

桥梁预应力损失和刚度变化预测方法研究

贺志勇^{1,2}, 陈智凯¹, 易功超³

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室;

3. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司 深圳分院)

摘要: 预应力混凝土桥梁在使用年限增加和车辆荷载长期作用下会出现预应力损失和刚度变化, 从而影响桥梁结构的健康状态。已有研究成果多数根据结构弹性模量的变化判定桥梁健康状态, 该文采用小波神经网络方法进行预应力混凝土梁桥的预应力损失和刚度变化预测。预应力损失预测结果表明: 成桥后 1~8 年, 预应力预测值由初始预应力的 88.54% 降为 87.1%, 根据 JTG D62-2004《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》所给公式计算的预应力值由初始预应力的 88.25% 降为 86.3%, 最大误差为 0.8%。刚度损失预测结果表明: 小波神经网络方法预测出的弹性模量损失规律与清华大学李秀芬公式和北京交通大学钟铭公式计算的弹性模量损失规律一致, 而且该方法可以同时考虑预应力和疲劳两个因素对桥梁弹性模量的影响, 较为符合桥梁实际状态。

关键词: 桥梁; 小波神经网络; 预应力损失; 刚度变化; 预测方法

1 桥梁概况

某桥为预应力混凝土三跨连续箱梁桥, 跨径组合为 29+30+29 m, 支座采用一般支承方式, 混凝土强度等级 C50, 预应力筋采用的应力 = 1 860 MPa, 弹性模量为 3.45×10^7 Pa, 用 Midas 进行建模, 全桥划分为 83 个节点和 74 个单元, 模型共有 15 个不同截面形式。图 1 为桥梁有限元模型, 图 2、3 分别为桥梁横断面图和立面图。

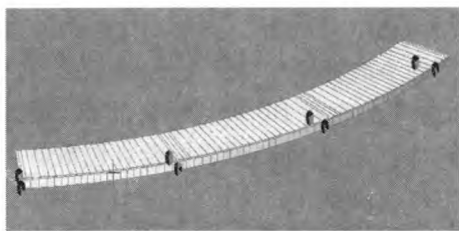


图 1 桥梁有限元模型

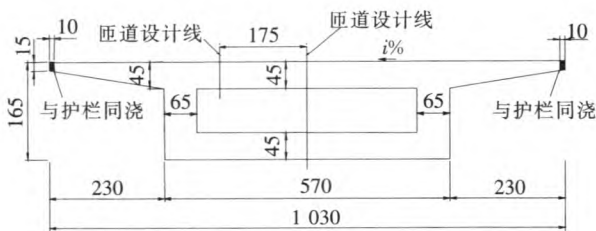


图 2 桥梁横断面图(单位: cm)

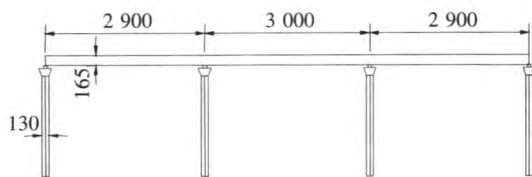


图 3 桥梁立面图(单位: cm)

计算, 所以可以采用将初始张力进行折减来考虑。通过大量的试算发现, 有一些节点对预应力损失的变化并不敏感, 将这些节点加入计算会影响预测的精度, 所以该文在考虑上述因素后选取了对预应力损失比较敏感的 20, 30, 40, 45, 55, 60, 65 共 7 个节点进行分析 (第一跨 3/4 跨, 第二跨 1/4 跨、第二跨跨中、第二跨 3/4 跨, 第三跨 1/4 跨、第三跨跨中; 第三跨 3/4 跨), 为了综合应用各种数据, 单元应力数据采用 y 、 z 方向

