

我国结构可靠性设计及目标可靠指标的发展现状

陈艳¹, 刘宁¹, 杨海霞¹, 胡爱宇²

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京工程学院建筑工程系, 江苏 南京 210024)

摘要:将结构可靠度的研究划分为两个阶段:一是基于概率分析的点可靠度设计阶段;一是广义的可靠度设计阶段(包括结构体系可靠度设计、基于功能的可靠度设计和非概率可靠性设计).阐述了不同设计理论的产生背景、基本思想、研究和应用现状,以及所对应的目标可靠指标的确定方法.

关键词:结构设计;可靠性设计;结构可靠度;目标可靠指标

中图分类号: TU318+.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2004)04-0061-04

人们对客观世界中物质的认识,总是逐渐由确定性的值向不确定性的分布过渡.结构工程中对于不确定性的研究,也随着概率与数理统计和随机过程理论^[1]的日益完善,以及数学领域中新兴学科(例如模糊理论、混沌、分形理论和神经网络等)^[2]的发展而日益深入和广泛.

结构可靠度的研究始于20世纪30年代,当时主要是围绕飞机失效进行研究.经过众多学者艰苦的研究工作,在1976年国际结构安全度联合委员会(JCSS)上,采用了拉克维茨(Rackwitz)和菲斯莱(Fiessler)等人提出的通过“当量正态”的方法,考虑随机变量实际分布的二阶矩模式,从而提高了二阶矩模式的精度.至此,二阶矩模式的结构可靠度表达式与设计方法开始进入实用阶段.随着可靠度理论应用的扩大和研究的深入,结构可靠度的研究也逐渐由基于概率分析的结构构件可靠度和结构体系可靠度的研究,延伸到基于结构的某一设计性能或使用功能的可靠性设计.笔者将这个发展过程划分为:基于概率分析的点可靠度设计和基于功能的可靠度设计两个阶段.由于结构的体系可靠度设计和非概率可靠度设计这两方面的主要研究成果是和第二个阶段同期发展起来的,所以将其归结在一起,定义为广义的可靠度设计阶段.

在结构可靠度设计中,作为结构设计依据的目标可靠指标,与工程造价、使用维护费用以及投资风险,人民生活及财产等因素有关,是体现结构安全性与经济性平衡的重要因素,它代表了设计所预期达到的结构可靠度.合理确定目标可靠指标值,不仅和

专业人士对工程设计可靠度水平的认识有关,还与社会经济和科技发展有密切的关系,是一个需要全面考虑的国家综合性技术经济政策问题.这绝对不是从安全或经济任何单一角度所能解决的.这是结构设计发展中主要的矛盾,也是将结构设计发展分为以上两个阶段的主要原因之一.

1 以概率分析为基础的可靠度设计阶段

我国为了提高结构设计规范的先进性、合理性和统一性,在土木工程的专业,相继开展了大规模的可靠度理论研究和设计规范的修改工作,于1984年完成了GBJ68-84《建筑结构设计统一标准》^[3]的编制工作,自1985年1月1日起施行.随后铁道、公路、水运和水利各有关部门也都先后成立专门机构,采用国际上正在发展和推行的以概率论为基础的极限状态设计方法,分别编制了部门标准^[4-9],统一了各类结构设计的基本原则,明确了结构的目标可靠指标.这些标准在使用过程中也在不断地被修订.

目标可靠指标的确定方法^[10-12]通常有3种:①事故类比法;②经济优化法;③经验校准法.确定目标可靠指标不仅要考虑理论结果,还要考虑工程结构的现实情况,保证新、老规范的衔接,以免因为材料用量的过大波动而引起设计人员的不安.在实际应用中,前两种方法比较困难,规范中对于其可靠指标的确定主要采用经验校准法^[13]①,即通过对现行设计规范安全度的校核,利用反演计算,找出按原规范设计在结构中隐含的相应可靠指标值,经综合分析和调整,以此来制定基于概率分析的可靠

作者简介:陈艳(1976—),女,甘肃天水人,博士研究生,从事结构可靠度研究.

①程学文,解伟,李铁.工程结构设计规范可靠度校准的精确方法.工程结构可靠性第三届全国学术会议论文集,1992.

