

结构生命周期的可靠性管理

王 剑¹, 刘西拉²

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084; 2. 上海交通大学 土木工程系, 上海 200030)

摘要: 结构的抗力性能、使用条件、环境作用等都是随时间变化的过程。结构的运行规律复杂且具有大量的不确定性和不确定知性, 单纯依靠设计来保证结构的安全性是不够的, 而应该综合考虑设计、检测、维护等策略对结构生命周期的可靠性进行管理。首先分析了目前的可靠度设计方法的优点和局限性, 对可靠性管理的概念和必要性进行了阐述。继而引入时变可靠度和时点可靠度指标, 建立一套考虑安全控制和风险优化的结构生命周期可靠性管理框架, 并对其中的若干理论问题进行了讨论。该框架的特点在于, 由静态思路转向动态思路, 强调信息的更新和充分利用, 与现有设计理论和工程实践保持协调。

关键词: 结构工程; 可靠度; 生命周期管理; 信息更新

中图分类号: TU 311.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)17-3125-06

LIFE-CYCLE RELIABILITY MANAGEMENT OF STRUCTURES

WANG Jian¹, LIU Xi-la²

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The performance of structures is a time-variant process with large amount of uncertainties as well as the load and environmental effects on them. The reliability of a specific structure should be managed considering not only a generic design but also the inspection and maintenance strategies during its life-cycle. In the paper, firstly the advantages and limitations of the time-variant reliability theory currently used in structural design are discussed. Then the concept of life-cycle reliability management is introduced. A framework considering risk optimization and safety constraint is proposed for life-cycle reliability management. Several important theoretic issues are discussed, including the definition and usage of time-dependent reliability and dynamic reliability index, the expression of life-cycle cost and the Bayesian decision analysis, etc.. The framework stresses the importance of information updating during the structural life-cycle, and keeps consistent with current design practice.

Key words: structural engineering; reliability; life-cycle management; information updating

1 引 言

结构的破坏不仅事关结构本身, 还伴随着结构内部的物资损失及人员伤亡, 桥梁隧道等生命线工程的损坏造成的危害则程度更深、范围更广, 大型

工程结构的破坏不仅带来巨大的经济损失, 还会造成严重的社会、政治影响。因此, 结构的安全性控制历来都是工程结构领域的重大课题^[1]。

一直以来, 人们致力于用可靠的设计保证结构的安全, 但对于一个具体结构, 其抗力性能、使用条件、环境作用等都是随时间变化的过程。结构的

收稿日期: 2005-02-24; 修回日期: 2005-04-11

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412709)

作者简介: 王 剑(1983-)男, 2001年毕业于清华大学土木工程系结构工程专业, 现为博士研究生, 主要从事工程结构可靠性方面的研究工作。E-mail: wangjian01@mails.tsinghua.edu.cn.

运行规律复杂且具有大量的不确定性和不确知性，单纯依靠设计来保证结构的安全性是不够的。近年来，着眼于结构的耐久性，综合考虑设计、检测、维护等策略的结构生命周期可靠性管理成为研究热点^[2]。目前，结构的可靠性管理还停留在静态的检测评估上，较少考虑着眼于结构生命全过程的决策问题。一些投入使用的结构可靠性管理系统^[3]也主要是积累监测数据，决策还多为主观判断。考虑结构生命周期运行趋势，用可靠度方法进行科学定量的检修决策，是目前结构生命周期管理领域的研究热点，国外研究者也提出了一些理论框架^[4,5]。

结构生命周期的可靠性管理首先着眼于安全水平的控制，即保持结构安全在可接受的范围之内；在此基础上还要基于风险优化的原则对检修策略进行规划和决策。两者均应尽可能与当前的设计理论相兼容。本文结合我国规范采用的可靠度设计方法，提出一套考虑安全控制和风险优化的结构生命周期可靠性管理框架，并对其中的若干理论问题进行了讨论。本文理论框架的特点在于：强调信息的更新和充分利用、将安全控制与风险优化分离及与现有设计理论保持协调。