1.1 考虑不同预应力损失的节点应力模拟分析

利用 Midas 建立有限元模型, 分别模拟不同预应力损失时的节点应力, 对预应力值分别折减 2%~20%, 由于有限元中对预应力损失的考虑是采用分项

收稿日期: 2014-07-28

基金项目: 华南理工大学国家重点实验室开放研究项目(编号: 2011KB14); 广东省公路管理局科技项目(编号: 粤公研 2009-14)

作者简介: 贺志勇, 男, 副教授, E-mail: zhyhe@scut.edu.cn

的组合应力,即 Midas 结果中的 Cb4(−y−z)进行分析,计算结果如表 1 所示。

表 1 不同预应力损失下各节点处的应力值

节点	不同预应力损失(%)时各节点应力/MPa										
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
20	8.55	8.48	8.40	8.32	8.24	8.16	8.08	8.00	7.92	7.83	7.75
30	5.57	5.50	5.43	5.35	5.27	5.19	5.11	5.03	4.94	4.86	4.78
40	13.1	13.0	12.9	12.9	12.8	12.7	12.6	12.5	12.4	12.3	12.2
45	5.94	5.85	5.77	5.68	5.59	5.50	5.41	5.32	5.23	5.13	5.04
55	8.35	8.29	8.22	8.15	8.08	8.00	7.93	7.85	7.78	7.70	7.63
60	14.5	14.5	14.4	14.4	14.3	14.3	14.2	14.1	14.1	14.0	14.0
65	14.3	14.3	14.2	14.2	14.2	14.1	14.1	14.1	14.0	14.0	14.0

由表 1 可知:预应力损失不断增加,节点的应力则不断降低,如节点 20 在预应力无损失时,应力值为 8.55 MPa,当预应力损失至 80%时,应力值仅为 7.75 MPa,变化达 0.80 MPa。在节点 45 处,当预应力没有损失时,在成桥荷载作用下,应力值为 5.94 MPa,当预应力损失至 80%时,应力值为 5.04 MPa,下降 0.90 MPa。

通过上述分析可知:随着预应力的不断减小,节点处的应力值也在不断下降且变化幅度较大,节点的应力对预应力损失比较敏感,通过节点应力值判断预应力损失可行。

1.2 预应力长期损失的节点应力模拟分析

使用年限增加,桥梁混凝土会产生收缩徐变、钢筋会产生应力松弛,利用 Midas 模拟成桥状态下桥梁的受力状况以及支承情况,第 1 次模拟数据为桥梁成桥 1 年时,第 2 次为成桥 2 年,以后每隔 2 年模拟 1 次,共计 5 次。该桥 2013 年初完工,用 Midas 软件计算 2013 年底、2014 年、2016 年、2018 年以及 2020 年的应力值(模拟方法为在 Midas 中添加 5 个阶段,每 1 年以 365 d 计算),定义的收缩参数根据规范确定,环境年平均相对湿度取 70%,水泥种类系数取 5,收缩开始时的混凝土龄期取为 3 d,各阶段的计算应力值见表 2。

由表 2 可知:节点 20 在 2013 年时应力值为 8.09 MPa,到 2020 年时为 8.01 MPa,下降 0.08 MPa,变化规律与预应力损失后节点应力变化规律一致。

2 基于小波神经网络的预应力长期损失预测

2.1 小波神经网络的建立

在得到不同预应力损失下的节点位移后,需要利

表 2 不同年份的节点应力值

节点	不同年份的节点应力值/MPa				
	2013	2014	2016	2018	2020
20	8.09	8.07	8.04	8.03	8.01
30	5.12	5.10	5.07	5.05	5.04
40	12.6	12.6	12.5	12.5	12.5
45	5.42	5.40	5.37	5.35	5.34
55	7.94	7.92	7.89	7.88	7.87
60	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2
65	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1

