



基于随机森林的内河架空直立式码头 损伤诱因反演模型研究^{*}

周世良¹, 熊 聪², 柯春儒², 舒岳阶¹, 周斯捷², 吴 凡², 杨逍驰²

(1. 重庆西南水运工程科学研究所, 重庆 400016; 2. 重庆交通大学, 重庆 400074)

摘要: 为研究对码头结构损伤不良诱因作用的反演, 在内河架空直立式码头物理模型上进行试验, 分析码头在超限堆载和不规范靠泊两种损伤诱因作用下的应变规律。结合三峡库区架空直立式码头损伤诱因反演分析, 提出基于随机森林的损伤诱因反演模型, 并使用物理模型的试验数据对模型进行评估。结果表明: 由物理模型试验得到靠江侧和靠岸侧基桩轴向应变分布规律, 靠江侧轴向应变特征较靠岸侧明显, 更适合作为反演输入; 随机森林反演模型能够对物理模型损伤诱因的类型、位置、强度进行较为准确的反演, 损伤类型的精度达到 0.98, 损伤位置的精度达到 0.99, 损伤强度的精度达到 0.99。

关键词: 随机森林; 损伤诱因反演; 模型评估

中图分类号: U656.1; TV698.1+1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)07-0053-07

Back analysis model of damage incentives of inland river overhead vertical wharf based on random forest

ZHOU Shiliang¹, XIONG Cong², KE Chunru², SHU Yuejie¹, ZHOU Sijie², WU Fan², YANG Xiaochi²

(1. The Southwestern Research Waterway Engineering Institute, Chongqing 400016, China;

2. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To study the back analysis of the adverse inducement of wharf structure damage, we carry out a test on the physical model of the inland river overhead vertical wharf, and analyze the strain law of the wharf under two kinds of damage inducement, namely overloading and irregular berthing. Combining with the back analysis of the damage inducement of the overhead vertical wharf in the Three Gorges reservoir area, we put forward a back analysis model of the damage inducement based on random forest, and evaluate the model by the test's data of the physical model. The results show that the distribution law of axial strain of foundation pile near the river and near the shore are obtained by physical model test, and the axial strain characteristics near the river are more obvious than those near the shore, so it is more suitable for back analysis input source. The random forest back analysis model can accurately predict the type, position and intensity of the horizontal and vertical actions of the physical model. The accuracy of the damage type reaches 0.98, and the accuracy of the damage location reaches 0.99, moreover the accuracy of damage intensity reaches 0.99.

Keywords: random forest; damage inducement back analysis; model evaluation

收稿日期: 2022-09-22

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (51508059); 重庆市交通局科技项目 (2020-08); 重庆市基础研究与前沿探索项目 (cstc2018jcyjAX0345); 重庆市教委科学技术研究项目 (KJQN201800739)

作者简介: 周世良 (1972—), 男, 博士, 教授, 从事水利水运规划、设计、科研、咨询和人才培养。

损伤诱因反演即根据结构的响应(应力、应变等)分析结构的损伤状况和结构所受不良作用的状况,是典型的由果及因的反问题。本文反演的主要对象为超限堆载和不规范靠泊这两种损伤诱因。

反演是一种基于物理量(如反映结构力学行为的应力、应变和位移等参数)的逆分析方法^[1]。20世纪70年代初,Kirsten^[2]在岩石工程勘察学术会议上首次提出用岩体变形反向推导岩体的弹性模量,之后逐渐推广到其他工程领域。根据反分析计算中使用的信息不同,可分为位移反分析法、应力反分析法和混合反分析法^[3]。目前研究主要集中在岩体工程^[4]和大型工程结构(桥梁等)。现有研究对于码头结构来说大多是正分析,由因至果,如张俊红等^[5]通过外荷载作用下大型管桩的变形试验,利用数值模拟方法进行分析,得出基桩相关力学参数,以此评价基桩的健康状态;刘兹胜等^[6]通过室内模型试验,测量桩身最大弯矩、桩身最大弯矩点位置、桩顶位移和泥面位移,从而研究高桩码头桩基边坡的水平承载特性。而对于码头结构反分析的相关研究可谓凤毛麟角,曹师宝^[7]基于神经网络搭建损伤诱因反演模型,将样本数据集输入损伤诱因反演模型,对模型进行训练优化,最终对损伤诱因作用的类型、位置、强度进行较为准确的预测识别,但其数据集的构建完全依靠数值模拟,存在一定的主观性。因此,本文在随机森林算法的基础上,利用模型试验数据作为数据集,并进行训练及验证,对该模型进行评估。

