

文章编号: 1002-0268(2006)04-0033-04

钢筋锈蚀引起桥梁结构性能退化的可靠性分析

程寿山, 张劲泉, 李万恒
(交通部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 在介绍了引起钢筋锈蚀的因素及过程后, 分析了钢筋锈蚀造成结构性能退化的机理, 并分析钢筋的锈蚀对桥梁结构的影响。通过对钢筋锈蚀引起结构抗力衰减过程分析, 建立了结构抗力的等效模型, 分析结构评价时刻的可靠度, 并与初始状态进行比较, 建立了基于桥梁检测结果的可靠性分析方法。以实现桥梁当前和将来状态的可靠性评估及预测。

关键词: 桥梁; 耐久性; 钢筋锈蚀; 可靠度

中图分类号: U443; U445.7*3 文献标识码: A

Reliability Analysis of Deterioration of Construction Performance Caused by corrosion of Steel Bar

CHENG Shou-shan, ZHANG Jin-quan, LI Wan-heng
(Research Institute of Highway, the Ministry of Communications, Beijing 100088, China)

Abstract: After analyzing the process and the factor causing the corrosion of steel bar on bridge structure, and the mechanism that the reinforcing bar's rust results in deterioration of construction function. Through analyzing the process of the construction resistance's reducing, the replacement model of the construction resistance is established. By evaluating reliability of the bridge currently, and comparing with the initiatory moment, the method to analysis the reliability of the bridge based on inspection is built, which can evaluate and forecast the current or future reliability.

Key words: bridge; reliability; corrosion; durability

0 引言

钢筋锈蚀是影响钢筋混凝土构件耐久性和使用寿命的重要因素。处于干燥环境下, 具有良好保护层的钢筋混凝土构件一般不会发生钢筋锈蚀; 而对于处于潮湿的或有侵蚀性介质的环境中的混凝土构件极易发生钢筋锈蚀, 如跨海大桥等; 还有一些钢筋混凝土构件由于损伤, 如裂缝, 或混凝土质量不好, 比如混凝土抗渗性不好, 都会导致或加剧钢筋的锈蚀。钢筋锈蚀对结构的影响往往是很严重的, 在桥梁建设飞速发展的今天, 应重视钢筋锈蚀对桥梁结构的危害, 防患于未然。

钢筋锈蚀是引起结构抗力劣化的一个重要因素。而且钢筋锈蚀的影响因素很多, 如何检测钢筋锈蚀及评价其对结构承载能力的影响成为众多学者关心的问题。目前, 直接对钢筋锈蚀程度的检测的方法就是用游标卡尺量取锈蚀后钢筋的直径, 计算出钢筋的锈蚀率, 它只是对钢筋锈蚀的局部检测以及对钢筋锈蚀的活性状况无法判断。要对桥梁钢筋锈蚀状况及活性作出整体的评价, 还是应该通过对其影响因素的检测来进行评定, 主要是对氯离子含量、锈蚀电位、混凝土电阻率、混凝土碳化深度的检测来判断钢筋锈蚀活化程度以及定性地判断钢筋的锈蚀程度。

收稿日期: 2006-01-13

作者简介: 程寿山 (1977-), 男, 安徽黄山人, 助理研究员, 主要从事桥梁检测评定与加固方面的研究. (ss.cheng@rioh.cn)

1 钢筋的锈蚀机理

钢筋的锈蚀一般可以分为电化学锈蚀、化学锈蚀、应力锈蚀3种形式,钢筋混凝土结构中的钢筋锈蚀主要是电化学锈蚀。几乎所有的钢筋锈蚀都与电化学腐蚀有关,或者都伴有电化学腐蚀过程。通常认为电化学腐蚀是混凝土中钢筋腐蚀的根本原因。电化学腐蚀必须具备3个基本的条件:

(1) 由于在混凝土中的钢筋开始处于钝化状态,因此钢筋发生腐蚀的首要条件是钢筋必须处于脱钝状态。

(2) 钢筋表面形成电位差,即在钢筋表面不同电位区段形成阴极与阳极。

(3) 阳极部位的钢筋表面处于活化状态,可以自由释放电子,在阴极部位附近钢筋表面存在足够的水和氧。在钢筋表面总是存在水膜和溶于水膜中的氧气。

由于钢筋材质和表面的非均匀性,钢筋表面总有可能形成电位差,因此,在潮湿环境下钢筋就可以发生电化学反应。

钢筋由于电化学腐蚀等原因,特别是氯离子引起的腐蚀,使表面形成大小不一,分散分布的腐蚀坑。腐蚀坑相当于一个缺口,在钢筋的受拉过程中,将引起钢筋应力的不均匀分布,造成应力集中,在平均应力尚低时缺口边缘应力就可能达到断裂应力水平,造成早期断裂,这种现象被称为应力腐蚀。应力腐蚀对高强预应力钢筋混凝土构件的危害很大。