用小波神经网络进行融合,小波神经网络是一个人工智能系统,具有强大的非线性和分析处理能力,可以无限逼近任意函数,利用小波神经网络的这个功能,将 Midas 计算得到的节点应力值作为输入数据,预应力损失值作为输出,建立输入与输出之间的非线性关系。该文采用的小波神经网络结构和 BP 神经网络结构类似,不同之处在于将 BP 神经网络的隐层激励函数用小波函数代替,小波神经网络的设计包括输入层、隐含层以及输出层的设计。

2.1.1 隐层神经元个数确定

采用三层小波神经网络结构,即小波神经网络隐层数设置为 1 层,隐层神经元的个数用以下计算公式确定:

$$N=\sqrt{mn}, N=2m+1, N=\sqrt{m+n}+a, N=\log 2^n$$

式中:a 为 1~10 之间的常数;m 为输入层神经元数目;n 为输出层神经元数目;N 为隐层神经元数目。

分别选取隐层神经元个数为 7、11、14 进行仿真分析,最后确定网络训练精度最好的参数 7 作为隐层神

经元个数。

2.1.2 数据归一化

小波神经网络中,为了避免数据的相互湮没以及加快收敛速度,需要对输入和输出数据进行归一化处理。归一化是利用数学工具将跨度很大的数据压缩到一个较小的空间,从而不至于浪费大量的数据,也可以避免由于数据跨度太大而引起的网络收敛缓慢或不收敛的现象。由于该文应力值都为正值,并且变化幅度较大,将原始数据归一化到[0.15,0.85]区间,归一化命令如下:

$$a=0.15;b=0.85$$
$$a_{\max}=\max[\max(p)]$$
$$a_{\min}=\min[\min(p)]$$
$$B=[p-a_{\min}]/(a_{\max}-a_{\min}](b-a)+a$$

上述语句中, p 为原始输入数据, B 为归一化后的输出值, a_{\max} 和 a_{\min} 分别为每组数据的最大值和最小值。通过上述命令语句,即可将原始输入数据归一化到[0.15,0.85]区间,从而有效地提高训练的精度和速度。

2.1.3 小波神经网络的 Matlab 实现

利用 Matlab 的 M-FILE 文件编制小波神经网络程序计算权值、阈值和小波参数。计算时,小波神经网络输入层到隐含层的激励函数采用 Morlet 小波,学习方法采用梯度下降法,学习率取 $l_r=0.01$,小波元数目采用 $n=11$,期望的误差最小值: $\text{err_goal}=0.000\ 01$,通过编制相应的小波神经网络训练程序,就可以对结果进行输出。

2.2 考虑预应力长期损失的节点应力预测

对表 2 数据进行归一化处理,见表 3。将表 3 数据作为输入数据,用已经训练好的小波神经网络进行预测,输出值见表 4,图 4 为预应力损失曲线。可以看

表 3 归一化数值

节点	不同年份时的节点应力归一化值				
	2013	2014	2016	2018	2020
20	0.379 0	0.378 5	0.377 7	0.378 0	0.377 0
30	0.150 0	0.150 0	0.150 0	0.150 0	0.150 0
40	0.726 7	0.726 9	0.719 7	0.719 9	0.720 1
45	0.173 1	0.173 1	0.173 0	0.173 0	0.172 9
55	0.367 4	0.366 9	0.366 2	0.366 5	0.366 3
60	0.850 0	0.850 0	0.850 0	0.850 0	0.850 0
65	0.842 3	0.842 3	0.842 3	0.842 3	0.842 4