2 可靠度设计方法的优点和局限性

自1969年A. M. Freudenthal提出将可靠性理论用于结构工程领域后，经过半个世纪的努力，结构可靠性理论已经从理论研究阶段进入实用阶段，目前我国的建筑结构设计就采用了基于概率理论的极限状态设计法^[6]。

采用概率方法度量工程结构的不确定性，使用可靠度作为衡量结构安全性的指标，是工程设计的一个重大进步。可靠度设计方法的主要优点是可以更全面地考虑影响结构可靠性诸因素的客观变异性，使所设计的工程结构更加合理；同时，由于有了具体度量结构可靠性的可靠指标，就可以根据建筑结构的不同特点恰当地划分和选择安全等级，就可具体规定各种建筑结构的可靠度水准，做到使所设计的同类结构、构件在不同工况下具有较佳的可靠度一致性^[7]。

但是，需要明确的是，可靠度理论只是用来处理工程结构不确定性问题的一种手段，在使用的过程中既要发扬其优点，也要注意其局限性。首先，可靠度理论依赖于建立在不充分数据基础上的模

型，同时为了简化计算采用了许多假定，目前所能得到的“失效概率”只是理论上的计算值，而不是真实的失效概率。其次，目前规范所采用的可靠度理论假定结构抗力在正常设计、正常施工和正常维护条件下不随时间变化，并将荷载及其效应的随机过程处理成随机变量。这样得到的可靠度指标没有时间概念，已经失去了衡量“结构在预定使用期内失效的概率”的意义，并不能为评估和预测结构的使用寿命提供依据。再次，目前采用的目标可靠度指标采用校准法得到，它的优点在于继承了以往的工程实践经验，从宏观角度将结构的安全水平控制在公众接受范围之内，这一点在实践中也得到了比较好的实现。但理论上而言，结构还应从风险优化角度考虑安全性和经济性的平衡，这一点还未能得到实现。

总而言之，目前所采用的可靠度指标，作为一个定量评价和比较结构可靠性的工具，它的积极意义是经验和定值方法所不能替代的。但是，它也仅能作为一个相对指标，体现对结构安全设计的实用性要求，使用时不能盲目夸大它的绝对意义而误导工程人员。换言之，可靠度指标的高低，只能说明设计要求的高低，或者用来比较不同构件、结构在计算时刻安全水平的高低，但并不代表着构件、结构在使用过程中实际发生失效的可能性的。如果要结构的使用寿命进行预测和控制，就必须由目前的可靠度设计上升到着眼于具体结构生命周期的可靠性管理的层次。可靠性管理的概念为：结合具体结构的生命全过程，尽可能地挖掘和利用信息，考虑各种因素(抗力退化、功能改变等)对结构安全的影响，采用可靠度为定量分析手段，对设计、检测、维护等策略做出决策，保证结构的安全性和经济性。

3 结构生命周期的安全控制

结构生命周期管理的首要任务是控制结构的安全水平。目前结构设计采用的安全控制准则是可靠度指标不小于目标可靠度指标，即

$$\beta \geq \beta_0 \quad \beta = \Phi^{-1}[P(R > S)] \quad (1)$$

可靠度指标 β 的计算过程中，抗力 R 和固定作用效应为随机变量，可变作用效应随机过程也通过极值方法(设计基准期50a)处理成了随机变量。目

标可靠度指标 β_0 的校准也采取了同样的作用取值办法, 两者保持了一致。

需要强调的是, 设计基准期并不是使用寿命, 而仅仅是计算参数。现行规范假定结构抗力在正常设计、正常施工和正常维护条件下不随时间变化, 意味着可靠度指标 β 能够一直保持不变, 结构能一直保持设计时的安全水平使用下去。这样的 β 没有时间概念, 纯粹是一个静态指标。