2 钢筋锈蚀引起结构性能退化的机理

钢筋锈蚀对结构的危害是很大的,通常钢筋锈蚀都伴有体积膨胀,使混凝土沿钢筋出现爆裂,造成钢筋与混凝土之间的粘结力破坏以及钢筋截面减少,结构构件承载力降低,变形和裂缝增大等一系列不良后果,并随时间的推移,锈蚀会逐渐恶化,最终可导致钢筋混凝土构件的破坏。

有关试验研究表明,混凝土梁内的钢筋锈蚀,主要使梁的以下力学性能发生变化:

- (1) 梁的强度降低;
- (2) 梁的延性性能退化;
- (3) 钢筋与混凝土之间的粘结性能破坏;

(4) 梁的加载全过程及破坏形态发生变化;随着锈蚀量的增加,梁的垂直裂缝间距变大,接近支座处斜裂缝逐渐与受拉主筋方向的纵向裂缝联接,其破坏形态由适筋延性破坏转为钢筋粘结撕裂的脆

性破坏。

3 钢筋的初始锈蚀时间

钢筋的锈蚀是一个复杂的化学过程,在混凝土中的钢筋的锈蚀是在有水分子参与的情况下发生的腐蚀,属湿腐蚀,是一种电化学腐蚀。但是混凝土的高碱性一开始对钢筋起着一种钝化作用,使钢筋处于阴极保护之中,阻止钢筋与氧分子间进行电子转移。因此,钢筋锈蚀作用并不是一开始就进行,而是发生在这种极化作用削弱到一定程度之后才发生的。当空气中的酸性气体(主要是 CO_2)向混凝土内渗透,破坏这种钝化作用;当混凝土中的氯离子含量达到一定时,使混凝土的导电性增强,这样也有利于钢筋中自由电子向氧分子传递,以及氧分子向混凝土中的渗透,使钢筋的阴极保护作用减弱,引起钢筋锈蚀的发生。因此,可以从2个方面来确定钢筋的初始锈蚀时间:一是混凝土保护层碳化到一定程度的时间;二是当氯离子和氧分子含量达到某一阈值所需的时间。此外,由于混凝土裂缝的存在和产生,可能会引起钢筋在局部锈蚀时间的提前和加剧。氯离子含量和混凝土碳化对钢筋锈蚀的影响,在不同环境以及不同的锈蚀阶段对钢筋锈蚀起控制作用;在氯离子含量不高的情况下,混凝土碳化对钢筋锈蚀起控制作用;氯离子含量超过一定量后会加速钢筋的锈蚀,对钢筋锈蚀起控制作用,主要是引起钢筋的坑蚀,这种危害是很大的,容易引起应力集中,导致钢筋的应力腐蚀。

3.1 混凝土保护层碳化到一定程度的时间

在空气中结构混凝土的碳化通常是一缓慢过程。根据大量室内试验和现场观察,碳化速度取决于混凝土渗透性与大气的 CO_2 浓度,大体上符合费克扩散定律。根据有关研究,混凝土碳化深度预测可用以下模型^[1]:

$$x=839(1-RH)^{1.1} \sqrt{\frac{w/c}{c} \cdot 0.34} C_0 \cdot \sqrt{t} =K\sqrt{t}$$

式中, x 为碳化深度, m ; RH 为环境相对湿度, $RH>55\%$ 时适用; w/c 为水灰比; c 为水泥用量; C_0 为环境中浓度; t 为碳化时间, d 。

该式能直接反映出水灰比水泥用量环境相对湿度 CO_2 浓度对碳化速度的影响,比较实用。 K 值就反映了这一特征,它主要取决于混凝土渗透性和环境条件。混凝土渗透性取决于水泥品种、水灰比、浇筑、捣实与养护质量等;而环境条件包括温度、湿度和 CO_2 浓度(Meyer,1968)。

3.2 氯离子含量达到阈值时间

氯离子的渗透也是一个缓慢的过程。氯离子对钢筋锈蚀的影响在海洋环境中比较典型，但是一些地区在冬季除冰盐的使用，使氯离子含量达到了对钢筋锈蚀的影响起决定作用的程度。现在，世界上比较公认的是 Cl⁻含量达到水泥重量 0.4%，即能引起钢筋锈蚀。因此，把 0.4%作为临界值所采用。

