



文章编号:1006-7329(2001)02-0098-06

## 结构耐久性应用研究现状综述<sup>\*</sup>

李宏毅<sup>1</sup>, 陈朝晖<sup>1</sup>, 白绍良<sup>1</sup>, 向长奎<sup>2</sup>

(1. 重庆大学B区 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 攀枝花大学 土木工程系, 攀枝花 617000)

**摘要:**总结了近年来结构工程领域耐久性研究成果在结构耐久性设计、评估、剩余寿命预测、维修加固决策以及与其它相关领域结合的应用现状。

**关键词:**结构耐久性; 耐久性设计; 耐久性评估; 剩余寿命预测

**中图分类号:**TU311.2

**文献标识码:**A

### 1 结构耐久性理论研究

结构耐久性是指结构在设计要求的使用寿命内,不需花费大量资金加固处理而保持其安全、使用功能和外观要求的能力<sup>[1]</sup>。结构的耐久性问题,在土木工程领域已引起越来越广泛的关注。早在本世纪四十年代,国外已着手结构耐久性的研究<sup>[2]</sup>,国内六十年代开始了对混凝土的碳化和钢筋锈蚀等耐久性基础理论的研究。总的来看,结构耐久性研究大致可分为两个层次:1)从材料机理上研究结构的老化、损伤过程及主要因素;2)从结构全局出发,以对材料的耐久性研究为基础,研究耐久性设计、评估、维修决策与优化等一系列应用问题<sup>[3]</sup>。第一个层次的研究是与材料学科的研究相一致的,是第二个层次的研究的前提。而第二个层次,则是耐久性理论在结构工程中的具体运用。

材料的耐久性研究,主要包括钢筋混凝土中的物理过程(如混凝土开裂、冻融循环等)、化学过程(如混凝土碳化、钢筋锈蚀)、生物过程(混凝土表面的生长物所引起的机械性破坏)以及由生长物引起的其他物理过程和化学侵蚀过程<sup>[4,5]</sup>。由于混凝土碳化、钢筋锈蚀和混凝土冻融破坏是导致结构构件破坏、抗力降低的主要因素,它们成为了近期研究的重点<sup>[6,7]</sup>。混凝土碳化深度计算模型<sup>[8,9]</sup>,处于应力状态下的混凝土碳化过程<sup>[10]</sup>,冻融循环作用下混凝土宏观损伤模型<sup>[11]</sup>,均取得一些研究成果。在钢筋锈蚀方面,研究主要集中在锈蚀钢筋的力学性能<sup>[12]</sup>、钢筋锈蚀量的预测<sup>[13,14]</sup>、裂缝对钢筋锈蚀的影响等方面。

材料的耐久性机理研究反映到构件上就是建立结构构件在各种环境因素的耦合作用下,抗力随时间的变化规律。即<sup>[15]</sup>:

$$R(t) = R_0 g(t) \quad (1)$$

其中, $R(t)$ 为 $t$ 时刻构件抗力, $R_0$ 为构件初始抗力随机变量, $g(t)$ 为抗力下降函数,是时间 $t$ 的不确定函数。由影响材料耐久性因素决定,既可是单因素的,也可是多因素的。目前研究较多的是钢筋锈蚀单因素作用下的抗力下降规律,文<sup>[16]</sup>通过大量的实验研究指出,构件正截面抗弯承载力与钢筋截面损失率大致成线性关系,而构件抗剪和抗扭性能与钢筋锈蚀的关系还有待研究。

\* 收稿日期:2000-01-19

基金项目:国家自然科学基金(59908015)

作者简介:李宏毅(1975-),男,重庆人,硕士生,主要从事结构工程研究。

## 2 结构耐久性的应用研究

### 2.1 耐久性设计

耐久性设计是指在考虑影响混凝土结构耐久性的内、外因素下,使新设计的结构可靠度在规定的使用寿命之内不低于规范要求,也即无需花费大量资金维修与加固<sup>[1]</sup>。在设计阶段就考虑耐久性的影响,无疑是保证结构具有足够的耐久性的最有效的方法。Desitter 在 CEB 通报 125 号中提出的“5 倍定律”<sup>[17]</sup>指出了结构耐久性设计对结构寿命极其重要的作用。

