

土工参数空间概率特征

TUGONG CANSHU KONGJIAN GAILÜ TEZHENG

李小勇 著



原子能出版社

土工参数空间概率特征

李小勇 著

本书由“北京市教育委员会科技发展计划面上项目”

(项目编号: KM200510009004)

资助出版

原子能出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

土工参数空间概率特征/李小勇, 著. —北京: 原子能出版社, 2006. 4

ISBN 7-5022-3601-5

I. 土... II. 李... III. 土工试验—参数—概率分布—统计分析 IV. TU41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 028755 号

内 容 介 绍

本书主要包括绪论、土工参数概率分布统计优化、土工参数自相关距离性状、土工指标试验方法不确定性、土工参数概率统计特征区域研究(太原粉质黏土概率特征和平湖淤泥质粉质黏土空间概率特征)等。通过试验数据的可靠性检验、概率模型的有限比较法拟合优度检验以及分布参数的推广贝叶斯法估计, 可以实现土工参数概率分布在统计意义上的优化, 而优化分析的关键是建立土工参数概率分布区域资料。土工参数的自相关距离性状具有明显的横观各向同性。互相关系数分析法和随机因子分析法是评价土工参数试验方法不确定性的两种有效的方法, 而后者适应性更广。根据工程勘察资料和试验研究, 建立了太原粉质黏土和平湖淤泥质粉质黏土的土性指标空间概率特性的区域资料。

本书可供从事岩土工程技术人员、科研、研究生和教学工作者参考使用。

土工参数空间概率特征

出版发行	原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100037)		
责任编辑	卫广刚		
责任校对	冯莲凤		
责任印制	丁怀兰		
印 刷	文联印刷厂		
经 销	全国新华书店		
开 本	850 mm × 1168 mm	1/32	
印 张	6.25		
字 数	167 千字		
版 次	2006 年 4 月第 1 版	2006 年 4 月第 1 次印刷	
书 号	ISBN 7-5022-3601-5		
印 数	1-270	定 价	25.00 元

版权所有 侵权必究

网址: <http://www.aep.com.cn>

前 言

土是一种组成复杂的多孔多相介质,其种类繁多,地域性差别明显。岩土工程的概率分析将概率统计方法和理论引入土性指标和岩土工程问题分析,符合土力学复杂研究对象和土力学课题特点的新发展。它使土力学对于岩土工程的分析更加接近事物的本来面目,防止了一些实际工作者对问题过分简单的肯定或否定。虽然,从非确定性的角度解决土力学问题的理论和方法还很成熟,还缺乏丰富的经验,但它的基本方向是有发展活力的。

岩土工程的概率分析是岩土工程一个新的分支,是在 20 世纪 70 年代逐渐兴起并仍处于大发展中。所谓的“可靠性分析”是其中有关计算方法方面的一个研究课题。

近年来,土工问题的概率分析和可靠性理论的研究和应用,在世界范围内越来越受到学者和工程师的重视,有关问题在现阶段对我国更具有突出的意义,与建筑业其他专业一样,我国在很多与土工有关的国家、行业和地方标准的制定中,都采用了 ISO/182 制定的极限状态设计原则和分项系数法,但由于土工参数和工作对象的特殊性,就理论和应用而言,岩土工程有待解决的问题更多一些。

笔者多年来以土工概率分析为主攻科研方向,研究内容不断拓宽和拓深,本书拟对土工参数空间概率特征研究成果进行系统总结。本书出版的目的在于揭示土工参数的空间概率特征,了解土工参数的概率分布特征和空间变异性规律,探讨土工参数的自相关距离特性和试验方法不确定评定,研究土工参数的区域特征。

本书共分七章,第 1 章绪论,主要介绍岩土工程可靠性的研究历史和现状。第 2 章主要讨论土工参数概率分布统计优化问题,通过试验数据的可靠性检验、概率模型的有限比较法拟合优度检

