

# 可持续发展工程结构全寿命周期 设计理论体系研究

金伟良<sup>1</sup>, 钟小平<sup>1,2</sup>

(1. 浙江大学结构工程研究所, 杭州 310058; 2. 扬州大学建筑科学与工程学院, 江苏扬州 225009)

[摘要] 以结构全寿命周期为研究时域,运用结构全寿命设计的新理念,构架了工程结构全寿命设计的目标体系,并从目标体系出发,结合工程结构的特点,分析了设计中结构性能、成本、使用寿命的内涵及相互关系。在综合众多影响因素的基础上构建了工程结构全寿命周期设计理论的研究框架,确定了工程结构性能指标、经济指标及时间指标在全寿命设计理论体系中的核心地位,提出了基于性能设计的耐久性极限状态设计新理念,并分析了性能极限状态所具有的特点。

[关键词] 基于可持续发展的设计理论;结构全寿命周期;结构可靠性;结构寿命周期成本;结构使用寿命

[中图分类号] TU318 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)03-0100-08

## 1 前言

工程结构的完整周期应该包括规划、设计、施工、运营、老化及废除各个阶段。可持续结构工程就是要求结构在设计中涵盖上述各个环节,并体现生态环境可持续性、经济发展可持续性和社会文化可持续性。现有的结构设计方法,无论是容许应力法、极限状态法还是可靠性方法,主要针对施工完成后的结构状态,仅仅体现了上述诸多环节中结构设计这一环。可见,现行结构设计理论已不能满足建造可持续发展工程的需要。为了使新建工程结构的全寿命性能(安全、适用、耐久、经济、美观、生态等)达到最优或优化,最终实现可持续结构工程的目标,以美国为首的一些国家,率先在建筑领域提出了工程结构“全寿命经济分析”(life cycle cost analysis, LCCA)的概念,也称做“寿命期成本分析”<sup>[1-5]</sup>。美国 ISO 标准(standard 15686)对“全寿命经济分析”给出的定义是:“它是工程项目费用的评估方法,旨在优选、对比实现寿命目标的不同措施,即包括初建

成本也包括之后的一切运行、维护费用”。LCCA 法既是政府法令,又是工程投资的评估、计算方法。设计、工程承包和投资方都要以“全寿命”为出发点,为保证规定的工程使用年限,采取技术、经济合理的战略措施。工程结构全寿命设计的理念正逐步被世界主要国家的结构工程研究者所接受,有可能促成新一代结构设计理论和方法的变革。由于这种新的设计理念正处于孕育和发展之中,有许多科学问题需要研究解决。

## 2 工程结构全寿命周期设计目标体系

工程结构实施全寿命周期设计,首先必须从“全寿命”的角度出发,建立工程结构全寿命周期设计的目标体系。目标体系的建立应能够反映结构在整个寿命期间的要求,既要考虑当前的利益,又要考虑后期的风险;既要重视结构建设的初始造价,又要考虑到寿命周期内所需的费用;既要考虑节约资源,又要保证工程质量,同时还要兼顾对环境、社会造成的影响以及可持续发展的需要<sup>[6]</sup>。按照上面的要

[收稿日期] 2010-10-08

[基金项目] 国家自然科学基金重大国际合作与交流项目(50920105806);浙江省科技厅计划项目(2008C24003)

[作者简介] 金伟良(1961—),男,浙江杭州市人,浙江大学教授,博士生导师,主要从事工程结构可靠性理论与应用的研究工作;  
E-mail: jinwl@zju.edu.cn

求与思路,综合国内外对全寿命周期工程项目目标体系的研究成果<sup>[7]</sup>,笔者将工程结构全寿命周期设计的目标体系分解为两部分:一是核心目标;二是绿色目标。