1989 年欧洲出版的《CEB 耐久混凝土结构设计指南》<sup>[18]</sup>要求设计和施工人员在设计阶段就考虑耐久性。《指南》进行了暴露环境的分级,制定了为满足耐久性要求所需的材料标准以及耐久性设计、施工和维护方面的措施。虽然这些措施多属结构构造方面,但它们明确了耐久性设计的意义。

1986 年日本的《建筑物设计、施工、维护耐久性指南》中,为不同类型的建筑物和结构制定了目标耐久性年限等级,并对结构如何达到目标耐久年限制定了一系列技术措施。1989 年日本土木学会制订了“混凝土结构耐久设计准则(试行)”<sup>[19]</sup>。该准则要求构件各部位的耐久指数  $T$  大于或等于环境指数  $S$ 。耐久指数  $T$  是根据结构使用的材料、设计详图、施工条件等众多因素进行评价;环境指数  $S$  是根据待建结构所处环境条件及结构不需要维修的年限而决定的指数。其参数取值主要依据经验,缺少严格的定量分析,对疲劳、腐蚀性影响缺少规定。这种方法虽然简单实用,但与目前规范采用的以近似概率为基础的设计方法不协调,取值主观性较大,主要依据经验。

中国现行的结构设计规范《建筑结构设计统一标准(GBJ10-89)》没有涉及耐久性的概念,除了一些保证混凝土耐久性的构造措施外,只是在正常使用极限状态验算中控制了一些与耐久性设计有关的参数,如混凝土结构的裂缝宽度等,但这些参数的控制不能构成耐久性设计。在编的《建筑结构设计统一标准》修订草案中,将现行设计规范的设计使用期改为设计工作寿命,根据结构性质、重要性不同,提出了 5 年、25 年、50 年、100 年 4 个等级的设计工作寿命,要求针对不同的设计工作寿命进行结构设计。对于 100 年这个等级,通过取重要性系数  $\gamma_0=1.1$  来提高初始时刻的可靠指标,保证具有所要求的耐久性。可见,修订草案虽然沿用了现行设计方法,但在设计思想上,已引入了耐久性的思想。

国内研究人员也提出了若干定量的耐久性设计方法。如邸小坛、周燕提出耐久性设计应满足的环境作用效应不小于结构抵抗环境作用的能力<sup>[20]</sup>。其中,环境作用效应根据不同环境类别确定;结构抵抗环境作用的能力则根据结构工作环境情况确定;由不同的功能要求来确定耐久极限状态及相应标准。这种方法与现行规范采用的以近似概率为基础的设计方法不协调。

李田、刘西拉提出了与现行规范的极限状态设计法相一致的耐久性设计方法<sup>[1]</sup>:

$$S \leq \eta R \quad (2)$$

其中, $S$  为内力设计值, $R$  为结构构件抗力设计值, $\eta$  为耐久性系数,为结构可靠指标的函数,可由现行设计规范的可靠指标  $\beta_0$ 、 $t$  时刻要求的结构可靠指标确定值  $\beta$  和结构可靠指标变化规律  $\beta(t)$  等确定。这种设计方法形式简单,耐久性含义明确,且与现行规范采用的极限状态设计方法相一致。但上述方法的成熟还依赖于目标可靠指标  $\beta$  的确定和结构可靠指标变化规律  $\beta(t)$  的分析方法,还须深入研究。

### 2.2 耐久性评估

现役结构的耐久性评估主要包括结构诊断、耐久性评定和剩余寿命预测等内容。

#### 2.2.1 结构诊断

结构诊断是指通过各种检查手段,取得结构的当前状态的全面数据,为耐久性评定与加固维修提供翔实的资料,找到主要损伤和致损的原因,对损伤的机理作出综合判断<sup>[21,22]</sup>。房屋结构的诊断