考虑结构的抗力退化和使用功能改变问题, 可将结构抗力和荷载效应均视为随机过程, 定义时变可靠度。时变可靠度的严格定义为结构(构件)在一段时间 t_L 内完成预定功能的概率^[8], 可表示为

$$P_s(t_L) = P(R(t) > S(t)), t \in (0, t_L) \quad (2)$$

式中: $R(t)$ 和 $S(t)$ 分别为结构抗力和荷载效应的随机过程。实际上, 目前所用的可靠度指标 β 概念上也源于式(2), 只是经过层层假设和处理, 而失去了时间概念。

从理论上而言, 式(2)概念明确, 结构生命周期的安全控制的准则可表示为

$$P_s(t_L) = P_0(t_L) \quad (3)$$

式(3)的含义为: 如果时变可靠度不小于一定水平, 那么结构在使用期 t_L 内就是安全可靠的, 使用寿命也大于 t_L 。但这一准则的首要问题在于目标可靠度水准 $P_0(t_L)$ 的设置问题。目标可靠度水准的设置与社会可接受的风险水平有关, 理论上应该根据各种结构的重要性、失效后果、破坏性质、经济指标根据风险优化方法确定^[9], 但在实际中很难做到。而目前可靠度设计中采用的目标可靠度指标 β_0 , 是由工程经验校准而来, 可以说是最具有说服力的安全控制准则。对结构生命周期进行安全控制, 也必须考虑与这一准则相协调。式(3)定义的时变可靠度, 虽然概念明确, 但由于理论体系不一样, 很难与现行的目标可靠度指标相统一。

因此, 本文主张, 在结构生命周期的安全控制中, 沿用现行的可靠度指标体系, 将 β 沿时间轴拓展成时点可靠度指标 $\beta(t)$, 即

$$\beta(t) = \Phi^{-1}[P(R(t) > S)] \quad (4)$$

时点可靠度指标 $\beta(t)$ 没有明确的“结构(构件)在一段时间 t_L 内完成预定功能的概率”的物理意义。但是, 可把其看成是现行规范所采用的可靠度指标 β 随时间轴的延伸, 看作是衡量结构安全度水平随

时间变化的一个指标, 它与目标可靠度指标 β_0 相兼容, 可用来对结构的可靠性进行评估和判断。由此, 结构生命周期的安全控制准则可表示为

$$\beta(t) = \beta_0 \quad (5)$$

在应用式(5)时, 应注意到它仅是一种对设计准则进行扩展的判断标准, 而不要拘泥于传统思路。例如, 在计算 $\beta(t)$ 时, t 时刻结构的后续目标使用期有可能小于 50 a。理论上而言, 此时设计基准期不宜再取 50 a, 应该按照目标使用期重新确定可变作用的最大值分布来计算 $\beta(t)$; 同时, 目标使用期不同, 目标可靠度指标 β_0 也会不同。从风险角度看, 社会公众对风险的承受能力是宏观的, 是以年度或者某个固定时间长度为单位, 宏观地对所有建筑结构物(而不论其目标使用期多少)安全水平的一个要求。从目标可靠度指标的确定方法——校准法而言, 目标可靠度指标直接取决于校准时采用的作用取值, β_0 与 $\lg T$ (T 为设计基准期)基本上呈线性关系^[4]。如果拘泥于上述理论分析, 根据后续目标使用期来选择不同的可变作用取值和目标可靠度指标, 式(5)的应用就会出现混乱。实际上, 目标可靠度指标与可变作用取值一一对应, 如果结构安全水准能够符合按设计基准期 50 a 制定的要求, 那它也就符合任意设计基准期取值下的安全要求。式(5)的意义就在于保持结构的安全控制准则与设计要求的一致, 而并不在于 $\beta(t)$ 的数值, 这一点需加以明确。