性设计的目标可靠指标.这在实质上是充分考虑到了工程建设长期积累的实践经验,继承了原有设计规范规定的可靠度水准,接受了其总体上的合理性.在当时,依靠过去采用安全系数法设计的可靠结构来进行“校准”,以此确定目标可靠指标,是一种比较切实可行的有效方法.在这个时期,不论是规范的确定还是可靠度理论的研究,关于结构可靠度的分析和设计基本上都停留在结构构件的可靠度(即点可靠度)分析和设计上,对于结构体系可靠度分析的研究还处在理论探索阶段.关于点可靠度的计算在文献[10]和[11]中已有详细的论述,也有一些关于新理论尝试性的可靠指标计算方法,如混沌搜索法、神经网络法、遗传算法等.

2 广义可靠度设计阶段

随着可靠性理论研究的深入和应用的推广^[14,15],有学者将国内外基于极限状态设计方法编制的结构可靠性设计规范进行了比较^[16~18],通过对目标可靠指标和由此确定的多系数设计方法中的分项系数进行分析,发现由于各国对不确定性因素的考虑和统计数据值处理方法的不同,分项系数在具体数值上会存在差异,因此对不确定性的描述不可能是统一、精确和充分的^[19],不同的分析体系就会得出不同的可靠指标值,故不应以此值作为判断结构可靠度大小的惟一标准.

随着经济和科技的发展,基于概率的极限状态设计方法^[20~25]逐渐显露了在设计过程中无力强调耐久性和长期效益^[26,27]、较少考虑经济的长远发展和用户的不同需要对于结构可靠性要求的不足.为了完善结构设计理论,使设计结果更好地满足业主对结构质量提出的不同要求,有利于设计人员在设计中能更灵活地采用新技术或应用新材料,实现按实际需要、业主要求、投资能力等选择不同等级的结构可靠性,发展了结构体系可靠度的设计,并提出了基于功能的设计方法.基于功能的设计方法以选定的结构性能或结构功能为设计目标,以结构全寿命期间为实现其使用功能而发生的一切可能费用^[28~30]和产生的效益函数为优化目标,实现技术经济的一体化,得到既满足使用性能要求而又经济合理的结构设计方案.在这里,目标可靠指标^[31,32]不仅满足结构正常使用下的安全性,更体现着考虑了时间因素后在经济优化条件下的最佳取值.

2.1 结构体系可靠度的分析设计

我国现行的结构设计规范是基于概率分析的极限状态设计方法制定的,与以往的结构设计规范一样,忽略了结构的整体性,是以构件的可靠度为目标

的结构设计.而构件或截面的可靠,并不一定能保证结构体系的可靠;构件和截面的最优,也不能保证结构体系的最优.随着新规范的实施和设计的深入,由于以上的原因,体系可靠度引起了研究人员更多的关注,他们将体系可靠度应用到工程结构的安全设计中^[33],并逐步将其与结构的优化设计理论相结合^[34].几乎所有计算结构体系可靠度的方法在理论上都是给出体系可靠度的近似估计,以可靠度的界限估计和点估计两类近似方法最具代表性^[10,11].结构设计要考虑其最优体系可靠指标,就存在着对本结构体系的子系统之间进行可靠指标分配的问题,使结构系统在一定体系可靠度所对应的成本约束条件等评价标准下,所包含的子系统具有最优的可靠指标分配.在体系可靠度的研究领域中,结合新兴的数学理论和评价标准,针对在工程结构设计中的应用,代表性的方法主要有:①基于人工神经网络最优分配^[35];②基于模糊理论的最优分配^[36,37];③系统多目标的最优分配^[38];④考虑动态风险成本的最优分配^[39]等.新的数学理论为结构的体系可靠度计算提供了强有力的方法保障,也能较全面地反映在结构分析过程中所出现的不确定性因素.新的数学手段和考虑体系可靠度分配方案的评价标准的有效结合,更有利于人们在设计过程中考虑结构体系的不确定性,选择出最安全、最经济的设计方案.这些理论方面的探索,为体系可靠度的研究提供了更广阔的空间.