1 物理模型试验研究

1.1 物理模型

本次试验依据相似性原理,对万州新田码头第10号结构段进行一定比尺缩放(1:20),构建物理模型并在基桩上布设应变传感器,见图1。



图1 物理模型

1.2 试验方案

物理模型上模拟超限堆载和不规范靠泊两种损伤诱因,具体实现方式为:1)码头超限堆载,在码头面层上方安装反力架,采用千斤顶、传力面板模拟超限堆载。2)不规范靠泊,在码头前方安装反力架,通过千斤顶模拟不规范靠泊荷载。加载装置见图2。



图2 试验加载装置

试验具体步骤按照JGJ 106—2014《建筑基桩检测技术规范》^[8]第5.3.2条进行加载,加载方式为逐级等量分级加载,每级荷载达到相对稳定后加下一级荷载,分级荷载为最大荷载的1/10,直到设计荷载,维持30 min,然后分级卸载到零,试验每间隔5 min读数1次。根据JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》^[9]规定,模型设计荷载为靠泊1 100 kN、堆货60 kPa,即水平和竖向两个方向荷载,加载位置见图3。考虑到尺寸效应及加载设备的限制,试验使用的传感器为质量称重

传感器, 故在试验中将水平和竖直荷载的加载范围分别设置为0~800 kg(即0~8 kN)与0~1 000 kg(即0~10 kN)。为方便描述, 将工况按靠泊荷载由下到上由左到右编号为E₁₁、E₁₂、E₁₃、E₂₁、E₂₂、E₂₃、E₃₁、E₃₂、E₃₃, 将堆货荷载由左到右编号为F₁、F₂、F₃、F₄, 下面均以编号代指工况。

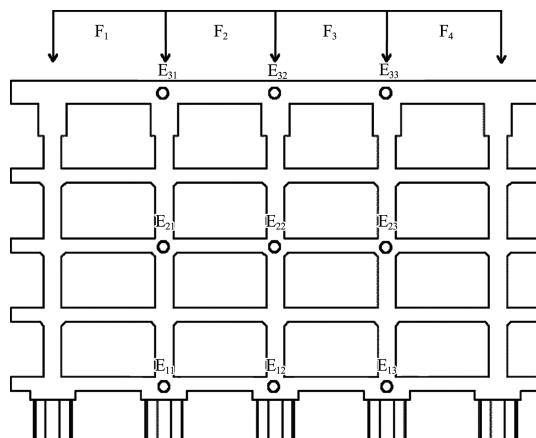
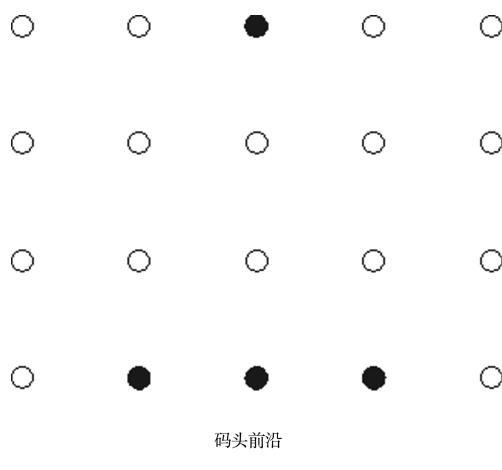
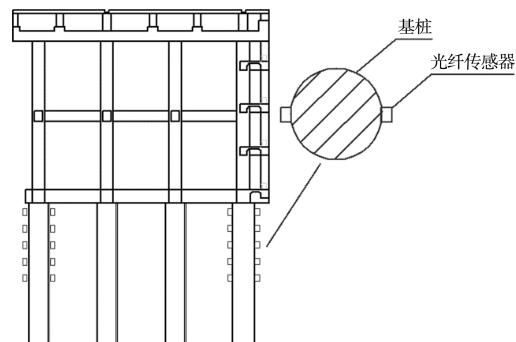