验以及分布参数的推广贝叶斯法估计,可以实现土工参数概率分布在统计意义上的优化,而优化分析的关键是建立土工参数概率分布的区域资料。第3章主要研究土工参数自相关距离性状。研究表明:土工参数的自相关距离性状具有明显的横观各向同性;通过静力触探试验曲线求解土工参数的竖向自相关距离以及通过剪切波速计算水平向自相关距离是有效的途径。第4章探讨土工指标试验方法不确定性的评定方法。成果揭示互相关系数分析法和随机因子分析法是评价土工参数试验方法不确定性的两种有效的方法,而后者适应性更广。第5章和第6章为土性参数概率统计特征的区域研究,分别以太原粉质黏土和平湖淤泥质粉质黏土为中心,全面深入地研究了土性参数的空间概率区域特征。根据工程勘察资料和试验研究,建立了太原粉质黏土和平湖淤泥质粉质黏土的土性指标空间概率特性的区域资料。第7章对本书的成果进行归纳,并对下一步工作进行了建议。

全书由浅入深,便于自学。对于阅读本书的读者,只需具有初等土力学地基基础和概率统计知识,便不会有困难。

本书在完成过程中,得到谢康和教授和白晓红教授的悉心指导,得到山西省建筑设计院和浙江平湖勘察大队的大力支持,得到北方工业大学有关领导和老师的热情帮助,特向他们致以衷心的感谢。

由于作者水平有限,不当之处,敬请专家与读者批评指正!

李小勇

2006年2月

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 岩土工程概率分析的研究历史和现状	(4)
1.3 软黏土地基固结概率分析的研究历史	(10)
1.4 主要研究内容	(13)
第2章 土工参数概率分布统计优化	(15)
2.1 引言	(15)
2.2 土工实验数据的优化整理	(15)
2.3 概率模型的优化拟合	(25)
2.4 分布参数的优化估计	(27)
2.5 应用实例	(30)
2.6 本章小结	(37)
第3章 土工参数自相关距离性状	(38)
3.1 引言	(38)
3.2 土工参数自相关距离性状	(39)
3.3 本章小结	(61)
第4章 土性指标试验方法不确定性	(62)
4.1 引言	(62)
4.2 互相关系数分析法	(62)

4.3	随机因子分析法	(69)
4.4	试验不确定性概率评定	(74)
4.5	本章小结	(74)
第 5 章	太原粉质黏土空间概率特征	(75)
5.1	引言	(75)
5.2	太原土层形成历史和野外地质特征	(75)
5.3	太原粉质黏土空间变异性	(76)
5.4	太原粉质黏土概率分布模型	(90)
5.5	土性参数间的经验关系分析	(115)
5.6	太原粉质黏土土性参数间的经验关系	(118)
5.7	指标间经验关系	(158)
5.8	本章小结	(160)
第 6 章	平湖淤泥质粉质黏土空间概率特征	(161)
6.1	引言	(161)
6.2	平湖土层的形成历史和野外地质特征	(161)
6.3	平湖淤泥质粉质黏土的空间变异性	(162)
6.4	平湖淤泥质粉质黏土的概率分布	(171)
6.5	平湖淤泥质粉质黏土经验关系	(171)
6.6	本章小结	(173)
第 7 章	结论和建议	(174)
7.1	主要结论	(174)
7.2	进一步工作的建议	(176)
参考文献		(177)

图目录

图 2-1	$N-I(N)$ 关系曲线	(22)
图 3-1(a)	自相关距离计算方法比较(1~20 孔号)	(41)
图 3-1(b)	自相关距离计算方法比较(20~40 孔号)	(41)
图 3-1(c)	自相关距离计算方法比较(40~60 孔号)	(42)
图 3-1(d)	自相关距离计算方法比较(60~80 孔号)	(42)
图 3-1(e)	自相关距离计算方法比较(80~100 孔号)	(43)
图 3-2	自相关距离与取样间距关系	(44)
图 3-3	水平向自相关距离对比	(46)
图 3-4	太原粉质黏土竖向自相关距离对比	(49)
图 3-5	太原粉土竖向自相关距离对比	(49)
图 3-6	平湖粉质黏土竖向自相关距离对比	(50)
图 3-7	平湖粉土竖向自相关距离对比	(50)
图 3-8	太原粉质黏土水平向自相关距离对比	(51)
图 3-9	太原粉土水平向自相关距离对比	(52)
图 3-10	平湖粉质黏土水平向自相关距离对比	(52)
图 5-1	变异系数散点折线图(工程 1~10)	(87)
图 5-2	变异系数散点折线图(工程 11~20)	(87)
图 5-3	压缩模量的频数直方图	(96)
图 5-4	压缩模量频率直方图	(96)