4 结构生命周期的风险优化

结构生命周期管理的另一重要任务就是对检测、维修进行规划和决策。决策的依据应该是全生命周期的风险或费用的最优化。结构生命过程中的总费用可表示为

$$C_T = C_{INS} + C_{REP} + C_F \quad (6)$$

式中: C_{INS} , C_{REP} , C_F 分别为检查费用、维修费用, 失效损失期望值。失效损失期望值等于失效损失乘以失效概率, 其计算要求失效概率具有明确的物理含义和时间概念。如前所述, 时点可靠度指标只是一个评估结构安全水平的相对指标, 并没有明确的“结构(构件)在一段时间 t_L 内完成预定功能的概率”的物理意义, 因此也就不能用来计算费用或风险, 这一点尤其需要加以注意。

然而，式(2)所定义的时变可靠度，概念严格明确，可以用于失效损失期望值的计算。求解式(2)的办法通常是将随机过程离散化，即

$$P_s(t_L) = P(R(t_1) > S_1 \cap R(t_2) > S_2 \cap \dots \cap R(t_n) > S_n) \quad (7)$$

式中： $R(t_i) > S_i$ 为第 i 个最不利用作用发生时的极限状态表达式。

考虑到将可变作用处理成平稳二项随机过程的常用做法，可以以年为单位将使用期分为 n 个时段，每个时段假设发生一次最不利用作用(分布取年最大值分布)，相应抗力取该年最小值分布，式(7)即可表达为

$$P_s[0, t_L] = P[R_1 > S_d + S_{Lm1} \dots \cap R_{t_L} > S_d + S_{LmtL}] = \int_0^\infty \dots \int_0^\infty \prod_{i=1}^n F_{S_d}(r_i - S_{Lmi}) f_{R_1, \dots, R_n}(r_1 \dots r_n) \cdot f_{S_{Lm}}(S_{Lmi}) dr_1 \dots dr_n dS_{Lmi} \quad (8)$$

式中： S_d ， S_{Lmi} 分别为固定作用效应和可变作用效应年最大值随机变量。 R_1, R_2, \dots, R_n 为不同年度抗力，可以建立抗力退化模型描述其联合分布。

式(8)是一个多维积分问题，可以使用模拟方法求解。

如果已知结构在时间段 $[0, t_i]$ 内完成预定功能，后续使用期 $[t_i, t_L]$ 内的时变可靠度应根据条件概率原则计算：

$$P_s[t_i, t_L] = P_s[R_{t_{i+1}} > S_{t_{i+1}} \dots \cap R_{t_L} > S_{t_L} | R_1 > S_1 \dots R_{t_i} > S_{t_i}] = \frac{P_s[0, t_L]}{P_s[0, t_i]} \quad (9)$$

如果用 $P_s[t]$ 统一表示 $P_s[0, t]$ 或 $P_s[t_i, t]$ ，结构在使用期 $[t_p, t_L]$ 内的失效损失期望值为

$$C_F = \sum_{i=t_p}^{t_L} C_F (P_f[i] - P_f[i-1]) / (1+r)^i \quad (10)$$

式中： C_F 为失效损失； t_p 为决策年份； t_L 为目标使用期； $P_f[i]$ 为 $[t_p, i]$ 时段的时变失效概率，与该时段的时变可靠度相对应； r 为折现率。

在进行决策分析时，有研究者采用事件树的方法，试图囊括结构生命过程中所有事件的可能性，再基于总费用最小得到一个“全局最优”的检修方案^[10]。本文认为，这没有必要也难以实现。结构生命周期的管理不同于设计，它应该是一个随具体结构使用期循序渐进不断对检修策略进行调整更新的

