

岩土力学研究 与工程实践

YANTULIXUEYANJIU
YUGONGCHENGSHIJIAN

主 编 鲁先元
夏熙伦
副主编 汤旋驹
李鸿钧
陈升和

黄 河 水 利 出 版 社

岩土力学研究与工程实践

主 编 鲁先元 夏熙伦

副主编 汤旋驹 李鸿钧 陈升和

江苏工业学院图书馆
藏书章

岩土力学研究与工程实践

主 编 鲁先元 夏熙伦

副主编 汤旋驹 李鸿钧 陈升和

责任编辑:吕洪予

责任校对:赵宏伟

责任印制:常红昕

出版发行:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 12 层

邮编:450003

印 刷:中国人民解放军信息工程学院印刷厂

开 本:787mm×1092mm 1/16

版 别:1998 年 8 月第 1 版

印 次:1998 年 8 月郑州第 1 次印刷

印 张:21.5

印 数:1-600

字 数:497 千字

ISBN 7-80621-208-6/TV·131

定 价:42.00 元

前 言

由中国岩石力学与工程学会岩石力学测试专业委员会、广东省岩石力学与工程学会测试技术专业委员会、湖北省岩石力学与工程学会、中国水利学会岩土力学专业委员会岩石工程专门委员会联合召开的全国复杂地基处理与岩土工程测试新技术研讨会,经过一年的学术工作准备,在广东省岩石力学与工程学会测试技术专业委员会和珠海市建筑工程质量检测站支持下,将于1998年9月10日至14日在广州召开。这次会议征集到的论文,涉及岩土力学基本性质、岩土工程测试新技术新方法、岩土边坡监测及稳定性研究、地基加固处理等方面,共66篇。这些论文反映了几个学会近年来结合工程建设取得的新的科研成果,既有一定的理论深度,在技术上又有新的发展。我们相信,通过这次学术交流,对我国岩土力学与工程的研究将起到积极的促进作用。

由于出版时间仓促,编辑水平有限,本书中的错误之处在所难免,敬请专家、读者批评指正。

本书能按时出版,保证研讨会的按时召开,长江科学院、广东省岩石力学与工程学会测试技术专业委员会、长江工程技术公司等单位给予了大力支持,在此表示衷心的感谢。

中国岩石力学与工程学会岩石力学测试专业委员会
广东省岩石力学与工程学会测试技术专业委员会
湖北省岩石力学与工程学会
中国水利学会岩土力学专业委员会岩石工程专门委员会

1998年8月

目 录

岩土力学基本性质研究

非线性理论的思考与在岩石力学中的应用前景	田 野	(1)
水泥土复合地基的变形特性及其工程应用	李永盛	(5)
灰绿色粘土岩力学特性试验研究	刘雄贞	(12)
节理岩体的损伤力学模型及其有限元分析	盛建龙 刘新波	(16)
锦屏一级水电站的岩体声波测试	郭惠丰	(20)
金山店铁矿西区围岩抗剪强度特性试验研究	李 炼 陈从新 谷志孟	(28)
略论国家标准《工程岩体分级标准》的应用	赵思贤	(32)
用伺服试验机进行抗剪断(峰值)强度单点法试验	王良之 周翠云	(38)
完整性较差岩体中的地应力测量	刘元坤 肖本职 景 锋 刘允芳	(42)
现场钻孔弹模检测岩体变形特征	尹健民 罗超文 许波涛 罗兰英	(47)
三峡右岸地下电站地应力测试与研究	钟作武 罗超文 刘元坤 龚壁新	(50)
金沙江溪洛渡水电站地应力测试研究	徐洪海	(57)
宝泉抽水蓄能电站地应力测量与分析探讨	孙民伟 王宝成	(62)

岩土工程测试新技术新方法

钻孔岩芯定向技术与方法	李 宏 江南生 张伯崇	(66)
竖井围岩稳定性声发射智能监测系统	李庶林 桑玉发	(71)
岩土工程专家系统开发工具 Geotech 建造及其应用	杨育文 袁建新 谷志孟	(76)
透地雷达在公路工程质量检测中的应用	林尤聪 陈荣卓	(82)
SIR-10H 型探地雷达及其应用	王士恩 柯宇荣	(87)
地理信息系统(GIS)在岩土工程中应用的现状及存在的问题	王笑海 白世伟 谷志孟	(95)
超声波成像钻孔电视在工程勘测中的应用	毛吉震 陈群策 祁英男 张志国	(99)
液压型光电式测压计的标定试验研究	陈 健 刘小巍 谷志孟	(103)
液压型光电式测压计传压盒结构优化分析	陈 健 谷志孟	(106)
湿磨细水泥灌浆新技术现场颗粒粒径快速检测方法研究	陈义斌 陈明祥	(110)
煤岩力学性质测试方法及工程应用探讨	张占海 吴兴利 郝临山	(115)
钻孔弹模计及在灌浆效果检测中的应用	罗超文 龚壁新 刘元坤	(118)
裂隙化岩体力学参数的确定方法	刘佑荣	(122)
郑家冲大桥受撞后的损伤检测及动力响应计算	汪天翼	(129)

桩基施工质量监督的新途径——打桩记录仪的意义及其作用

..... 蒋 企 古晋雄 戴永相 卢邦华(135)