手段通常有两种:直观检测(如用眼看、手摸)和仪器检测(砖墙承载力原位测定仪、混凝土构件强度回弹仪)。通常先使用直观检测的方法,大致了解结构损伤的部位、损伤的程度,初步确定致伤原因,然后进行逻辑判断,确定主要的检测构件、主要的损伤原因及采用的检测方法,最后借助仪器,获取进一步的信息,证实或推翻前面作出的假设,将获得很好的诊断结果。

目前的诊断检测技术已有很大进展。在混凝土强度评估中,除回弹法、拉拔法、钻芯法之外,还应用了超声波法、超声回弹综合法、射钉法等。目前较为先进的还有脉冲回波技术。在监测裂缝发生发展方面应用了多声道声波仪、光弹贴片法、云纹法、激光散斑法、埋置光纤法。在无损检测中应用冲击反射(回波)法,探测混凝土内部损伤的雷达仪,以及电子显微镜、工业CT等。湖南大学利用神经网络实现对梁、板构件和框架结构的损伤诊断<sup>[23]</sup>。仿真结果表明,网络诊断结果能够满足工程需要,这为结构损伤诊断和评估研究提供了新的思路,展现了神经网络在求解逆问题方面的巨大潜力。随着科学的不断发展,检测技术也将不断提高。在推理方法方面,哈尔滨建筑大学的刘箴,唐岱新等首次提出了房屋结构工程质量诊断逻辑推理方法<sup>[24]</sup>。包括演绎推理、证据反驳推理和概率推理等。综合运用各种技术的大型结构监测系统已在工程中有所运用。清华大学利用GPS(全球卫星定位系统)开发的大型监测系统对香港青马大桥进行了位移实时监测。

### 2.2.2 结构耐久性评定

结构耐久性评定是对现有结构,通过恰当方法得到老化阶段可靠性,最终确定结构今后可靠性降低情况<sup>[21]</sup>。微观机理的研究是鉴定和评估的基础。

随着采用以可靠指标 $\beta$ 度量结构可靠性为特点的《建筑结构设计统一标准》于1984年颁布实施以来,对现役结构鉴定评估的理论与应用取得明显进展,包括:用于民用住宅的《房屋完损等级评定标准》、《危险房屋鉴定标准》(CJ13-86)、《房屋修缮范围和标准》;针对工业建筑的《钢铁工业建(构)筑的可靠性鉴定规程》(UJB219-89)以及《工业厂房可靠性鉴定标准》(GBJ144-90)等。其中,除《钢铁工业建(构)筑物可靠性鉴定标准》(YBJ219-89)明确给出了各种结构的耐久性评定等级标准(按耐久性系数 $K_d=Y_r/Y_m$ 分为4级,式中 $Y_r$ 为根据耐久性破坏速率推算的构件自然寿命剩余年限, $Y_m$ 为根据继续使用要求所设定的目标使用年限)外,其余标准没有考虑耐久性的影响,而实际工程中又不断需要回答结构还能用多久、还能不能用若干年等与结构耐久性有关的问题,因此,制定统一的结构耐久性鉴定标准十分迫切。文<sup>[25]</sup>提出了耐久性评定标准的风险决策方法,而目前在编的《砼结构耐久性评定标准》综合了国内外耐久性研究所取得的成果,结合工程经验,制定了从结构构件到系统的定量与定性相结合的评定标准。

### 2.2.3 耐久性终结标准和剩余寿命预测

从耐久性的角度,未经意外的维护和修理的结构因不能满足耐久性要求而导致自然寿命终止的现象,叫做结构耐久性终结<sup>[26]</sup>。结构耐久性终结及其标准也包括构件和系统两个层次。事实上,目前大多数考虑耐久性影响的构件破坏准则就是构件的耐久性终结标准,如:Shigeou Morinagu<sup>[27]</sup>以氯离子引起钢筋锈蚀导致混凝土开裂为失效准则,预测构件寿命;Browne<sup>[28]</sup>建立混凝土中氯浓度和扩散时间、扩散深度之间的关系的数学模型来预测寿命;清华大学肖从真、刘西拉以截面损失率为5%作为寿命终止标准<sup>[14]</sup>;此外还有以裂缝宽度或钢筋腐蚀深度作为寿命终止标准的。也可把构件可靠度下降到某一指定的值作为寿命终止标准。文献<sup>[29]</sup>尝试采用应力密度函数,根据材料性质和裂缝开展情况,进行统计强度分析,获得脆性材料强度、概率、时间的关系从而预测脆性材料构件的寿命。结构系统层次的耐久性终结及其标准的研究还很少,文献<sup>[26]</sup>从承载力安全性和风险分析的角度,讨论了如何确定结构耐久性终结标准。文中提出耐久性终结标准设置不仅受承载力的影响,还需考虑经济发展水平、人们对风险的承受能力等社会、经济因素,结构耐久性终结标准应使净残余价值(净残余价值=结构寿命终止时的残余价值+期望效益-期望损失)最小。

