



基础工程 可靠度分析 与设计理论



冷伍明 著
中南大学出版社

JICHUGONGCHENG KEKAODUFENXI YU SHEJILILUN



基础工程可靠度分析与设计理论

冷伍明 著

中南大学出版社

基础工程可靠度分析与设计理论

冷伍明 著

☐责任编辑 刘石年

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路 邮编:410083

发行科电话:0731-8876770 传真:0731-8829482

电子邮件:csucbs @ public.cs.hn.cn

☐经 销 新华书店总店北京发行所

☐印 装 长沙市华中印刷厂

☐开本 850×1168 1/32 开 ☐印张 7.25 ☐字数 175 千字

☐版次 2000 年 9 月第 1 版 ☐2000 年 9 月第 1 次印刷

☐印数 0001-1200

☐书号 ISBN 7-81061-355-3/Z·019

☐定价 15.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内容简介

本书针对岩土工程的特殊性,探讨了基础工程应用可靠度理论进行概率极限状态设计分析的理论和方法。全书分绪论、第一篇、第二篇和第三篇四部分共9章和4个附录。绪论部分综合分析了岩土工程可靠度分析的特点。第一篇讨论岩土工程可靠度分析中的几个主要问题,内容包括土性参数不确定的计算,岩土工程极限状态设计原理和表达形式,岩土工程可靠度指标的计算。第二篇和第三篇分别探讨在铁路桥梁浅基础和桩基础工程中应用可靠度理论进行概率极限状态设计的方法。本书除吸收了国内外该领域最新成果外,许多内容为本人的科研成果。在4个附录中分别列出了根据本书研究成果研制的计算机分析程序。

本书可供土建类大学生、研究生、工程技术人员和教师使用和参考。

前 言

在建筑结构设计,已采用以概率论为基础、通过分项系数表达的极限状态设计方法,但地基基础与上部结构设计在这一点尚未统一。应用概率论为基础的极限状态设计方法即可靠度设计方法是方向,它是工作应力设计方法的合理扩充和延续。然而,由于岩土工程的特殊性,岩土工程应用可靠度设计方法在技术上还有许多有待解决的问题。本书在绪论中回顾和概括了岩土工程可靠度研究和设计的发展过程,综合分析了岩土工程可靠度分析的特点和应注意的问题;在第1章中探讨了土工参数不确定性的计算方法,提出了土性空间平均变异性计算的综合计算式;在第2章中讨论了工作应力设计方法及其局限性;在第3章中介绍了岩土工程极限状态设计方法的主要表达形式,并分析了它们的优缺点;在第4章中提出了一个适合于复杂岩土工程极限状态方程的可靠度指标计算方法;第5章和第6章探讨了铁路桥梁浅基础的可靠度设计;第7章至第9章研究分析了铁路桥梁桩基础的可靠度设计分析。在4个附录中分别列出了根据本书有关研究成果研制的计算机分析程序,可供岩土工程可靠度研究和基础工程可靠度规范改革时参考使用。由于岩土工程的内容很多,本书的撰写主要围绕土性参数的不确定性计算和铁路桥梁基础工程的可靠度分析与设计,兼顾基础工程可靠度规范改革的实际应用,注意吸收了该领域国内外最新研究成果。

由于作者水平所限,加之岩土工程可靠度问题的复杂性,并且

许多研究工作处于探索阶段,书中难免存在不妥甚至错误之处,敬希读者批评指正。

冷伍明

2000.4

目 录

绪 论	(1)
0.1 岩土工程可靠性研究和设计理论发展简况	(1)
0.2 岩土工程可靠性分析的特点	(5)

第一篇 岩土工程可靠性分析中的若干问题

第 1 章 土工参数不确定性的计算分析	(9)
1.1 土工参数的不确定性	(10)
1.2 土工参数不确定性的计算	(11)
1.3 土性空间平均的变异性 and 随机场理论	(14)
1.4 相关距离计算方法	(16)
1.5 变异系数的综合计算式	(21)
1.6 算例	(21)
第 2 章 工作应力设计方法及其局限性	(26)
2.1 工作应力设计方法	(26)
2.2 总安全系数的定义	(27)
2.3 工作应力设计方法的局限性	(29)
第 3 章 岩土工程极限状态设计	(33)
3.1 岩土工程极限状态的特点	(33)
3.2 极限状态设计的发展	(35)
3.3 采用分项安全系数的极限状态设计	(36)
3.4 换算强度方法与换算抗力方法的比较	(37)
3.5 极限状态法中荷载系数设计方法	(42)
3.6 荷载和抗力系数设计方法(LRFD)	(43)
3.7 基于可靠度理论的设计	(47)

