

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.03.018

# 空心板梁桥表观病害与荷载横向分布关联分析

曹皓<sup>1</sup>,孙敦华<sup>1</sup>,王子琛<sup>2</sup>,赵福利<sup>1</sup>,孙海鹏<sup>1</sup>,熊文<sup>2\*</sup>

(1.安徽省交通控股集团有限公司,安徽合肥 230088;2.东南大学交通学院,江苏南京 211189)

**摘要:**为了正确评定预制空心板梁桥的服役状态,该文基于改扩建工程空心板梁桥表观病害与荷载试验实测数据,首先分析梁体、铰缝与支座病害样本的数据特征,得到其统计学分布规律;进而针对典型病害(梁底横向裂缝与铰缝裂缝),利用BP神经网络对两者构建关联模型,证明空心板梁桥两种典型病害间的紧密关联性;然后将铰缝横向传力性能作为空心板梁桥荷载横向分布能力评价指标,并基于铰缝实测错缝高度与铰缝完好状态下理论错缝高度之差,建立铰缝损伤程度评价指标;最后基于测试桥梁现场检测、试验以及有限元模拟数据,构建“表观病害-荷载横向分布能力”关联分析的神经网络模型。研究表明:该神经网络模型可用于基于表观病害的空心板梁桥荷载横向分布能力评定,具有较好的工程实用价值。

**关键词:**空心板梁桥;梁底裂缝;铰缝病害;横向分布;关联模型;神经网络

**中图分类号:**U445.7+1

**文献标志码:**A

## 0 引言

空心板梁应用于中小跨桥梁中优势明显,具有构造简单、受力明确、施工方便、桥下净空高等优点,是一种经济有效的桥型结构,已被大量应用于高速路网与国省道公路系统中<sup>[1]</sup>。空心板梁桥多采用预制拼装建造方法,梁段分批次运输至施工现场并吊装架设至指定位置,多为简支或连续体系。各梁段通过横向铰缝连接传力共同承担后期运营荷载,是决定空心板梁桥荷载横向分布能力的关键构造;该分布能力与梁段间连接形式的完整程度、结构/构件的弯扭刚度等直接相关,是反映空心板梁桥服役性能与承载能力的重要指标<sup>[2-3]</sup>。

近年来,由于服役时间长,预制空心板梁桥已出现不同程度的病害,具体形式包括:①铰缝渗水、钢筋外露、砂浆开裂、单板受力<sup>[4]</sup>;②底板纵横向裂缝、混凝土大面积剥落、钢筋外露且锈蚀严重、加固钢板外露锈蚀;③板式橡胶支座翘起、脱空甚至缺失等<sup>[5]</sup>。显然,上述病害描述均针对结构表观,仅基于表观检查结果,养护人员一般难以实施科学正确的

服役状态评定,并以此选择针对性的处置措施<sup>[6]</sup>。

目前,已有学者在试验室按多种加载工况进行表观病害与荷载性能的关联性研究,但此类病害常与时间因素紧密相关,采用新浇混凝土难以准确匹配实际服役状态。虽有学者利用加速试验或有限元仿真计入时间因素影响,但仍难以准确模拟长期服役对结构的真实作用,不能确保分析的准确性与数据的合理性<sup>[7]</sup>。所以,此类研究一直受困于研究样本(新浇试验件)与研究问题(长期服役病害)不相匹配的难题。

安徽某高速公路于1995年通车,距今已有20多年。其中空心板梁桥44座,应用比高达90%以上,单梁长度多为8~22 m。于2018年完成上部结构与支座的现场检测工作,自2019年起开始全面实施改扩建工程。该改扩建项目可为解决上述难题提供大量可充分反映长期服役影响的研究样本。

本文基于改扩建工程空心板梁桥典型病害实测数据,首先分析梁体、铰缝与支座病害样本的数据特征,得到其统计学分布规律;进而针对典型病害梁底横向裂缝与铰缝裂缝,利用BP神经网络对两者构建关联模型,以验证空心板梁桥两种典型病害间的紧密关联性;然后将铰缝横向传力性能作为空心板梁桥荷载横向分布能力评价指标,并基于铰缝实测错

收稿日期:2021-04-14

基金项目:安徽省交通运输科技进步计划项目(编号:2018-37)

作者简介:曹皓,女,大学本科,高级工程师.E-mail:caoh421@ahjk.jt.com

\*通信作者:熊文,男,博士,副教授,博士生导师.E-mail:wxiang@seu.edu.cn

缝高度与铰缝完好状态下理论错缝高度之差,建立铰缝损伤程度评价指标;最后基于测试桥梁现场检测、试验以及有限元模拟数据,构建“表观病害-荷载横向分布能力”关联分析的神经网络模型。

