

预制出筋叠合板缺陷冲击回波频谱特征无损识别技术研究*

Research on Non Destructive Identification Technology of Impact Echo Spectral Characteristics of Defects in Prefabricated Reinforced Composite Plates

胡勇军

(广东碧桂园职业学院, 广东 清远 511510)

摘要: 针对红外成像与超声波技术在识别出筋叠合板缺陷时存在的无损识别率低及缺陷参数识别不准确等问题, 提出预制出筋叠合板缺陷冲击回波频谱特征的无损识别技术。分析冲击锤直径与冲击响应之间的线性关系, 结合叠合板的结构参数对冲击波信号的传播路径与频率特性进行优化。根据优化结果分析冲击回波信号的时域与频域特征, 通过优化时频特征识别算法, 有效减少了频域中的干扰成分。利用小波技术对优化的时频特征进行分解, 揭示了黏结质量对频谱图像及能量特征的具体影响规律。结果表明: 提出的无损识别技术对于预制出筋叠合板缺陷的识别率均高于 90%, 最高可达 96.2%, 展现出优异的识别效率。研究成果可为预制出筋叠合板构件缺陷的无损检测提供有力的技术参考。

关键词: 冲击回波法; 缺陷无损识别; 出筋叠合板; 时频域特征; 小波分解

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 06-0155-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.06.028

HU Yongjun

(Guangdong Country Garden Polytechnic, Qingyuan 511510, China)

Abstract: Aiming at the problems of low non-destructive identification rate and inaccurate identification of defect parameters in identifying defects in reinforced composite panels using infrared imaging and ultrasonic technology, a non-destructive identification technology based on the pre-fabricated impact echo spectrum characteristics of reinforced composite panel defects is proposed. Analyze the linear relationship between the diameter of the impact hammer and the impact response, and optimize the propagation path and frequency characteristics of the shock wave signal by combining the structural parameters of the composite plate. Based on the optimization results, the time-domain and frequency-domain characteristics of the shock echo signal were received and analyzed in depth. By optimizing the time-frequency feature recognition algorithm, the interference components in the frequency domain were effectively reduced. By using wavelet technology to decompose the optimized time-frequency characteristics, the specific impact of bonding quality on spectral images and energy features was revealed. The results show that the proposed non-destructive identification technology has a recognition rate of over 90% for defects in prefabricated reinforced composite panels, with a maximum of 96.2%, demonstrating excellent recognition efficiency. The research results can provide powerful technical references for non-destructive testing of defects in prefabricated reinforced composite panel components.

* 基金项目: 广东省高等职业教育品牌专业建设项目 (粤教职函〔2018〕194 号); 广东省高水平专业群建设项目 (GSPZYQ2021008); 2022—2023 学年校级高等职业教育质量工程建设项目 (2023JG16)。

作者简介: 胡勇军 (1988—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 建筑工程施工与管理。

收稿日期: 2023-06-20

研究与应用

Keywords: impact echo method; non destructive identification of defects; reinforced laminated plate; time frequency domain characteristics; wavelet decomposition

0 引言

在现代建筑工程中,预制出筋叠合板由于其在提高建筑质量、缩短施工周期以及节能环保等方面的显著优势,得到了日益广泛的应用^[1]。然而,在预制出筋叠合板的生产、运输和安装过程中,不可避免地会出现各种缺陷,如内部孔洞、裂缝、钢筋与混凝土的粘结不良等^[2]。这些缺陷的存在会严重影响叠合板的力学性能和耐久性,进而危及整个建筑结构的安全。传统的检测方法,如钻芯法和破损检测,虽然能够直观地检测缺陷,但会对叠合板造成一定程度的破坏,不利于其在工程中的继续使用^[3-5]。而无损检测技术能够在不破坏结构的前提下对内部缺陷进行检测。冲击回波法作为一种新兴的无损检测技术,通过分析冲击产生的应力波在结构中的传播特性及反射波频谱特征来识别缺陷^[6]。但目前针对预制出筋叠合板这一特殊结构的冲击回波频谱特征与缺陷的关系研究尚不充分,难以实现准确有效的缺陷识别^[7]。因此,开展基于预制出筋叠合板缺陷冲击回波频谱特征的无损识别技术研究具有重要的工程应用价值。

