

基于可靠度的桥梁结构优化设计

禹智涛¹, 韩大建²

(1. 广东工业大学 建设学院, 广东 广州 510643; 2. 华南理工大学 土木工程系, 广东 广州 510641)

摘要: 针对传统设计方法的不足, 阐述了基于可靠度的桥梁结构优化设计方法, 介绍了这一方法的基本思想, 讨论了其优化模型, 综述了该研究方向的发展动态, 并指出了该方法的应用前景以及需进一步研究的关键问题.

关键词: 桥梁结构; 结构可靠度; 结构优化设计

中图分类号: TU311. 2; U441; TB114. 1 文献标识码: A 文章编号: 1007-7162(2002)03-0050-06

桥梁结构设计的基本原则是安全、适用和经济. 传统的桥梁结构设计主要是采用定值设计的方法, 既不能描述和处理桥梁结构中客观存在的各种不确定性因素, 也不能定量地分析计算安全、适用及经济的各项指标, 更无法科学地协调它们之间的矛盾, 使它们达到合理的平衡. 事实上, 传统设计方法追求的是一个满足设计规范条件下的最低水平设计, 因而提出新思路、研究新方法是十分必要的^[1~4].

本文介绍和讨论的基于可靠度的桥梁结构优化设计方法, 是一种“投资-效益”准则下的、考虑结构整体性能的方法. 它以结构可靠度为控制参数, 既能处理桥梁结构中的随机不确定性, 又能很好地协调安全与经济之间、近期投资与长远效益之间的矛盾, 从而使设计方案在安全、适用、经济的条件下达到优化.

1 概述

结构优化理论是结构设计理论的重大发展^[5~8]. 因为同一个设计任务可以有多种不同的可行的设计方案, 从所有可行的方案中选用最满意的方案自然是理所当然的要求, 任何情况下“择优而用”是人们无法回避的要求. 目前结构优化设计在机械、电子、航空航天等领域的一些重要工程中已得到成功的应用, 但在桥梁工程中应用得还不普遍, 结构优化所蕴含的巨大潜力还没有得到充分发挥.

传统的结构优化设计方法至少存在以下几个方面的不足和局限性^[8~13]:

(1) 传统的结构优化主要是针对单个构件(或截面)进行的. 实际上, 各个构件独立优化后拼凑而成的结构体系并不一定优化. 原因有二: ① 将一个结构体系各个构件分别处理, 就割裂了体系各个构件之间的横向约束, 优化对象就不再是原来的“体系”, 而是一些独立的构件, 从而改变了原有体系的性质; ④ 结构体系总体的利益有时要求某些部分做出牺牲, 如果各部分单独优化, 就不可能考虑和协调体系整体的要求.

收稿日期: 2001-12-27

作者简介: 禹智涛(1969), 男, 讲师, 硕士, 现为华南理工大学在职博士生, 主要研究方向为桥梁结构可靠度与优化、桥梁结构分析.

(2) 传统的结构优化设计主要是对结构进行最小造价(或最小尺寸,最小重量等)设计,而忽视了长远效益的考虑,因而安全与经济指标均不明确,更无法达到安全与经济之间的协调。

(3) 传统的优化设计中,设计向量、目标函数和约束函数均为确定性的(称为确定性优化设计)。然而,实际的工程结构设计中存在着大量的不确定性因素,如随机性、模糊性和未确知性等,在考虑各种不确定性因素之后,结构优化的目标函数和约束条件将由硬变软,从而得到的不再是唯一的一个“最优解”,而是一组“满意解”系列(称为不确定性优化设计)。