4 钢筋锈蚀速度以及锈蚀程度

钢筋的锈蚀速度反映的是钢筋锈蚀活性，与混凝土的品质、氯离子含量、碳化深度以及所处的环境等因素直接相关的。具体到检测结果就是混凝土电阻率、锈蚀电位、氯离子含量、碳化深度，通过对 4 个方面的检测基本可以确定了钢筋的锈蚀电流密度，从而判断钢筋的锈蚀速度为。则在 T 时刻，钢筋的锈蚀程度可表示为

$$i(t) = \frac{[D_0 - 2w(T - T_0)]^2}{D_0^2}$$

式中，D₀ 钢筋的初始直径；T₀ 钢筋的初始锈蚀时间。

钢筋锈蚀率一般比较小，也就是 $\frac{2w(T - T_0)}{D_0}$ 这一

项较小，因此上式可以约等于： $i(t) = 1 - \frac{4w(T - T_0)}{D_0}$ 。

这样在后面计算结构等效抗力时减少了很多麻烦。

5 钢筋锈蚀与承载力的可靠性分析

结构可靠度是指结构在规定时间内，规定条件下完成预定功能的能力。其功能函数可以用随机过程来表示

$$Z(t) = g(R(t), S(t)) = R(t) - S(t)$$

设结构的永久荷载为 S_G，可变荷载效应为 S_Q(t)，则在某一基本组合结构某一状态的功能函数为

$$Z(t) = R(t) - S_G - S_Q(t)$$

在对既有桥梁进行可靠性分析时，有些桥梁经过一定的使用阶段后，结构抗力 R(t) 已发生明显的劣化，或对结构抗力维持原有水平已产生怀疑，这就需要考虑结构抗力 R(t) 随时间的变化。此时结构可靠性分析的功能函数^[2]：

$$g(R_1, R_2, \dots, R_n, S_G, S_Q) = - \frac{1}{T} \ln \left[\frac{1}{T} \int_0^T \exp(-R(t)) dt \right] - S_G - S_{QT}$$

(1) 钢筋锈蚀后结构抗力

对于钢筋混凝土桥梁，结构抗力的下降并不是

一开始就发生的，而是经过一定的时间之后，结构产生了病害，其中主要是由于钢筋的锈蚀之后。钢筋的锈蚀一般是发生在钢筋的破钝之后，这可能是由于碳化或者裂缝以及氯离子所引起的。结构在经过钢筋的初始锈蚀时间之后，结构抗力便开始下降，这一过程是与钢筋的锈蚀速度密切相关的，在前面已经分析了钢筋的锈蚀特性和锈蚀速率与影响因素之间 t_c 的关系。由钢筋混凝土结构设计原理可知，钢筋混凝土受弯构件的极限承载能力主要依赖于受拉钢筋，同时与受拉钢筋的力臂系数有关，为分析方便，假定钢筋截面损失的钢筋力臂系数影响可以忽略，桥梁受弯构件结构抗力的下降过程可以表示为如下形式

$$R(t) = R_0 \cdot \lambda(t) \quad \lambda(t) = \begin{cases} 1 & t < t_c \\ \lambda(t) & t \geq t_c \end{cases}$$

式中，λ 为钢筋锈蚀引起的粘结性能退化系数；λ(t) 为钢筋锈蚀率；R₀ 为桥梁结构初始抗力；λ(t) 为结构抗力的衰减函数，可根据钢筋锈蚀过程得到。将上式代入钢筋的等效抗力公式

$$R = - \frac{1}{T} \ln \left\{ \frac{1}{T} \int_0^{t_c} \exp(-R_0) dt + \frac{1}{T} \int_{t_c}^T \exp(-R_0 \lambda(t)) dt \right\} = R_0 - \frac{1}{T} \ln \left\{ \frac{t_c}{T} + \frac{1}{T} \exp \left[\lambda R_0 \frac{4}{D_0} (T - t_c) \right] - 1 \right\}$$

(2) 抗力模型和荷载模型

桥梁结构的抗力模型主要是考虑抗力的衰减过程 λ(t) 和 R₀ 中材料性能的不均匀性。可将 R₀ 看成是 1 个随机变量，然后计算出结构等效抗力的统计参数。恒载效应主要是根据结构尺寸及材料性能变异等产生的不确定性，一般认为它服从正态分布。活载效应概率分布模型不容易直接求得，文献[3]对活载效应的概率分布做了研究，将桥梁车辆的荷载效应与标准荷载效应的比值作为随机变量，并拟合出分布模型。在设计基准期内服从最大值分布。

$$\text{弯矩} \quad F_M(x) = \exp \left\{ - \exp \left[- \frac{x - 0.768 5S_{1QK}}{0.053 7S_{1QK}} \right] \right\}$$

$$\text{剪力} \quad F_M(x) = \exp \left\{ - \exp \left[- \frac{x - 0.693 8S_{1QK}}{0.043 1S_{1QK}} \right] \right\}$$

