

岩土力学与工程技术进展

第六届江苏省岩土力学与工程学术大会论文集

主编 金丰年

DEVELOPMENT OF GEOMECHANICS AND ENGINEERING TECHNOLOGY

3

517

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

岩土力学与工程技术进展

DEVELOPMENT OF GEOMECHANICS AND
ENGINEERING TECHNOLOGY

第六届江苏省岩土力学与工程学术大会论文集

主 编 金丰年
副 主 编 谭跃虎 汪一鸣
执行主编 尹 峰

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

第六届江苏省岩土力学与工程学术大会于2009年10月31日~11月1日在苏州召开,会议由江苏省岩土力学与工程学会主办,解放军理工大学工程兵工程学院、苏州大学城市轨道交通学院联合承办。会议共收到论文126篇,评选出优秀论文20篇,收录论文集46篇,内容涉及城市隧道工程设计、施工技术,大型岩土工程案例,岩土力学进展,地基处理技术,大型深基坑支护技术,岩土工程与可持续发展,岩土工程风险评价与管理等主题,重点反映了近年来江苏省及部分其他省市在岩土力学与工程技术领域取得的新成就和新进展,可供广大科研及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩土力学与工程技术进展/金丰年主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2009.10

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0074 - 7

I. 岩… II. 金… III. ①岩石力学—学术会议—文集
②岩土工程—学术会议—文集 IV. TU4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 190286 号

书 名 岩土力学与工程技术进展
主 编 金丰年
责任编辑 吴学兵
出版发行 中国矿业大学出版社
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
排 版 徐州中矿大印发科技有限公司排版中心
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
经 销 新华书店
开 本 880×1230 1/16 印张 19.25 字数 569 千字
版次印次 2009 年 10 月第 1 版 2009 年 10 月第 1 次印刷
定 价 80.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

第六届江苏省岩土力学与工程学术大会

(苏州大学 2009)

主办单位:

江苏省岩土力学与工程学会

承办单位:

解放军理工大学工程兵工程学院

苏州大学城市轨道交通学院

协办单位:

苏州轨道交通有限公司

江苏华东地质建设集团有限公司

南京土壤仪器厂有限公司

学术委员会:

主 席:金丰年

副主席:刘汉龙 刘松玉 谢兴楠 周国庆 杨 挺 靖洪文
汪一鸣 谭跃虎 邵国建 陈国兴 阎长虹 杨 平

委 员:(以姓氏笔画为序)

于广云	王心联	韦 杰	方 磊	朱家祥	李晓昭
杨维好	余才高	宋宏伟	汪 凯	陈 甦	陈新民
金如元	周友根	赵伟斌	胡明亮	郭志昆	章 青
程知言	裘慰伦	蔡钟业	樊有维	魏大平	

组织委员会:

主 任:汪一鸣

副主任:高伟江 谭跃虎

委 员:陈 甦 金菊华 吴可旻 蒋 宇 尹 峰 孙景明
曹世霞 孙小园

目 录

复合桩基地基破坏性状的有限元数值模拟	蒋 刚, 宰金珉, 王旭东, 赵金勇(1)
软土地基中按变形控制的桩基设计方法探讨	章 钊, 胡立峰, 龚维明, 穆保岗, 过 超(6)
固化灰浆防渗墙墙体浆材配制的试验研究	代国忠, 金其军, 徐 志(11)
设置柔性支撑提高结构构件的抗震能力分析	柳锦春, 还 毅, 陈 力, 杜茂林(16)
基于盲数理论的堰塞湖溃坝模型研究	董陇军, 杨 冠, 赵平水(23)
昆山世贸广场基坑工程实录	张全胜, 王兴龙, 刘 瑞(28)
灰岩地基在三轴应力条件下细观破坏模拟	赵吉坤(33)
基于信号检测理论的地铁施工人员安全能力评价	王盼盼, 李启明, 邓小鹏, 吴伟巍(38)
复合加固技术在黄土深基坑中的应用	梁恒昌, 周国庆, 刘志强, 周金生, 赵光思, 商翔宇(44)
外水压力作用下透水衬砌渗流—应力耦合分析	刘仲秋, 章 青(50)
全断面掘进机综合试验台反力架设计与分析	赵 羽, 高伟贤, 邓立营(55)
E_{v0} 检测技术及探讨	史贵才, 蒋晓曙, 葛修润(59)
移动荷载下土体应力响应影响因素的三维有限元分析	陈国兴, 刘雪珠, 龙晓东(63)
大型洞库扩建技术分析	许宏发, 王江南, 金丰年, 江 森, 刘新宇(69)
地质雷达在隧道地质超前预报中的应用研究	喻 军, 刘松玉(74)
温度补偿块在电阻应变测量使用中存在问题的分析	王 源, 刘松玉, 毕 佳, 谭跃虎, 李二兵(79)
真空—堆载联合预压下侧向变形机理及解析解研究	彭 勃, 张 磊, 赵慧英(83)
软土深基坑开挖地表沉降计算方法研究	尹 峰, 张尚根, 周晓东(88)
太沙基固结方程有限差分分析排水边界对固结速率的影响	牛文杰, 叶为民, 黄 雨, 陈 宝(92)
强夯法研究现状总结	赵华新, 凌 敏(97)
锚杆的工程临界锚固长度问题研究	金丰年, 王 波, 蒋美蓉, 周健南(105)
大直径双环梁基坑支护体系设计与优化	刘益平, 戴洪军(110)
长短组合管桩在百米高楼中的应用	梁勇然, 徐 凯(114)
自应力小直径钢管组合桩在古建筑地基基础加固中的应用	张冠洲, 胡 智, 张小伟, 王道远(119)
巷道围岩变形影响因素探讨	文志杰, 申玉三, 王振武(122)
上海国际航运中心洋山深水港岩土工程实录	庄 宁, 王大刚, 黄明毅(126)
隧道喷锚支护安全系数的三维非线性有限元分析	李 映, 章杨松(131)
卡拉水电站滑坡风险分析及其稳定性对坝址选择的影响	李宗杰, 谭跃虎, 李二兵(135)
越流承压含水层非稳定流半解析数值分析	王旭东, 刘远航, 徐 进, 宰金珉(142)
饱和软土强夯的实践与探讨	资西阳(148)
真空堆载联合预压加固软土地基稳定分析	刘加才, 要彦波, 王旭东, 汪中卫(153)
多步滚动实时预报法在建筑物沉降监测中的应用	张尚根, 尹 峰(158)
FRP 复合桩在深水基础中的应用	周香琴, 戴国亮, 龚维明(163)
寒区隧道冻胀条件下的塑性分析	张全胜, 王兴龙(167)
浅埋连拱隧道施工数值模拟与监测	段建立, 谭跃虎, 王 源(172)

