

文章编号:1674-2869(2008)03-0036-04

基于BP网络的钢筋混凝土结构时变可靠度

屠艳平^{1,2}, 管昌生¹, 谭浩²

(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070;

2. 武汉工程大学环境与城市建设学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:运用人工神经网络来预测混凝土中钢筋的锈蚀量,考虑锈蚀后钢筋屈服强度的下降及钢筋与混凝土间粘结力降低两个因素,建立钢筋混凝土梁抗力模型,并用于钢筋混凝土时变可靠度分析中,这种方法原理简单,计算方便,且精度较高。

关键词:神经网络;钢筋锈蚀;时变可靠度;计算方法

中图分类号:TU 375

文献标识码:A

0 引言

钢筋混凝土结构在土木工程中的应用范围极广,但是其在使用过程中,出现了大量的耐久性问题,造成巨大的经济损失。针对这些问题,国内外学者从环境、材料、构件及结构层次四个方面作了许多研究工作,取得了大量成果^[1~14]。王炯明^[1]、李艺^[2]、王圣南^[3]对不同使用环境下的钢筋混凝土结构进行了分析,金伟良^[4]、张誉^[5]、Gonzalez J A^[6]、Hwai-Chung Wu^[7]对材料引起的耐久性问题进行了全面分析。张誉^[6]综合这些成果,从材料层次入手,指出混凝土结构的耐久性是由混凝土、钢筋材料本身特性和所处使用环境的侵蚀两个因素决定的。混凝土以正常方法配置和养护时,存在大量孔隙,在承受荷载条件下,不可避免产生裂缝。钢筋混凝土在使用过程中,空气中的二氧化碳、二氧化硫等酸性气体及由于各种原因进入混凝土的有害溶解物质(如氯离子、硫酸根离子、氢氧根离子)在混凝土孔隙和裂缝中迁移,迁移过程中与水化生成物发生物理化学变化,导致钢筋锈蚀,使钢筋与混凝土的粘结力降低及结构承载力下降、刚度降低和混凝土开裂,严重影响混凝土的寿命。可见混凝土本身的孔结构和在使用过程中出现的裂缝是影响水、各种腐蚀气体、溶解物在孔隙中的迁移速度、范围和结果的内在因素,影响迁移的外部因素是结构设计所选用的结构形式和构造、混凝土和钢筋的性质和质量、施工质量和使用环境。吴谨、吴胜兴^[8]对构件层次进行了研究,提出受弯构件承载力计算模型。虽然已经取得了不

少成果,然而对于结构耐久性的分析至今还没有一个普遍接受的方法。本文拟从钢筋混凝土结构耐久性评估的基本方法入手,运用人工神经网络及可靠度理论,结合测试结果,进一步分析钢筋混凝土结构的时变可靠度,并用算例进行分析与验证,提出基于人工神经网络的钢筋混凝土结构随机时变可靠度的分析方法。这一研究在混凝土结构耐久性预测、结构时变可靠性评估领域有广泛的应用价值,也具有很大的经济效益和社会意义。

1 耐久性评估的基本方法

在土木工程领域存在着大量服役若干年的结构物,对已有结构进行耐久性评估,就是根据结构当前的状况,如混凝土强度、钢筋锈蚀情况来推断结构的剩余承载力或剩余使用寿命,以确定结构能否继续使用或是否需要维修加固。有关结构的耐久性评定,从已取得的成果来看,主要包括是传统经验法、基于模糊综合评判的耐久性评定法、基于可靠度的耐久性评定。

1.1 经验法

由于工程问题的复杂性,评估过程中会遇到大量的模糊信息,所以长期以来,对服役结构耐久性的评估一直依赖有经验的技术人员、专家用传统的经验法来完成。显然其结果具有人为主观性,其准确性与专家的知识水平和经验的丰富程度有很大的关系,遇到新的使用环境、新型混凝土材料及结构已服役时间比较长就不可避免容易产生差错。

收稿日期:2007-07-12

基金项目:湖北省自然科学基金资助项目(2005ABA285)

作者简介:屠艳平(1977-),女,湖北孝感人,讲师,博士生,研究方向:钢筋混凝土结构耐久性、地下工程耐久性。

1.2 基于模糊综合评判的耐久性评定法

由于影响耐久性的因素繁杂,而且各因素之间相互影响,使得钢筋混凝土结构的耐久性评估的问题非常复杂.影响因素自身表现出随机性,在与耐久性的关系上又表现出一定的模糊性,而且表征耐久性失效的许多信息是不完善的.任锋^[9]运用模糊数学理论,确定评估的多因素指标体系并进行单因素评估,然后选择模糊合成算子,应用模糊关系合成原理进行综合评估,最终确定被评估对象的等级归属.但该方法中影响因素的权向量针对不同工程取值不同,且模糊合成算子的选取很复杂,且只是评定出对象所处的等级,并不能对结构剩余寿命进行预测,与现行设计规范不协调,在实际运用中有一定的局限性.