式中，S_{1QK} 为标准荷载所产生的荷载效应，对于特定的桥梁，其为一定值。

(3) 任意时刻桥梁结构所具有的可靠度

根据前面分析结果可以求出结构在评估时所具有的可靠度 P_i , 根据可靠度指标的定义可以求出当前状态下桥梁的可靠度指标

$$\beta_i = \Phi^{-1}(1 - P_i)$$

式中, $\Phi^{-1}(1 - P_i)$ 为标准正态分布函数的反函数。

6 结构使用寿命预测及加固时机的选择

通过比较不同时刻桥梁的可靠度指标及其变化趋势, 可以预测未来某一时刻桥梁结构的可靠性水平。根据可靠度指标与时间的历程曲线, 预测结构的剩余寿命, 结合桥梁的全寿命分析, 选择合理的加固时机。

7 工程实例

本桥所处的环境和本身结构的特点, 本桥在投入使用不久钢筋就可能发生了锈蚀, 在混凝土的氯离子含量测试中可以发现, 氯离子含量较高。从测试结果可以推断混凝土表面的氯离子含量为 1.0%; 钢筋处氯离子含量在 0.8%, 由此可得钢筋锈蚀不均匀系数为 1.4。从氯离子的渗透过程, 可以估计出钢筋的初始锈蚀时间为: $T_0=6.5$ 年。

在对混凝土的电阻率和钢筋的锈蚀电位的检测结果来看, T 梁腹板下半部的混凝土电阻率和钢筋的锈蚀电位都较小, 其中混凝土电阻率大都在 0.005 M·cm, 钢筋锈蚀电位在 -465 mv 左右, 在腹板下缘受拉钢筋附近区域锈蚀电位基本低于 -500 mv。目前钢筋的锈蚀速率约为: 0.3 mm/a, 在 $[T_0, t]$ 时间内的锈蚀速度可取平均值, 为 0.15 mm/a。

从以前设计资料中可以知道, 其受拉主筋直径为 28 mm, 因此钢筋锈蚀率随时间的关系可表示为

$$r(t) = 1 - \frac{4w(T - T_0)}{D_0} = 1 - 0.03(T - T_0)$$

由此可以计算结构等效抗力

$$R = R_0 - \frac{1}{T} \ln \left\{ \frac{t_c + 1}{T} \exp \left[\frac{4}{D_0} (T - t_c) \right] - 1 \right\} =$$

$$R_0 - \frac{1}{T} \ln \left\{ \frac{t_c + 1}{T} \exp \left[\frac{0.03}{0.03} (T - t_c) \right] - 1 \right\}$$

这样结构的功能函数为:

$$Z = R_0 - \frac{1}{T} \ln \left\{ \frac{t_c + 1}{T} \exp \left[\frac{0.03}{0.03} (T - t_c) \right] - 1 \right\} -$$

$$S_G - S_{GT}$$

由一次二阶矩方法求得, 结构可靠度指标 $\beta = 3.75$, 结构得 $\beta_0 = 4.37$, 结构可靠度指标下降 13%。

8 结论

运用可靠度理论, 对桥梁钢筋锈蚀所引起结构性能的退化进行了全过程分析, 从钢筋锈蚀量和粘结性能的退化, 分析了结构可靠性的下降, 对桥梁的耐久性恶化做出了评价。通过对桥梁混凝土构件中钢筋锈蚀状况的检测, 利用结构等效抗力这一概念, 可以计算出不同时刻结构的可靠度水平, 从而可以实现对结构的使用寿命的预测和加固时机的选择。由于有关钢筋锈蚀状况参数与钢筋锈蚀速度之间关系还需进一步验证, 锈蚀速度模型还应进一步完善。

参考文献:

- [1] 国家基础性研究重大项目《重大土木与水利工程安全性与耐久性的基础研究》混凝土碳化及其钢筋腐蚀的研究[R]. 上海: 同济大学, 1995.
- [2] 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.
- [3] 李扬海, 等. 公路桥梁结构可靠度与概率极限状态设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1997.
- [4] 交通部公路科学研究院. 公路旧桥检测评定与加固技术的研究及推广应用研究报告 [R]. 北京: 交通部公路科学研究所, 2005.
- [5] 董聪. 现代结构系统可靠性研究理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.

(上接第 29 页)

6 结论

应用模糊模式识别理论对桥梁技术状态进行评定, 在充分利用专家经验的同时, 可以减少人为主观因素的影响。该方法简单、有效, 其评定结果可以客观地反映桥梁的真实情况。

参考文献:

- [1] 交通部公路科学研究院. 公路旧桥检测评定与加固技术的研究及推广应用研究报告 [R]. 北京: 交通部公路科学研究院, 2005.
- [2] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [3] 张玲玲, 马建勋. 服役结构可靠性的模糊综合评判法及其应用 [J]. 土木工程学报, 2001, 34 (5): 20-23.