压缩模量计算中孔隙比取用之辨析	谭荣章(176)
综合改良法处理膨胀土地基的膨胀率试验研究	兰常玉,薛 鹏(180)
静载及动载作用下碳纤维混凝土压敏性试验研究	钱金蕊,刘 松(184)
多支盘桩沉降的简化计算	王淑新,王旭东,汪中卫,宰金珉(188)
隧道最小安全防护层厚度的估算与讨论	周健南,金丰年,王 斌(193)
基于土体弹塑性理论的复合桩基沉降有限元分析	张传海,郭兴文(198)
苏州北环快速路隧道基坑围护设计	钱劭彦(204)
真空预压在海防 DAP 项目软土地基处理中的应用	何 平,李精英(207)
苏州市北环快速路隧道的基坑支护设计简介	高 晶(213)
基坑施工与基坑设计的动态反馈	梁玉红,张红琴,王雪丽(217)
关于三轴渗透试验的应用分析及探讨	陈伟凌(221)
* 掺入轮胎橡胶颗粒对砂土剪切性状的影响	邓 安,冯金荣(224)
* Near-Miss(险兆事件)管理系统在地铁施工安全管理中的应用	周志鹏,李启明,邓小鹏,吴伟巍(228)
* 中厚煤层回采巷道变形机理及其力学模型建立	文志杰,朱永鹏,刘崇凌,孙 进(234)
* 穿越采空区桥隧工程危害效应分析及对策	王树仁,张海清,慎乃齐(238)
* 钉形搅拌桩复合地基工程应用及其沉降计算方法探讨	易耀林,刘松玉,杜延军(242)
* 泰州长江大桥群桩基础工后沉降数值分析	王东栋,许建聪,冯兆祥(246)
* 测井岩性的非线性动态辨识新方法及应用	郭 健,龚 静,余 飞(250)
* 边界面模型在 ABAQUS 的开发应用	费 康,刘汉龙(254)
* 南宁大桥地锚内力性状分析	任 鹏,黄 东(258)
* 砂岩吸水特性试验研究	周 莉,何满潮,李京阳,王桂莲(262)
* 基于流变效应锚杆柔性支护在基坑中的应用	王 军,曹 平,曾国柱,林 杭(267)
* 静压桩沉桩机理及承载力试验研究	胡立峰,龚维明,过 超,章 钊(271)
* 沉箱—钢管桩逆作法复合基础试验研究	过 超,龚维明,徐国平,刘 高,穆保岗(275)
* 深部盐岩含夹层地层初始地应力场模拟分析	马林建,刘新宇,马淑娜,王 丹(280)
* 变径水泥土搅拌桩加固桥头软基的试验分析	向 玮,刘松玉,朱志铎,叶文勇,蔡 志(284)
* 高山峡谷地区坝陵河大桥西岸边坡稳定性及工程效应研究	樊敬亮,金雪莲,梁玉红,曾钱帮(288)
* 盾构出洞水平冻结解冻温度场三维有限元分析	王效宾,杨 平,张 婷,王海波(291)
* 南京地铁集庆门盾构隧道进洞端头人工冻结加固温度实测研究	杨 平,袁云辉,余才高,金 明,张旭晖,王海波(295)
* 未确知均值分级方法及在回采巷道围岩分类中的应用	董陇军,赵国彦(299)

(注: * 为优秀论文,全文已发表于《解放军理工大学学报》,本论文集仅择要收录)

复合桩基地基破坏性状的有限元数值模拟

蒋 刚, 宰金珉, 王旭东, 赵金勇

(南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210009)

摘要:复合桩基是介于常规桩基和天然地基之间的过渡基础形式, 基桩达到塑性支承状态后, 后续荷载主要由承台下的地基土承担。复合桩基的整体极限承载力状态和相应破坏模式涉及承台下地基土的极限性状。不同桩距的复合桩基三维有限元数值模型计算表明, 随着桩间距的增大, 桩对地基土的遮拦作用降低, 复合桩基的整体极限状态逐渐由承台下地基土控制。基桩间土地基在加载过程中主要为竖向压缩, 形成近似梯形的弹性核, 地基出现绕桩的水平位移, 与天然地基破坏形态明显不同。复合桩基达到整体极限状态时, 可将承台下地基的破坏分解为地基竖向滑移破坏和水平向绕桩滑移破坏, 地基的破坏模式不同于天然地基, 且受桩间距的影响。

关键词:复合桩基; 地基极限承载力; 绕桩阻力; 地基破坏模式

Analysis on Failed Behavior of Soils under Composite Piled Foundation with FEM Simulation

JIANG Gang, ZAI Jinmin, WANG Xudong, ZHAO Jinyong

(College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing, Jiangsu 210009, China)

Abstract: Composite piled foundation is the transitional foundation of general piled foundation and natural foundation, the following load was taken on the soil under raft after foundation pile in plastically bearing state. The whole ultimate state and failed character of composite piled foundation are controlled with failed behavior of soil under raft. The results of three-dimensional FEM simulation of composite piled foundation with varied pile space indicated: the whole ultimate state and failed character of composite piled foundation was dominated gradually with pile space increase. The soils in-between foundation pile under raft were compressed during loading, becoming with trapezoid elastic nuclear, and horizontal deformation of soil around pile under raft appeared. The failed behavior of composite foundation was obviously different from that of natural foundation. The composite piled foundation reach at whole ultimate state, the soils failed behavior was controlled with vertical sliding and horizontal sliding around pile, differ from that of natural foundation and affected by pile space.

Key words: composite piled foundation; ultimate bearing capacity of foundation; resistance sliding around pile; failed character of foundation

作者简介: 蒋刚(1971—), 男, 湖北咸丰人, 博士, 副教授, 主要从事土力学与基础工程研究

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2004420); 江苏省“青蓝工程”资助

1 引言

复合桩基是介于常规桩基和天然地基之间的过渡基础形式,它不仅能充分利用桩的极限承载力,同时在保证基础沉降满足要求的前提下,也能充分利用承台(筏板)下地基土的承载力^[1]。复合桩基设计桩间距的不同,影响到承台下地基土的极限性状,进而影响其整体极限承载力状态和相应的破坏模式。显然有桩条件下地基土的极限承载力性状与天然地基有所差别。

桩间距 $s_n \geq 6d$ (d 为桩径)的复合桩基,基桩达到承载力极限状态后,后续荷载主要由承台下的地基土承担并逐渐趋近于极限状态。地基土达到极限承载力状态时,将克服桩的遮帘作用,使其极限承载力较天然地基有一定的提高^[2],成为复合桩基与常规桩基破坏模式的主要区别。

根据复合桩基的非线性共同作用性状,辛金珉^[1]推断复合桩基的可能破坏模式为:

① 复合桩基中各基桩达到极限承载力 P_u ,进入塑性支承状态后,桩能承担的荷载 $Q_p = nP_u$ 保持不变,桩端产生一定的贯入沉降,复合桩基转入进一步加载以天然地基为主的承载状态。

当荷载不断增加,直至基底土体承载力也达到其极限承载力 f_u ;即极限承载力 $Q_u = nP_u + f_u A$ (A 为承台底净面积),达到复合桩基整体承载力极限状态之一。

② 对于 $s_n \geq 6d$ 特大桩距,土体克服桩对土侧向挤出的绕流阻力,在基底压力 $f_u + \Delta f_u$ (Δf_u 是基底土由于桩的遮帘作用而得到的极限承载力的提高值)作用下出现剪切滑动面,土体挤出, $Q_u = nP_u + (f_u + \Delta f_u) A$, 达到复合桩基整体承载力极限状态之二。

③ 对中小桩距 ($s_n \leq 6d$) 的复合桩基,荷载在桩端下土体中产生高应力区,并使该深层土体产生剪切破坏面,达到复合桩基整体承载力极限状态之三,可按实体深基础破坏的有关理论公式计算极限荷载 Q_u 。

复合桩基的破坏模式的确定,关键在于承台下地基土的发挥及破坏性状。针对这一问题,本文利用 ABAQUS 有限元软件建立复合桩基三维模型^[3,4],开展复合桩基地基极限承载力性状和破坏模式的研究。

模型中地基土采用 Mohr-Coulomb 理想弹塑性模型,桩采用弹性模型,竖向荷载作用下,承台与土体考虑摩擦不产生相对滑移。模型中地基土、桩的物理力学参数见表 1。

表 1 数值模型分组与计算参数

数值分析项目		土重力密度 /(kN/m ³)	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	土模量 /MPa	桩模量 /MPa	桩重力密度 /(kN/m ³)
模型 A	带承台单桩模型	18	10	30	15	2.8×10^4	23
模型 B	4d 桩距双桩模型	18	10	30	15	2.8×10^4	23
模型 C	6d 桩距双桩模型	18	10	30	15	2.8×10^4	23
模型 D	9d 桩距双桩模型	18	10	30	15	2.8×10^4	23

2 复合桩基下地基土极限性状的数值模拟

2.1 带承台单桩三维有限元分析

带承台单桩计算模型(取过板边中点的竖直截面),如图 1 所示。

根据有限元计算结果整理,图 2 为极限荷载下桩轴线地基竖向塑性区分布图,图 3 为极限荷载下桩轴线竖直剖面地基的竖向位移分量分布,

图 4 为极限荷载下板底 0.5B(B 为承台板宽)深度的水平位移分布。从图中可以看出,加载至极限荷载时,地基中塑性区因桩的存在而形成绕桩的环带。地基的竖向破坏特征与天然地基类似,而承台下地基土体水平位移分量均以桩轴线为中心呈发射状,且随深度增加迅速衰减,未出现绕桩流动。

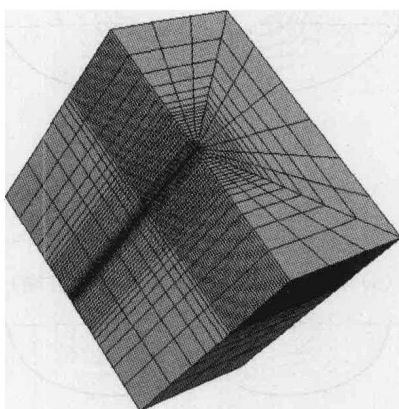


图1 带承台单桩模型

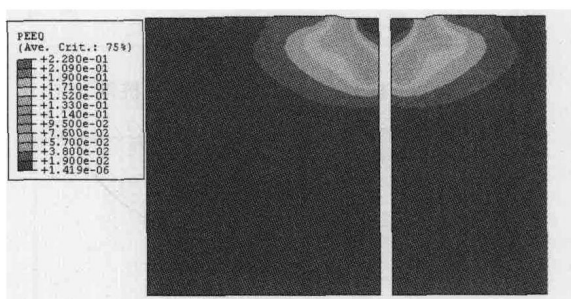


图2 极限荷载 Q_u 时地基塑性区分布
(注:取图深度未达桩端)

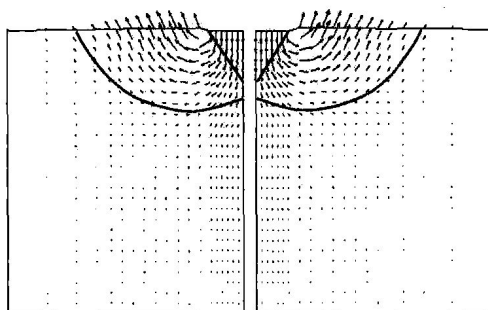


图3 极限荷载 Q_u 时地基竖向位移分布图

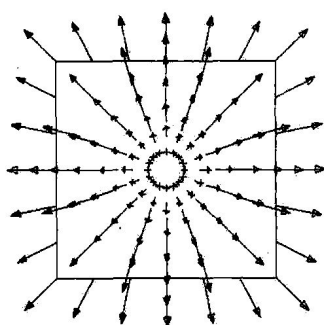


图4 极限荷载 Q_u 时 $0.5B$ 深度处地基水平位移分布

2.2 4d、6d、9d 桩距双桩复合桩基三维有限元分析

不同桩间距双桩复合桩基的数值模型 B、C、D 的几何模型和网格划分如图 5 所示(过双桩轴心的竖直截面截取后的半模图像)。

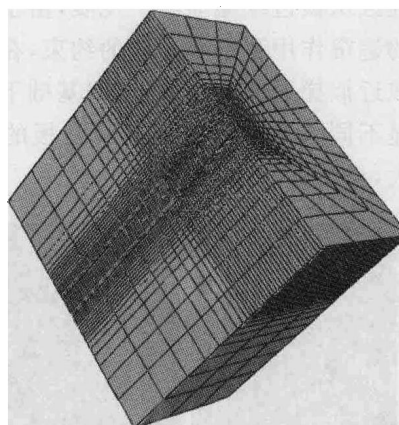


图5 4d、6d、9d 桩距计算模型

2.2.1 4d、6d、9d 桩距双桩复合桩基承载性状

复合桩基中基桩进入塑性支承状态后^[5],后续荷载主要由承台下地基分担。由整理的 4d、6d、9d 桩间距复合桩基 $Q-S$ 曲线(见图 6)可知,随着桩间距增大,桩对土体的挟持约束作用降低,6d 桩距复合桩基 $Q-S$ 曲线较 4d 桩距 $Q-S$ 曲线趋于平缓,介于常规桩基和天然地基的 $Q-S$ 曲线之间,而 9d 桩距复合桩基 $Q-S$ 曲线特征更趋近于天然地基的 $Q-S$ 曲线特征。这说明随着桩间距的增加,复合桩基的整体极限状态逐渐由承台下地基土控制。