结构剩余寿命预测应根据结构评估时的可靠性等级、后续服役期的使用状况(包括使用环境、使用功能以及荷载等的变化)以及耐久性终结标准等因素共同完成。

### 2.3 结构的维修、加固及相关决策

结构的维修、加固研究主要有两方面内容:一方面是维修加固技术;另一方面是维修加固决策。后者与优化理论及方法有关。

目前,已有的维修加固技术很多。我国在90年颁布了《混凝土结构加固技术规范》(CECS25:90)。针对一些具体结构、具体损伤的专门加固技术研究也有所发展,如哈尔滨建筑大学提出了房屋基础因地道塌陷的加固处理方法<sup>[30]</sup>,新加坡研究人员探讨了在亚太地区采用高级复合材料维护、加固结构的问题<sup>[31]</sup>。在混凝土的维修、加固、改造过程中,新老混凝土的粘接状态是一个重要因素,《重大土木与水利工程安全性与耐久性的基础研究》对新老混凝土的粘接机理进行了专题研究。

维修加固策略的研究是问题的另一方面。维修与否、什么时候维修、维修的程度均会影响结构在后续服役期的使用功能和总体造价。过度的维修是不必要的,也是不经济的。根据结构的动态可靠性而提出的优化维修决策已成为研究的重点。目前采用的决策目标函数可大致分为两类:一类单纯考虑结构的安全性或可靠性;一类以结构可靠性为基础采用了风险分析。两类模型中所考虑的影响结构的耐久性因素都以钢筋锈蚀为主。结构安全性或可靠性为目标函数的决策模型有:最优维修决策应使相邻两次维修之间失效概率的峰值最小<sup>[32]</sup>,或使结构在使用寿命期内任意时刻的失效概率均不高于允许值。结构失效概率的允许值可以是结构在一段时间内的区间值,也可是年度失效概率<sup>[33]</sup>。以结构可靠性为基础的风险决策方法是目前普遍采用的方法。常用的模型是最优维修策略使结构全寿命的总期望费用(即维修、监测费用与期望损失之和)最小<sup>[34,35,36]</sup>。这种方法较只考虑安全性的方法要全面,它不仅要分析结构的失效概率,还要分析结构的费用,包括维修监测费用和失效损失。这类模型差别主要在决策变量的选取上。以Thoft-Christensen为代表的主要采用连续变化的结构动态失效概率,且主要考虑钢筋锈蚀的影响<sup>[34,35]</sup>,哈尔滨建筑大学的刘玉彬、王光远<sup>[37]</sup>,引入了模糊随机变量,以现役结构的动态模糊随机可靠度为决策变量,并利用结构模糊随机优化的数学方法,建立了现役结构维修方案的模糊随机优化数学模型;文献[38]则基于结构系统在地震作用和钢筋锈蚀的共同影响下的失效概率变化规律,采用了离散的状态变量——结构安全性等级——以及相应的离散的费用函数和决策时间段,从而建立了维修决策的动态规划模型。

基于结构耐久性的全局优化设计的研究也取得了一些进展。文[39,40]等相继提出了若干基于结构耐久性的结构全寿命优化设计方法,上述方法的完善还有赖于结构耐久性理论和应用研究的发展。