## 1 空心板梁桥病害统计特征分析

### 1.1 病害分类统计分析

现场共检测11座空心板梁桥,包含2座预应力混凝土梁桥与9座钢筋混凝土梁桥,具体信息如表1所示。

表1 空心板梁桥信息

编号	跨径布置/m	预应力	单跨片数	编号	跨径布置/m	预应力	单跨片数
1	2×16	否	6	7	2×13	是	8
2	2×16	否	4	8	3×20	是	10
3	2×16	否	4	9	2×16	否	8
4	4×16	否	8	10	1×16	否	13
5	3×13	是	8	11	1×16	否	8
6	3×16	否	8				

共获得病害记录656条:其中梁体病害279条,占比42.5%;铰缝病害249条,占比38.0%;支座病害128条,占比19.5%。其中4号桥(倪翟桥)的病害最多,共280条记录。

表2为不同构件处病害数量及其占比情况。

表2 病害总体分析

位置	主要病害	病害数量/条	合计/条	占比/%
铰缝	剥落、纵向裂缝	191	249	76.8
	横向裂缝	21		8.4
	渗水	7		2.8
	漏筋、钢筋锈蚀	30		12.0
	底板横向裂缝	230		82.4
梁体	钢板锈蚀	27	279	9.7
	剥落	15		5.4
	纵向裂缝	7		2.5
支座	渗水	128	128	100.0

由表2可以看出:空心板梁桥主要病害形式为铰缝纵向裂缝、梁体底板横向裂缝、支座渗水,在各自所属构件(铰缝、梁体、支座)病害中占比分别为76.8%、82.4%和100%,均大于75%,为所属构件的代表性病害。

### 1.2 病害分布统计分析

结合空心板梁桥受力特点,将病害按所属构件

分为梁体病害、铰缝病害与支座病害,进而针对每一类病害在其构件内部的分布情况进行统计学分析。

#### (1) 梁体主要病害

表3为梁底横向裂缝的位置与长度分布情况。

表3 梁底横向裂缝位置、长度分布

纵向分布部位	数量/条	横向裂缝长度/cm	数量/条
左支座侧	10	0~9	23
左1/4跨	46	10~19	87
跨中	170	20~29	62
右1/4跨	4	30~39	35
合计	230	40~49	22
		>50	1
		合计	230

由表3可以看出:①梁底横向裂缝多分布在纵向跨中区域,约占74%;左1/4跨区域数量亦较多,占20%;其余区域分布较少且均匀;②裂缝长度几乎全部分布在0~50 cm区间,其中数量分布最多的区间为10~19 cm,约占38%,小于50 cm的其他区间数量差异不大。

#### (2) 铰缝主要病害

表4为铰缝纵向裂缝的位置分布情况。

表4 铰缝纵向裂缝位置分布

纵向裂缝分布位置	数量/条
左支座侧	26
左1/4跨	11
跨中	27
右1/4跨	33
右支座侧	19
贯穿	75
合计	191

由表4可以看出:分布在支座侧至1/4跨附近的铰缝纵向裂缝约占46.6%,而贯穿铰缝裂缝约占39.3%。

#### (3) 支座主要病害

支座渗水病害程度按1~5分定量表述,其中1分程度最轻,5分程度最重。表5为支座渗水病害的程度分布情况。

由表5可以看出:1分(程度最轻)与5分(程度最重)病害数量相对较少,2~4分病害数量较多,整体呈现较为明显的正态分布趋势。

表 5 支座渗水病害

病害严重程度/分	数量/个	病害严重程度/分	数量/个
1	12	4	39
2	36	5	10
3	31		

## 2 梁体-铰缝表观病害关联分析

### 2.1 样本分析

将空心板梁及其两侧铰缝作为评价单元,探究评价单元内梁体-铰缝的表观病害关联性。为提高关联性分析的准确性,从调查的桥梁病害样本中选择 40 个评价单元,作为后续训练的样本集。为减小其他因素干扰,选择的评价样本单元均具有较为明显的底板横向裂缝或铰缝病害。图 1 为部分评价单元中梁体与铰缝的表观病害图示。