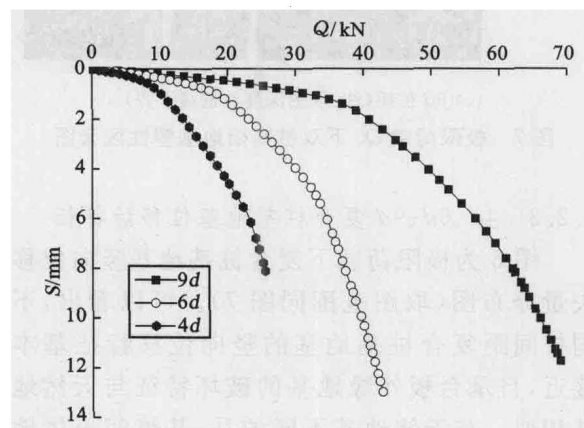


图6 4d、6d、9d 桩距 $Q-S$ 曲线

2.2.2 4d、6d、9d 复合桩基地基塑性区分布特征

图 7 为极限荷载下复合桩基地基竖向剖面塑性区分布(其中 4d、6d 基础取 6B 宽度、4B 深度范围,9d 基础取桩长深度、8B 宽度范围)。地基中塑性区从板边缘逐渐向下发展,由于桩对板下土体的遮帘作用和板对土体的约束,在板底和桩间形成近似梯形的弹性核,与浅基础下弹性核形态明显不同。弹性核范围随承台板的尺寸增加而加大,且受桩间距影响。

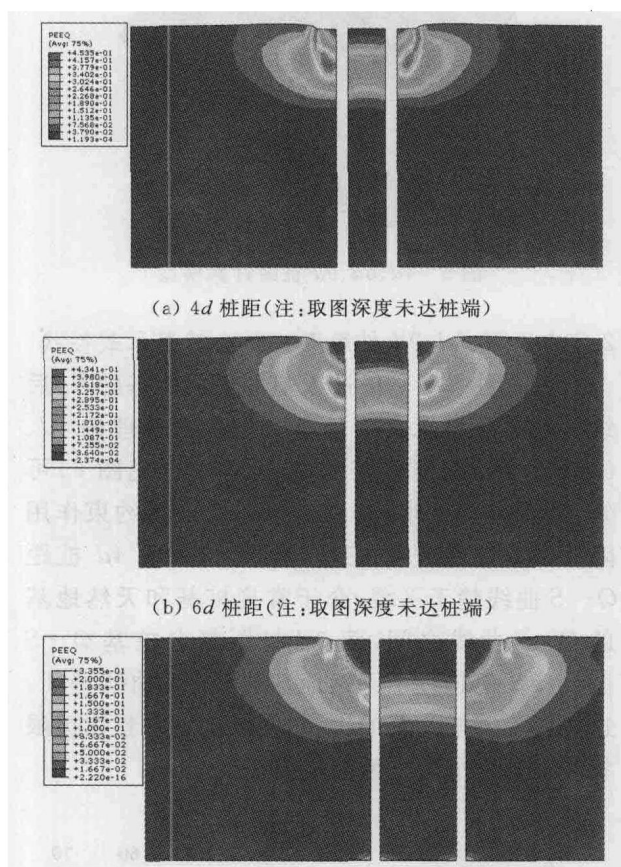


图 7 极限荷载 Q_u 下双桩基础地基塑性区云图

2.2.3 4d、6d、9d 复合桩基地基位移场特征

图 8 为极限荷载下复合桩基地基竖向位移矢量分布图(取图范围同图 7)。可以看出,不同桩间距复合桩基地基的竖向位移特征基本接近,且承台板外缘地基的破坏特征与天然地基相似。与天然地基不同的是,基桩间土体地基在加载过程中主要为竖向压缩,形成板下的弹性核区域。

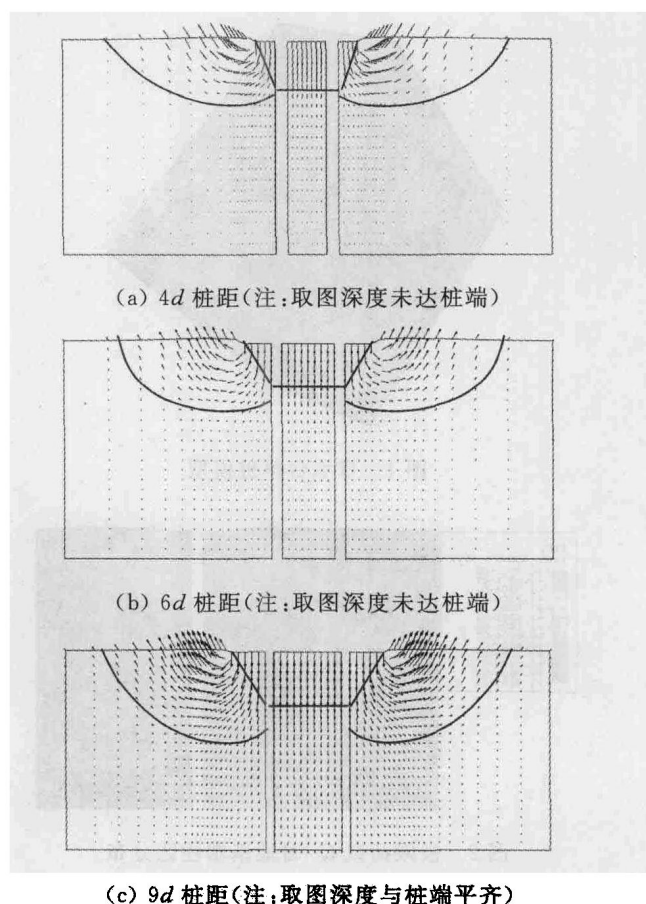


图 8 不同桩距复合桩基地基竖向位移分布图

图 9 为极限荷载时承台下 1.0B 深度处地基水平位移矢量分布。可以看出达到整体极限状态时,复合桩基下地基土将会出现绕桩的水平位移,绕桩范围在板下 0.5B 到 1.5B 深度范围内,且随深度呈先增加后减弱的趋势。水平绕桩范围可用抛物线型描述。

3 结 语

复合桩基达到整体极限状态时,桩的遮帘作用效应使得地基受到绕桩阻力作用,其破坏机理与常规桩基不同。极限荷载作用下复合桩基三维有限元数值模拟结果表明:

(1) 带承台单桩地基的竖向破坏特征与天然地基类似,而承台下地基未出现绕桩流动。

(2) 6d 桩距复合桩基 $Q-S$ 曲线介于常规桩基和天然地基的 $Q-S$ 曲线之间,而 9d 桩距复合桩基 $Q-S$ 曲线特征更趋近于天然地基的 $Q-S$ 曲线。说明随着桩间距的增加,复合桩基的整体极限状态逐渐由承台下地基土控制。

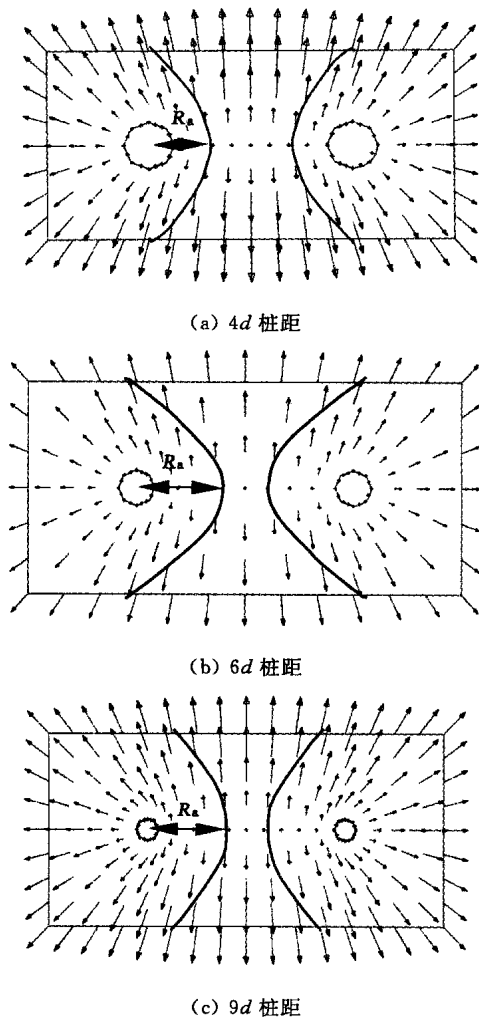


图9 板下地基 1.0B 深度处地基水平位移矢量

(3) 基桩间土体地基在加载过程中主要为竖向压缩,在板底和桩间形成近似梯形的弹性核,极限状态时弹性核与浅基础下弹性核形态明显不同,地基土也产生绕桩水平位移,水平绕桩范围可用抛物线型描述。

(4) 复合桩基达到整体极限状态时,可将承台下地基的破坏分解为地基竖向滑移破坏和水平向绕桩滑移破坏。复合桩基下地基的破坏性态与天然地基的破坏特征有明显差别,且受桩间距的影响,破坏模式不同于天然地基。

参考文献:

- [1] 辛金珉. 复合桩基理论与应用[M]. 北京: 知识产权出版社, 中国水利水电出版社, 2004.
- [2] 辛金珉, 杨嵘昌. 复合桩基承台下土的极限承载力提高值理论解[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 39-48.
- [3] 邓楚键, 孔位学, 郑颖人. 地基极限承载力增量加载有限元求解[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 500-504.
- [4] 郑颖人, 赵尚毅. 岩土工程极限分析有限元法及其应用[J]. 土木工程学报, 2005, 38(1): 91-99.
- [5] 辛金珉. 塑性支承桩—卸荷减沉桩的概念及其工程应用[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 273-278.

软土地基中按变形控制的桩基设计方法探讨

章 钊, 胡立峰, 龚维明, 穆保岗, 过 超

(东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:本文介绍了按变形控制桩基设计方法的研究状况,列出了沉降控制复合桩基、减少沉降量桩基、复合桩基、疏桩基础和桩基逆作法等几种主要的设计方法,总结出它们的共同点和各自特点,并结合工程实例对各种设计方法进行对照比较,从而能更合理地、有选择性地应用于工程实践中。

关键词:变形控制;桩基础;桩基逆作法

Discussion on Design Methods of Pile Foundation Based on Settlement Control to Soft Soil Ground

ZHANG Zhao, HU Lifeng, GONG Weiming, MU Baogang, GUO Chao

(Department of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: The development of design method of pile foundation based on settlement control was briefly referred in this paper. The major design methods, such as settlement-controlled composite pile foundation, settlement-reducing pile foundation, compound pile foundation, sparsely pile foundation and pile foundation constructed in reverse order were presented. Their common ground and respective characteristics were summarized, and engineering cases were also given. This study is helpful for the proper application of these design methods.

Key words: settlement control; pile foundation; pile foundation constructed in reverse order

为充分发挥桩间土的直接承载能力,早在20世纪60年代初就已经提出按变形控制进行桩基设计。在国外^[1],1977年Burland等学者比较明确地指出桩基按沉降变形设计将比按承载力设计更为经济。1978年Hain和Lee指出桩基对减少沉降量的效果显著,并分析了影响桩间土荷载分配的因素。1979年Hooper基于有限元模拟分析,指出建造一个具有大垂直刚度的复合地基不需要太多的桩数。1980年H. G. Poulos^[2]通过对片筏一桩一土相互作用的分析,提出了仅用于减少沉降桩基础的沉降计算公式。

20世纪80年代初期,瑞典J&W设计咨询研究院提出了Creep Pile的概念和设计方法。1986年R. W. Cooke指出,由传统的设计方法设计的桩基础的实际安全系数远远超过2.0或3.0,并指出桩基础在纯粹用来减少基础沉降的地方,均质土中模型桩的试验表明在桩间距为4倍桩径时再加入更多的桩已不能显著地减少沉降。在国内,1979年童谓湘^[3]基于群桩基础工作机理的分析,提出了分不同情况按沉降设计桩基的初步想法。1982年黄绍铭、裴捷^[4]等人在由Geddes应力解导出的沉降计算方法的基础上,

作者简介:章钊(1984—),男,硕士研究生

基金项目:国家“863”计划资助项目(2007AA11Z102)

提出了沉降控制复合桩基的设计方法,认为沉降控制复合桩基是以变形控制为原则的,且考虑了桩土相互作用,是介于浅基础与桩基之间的一种基础形式。目前该法已列入上海市标准《地基处理技术规范》(DBJ08—40—94)^[10]和上海市工程建设规范《地基基础设计规范》(DGJ08—11—1999)。1988年同济大学杨敏^[6]提出了减少沉降桩基础,通过实践深化了计算方法。1992年宰金珉^[6]提出了复合桩基的设计方法。20世纪90年代初温州市建筑设计院管自立^[7,8]基于充分利用温州地区浅埋硬土层良好承载力的考虑,提出了疏桩基础的设计思想。90年代末东南大学龚维明等^[9]开始对桩基逆作法进行研究,提出了高层建筑桩基逆作法简化理论、设计计算方法和沉降计算公式。