针对传统优化设计方法的不足,需进一步发展和完善结构优化设计的理论及方法。随着结构可靠度理论不断发展,许多国家已经或即将采用近似概率设计方法(水准2),并向全概率设计法阶段(水准3)迈进^[3, 4, 13~16]。我国《公路工程可靠度设计统一标准》(GB/T 50283-1999)等一系列《统一标准》的编制与发布^[17~22],标志着我国各类工程结构设计规范将全面采用近似概率设计方法,并向全概率设计法阶段进展。与此同时,基于可靠度的结构优化设计理论也在不断发展之中^[8, 11~13, 27~35]。基于可靠度的桥梁结构优化设计较传统的结构优化设计更为合理,因为它将桥梁结构作为一个整体考虑,而且能考虑和处理桥梁结构设计中的随机不确定性。在基于可靠度的桥梁结构优化设计中,把桥梁结构的可靠度要求或者结合到优化问题的约束条件内,或者结合到优化问题的目标函数内,即在一定的结构可靠度指标下,通过调整设计向量使桥梁结构的费用或重量最小;或者在一定的结构费用或重量条件下,通过调整设计向量使桥梁结构的可靠度最大。由于对桥梁结构的最主要的要求是既安全可靠又经济合理,而可靠度能很好地协调安全与经济之间的矛盾,故基于可靠度的桥梁结构优化设计成为目前国内外都在积极探索和研究的课题。但由于桥梁结构体系可靠度分析涉及到大量失效模式及失效模式之间的相关性等问题,使得可靠度的计算较为困难和复杂,也给基于可靠度的桥梁结构优化设计带来了困难。此外,对各种类型桥梁结构优化模型的建立及有效优化算法的选择,也是目前探讨的问题。因此,基于可靠度的桥梁结构优化设计的目前水平仍处于初期阶段。

当前,结构优化设计在桥梁工程领域日益受到重视,但其应用的范围和程度还很不理想。其原因除了桥梁工程设计取费标准不利于推动优化技术之外,还可归结为桥梁工程结构优化问题的如下特点^[11, 13, 23]:

(1) 桥梁工程结构设计中的大量不确定性。如外部环境(荷载和结构所处场地类型等)的不确定性、结构本身的不确定性(结构材料性能、截面几何参数和计算模式的精度等不确定因素导致的结构构件抗力的不确定性)、结构整体分析中由于模型简化的误差而导致的不确定性等。为了充分考虑所涉及到的各种不确定性因素(目前主要考虑随机性因素),必须采用结构可靠度理论。

(2) 桥梁工程结构设计准则的多重性。包括承载能力极限状态设计、正常使用极限状态设计以及与其它特殊功能要求相联系的极限状态。

(3) 结构优化目标的多样性。对桥梁工程来说,人们既要求在目标方面考虑结构造价,还要考虑不同功能的失效概率和失效损失造成的失效损失期望、结构运行和维修费用等在内的经济指标,还可以以某些特定结构功能为目标。另外,目标函数的性质也很复杂,既有设计变量的显式函数(结构的重量或造价),又有设计变量的非线性、高度隐式函数(结构的失效损失期望);而且由结构造价和结构损失期望的加权和所构成的统一目标函数不具有对设计变量的单调性。

(4) 结构设计变量的离散性。由于施工条件的要求,桥梁工程结构设计中的设计变量都是离散的。另外,相对于数目庞大的约束条件,实际桥梁工程结构中的设计变量由于受施工条件的限

制,其数量是相对较少的.

(5) 约束条件数目的庞大性与性质的复杂性. 为使结构优化设计应用于实际桥梁工程, 必须保证设计符合现行规范的各项要求. 现行的各种规范对许多类型结构及构件的设计都给出了具体详细的规定, 这些规定涉及到结构设计的各个方面, 其性质相差很大, 从尺寸约束到结构强度刚度约束, 从构件单元约束到结构体系约束, 从正常使用极限状态下的弹性约束到最终极限状态的弹塑性约束, 从基于可靠度的约束到确定性约束, 等等.

因此, 符合规范要求的桥梁工程结构优化设计, 是基于可靠度的多目标离散变量优化问题, 它具有和航空航天机械结构优化问题显著不同的特点. 现有优化模型和方法未能充分注意这些特点, 使得这些方法并不适合桥梁工程优化问题. 为了应用这些优化方法, 就不得不对实际桥梁工程优化模型作很大的简化以适应这些方法的要求, 但是, 利用这种过于简化的优化模型所得的优化结构与实际情况相差很大, 无法应用于实际桥梁工程.