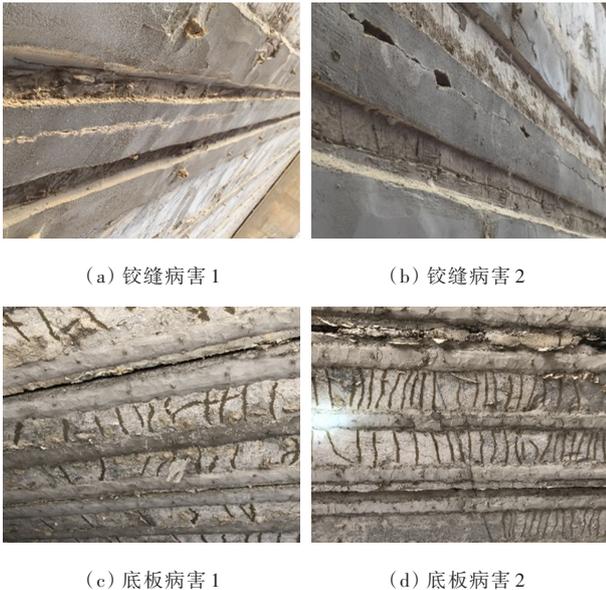


图 1 空心板梁桥表观病害

### 2.2 分析方法

BP(Back Propagation, BP)神经网络是一种多层前馈神经网络<sup>[8]</sup>。单次运算过程主要分为两个阶段,第一阶段是输入信号的向前传播,从输入层经过加权至隐含层,最后至输出层;第二阶段是误差的向后传播,误差从输出层到以相同权重反馈至隐含层,直至输入层,误差传播过程中依次调节层间权重<sup>[9]</sup>。

网络构建代码通过软件 Matlab 编写,总共分为 5 大块:网络结构初始化、隐含层输出、输出层输出、误差计算、权值更新。

#### (1) 网络结构初始化

假设输入层节点个数为  $n$ ,隐含层节点个数为  $l$ ,输出层节点个数为  $m$ ,学习率为  $\eta$ ,激活函数为  $g(x)$ ,采用 Sigmoid 函数。

#### (2) 隐含层输出

根据上述单输出 BP 神经网络,隐含层输出  $H_j$ 为:

$$H_j = g\left(\sum_{i=1}^n \omega_{ij}x_i + a_j\right) \quad (1)$$

式中: $\omega_{ij}$ 与  $a_j$ 分别为输入层至隐含层权重与输入层至隐含层偏置,均随机给定初始值,并随网络迭代逐渐修正与更新; $x_i$ 为输入数据,此处为梁底病害标度。

#### (3) 输出层输出

隐含层节点值加权累积至输出层节点,与输入层至隐含层的计算方法类似:

$$O_k = \sum_{j=1}^l H_j \omega_{jk} + b_k \quad (2)$$

式中: $\omega_{jk}$ 、 $b_k$ 分别为隐含层至输出层权重、隐含层至输出层偏置,均随训练过程逐渐修正与更新。

#### (4) 误差计算

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m (Y_k - O_k)^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m e_k^2 \quad (3)$$

式中: $E$ 为误差; $Y_k$ 为期望输出; $e_k = Y_k - O_k$ 。

#### (5) 权重更新

$$\begin{cases} \omega_{ij} = \omega_{ij} + \eta H_j (1 - H_j) x_j \sum_{k=1}^m \omega_{jk} e_k \\ \omega_{jk} = \omega_{jk} + \eta H_j e_k \end{cases} \quad (4)$$

公式(1)~(4)的计算过程为误差反向传播过程,其目标确保第(3)步误差函数达到最小。故采用梯度下降法,通过预先指定迭代次数,或计算相邻两次迭代误差是否小于限值来判断是否收敛<sup>[10]</sup>。

### 2.3 病害数据预处理

数据预处理可减少单组输入数据个数,即减少数据维度,此过程亦被称为维归纳<sup>[11]</sup>。本研究将裂缝宽度、长度、间距、面积等数据特征整合至裂缝统一衡量指标内。

基于《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)<sup>[12]</sup>,按 5 个标度(1~5)分别对底板与铰缝表观病害进行定量描述(表 6、7)。

在病害数据预处理中,将空心板梁沿纵向划分为“左支座”“左 1/4 跨”“跨中”“右 1/4 跨”“右支座”

表6 梁底横向裂缝定量标度

标度	定量描述
1	无裂缝
2	网状裂缝累计面积≤构件面积的20%,或单处面积≤1.0 m <sup>2</sup> 时,裂缝缝长≤截面尺寸的1/3
3	网状裂缝累计面积>构件面积的20%,或单处面积>1.0 m <sup>2</sup> 时,裂缝缝长>截面尺寸1/3且≤截面尺寸2/3
4	裂缝缝长>截面尺寸的1/2,间距≤30 cm
5	裂缝缝宽>1.0 mm,间距≤10 cm