### 2.4 其它领域与结构耐久性的相互渗透

结构耐久性理论的应用前景与计算机技术、人工智能、信息化技术、现代数学理论等密切相关。人们已将神经网络技术和模糊数学理论用于建立结构耐久性评估的专家系统、对梁、板构件和框架结构进行损伤诊断等。耐久性理论除了用于建筑结构外,还在城市生命线工程如道路、桥梁、管道的维护管理中得到了应用,日本、美国等国已初步建立了桥梁的耐久性评估系统<sup>[41,42]</sup>。此外,在精密仪器、飞机、船舶等领域,耐久性问题业已成为研究的热点和重点。

## 3 小结

结构耐久性研究的重要性和应用前景的广阔性已毋庸置疑。这一领域的理论和应用研究已取得了很多进展,但离实用还有一段距离,推动其实用化不仅需要结构工程研究人员在基础理论方面的深入研究,还需要其它专业的大力合作以及社会有关部门的重视和支持,尤其是结构耐久性设计、评估、终结等相关标准的制定以及决策管理系统的建立和应用需要有关部门提供结构的经济效益、社会效益、社会经济发展水平及风险承受水平等数据并进行统计分析,此外,还应扩展结构耐久性在城市生命线工程的规划管理方面的应用。

## 参考文献:

- [1] 李田,刘西拉. 砼结构的耐久性设计[J]. 土木工程学报,1994,27(2):47-55
- [2] T. C. Powers, Proc. Highw[J]. Res. Bd, (39), 1949, 184-211
- [3] 李田. 混凝土结构耐久性研究的概况与若干特点[J]. 建筑结构, 1995, (12): 44-47
- [4] C. B. 谢斯托朴洛夫, 郭奇强译. 混凝土的耐久性[M]. 北京: 科学出版社, 1966
- [5] 日本建筑学会建筑设计标准委员会编, 张富春译. 建筑物的损伤和耐久对策[M]. 中国冶金建设管理协会, 1984
- [6] 张誉. 结构耐久性研究的展望, 现代土木工程的新发展[M]. 南京: 东南大学出版社, 1998, 88-96
- [7] 刘西拉, 方东平, 宋晓冰. 沿着结构“生命周期”的探索[A]. 中国土木工程学会第九届年会论文集[C]. 杭州, 2000, 5
- [8] Papadakis, et al. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation[J]. ACI Materials Journal, 1991, 88, 363-373
- [9] 张誉, 蒋利学. 基于碳化机理的混凝土碳化深度实用数学模型[J]. 工业建筑, 1998, (1): 16-19
- [10] 刘亚芹. 混凝土碳化引起的钢筋锈蚀实用计算模式[D]. 同济大学硕士学位论文, 1997
- [11] 蔡昊. 混凝土冰融破坏预测模型[D]. 清华大学博士学位论文, 1998
- [12] 惠云玲. 锈蚀钢筋性能试验研究分析[J]. 工业建筑, 1997, (27): 10-13
- [13] Song Xiaobing, Liu Xila. Experimental research on corrosion of reinforcement in concrete through cathode-anode area ratio[J]. ACI Material Journal
- [14] 肖从真. 混凝土中的钢筋腐蚀的机理研究及数论模拟方法[D]. 清华大学博士学位论文, 1995
- [15] Yasuhiro Mori et al. Reliability-based service-life assessment of aging concrete structures[J]. J. Struct. Engin., 1993, 119(5): 1600-1620
- [16] 李荣. 钢筋混凝土构件钢筋锈蚀后正截面承载力的实验研究[D]. 冶金工业部建筑研究总院硕士学位论文, 1993
- [17] CEB 资料通报第 125 号[R]
- [18] CEB 耐久混凝土结构设计指南, 第二版, 1989
- [19] 冈村甫, ユンケリト构造物の耐久性设计の考文方, ユンケリート工学, 1988, 26(11): 11-14
- [20] 邸小坛, 周燕. 混凝土结构的耐久性设计方法[A]. 第四届全国混凝土结构耐久性学术交流会论文集[C]. 苏州, 1996, 17-22
- [21] 刘西拉, 宋晓冰. 结构工程的耐久性研究, 现代土木工程的新发展[M]. 南京: 东南大学出版社, 1998, 82-87
- [22] 张富春, 林志伸, 庄秉文编著. 建筑物的鉴定加固与改造[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992
- [23] 易伟建, 郭国会. 结构损伤诊断和神经网络的应用, 现代土木工程的新发展[M]. 南京: 东南大学出版社, 1998, 343-347
- [24] 刘箴, 唐岱新. 房屋结构工程质量诊断中的推理方法及其应用[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1996, 29(6): 31-35
- [25] Chen, Z. H. Structural durability appraisal using risk analysis, Proceeding on 6th International Conference on Inspection, Appraisal, Repairs & Maintenance of Buildings & Structures[M]. Melbourne, Australia, 1999, 87-92
- [26] 陈朝晖, 刘西拉. 结构耐久性终结设置标准初探[M]. 成都: 四川建筑科学研究, 1997, 1
- [27] Shigeru Morinagu. Prediction of service lives of reinforced concrete buildings based on rate of corrosion of reinforcing steel[M]. SHIMZU Corporation, 1986
- [28] Brown R D. 在海洋和其他氧化环境中钢筋混凝土使用寿命的设计预测[M]. 上海: 海工钢筋混凝土耐久论文集, 1988, 87-94
- [29] Wolfgang H. Muller. The use of stress-density functions for lifetime predictions of brittle structures[J]. Structural Safety, 1993, (12): 137-143
- [30] 王振东, 王铁, 杜永生. 房屋基础因地道塌陷的加固处理[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1996, 29(1): 104-107
- [31] N. Y. Ho, S. H. Giam, M. W. Sim. Repairs strengthening and maintenance of structures using advanced composite material in Asia Pacific[A]. Proceeding on 6th International Conference on Inspection, Appraisal, Re-