1)核心目标。体现了结构设计的最初本意,包括三部分:质量可靠目标、经济优化目标和时间优化目标。三大核心目标各自又有丰富的内涵,见图1。

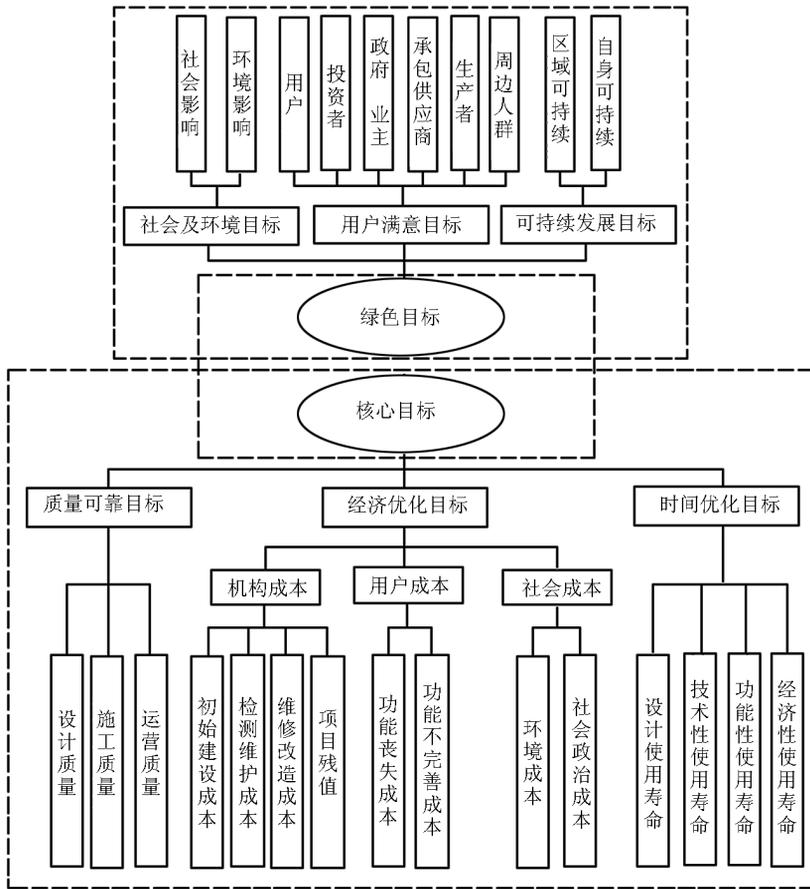


图1 工程结构全寿命周期设计目标体系构成

Fig.1 Target systems constitute of design on engineering structures in whole life-cycle

质量可靠目标、经济优化目标和时间优化目标构成了工程结构全寿命周期设计目标体系的基础,反映了人们对工程设计现实性的思维。质量、经济(费用)和时间优化目标之间的内在联系十分复杂,追求较高的质量可靠目标,可有效地延长结构的使用寿命,提高结构全寿命的收益,但也必然会增加结构全寿命成本的投入;追求费用的最优化,必须确知各项时间指标,且须以工程结构的质量可靠为前提;追求各项时间指标的优化,其实质是在工程结构质量可靠的基础上追求经济的最优化。因此,工程结构全寿命周期设计研究的基本目的就是要科学地认识质量、经济、时间三大核心指标之间的内在联系,找到合理的平衡点,从而有效地处理它们之间的关系。

2)绿色目标。绿色目标是核心目标的发展和

深化,反映了理性、哲学的思维。绿色目标主要有:用户满意目标、社会和环境目标以及可持续发展的目标。

用户满意目标是使与工程项目发生各类关系的不同群体(如用户、投资者、业主等),在各方面利益达到一定的平衡,使各方面满意。

社会及环境目标是指工程项目在建设、运营和废除的过程中对社会及生态环境应有良好、正面、积极的影响,如注重工程项目对公共团体、社会文化、风俗习惯、宗教信仰等的社会性影响;在工程结构的寿命周期内不产生环境污染,符合法律规定的环保指标;保持健康的生态,如防止植被的破坏,水土流失,动植物灭绝等;节约使用自然资源,特别是对不可再生的资源,如土地、水、矿物资源等。工程项目作为人们改造自然的行为,它的过程和最终结果应

与自然融为一体,互相适应,和谐共处。

可持续发展的目标是指工程项目不仅符合可持续发展,同时还能促进地区及城市可持续发展的要求,并且还具有自身可持续发展的能力。工程结构的整个寿命期内,结构的使用功能稳定,具有持续性,当功能需求发生变化时,能方便地进行功能更新或转型。

工程结构全寿命周期设计中,首先必须实现核心目标中的质量、经济、时间三大核心目标才有可能使各方面满意,各方面满意的目标中也有与社会及环境协调和可持续发展相关的内容。社会及环境协调和可持续发展是互相联系的,没有与社会及环境协调,就不可能有可持续发展。