表7 铰缝裂缝定量标度

标度	定量描述
1	无裂缝
2	裂缝缝宽<1 mm或裂缝缝长≤铰缝长度1/3
3	裂缝缝宽<3 mm或裂缝缝长>铰缝长度1/3且≤铰缝长度1/2
4	裂缝缝长>铰缝长度1/2,且裂缝缝宽<5 mm
5	裂缝缝宽>5 mm或裂缝缝长>铰缝长度2/3

共计5个区域(图2),并按1~5标度完成对梁底横向裂缝病害衡量。具体实施中,该区域划分可根据实际情况进行适当加密或合并。

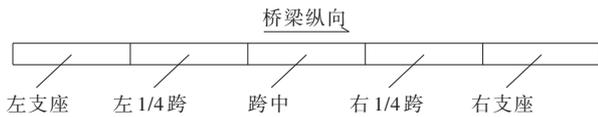


图2 梁底病害区域划分

2.4 训练结果分析

相关性分析采用3层BP神经网络,训练数据为40个评价单元;输入层神经元个数 $n=5$ ,对应梁底5个区域病害衡量标度;隐含层神经元个数 $l=10$ ;输出神经元个数 $m=2$ ,对应两侧铰缝裂缝标度;学习率 $\eta=0.1$ ;最大迭代500次,此时误差 $E$ 趋于稳定并已降至0.5以下。

选择非训练样本实测数据代入已训练神经网络,以验证该神经网络的准确性,表8为其对应分析结果。其中,输入项为评价单元5区域梁底横向裂缝标度,输出项为两侧铰缝裂缝标度。

表8 样本训练结果

样本编号	输入梁底标度	期望输出铰缝标度	实际输出铰缝标度
1	1 3 5 5 1	3 3	3.08 2.87
2	2 5 1 1 3	2 2	1.93 1.90
3	3 3 4 1 1	3 4	3.14 3.83

由表8可以看出:训练后该神经网络具有较好的计算准确性;梁底横向裂缝与铰缝裂缝两项表观病

害间存在显著关联,且该关联能够被BP神经网络定量表述。未来条件允许,可进一步扩大数据样本,提高数据质量,获得更为精确的关联模型与表述。

3 荷载横向分布能力试验测试

3.1 测试桥梁与测点布置

为进一步研究长期服役后空心板梁桥荷载横向分布能力与表观病害之间的关联性,选择倪翟桥(4号桥)为典型样本,在拆除改造前实施多种工况的桥梁荷载试验。倪翟桥于1995年竣工并通车,上部构造为钢筋混凝土空心板梁,桥跨组合为 $4 \times 16$  m,全长77.48 m。图3为该桥现场图,图4为主梁横断面图。



图3 倪翟桥现场图

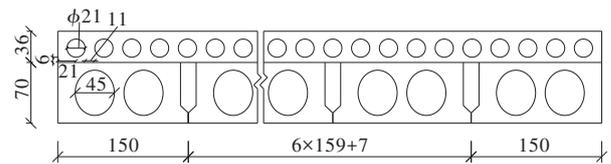


图4 梁体横截面(单位:cm)

测试桥各空心板梁从左外边缘至中央分隔带依次编号为1~8,铰缝编号为1~7。在各空心板梁跨中处左、右端各安置一个挠度测点,测点布置见图5。

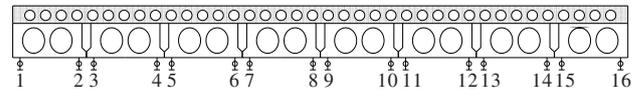


图5 挠度测点布置

3.2 测试与加载方案

为得到测试桥受荷后测点竖向挠度,采用定制木板尺倒置粘贴至测点位置(图6)。通过在岸边平整地段架设水准仪,测量车辆上桥前、后测点挠度变化(图7),得到竖向挠度沿横向分布,从而反映空心板梁桥实际的荷载横向分布能力。

4辆试验车前后并排布置在桥面中心(图8),单车车载300 kN,其中前轴单个轮载26.25 kN,后轴单个轮载48.75 kN。



图 6 测点位置与测试方案

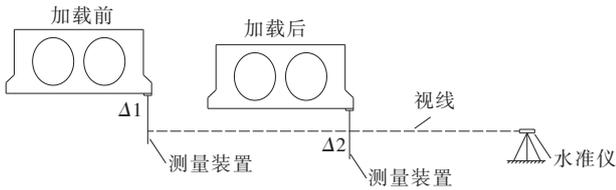
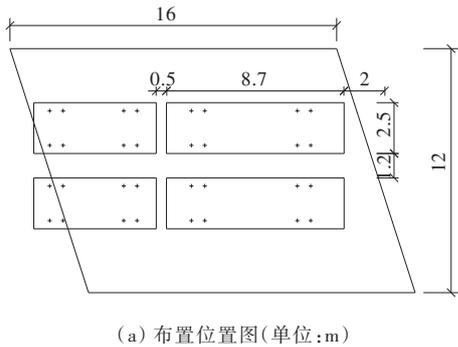