1.3 考虑时变性的钢筋混凝土结构耐久性

现行的结构可靠度规范以结构抗力和荷载在使用过程中保持不变来考虑,而实际上由于混凝土碳化、碱集料反应、钢筋锈蚀等因素导致混凝土强度下降、钢筋强度降低及钢筋与混凝土间的粘结力破坏,使得抗力随着时间不断变化而表现为一个随机过程,并且是一个非常复杂的不可逆过程(经维修、加固除外).考虑结构抗力和荷载时变性的可靠度,称为结构时变可靠度.李艺^[2]、管昌生^[10]基于构件的时变可靠度分析,得出混凝土构件在钢筋锈蚀前,可靠度指标基本不变,钢筋锈蚀后,可靠指标开始下降,但降低幅度不大,保护层锈胀开裂以后,可靠指标下降较快.但这些分析都没有能够建立抗力衰减模型,且算例不具有代表性.当考虑结构抗力随时间变化时所用的结构失效概率是一个高维积分表达式,在实际工程中是不适用的.把设计基准期分为 m 个相等的时段,将荷载随机过程 $S_Q(t)$ 离散为 m 个随机变量 S_{Q_i} 的同时,将抗力随机过程也离散为 m 个随机变量 R_i , R_i 取为第 i 个时段抗力的中值,然后根据可靠度分析方法来计算.赵国藩^[11]以混凝土短柱为模型,假设抗力为正态分布、最大可变荷载为极值Ⅰ型分布,以混凝土和钢筋强度的衰减系数分别为 $\varphi_c(t) = 1.0 - 8.0 \times 10^{-7} t^3$ 、 $\varphi_s(t) = 1.0 - 2.2 \times 10^{-6} t^3$ 来分析结构经过50年后的可靠度.计算说明考虑抗力随时间降低时结构可靠指标比不考虑时有所下降,结构的危险率随时间不断增加.按照这种思路,可以求出结构在任意时刻的可靠度且计算相对简单,但由于抗力衰减模型不具有代表性而值得进一步的研究.

2 人工神经网络方法

人工神经网络方法是新发展起来的方法,它

用大量简单的处理单元广泛连接形成复杂网络,用以模拟人类大脑神经网络结构和行为.由于人工神经网络具有高度的非线性全局作用和实时推广能力及良好的容错性与联想记忆功能等优点,特别是它可以从工程实例中学习知识,尽可能地把各种定性与定量的影响因素作为变量加以输入,建立各影响因素与结论间的高度非线性映射,采用自适应模式识别方法完成预测等任务,因而在钢筋锈蚀量预测^[12]、锈蚀钢筋与混凝土粘结性能预测^[13]及钢筋混凝土结构寿命预测^[14~15]方面取得了一定的成果.虽然BP神经网络存在易陷入局部极小、收敛速度慢、推广能力差等不足,但由于其简单、计算量小,在人工神经网络的实际应用中,80%~90%的网络模型采用的是BP网络或它的变化形式.

2.1 BP人工神经网络的结构

一个神经网络由多个互连的神经元组成,神经元是神经网络的基本处理单元,它一般是多个输入、一个输出的非线性单元,可以有一个内部反馈和阈值.本文选取网络模型为输入层4个节点,分别为混凝土裂缝宽度(W)、混凝土强度(f_{cu})、混凝土保护层厚度(c)和钢筋直径(d);输出层为一个节点,为钢筋截面损失率(η).理论上已经证明:三层(单隐含层)的BP网可以表达任意非线性连续的函数.因此,一个选取网络隐层规模的初步原则是:优先采用单隐层结构,在能解决问题的前提下,以网络收敛速度最快为准,隐含层节点数根据误差最小的原则进行调整.

2.2 BP学习算法

BP算法属于 δ 算法,是一种有导师的算法,它由两部分组成:信息的正向传播与误差的反向传播.在正向传播过程中,输入信息从输入层经过隐含层逐层计算传向输出层,每一层神经元的状态只影响下一层神经元的状态.如果在输出层没有得到期望的输出,则计算输出层的误差变化值,然后将误差信号沿原先的连接路径返回,同时根据返回的误差逐层修改各层权值,直到达到期望输出为止.

2.3 神经网络模拟

收集了实际工程检测数据15组,以其中的10组构成训练集,如表1所示,以其余的5组为测试集,如表2所示.