### 3 工程结构全寿命周期设计指标体系

从全寿命周期设计的角度来看,质量可靠目标不仅包括设计的质量,还包括施工质量、寿命期内的运营质量,它的核心是要保证工程结构在全寿命周期内的安全性、适用性、耐久性、舒适性和其他相关的特殊性能,因此,在全寿命周期设计中可通过对结构各项技术性能指标的设计来满足质量可靠目标的要求,当采用结构性能指标来满足质量可靠目标要求时,设计问题的关键就转化为对结构全寿命性能指标的分析、确定,对各项性能指标的把握和控制等。

工程结构全寿命周期的经济优化目标是建立在质量可靠目标基础之上的,工程项目的实施实质上是一种资金的投入,其内在要求是在全寿命周期内以最小的投入获得最大的效益来满足经济优化目标的要求。全寿命设计理论与方法强调结构寿命期内的经济性而不是初始一次性投资,必须将结构检测、维修加固等的费用反映在结构设计经济指标中,同时还需要综合考虑结构全寿命周期性能、使用寿命、对生态环境的影响、可持续发展的能力等。

工程项目的优化目标,不仅包括建设期、投资回收期、维修或更新改造的周期等,从全寿命周期设计的角度来看,更重要的是结构的使用寿命指标。结构的使用功能及性能会随着时间不断发生变化,且资金又具有时间价值,因此,各项措施所属的时间指标取值的不同,将直接影响到结构后续使用功能及性能的变化情况,且全寿命的成本及效益也将不同。使用寿命是工程结构最重要的时间指标,它的大小将在很大程度上直接影响经济优化的结果和结构初建的质量可靠水平以及后续与维护管理程度。

综上所述,由工程结构全寿命周期设计三大核心目标出发,产生了工程结构全寿命周期设计研究的三大核心指标,即时间指标、性能指标和经济指标,见图2。

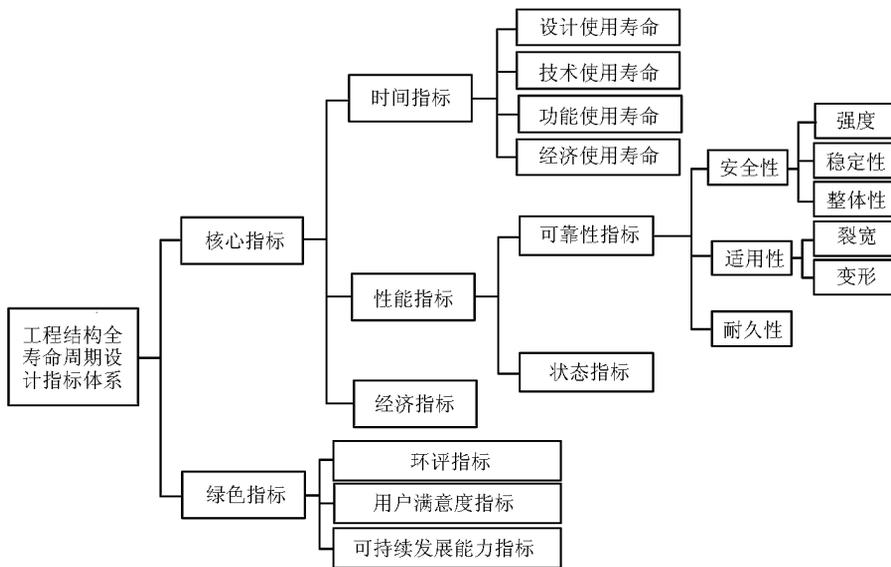


图2 工程结构全寿命周期设计指标体系

Fig. 2 Index systems of design on engineering structures in whole life-cycle

由绿色目标决定的绿色指标如公众对工程项目的满意度指标、项目的环境评价指标、项目的可持续

发展能力指标等,由于影响因素十分复杂,目前尚难以定量的进行研究,只能进行定性的分析。

#### 4 工程结构全寿命周期设计阶段划分

在工程结构的整个生命历程中,不同的阶段结

构三大核心指标研究的内容和重点有所不同,因此,将结构全寿命周期性能、经济及寿命分析研究的过程划分为规划—设计—施工—运营—老化—废除几个阶段。各个阶段具体研究的内容及其关系见图3。