图3 加载位置

本文模型试验在原型高程145~153 m之间布置光纤光栅应变传感器。在每个排架上选择靠江侧3根基桩、靠岸侧1根基桩, 拟定传感器安装的基桩见图4a), 在基桩上对称布置, 形式见图4b)。模型试验监测数据采集设备使用Dewesoft动态数据采集系统。前排3根基桩自左至右的编号为Z₁、Z₂、Z₃, 后排待测基桩编号为Z₄。



a) 布设基桩



b) 布置形式

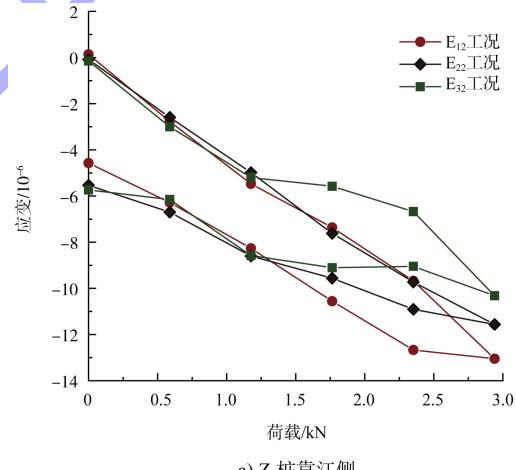
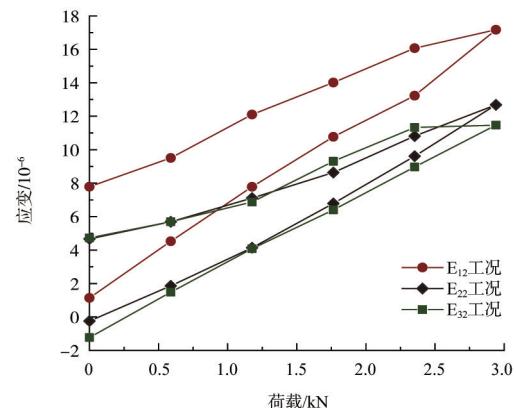
图4 传感器布设基桩及布置形式

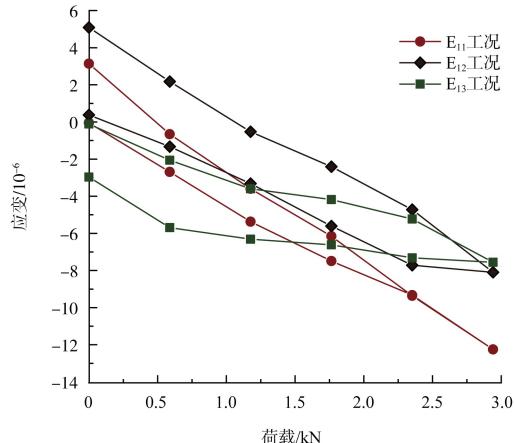
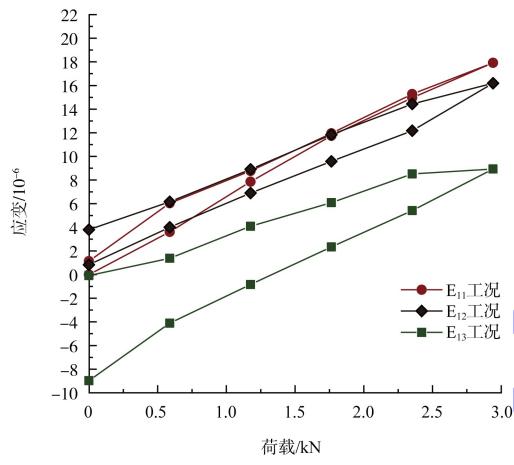
1.3 试验结果分析