图 5-5	压缩模量累计频率直方图·····	(97)
图 5-6	三轴内摩擦角频数直方图·····	(104)
图 5-7	三轴内摩擦角频率直方图·····	(104)
图 5-8	三轴内摩擦角累计频率直方图·····	(105)
图 5-9	三轴内黏聚力的频数直方图·····	(105)
图 5-10	三轴内黏聚力频率直方图·····	(106)
图 5-11	三轴内黏聚力累计频率直方图·····	(106)
图 5-12	直剪内摩擦角的频数直方图·····	(107)
图 5-13	直剪内摩擦角频率直方图·····	(107)
图 5-14	直剪内摩擦角累计频率直方图·····	(108)
图 5-15	直剪内黏聚力的频数直方图·····	(108)
图 5-16	直剪内黏聚力频率直方图·····	(109)
图 5-17	直剪内黏聚力累计频率直方图·····	(109)
图 6-1	含水量变异系数·····	(167)
图 6-2	密度变异系数·····	(167)
图 6-3	孔隙比变异系数·····	(168)
图 6-4	压缩系数变异系数·····	(168)
图 6-5	内摩擦角变异系数·····	(169)
图 6-6	黏聚力变异系数·····	(169)
图 6-7	变异系数(工程 1~10)·····	(170)
图 6-8	变异系数(工程 11~20)·····	(170)

表目录

表 2-1	分位数·····	(18)
表 2-2	压缩模量实验成果·····	(21)
表 2-3	空间标准差·····	(22)
表 2-4	压缩指数统计数据·····	(31)
表 2-5	压缩指数概率分布比较法检验·····	(34)
表 2-6	压缩指数概率分布比较法检验结果·····	(34)
表 2-7	孔隙比测定值和压缩指数的计算值·····	(35)
表 3-1	水平向自相关距离对比·····	(45)
表 3-2	不同指标的竖直向自相关距离(m)对比·····	(48)
表 3-3	不同指标的水平向自相关距离(m)对比·····	(51)
表 3-4	自相关距离不同向的对比·····	(54)
表 3-5	强度指标竖直向和水平向的自相关距离对比·····	(55)
表 3-6	太原典型土层的自相关距离·····	(56)
表 3-7	平湖典型土层的自相关距离·····	(57)
表 3-8	上海地区典型土层的自相关距离(m)统计结果·····	(58)
表 3-9	杭州地区主要土层的自相关距离·····	(58)
表 3-10	太原某工程场地竖直向自相关距离·····	(59)
表 3-11	太原某工程场地竖直向相关距概率特征·····	(60)
表 4-1	未预固结和预固结三轴试验结果对比·····	(64)
表 4-2	现场和室内试验结果对比·····	(65)

表 4-3	三轴试验指标·····	(66)
表 4-4	直剪试验指标·····	(67)
表 4-5	强度指标回归方程·····	(68)
表 4-6	太原粉质黏土强度指标·····	(72)
表 4-7	太原粉土强度指标·····	(72)
表 4-8	试验方法不确定性因子·····	(73)
表 5-1	岩土参数变异性的原因·····	(77)
表 5-2	工程位置一览·····	(82)
表 5-3	太原粉质黏土土性参数空间变异性·····	(83)
表 5-4	太原粉质黏土不排水强度指标空间变异性·····	(85)
表 5-5	粉质黏土均值和空间变异系数·····	(86)
表 5-6	土层变异类型统计·····	(89)
表 5-7	压缩模量的统计量 ·····	(94)
表 5-8	压缩模量经验分布·····	(95)
表 5-9	拟合数值和结果·····	(99)
表 5-10	拟合优度检验·····	(101)
表 5-11	强度指标的统计量·····	(102)
表 5-12	强度指标的经验分布·····	(103)
表 5-13	β 分布拟合数值·····	(110)
表 5-14	强度指标的概率密度·····	(110)
表 5-15	直剪内摩擦角的 β 分布拟合优度检验·····	(111)
表 5-16	直剪黏聚力分布拟合优度检验·····	(112)
表 5-17	三轴内摩擦角分布拟合优度检验·····	(112)