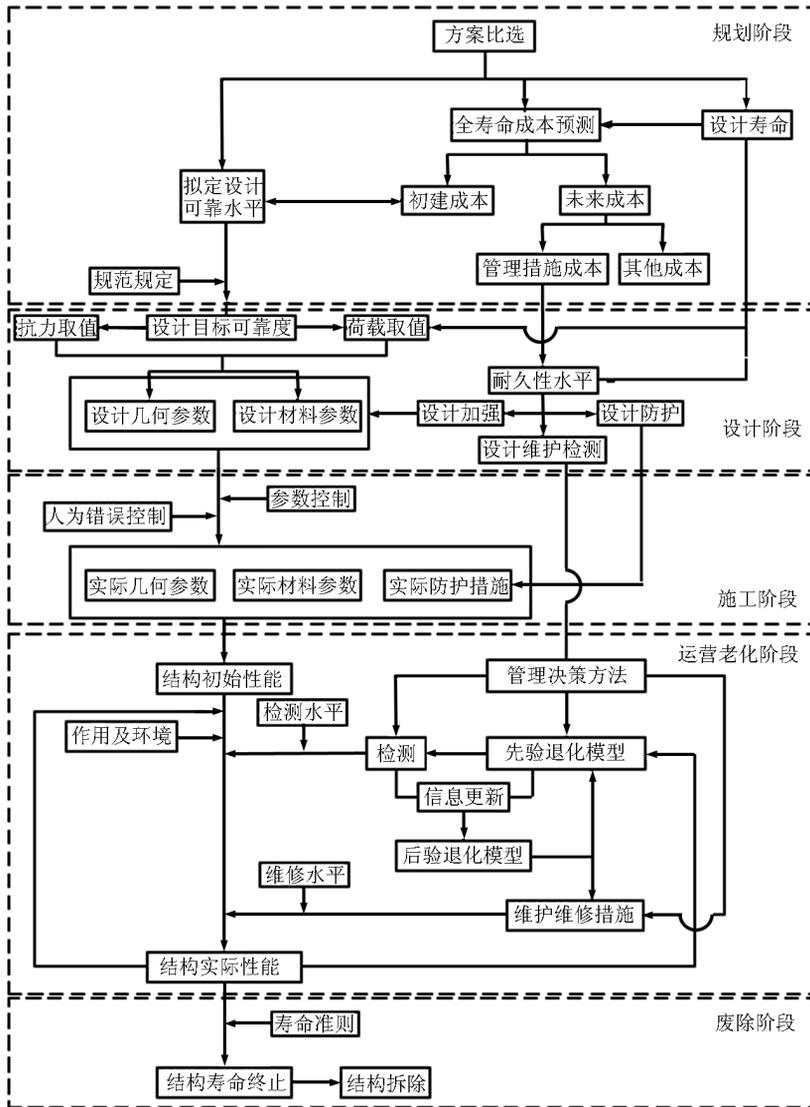


图3 工程结构全寿命周期理论研究基本内容及其关系

Fig. 3 Basic contents and their relationship for life cycle research of engineering structures

1) 规划设计阶段:主要针对工程项目的目标使用要求,依据各类行业的技术规范、行政规定等进行技术、经济、环境、可持续发展等方面的分析和论证。在各方面协调的情况下,从技术层面上合理确定结构的设计使用寿命,设计的目标可靠水平,并据此设计结构的几何及材料参数,标定结构设计的荷载和抗力分项系数以进行基于可靠性的结构设计,优化结构耐久性设计水平,进行必要的耐久性设计加强

和设计防护,确定设计的检测维护决策,在此基础上对结构进行全寿命成本的预测及大致分配。

2) 施工阶段:施工阶段是运用一定的方法、工具和材料将图纸结构变为现实空间实体的过程。施工过程中,需对各类设计参数进行施工控制,并考虑合理的人为错误作用影响,使施工后的结构实体满足设计的要求。

3) 运营及老化阶段:工程结构在作用、环境及

材料内部因素影响下,结构性能逐渐劣化,抗力下降,可靠性降低。根据对结构可靠性能的预测及可允许的管理措施成本,建立工程结构全寿命的管理措施优化决策方法,以指导对实际结构进行检测、维护和必要的维修,并满足结构全寿命周期核心目标的要求。

4) 废除阶段:建立结构使用寿命判定准则,优化决策工程结构寿命的终止时间,同时包含了寿命终止之后的结构拆除等。在拆除过程中,不同结构也将产生不同的废除费用或者效益。