第 4 章 岩土工程可靠度指标最优化计算方法	(50)
4.1 从一次二阶矩到最优化方法	(50)
4.2 建立优化方法求可靠度指标的数学模型	(53)
4.3 可靠度指标的优化计算	(54)
4.4 工程计算实例	(56)
4.5 几点说明	(59)

第二篇 铁路桥梁浅基础可靠度设计

第 5 章 铁路桥梁浅基础设计变量的不确定性分析	(61)
5.1 浅基础设计变量	(61)
5.2 作用荷载的不确定性计算	(62)
5.3 地基抗力的不确定性分析	(68)
第 6 章 铁路浅基础承载力可靠度设计方法研究	(73)
6.1 浅基础的极限承载力计算公式	(73)
6.2 地基土抗力 R 的变异性	(76)
6.3 浅基础承载力可靠度指标的计算和目标可靠度指标的确定	(78)
6.4 地基土承载力设计值的确定方法	(83)
6.5 浅基础的荷载—抗力系数设计方法	(84)
6.6 地基土抗力分项系数的计算分析	(85)
6.7 总结	(89)

第三篇 钻孔灌注桩的可靠度研究

第 7 章 轴力桩承载力计算模型的不确定性分析及工程应用	(92)
7.1 基于试桩资料的极限承载力计算方法	(93)
7.2 计算程序	(96)
7.3 计算模型的不确定性分析方法	(98)

7.4	计算模型不确定性的统计分析	(100)
7.5	工程应用实例	(106)
7.6	小结和说明	(108)
第8章	成层土中钻孔灌注桩承载力指标和桩径的统计分析	(110)
8.1	成层土中灌注桩承载力发挥的特点及影响因素 ..	(110)
8.2	钻孔桩承载力指标的统计原则	(114)
8.3	统计分析结果	(115)
第9章	成层土中灌注桩承载力的可靠性分析	(126)
9.1	桩土体系基本变量的无量纲化	(126)
9.2	侧阻和端阻的无量纲比值及有关可靠性分析计算 表达式	(127)
9.3	桩顶荷载效应统计量的取用	(130)
9.4	单桩承载力现行设计水准的可靠度评估	(131)
附 录	电算程序	
附录一	根据自协方差函数值推求土工参数随机试验 误差	(136)
附录二	曲线极限法(最优拟含法)求土工参数的相关 距离	(142)
附录三	最优化方法求岩土工程可靠度指标	(155)
附录四	分析计算铁路桥梁浅基础地基土抗力分项 系数	(171)
参考文献		(213)

绪 论

0.1 岩土工程可靠性研究和设计理论发展简况

由于岩土工程中大量的不确定和不确定因素、研究对象为千变万化的自然以及错综复杂的人为影响因素,岩土工程的可靠度问题是工程可靠度分析研究中一个比较困难的问题,它的发展落后于结构可靠度的发展,国内外都如此。

从 20 世纪 60 年代起,Lumb P、松尾稔、Meyerhof G G 等人开始了关于土的性能统计性质的研究和资料搜集。70 年代对土性参数概率统计分析进入一个新的发展时期,1975 年,Lumb P 首次提到土的空间变异性(spatial variability)概念,1977 年 Vanmarcke E H 提出了土层剖面的概率模型,自此以后,这一概率模型及其土工随机场(random field)理论被广大研究者所引用。在这个时期,对土坡稳定的可靠性方法和计算有较多的研究(Yucemen M S, Tang W H, 1975, Vanmarcke E H, 1976, 等)。1981 年,Meyerhof G G 在《Structural Safety》杂志上的一文中总结了岩土工程中极限状态设计方法,讨论了变异性、总安全系数和分项安全系数等问题;在 80 年代内,可靠性理论在土工中的研究领域进一步扩大,除了土性参数和边坡外,内容涉及近海洋平台基础、锚桩、挡土墙以及基础的破坏模式和计算模型的不确定性(uncertainty)等。关于沉降,据松尾稔介绍,以 Vanmarcke E H 和 Cornell C A 为主的麻省理工学院研究小组的研究取得了较大的成果;对于软土地基上的填土、天然及人工边坡、开挖地基等破坏问题或沉降预测问题,作为整个系统考虑的可靠性设计已导出固定的公式,达到了可供