表 4 不同时间下小波神经网络输出值

时间/年	预测值	时间/年	预测值
2013	0.885 4	2018	0.872
2014	0.878 6	2020	0.871
2016	0.875 0		

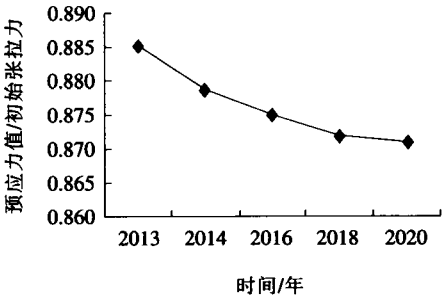


图 4 成桥阶段预应力损失图

出:随着使用年限的不断增加,预应力损失不断增加,在成桥 1 年时,预应力值为初始张拉力的 88.54%,到成桥后第 7 年,预应力值为初始值的 87.1%,6 年时间桥梁预应力损失 1.43%。预应力损失是由于混凝土的收缩徐变和钢筋的松弛导致应力重分布,从而导致预应力的长期损失。根据大量文献可知:钢筋的松弛在施工阶段几乎完成,影响预应力损失的因素主要是混凝土的收缩徐变。由曲线可以看出:预应力的变化率随着时间的增加而逐渐降低,这说明混凝土的收缩徐变在后期逐渐趋稳,在 2018—2020 年间预应力仅损失 0.1%,预应力长期损失几乎可以忽略。

2.3 预测值与规范计算值对比分析

在成桥阶段,预应力长期损失就是混凝土收缩徐变引起的损失,利用 JTG D62—2004《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》中计算公式计算的各阶段末预应力损失值见表 5,在收缩徐变作用下,长期预应力占总预应力的比值见表 6。

表 5 收缩徐变影响下预应力损失值

节点	不同年份时的预应力损失值/kPa				
	2013	2014	2016	2018	2020
20	35 331	42 464	51 182	56 569	60 318
30	34 058	41 937	51 531	57 415	61 463
40	33 495	40 179	48 409	53 566	57 203
45	35 476	43 225	52 656	58 439	62 423
55	35 036	42 415	51 423	56 975	60 825
60	37 674	44 372	52 598	57 732	61 345
65	37 241	43 593	53 147	56 363	59 866

表 6 长期预应力占初始预应力比值

节点	不同年份时的长期预应力占总预应力比值				
	2013	2014	2016	2018	2020
20	0.883 3	0.877 9	0.871 2	0.867 1	0.864 3
30	0.882 6	0.876 4	0.868 8	0.864 1	0.860 9
40	0.879 8	0.874 7	0.868 5	0.864 6	0.861 8
45	0.881 6	0.875 5	0.868 2	0.863 7	0.860 6
55	0.883 4	0.877 7	0.870 7	0.866 4	0.863 4
60	0.880 5	0.875 5	0.869 3	0.865 5	0.862 8
65	0.886 3	0.881 5	0.875 3	0.871 9	0.869 2
平均值	0.882 5	0.877 0	0.870 3	0.866 2	0.863 3

在隐含层节点数为 11 时,对成桥 5 个时间的应力数据进行融合,输入到小波神经网络进行预测,预测值与规范公式计算值对比见表 7。

表 7 预测值与规范公式计算值对比分析

时间/年	预测值	规范值	差值
2013	0.885 4	0.882 5	0.002 9
2014	0.878 6	0.877 0	0.001 6
2016	0.875 0	0.870 0	0.005 0
2018	0.872 0	0.866 0	0.006 0
2020	0.871 0	0.863 0	0.008 0

由表 7 可以看出:在 2020 年,预应力预测值为成桥时的 87.1%,与规范公式计算值误差仅为 0.8%,预测值与规范公式计算值拟合较好,说明训练出来的小波神经网络是可靠的。

图 5 为仿真预测值与理论值(规范公式计算值)曲线图。

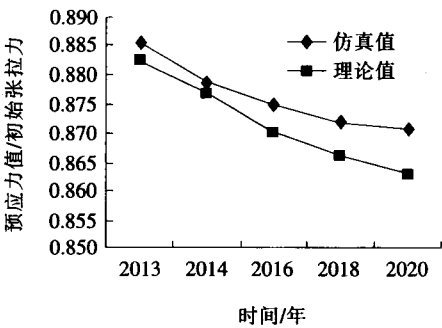


图 5 预应力仿真预测值与理论值对比曲线

由图 5 可以看出:刚成桥时,由于预应力瞬时损失以及预应力钢筋与管道壁之间的摩擦,锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩,预应力钢筋与台座之间的温差,混凝