1.3.1 水平荷载下应变监测数据

剔除部分误差较大的数据后, 总共得到29组较好的应变数据。

依据试验方案, 选取施加水平方向荷载后得到的Z₁桩同一区域监测数据结果见图5、6。其他桩结果与该桩有相似性, 不再赘述。

a) Z₁桩靠江侧b) Z₁桩靠岸侧图5 Z₁桩E₁₂、E₂₂、E₃₂工况竖向应变-荷载关系曲线

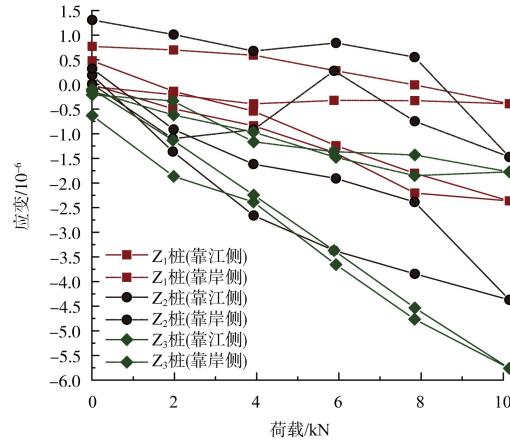
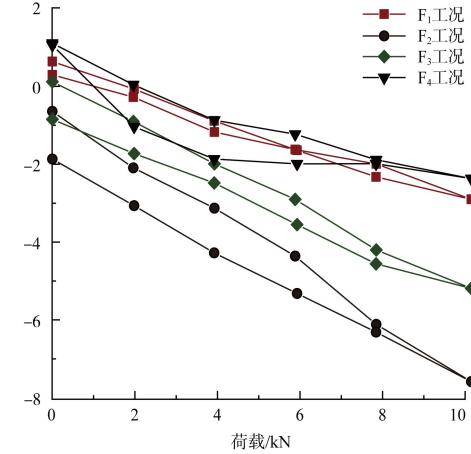
a) Z_1 桩靠江侧图 6 Z_1 桩 E_{11} 、 E_{12} 、 E_{13} 工况水平应变-荷载关系曲线

由数据可知：同一基桩靠岸侧轴向应变整体大于靠江侧，二者应变数值均有明显变化，靠江侧轴向应变变化规律相似，而靠岸侧无统一变化规律；靠江侧应变沿高程变化比靠岸侧应变沿高程变化更加明显，后者整体变化无明显特征，就损伤反演来看，前者更具识别性。

1.3.2 竖向荷载下应变监测数据

依据试验方案，施加竖向荷载后得到基桩同一区域监测数据结果见图 7、8。

待测基桩受相邻跨竖向作用影响最大，竖向作用位置越近，轴向应变越趋于线性变化。靠江侧轴向应变变化明显大于靠岸侧。

图 7 F_3 工况下应变-荷载关系曲线图 8 前排 Z_2 桩竖向荷载下应变-荷载关系曲线

综上，对于水平荷载，待测基桩整体产生应变变化更大；对于竖向荷载，待测基桩整体产生轴向应变变化偏小，基桩对于水平荷载反映更加灵敏。且二者靠江侧均比靠岸侧变化更加明显， Z_2 桩相对其他桩在各工况下轴向应变特征更明显。就损伤反演来看，靠江侧监测数据能够作为样本数据集输入，可将靠江侧监测数据代入反演模型进行分析。

2 损伤诱因反演效果分析

2.1 反演模型建立及评价指标

通过以上模型试验结果，物理模型试验已采集应变样本可对损伤诱因的作用类型、强度、位置进行反演。

随机森林既可以处理回归问题, 也可以处理分类问题, 而回归问题与分类问题本质上都是要建立映射关系: 假定输入源轴向应变的集合为 X , 所有损伤诱因作用的参数集合为 $Y(X, Y \subseteq \mathbf{R})$, 则其映射关系可表示为:

$$f(x) = y \quad (x \in X, y \in Y) \quad (1)$$

反演目的是构造反演模型 f , 使得对于每一组轴向应变数据的集合 X_i , 均能准确得到对应的 Y_i 。随机森林算法根据损失函数达最小的原则建立决策树模型, 包括 3 个基本步骤: 属性选择、决策树的生成与剪枝^[10]。