实际应用的阶段。松尾稔本人在他的《地基工程学——可靠性设计的理论与实践》一书中介绍了可靠性理论在土性参数、填土、边坡稳定、挡土墙和小直径埋管中的应用和他们取得的研究成果以及利用施工观测预测破坏和沉降的方法。比较有名的《加拿大岩土工程学报》(Canadian Geotechnical Journal)和《美国岩土工程学报》(Journal of Geotechnical Engineering)历年都有关于土工参数概率统计分析和岩土工程可靠性研究方面的论文发表和应用成果介绍。

从 1971 年开始,国际上每隔四年召开一次“统计学和概率论在土工和结构工程中的应用”国际会议,至今已召开七次,尔后的历届国际土力学和基础工程会议中关于土工可靠性理论的论文数量逐年增加,1977 年,第九届(东京)国际土力学和基础工程会议召开了“土力学中概率设计方法”研究会,以后各届都提出了“岩土工程中的概率分析方法”的专题会议。美国的 ASCE Specialty Conference on Probabilistic Methods 每四年召开一次。1993 年 5 月,在丹麦哥本哈根召开了岩土工程极限状态设计国际学术会议。这次学术会议由国际土力学及基础工程协会(ISSMFE)技术委员会(TC23)和丹麦岩土工程科学院和丹麦岩土协会共同举办。共收论文 68 篇,涉及极限状态设计分析的各个方面。从更远的历史上来讲,在岩土工程中首先使用极限状态(limit state)概念的包括 Coulomb 和 Rankine 早期做的工作。在 1773 年,Coulomb 基于极限状态的考虑,推导了粘性土上路堤的垂直界限高度;1857 年,Rankine 提出了主动和被动土压力极限状态。因此,土力学中的极限状态问题,如土压力理论和承载力边坡稳定、渗漏等问题在 18 世纪和 19 世纪就已经研究过了。在 1943 年,Terzaghi 指出了岩土工程极限状态问题中的两大类,即稳定问题和弹性问题。稳定问题处理的是瞬态情况,它不考虑应变由塑性流引起极限承载力失效之前的情况,而弹性问题处理的是土体在自重和外力作用

下的变形问题,这类问题不考虑失效的应力条件。上述两类问题分别与极限状态设计中的承载能力极限状态(ultimate limit state, 简称为 ULS)和正常使用极限状态(service limit state, 简称为 SLS)相符。世界上第一部极限状态标准是 1956 年的丹麦基础工程标准。在早期,岩土工程界在极限状态原理方面的认识和应用是领先于结构工程的。

近 20 年来,与可靠度理论应用有关的极限状态设计在岩土工程和结构工程中受到日益重视,许多研究者和实践者就此主题发表了很多论文,其中著名的包括 Meyerhof (1982, 1984, 1993, 1995), Ovesen(1981, 1993), Ovesen 和 Orr(1991), Allen (1991), Green(1987, 1993)和 Barker(1991)。

在规范编制方面,波兰 PN-83/B-02482 和前苏联 СНИП 2.02-85 桩基规程,均规定桩基要按承载能力和正常使用两种极限状态进行计算,并给出了有关分项系数数值。加拿大的“岩土工程手册”是一本准规范,它采用兼容并蓄的方法,同时列出了总安全系数和建立在概率理论上的分项系数法。《欧洲地基基础规范》是由欧洲十一国的各国岩土工程学会向欧洲共同体委员会提交的技术法规,1986 年 3 月国际土力学和基础工程学会地区技术委员会主席 Neils Krebs Ovesen 将欧洲法规第七分册蓝本草案《地基基础规范》邮寄欧洲共同体所属十一个国家的岩土工程委员会,并邀请各成员国学会对规范蓝本草案提出意见和建议。该规范蓝本系统而全面地论述了基础工程问题,并规定采用极限状态法分项系数表达式进行设计。20 世纪 90 年代初开始编制的岩土工程国际标准分为三部分,其中第三部分是关于基础、挡土墙和土工构筑物的,在这一部分中给出了不同安全等级下岩土工程的可靠性指标建议值,并认为各国由于各自的技术条件和经济政策的不同,其分项系数的具体值应在各国国家标准中给出。再说加拿大,极限状态设计自 70 年代中期以来,已成为结构工程师们广为应用的一