2.2 以功能为基础的可靠度设计

设计规范今后的发展方向,将会是“以功能为基础”的结构设计,它是“以概率为基础”的极限状态设计方法的进一步发展.这种基于功能的结构可靠性设计研究,目前的主要研究成果都集中在抗震防灾结构中.对于有防灾要求的结构^[40],尽管可以做到在大震时避免主体结构倒塌以保障人们的生命安全,但一些现代建筑,特别是其内部设备价值远远超出结构自身价值的建筑物,遭受破坏可能导致的直接经济损失、间接经济损失以及人员伤亡等方面的损失将是巨大的.因而对这些现代建筑不仅要防止结构倒塌,还要考虑控制经济损失和结构的使用功能在灾后能够得以延续等问题.由于灾害荷载和结构抗力的不确定性,由超载所引起的结构破坏是不可避免的.针对结构承受不同风险水平的灾害荷载,以一定可靠指标水平为保证,满足不同功能要求的“基于功能的设计”,能保障建筑结构在整个运行期充分发挥功能,方便维护和改建,更符合设计的经济目的.随着该理论研究的深入,这也将会成为具有特殊功能要求的非抗灾结构设计的发展趋势.人们在

建筑结构使用的过程中,不仅有安全性的要求,也会有一些其他功能上的要求,如最大裂缝、最大感知振动、城市象征、景观作用等心理需求,或者灾害抢救等特殊用途.这些不同功能所应满足的可靠度标准,就是结构功能设计的目标.这种针对结构个性的设计,更好地体现了结构设计应该满足的经济性要求.这不同于规范中满足结构强度或稳定设计所表现出的经济性,它是在满足多元化结构功能的要求下,以结构系统可靠度为决策变量,以结构寿命全过程为时间范围,以相应的寿命期内总费用最小为决策目标.这样设计的每个方案,都是由设计者和业主共同参与,按结构的用途及业主的特殊要求,确定结构要实现的目标功能水平,使业主和社会均可接受结构在突发荷载作用下可能遭受的损失.这种设计观念,更适合不同的设计计算方法和新兴特种施工工艺的使用.综合起来,“以功能为基础”的结构设计主要优点表现在:①按结构的用途和业主的要求确定功能要求,即建立目标功能;②选用合适的设计方法以满足目标功能,强调了设计要完成的重点应该是结构的目标功能,而计算方法是可以选择的,为达到预期的目标功能提供合理的理论基础;③结构是否满足设计目标,是通过对每项功能进行评定来确定的,这种设计思路更接近于结构使用的要求.

在设计结构功能上,可以由不同形式的结构来实现同一功能;同时,一个被设计的结构又需要满足不同功能的需求,这是一个系统决策问题.针对这个问题,现在有关基于多功能的结构体系可靠度优化设计的研究,可以利用拓扑理论来确定结构系统的选型和结构形状、尺寸等,再对整个体系多功能设计可靠度进行优化分配^[41].由于基于功能的设计是在基于概率的设计基础上发展的,一切基于概率设计的理论成果,都可以作为基于功能设计的应用理论.基于功能设计更为优越的是,可以计算结构在某种性能状态下完成某种功能要求的可靠度^[42],这样能为已建结构的功能维修和保障提供理论上的支持.这部分的研究还处于探索阶段,但它的发展将会给设计理念带来质的飞跃.

2.3 非概率可靠性的分析

伴随着新的数理知识在工程中的应用,人们对于结构不确定性的非概率方面的认识也在不断发展,对于影响结构可靠度的不确定性因素的研究更加全面.对于结构可靠度的研究而言,数学理论是基础.数学理论针对事物3种不同划分的不确定性(随机性、模糊性和不确定知性)有各自独立的体系进行研究,要全面考虑这些不确定性因素对于结构可靠度的影响,就要综合利用这些理论对结构的可靠性进

行分析.这也是随着结构可靠性研究的深入而亟需解决的问题之一.

对于不确定性分析的非概率尝试,主要集中在:①用于在描述不确定性因素的原始数据较少的情况下,结构体系可靠度的计算和失效模式的非概率研究^[43~47],这对于目前无法得到充分统计资料的不确定性数值评价提供了很好的理论支持;②基于模糊理论的体系可靠性研究^[48,49],侧重考虑结构所具有的模糊因素对结构系统可靠度的影响,基于此理论的结构体系可靠度的优化分配较常规分配方法更符合实际;③由于结构设计所用的功能函数对于实际状况的不完全反映,和同一功能可由不同表达式表示等因素,将会对结构可靠度的计算造成影响,这是本研究领域中未认知因素造成的可能误差.这些研究都是对结构不确定性更全面的反映.