## 5 工程结构全寿命周期核心指标研究

### 5.1 时间指标

使用寿命是工程结构全寿命周期设计中影响最大的时间指标,对结构全寿命周期性能和成本分析都将产生较大的影响,因此其确定应综合考虑技术、功能和经济等方面的因素。使用寿命主要包括设计使用寿命、技术性使用寿命、功能性使用寿命和经济性使用寿命。

结构设计使用寿命是设计人员预定据以进行设计的寿命,是建筑工程的地基基础工程和主体结构工程的“合理使用年限”的具体化。但是,主体结构建成后的实际使用年限必然会随荷载条件、环境条件、结构材料性能和施工质量等多种因素的变异而变化,因而与结构的设计承载能力相似,设计使用年限也必须有足够的保证率,在统计概念上它并不是预期的平均值。理论上,结构设计使用年限的保证率与构件使用年限的保证率并不一定相同,同一结构不同构件的保证率也不尽相同,详尽的分析需要针对各个使用年限终结状态量化并明确基本分析变量,显然,现有的研究积累并不足以支持该层次上的理论研究,因此,实际确定时可作简化处理,结构的主要构件与结构取相同的保证率,可替换构件的保证率可与结构保证率不同。

结构设计使用寿命是针对主体结构而言,并不表示各种部件都能达到这一要求。即使是结构的主要受力构件,有时也不能都达到所要求的结构使用寿命而需要在使用过程中加以更换。结构整体不同构件的使用寿命存在差异,因此,需对具有不同使用寿命的不同结构构件进行有效的寿命匹配优化设计。

工程结构的设计使用寿命在一定程度上反映了结构的重要性,设计使用寿命越高其重要性程度也普遍越高,结构的作用尤其是可变作用的取值越大,

对结构材料性能及设计可靠水平等方面的要求也越高,结构初期投资和全寿命期内的总投资将升高。设计使用寿命的确定需要综合考虑结构类型的重要性程度、经济性、材料本身的性能等因素。在实际设计中,设计者可根据有关规范标准与业主和用户共同确定结构的设计使用寿命,或者通过对现有结构及其构件实际使用寿命的调查分析,得到其使用寿命的分布范围及统计规律,借以进行参考确定。

对技术使用寿命的要求关键是要掌握建筑物的荷载效应和结构抗力变化的规律。目前对结构常遇荷载已有了较全面的把握,但是对灾害荷载(火灾、爆炸、冲击等)的预测方面还十分薄弱。在抗力衰减方面的预测模型一般还限于钢筋锈蚀、混凝土的碳化、硫酸盐侵蚀、冻融等单项影响因素的描述。结构的技术使用寿命涉及结构的安全性、适用性、耐久性等性能指标,要准确预测结构的技术使用寿命,关键是对各项性能指标的极限状态进行标定,即确定失效准则。

结构功能性使用寿命的确定与业主的要求及设计人员的许诺有关,也与社会、经济的快速发展对结构使用功能要求的提高或改变有关。对功能性使用寿命的确定,主观性较大,有可能取决于某个或某些人员的决策,或某些部门的行政命令。

结构的经济使用寿命确定需对结构进行全寿命的宏观经济分析,将工程结构作为投资对象来考虑,以投资的回报效益进行使用寿命的确定。一般工程领域可采用全寿命周期成本(LCC)、效益-成本率(BCR)、内部回报率(IRR)、纯利(NB)、投资回收率(PB)等指标或者方法来进行分析。

结构的使用寿命还是结构全寿命经济分析的时间周期,不仅影响折现率的选取,还直接影响了分析的结果。出于节约资源和可持续发展的需要以及维修、拆除所带来的巨大经济损失,国际上对基础设施工程的结构设计使用年限有进一步延长的趋势。

### 5.2 性能指标

工程结构全寿命周期性能的优劣可以用各种不同的性能指标来反映,如可靠性指标和状态指标。结构的可靠性指标主要有安全性、适用性、耐久性。结构的状态指标主要是指用肉眼或仪器来观测确定的结构承载能力。结构的状态指标可大致地反映构件是处于正常状态还是非正常状态。由于结构性能具有时变性<sup>[8]</sup>,因此工程结构全寿命性能设计应针对各个阶段结构性能的特点,结构功能需求以及设计要求,提出相应的设计控制指标,以满足结构在规