种方法。然而,绝大多数岩土设计一直继续沿用传统的工作应力设计方法(working stress design,简称为WSD)。由于在近20多年里,极限状态设计法在岩土工程研究中越来越引起重视,要求采用极限状态设计方法的呼声越来越高。因此从90年代初,加拿大岩土工程界开始评价把LSD(limit state design)引入基础工程设计规范的工作,以便使结构工程师和岩土工程师之间使用的设计方法一致。

对于基础工程来说,极限状态设计方法用于基础工程并不是什么新东西。该方法最早于20世纪50年代中期就已引入欧洲,在丹麦的应用已超过30年。在加拿大,LSD最早见于安大略省公路桥梁设计规范的第二版中(OHBDC,交通通讯部,1983年)。OHBDC采用了在丹麦发展起来的换算强度原理,这一原理与在丹麦的发展极限状态设计理论是一致的。

我国岩土工程可靠性研究始于20世纪70年代末期,研究内容涉及地基承载力、土坡稳定、桩基础、挡土墙、土性参数和地基沉降等方面。80年代末和90年代初有关单位召开了一系列关于岩土工程可靠性的会议。在《土木工程学报》和《岩土工程学报》以及工程结构可靠性学术交流会议上发表的岩土工程可靠性分析的论文也越来越多。1990年成立了“岩土工程可靠度可行性研究攻关组”,攻关组做了大量工作,对我国岩土工程可靠性理论的研究工作起了很好的促进作用。1993年吴炳焜教授在《西南交通大学学报》(英文版)上发表了“The Probabilistic Aspects of Stress Tensors in Mechanics of Particulate Media”一文,文中介绍了作者对土的亚微观统计性质的研究成果。在规范修订和改革方面,各行业部门也正在抓紧进行工作并已取得一些成果。1990年1月颁布的《建筑地基基础设计规范》GBJ-7-89按《统一标准》的要求对原规范作了较大的修改和补充,对各种指标基本上都给出了标准值,并在有关附录中给出了变异系数的计算公式。1994年,颁布的《建

《建筑桩基设计规范》规定按概率极限状态法进行设计,考虑承载力和正常使用两种极限状态,采用分项系数和标准值的实用设计式,分项系数和标准值结合试桩资料进行评定和校核。

不确定性变化大是地基基础和其他岩土工程设计中所固有的现象。因此在近年来,在岩土工程中采用基于可靠度及概率的设计方法是一种趋势。概率极限状态设计方法是工作应力设计方法的合理扩充和延续,也应当成为岩土工程师在基础设计中的一般手段。但是,可靠而恰当地应用全概率设计法是困难的,特别是在绝大多数岩土工程设计中是如此,因为一般都缺乏足够可用的统计资料;并且,全概率法由于费时费力,仅在重大的和特殊的工程设计中采用。正因为这些困难,近似概率方法得到了发展,如多系数极限状态设计方法,多个分项系数的设计方法中的各分项系数是采用概率法和可靠度方法统计校准出来的,该方法分别考虑荷载、材料及结构的基本行为,能反映出设计中荷载类型、材料类别、结构基本行为以及不同失效模式或极限状态所起的不同作用。

0.2 岩土工程可靠性分析的特点

岩土工程中存在大量不确定性和不确知的因素,研究对象千变万化,远比人工材料如钢材、混凝土等复杂。

(1)与上部结构工程相比,岩土工程可靠性分析有下述几大特点:

①岩土工程的规模和尺寸比一般结构工程大得多,其实际范围是半无限空间,工程计算分析中采用的边界是近似和模糊的。

②岩土的各种参数是空间的函数,参数的变异性大,变异系数一般在 $0.1 \sim 0.35$,有的可超过 0.4 。并且土性之间或不同点的土性具有较强的相关性,包括互相关和自相关。