过程，也是一个管理者进行判断和决策的过程。与其花大力气从理论上去寻找所谓的“最优解”，还不如将决策问题简单化。决策的目的就是在“行动”空间中选择某些行动，以使得被选择的行动带来的预期效益最大(或者损失最小)。结构生命周期管理的决策问题可以表示为

$$a_{opt} = a_j | \{ \min_{j=1,2,\dots,n} C_T \} \quad (11)$$

式中： $a_j (j=1, 2, \dots, n)$ 为可能采取的行动(是否维修，如何维修)， a_{opt} 为根据总费用最小原则选择的最优行动。

5 信息的更新和利用

综上所述，结构生命周期可靠性管理的理论框架可以表示为一个带约束的优化问题，即

$$a_{opt} = a_j | \{ \min_{j=1,2,\dots,n} C_T \} \text{ subject to: } \beta(t) \leq \beta_0 \quad (12)$$

这一框架对具体结构的安全性和经济性建立“双重控制”，即一方面利用现行的目标可靠度指标将结构的安全性控制在公众可接受范围之内；另一方面以检测维修策略的优化控制具体结构在生命周期内的风险水平。这既与现行的设计评估方法相协调，满足宏观控制的要求，又符合对具体结构特别是重大结构生命周期风险水平进行控制和优化的需要。

实现这一理论框架的关键问题在于，如何建立合理的抗力和荷载效应模型，进行合理的可靠度分析。尤其是抗力的退化预测问题，近年来研究者通过理论分析、试验研究等手段，对结构的抗力蜕化的内在规律获得了许多基础性的认识。然而，工程结构具有很强的个性和综合性，试图采用由试验和统计资料回归的模型概括具体结构生命周期的发展规律存在极大困难。目前建立的一些耐久性模型的特点就是五花八门、离散性大、适用性差。对于一个具体结构，其未来的发展趋势总是未知且不可重复观测的，对其的认识也总是不完善的，不能奢望用一个完美的模型从一开始就可以解决一切问题。

本文主张，结构生命周期管理应该从结构设计的静态思路转向动态思路，着眼于具体结构的个性特点，在一般统计规律基础上，通过在结构生命周期中不断得到的新信息，更新已有信息，从而更新可靠度分析和决策。信息更新的思路近年来得到了

广泛的重视^[11], 本文作者也对信息的发掘和利用方法进行了研究, 提出了一种基于 Bayes 动态预测理论的抗力退化模型。此模型能有效地实现先验模型和观测数据的综合, 既能利用多年来耐久性基础研究对结构内在规律的理性认识, 也能考虑结构的实际情况^[12]。

信息的更新也意味着决策的更新, 式(12)所代表的决策问题的关键也在于信息的完善程度。按照 Bayes 决策理论, 在每一个决策点上都有两种选择: 依据现有的信息作出终端决策(称为先验分析); 或者进一步获取决策需要的信息然后再进行决策(后验分析)。如何选择取决于进一步获得信息的成本(CI)和效益(EVI)(对信息获取效益的评估称为预后验分析)。在结构生命周期的任一时刻, 可以进行预后验分析, 通过评估获取信息的效益, 对检测进行规划, 包括是否检测、何时检测和采取什么样的检测技术; 然后根据有/无检测信息, 采用后验分析或者先验分析对维修策略做出决策。整个分析流程见图 1。