随机森林处理分类问题原理^[11-12]为: 首先, 从原始训练集中随机选取 k 个样本; 然后, 分别建立决策树模型, 形成多分类模型体系; 得到 k 个样本的分类结果, 该系统的最终分类结果采用简单多数投票法, 最后, 确定分类:

$$H(X) = \operatorname{argmax}_{h_i(x) = Y} \sum_{i=1}^k I(h_i(x)) \quad (2)$$

式中: $H(X)$ 为组合分类模型; h_i 为单决策树分类模型; Y 为输出变量(或称目标变量); $I(x)$ 为线性函数。

随机森林处理回归问题原理为: 假设训练集是从随机向量 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 分布中独立提取出来的, 给定一组分类模型 $h_i(x)$, 每个分类模型的训练集都是从原始数据集 (X, Y) 随机抽样所得。令 $h_i(x)$ 表示其中一个决策树的回归预测值, 然后对决策树的回归预测值取平均得到随机森林回归的预测值:

$$H(x) = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h h_i(x) \quad (3)$$

式中: h 为单决策树分类模型的数量。

损伤诱因反演基本思路见图 9。基于 Python 语言构建码头损伤诱因反演模型见图 10。

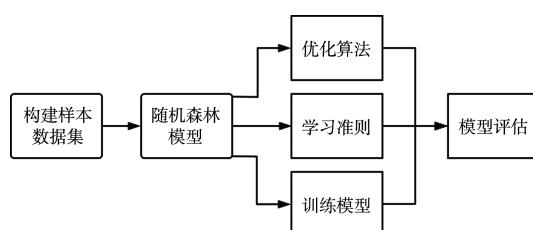


图 9 损伤诱因反演思路

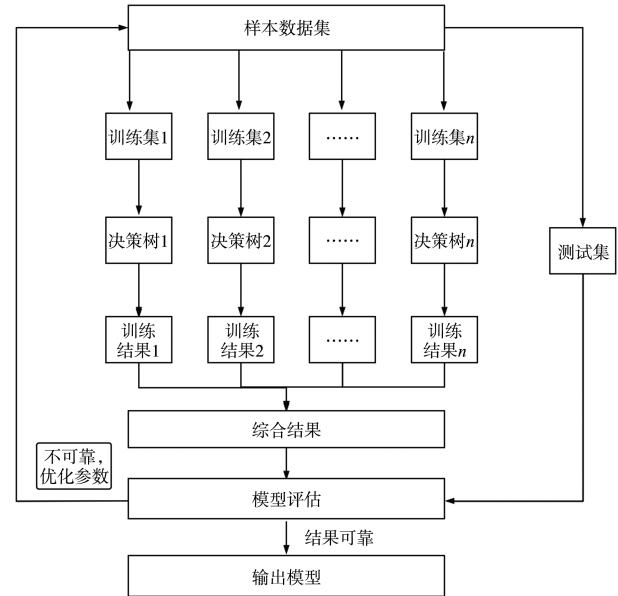


图 10 碼头损伤诱因反演模型

反演模型输入源 X 为靠江侧轴向应变, 基于数据特征和数据可靠度分析, 采用 Z_2 桩靠江侧连续 5 个应变值作为输入源。输出为模型损伤诱因的作用类型、作用强度和作用位置。

本文反演模型监测样本采集共 124 548 条。其中测试样本集 24 910 条, 训练样本集 99 638 条。训练样本集和测试样本集为 4:1。反演模型主要优化策略选择为样本数据预处理, 预先筛选样本数据。将数据预处理后得到的损伤诱因作用样本数据集编号为 1 竖向、2 竖向、3 竖向、4 竖向、1 水平、2 水平、3 水平后载入随机森林反演模型。

分类问题采用精度、 F_1 值、汉明损失作为评估指标。回归问题采用拟合优度 R^2 、平均绝对百分比误差 MAPE、平均绝对误差 MAE^[13] 作为评估指标。

2.2 分类问题反演结果

分类问题的反演结果见表 1。

表 1 分类问题反演结果

数据集	输出	样本数	精度	F_1	汉明损失
训练数据集	损伤类型	99 638	1.00	1.00	0.000
数据集	损伤位置	99 638	0.99	0.99	1×10^{-6}
测试数据集	损伤类型	24 910	0.99	0.99	0.008
数据集	损伤位置	24 910	0.98	0.98	0.005

对于损伤作用类型分类，按水平作用和竖向作用定义热编码共 2 个分别为 10、01。随机从样本测试集抽取 10 个样本与反演模型预测做比较，结果见表 2，抽取 50 个样本与反演模型预测结果也完全一致。