岩土边坡监测及稳定性研究

三峡船闸高边坡岩体卸荷松动及其性状研究

..... 夏熙伦 肖国强 朱杰兵 周火明(138)

武钢金山店铁矿地下采动条件下岩层及地表的变形特征研究

..... 余景崇 徐国财 陈从新 谷志孟(147)

开采急倾斜矿体围岩地表变形特征及模式分析

..... 任清平 丰定祥 谷志孟 傅卫东 余景崇 徐国财(152)

三峡永久船闸高边坡岩体松弛范围声波监测研究..... 肖国强 高鹏飞 鲁先元(160)

三峡工程永久船闸高边坡稳定性的三维弹塑性有限元分析

..... 陈 健 盛 谦 谷志孟 刘 雄(166)

岩土工程位移变形及观测意义..... 毛静民(170)

地下开挖自然坡岩体变形预测分析..... 李文秀(176)

洞室围岩深部状态探测与研究..... 鲁先元(181)

三峡水利枢纽茅坪溪防护工程泄水建筑物施工期安全监测设计..... 曹荣祥(185)

墓坪滑坡体位移机制分析..... 张保军 马水山 彭 勇(189)

三峡永久船闸一期开挖锚杆应力监测成果分析..... 朱杰兵 景 锋(193)

高速公路隧道工程监控信息分析的研究..... 刘 立 邱贤德 袁顺德 鲍安红(197)

地下采矿和地表回填对地表变形影响的研究..... 肖士澄 谷志孟(202)

钻孔倾斜仪在岩层内部移动变形观测中的应用

..... 吴焕明 陈从新 刘小巍 潘 澄(206)

靠椅山隧道拱顶下沉开裂原因分析..... 傅鑫彬(211)

地基加固及处理

嵌岩桩受力机理分析..... 明可前(214)

基桩完整性检测系统及检测技术..... 钱春阳 王小文(219)

复杂地质条件下预应力管桩的沉桩控制——关于预应力管桩收锤停打标准的讨论

..... 陈久照(230)

重庆地区单桩极限承载力灰色预测..... 肖本职 黄志鹏(237)

地下水对基坑开挖及周围环境的影响..... 唐孟雄(241)

挡土墙的稳定性和土压力计算..... 罗晓辉 何立红(247)

预制桩竖向承载性能计算研究..... 李素华 杨位光(253)

陈家山隧道山体顺层滑动的综合整治..... 周继望(261)

预应力管桩设计和施工中一个值得注意的问题..... 郑永民 张 汉(266)

广州地铁一号线体育中心站支撑方案探讨..... 林作忠(271)

广州地铁一号线体育西路站天河南一路段施工方案探讨..... 熊朝辉(275)

南京长江二桥桩基承载力研究及优化设计·····	边智华	李维树(278)
以电火花振源激振桩动力检测法的特点·····	汤旋驹 伍佳汉 周伟凡	赵汝卓(283)
砌石路基在山区陡坡道路中的应用研究·····		张 伟(292)
高速公路高填方桥台台背回填技术研究·····	李志勇	刘银生(295)
广州地铁紧邻宿舍楼基段围护桩设计计算分析·····		周小华(300)
低应变试桩中的几个问题·····	潘奇俊	柯李文(304)
酸性地基粘土水泥防渗灌浆材料研究·····	唐 玲	蒋硕忠(312)
沥青混合料配合比设计与调整·····		雷智敏(316)
双液注浆法处理隧道坍塌冒顶的设计与施工·····	王效文 李春云	郭鸿洲(322)
强夯施工地面振动特性的试验研究·····	黄志鹏	肖本职(326)
钻孔灌注桩质量事故与分析·····	庄心善	何世秀(330)
使用深层搅拌桩处理软土地基一例·····	何沛田	张 丽(332)

非线性理论的思考与在岩石力学中的应用前景

田野

(长江科学院 武汉 430010)

【摘要】 本文简述了非线性理论中的耗散结构理论、协同学、突变论、混沌理论、分形理论及在岩石力学中的应用前景。

1 复杂性与非线性

众所周知,岩体及其岩石工程是一个复杂性系统。什么是复杂性?鉴于复杂性具有广泛的涵义,在时间的演化过程中不断地改变着自身的涵义与内容,因此尼科里斯(G. Nicolis)和普里高津(I. Prigogine)在他们的名著《探索复杂性》一书中,以科学的态度,并没有给复杂性下定义^[1]。从演化的观点来思考问题,对岩体及其岩石工程而言,可从空间演化、时间演化及结构的复杂性来理解复杂性。

线性和非线性是数学语言。线性关系是指事物因果数量关系可用一条直线在平面直角坐标系内形象地表示出来。线性过程是指在初始时刻任何变量的一点变化会使在以后的时间内这个变量或其他变量也产生一点变化,在时间、空间上光滑规则运动的过程是确定性的、可逆的。从牛顿(Newton)时代(1642年~1716年)起到现在300多年以来,人们习惯地认为,确定论是一种“一一对应”的因果关系。一组确定的初值,决定了未来的一条确定的轨道;自然界的演化行为,由系统的初值唯一地确定,初值条件发生了微小变化,其轨道的改变也应是不显著的。然而,牛顿死后250年发生了奇事,后人在他的力学中竟然发现了混沌(chaos)^[2~4]。自1963年洛伦兹(E. N. Lorenz)在一个确定性的非线性耗散系统中发现了完全无序的非周期运动混沌以来,人们的传统习惯看法受到了根本性的冲击,表明牛顿力学系统存在内随机性,确定性和随机性并存。