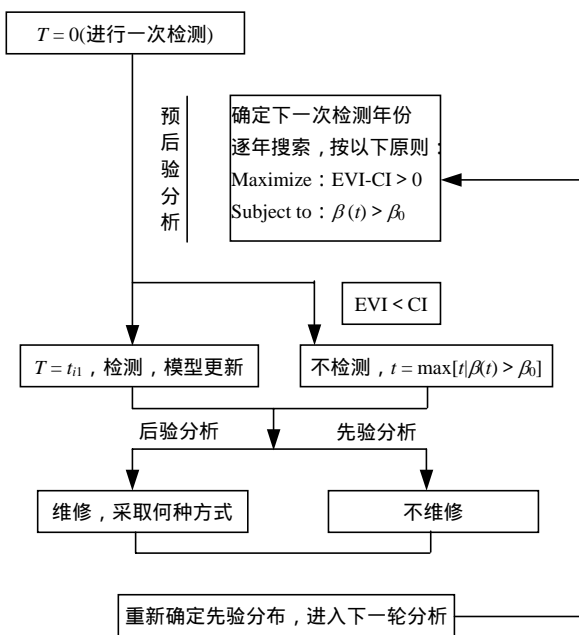


图 1 可靠性管理决策分析流程图

Fig.1 Flow chart of decision analysis in reliability management

这样一个决策过程, 与一般的依赖固定模型追求“最优”方案的思路不同, 它着眼于如何尽可能地利用信息, 求出一个“满意解”, 一步一步根据结构的实际情况调整规划和决策, 是一个“自适应”的优化过程。

6 算 例

本节用一个数值算例来说明前面提出的理论框架, 对一个钢筋混凝土梁(见图 2)进行分析, 考虑跨中截面的受弯承载力极限状态和一般大气环境下钢筋锈蚀引起的承载力退化。基于文[13]的钢筋锈蚀模型建立先验预测模型, 并考虑了第 27 a 检测数据对模型的更新。荷载取值、可靠度分析均按标准方法, 具体计算过程略。

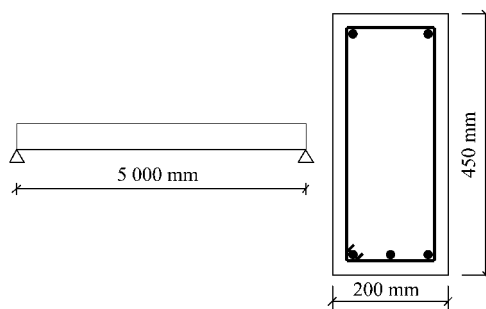


图 2 算例: 钢筋混凝土梁截面

Fig.2 Section of RC beam example

图 3, 4 分别为时点可靠度指标和时变失效概率的分析结果。首先, 检测数据的更新对分析结果有较大的影响, 说明信息的更新和充分利用是可靠性管理的基础; 图 3 中的目标可靠度指标 $\beta_0 = 3.2$, 与目前设计安全度水平一致, 代表了对结构安全控制的要求和对检修决策的约束条件; 图 4 中的时变失效概率结果, 代入式(10)可计算后续使用期的期望失效费用, 为维修决策提供依据; 将检测费用与信息更新前后的期望费用之差相比, 可以评估检测费用是否值得, 为检测决策提供依据。

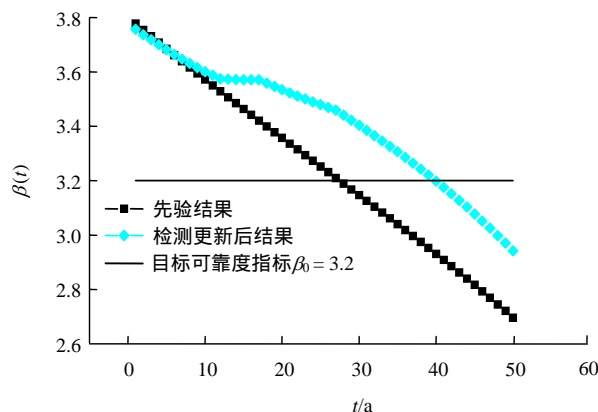


图 3 时点可靠度指标(先验与更新后结果)

Fig.3 Dynamic reliability index(prior and posterior)