表 2 作用类型预测对比结果

输入源(归一化)	实际值	预测值	结果
{0.36, 0.53, 0.49, 0.43, 0.48}	01	01	正确
{0.41, 0.57, 0.54, 0.45, 0.49}	10	10	正确
{0.30, 0.46, 0.41, 0.39, 0.44}	10	10	正确
{0.30, 0.50, 0.49, 0.41, 0.47}	10	10	正确
{0.45, 0.63, 0.58, 0.50, 0.54}	10	10	正确
{0.28, 0.43, 0.41, 0.37, 0.41}	01	01	正确
{0.42, 0.58, 0.54, 0.46, 0.49}	10	10	正确
{0.29, 0.50, 0.48, 0.41, 0.47}	10	10	正确
{0.38, 0.51, 0.47, 0.43, 0.54}	10	10	正确
{0.43, 0.57, 0.48, 0.46, 0.50}	10	10	正确

对于损伤作用位置分类，按排列顺序输出水平作用低、中、高水位，竖向作用第 1~4 跨独热编码共 7 个，分别为 1000000、0100000…0000001 表示。从样本测试集随机抽取 10 个样本与反演模型预测比较，结果见表 3，抽取 50 个样本与反演模型预测结果也完全一致。

表 3 作用位置预测对比结果

输入源(归一化)	测试值	预测值	结果
{0.36, 0.52, 0.51, 0.42, 0.45}	0100000	0100000	正确
{0.40, 0.56, 0.54, 0.45, 0.49}	0010000	0010000	正确
{0.31, 0.47, 0.45, 0.39, 0.44}	1000000	1000000	正确
{0.38, 0.52, 0.51, 0.46, 0.48}	0100000	0100000	正确
{0.11, 0.20, 0.10, 0.13, 0.10}	0010000	0010000	正确
{0.36, 0.52, 0.48, 0.39, 0.41}	0000010	0000010	正确
{0.25, 0.45, 0.44, 0.39, 0.44}	0000100	0000100	正确
{0.32, 0.46, 0.42, 0.39, 0.49}	0010000	0010000	正确
{0.41, 0.52, 0.47, 0.44, 0.55}	0100000	0100000	正确
{0.66, 0.77, 0.68, 0.68, 0.76}	0001000	0001000	正确

通过以上结果分析可知，对于反演模型的损伤作用类型反演，训练集识别精度达到 1，测试样本的识别精度也达到 0.99；此外训练集与测试集 F_1 指标和汉明损失指标良好，训练集和测试集的各项指标相差较小；50 个随机样本预测均与测试

样本实际相同。说明反演模型能够准确识别损伤作用的水平和竖向的作用类型。

对于反演模型的损伤作用位置反演，训练集识别精度达到 0.99，测试样本的识别精度也达到 0.98，50 个随机样本预测均与测试样本实际相同；此外训练集与测试集 F_1 指标和汉明损失指标良好，训练集和测试集的各项指标相差较小。

2.3 回归问题反演结果

回归问题的反演结果见表 4。

表 4 回归问题反演结果

数据集	样本数	R^2	平均绝对百分比误差/%	平均绝对误差
训练数据集	99 638	0.998	0.323	2.74
测试数据集	24 910	0.986	1.110	7.46

对于损伤作用强度识别，即回归问题，从样本测试集随机抽取 10 个样本与反演模型预测比较，结果见表 5；从样本测试集随机抽取 50 个样本与反演模型预测比较，结果见图 11。

表 5 作用强度预测对比结果

输入源(归一化)	实际值/N	预测值/N	绝对误差/N
{0.36, 0.53, 0.49, 0.43, 0.48}	1 032.7	1 039.6	6.9
{0.41, 0.57, 0.54, 0.45, 0.49}	1 985.1	1 976.1	-9.0
{0.30, 0.46, 0.41, 0.39, 0.44}	2 349.5	2 251.4	98.1
{0.30, 0.50, 0.49, 0.41, 0.47}	1 194.9	1 197.0	2.1
{0.45, 0.63, 0.58, 0.50, 0.54}	378.2	484.3	106.1
{0.28, 0.43, 0.41, 0.37, 0.41}	2 077.2	2 178.5	101.3
{0.42, 0.58, 0.54, 0.46, 0.49}	1 746.6	1 824.1	77.5
{0.29, 0.50, 0.48, 0.41, 0.47}	1 198.2	1 199.8	1.6
{0.38, 0.51, 0.47, 0.43, 0.54}	2 452.3	2 391.1	-61.2
{0.43, 0.57, 0.48, 0.46, 0.50}	546.2	650.7	104.5