自然界存在大量的非线性现象。非线性(Nonlinearity)是指初始状态的变化未必会导致后续状态成比例的变化,运动位置是不确定的、随机的、不可逆的;非线性过程一般具有非平衡性、突变性、多尺度性、自组织性、自相似性、有序性及随机性等属性。非线性不满足叠加原理,整体不等于部分之和。简单地说,一个非线性过程就是一个不完全的线性过程。

2 非线性理论的主要内容

非线性理论是当代迅速发展的、对自然科学影响深远的综合科学,它研究数理科学、生命科学、空间科学、地球科学、地质科学、地震科学、工程科学及岩石力学与工程科学等中非线性现象的共性和复杂性,是当代重大的前沿理论。

现代非线性理论包括哪些?以下主要简述耗散结构理论、协同学、突变论、混沌理论、

分形理论。当然,还有一些其他非线性理论,如神经网络理论等。

2.1 耗散结构理论^[5~7]

耗散结构理论是普利高津于1969年首先提出的。耗散结构(Dissipative structure)是指一个远离平衡的开放系统(力学的、物理的、化学的、生物的,乃至社会的、经济的系统),通过不断地与外界交换物质和能量,在外界条件的变化达到一定的阈值时,可能从原有的混沌无序的混乱状态,转变为一种在时间上、空间上或功能上的有序状态,即当体系处于非平衡状态时,通过体系与外界进行能量和物质交换而形成和维持的一种稳定了的宏观体系结构。

耗散结构理论是研究耗散结构的性质,以及它的形成、稳定和演变的规律,主要从热力学角度分析由无序产生有序结构的原则、条件及动力学计算方法。此理论的核心概念,熵是无序度的量度;研究对象是自组织行为,自组织是指内部具有一定功能的开放系统远离平衡态时,因其定态的失稳,在系统内部涨落的驱动下转变为稳定的时间、空间或功能结构的过程。

2.2 协同学

协同学(synergetics)是哈肯(H. Haken)于70年代初期创立的^[8,9]。它主要是从动力学角度研究从无序产生有序结构的规律性,阐述自组织、自适应行为形成的机制。协同学的突出贡献是发现了在分支点附近慢变量支配快变量的普遍原理并给以动力学表述,这个原理使对自组织形成的机制有了更深刻的认识。

2.3 突变论

突变论(Catastrophe theory)是托姆(Thom)于70年代初提出的。它是研究系统的状态随外界控制参数连续改变而发生不连续变化的数学理论^[10,11]。突变论阐述了在许多系统中平衡点是由一个势函数导出的,导出的方法是把这势函数对广义坐标的导数取为零,解之即得。平衡点的个数依赖于此问题的参数,例如在弹性系统中力的负载。突变论与平衡点的个数密切相关。在这些参数的某些临界值附近,突变论预言,平衡点的个数以预定方式变化,而且这些变化对于某些类型的势函数具有普适性。突变论的重要贡献是对突变的类型作了分类,它告诉人们,突变类型的数目不取决于状态变量的数目,而取决于控制参数的数目。当控制参数不多于4时,只有7种不同类型的突变。

2.4 混沌理论

混沌是一种确定的系统中出现的无规则的运动。混沌理论所研究的是非线性动力学混沌,目的是要揭示貌似随机的现象背后可能隐藏的规律,以求发现复杂问题普遍遵循的共同规律。混沌概念的提出,使得人们能够把许多复杂现象看作是有目的、有结构的行为,而不再是外来的、偶然性行为。混沌的发现,使人们认识到客观事物的运动不只是定常、周期或准周期运动,而且还存在一种更具有普遍意义的运动形式,即无序的混沌;在确定论和概率论描述之间存在着由此及彼的桥梁。混沌的发现告诉人们,耗散系统是一个对初始条件很敏感的系统,初始条件的微小差别,最终导致结果的很大差异,甚至使两种结果变得毫无关系。所谓蝴蝶效应,就是指系统输入的初值的微小随机差异可能导致系统输出巨大变化的现象。混沌不是简单的无序或混乱,而是没有明显的周期和对称,但同时具备丰富的内部层次的有序状态。一般说来,在自然界中混沌是一种更为普遍的现象。

2.5 分形理论

分形(Fractal)是由分形几何的创始人曼德尔布诺特(B. Mandelbrot)于1975年创造出来的^[12-14]。分形是指维数不是整数的点集,也指维数“碰巧”是一个整数的一组类似结构。分形是一种复杂的几何体,只有具备自相似的几何体才是分形。分形是描述 n 维空间的一个点集的一种几何性质,在不同标度下具有自相似性质,而且具有小于 n 的一个非整数维数。分形理论的核心是研究自相似性,分形的特征量是分数维。分形几何学为描述复杂性提供了一个有力的方法。