可见运用神经网络进行钢筋锈蚀量的预测效果非常好.

表 1 人工神经网络的学习结果

Table 1 Results of artificial neural network's studying

样本号	W/mm	f_{cu}/MPa	c/mm	d/mm	η 检测	η 计	η 检测/ η 计
1	0.180	27.63	25.0	20	14.51	16.45	0.8821
2	0.250	29.86	24.3	20	18.64	18.80	0.9915
3	0.333	31.76	23.2	20	13.84	13.00	1.0646
4	0.667	26.88	21.0	20	15.10	14.76	1.0230
5	0.500	28.00	22.4	20	18.60	18.37	1.0125
6	0.750	30.00	20.0	20	12.70	13.67	0.9290
7	0.667	29.70	23.0	20	16.33	18.45	0.8851
8	1.100	28.60	22.7	20	17.72	16.51	1.0732
9	0.850	25.54	21.5	20	16.05	18.21	0.8814
10	1.150	27.32	21.7	20	18.32	18.01	1.0172

表 2 人工神经网络的测试结果

Table 2 Results of artificial neural network's testing

样本号	W/mm	f_{cu}/MPa	c/mm	d/mm	η 检测	η 计	η 检测/ η 计
1	0.700	29.21	25.0	20	12.84	12.82	1.002 2
2	0.333	26.58	21.4	20	14.51	14.52	0.999 3
3	0.500	28.34	23.0	20	15.70	15.68	1.001 2
4	1.500	25.68	22.0	20	14.80	14.78	1.001 3
5	0.667	28.31	22.5	20	18.60	18.62	0.998 9

3 算例与分析

3.1 时变可靠度计算

某厂房建于 1977 年,钢筋混凝土梁跨度 7 200 mm,间距 3 600 mm,截面为 250 mm \times 600 mm,混凝土强度等级为 C20,采用 II 级钢筋 4 根, $d=20$ mm,设计保护层厚度 25 mm. 永久荷载效应 S_G 服从正态分布, $\mu_{S_G}=100.8$ kN \cdot m, $\sigma_{S_G}=6.1$ kN \cdot m; $T=50$ 年设计基准期内的最大可变荷

载效应 S_{Q_t} 服从极值 I 型分布, $\mu_{S_{Q_t}}=52.2$ kN \cdot m, $\sigma_{S_{Q_t}}=7.3$ kN \cdot m. 梁抗力随机过程为 $R(t)$, 钢筋初始屈服强度 f_{y0} 服从正态分布, $\mu_{f_{y0}}=323.8$ N/mm², $\delta_{f_{y0}}=0.071 3$.

根据惠云玲^[16] 试验研究, 钢筋锈蚀后屈服强度会下降, 用公式 (1) 表示, 则钢筋混凝土受弯构件的抗力随机过程可表示为公式 (2), $\eta(t)$ 表示钢筋截面锈蚀率, ζ 表示相对界限受压区高度. 根据惠云玲^[17] 试验研究, 对于钢筋锈蚀混凝土保护层已经开裂的受弯构件, 除应考虑钢筋截面损失和屈服强度降低外, 还应考虑由于粘结力损失引起的强度降低系数 $\alpha(t)$, 可按照公式 (5) 计算.

$$f_y(t)=[0.985-1.028\eta(t)]/[1-\eta(t)] \quad (1)$$

$$R(t)=\alpha_1 f_c b h_0^2 \zeta(t)[1-0.5\zeta(t)]=$$

$$\rho(t) f_y(t) b h_0^2 [1-0.5\zeta(t)] \quad (2)$$

$$\rho(t)=\Lambda_s(t)/(b h_0)=\eta(t)\Lambda_s/(b h_0) \quad (3)$$

$$\zeta(t)=\rho(t) f_y(t)/\alpha_1 f_c \quad (4)$$

$$\alpha(t)=1, W \leq 0.5 \text{ mm}$$

$$\alpha(t)=(1.1-0.009d)/(1.12-W/9.4) \quad (5)$$

$$d \leq 16 \text{ mm 时 } \alpha \text{ 取 } 0.95; \alpha \text{ 大于 } 0.95 \text{ 时取 } \alpha=$$

0.95

则抗力随机过程为

$$R(t)=\alpha(t) f_y(t) A_s(t) h_0 [1-0.5\zeta(t)] \quad (6)$$

3.2 结果分析

该厂房已经服役了 30 年, 按照一次二阶矩法, 分别计算出梁 1~15 的可靠指标如表 3.