土的弹性压缩,预应力钢筋的应力松弛和混凝土的收缩徐变等因素,成桥时预应力已经损失。成桥 1 年后的预应力值为初始张拉力的 88.54%,在成桥第 2 年后,考虑混凝土收缩徐变的影响,预应力钢筋的预应力继续降低,为初始张拉力的 87.86%。在后续的模拟分析中,随着使用年限的不断增加,预应力损失持续发展,但是变化幅度越来越小,在使用第 7 年时,模拟出预应力为初始张拉力的 87.1%,说明后续发展越来越缓慢,混凝土的收缩徐变也趋于缓和。由混凝土相关知识可知:混凝土收缩徐变会一直产生,但是幅度越来越小,与小波神经网络输出结果一致。

由上述分析可知:规范公式计算值和预测值变化规律相似,两者最大相差 0.8%,拟合较好。可见利用成桥阶段的节点应力数据来判断预应力的损失可以取得较好的预测效果。

3 基于小波神经网络的桥梁整体刚度变化分析

桥梁随着使用年限增加,在车辆荷载、自然环境等作用下会出现预应力损失、疲劳等各种病害。桥梁病害可以转化为桥梁结构材料损伤进行考虑,而损伤会使材料弹性模量逐渐退化。对预应力混凝土桥梁,适合采用损伤弹性模量模拟桥梁结构损伤,损伤弹性模量用公式 $E_{c,f} = (1 - D_c) E_c$ 表示,其中 D_c 为混凝土的损伤量; $E_{c,f}$ 为混凝土损伤弹性模量。桥梁整体刚度变化最直接的反应是结构变形的加剧,结构的刚度主要取决于混凝土弹性模量以及梁体几何特性 A 、 I ,对于已建成的梁体,几何特性值变化不大,可通过建立桥梁结构变形数据与桥梁整体刚度之间的关系,采用降低混凝土弹性模量方法模拟预测桥梁整体刚度变化。

3.1 疲劳荷载作用对桥梁刚度的影响

预应力混凝土桥梁在车辆荷载的反复作用下,会出现疲劳现象,重复荷载对刚度会产生影响,影响结构刚度的试验回归公式比较多,常用的有清华大学李秀芬公式和北京交通大学钟铭公式。根据英国公路桥梁典型车辆荷载频谱值(BS 5400),当交通类型为重型道路交通时,总车流量中有 16.74%疲劳荷载概率,根据该文桥梁路线交通量预测,得到 2013—2020 年的疲劳荷载作用次数,见表 8。

利用李秀芬公式及钟铭公式,计算得到成桥后不同时间阶段的疲劳弹性模量,见表 9。

由表 9 可以看出:2013 年到 2020 年,在疲劳荷载

表 8 疲劳作用次数

时间/ 年	疲劳作用 次数/万次	时间/ 年	疲劳作用 次数/万次
2013	129.3	2018	164.9
2014	135.7	2020	185.2
2016	149.6		

表 9 不同时间阶段弹性模量值与初始弹性模量值

时间/年	E_t (李秀芬值)	E_m^N (钟铭值)
2013	0.809	0.694
2014	0.801	0.681
2016	0.797	0.673
2018	0.793	0.666
2020	0.791	0.661

作用下,李秀芬公式疲劳弹性模量降低 1.8%,钟铭公式预测疲劳弹性模量降低 3.3%,变化规律都是曲线逐渐变缓,即随着使用年限的不断增长,在疲劳荷载作用下,弹性模量变化幅度逐渐减小。