3 应用前景

复杂性是非线性理论研究的基本内容,然而岩石力学与工程中的疑难问题都与复杂性有关。近十多年来,随着我国岩石力学与工程学科的深入发展,人们已认识到非线性因素是岩体及岩石工程存在复杂性问题的集中表现,非线性是导致复杂性的根源;探索复杂性就得研究非线性;进行岩石工程稳定性研究,不考虑非线性因素,不建立非线性模型就无法真实而准确地反映客观规律。理论的发展在于应用和验证,由看到的部分成果和论文^[15-37],可以看出非线性理论在地震、地质、矿山、水电等岩石力学与工程中的广泛应用前景,并获得了以下信息:

(1)用非线性理论研究岩石力学与工程问题的成果和论文,已愈来愈多,获得了好的效果,表明人们对确定性与随机性、有序与无序、简单性和复杂性、偶然性与必然性、局部与整体等概念、内容有了新的认识和深化,只有非线性理论才有可能回答岩石力学与工程学科中的本质问题。

(2)从近几年已取得的可喜成果和论文来看,涉及混沌理论和分形理论的应用论文数量较多,其他较少,还存在低水平的重复现象,非线性理论尚待纵深开拓。

(3)在非线性的形成和探索复杂性的过程中,计算机方法起到了关键作用,例如对非线性微分方程的求解和分析由它所描述的复杂现象及过程的时间演化与动态行为,只能靠计算机技术方法。

参考文献

- [1] 尼科里斯,普利高津.探索复杂性.成都:四川教育出版社,1986
- [2] 伊·普里戈金,伊·斯唐热.从混沌到有序.上海:上海译文出版社,1987
- [3] E·N·洛伦兹.混沌的本质.北京:气象出版社,1997
- [4] 卢侃,孙建华.混沌学传奇.上海:上海翻译出版公司,1991
- [5] 湛星华,沈小峰.普利高津与耗散结构理论.西安:陕西科学技术出版社,1982
- [6] I. Prigogine. Probing into Time. Discovery, 1980
- [7] I. Prigogine. From being to becoming. 1979
- [8] Haken, H.. Advanced synergetics, Springer - Verlag, New York, 1983
- [9] H·哈肯.高等协同学.北京:科学出版社,1989
- [10] Thom, R.. Structural stability and Morphogenesis. Reading Mass, 1975
- [11] 桑德斯.突变理论入门.凌复华译.上海:上海科学技术文献出版社,1983

- [12] Mandelbrot, B. . The Fractal Geometry of Nature. San Francisco, 1982
- [13] 刘式达, 刘式适. 分形和分维引论. 北京: 气象出版社, 1993
- [14] 严绍瑾, 彭永清. 非平衡态理论与大气科学. 北京: 学苑出版社, 1993
- [15] 田野, 徐平. 岩体蠕变位移数据的处理和预测. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(4)
- [16] Tian Ye, Xu Ping. Attractor Analysis of slide creep. In: International Geological Hazards Symposium. Beijing, 1991
- [17] 田野, 徐平. 用岩体蠕变数据计算 Lyapunov 指数. 长江科学院院报, 1994, 11(2)
- [18] 施泽进, 罗蛰潭等. 苏北溱潼凹陷非线性动力学特征浅析. 华东地质学院学报. 1996, 19(2)
- [19] 李立新, 王建党等. 软土地基变形的混沌性与承载力识别. 工程地质学报, 1997, 5(2)
- [20] 张年梅, 韩强等. 非线性阻尼梁的混沌行为. 工程力学, 1997(增刊 1)
- [21] 彭涛, 何满潮. 煤矿软岩混沌力学特性的研究. 矿山压力与顶板管理, 1997, (1)
- [22] 谭云亮, 宋扬. 顶板运动过程中混沌性分析. 矿山压力与顶板管理, 1997, (3, 4)
- [23] 田玉楚. 混沌时间序列的时滞判定. 物理学报, 1997, 46(3)
- [24] 秦四清, 张倬元等. 滑坡时间预报的突变理论及灰色突变理论方法. 大自然探索, 1993, 12(46)
- [25] 吴中如, 潘卫平. 应用 Lyapunov 指数研究岩土边坡的稳定判据. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(3)
- [26] 陈学忠, 尹祥础. 非线性科学在地震研究中的一些应用. 地球物理学进展, 1994, 9(1)
- [27] 董聪, 何庆芝. 微裂纹演化过程中分岔与混沌现象的描述及若干问题探讨. 力学进展, 1994, 24(1)
- [28] 秦四清, 张倬元. 地震孕育过程的非线性动力学模型. 中国地震, 1994, 10(3)
- [29] 杨润海, 沈秋伟. 分形方法在揭示基底控岩控矿条件方面的应用. 长春地质学院学报, 1993, 23(1)
- [30] 杨文采. 非线性地震道的混沌反演. 地球物理学报, 1993, 36(3)
- [31] 唐权钧. 自然界的分形和混沌现象及其在地球物理中的应用初探. 石油物探快讯, 1993, 10(10)
- [32] 崔鹏, 关君蔚. 泥石流起动的突变学特征. 自然灾害学报, 1993, 2(1)
- [33] 仪垂祥. 泥石流突变模型. 自然灾害学报, 1995, 4(2)
- [34] 李造鼎, 宋纳新等. 岩土动态开挖的灰色突变建模. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(3)
- [35] 唐春安, 徐小荷. 岩石破裂过程失稳的尖点灾变模型. 岩石力学与工程学报, 1990, 9(2)
- [36] 谢和平. 分形几何及其在岩土力学中的应用. 岩土工程学报, 1992, 14(1)
- [37] 谢和平. 岩石节理的分形描述. 岩土工程学报, 1995, 17(1)