2.4 可靠指标的确定

在广义可靠度设计阶段,目标可靠指标的确定方法更多地采用第二类方法,即经济优化法.在这种方法中,经济性已不局限于结构建设期中的一次性投资,而是全面考虑结构物在整个设计基准期内的维护维修费用和由于结构遭遇超越荷载而引起的破坏性损失费用的总和.这部分损失不仅包括建筑物破坏的损失和由此引起的经营性损失,还包括社会间接经济损失和因此产生的社会不良影响等.这是将某一建筑物或建筑物系统放在整个社会的经济链条中来考虑的大系统的安全性和经济性,更好地体现了目标可靠指标所代表的安全性与经济性的最佳平衡.由于结构设计目标可靠指标的值与结构设计方案有函数关系,其值在评价设计方案优劣标准的控制函数中,是作为结构优化设计的约束条件和约束目标出现的,通过迭代求解后,使所得设计方案满足功能要求和经济性最佳,体现结构设计的经济优化性.这种方法的计算量虽然较原规范设计要大许多,但随着电子技术的高度发展,计算量的增大将不会限制这种设计思路的应用.

3 结 论

随着经济的发展,我国设计规范中规定的设计标准在有些方面值得商榷.结构设计由结构构件设计向结构功能设计的转变,是设计方法发展的必然趋势,也是设计方案完成结构使用功能要求发展的必然.结构设计水平最直接的反映,就是结构的目标可靠指标,它是一个国家社会经济和科技水平的折射.随着可靠度理论的广泛应用和不确定性理论研究的逐渐深入,将工程结构的设计、施工以及使用过程中种种影响结构安全、适用、耐久的不确定性因

素,逐步引入不确定性分析的结构设计方法,使设计方案能够更全面体现对现有资料和结构真实状态的反映,将是结构设计发展的最高目标。

参考文献:

- [1] 盛骤,谢式千,潘承毅.概率论与数理统计[M].北京:高等教育出版社,1995.
- [2] 黄健元.模糊集及其应用[M].宁夏:宁夏人民教育出版社,1999.
- [3] GBJ68-84,建筑结构设计统一标准[S].
- [4] GB50153-92,工程结构可靠度设计统一标准[S].
- [5] GB50216-94,铁路工程可靠度设计统一标准[S].
- [6] GB50199-92,水利水电工程结构可靠度设计统一标准[S].
- [7] GB50158-92,港口工程结构可靠度设计统一标准[S].
- [8] GB/T50283-99,公路工程结构可靠度设计统一标准[S].
- [9] GB50068-2001,建筑结构设计统一标准[S].
- [10] 吴世伟.结构可靠度分析[M].北京:人民交通出版社,1988.
- [11] 赵国藩,金伟良,贡金鑫.结构可靠度理论[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.
- [12] ISO2394:1998,结构可靠性总原则[S].
- [13] 徐军,郑颖人,刘东升.锚喷支护喷层结构的目标可靠指标和分项系数研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(5):671~674.
- [14] 董聪.结构系统可靠性理论:进展与回顾[J].工程力学,2001,18(4):79~88.
- [15] 郭书祥,吕震宙,李为吉,等.论基于概率模型的结构可靠性优化设计[J].空军工程大学学报(自然科学版),2001,2(2):67~70.
- [16] 李明顺.《建筑结构设计统一标准》(GB50068-2001)的技术合理性及依据[J].建筑结构,2002,32(1):61~66.
- [17] 侯建国,张京穗,吴春秋.工程结构设计标准的发展动态[J].三峡大学学报,2001,23(3):201~204.
- [18] 欧进萍,侯钢领.建筑结构设计可靠度的影响因素与比较研究[J].建筑科学,1999,15(5):51~55.
- [19] 张帆,胡云昌.结构可靠性指标统计不确定性的评价方法[J].机械强度,2002,24(3):409~412.
- [20] 陈肇元,杜拱辰.结构设计规范的可靠度设计方法质疑[J].建筑结构,2002,32(4):64~69.
- [21] 陈肇元.结构设计规范与市场经济[J].建筑结构,2001,31(5):69~70.
- [22] 郭修武.确定目标可靠指标的一种新方法 & 材料用量分析[J].西安公路交通大学学报,1997,17(1):21~24.
- [23] 戴国欣,刘存中,郭洪.工程结构设计可靠度中的几个问题的探讨[J].重庆建筑大学学报,1996,18(2):122~127.
- [24] 容柏生.对建筑结构可靠度的我见[J].建筑科学,1999,15(5):8~10.
- [25] 陈肇元.混凝土结构的安全性 & 规范的可靠度设计方法[J].建筑技术,2001,32(10):682~687.
- [26] 陈远椿.对我国现行结构设计中可靠度水平的一些看法[J].建筑科学,1999,15(5):28~29.
- [27] 吴学敏.关于结构设计安全度问题[J].建筑科学,1999,15(5):11~15.
- [28] 张宇贻,秦权.基于可靠度的混凝土桥梁构件最优检测/维修规划[J].清华大学学报(自然科学版),2001,41(12):68~71.
- [29] 吕岳鹏.基于可靠度的结构风险损失研究[J].西安公路交通大学学报,2000,20(1):49~51.
- [30] 杨伟军,左恒忠,赵传智.基于动态可靠性的结构优化设计[J].基建优化,1998,19(2):24~26.
- [31] 王光远.工程结构与系统抗震优化设计的实用方法[M].北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [32] 欧进萍,段宇博.高层建筑结构的抗震可靠度分析与优化设计[J].地震工程与工程振动,1995,15(1):1~13.
- [33] 黄慎江.以体系可靠度为目标的结构设计[J].淮南矿业学院学报,1997,17(4):24~28.
- [34] 周健生,蔡荫林.基于强度和刚度可靠度的结构优化设计[J].强度与环境,2002,29(1):27~34.
- [35] 王文涛.工程系统可靠度优化的人工神经网络[J].南京建筑工程学院学报,1998(3):57~64.
- [36] 莫文辉.可靠度分配的模糊方法[J].现代机械,2002,(1):22~23.
- [37] 白广忱,王光远.系统可靠度的模糊优化分配[J].哈尔滨建筑工程学院学报,1994,27(6):1~6.
- [38] 阎春宁,何道杰.系统可靠度的多目标最优分配方法[J].上海大学学报,1997,3(6):591~596.
- [39] 李庆典,唐文勇,张圣坤.考虑动态风险成本的工程系统可靠度最优分配方法[J].系统工程,2002,20(4):86~90.
- [40] 程耿东,李刚.基于功能的结构抗震设计中一些问题的探讨[J].建筑结构学报,2000,21(1):5~11.
- [41] 李纲,程耿东.基于功能的结构体系目标可靠度优化决策[J].计算力学学报,2002,19(2):127~131.
- [42] 吴斌,欧进萍,张纪纲.基于可靠度的结构损伤性能设计[J].世界地震工程,2002,18(3):10~18.
- [43] 徐军,郑颖人.工程结构可靠度指标计算的混沌搜索方法[J].工程力学,2002,19(1):6~9.
- [44] 郭书祥,吕震宙.结构体系的非概率可靠性分析方法[J].计算力学学报,2002,19(3):332~335.
- [45] 郭书祥,吕震宙,冯元生.基于区间分析的结构非概率可靠性模型[J].计算力学学报,2001,18(1):56~60.
- [46] 程远胜,曾广武.结构非概率可靠性优化设计[J].华中科技大学学报,2002,30(3):30~32.
- [47] 郭书祥,吕震宙.基于非概率模型的结构可靠性优化设计[J].计算力学学报,2002,19(2):198~201.
- [48] 吕震宙,冯蕴雯,岳珠峰.改进的区间截断法 & 基于区间分析的非概率可靠性分析方法[J].计算力学学报,2002,19(3):260~264.
- [49] 莫文辉.可靠度分配的模糊方法[J].现代机械,2002(1):21~22.

(收稿日期:2003-10-13 编辑:骆超)