3.2 疲劳和预应力损失共同作用对桥梁刚度的影响

分别将混凝土弹性模量降低 2%~20%共 11 组数据,采用 Midas/Civil 2010 进行预测分析,选用 10、18、34、42、58、66 共 6 个节点,采用 Midas 可以计算出 D_x 、 D_y 、 D_z 以及 3 个方向的转角位移,鉴于监测中转角位移很难获取,该文提取 D_x 、 D_y 、 D_z 3 个方向数据进行融合分析,如 34 节点,当弹性模量为 98%时,竖向位移为 0.156 mm;当弹性模量降低为 80%时,竖向位移为 1.912 mm,位移变化 1.756 mm,可见通过融合结构位移数据来预测刚度变化是可行的。

小波神经网络为三层神经网络结构,输入层神经元为 3 个方向的位移量,总共 6 个节点 18 个神经元,即输入层神经元数 $M=18$;输出层节点数 $N=1$,即材料的弹性模量值;学习率设定为 0.05,学习算法采用梯度下降法,激励函数采用 Morlet 小波,通过小波神经网络训练,确定小波神经网络的隐层节点数为 30,即在 Matlab 中设定 $n=30$ 。

在 Midas 中输入不同成桥阶段的预应力损失值及利用李秀芬公式计算疲劳弹性模量,运行 Midas 软件得到结构位移值作为小波神经网络的输入数据,归一化到[0.15,0.85]区间,将归一化后的数值作为输入数据,输入到前面已经训练好的小波神经网络中,网络输出值为 0.772 4、0.753 8、0.738 9、0.729 5、0.726 4。

由输出结果可知:当疲劳荷载作用 129.3 万次(即成桥后第 1 年),预应力剩余值为初始张拉力的 88.25%时,结构的整体刚度为成桥时的 77.24%,随后随着使用年限的不断增长,到成桥第 7 年时,结构的整体刚度为初始值的 72.64%,7 年整体刚度变化 4.6%,随着疲劳荷载和预应力的不断损失,结构的整体刚度不断下降,但是降幅逐渐减少。结果表明:在同时考虑预应力荷载和预应力损失的情况下,结构的整体刚度要比只考虑疲劳弹性模量时降低,说明预应力损失的存在对桥梁整体刚度产生了一定程度的影响,在考虑长期效应的刚度分析时必须加以考虑。

在 Midas 中输入不同成桥阶段的预应力损失值及利用钟铭公式计算疲劳弹性模量,运行 Midas 软件得到结构位移值作为小波神经网络的输入数据,归一化到[0.15,0.85]区间,将归一化后的数值作为输入数据,输入到前面已经训练好的小波神经网络中,网络输出值为 0.673、0.654、0.642、0.633、0.627。由输出结果可知:在考虑了预应力损失后,预应力混凝土桥梁的整体刚度比疲劳荷载单独作用时要低,在成桥后 1 年,利用钟铭公式计算的混凝土弹性模量为初始弹性模量的 67.3%,到成桥第 7 年,弹性模量为初始弹性模量的 62.7%,6 年下降 4.6%,下降幅度与李秀芬式计算结果相当。