定的寿命期内总体性能最优的目标。

在结构施工建造期,由于结构还未形成整体的受力骨架,施工中的荷载作用与结构使用期的设计荷载作用有显著差别,人为错误以及缺乏有效的规范体系保证等因素,结构往往表现出较高的失效概率;在结构正常使用阶段,由于这些因素被消除或得到控制,结构的失效概率降低;在结构使用若干年以后,结构由于材料性能的退化、使用过程中累积起来的各种损伤等因素,使得结构的失效概率再次升高<sup>[9]</sup>。为确保结构的安全性和可靠性,必须对结构全寿命周期各个阶段的失效概率或者风险进行分析与控制。

在结构的运营及老化阶段,结构性能变化的最根本原因是结构耐久性问题的存在。因此,从全寿命周期的意义上对结构耐久性问题的研究,不能仅仅局限于材料的性能劣化和损耗的结果上,必须考虑结构耐久性损伤对结构安全性、适用性及其他性能的影响,即对结构进行全寿命周期耐久性的设计。在现行的国家标准 GB50068—2001 中,由于没有耐久性极限状态的判别标准,其设计就缺少了目标,无法形成用失效概率表述的极限状态方法。因此,确定结构耐久性的极限状态是结构全寿命周期耐久性设计最为重要的因素之一。从已有对结构性能变化发展的过程以及耐久性对安全性和适用性影响的研究来看<sup>[10-12]</sup>,结构耐久性是结构的综合性能,耐久性就是要反映结构性能(包括安全性、适用性等)的变化程度,从这个意义上来说,考虑一种全寿命周期基于性能设计的耐久性极限状态是可行的,也是合理的。这种耐久性的性能极限状态应具有以下特点:a. 动态性,在结构全寿命周期内,每一个特定的时间点所对应的结构性能都是不同的,使用者对结构的目标期望性能可以根据需要而变化,即可以定义不同的性能极限状态。每一种性能极限状态,体现了业主或使用者对结构某项性能的要求。因此,性能极限状态是动态的性能状态。b. 性能极限状态包涵了安全性、适用性以及其他性能的关键点。由于性能极限状态可以根据使用者的需要来定义,而这些需要可以是安全性的,也可以是适用性的,还可能是其他如混凝土碳化、钢筋锈蚀等方面。如若以混凝土碳化达到钢筋表面作为结构使用寿命终结的标准,那么混凝土碳化到钢筋表面的深度这一事件便是相应的性能极限状态。因此,性能极限状态不仅仅局限于与安全性、适用性有关的性能,还可以是其他方面的性能。c. 性能极限状态可根据用户的特

殊要求来确定,如结构的振动、视觉、采光、噪声、外观等性能的特殊要求。d. 性能极限状态可通过经济与技术的可行性比较确定,如某结构当采取维修、加固、更换等措施已经不经济或技术上难以实现时,即可认为该结构达到了经济或技术性能指标的性能极限状态。

在工程结构全寿命周期性能分析中,除了考虑施工、运营及老化等各个阶段的荷载对结构性能的影响外,还需要考虑各种偶然灾害作用下结构的安全性和可靠性问题。偶然灾害包括火灾、爆炸和冲击等。结构在灾害作用下的安全性问题均有一个共同特点:在结构的整个生命周期内,高强度的灾害作用出现的可能性很小,但是一旦出现将产生很大的荷载效应或灾难性的破坏作用。显然,为保障结构的安全性而把结构设计得足够强,以抵御所有可能的灾害作用的想法不切实际,一个比较实际的办法是把灾害作用引起的风险降低到一个可以接受的水平以内。

### 5.3 经济指标

1) 工程结构全寿命经济分析的时间周期和资金折现率选择。a. 时间周期。目前,一般投资项目的财务评价计算期不超过 20 年<sup>[13]</sup>,我国建筑设计规范规定普通房屋和构筑物的设计使用年限是 50 年,特殊重要建筑物是 100 年及以上。可见,对工程建设项目,尤其是大型的基础设施工程项目,20 年的财务评价计算期显然不能反映工程结构的真实经济状况。因此,工程结构全寿命经济分析的时间周期应取为工程结构的实际使用寿命,当设计阶段对工程结构全寿命周期成本进行预测时,此时间周期可取为工程结构的设计使用寿命。b. 资金的折现率。工程结构项目全寿命经济分析的折现率通常是在实际利率的基础上确定的实际折现率,不考虑通货膨胀的影响。由于工程项目经济分析的时间周期很长,所以折现率的选择对项目的经济分析尤为重要。根据对世界主要国家折现率的研究分析,工程结构全寿命经济分析的折现率可取为 2%~3%。