水泥土复合地基的变形特性及其工程应用

李永盛

(同济大学地下建筑与工程系 上海 200092)

〔摘要〕 基于两个工程实例的监测数据和相应室内试验结果,提出有关上海软粘土水泥土复合地基的沉降计算模式,以及设计和施工中需注意的问题。

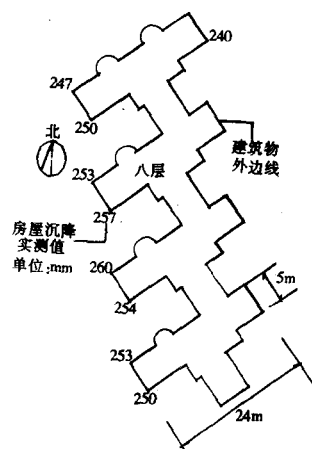
1 工程实例

1.1 上海四方新城八层公寓

四方新城位于上海巨鹿路、陕西路口,其中八层公寓为框架结构,60cm厚整体浇筑底板,底板底标高为自然地坪以下1m,房屋的平面形状如图1所示。底板以下采取粉喷桩加固,桩径500mm,有效桩长14.5m,置换率12%,水泥掺入量12%,加固后地基设计承载力160kPa。场地的地质条件如表1所示。

表1 四方新城场地地质条件

序号	土层名称	厚度(m)	层底标高 (以自然地坪为0.0, m)	密度 (t/m ³)	含水量 ω (%)	粘聚力 C (kPa)	内摩擦角 φ (°)	压缩模量 E_c (MPa)
②	褐黄色粉质粘土	1.9	-3.1	1.88	34.3	15	13.5	6.00
③	灰色淤泥质粉质粘土	4.1	-7.2	1.78	41.3	8	14.7	3.11
④	灰色淤泥质粘土	7.3	-14.5	1.69	50.7	6	7.3	2.70
⑤	灰色粘土	3.0	-17.5	1.77	40.6	9	7.5	4.00
⑥	灰色粉质粘土	9.0	-26.5	1.83	33.9	9	15.0	8.00



结构物于1995年12月封顶后进入粉刷与装修阶段, 图1 四方新城八层公寓至1996年12月,基础各点平均下沉252mm,最大不均匀沉降20mm,沉降实测数据如图1所示。按监测数据分析,房屋封顶后一年内的平均沉降速率为0.71mm/d,一年后的沉降速率尚维持在0.2~0.3 mm/d,未见迅速收敛的迹象。由于沉降基本属均匀性态,因而房屋结构虽未受到过量不利影响,但因受到基地内外排水管道标高的限制,房屋沉降已达到预留最大允许落差30cm的84%,计入后续沉降量值,如不加以处理必然影响到已安装到位的房屋底层卫生间、厨房中的排水设施的正常使用。最终采取了凿开底板、重新提高室内排水管道标高、内外管道接头换成柔性接头等措施予以处理。因损坏已装修完工的洁具、瓷砖、木地板、管道等,造成了不必要的损失,同时延误了工期。

1.2 上海中医药大学专家楼

上海中医药大学专家楼位于零陵路近宛平南路, 框架结构, 西端部分为 6 层, 东端增至 11 层。东端为避让相邻已建建筑物, 自地上二层以上有宽度为 2.87m 的外挑部分, 揭顶时房屋各部分实际标高如图 2 所示。房屋采用水泥搅拌桩上的箱形基础, 底板厚度 70cm, 底标高为自然地坪以下 3.6~4.2m。水泥搅拌桩有效桩长 13.8m, 设计截面双头 $\varnothing 700\text{mm}$, 水泥掺入量 12%, 置换率 24%, 加固后复合地基设计允许承载力东端为 150kPa, 西端为 130kPa。场地的地质条件如表 2 所示。

表 2 上海中医药大学专家楼场地地质条件

序号	土层名称	厚度 (m)	层底标高 (以自然地坪为 0.0, m)	密度 (g/cm ³)	含水量 ω (%)	粘聚力 C (kPa)	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	压缩模量 $E_c(\text{MPa})$
②	褐黄色粉质粘土	1.2	-2.0	1.9	31.3	12.0	16.0	3.91
③	灰色淤泥质粉质粘土	4.2	-6.2	1.8	40.6	9.5	11.3	3.11
④	灰色淤泥质粘土	9.9	-16.1	1.8	49.3	9.6	8.0	2.01
⑤	灰色粘土	15.0	-31.0	1.8	39.4	11.1	14.6	3.74
⑤	灰色粉质粘土	10.0	-41.1	1.8	34.0	11.9	13.9	4.16
⑤ ₄	灰色粉质粘土	3.0	-44.1	1.9	20.0	20.0	15.0	8.36