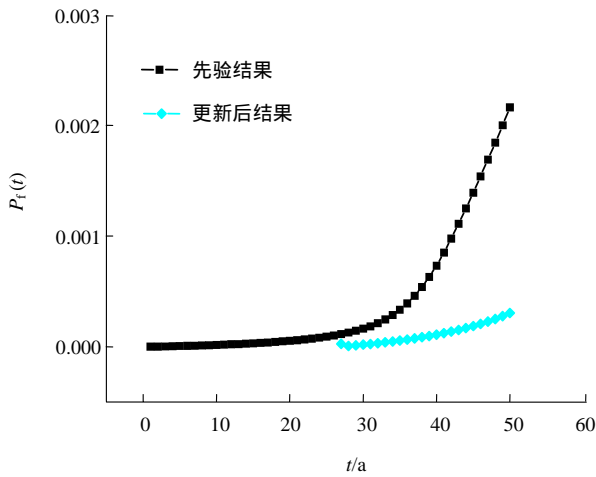


图 4 时变失效概率(先验与更新后结果)

Fig.4 Time-dependent failure probability(prior and posterior)

7 结 论

可靠度理论作为定量处理不确定性问题的工具,其优点不可否认,但在使用时需要明确其含义,不贬低、不夸大。

结构生命周期管理包括安全控制和风险优化,前者与设计要求保持一致,使用时点可靠度指标对结构的安全水平进行控制;后者则要求可靠度分析必须有时间概念。

结构生命周期管理应摆脱传统设计中“一劳永逸”的静态思路,紧扣具体结构的实际情况,着眼于信息的不断更新和利用。

参考文献(References) :

[1] 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.(Liu Xila. The Status and Prospects of Structural Engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 1997.(in Chinese))

[2] Dan M F, Liu M. Maintenance and management of civil infrastructure based on condition safety optimization and life-cycle cost[A]. In: Cheung M S, Chang C C ed. Proc. of The International Workshop on Integrated Life-cycle Management of Infrastructures[C]. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2004. 26-34.

[3] Thompson P D, Small E P. The points bridge management system[J]. Structural Engineering International, 1998, (1): 303-308.

[4] Jung S K. Lifetime maintenance strategies for deteriorating structures[Ph. D. Thesis][D]. Colorado: University of Colorado, 2001.

[5] Mori Y, Ellingwood B R. Maintaining reliability of concrete structures II: optimum inspection/repair[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1994, 120(3): 846-863.

[6] 中华人民共和国国家标准编写组. 建筑结构可靠度设计统一标准(GB50068-2001)[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Unified Standard for Reliability Design of Building Structures(GB50068-2001)[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001.(in Chinese))

[7] 李继华,林忠民,李明顺,等. 建筑结构概率极限状态设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1990.(Li Jihua, Lin Zhongmin, Li Mingshun, et al. Probabilistic Limit State Design of Building Structures[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1990.(in Chinese)).

[8] Mori Y, Ellingwood B R. Reliability-based service-life assessment of aging concrete structures[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1993, 119(5): 1600-1621.

[9] 秦剑君,刘西拉,左勇志,等. 结构最优可靠度的选择模型与经济收益及维修策略的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 97-104.(Qin Jianjun, Liu Xila, Zuo Yongzhi, et al. Model of choice for structural optimal reliability and the influence of overall income and maintenance strategy[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 97-104.(in Chinese))

[10] Enright M P, Frangopol D M. Maintenance planning for deteriorating concrete bridges[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1999, 125(12): 1407-1413.

[11] Joint Committee of Structural Safety. Probability Assessment of Existing Structures, a Publication of the Joint Committee on Structural Safety (JCSS)[M]. France: RILEM Publications S.A.R.L., 2001.

[12] Wang J, Liu X L. Application of Bayesian dynamic model in structural performance prediction and life-cycle management[A]. In: Cheung M S, Chang C C ed. Proc. the International Workshop on Integrated Life-cycle Management of Infrastructures[C]. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2004. 36-40.

[13] 宋晓冰. 钢筋混凝土结构中的钢筋锈蚀[博士学位论文][D]. 北京:清华大学, 1999.(Song Xiaobing. Corrosion of reinforcement in reinforced concrete structures[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Tsinghua University, 1999.(in Chinese))