随着科学技术的发展, 对结构设计的要求也越来越高. 基于可靠度的结构优化设计研究正是顺应着这一发展趋势, 因而成为结构工程学科的研究前沿和热点之一, 是一门具有重要理论意义和工程意义的边缘交叉课题. 国家自然科学基金也将大型复杂结构可靠度和优化设计研究列为优先资助发展的领域, 并被认为是二十一世纪土木工程学科的发展趋势之一^[24-26]. “八. 五”国家自然科学基金重大项目“城市与工程减灾基础研究”及 1995 年国家科委批准并启动的攀登计划项目“重大土木及水利工程安全性与耐久性的研究”等科研项目中均进行了有关工程结构可靠度及优化设计的研究, 并取得了大量的成果^[24-26], 不少已被各类规范采用.

2 基于可靠度的桥梁结构优化设计

2.1 结构优化控制参数的选择

工程结构设计的理论和方法的最终目的, 都是为了寻求一个特别令人满意的设计方案. 优化的目标就是使设计方案在具有良好的使用功能的条件下获得最好的近期和长远的经济和社会效益. 目前的桥梁结构优化设计大都是针对单个构件分别进行的. 实际上, 各个构件独立优化后组成的结构并不一定优化. 这是因为各个构件分别独立优化就是切断了这些构件之间的横向联系, 改变了原有结构的性质. 而且结构整体的利益有时要求某些单元做出局部的牺牲. 因此, 必须从结构整体进行优化, 才能真正收到优化的效果, 这就是结构全局优化的概念^[8, 10, 12].

桥梁结构整体优化的主要困难之一就是选择优化的控制参数. 这些控制参数应满足以下条件^[8, 10-12, 27]:

- (1) 具有高度的综合性质, 能充分代表结构对构件的要求.
- (2) 借助这些参数, 能建立各构件间的横向约束.
- (3) 这些参数之间要有明确的关系.

选择结构造价 C 和损失期望 L 作为目标控制参数, 结构的可靠度 P 作为约束控制参数能满足上述三个条件. 如果将可靠度 P 作为目标控制参数时, 造价 C 和损失期望 L 就转化为约束控制参数. 这是一对相互对偶的问题. 一般情况下, 它们具有相同的优化解.

选择可靠度作为控制参数有以下优点:

- (1) 结构的可靠度是结构在规定的时间内, 在规定的条件下, 完成预定功能的概率. 所以, 它具有双重性质: 一方面作为下限, 它是保证结构整体正常工作的数量指标(安全指标); 另一方面作为上限, 它又是限制投资额的控制指标(经济指标). 所以, 安全与经济这一对主要矛盾可以在

最优可靠度上得到最佳的协调.

(2) 采用可靠度作为控制参数,可以很好地反映和处理结构设计的随机不确定性.

(3) 损失期望函数可转化为极为简单而又合理的形式

$$L(P_s) = P_f D = (1 - P_s) D \quad (1)$$

式中, D 为结构失效时带来的损失, P_s 为结构的可靠度, $P_f = (1 - P_s)$ 为结构的失效概率. 当然, 针对不同问题, 上式将会具有不同的较细致的表达形式.

(4) 由于可靠度是从结构整体正常工作的角度提出要求的, 因而它是正常工作的必要和充分条件. 而一般结构优化中的某些局部(如构件强度)条件就不一定是必要条件.

(5) 利用可靠度可以建立各构件之间的横向联系, 有利于结构优化建模.

当采用结构可靠度作为控制参数时, 结构的整体优化就转化为结构可靠度的最优分配问题. 整体优化的结果就是在满足结构整体的造价、损失期望和可靠度的具体要求条件下, 为各个构件选出其最优可靠度.

2.2 结构优化模型

基于可靠度的桥梁结构优化模型可以决策出各个构件的最优可靠度, 各个构件的优化设计就是以最小的造价实现它的最优可靠度. 这就将结构整体优化设计方法转化为一个两层次的结构优化设计问题^[8, 10-12, 27].