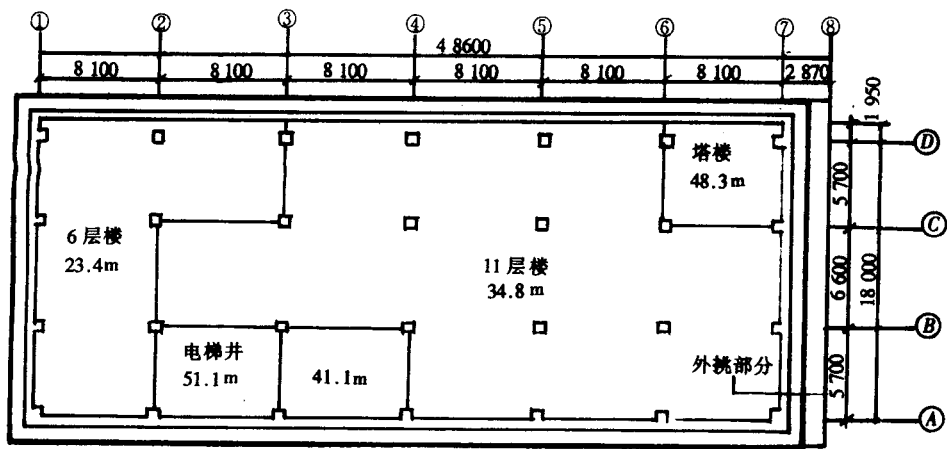


图 2 上海中医药大学专家楼平面布置示意图(单位:mm)

水泥搅拌桩施筑完成后进行了三组静载试验, 测得加固后地基承载力西部一组为 135.3kPa, 中部一组为 89.6kPa, 东部一组为 99.7kPa, 均未达到设计要求。小应变测试结果亦反映出断桩现象严重、水泥掺入量不足、桩顶强度不足等质量问题。为防止房屋产生过大不均匀沉降, 采取静压锚桩对地基予以补强。静压锚桩分两批施筑, 断面尺寸、单桩承载力等如表 3 所示。

表 3 静压锚桩施筑情况

序号	根数	截面尺寸(mm)	有效桩长(m)	单桩承载力(kN)	施筑时间
第一批	87	250×250	27	≥500	结构物六层完成之后
第二批	39	300×300	36	≥700	结构物封顶

在结构物四周布设了沉降观测点,测得封顶前后连续 14 个月各点的沉降-时程曲线如图 3 所示,其中东侧沉降量为 165mm,西侧为 48mm,两侧不均匀沉降量为 117mm。测得结构物的倾斜率为 2.39‰(东西方向)和 1.43‰(南北方向)。结构物的沉降向东偏南呈线性增大趋势,外加构筑物本身刚度较大,除在地下室南北侧墙上出现微细裂缝外,底板和边柱均未开裂。东侧角点因补桩拖带曾短期发现 2.5mm/d 的沉降速率,其余测点均在 0.5~1.0mm/d,第二批补桩受力以后,沉降速率很快即降低至 0.15mm/d,如图 3 所示。

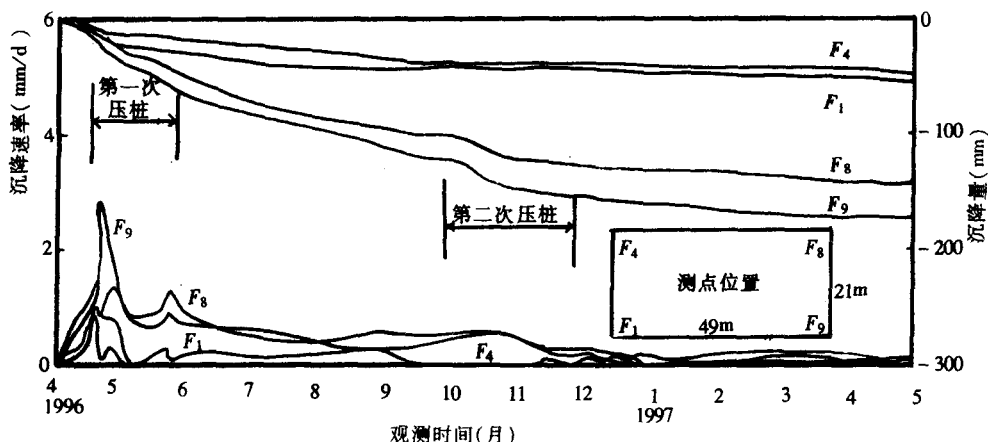


图 3 上海中医药大学专家楼沉降实测曲线

2 室内试验

2.1 试验概况

水泥土复合地基的变形和强度特性与场地的土层物理力学性质直接有关,通过模拟土层加固的现场施工工艺,开展室内配比试验,对于正确理解水泥土的变形规律和强度特征,合理选择设计与施工参数是十分有益的。

室内试验采用的土样取自上述工程实例 1,土层主要物理力学参数如表 1 所示。试样尺寸为 $\varnothing 40\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的圆柱形,水泥为 425 号普通硅酸盐水泥,水灰比为 0.55,试验中采用 5% 至 20% 等 5 种水泥掺入比 a_w 。 a_w 为水泥重量和被加固土体重量之比。水泥与土体的搅拌方式为人工刮刀翻拌,至基本均匀即止。制备好的试样置于双层塑料袋内并扎紧袋口,保持恒定湿度,以模拟水泥土的养护环境。试样养护至 10~60 天等四种龄期后,采用 WE-30 液压万能试验机进行无侧限单轴压缩试验,分组加载并记录试样在加载至破坏全过程的变形曲线。按每种状况测试至少 5 个试样计,用以制备与测试的试样总数为 400 个。