2) 工程结构全寿命周期成本构成。在工程结构的整个寿命期内,根据成本发生的主体不同,可分为机构成本、社会成本和用户成本三部分<sup>[14]</sup>,详见图 1。

机构成本是项目在全寿命周期内发生在结构本身上的投资总和;用户成本是当结构性能降低到一定程度,或由于某些措施的实行,可能造成工程结构使用功能的不完全而产生的费用。如工程维修时,因项目停产造成的损失等,这些成本除了考虑相关

措施的机构成本之外,尚需考虑间接的额外损失成本;社会成本是指工程项目本身以及由于施工建造、检测维护及维修加固等工作对社会及环境的影响通过折算成货币后的总成本。

在全寿命周期成本组成中,机构成本是最直接的成本,用户成本和社会成本由于影响因素极为复杂,很难进行定量的分析。因此,目前在全寿命周期经济分析中重点关注的仍然是机构成本。工程结构的机构成本应包括初始投资和后续投资两部分:第一部分指初始建设成本,包括建设时的规划、设计、施工等相关费用;第二部分是为了保证工程结构达到设计使用寿命所必须的后续费用,包括整个寿命期内的检测、维护、维修和改造等的费用,大量工程实践表明,这一部分的费用相当可观。应当看到,机构成本中后续费用的产生,其主要原因也是由于结构耐久性问题的存在。因此,工程项目全寿命周期机构成本优化的核心就是充分考虑结构耐久性影响的基础上,平衡初始投入和后续投入之间的关系。在规划设计阶段,决策设计人员可根据已有的知识和资料,对工程对象在整个寿命期内的性能进行预测,并估算全寿命成本,提供工程建造的一次性投资费用和在预期使用寿命内的维修、检测费用、修复或更换部件的费用以及结构失效可能造成的损失。这需要设计人员站在全寿命周期的角度上,合理选择材料、施工工艺,对使用过程中的正常维修与检测等提出要求。有时只需增加不多的初期投入,就可以大为改善结构的耐久性能,延长使用寿命。例如适当提高混凝土材料的强度等级,能够大量节约以后使用期内的维修费用;在运营阶段,除了正常维护外,可能还要进行若干次的修复,每次修复后结构的性能提高,使用寿命得以延长。何时进行结构修复需要进行综合的技术分析和经济分析,不一定要等到结构达到性能最低要求时再采取修复措施。修复时点的选择及修复程度的确定,对结构全寿命周期成本及性能都将产生一定的影响;在废除阶段,工程项目与其他生产设备不同,废除时可能有较少的价值,但一般情况下,可能没有价值甚至反而有负价值,因此,结构废除产生的费用也作为成本来对待。

工程项目在运营中突然中断,如结构突然性的倒塌。这时不仅将产生巨大的直接和间接经济损失,还会产生次生灾害、政治损失(主要指由此产生的社会不良影响)、生命损失等,这些损失折算成货币成本在数值上可能是巨大的,也是困难的,通常在

全寿命经济分析中做简化处理。

3)工程结构全寿命周期各项成本的预测模型。工程结构全寿命周期内具有多种不同的成本形式,其性质、影响因素、相关信息量等都存在着一定的差别,因此,需从各项成本的内在变化规律出发,建立不同的成本预测模型。根据上述成本的构成方式,机构成本中主要包括:初始建设成本、检测维护成本、维修改造成本和项目残值。为了便于实际工程运用并与当前结构设计方法相协调,各项成本模型建立可根据工程项目的实际情况并结合工程概预算来确定。其中成本计算中各项取费标准按国家标准执行。

通过对三大核心指标的分析可以看出,时间指标、性能指标和经济指标与现行结构设计规范中同一表述内容的指标内涵有本质的区别。时间指标是充分考虑结构耐久性的基础上,综合了技术、功能和经济等因素的寿命设计指标。性能指标是涵盖了施工期、使用期和老化期的可靠度性能指标。经济指标是全寿命的成本经济指标,包括了初始建设成本和之后的一切运行、维护费用等。三大核心指标之间的研究内容相互渗透,相互制约,需要综合考虑并进行优化设计。