表 3 梁的可靠指标

Table 3 The reliability index of beams

可靠指标	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
β	3.824	3.815	3.820	3.822	3.814	3.798	3.806	3.788	3.811	3.762	3.795	3.773	3.765	3.687	3.778

随着时间的延长, 裂缝宽度增大, 梁钢筋的锈蚀量增大, 导致抗力下降增大. 按照这种方法, 只要测出裂缝宽度, 就可按照训练好的神经网络来预测钢筋的锈蚀量, 进而计算出梁的可靠指标. 当动态可靠指标 β^* 小于 0.85 目标可靠 β_0 时, 梁不满足安全性和使用功能要求, 需采取一定的措施. 利用本文提出的方法, 及 $\beta^*=0.85\beta_0$ 作为梁寿命中止的标志^[5], 就可以确定钢筋混凝土结构的耐久年限.

4 结 语

人工神经网络方法不需要明确的数学物理模型就可以得到比较精确的钢筋锈蚀量, 并且有一定的自适应性, 使得人工神经网络用于钢筋混凝土结构时变可靠度评估. 运用 BP 网络预测钢筋的锈蚀量, 考虑锈蚀后钢筋屈服强度的下降及钢筋

与混凝土间粘结力降低两个因素, 建立钢筋混凝土梁抗力模型, 并对钢筋混凝土梁进行时变可靠度分析. 文中的方法原理简单, 计算方便, 且精度较高, 无疑对耐久性分析提出了新的思路.

参考文献:

- [1] 王炯明, 赵宏延. 一般大气条件下钢筋混凝土构件剩余寿命预测[J]. 建筑结构学报, 1996(3): 58-62.
- [2] 李 艺, 林 勇, 赵 文. 酸性气体作用下服役结构的时变可靠度[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(2): 214-216.
- [3] Wang Shen-nian, Pan De-qiang, Huang Jun-zhe. Long Term Durability of Marine Concrete Structures [A]. Nagataki. Proceedings of the 5th International Symposium on the Cement and Concrete [C]. Shanghai, 2002. 1254-1258.
- [4] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性研究的回顾与展

- 望[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002, 36(4): 371-380.
- [5] 张 誉, 蒋利学, 张伟平, 等. 混凝土结构耐久性概述[M]. 上海: 科学技术出版社, 2003: 8-14.
- [6] Gonzalcz J A. Some Questions on the Corrosion of Steel in Concrete—Part I: When, How and How Much Steel Corrodes[J]. Materials and Structures, 1996, 29: 40-46.
- [7] Hwai-Chung Wu. Crack Resistance and Durability of High Performance Fiber Reinforced Concrete [A]. Nagataki. Proceedings of the 5th International Symposium on the Cement and Concrete [C], Shanghai, 2002: 1152-1159.
- [8] 吴 谨, 吴胜兴. 锈蚀钢筋混凝土受弯构件承载力计算模型[J]. 建筑技术开发, 2002, 29(5): 20-22.
- [9] 任 锋, 刘俊岩, 裴现勇. 钢筋混凝土厂房耐久性评估研究[J]. 有色金属, 2007, 59(2): 113-115.
- [10] 管昌生, 江智鹏. 钢筋混凝土结构耐久性预测的时变可靠度方法[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(6): 31-34.
- [11] 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: 12.
- [12] 屠艳平. 钢筋混凝土结构耐久性分析的神经网络方法[D]. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 2003.
- [13] 范颖芳, 周 晶, 张京英. 应用人工神经网络预测锈蚀钢筋与混凝土粘结性能. 工业建筑, 2002, 32(9): 48-50.
- [14] Buenfeld N R, Hassancin N M. Predicting the Life of Concrete Structure Using Neural Networks[J]. Proceedings of the Institute of the Civil Engineering Structures & Buildings, 1998, 128: 38-48.
- [15] 张苑竹, 金伟良. 神经网络在混凝土结构可靠度评估中的应用[J]. 科技通报, 2002, 18(6): 495-500.
- [16] 惠云玲, 林志伸, 李 荣. 锈蚀钢筋性能试验研究分析[J]. 工业建筑, 1997, 27(6): 10-13.
- [17] 惠云玲, 李 荣, 林志伸, 等. 混凝土基本构件钢筋锈蚀前后性能试验研究[J]. 工业建筑, 1997, 27(6): 14-18.

The time dependent reliability of reinforced concrete structures based on BP network method

TU Yan-ping^{1,2}, GUAN Chang-sheng¹, TAN Hao²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. School of Environmental and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The resistance model of beam based on decreasing of yielding strength of steel and connection strength of steel and concrete is build through prediction of corrosion of steel with BP neural network, and the resistance model is used in the time dependent reliability analysis of steel concrete structure. Analysis shows the method is simple and the result is satisfactory.

Key words: neural network; corrosion of steel; time dependent reliability; computing method

本文编辑: 萧 宁