2.2 试验成果

2.2.1 水泥掺入量对抗压强度 q_u 的影响

以 30 天龄期为例,4 种土层在不同水泥掺入比 a_w 加固条件下的单轴抗压强度 q_u 如

图 4 所示。由图可见,随着水泥掺入比 a_w 的增加,各层土加固后的抗压强度 q_u 基本按线性规律增长,只是增加的幅度有所差异,两者的函数关系可以表达为以下经验公式

$$q_u = k_w a_w + q_{u0} \quad (1)$$

式中: k_w 为强度增长系数, MPa; q_{u0} 为原状土单轴无侧限抗压强度, MPa。

上海地区第②至第⑤层 4 种土体的 k_w 和 q_{u0} 参照表 4 试验结果选取。

表 4 k_w 和 q_{u0} 取值

土层 序号	土层名称	k_w (MPa)	q_{u0} (MPa)
②	褐黄色粉质粘土	866.38	6
③	灰色粉质粘土	689.50	3
④	灰色淤泥质粘土	384.53	3
⑤	灰色粘土	510.00	4

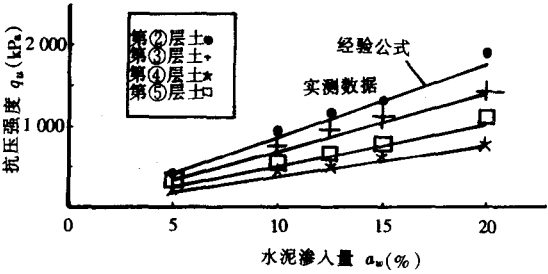


图 4 4 种土层不同水泥掺入量对应的抗压强度

2.2.2 龄期对抗压强度的影响

图 5 为当水泥掺入比取为 15% 时, 4 种土层抗压强度随龄期的增长曲线。由图可见, 在 60d 龄期范围之内, 水泥土的强度均有明显增长, 但随土层种类不同其增长幅度有所差异, 增长比例并非常数, 前期较快, 后期则趋于缓慢, 其变化曲线可由以下抛物线方程表示为

$$q_u = k_T \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\alpha_T} \quad (2)$$

式中: k_T 为强度随龄期增长系数, kPa; α_T 为无量纲经验系数; T 为龄期, d; T_0 为无量纲设置的单位参数, d, $T_0 = 1$ 。各土层的 k_T 和 α_T 可以通过试验数据回归确定, 如表 5 所示, 表中数据仅适用于龄期大于 7d、水泥掺入比 $a_w = 12\% \sim 15\%$ 的情况。

水泥土抗压强度随龄期增长的规律与水泥掺入量亦存在相当密切的关系, 一般而言, 低掺入量的后期强度增长量值较小, 60d 后强度 - 龄期曲线即趋于平缓; 高掺入量情况下, 即使在 60 天时强度增长曲线仍持续上翘, 表明后期强度仍有一定幅度的提高。图 6 为第③层灰色粉质粘土在不同水泥掺入量情况下强度 - 龄期增长曲线。

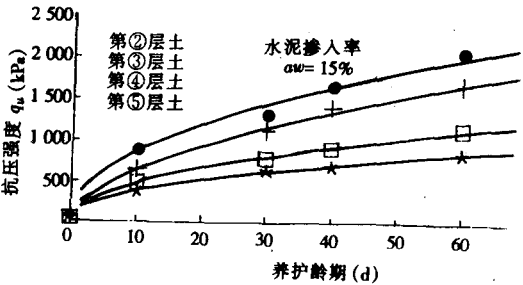


图 5 4 种土层抗压强度随龄期的增长曲线

表 5 上海 4 种土层的 k_T 和 α_T

土层 序号	土层名称	k_T (kPa)	α_T
②	褐黄色粉质粘土	300.07	0.473
③	灰色粉质粘土	187.92	0.535
④	灰色淤泥质粘土	134.55	0.453
⑤	灰色粘土	159.97	0.482

2.2.3 水泥土的变形模量

水泥土的变形模量通常取 E_{50} , 即当作用应力达到抗压强度 q_u 的 50% 时, 试样的应力与应变之比, 以此作为分析指标, 与原状土的压缩模量 $E_{s(1-2)}$ 相比, 经加固土样的变形模量的增长量十分明显, 一般提高至原值的 20~30 倍, 其增长的幅度按水泥掺入量的多少和龄期长短有所差异, 同时也与土体本身的性质有关。对于砂性较重的第③层粉质粘土, 其变形性质的改善远比第④层淤泥质粘土要明显得多。