图 7 测量方式



(a) 布置位置图(单位:m)



(b) 现场布置图

图 8 荷载试验工况布置

### 3.3 铰缝错缝高度测试

铰缝错缝高度即为铰缝两侧空心板实测竖向位移的差值。例如,铰缝 1-2 的错缝高度即为测点 2 与测点 3 竖向位移的差值,如图 9 所示。

表 9 为每条铰缝跨中位置处的错峰高度实测值。

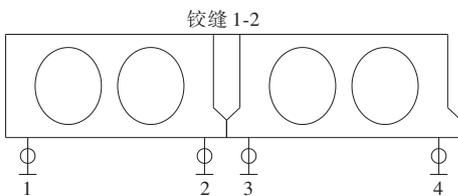


图 9 铰缝错缝高度测量

表 9 铰缝错缝高度

铰缝编号	实测值/mm	铰缝编号	实测值/mm
1-2	0.01	5-6	0.14
2-3	0.01	6-7	0.30
3-4	0.82	7-8	0.02
4-5	0.62		

## 4 荷载横向分布能力理论分析

### 4.1 铰缝损伤程度评价指标

铰接板(梁)法和刚接梁法将铰缝简化为作用力与反作用力,视铰缝位置不发生相对竖向位移。“有限条法”(Finite Strip Method,FSM)是一种半解析半数值计算方法,将连续体沿一个方向离散化<sup>[13]</sup>。对于空心板梁桥,有限条法将空心板梁视为桥纵向条元,铰缝为空心板梁条元间结线,同样可视为独立条元进行单独分析(图 10)。由于篇幅有限,且有限条法为经典算法,此处不再赘述。

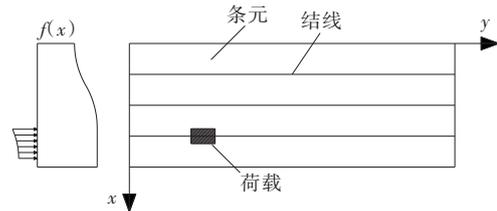


图 10 有限条模型

为定量评定铰缝的横向传力性能,基于铰缝实测错缝高度与铰缝完好状态下理论错缝高度之差,提出铰缝损伤程度评价指标  $\mu_{i,i+1}$ 。该指标能够真实反映桥梁对不同荷载状态下的结构力学响应,避免由于铰缝构造不同而引起评定结果偏差,见式(5):

$$\mu_{i,i+1} = \frac{\gamma_{i,i+1} - \gamma'_{i,i+1}}{\gamma_{i,i+1} + \gamma'_{i,i+1}} \quad (5)$$

式中: $\gamma_{i,i+1}$ 为铰缝  $i-i+1$  在给定荷载下实测错缝高度; $\gamma'_{i,i+1}$ 为铰缝  $i-i+1$  在同一荷载下理论错缝高度(可按图 10 计算模式采用有限条理论计算得到,在此不再赘述)。

可以看出:铰缝  $i-i+1$  的损伤度  $\mu_{i,i+1}$  为无量纲标量,其含义是同一荷载下该铰缝错缝实测高度与理论高度之差占该错缝高度的比值,是一项具有实际物理含义的无量纲损伤评价指标。当铰缝完好时,其错缝高度实测值等于或小于理论值,此时损伤度  $\mu_{i,i+1}$  等于或小于 0;当铰缝出现一定程度损伤时,

其错缝高度实测值大于理论值,此时 $\mu_{i,i+1}$ 为0~1, $\mu_{i,i+1}$ 值越大,损伤度越高。

### 4.2 铰缝损伤程度评价结果

基于有限条法将测试桥横向划分为15个条元,其中空心板梁8个条元、铰缝7个条元,各有限条元编号如图11所示。将错缝实测值与理论值带入公式(5)即可求得各铰缝损伤程度评价指标 $\mu_{i,i+1}$ (图12、13)。