本文列举了几种按变形控制设计桩基础的设计方法,从理论上分析比较了它们的桩基承载力、沉降、安全系数计算方法,对各自的特点进行总结,通过工程实例进行具体分析比较,使它们能更合理地、有选择性地运用于工程实践中。

1 几种按变形控制的桩基础设计方法

1.1 《地基处理技术规范》方法

上海市地方标准《地基处理技术规范》将沉降控制复合桩基定义为桩与承台共同承担外荷载、按沉降要求确定用桩数量的低承台摩擦桩基。该方法是根据 Geddes 按弹性理论中 Mindlin 应力公式积分后得到的单桩荷载在半无限体中产生的应力解,用简单叠加法原理求得群桩荷载在地基中产生的应力,然后按分层总和法计算沉降并进行适当修正。该法可以考虑桩基中桩数、桩间距、不规则布桩法、不同桩长等因素对沉降计算结果的影响。

沉降控制复合桩基,承台始终与地基土保持接触,桩与承台共同承担外荷载。其规律比较复杂,随时间和外荷载的大小而变化,若不考虑时间因素,承台和桩在外荷载作用下沉降达到基本稳定的条件下,荷载较小时,主要由桩承担外荷载,承台居于次要地位,随着荷载的增大,承台作用逐步发挥,当荷载超过桩基中各单桩极限承载力之和 $n \cdot P_u$ 后,桩始终承担 $n \cdot P_u$,而承台则承担了外荷载超出 $n \cdot P_u$ 的余下部分。

1.2 杨敏方法

杨敏提出的减少沉降桩基础^[5],是按控制地基沉降的原则设计的桩基础,也即在设计时由基础的沉降控制来确定桩数和桩长,主要用于天然地基强度能满足设计要求但沉降过大的情况。设计减少沉降桩基础时,主要的工作是计算出基础沉降与使用桩数之间的关系,目前在设计中采用的是半经验、半理论法。将基础沉降分为两部分,一部分为桩群分担的荷载所引起的建筑物沉降 S_1 ,而另一部分为承台分担的荷载引起的建筑物沉降 S_2 ,总沉降为

$$S = S_1 + S_2 \quad (1)$$

由式(1)可以计算出使用不同的桩数所对应的基础的沉降量,从而绘出桩数与沉降的关系曲线。实际工程设计时应从控制沉降和安全因素等角度来选择一个既经济又合理的桩数。

地基强度验算采用下式

$$\frac{Q - n \cdot P}{A_c - n \cdot A_p} \leq \xi \cdot f \quad (2)$$

式中, ξ 为考虑置入桩体后对原状地基强度的影响系数; f 为经修正后的天然地基承载力设计值; n 为桩数; A_c 为承台面积; A_p 为桩顶截面积; Q 为上部结构竖向力设计值、基础自重设计值和基础上土重标准值 G 之和; p 为单桩极限承载力。

1.3 宰金珉方法

宰金珉所提出的复合桩基为按大桩距[如(5~6) d 以上]稀疏布置的低承台摩擦群桩或端承作用较小的端承摩擦桩与承台底土共同承载的桩基础。

文献[6]给出天然地基承载力设计值 f 的利用系数 ξ ,单桩极限承载力 P_u 的利用系数 ζ ,桩数 n 确定如下:

$$n = \frac{Q - \xi \cdot f \cdot A}{\zeta \cdot P_u} = \frac{(1 - \xi \cdot \Psi) \cdot Q}{\zeta \cdot P_u} \quad (3)$$

式中, $\Psi = \frac{f \cdot A}{Q}$; A 为承台底总面积;其他参数意义同上。

复合桩基设计中单桩荷载水平已接近 P_u ,桩间土又直接承担一部分荷载,故总沉降比纯桩基要大得多,其计算满足不大于容许沉降的要求至关重要,甚至是控制性的步骤。

沉降可作如下简单估算:承台视为刚性,总

沉降 S 视为分别由 Q_s 和 Q_p 引起的沉降 S_1 和 S_2 之和。 S_1 可按弹性半空间上刚性板沉降公式估算:

$$S_1 = m_r \cdot \omega_r \cdot b \cdot P_0 \frac{1 - \mu_0^2}{E_0} \quad (4)$$

式中, E_0 、 μ_0 为土的变形模量和泊松比,按土层厚度加权平均取用; $p_0 = \xi \cdot \varphi - \gamma \cdot D$; D 为承台埋深。

S_2 可按刚性高承台群桩沉降的理论解估算。

常规桩距的中小群桩和较大桩距以下的大群桩,沉降以桩端下土层压缩为主,故可视为实体深基础,按桩基沉降的常规方法来计算。

1.4 管自立法

为充分利用温州地区浅埋硬土层良好承载力,管自立^[7]提出疏桩基础的设计思想,对由传统桩基设计所确定的桩的数量和间距进行精简与疏布。设计思想可归纳为“长桩疏布,宽基浅埋”八字要点。

文献[8]指出,由于桩承台下地基土的压缩变形使位于承台下某一区段的桩摩擦力得不到发挥。桩的有效工作长度为

$$L_{\text{有效}} = L - L_B \quad (5)$$

式中, $L_B = (1.0 \sim 1.5) \cdot B$; L 为实际桩长; B 为桩承台宽度。

单桩有效极限承载力为

$$P_{\text{有效}} = \pi \cdot D \cdot \sum_{L_B}^L f_i + f_p \cdot A_p \quad (6)$$

式中, f_i 为各土层的极限摩阻力; f_p 为桩端的极限端阻力; A_p 、 d 分别为桩的横截面积和直径。

疏桩基础中桩发挥总承载为各单桩有效承载力之和,即 $Q_{\text{桩}} = n \cdot P_{\text{有效}}$, 式中 n 为桩数。承台实际承担量为 $Q_{\text{承}} = Q - Q_{\text{桩}}$, 式中 Q 为上部结构传给基础的总荷载。

1.5 桩基逆作法

在高层建筑中,为了合理利用桩土共同作用,桩基逆作法在实际工程中得到了重视。所谓桩基逆作法^[10],就是指这样一种工艺:施工开始,先施工地下室的底板(柱下为较厚的承台)或筏板,同时在设计的桩位处预留桩孔和锚杆;施工地面以上若干层的上部结构后,当上部结构的自重荷载满足压桩要求,并且天然地基的承载力