加固土层的变形模量 E_{50} 与抗压强度 q_u 之间基本呈线性关系, 如图 7 所示, 由以下经验公式表示为

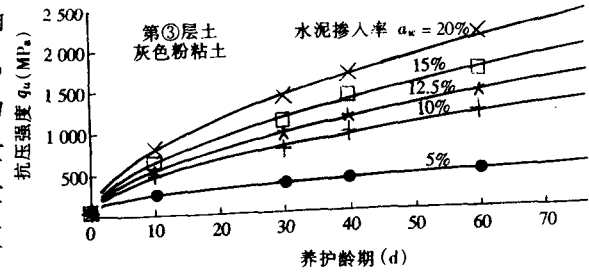


图 6 相同土层不同水泥掺入量的强度-龄期增长曲线

$$E_{50} = K_E q_u \quad (3)$$

式中: E_{50} 为当作用应力为 50% 抗压强度时水泥土变形模量, kPa; K_E 为比例系数, 如表 6 所示; q_u 为抗压强度, kPa。

表 6 4 种土体 K_E		
土层序号	土层名称	K_E
②	褐黄色粉质粘土	130
③	灰色粉质粘土	124
④	灰色淤泥质粘土	111
⑤	灰色粘土	115

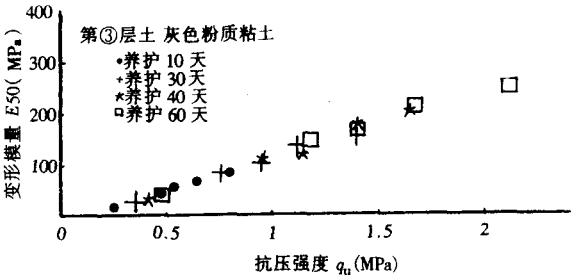


图 7 水泥土变形模量 E_{50} 与抗压强度的关系

3 理论分析

3.1 水泥土复合地基的沉降计算法

较之天然地基, 水泥土复合地基

在承载力和变形刚度方面有很大提高, 但浅基和桩基的受力机理存在明显差别, 其对场地土质和赋存条件的依赖性极强, 在荷载作用下的变形规律十分复杂, 与之相对应的地基沉降计算方法尚处于不很成熟的阶段, 现行规范亦未就此提出检算模式与相应规定^[1]。

水泥土复合地基的沉降计算模式可以表示为如图 8 所示, 整个压缩层 Z 由加固区 h_1 和下卧层 h_2 组成, 在荷载作用下地基总沉降量 s 为两部分之和, 即

$$s = s_1 + s_2 \quad (4)$$

式中: s_1 为加固区各土层沉降量; s_2 为下卧层沉降量。

加固区土层的沉降计算方法有复合地基法、桩身压缩量法、应力修正法和应变修正法^[2,3]。其中以复合地基法最为简便, 计算公式为

$$s_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i}{E_{csi}} H_i \quad (5)$$

式中: n 为加固区内地层数量; ΔP_i 为第 i 层土的附加应力增量, MPa; H_i 为第 i 层土的厚度, m; E_{csi} 为第 i 层土的复合变形模量, MPa。

加固层中各层土体的复合变形模量 E_{csi} 按加固面积的加权平均方法计算, 即

$$E_{csi} = mE_{psi} + (1 - m)E_{ssi} \quad (6)$$

式中: m 为复合地基置换率。

如果将整个加固区视为一均质地层, 其复合变形模量 E_{cs} 可以通过对各土层厚度的加权平均方法求算, 即

$$E_{cs} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{csi} H_i}{\sum_{i=1}^n H_i} \quad (7)$$

则式(5)可简化为

$$s_1 = \frac{P}{E_{cs}} H \quad (8)$$

式中: P 为基底标高处附加应力, MPa; E_{cs} 为加固区复合变形模量, MPa; H 为加固区厚度, m。

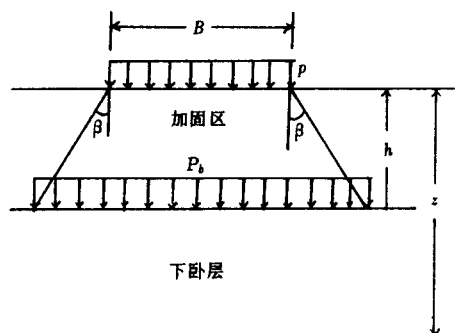


图8 水泥土复合地基
的沉降计算模式

加固区下卧层的沉降量 s_2 可按天然地基分层总和法求算^[4]。根据应力扩散原则, 作用在下卧层上的荷载 P_b 可按图8所示的图式求算, 即

$$P_b = \frac{BDP}{(B + 2H\text{tg}\beta)(D + 2H\text{tg}\beta)} \quad (9)$$

式中: B 、 D 分别为复合地基上荷载作用宽度、长度, m; β 为地基压力扩散角, 一般可取 22° ^[4]。地基压缩层厚度控制在附加压力等于土层自重压力的 10% 处。

3.2 工程实例检算结果

参照水泥土室内试验结果和理论计算公式(4)至式(9), 对所述工程实例进行分析, 计算中所选取的参数如表7所示。按无加固和有加固两种情况检算所得的地基沉降量, 以及与实测值的比较如表8所示。

表7 工程实例选取的计算参数

工程项目	基础尺寸 $D \times B$ (m)	加固层 厚度 H (m)	置换率 m (%)	加固区复合 变形模量 E_{cs} (kPa)	加固区 附加应力 P (kPa)	下卧层 附加应力 P_b (kPa)
实例1	52 × 24	14.5	12	13.3×10^3	160	87.75
实例2	48.6 × 20	13.8	14	18.4×10^3	170	88.78