表 5-18	三轴黏聚力分布拟合优度检验·····	(113)
表 5-19	太原粉质黏土土性参数分布拟合优度检验·····	(113)
表 5-20	太原粉质黏土土性参数概率分布·····	(115)
表 5-21	回归计算成果·····	(121)
表 5-22	方差分析表·····	(122)
表 5-23	方差计算分析表·····	(122)
表 5-24	实际工程检验·····	(124)
表 5-25	用液限求塑限·····	(127)
表 5-26	回归计算成果·····	(128)
表 5-27	方差计算分析表·····	(129)
表 5-28	回归计算成果·····	(131)
表 5-29	方差计算分析表·····	(132)
表 5-30	回归计算成果·····	(136)
表 5-31	方差计算分析表·····	(137)
表 5-32	土工试验成果·····	(139)
表 5-33	回归方程预报成果·····	(140)
表 5-34	回归计算成果·····	(141)
表 5-35	方差计算分析表·····	(142)
表 5-36	回归计算成果·····	(144)
表 5-37	方差分析表·····	(146)
表 5-38	回归计算成果·····	(148)
表 5-39	方差分析表·····	(149)
表 5-40	相关系数·····	(150)

表 5-41	回归计算成果·····	(151)
表 5-42	方差分析表·····	(152)
表 5-43	强度指标·····	(153)
表 5-44	回归计算成果·····	(155)
表 5-45	方差分析表·····	(157)
表 5-46	太原粉质黏土物理力学指标间经验公式·····	(158)
表 6-1	平湖淤泥质粉质黏土土性参数空间变异性·····	(164)
表 6-2	平湖淤泥质粉质黏土空间变异系数·····	(166)
表 6-3	我国若干地区的变异系数·····	(166)
表 6-4	平湖淤泥质粉质黏土概率分布·····	(171)
表 6-5	平湖淤泥质粉质黏土经验公式·····	(172)
表 6-6	相关系数·····	(173)

第 1 章 绪 论

1.1 引言

近 30 年来,随着概率统计理论在岩土工程中的应用,一个新的土力学分支——岩土工程的概率分析方法(或简称为概率土力学)已经逐渐兴起并仍在发展,目前所谓的“可靠性分析”是其中有关计算方法方面的一个研究课题。

20 世纪 70 年代以来兴起的这一土力学非确定性研究,将概率统计方法和可靠性理论引入土性指标和岩土工程变形及稳定性分析,是一个顺乎情理、符合土力学复杂研究对象和土力学课题特点的新发展。它使土力学对于岩土工程的分析更加接近事物的本来面目,防止了一些实际工作者对问题过分简单的肯定或否定。虽然,从非确定性的角度解决土力学问题的理论和方法还很不成熟,还缺乏丰富的经验,但毫无疑问,它的基本方向是有发展活力的(谢定一, 1997)。

土是一种变异性很大的工程材料,虽然其在某一点的性质是确定的,但是我们通过勘察、取样、试验得到的土性参数却是十分离散和不确定的。另一方面由于理论上的近似和假设,边界条件的简化而产生的计算方法的不确定性也是客观存在的,因此岩土工程设计中存在大量的不确定因素。岩土工程中的不确定性主要来自如下几方面(包承纲, 1989):

- (1) 地层(土层)剖面与边界条件的不确定性;
- (2) 现场与试验室测定的土性指标的不确定性;
- (3) 现场的应力分布与孔压分布的不确定性;
- (4) 外加荷载大小和分布的不确定性;
- (5) 计算模式的不确定性等。

分析计算中的不确定性主要产生于对土的性质的认识不足和有关参数的确定不当,尤其是与土在不同受力条件下的应力、应变和强度特性研究的不充分有关,而土的性质的不确定性又来自:

- (1) 土的性质的天然(固有)可变性;
- (2) 勘测取样方法与试验方法的误差;
- (3) 试验数量和勘探数量不足。

岩土工程和结构工程相似,它的状态是由有限个相互独立的参数确定的。这些参数大多是随机变量,这是因为设计参数从本质上说是用来描述性状不均匀性的,它们依赖于人类无法控制的许多因素,而且这些设计参数的数值一般是根据试验或调查数据统计得到的。