能够满足这一阶段上部结构荷载时,按照设计的方法在地下分批进行压桩;继续施工上部结构,在沉降观测的基础上,适当时机封桩,上部结构继续施工直到结构封顶。

文献[9]根据桩基逆作法施工顺序,可将基础受力分为两个阶段。第一阶段:地基土承受基础及其上部已建 n_1 层结构自重和施工荷载 P_1 , 此时(时间为 t_i)相当于一般浅基础;第二阶段:桩间土和桩共同承担 P_1 和后期建造的 n_2 层结构自重和活载 P_2 。为便于理论分析,将基础计算分为三个步骤进行。第一步,在 P_1 作用下,浅基础 t_i 时的沉降 S_{t_i} 及最终沉降 S_{t_f} ;第二步,封桩完毕后,在 P_1 作用下,带桩基础的最终沉降 S_1 ,此时需考虑桩土共同作用导致基础刚度的增大;第三步,在增加荷载 P_2 作用下,带桩基础的沉降 S_2 。需特别注意的是,大量预制桩压入土中后导致土体产生一定的隆起量,设计时必须考虑其上抬量 S_3 。将上述二、三步各自的沉降相加减即为基础的最终沉降。则基础最终沉降为

$$\begin{aligned} S &= S_1 + S_2 - S_3 \\ &= S_{t_i} + \frac{K_r}{K_{pr}} (S_{t_f} - S_{t_i}) + \\ &\quad \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{K_r}{K_{pr}} (S_{t_f} - S_{t_i}) - \\ &\quad \frac{n \cdot V_p}{A} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_v \end{aligned} \quad (7)$$

式中, K_r 为浅基础的刚度; K_{pr} 为带桩基础的刚度; n 为桩数; K_1 为体积变化系数,一般取 $0.7 \sim 0.95$; K_2 为挤土施工系数,与桩的数量、密度、打桩方向有关,一般取 $0.55 \sim 0.8$; K_v 为垂直位移系数,一般取 $0.33 \sim 0.4$ 。

桩上分担荷载为

$$P_p = \lambda(1 - u_i)P_1 + \lambda P_2 = \lambda(P_0 - u_i P_1) \quad (8)$$

基底土分担荷载为

$$P_i = P_0 - P_p = P_0(1 - \lambda) + \lambda \cdot u_i \cdot P_1 \quad (9)$$

式中, $P_0 = P_1 + P_2$, 显然,由式(7)至式(9)可以确定压桩时间和桩数,以控制基础的最终沉降和桩土荷载分担。

2 对比分析

以上设计方法名称各不相同,但本质上都是以控制变形为原则、考虑桩和土的共同作用、充

分发挥地基土和桩的承载潜能、低承台、大桩距摩擦桩或者是端承作用较小的摩擦端承桩,且目前只能应用于多层建筑或者小高层建筑。其设计计算核心是要给出一个能计算桩数与沉降关系的公式,以便确定合适的桩数,使建筑物沉降

在容许沉降量以内,并满足整体承载力的要求。对沉降控制复合桩基、减少沉降桩基础、复合桩基、疏桩基础、桩基逆作法设计,就桩土荷载分担情况、沉降计算、安全系数及常用参数进行比较,几种设计方法的分析比较结果如表 1 所列。

表 1 几种按变形控制的桩基设计比较表

方法	桩土荷载分担	沉降计算	安全系数	常用参数及特殊参数
《地基处理技术规范》方法	外载小于单桩极限承载力总和,外载由桩全部承担;外载大于单桩极限承载力总和,超出部分荷载由承台分担	$S=S_{\text{承台}}+S_{\text{桩}}$, $S_{\text{承台}}$ 用一般浅基础沉降计算方法计算,一般采用分层总和法; $S_{\text{桩}}$ 也采用分层总和法;计算 $S_{\text{承台}}$ 忽略桩的影响	$K=\frac{\eta_{sp} \cdot n \cdot P_u + \eta_c \cdot f_u \cdot A}{Q}$, η_{sp} 、 η_c 为群桩和承台的效应系数,当平均桩距大于 6 倍桩径时,均近似取 1.0,此时安全系数与疏桩基础安全系数公式相同	校核整体承载力 $Q \leq \xi \cdot n \cdot P_u + A_c \cdot f$, ξ 为复合桩基承载力调整系数,取 0.55
杨敏方法	同上,单桩极限承载力按式(10)计算	$S_{\text{承台}}$ 也可以用弹性理论公式法, $S_{\text{桩}}$ 常由 Poulos 和 Davis 公式确定	文献[5]定义安全系数为 $K_{sp}=K_s \cdot \frac{Q_s}{Q} + K_p \cdot \frac{Q_p}{Q}$, 将天然地基和桩基的不同安全系数定义方法和取值统一在一个安全系数中,反映天然地基极限承载力不同确定方法及相应安全系数的不同取值,使复合桩基与天然地基和桩基承载力安全系数匹配,概念明确,易于计算	桩承载力的发挥程度系数 γ ,理论上取 1,设计时取 0.75~1.0, $P=\gamma \cdot P_u$ (10);疏桩基础中单桩有效极限承载力 P 按式(6)计算,考虑了承台的削弱作用
宰金珉方法	桩土明确分担荷载;同《地基处理技术规范》方法	同上	$K=\frac{Q_u}{Q}$ $=\frac{1}{\xi} + \left(2.5 - \frac{\xi}{\xi}\right) \Psi$	天然地基承载力设计值 f 的利用系数 ξ ,单桩极限承载力 P_u 的利用系数 ξ ,承台承担荷载比 Ψ
管自立方法	同《地基处理技术规范》方法,单桩极限承载力按式(10)计算	同上	$K=\frac{n \cdot P_u + f_u \cdot A}{Q}$	疏桩率 η ,可将基础划分为不同形式,将常规桩基天然地基和疏桩基础用疏桩率统一起来
桩基逆作法	引入参数 u_i 、 λ	S 由各施工阶段产生的沉降进行代数加减得出。 S_1 、 S_2 亦由分层总和法计算出	$K=\frac{n \cdot P_u + f_u \cdot A + Q_w}{Q}$, Q_w 为上浮力,当基础位于地下水位以下时需考虑	t_i 时刻浅基础下土的固结度 u_i ;考虑桩土共同作用桩上承担的荷载分担比例 λ

3 工程实例分析

按变形控制进行桩基础的设计目前已广泛应用于工程实践,表 2 给出了 3 个工程实例的概况和分析的简要结果。

上海香海美容品厂主厂房桩基工程^[5]采用减少沉降桩基,设计用桩 138 根,仅占常规设计

桩数的 41.5%,最终沉降量不超过 100 mm,基础是绝对安全的。

某办公楼^[11]的设计若按传统桩基设计需 33 根桩,按疏桩理论计算仅需用桩 9 根,疏桩率 73%,大大节约了工程造价。

宜兴市农业银行办公楼主楼^[10]设计时预计土体承担荷载 69 839 kN,桩承担荷载 46 248

kN,此时土体、桩体承担荷载的比例分别为60%和40%,实际测得换算后的土体、桩体荷载分担比值为62%和38%。与原有钻孔桩方案相比,采用桩基逆作法缩短施工工期一个半月,节省基础造价100多万元,施工时大大降低了噪声污染。