图 6、7 为疲劳荷载单独作用以及疲劳荷载和预应力损失综合作用时的弹性模量值曲线。

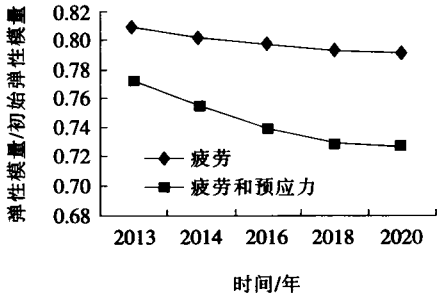


图 6 利用李秀芬公式的弹性模量图

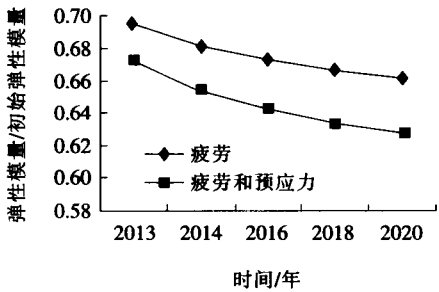


图 7 利用钟铭公式的弹性模量图

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2015.03.032

预应力节段拼装桥墩力学性能研究

姚晓飞, 李雅娟, 康琦, 郑鹏飞

(中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 采用拟静力方法比较分析有(无)粘结预应力钢筋、不同预应力钢筋配筋率、不同配箍率和不同节段数量共10种预应力节段拼装桥墩的变形、节段间接触状态、裂缝、预应力钢筋应力和骨架曲线的异同。结果表明:无粘结预应力比有粘结预应力应力均匀,预应力钢筋不容易屈服;接缝的张开是不可避免的,张开的大小和次序与水平位移和节段高度相关;提高节段混凝土配箍率作用有限;同一墩高情况下节段数目对性能几乎没有影响;轴压比在25%左右是一个比较理想的状态。

关键词: 预应力节段拼装桥墩; 拟静力方法; 变形; 接触状态; 轴压比; 骨架曲线

预制节段拼装桥墩具有质量好、施工速度快、环境扰动小、环保等优点。针对预制节段拼装桥墩抗震性能、不同节段接缝性能的室内模型试验研究国内外已经开展的较多,但对节段拼装预应力混凝土桥墩基本力学性能和墩顶水平位移计算方法等仍缺乏统一和明确的认识,限制了工程设计和应用。该文在参考国内外相关试验和研究的基础上,采用 Ansys 软件设计并

建立实体有限元模型对实际工程进行了数值分析,对力学性能和墩顶水平位移计算方法进行了探讨。

1 数值模型建立

根据国内外相关工程,上部结构为装配式结构、墩高小于15 m时,四车道高速公路桥梁预制节段拼装

由图6、7可知:考虑疲劳和预应力作用后,曲线斜率逐渐减小,可以预测随着时间的继续增长,弹性模量损失继续增加但是降幅越来越小。桥梁整体刚度变化是由各种因素综合作用的结果,李秀芬和钟铭公式都只能考虑疲劳荷载作用下的弹性模量损失,小波神经网络预测方法可以综合考虑疲劳和预应力损失的共同影响,能够更全面地反映结构的整体刚度变化状况,而且预测出来的弹性模量损失规律和李秀芬和钟铭公式计算结果一致,可以作为监测桥梁健康状态的一种新方法。

4 结语

预应力混凝土连续桥梁由于行车舒适,造价较低,耐久性好等优点,在中国的桥梁体系中占据重要位置。随着使用年限的增加,这些桥梁都不同程度地出现了预应力损失、整体刚度下降的情况,对桥梁的承载能力

和使用状态造成一定程度的影响,威胁行车安全。论文采用小波神经网络方法预测预应力损失和刚度变化,模拟分析预应力混凝土梁桥的健康状态。结果表明:预应力损失预测值与规范规定的理论计算值进行对比,二者最大误差仅为0.8%;桥梁整体刚度损失预测结果表明:小波神经网络方法预测出的弹性模量损失规律与李秀芬和钟铭公式计算的弹性模量损失规律一致,而且该方法可以同时考虑预应力和疲劳两个因素对桥梁弹性模量的影响,较为符合桥梁实际状态。

参考文献:

- [1] 李世安. 考虑反复荷载作用的部分预应力混凝土梁桥长期挠度计算方法[D]. 长安大学硕士学位论文, 2006.
- [2] 周燕勤, 吕志涛. 预应力长期损失计算建议[J]. 东南大学学报:自然科学版, 1997(增刊).
- [3] 钟铭, 王海龙, 刘仲波, 等. 高强钢筋高强混凝土梁静力和疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005(2).

收稿日期:2015-01-07

基金项目:交通运输部西部交通建设科技项目(编号:201231836520)

作者简介:姚晓飞,男,博士,高级工程师. E-mail:slbyxf@163.com