扩散

到桩端平面处用一等代的扩展基础代替,扩展基础的计算面积为 A_e (图 4)。

$$A_e = \frac{\pi}{4} (d + 2l \tan \frac{\bar{\varphi}}{4})^2 \quad (24)$$

式中 $\bar{\varphi}$ 为桩侧各层土内摩擦角的加权平均值。

在扩展基础底面的附加压力 σ_0 为:

$$\sigma_0 = \frac{F+G}{A_e} - \bar{\gamma}l \quad (25)$$

式中 F 为桩顶设计荷载; G 为桩自重; $\bar{\gamma}$ 为桩底平面以上各土层土有效重度的加权平均值; l 为桩的入土深度。

在扩展基础底面以下土中的附加应力 σ_z 分布可以根据基础底面附加应力 σ_0 , 并用 Boussinesq 解查规范附加应力系数表确定, 也可按 Mindlin 解确定。压缩层计算深度可按附加应力为 20% 自重应力确定 (对软土可按 10% 确定)。

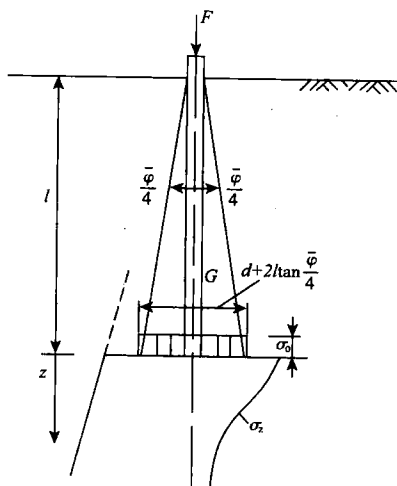


图 4 单桩沉降的分层总和法简图

3.6 单桩的数值分析法

目前应用较为广泛和成熟的数值分析方法主要包括有限元法、边界元法和有限条分法。

3.6.1 单桩的有限元法

有限元法从理论上可以通过在计算中引入一系列土体本构模型, 同时考虑影响桩承载变形性能的诸多因素, 如土的非均质性、非线性、固结时间效应、动力效应以及桩的后续加载过程等, 采用有限元还可以方便地分析桩—土—基础的共同作用性状。因此在桩基分析中得到了一定的应用 (Desai, 1974; Ottaviani, 1975; Jardine et al. 1986; Trochani, 1991; 陈晶, 2006)。用有限元法分析桩基础 (包括单桩和群桩) 的工作机理, 并以它作为原则指导实际工程以及探索和校核工程中的实用计算简化方法, 有着重要的意义。但目前直接将有限元应用到工程实际中还有一定困难, 一是因为在桩基分析中涉及的因素较多, 比较复杂, 计算过程中需要考虑许多土工参数, 计算参数难求, 工程实用性较差; 另一方面是由于考虑到这些因素在计算机编程中实现有一定的困难, 而且要求庞大的计算机容量。

3.6.2 边界元法

边界元法亦称积分方程法, 即把区域问题转化为边界问题求解的一种离散方法, 即将筏板地基中的桩进行离散化分析。Banerjee (1969, 1976, 1978)、Butterfield (1970, 1971)、Wolf

(1983)先后用边界元法对单桩和群桩进行了分析。

单纯的边界元法假设桩土界面位移协调,没有考虑桩土界面土的屈服滑移,与实际工程有一定差距。Sinha(1996)提出了一种完整的边界元法,把桩离散用边界元法分析,用薄板有限元法分析筏板,土被假定为均质弹性体,引入了土的滑移现象,以分析土体的膨胀或固结效应。目前边界元法由于计算难度大应用不广。

3.6.3 有限条分法

有限条分法首先用于分析上部结构,并取得成功。Cheung(1976)首先提出将有限条分法用于单桩分析,以分析层状地基中单桩的特性。随后 Guo(1987)将有限条分法发展成为无限层法,分析了层状地基中的桩基础,能更有效的求解层状地基中桩与土体的相互作用。王文、顾晓鲁(1998)进一步以三维非线性棱柱单元模拟土体,将桩土地基分割成一系列横截面为封闭或单边敞开的有界和无界棱柱单元,利用分块迭代法求解桩—土—筏体系。目前有限条分法在工程应用不广。

4 单桩沉降的计算方法的特点比较

对于各种单桩沉降计算方法,由于其假设条件和原理的不同,也表现出各自不同的特点,现将各种方法中对桩模型、土模型的假设条件及桩土相互作用模型比较列于表2。

通过表2和前面的分析,我们可以得到以下几点规律:

(1)对于桩的假定,其本构关系一般取弹性,虽然其在高荷载水平作用下,混凝土呈现弹塑性,但为简化起见,仍然假定其保持弹性。按照弹性连续介质理论,同一根桩上的某一单元的受力会通过土的传递影响其他桩单元的变形(如单桩弹性理论法),但在实际应用过程中,常常假设同一根桩上的桩单元彼此间互不影响,对单桩,其变形只与该单元上的荷载有关(如荷载传递法,剪切位移法等)。

(2)对于土的假定,其本构关系从弹性到弹塑性在桩土体系中都有应用。土实际上为连续介质,因此若要分析均质土中群桩的每根桩的响应,在弹性范围内, Mindlin 位移解具有无可替代的作用,可以通过 Mindlin 位移解来建立不同土结点的相互影响,从而形成土结点的柔度矩阵。若要将结论推广到一般的土,通常需要考虑土的非线性和不均匀性。

一般使用荷载传递法分析单桩时,忽略了土的连续介质特性,只考虑相邻桩单元对该土结点的影响,因此无法计量桩侧摩阻力对桩端沉降的影响。

(3)对于桩土间的相互作用,首先满足力的平衡,即桩单元结点上的力与相邻土结点的力大小相等,方向相反,有时干脆将这种结点间的作用力直接称为桩土间相互作用力;其次满足位移的兼容性。

(4)荷载传递法的特点是能较好的反映桩土间的非线性和地基的成层性,计算简便,但没有考虑土的连续性,无法直接应用到群桩分析。

(5)剪切位移法给出桩周土体的位移变化场,通过叠加方法考虑群桩共同作用,但假定桩土之间没有相对位移,桩侧土体上下层之间没有相互作用,与实际工程不符。

(6)弹性理论法考虑了土体的连续性,但其分析基于弹性力学的基本解,无法精确考虑土的成层性和非线性特性。土的性状仅仅通过 E_s 和 ν_s 两个参数加以反映也不够完善。

(7)分层总和法及经验简化法是实际工程中应用的方法,其主要是考虑附加应力对桩底土层的压缩所引起的沉降,计算较为简便,但误差较大。

(8)数值算法通过建立模型,可以考虑桩土滑移的发生等其他理论方法不能考虑的情