既然岩土工程问题是非确定性的,那就要用具有非确定性模型的数学“概率论和数理统计”来解决,应用概率统计的概念和方法对不确定性加以定义、预测和估计(高大钊,1989)。

目前我国的结构设计规范已在极限状态和概率方法的基础上采用分项系数设计。可靠性设计除《桩基规范》外尚未在岩土工程领域普遍应用,总体上还处在探索和研究阶段,这是由岩土工程的特殊性决定的,具体表现在以下方面(顾保和,1995):

- (1) 结构工程所用的材料是人造的,其性能由人为控制,而岩土工程分析的对象是岩石和土,它是天然形成的,一般非人为所能控制。结构工程所用材料可通过全国性的调查统计,取得性能参数的平均值、标准值和变异系数,而岩土则不能,只能通过一

一个工程的勘察测试取得。

(2) 岩土有地域性的特点,其性能随位置而改变。不仅不同场地岩土性能不同,而且即使同一场地和同一土层,其性能也不相同。

在统计某一层土的变异性时,实际上包含了试验变异性 and 因位置不同而形成的岩土本身固有的变异性,结构工程则不具有这种特点。

(3) 试验尺寸与分析计算尺寸相比,结构设计差别不大,而岩土工程设计差别很大,分不清截面可靠性或系统可靠性。

当我们分析一个地基时,要考虑大范围岩土性能的综合指标,显然比结构的截面设计复杂得多。

(4) 土性具有自相关性。空间分布的土层,其性质存在着空间可变性,土性参数的概率分析总是一个随机场问题。空间分布的土层,由于其沉积条件、沉积历史、埋藏条件等的联系,不同点的土性虽有差别但又有一定的相关性,这种相关性将随着两点距离的增大而减弱。

因此,必然存在着这样一个距离,称为自相关距离,在该距离内土性强烈相关,超过该距离土性就基本不相关了。这种相关性是就同一参数而言的,称为土性的自相关性,不同的两参数之间的相关性称为互相关性(高大钊,1996)。

研究岩土工程的可靠性,下面一些问题(高大钊,1984)是需要着重解决的:

(1) 观察或试验数据(包括土的性状、荷载和环境因素等)的统计处理,例如设计参数的概率分布拟合度检验,统计参数的计算和预测等;

(2) 现场勘探和取样对策、试验设计;

(3) 计算安全系数和破坏概率之间的关系;

- (4) 工程造价与安全度的关系;
- (5) 总沉降和差异沉降的关系;
- (6) 工程实例的风险分析与经济分析;
- (7) 在不确定性条件下的优化与决策。

1.2 岩土工程概率分析的研究历史和现状

可靠性理论萌芽于第二次世界大战期间,而在战后才得到完善与发展,并在许多工程领域内得到应用,取得了显著成效。

可靠性理论在土木工程的结构方面的应用始于 20 世纪 40 年代。在 1947 年,苏联的 APP 提出了用一次二阶矩理论的方法来估计结构的失效概率。美国(1954)发表了“结构安全度”的论文,开创了美国结构安全度研究工作的先河。

在 20 世纪 60 年代和 70 年代,土木工程结构可靠性的研究工作广泛地开展并逐步进入实用阶段。

20 世纪 80 年代以来,结构构件的概率极限状态设计方法已趋向成熟并陆续进入各国的标准、规范之中。国际标准化组织委员会 1986 年批准的国际标准《结构可靠性总原则》(ISO 2394),是以概率理论为指导制定的结构可靠性设计总原则。它作为制定一切土木工程结构可靠性设计规则的共同基础,也作为制定其他承重结构国际标准的基础。近年来,结构可靠性研究关注的重点是结构系统可靠性的分析,模糊概率分析与优化等方面。

我国从 20 世纪 50 年代初期开始用数理统计方法确定超载系数和材料强度系数。

20 世纪 70 年代成立了工业与民用建筑规范系列的《建筑结构设计统一标准》编委会和专题研究组,参考国际上的研究成果,