(1) 层次一——结构可靠度的最优分配

在无约束条件下, 寻求结构可靠度的最优分配就是求解如下的数学规划:

$$\left. \begin{array}{l} \text{求} \quad [P_{si}] \quad i = 1, 2, \dots, K \\ \min \quad W = C + L \end{array} \right\} \quad (2)$$

式中, W 为目标函数, C 为结构造价, L 为结构的损失期望, K 为构件数目, P_{si} 为第 i 个构件的可靠度.

以上模型中的 C 和 L 目前只能利用经验统计法、半理论半经验法等求得其近似表达式^[8, 13]. 对不同的结构及不同的情况(如考虑构件失效的相关性及构件之间的串并逻辑关系), C 和 L 具有不同的表达形式. 因此, 寻求 C 和 L 的合理表达式是有待于进一步研究的问题.

结构可靠度的最优分配模型中, 采用目标函数 $W = C + L$, 将多目标优化问题转化为单目标优化, 使问题得到了极大的简化.

求解数学规划(2), 便可决策出各个构件的最优可靠度 P_{si}^* ($i = 1, 2, \dots, K$). 它们是从结构整体的近期效益和长远效益出发, 结合投资条件为各个构件规定的控制指标, 既是安全的指标, 又是经济的指标, 因而是各个构件的最佳控制标准.

(2) 层次二——结构中的构件优化

在决策 P_{si}^* ($i = 1, 2, \dots, K$) 时已考虑了结构的近期投资和长远效益, 因此, 在构件设计变量的细部优化时就只需考虑如何以最小的造价 C_i^* ($i = 1, 2, \dots, K$) 使构件具有规定的可靠度即可. 这就是结构整体利益指导下的构件变量优化设计. 它的数学模型就是解如下的数学规划:

$$\left. \begin{array}{l} \text{求} \quad X \\ \min \quad C(X) \\ \text{s. t.} \quad P_s(X) = P_s^* \end{array} \right\} \quad (3)$$

式中, X 为设计变量. 为了一般化, 上式中的符号均未加下标.

解决问题的另一途径就是找出结构造价和可靠度之间的比较精细合理的函数关系, 这时,

$C(P_s^*)$ 就是构件最合理的造价。

3 结语

本文研究讨论了基于可靠度的桥梁结构优化设计的一般思路和方法,针对具体的结构、不同的实际情况,应选择合适的优化模型和求解方法,或改进模型,或提出更为合理的优化模型和求解方法,这些都是需进一步研究的问题。

基于可靠度的桥梁结构优化设计,应重点研究和解决以下问题:

(1) 研究符合桥梁结构特点的、实用可行的优化模型。

(2) 研究桥梁结构各构件的逻辑功能关系。在结构体系可靠度理论中,研究较多较成熟的是“串联系统”,因此,如何将桥梁结构划分为若干具有串联关系的单元(单元可以是单个构件,也可以是构件的组合,这种组合可能出现并联关系或混合关系),也是一个十分有意义的问题,可使问题得到简化。

(3) 研究单元(构件)失效之间、失效模式之间的相关性问题。可靠度计算是结构优化过程中非常关键的环节,为此,合理考虑各单元(构件)失效间的相关性及失效模式间的相关性是非常重要的。否则在某些情况下会导致较大的误差。

(4) 研究对桥梁结构起控制作用的失效模式。以便能抓住主要矛盾,同时又能简化问题。

(5) 研究桥梁结构(构件)造价与可靠度之间的函数关系表达式,以及结构(构件)失效损失值的估计方法。

(6) 研究适用于桥梁结构的可靠度分析和计算方法。包括结构构件和结构体系的可靠度计算,其中难点在于后者。

参考文献:

- [1] 叶见曙. 结构设计原理[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [2] 范立础. 桥梁工程(上,下册)[M]. 北京: 人民交通出版社, 1993.
- [3] 常大民, 江克斌. 桥梁结构可靠性分析与设计[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1995.
- [4] 李扬海, 鲍卫刚, 郭修武, 程翔云. 公路桥梁结构与概率极限状态设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997.
- [5] 钱令希. 工程结构优化设计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [6] 程耿东. 工程结构优化设计基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [7] 王光远, 董明耀. 结构优化设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.
- [8] 王光远. 工程软设计理论[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [9] 王光远. 论抗灾结构优化设计的实用化[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, 32(1): 1-5.
- [10] 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.
- [11] 安伟光. 结构系统可靠性与基于可靠性的优化设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.
- [12] 王光远, 陈树勋. 工程结构系统软设计理论及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [13] 王光远, 程耿东, 邵卓民, 陈厚群. 抗震结构的最优设防烈度与可靠度[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [14] 赵国藩. 工程结构可靠性理论与应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1996.
- [15] 赵国藩, 贡金鑫, 赵尚传. 我国土木工程结构可靠性研究的一些进展[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(3): 253-258.
- [16] 杨伟军, 赵传智. 土木工程结构可靠度理论与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [17] GB/T50283-1999, 公路工程结构可靠度设计统一标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [18] GB50216-1994, 铁路工程结构可靠度设计统一标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1994.

- [19] GB50158-1992, 港口工程结构可靠度设计统一标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1992.
- [20] GB50199-1994, 水利水电工程结构可靠度设计统一标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1994.
- [21] GB50153-1992, 工程结构可靠度设计统一标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1992.
- [22] GBJ68-84, 建筑结构设计统一标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984.
- [23] 孙焕纯, 柴山, 王跃方. 离散变量结构优化设计[M]. 大连理工大学出版社, 1995.
- [24] 刘西拉. 结构工程学科的现状与展望[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997.
- [25] 袁驷, 张跃, 茹继平主编. 二十一世纪土木工程学科的发展趋势[A]. 中国科协第20次青年科学家论坛论文集[C]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [26] 中国土木工程学会. 工程安全及耐久性[A]. 中国土木工程学会第九届年会论文集[C]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [27] 何水清, 王善. 结构可靠性分析与设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.
- [28] 杜进生, 秦权, 刘西拉. 系统可靠度极其在桥梁工程中的应用前景[J]. 公路交通科技, 1999, 16(4): 21-24.
- [29] Y Murotsu, S W Shao, A Watanabe. An Approach to Reliability-based Optimization of Redundant Structures[J]. Struct. Safety, 1994, 16: 133-143.
- [30] F Moses. Problems and Prospects of Reliability-based Optimization[J]. Eng. Struct., 1997, 19(4): 293-301.
- [31] J Kanda, S Haresh. Engineering Role in Failure Cost Evaluation for Building[J]. Struct. Safety, 1997, 19(1): 79-90.
- [32] A H S Ang, D D Leon. Determination of Optimal Target Reliability for Design and Updating of Structures[J]. Struct. Safety, 1997, 19(1): 91-103.
- [33] 程耿东, 蔡悦, 蔡文学. 基于可靠度的结构优化模型和“强柱弱梁”设计[J]. 大连理工大学学报, 1998, 38(6): 625-631.
- [34] 程耿东, 李刚. 基于功能的结构抗震设计的一些问题的探讨[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(1): 5-11.
- [35] 宋笔锋, 李为吉, 吉国民, 唐继武. 大型结构可靠性优化设计[J]. 力学进展, 2000, 30(1): 29-36.
- [36] 霍达, 李广慧, 王东炜. 在役 RC 框架结构截面的灵敏度分析及其应用[J]. 基建优化, 2000, 21(2): 1-3.

Optimal Design of Bridge Structures Based on Reliability.

YU Zhi-¹tao¹, HAN Da-²jian².

(1. Faculty of Construction, GDUT, Guangzhou 510643, China;

2. Dept. of Civil Eng., South China Univ. of Tech., Guangzhou 510641, China).

Abstract: A method of optimal design for bridge structures based on reliability is proposed to deal with the shortcomings of traditional design procedures. Some fundamental principles of this method are introduced. Some optimal models are discussed. Moreover, wide applied prospects of this method and some key problems to be further studied are indicated.

Key words: bridge structure; structural reliability; optimum structural design.