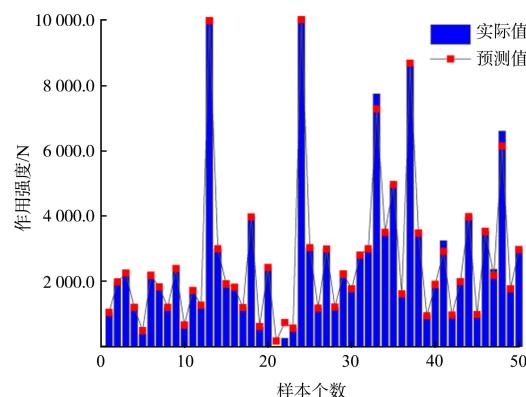


图 11 损伤作用强度反演结果

对于损伤作用强度识别, 训练集 R^2 指标达到 0.998, 测试样本的 R^2 指标也达到 0.986, 训练集绝对百分比误差在 0.323%, 测试集稍高在 1.110%; 训练集和测试集绝对误差比较接近, 测试集稍高, 分别是 27.4 和 74.6 N; 50 个随机样本预测均与测试样本作用强度大体相同, 在一些较高和较低的数据会有个位数到十位数误差, 说明反演模型对于数值较大或较小的损伤作用精度相对较低, 其余大部分数据均精确至个位数。以上预测数据均能达到损伤诱因反演精度要求。

3 结论

1) 物理模型试验结果符合基桩在水平和竖向受力作用下的受力特性。基桩对于水平荷载反应更加灵敏, 靠江侧均比靠岸侧变化更加明显。而对于此次反演数据集的建立, 靠江侧监测数据适合作为样本数据集输入, 可将靠江侧监测数据代入反演模型分析。

2) 对于分类问题, 损伤作用类型的反演精度达到 0.99, 说明反演模型能够精准的分类水平方向和竖直方向两种损伤诱因。损伤作用位置的反演精度达到 0.98, 能准确地反演出水平作用的高、中、低水位和竖向荷载的 1、2、3、4 跨的堆货区域。

3) 对于回归问题损伤强度的反演, R^2 指标达到 0.99。并且通过对随机抽取的 50 个样本进行反演预测, 得到反演结果较为精确。随机森林反演模型能够对物理模型水平作用和竖向作用的类型、位置、强度进行较为准确的预测。

参考文献:

- [1] GIODA G, SAKURAI S. Back analysis procedures for the interpretation of field measurements in geomechanics[J]. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 1987, 11(6): 555-583.
- [2] KIRSTEN H A D. Determination of rock mass elastic moduli by back analysis of deformation measurement[C]// Proceedings of Symposium on Exploration for Rock Engineering. Johannesburg: [s. n.], 1976: 1154-1160.
- [3] 李守巨, 刘迎曦, 孙伟. 智能计算与参数反演[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [4] 袁勇, 孙钧. 岩体本构模型反演识别理论及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1993(3): 232-239.
- [5] 张俊红, 李世海, 许利凯, 等. 海港码头大管桩力学特性的实验测试与反演研究[J]. 港工技术, 2006 (4): 21-23.
- [6] 刘兹胜, 卓杨, 时蓓玲, 等. 高桩码头桩基在倾斜泥面中的水平承载性能研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(12): 1861-1867.
- [7] 曹师宝. 三峡库区架空直立式码头损伤诱因反演分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
- [8] 中国建筑科学研究院. 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [9] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 港口工程荷载规范: JTS 144-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [10] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [11] 董红瑶, 王奕丹, 李丽红. 随机森林优化算法综述[J]. 信息与电脑(理论版), 2021, 33(17): 34-37.
- [12] 方匡南, 吴见彬, 朱建平, 等. 随机森林方法研究综述[J]. 统计与信息论坛, 2011, 26(3): 32-38.
- [13] KINGMA D, BA J. Adam: a method for stochastic optimization[J]. Computer science, 2014, 480(1): 1-15.

(本文编辑 王璁)