## 6 结语

1)文章构建了工程结构全寿命周期设计的目标体系,该体系分为核心目标和绿色目标两部分。从全寿命目标体系出发,构建了工程结构全寿命周期设计的指标体系,确定了工程结构时间指标、性能指标、经济指标在全寿命设计指标体系中的核心地位。

2)耐久性是影响工程结构全寿命周期性能、成本和使用寿命等最主要的因素,尤其是对处于恶劣环境条件下的工程结构影响更为严重,因此,进行结构全寿命周期设计时必须考虑耐久性的影响并对其进行耐久性设计。对结构进行耐久性设计的关键是尽快建立耐久性的极限状态判别标准。笔者等在充分认识耐久性对结构性能、成本及使用寿命影响的基础上,提出了一种基于性能设计的耐久性失效准则,并指出了耐久性性能极限状态所具有的特点。

3)工程项目实施全寿命周期设计的新理念,就是合理地确定工程结构的使用寿命,以对象的整个寿命期为研究时间,充分考虑寿命期内工程结构性性能的变化,以工程项目的成本效益分析为手段,对工程项目进行决策、设计、施工、运行、维护及维修乃至

报废等管理措施。全寿命周期设计能有效地提高各项决策的科学性和合理性,在降低工程项目的全寿命成本的同时,使技术上的可靠性与项目投资的经济性达到最优化,使项目的决策方案、设计方案、施工方案、维修、维护及加固方案更加合理,促进环境友好和资源节约,实现工程建设项目的可持续发展。因此,推行工程项目全寿命周期设计,具有重大的现实意义。

4) 实施工程结构全寿命周期设计,不仅涉及到设计理论、设计方法的调整,还涉及到政策、法规的调整,需要尽快建立一套与全寿命理论相适应的政策法规和技术体系。

#### 参考文献

- [1] Sarja A. Integrated Life Cycle Design of Structures [M]. New York: Taylor & Hancis Group, 2002.
- [2] American Institute of Architects. Life Cycle Cost Analysis: A Guide for Architects [M]. USA: American Library Association, 1977.
- [3] Ockwell A. Pavement management: development of a life cycle costing technique [R]. Australian: Bureau of Transport and Communication Occasional Paper 100, Australian Government

Publishing Service, 1999.

- [4] Arditi, Messiha H. Life cycle cost analysis in municipal organization [J]. Journal of Infrastructure System, 1999, 5(1):1-10.
- [5] Asiedu Y. Life cycle cost analysis and probabilistic cost estimating in engineering design [D]. Canada: University of Calgary, 2000.
- [6] 陈肇元,徐有邻. 土建结构工程的安全性及耐久性[J]. 建筑技术, 2002, 33(4): 248-253.
- [7] 陈光,成虎. 建设项目全寿命期目标体系研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(10): 87-91.
- [8] 金伟良,赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [9] 金伟良,宋志刚,赵羽习. 工程结构全寿命可靠性与灾害作用下的安全性[J]. 浙江大学学报:工学版, 2006, 40(11): 1862-1868.
- [10] 金伟良,钟小平. 结构全寿命的耐久性与安全性、适用性的关系[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(6): 1-7.
- [11] 邱小坛,周燕. 混凝土结构耐久性设计方法[J]. 建筑科学, 1997(1): 16-20.
- [12] 张跃松. 建设工程安全耐久性与投资效益评价及优化研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2002.
- [13] Salem M Ossama. Infrastructure construction and rehabilitation: risk-based life cycle cost analysis [D]. Canada: University of Alberta, 1999.
- [14] 邵旭东,彭建新,晏班夫. 桥梁全寿命设计方法框架性研究[J]. 公路, 2006, 51(1): 44-49.

## Sustainable development-oriented design theory of engineering structures in whole life-cycle

Jin Weiliang<sup>1</sup>, Zhong Xiaoping<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Structural Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Construction Scientific and Engineering Institute of Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

[Abstract] In this study, a durability design theory system for engineering structures' whole life-cycle design is established. The new theory system is based on the relationships between performances, cost and service life of structures in the whole life time domain. The performance index, economic index and service life index are considered as key indexes in the whole system. Based on the established system, the limit state for durability design could be determined and the features of durability limit state are also analyzed. The proposed new durability design theory system could be used in structural performance optimization in whole life period and consequently results in the promotion of environment-friendly and resource conservation.

[Key words] sustainable development-oriented design theory; structural whole life; structural reliability; structural life-cycle cost; structural service life