③岩土是一种高度非线性材料,在不同的应力水平下具有很不相同的变形特性。岩土工程的极限状态方程也经常是高度非线性

性的,并且诱发极限状态的原因或作用多种多样。图0-1所示为基础工程设计中的承载能力极限状态,对这些不同原因和作用,会有不同的极限状态方程。

④岩土试样性质与原状土的性质往往存在较大差别,即使原位测试所反映的,也是岩土的“点”性质(如现场十字板强度试验)或“线”性质(如静力触探)。而岩土工程的行为往往由它的整体空间平均性质控制,因此,在岩土工程可靠度分析设计中,要注意“点”、“线”到“空间平均性”概率统计指标问题。

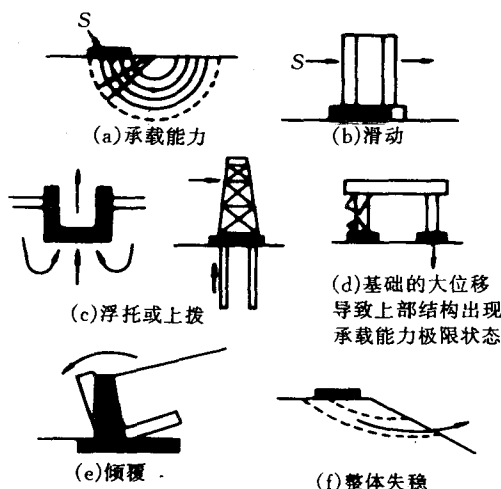


图0-1 基础工程承载能力极限状态

(a)~(f)为导致承载能力极限状态的各种原因和作用

⑤由于上述岩土性质和岩土工程的不确定性加之推理的不确定性(如有目的地简化),岩土工程的计算模型—极限状态方程往往具有较大的不确定性或不精确性。并且除了上述③中提到的在岩土工程中“对不同原因和作用,会有不同的极限状态方程”外,对于同一个计算参数(如地基土的极限承载力)也还存在不同的计

算表达式(即功能函数)。

⑥岩土工程性质和功能(如承载力等),受施工工艺、施工质量和水平的影响很大。

(2)因此,在岩土工程可靠度分析和设计中应充分理解和注意下面的几点:

①岩土工程分析和设计应更多地考虑不确定性和不确定因素,换句话说,岩土工程的性质本来就具有较大的离散性、土工活动避免不了随机性,所以从确定论观点上处理岩土工程问题是不足的,而用随机理论来分析处理问题与岩土工程的客观规律是一致的。

②根据岩土材料和岩土工程的上述特点,要采用合适的统计方法和理论来估计设计参数,如考虑相关影响的方法——采用协方差矩阵将相关变量空间转化为不相关变量空间;采用随机场理论——根据岩土的“点”统计指标来估计岩土空间平均性质的指标。

③根据工程实际,深入了解和评定极限状态方程。在极限状态设计的分项系数法,对不同的极限状态方程,相同土抗力参数的分项系数一般要取不同的数值,以便使目标可靠度指标(reliability index)一致。在岩土工程的可靠性理论规范改革中,宜“采用校准法”来确定目标可靠度指标,并且岩土工程设计规范改革宜循序渐进。由于岩土参数的变异性比较大,要采用合适的方法计算可靠度指标。

总之,岩土工程应更多地考虑不确定性因素和不确定因素,换句话说,岩土的性质本来就具有离散性;土工活动(试验和施工)避免不了随机性,而且离散性和随机性相当大,所以从确定论观点上处理岩土工程问题是不足的或不合适的,而从随机的观点来分析是不可否定的。近年来,飞速发展起来的可靠度分析方法最本质的一点就是力图定量地考虑工程中的各种不确定性因素。也由于

这种以概率统计为基础的可靠性理论提供了处理不确定性的系统方法,并能将不确定性与工程的可靠度(或风险)联系起来,所以越来越受到人们的重视,并发展成为一套考虑不确定性和随机离散性的工程设计理论。如果结构的可靠性可以用作协调工程的安全适用与经济的最佳结合点的话,则土工的可靠性也不外乎如此,并且土工可靠性理论对土工测试数据的分析整理、土工性能的预测、勘察程序的规划都能发挥很好的指导作用。