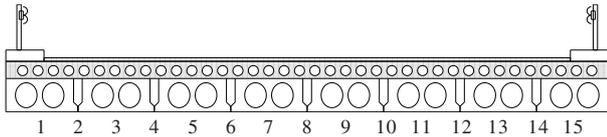


图11 条元编号

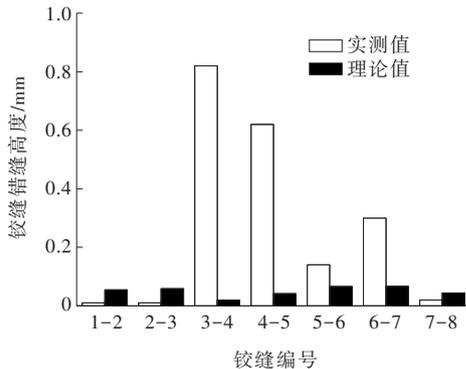


图12 实测与理论铰缝错缝高度

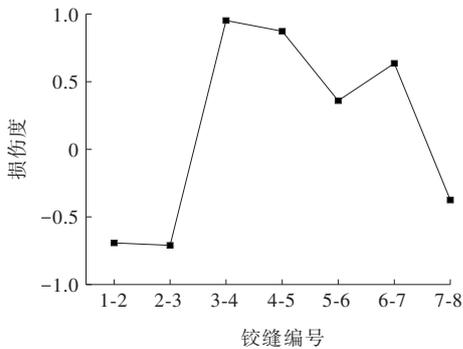


图13 各铰缝损伤程度评价指标计算值

由图12、13可知:

(1) 测试桥梁多数铰缝错缝高度实测值与理论值相比具有一定偏差,其中存在少数铰缝实测值远大于理论值,说明该空心板梁桥的荷载横向分布能力较弱,与设计预期存在不小偏差。

(2) 铰缝1-2、2-3、7-8实测错缝高度接近0,说明两侧空心板梁横桥向挠度变化连续,荷载横向传递较充分,且铰缝损伤程度评价指标均小于0,其状态完好。铰缝3-4、4-5、5-6、6-7实测错缝高度与理论值

偏差较大,表明可能已出现严重损伤,且损伤程度值皆大于0.5;尤其铰缝3-4实测错缝高度是理论值的数十倍,损伤程度接近1。事实上,铰缝3-4与4-5的现场实拍图也可验证这一分析结论(图14)。



(a) 铰缝3-4

(b) 铰缝4-5

图14 铰缝病害

## 5 表观病害-荷载横向分布能力关联分析

### 5.1 模型构建

将梁底与铰缝病害的定量标度作为输入参数,将空心板梁桥荷载横向分布能力评定指标作为输出参数,构建“表观病害-荷载横向分布能力”关联分析的神经网络模型(图15)。由于该模型输入项较为复杂,为进一步提高其关联分析的迭代效率,梁底与铰缝病害的定量标度选定为各梁体左/右区域与跨中区域的梁底裂缝宽度最大值;空心板梁桥荷载横向分布能力评定指标选定为前文提出的铰缝损伤程度评价指标。

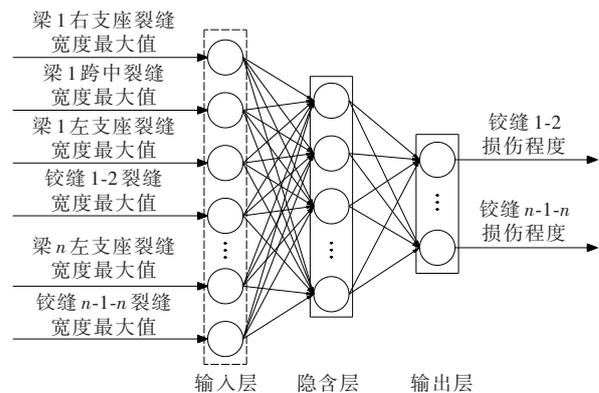


图15 表观病害-荷载横向分布能力神经网络模型

### 5.2 模型训练

获取桥梁表观病害(输入层)与荷载横向分布能力(输出层)的测试数据,需要现场调研、病害统计,

试验设计、现场协调、仪器安装、试验实施、数据测试、数据处理等系列工作,一般难以在短期内获取大量训练样本。采用有限元模型更新技术,仿真得到测试桥梁不同表观病害下的荷载横向分布能力,为准确构建“表观病害-荷载横向分布能力”的神经网络模型提供足够的训练样本。

按空间梁格法对测试桥梁有限元建模,共 536 个节点、647 个单元。其中,每片空心板按纵向梁单元模拟,梁单元与每片空心板中心线重合,纵梁间用虚拟横梁(不计入重量)连接;纵向梁格划分为 32 个单元,横向梁格划分为 21 个单元。边界条件为简支,共 16 个支座。计算模型如图 16 所示。