表 2 3 个工程实例与分析结果汇总

工程实例	上海香海美容品厂主厂房桩基工程	某办公楼	宜兴市农业银行办公楼主楼
概况	主厂房地区浅层存在较好的硬壳层,其承载力 $f=136.5$ kPa,基本可满足厂房荷载的要求,可作为浅基础的持力层,但其下存在近 20 m 的软弱下卧层	1~2 层框架结构,3~6 层砖混结构。地基的土层:上部 8~9 m 主要为软塑状粘土与粉质粘土,承载力标准值 $f_k=100\sim120$ kPa;下部至 30 m 深主要为流—软塑状淤泥质粉土,承载力标准值 $f_k=80\sim90$ kPa	总高度为 66 m,框剪结构,地下 1 层,局部 2 层,地上 14 层,其中裙楼 2 层。基础由厚筏板(1.4 m)和薄筏板(0.5 m)组成,桩端持力层为粉质粘土
桩基	钢筋混凝土预制桩,桩长 21 m,截面 $0.3\text{ m}\times0.3\text{ m}$	有效桩长 10 m,桩径 0.45 m	钢筋混凝土预制桩,桩长 6 m,截面尺寸 $220\text{ mm}\times220\text{ mm}$,混凝土强度等级 C30
设计方法	减少沉降桩基础	疏桩基础	桩基逆作法
沉降	施工结束时 46 mm,与预估最小值接近	101.2 mm,在允许范围内	沉降在允许范围内

4 结束语

本文列出了目前岩土工程前沿领域几种典型的按变形控制的桩基础设计方法,这些设计方法已分别在上海、温州等沿海地区得到了工程应用。从工程实践可看出,按变形控制的桩基设计方法充分发挥桩间土的直接承载能力和桩的极限承载力,取得了显著的经济效果。但由于土的地区差异性及复杂性,按变形控制的桩基设计应研究更严密、合理和实用的桩基础非线性分析方法,这将直接影响到变形控制设计思想在高层建筑桩基础中的工程应用。沉降的计算不宜采用常规的弹性理论法,应加强土的本构模型研究,对不同沉降要求的建筑物基础采用不同变形状态下的桩基,根据桩基沉降对上部结构的影响制定沉降控制标准。此外,还应加强群桩和桩筏基础的现场和室内模型试验研究工作,进一步积累工程经验,建立适合本地区的桩基设计方法,从而完善按变形控制桩基础设计方法。

参考文献:

[1] 高英. 复合桩基的变形控制设计理论研究[D]. 武汉:武汉理

工大学,2006.

[2] POULOS H G, DAVIS E H. Pile Foundation Analysis and Design[M]. New York:John Wiley and Sons,1980.

[3] 张剑峰. 软土地区多层建筑的桩基设计施工与检测研究[D]. 长沙:国防科技大学,2005.

[4] 黄绍铭,王迪民,裴捷,等. 减少沉降量桩基的设计与初步实践[C]//中国土木工程学会第六届土力学及基础工程学术会议论文集. 上海:同济大学出版社,1991.

[5] 杨敏. 减少沉降桩基础的设计理论和工程应用[C]//岩土工程青年专家学术论坛文集. 北京:中国建筑工业出版社,1998.

[6] 宰金珉. 桩土明确分担荷载的复合桩基及其设计方法[J]. 建筑结构学报,1995,16(4):66-74.

[7] 管自立. 疏桩基础设计实例分析与探讨(一) [J]. 建筑结构,1993.

[8] 管自立. 疏桩基础设计实例分析与探讨(续) [J]. 建筑结构,1993.

[9] 龚维明,蒋永生,施明征,等. 高层建筑桩基逆作法应用研究[J]. 建筑结构学报,2000,21(3):69-76.

[10] 刘利民,舒翔,熊巨华. 桩基工程的理论进展与工程实践[M]. 北京:中国建材工业出版社,2002.

[11] 杜鹃,杨成斌,何刚,等. 以变形控制为原则的桩基础设计方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2002,25(3):384-388.

固化灰浆防渗墙墙体浆材配制的试验研究

代国忠¹, 金其军², 徐 志²

(1. 常州工学院 土木建筑工程学院, 江苏 常州 213002;

2. 华东冶金地质勘查局 勘察基础工程总公司, 安徽 合肥 230088)

摘要:为解决固化灰浆防渗墙工程技术难题,并为浆液配合比设计提供科学依据,进行了该类防渗墙墙体浆材配制的试验研究(目的)。通过试验优选出了一组固化灰浆防渗墙所用护壁泥浆和固化灰浆的配方,并对配方中水玻璃、水泥、粉煤灰、造浆粘土等各组份对墙体性能的影响进行了分析(方法)。所选出固化灰浆配伍性好,其墙体抗压强度、弹性模量等力学性能指标优良(结果)。固化灰浆防渗墙与其周围地基协调变形能力好,受力后墙身不易出现开裂,抗渗性能稳定。该类墙体浆材成本低、无污染、废泥浆利用率高,具有推广应用价值(结论)。

关键词: 防渗墙; 泥浆; 固化灰浆; 浆液配合比

Study on Grouting Confecting of Solidified Mortar Diaphragm Wall

DAI Guozhong¹, JIN Qijun², XU Zhi²

(1. College of Civil Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou, Jiangsu 213002, China;

2. General Company of Foundation, East-China Metallurgical Bureau of Geology, Hefei, Anhui 230088, China)

Abstract: In order to solve the problems of engineering technication on solidified mortar diaphragm wall, to afford scientific basis for the proportion project of the grouting, study and test on grouting confecting of it was carried through. Through laboratory test, a group of solidified mortar and slurry proportions on solidified mortar diaphragm wall were choosed admirably, besides, effect factors about sodium silicate, cement, fly ash, clay mud and so on were analysed to capability of it. The proportion of solidification mortar choosed is very well in compatibility and performance, its press intensity and flexibility quotiety are well. Solidified mortar diaphragm wall possess co-deformation capability around the foundation very well, it is not easy to crack as it was forced, and it has stability in resisting infiltration. So the wall is low cost and no environmental pollution, and its waste slurry can adequately be utilized, that it is worth popularizing.

Key words: anti-seepage wall; slurry; solidified mortar; grouting proportions

作者简介: 代国忠(1963—),男,教授,工学博士,主要从事地基与基础工程、地下工程等研究
基金项目: 国家“863”项目子课题(2006AA06A109—3)