- pairs & Maintenance of Buildings & Structures(C). Melbourne, Australia, 1999, 147-156
- [32] Bogdanoff J. L., et al. Probabilistic models of cumulative damage(M). New York: John Wiley and Sons, 1985
- [33] Han Ping Hong. Inspection and maintenance planning of pipeline under external corrosion considering generation of new defects(J). Structural Safety, 1999, (21): 203-222
- [34] Thoft-Christensen P. Sorensen JD, Optimal strategies for inspection and repair of structural systems(M). Civil Engineering System, 1987, 94-100
- [35] Madsen HO. Sorensen JD, Olesen R. Optimal inspection planning for fatigue damage of offshore structures(M). Proceedings ICOSSAR 89, San Francisco, 1989
- [36] Madsen H. O., et al. Probability-based optimization of fatigue design inspection and maintenance(M). Presented at Symp. on Offshore Structures, University of Glasgow, 1990
- [37] 刘玉彬, 王光远. 以动态模糊随机可靠度为参数的在役结构维修决策(J). 哈尔滨建筑大学学报, 1996, 29(2): 1-7
- [38] 陈朝晖. 结构抗震维修动态规范化决策(D). 清华大学博士学位论文, 1997
- [39] 闰维明, 陈少峰, 孙峰. 静定结构及其维修整体优化设计分析(J). 哈尔滨建筑大学学报, 1996, 29(4): 1-6
- [40] Tao, Z. W., et al. Reliability-based bridge design and life cycle management with Markov decision processes (J). Structural Safety, 1994, (6): 111-132
- [41] Furuta, H. Bridge reliability experiences in Japan(J). Engineering Structures, 1998, 20(11): 972-978
- [42] Yaney B. The management of bridges in New York City(J). 1998, 20(11): 1020-1026

## Summarization of Current Research on Application of Durability of Structures

LI Hong-yi<sup>1</sup>, CHEN Zhao-hui<sup>1</sup>, BAI Shao-liang<sup>1</sup>, XIANG Chang-ku<sup>2</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering, Chongqing University B, Chongqing 400045, China;

2. Faculty of Civil Engineering, Panzihua University, Panzihua 617000, China)

**Abstract:** This paper summarized the recent research results about the durability of structures, introduced their current application in durability design, appraisal, estimation of rest life and strategy of maintenance and strengthening as well as in other fields.

**Keywords:** durability of structures; durability design; durability appraisal; estimation of rest time