孙兆霖等^[8]提出基于 GPR 和 PAUT 的叠合板缺陷无损检测方法,制备单层配筋叠合板和双层配筋桁架叠合板,这两种板型难以完全代表实际工程中各种复杂结构、不同材料配比、不同工艺下的叠合板情况,从而影响检测方法的普适性;蒋保等^[9]提出基于冲击回波和超声断面成像技术的叠合板缺陷无损检测方法,利用冲击回波法所得的名义厚度估算值与频谱特征解析,能够精确辨识出试件模型内预设的不同规格缺陷,但受环境因素(如温度、湿度、承载压力等)、材料不均匀性等方面影响,准确性难以保证;郑丹等^[10]选用红外探测技术,结合红外热像技术和增强图像识别算法进行改进,对叠合板缺陷进行红外探测与热像缺陷特征图像识别,并结合时域图像检测叠合板厚度与缺陷参数等,但该方法对叠合板材料导热性能不良,缺陷识别率不高;

许鑫浩等^[11]采用超声检测法对叠合板发射超声波干扰信号进行缺陷检测,同时利用相控阵列超声检测法对高密度材料区域进行内部探测,提高超声波检测精度,但该方法对叠合板材料分层密度不敏感,缺陷检测数据不准确,无明显识别效果。

冲击回波频谱特征无损识别技术,其原理在于通过在被测材料表面施加瞬间冲击力,产生低频应力波^[12]。当这些波遇到材料内部的缺陷或界面时,会发生反射,反射信号被传感器捕获并进行频谱分析^[13]。通过分析频谱图中的明显峰值,可以识别出由冲击表面、缺陷及其它外表面之间的多次反射产生的瞬态共振,从而确定结构内部的缺陷位置和尺寸^[14-15]。在预制出筋叠合板缺陷识别中,冲击回波频谱特征无损识别技术仅需一个测试面就能够实现深入测试,有效解决了深部位点测试难的问题。此外,该技术使用的声波频率低,避免了高信号杂波的干扰,提高了检测精度。因此,冲击回波频谱特征无损识别技术是预制出筋叠合板缺陷检测的一种高效、可靠的方法。

1 冲击回波频谱特征识别技术

1.1 冲击回波技术原理

冲击回波测量技术是应用于混凝土叠合板等建筑构件缺陷检测的一种方法^[3-4],通过发射冲击波在测量物体内部产生共振,经过反馈信号波识别震动频率,计算分析检测物体各部分结构厚度、缺陷深度等信息。冲击回波应用原理如图 1 所示。

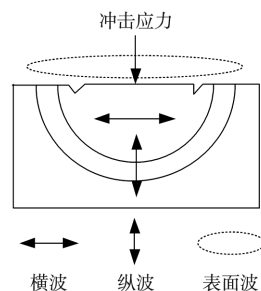


图 1 冲击回波技术原理示意

Fig. 1 Schematic diagram of shock echo technology principle

发射的冲击波不会形成弹性冲击回波, 冲击波分为纵波、横波与表面波三种形式, 纵波与横波穿透到物体内部形成波动延伸状传播, 可测量目标物体的法向应力和剪切应力; 表面波发射到物体表面被拦截形成体表扰动, 可用于测量物体表面预应力。

冲击锤击打出筋叠合板表面会瞬间产生冲击应力, 在遇到缺陷或开裂部位时产生反射, 形成一个振动位移信号波, 接收器接到信号波对其进行振幅频率转换, 采用傅里叶变换公式测量叠合板构件缺陷部位深度:

$$B = \frac{bv_b}{2f} \quad (1)$$

式中: B 为叠合板构件厚度; b 为叠合板体积的结构系数, 一般取值为 0.96; v_b 为叠合板表面波传播波速, m/s; f 为冲击回波频谱中测量反射波的主频峰值。

采用探测扫描仪检测冲击回波信号, 根据目标叠合板结构体量调试信号采频参数, 按顺序对叠合板表面划分探测区域, 接收到冲击回波信号并进行波速标记, 便于更精准识别与计算反射信号波测量所得缺陷区域的厚度回波频率。