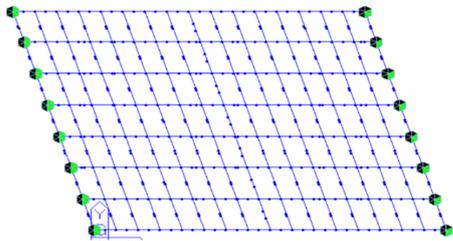


图 16 有限元模型

梁底横向裂缝通过局部弹性模量折减实现模拟。已有学者通过大量回归试验得到公式(6),建立梁体抗弯刚度折减与最大裂缝宽度之间的关系<sup>[14]</sup>。故此处仅需将测试桥梁梁底横向裂缝宽度实测数据带入公式(6),即可得到有限元模型中对应的弹性模量折减系数,以模拟该处的梁底横向裂缝。

$$\beta = 0.9937 - 1.10048\omega_{\max} + 0.46195\omega_{\max}^2 \quad (6)$$

式中: $\omega_{\max}$ 为梁底裂缝宽度最大值(mm); $\beta$ 为此局部弹性模量折减系数。

铰缝病害(裂缝)会引起铰缝转动刚度的折减,通过部分或完全释放横梁梁端绕主梁转动自由度可实现不同转动刚度铰缝的模拟。由于尚无法基于铰缝表观病害直接得到该刚度的削弱程度,此处利用有限元模型更新思想,通过反复调整横向梁格虚拟梁铰缝处的转动刚度,直至模型计算跨中挠度横向分布曲线与实测值一致。

图 17 为模型更新后梁格模型跨中挠度横向分布曲线与实测值的对比图,可明显看出两条曲线重合程度较好,此时可认为更新后的有限元模型与测试桥梁具有相同的荷载横向分布能力。进而以更新后的梁格模型为基准,通过在模型中人为添加不同区域不同标度的梁底横向裂缝,即对不同位置铰缝进

行不同程度的折减,并计算得到相对应的跨中挠度横向分布以及各铰缝损伤程度评价指标数值,从而大幅扩充“表观病害-荷载横向分布能力”神经网络的训练样本,共计 115 个。

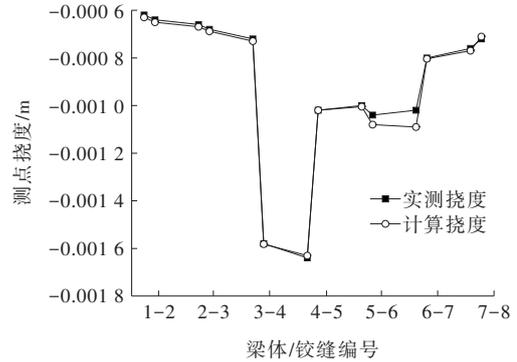


图 17 跨中挠度横向分布曲线

针对以上训练样本,将每根单梁梁底各区域最大裂缝宽度、各铰缝最大裂缝宽度等特征值作为“表观病害-荷载横向分布能力”的神经网络模型输入,将每条铰缝损伤程度评价指标数值作为其输出。初始神经网络的参数为 31 个输入节点、单层隐藏层、7 个输出节点,最大迭代次数 100 次、学习率 0.05,当迭代次数达到最大设定值或系统误差  $E$  到达设定最小值时迭代结束。

其中,由于该测试桥梁长度不长,且裂缝分布特征变化不剧烈,故将图 2 中“左支座”与“左 1/4 跨”合并为“左支座”“右支座”与“右 1/4 跨”合并为“右支座”、中间区域为“跨中”(图 18)。可大幅减少输入层变量个数,但仍可较为准确地描述底板病害分布特征;既可缩短运算时间,又可保证计算精度。

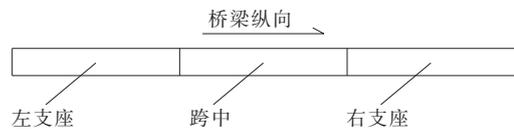


图 18 底板病害区域划分

### 5.3 验证分析

选择未参与模型训练的倪翟桥样本 A1、A2 进行上述神经网络模型的准确性验证。样本 A1 梁底裂缝主要集中在跨中区域;铰缝裂缝发展长度明显。样本 A2 梁底裂缝主要集中在左支座区域;铰缝裂缝宽度较大。样本 A1、A2 各 14 个测点分别布置于铰缝两侧,在指定荷载下各铰缝错缝实测高度见表 10,理论高度按有限条法进行计算。将各铰缝错缝理论高度  $\gamma'_{i,i+1}$ 、实测高度  $\gamma_{i,i+1}$  带入公式(5),即可得到各

铰缝损伤程度评价指标的实际值(模型输出的期望值),可作为该神经网络模型的准确性验证。

表 10 样本 A1、A2 铰缝错缝高度

铰缝编号	错缝高度/(0.1 mm)		铰缝编号	错缝高度/(0.1 mm)	
	A1	A2		A1	A2
1-2	0.12	0.14	5-6	0.56	0.53
2-3	0.12	0.14	6-7	2.22	2.01
3-4	6.91	7.38	7-8	0.17	0.17
4-5	3.77	4.84			

将样本 A1、A2 的表观病害作为输入,通过构建的“表观病害-荷载横向分布能力”神经网络模型,可得到各铰缝损伤程度评价指标的预测输出值,即各铰缝损伤度预测值。与期望数值的对比结果见表 11。

表 11 样本 A1、A2 铰缝损伤度预测验证

铰缝编号	A1		A2	
	期望值	预测值	期望值	预测值
1-2	-0.642	-0.642	-0.594	-0.599
2-3	-0.662	-0.653	-0.616	-0.615
3-4	0.944	0.941	0.947	0.945
4-5	0.800	0.806	0.840	0.842
5-6	-0.082	-0.085	-0.109	-0.109
6-7	0.536	0.535	0.500	0.501
7-8	-0.443	-0.449	-0.443	-0.444

从表 11 可以看出:采用表观病害作为网络输入特征参数、各铰缝损伤程度评价指标作为网络输出特征参数,“表观病害-荷载横向分布能力”神经网络模型的识别准确度较高,最大误差不超过 5%。表明该神经网络模型可用于基于表观病害的空心板梁桥荷载横向分布能力评定中。

## 6 结论

(1) 对于长期服役空心板梁桥,病害具有如下特征:梁体典型病害“底板横向裂缝”主要分布在纵向跨中区域,长度多分布在 10~40 cm 区间;铰缝典型病害“纵向裂缝”多呈现贯穿特征;支座渗水严重程度呈现出较为明显的正态分布趋势。

(2) 利用 BP 神经网络构建空心板梁桥梁体病害与铰缝病害间的定量关联性,且期望输出与实际输出误差较小,证明了空心板梁桥两种典型病害间关联紧密。

(3) 铰缝横向传力性能作为空心板梁桥荷载横向分布能力评价指标,为定量表述铰缝横向传力性能,基于铰缝实测错缝高度与铰缝完好状态下理论错缝高度之差,建立铰缝损伤程度评价指标。

(4) 将梁底与铰缝病害定量标度作为输入参数,将空心板梁桥荷载横向分布能力评定指标(铰缝损伤度)作为输出参数,构建“表观病害-荷载横向分布能力”关联分析的神经网络模型,该神经网络模型可用于基于表观病害的空心板梁桥荷载横向分布能力评定。

## 参考文献:

- [1] 宋宇锋,孙勇,杨立坡.空心板梁桥铰缝受力特性与破坏模式的试验与理论研究[J].中外公路,2018,38(2):159-165.
- [2] 李川.简支空心板梁桥受力特征及病害处理技术[D].杭州:浙江大学,2020.
- [3] 黄卫国,俞博,易汉斌.装配式空心板梁桥铰缝数值分析与试验研究[J].中外公路,2019,39(6):133-136.
- [4] 苏波,周登燕,杨明.空心板病害分析与改进设计[J].公路,2016,61(11):105-108.
- [5] AKTAN A E, FARHEY D N, BROWN D L, et al. Condition assessment for bridge management[J]. Journal of Infrastructure Systems, 1996, 2(3): 108-117.
- [6] 李兴锋,孔晨光,程烽雷,等.空心板梁桥整体化层厚度对受弯失效模式的影响[J].公路,2020,65(9):119-124.
- [7] ZHAO Z Z, KWAN A K H, HE X G. Nonlinear finite element analysis of deep reinforced concrete coupling beams[J]. Engineering Structures, 2004, 26(1): 13-25.
- [8] RUMELHART D E, HINTON G E, WILLIAMS R J. Learning representations by back-propagating errors[J]. Nature, 1986, 323(6088):533-536.
- [9] 李萍,曾令可,税安泽,等.基于 MATLAB 的 BP 神经网络预测系统的设计[J].计算机应用与软件,2008,25(4):149-150,184.
- [10] 曹甄.基于模糊神经网络的桥梁状态评价[D].天津:天津大学,2009.
- [11] 王宇鑫.基于自编码神经网络的桥梁结构损伤检测研究[D].广州:暨南大学,2018.
- [12] 交通运输部公路科学研究院.公路桥梁技术状况评定标准:JTG/T H21—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [13] CHEUNG Y K, NAYAK G C. The finite strip method in the analysis of elastic plates with two opposite simply supported ends[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1969, 42(1):169-170.
- [14] 王显张.基于裂缝特征在役混凝土桥梁结构状态评估[D].西安:长安大学,2011.