1.2 冲击回波频率确定

针对出筋叠合板构件缺陷无损测量, 运用冲击回波的波速确定选择用间接确定法。首先测量出筋叠合板实心板的厚度, 根据厚度与探测面积调试冲击回波参数。进行冲击回波缺陷探测主要有三个关键参数; 冲击锤尺寸、冲击动能与冲击时间。在进行冲击探测过程中, 冲击锤尺寸不同会发射出不同传播范围的冲击弹性波, 冲击动能大小影响冲击波的传播势能, 冲击时间则影响冲击回波速度信号接收量。以这三个参数为基础进行冲击回波波速间接确定, 设定冲击时间与冲击锤直径尺寸呈线性函数关系, 冲击锤下落到叠合板的冲击高度用 h 表示, 则冲击时间计算公式为:

$$t = \frac{0.0043B}{h^{0.1}} \quad (2)$$

式中: t 为计算所得冲击锤运行的冲击时间, 一般条件下 h 取值 0.5 ~ 4 m。冲击产生的弹性应力波频率取决于冲击动能与冲击时间关系, 目前冲击锤振动

频率普遍为冲击时间的 125%, 则可以推断出最大冲击回波频率与冲击锤直径尺寸的关系公式为:

$$F = \frac{291}{B} \quad (3)$$

式中: F 为最大冲击回波频率, 单位为 Hz。根据上述公式分析可知, 在相同的冲击动能控制下, 冲击锤直径越小, 落在叠合板上的冲击点的应力越集中, 产生冲击回波的频率越高, 向叠合板内部与表面扩散的力体量越多, 对叠合板纵深厚度测量效果越差; 同时受到叠合板内部结构与密度不均匀影响, 冲击回波分散情况更严重, 反馈到接收器的冲击回波信号越差, 探测结果不佳。

因此, 需要根据探测叠合板结构与厚度选择合适的冲击锤, 能够更精准控制冲击回波频率大小, 得到清晰准确的缺陷回波探测信号。

2 预制出筋叠合板构件缺陷冲击回波频谱特征无损识别

2.1 冲击回波时频域波谱特征识别

首先对出筋叠合板进行冲击试验, 获取叠合板构件冲击回波信号, 根据时频域特征频谱分析识别缺陷部分。

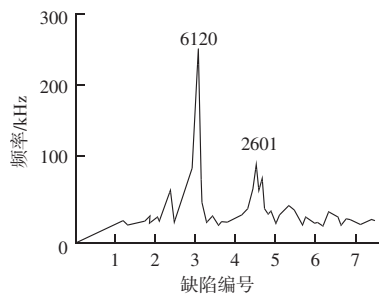
(1) 频域分析。对采集到的叠合板冲击回波信号进行傅里叶变换, 计算出冲击回波厚度频率:

$$F_b = \frac{\omega v}{2T} \quad (4)$$

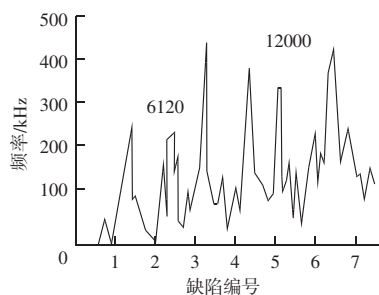
式中: F_b 为冲击回波厚度频率; ω 为叠合板横截面厚度系数; v 为叠合板材料内部传播波速; T 为叠合板厚度参数。根据计算所得频率构建冲击回波时程曲线频谱, 图谱中会根据振幅波动大小产生不同峰值, 峰值大小为冲击波探测到叠合板界面缺陷部位, 材料断裂等部位产生反射回波形成的^[12]。目前主要有 ND 和 DE 两种频谱图像, 如图 2 所示。

ND 图谱中峰值数量较少, 且峰值极差较大。其信号波主要为叠合板表面波信号反射回波, 缺陷部位反射频率变化不明显, 反射系数较小。DE 频谱中峰值数量很多, 且有明显的频率数值变化, 能够明显表达出叠合板结构厚度中存在的缺陷信息, 特别是在不同密度层次材料内部, 反射信号的传播速度会有明显变化。

研究与应用



(a) ND 频域



(b) DE 频域

图2 频域特征图谱图像

Fig. 2 Frequency domain feature map image

(2) 时域分析。接收采集冲击波发射到叠合板表面,产生冲击波并反射回波到信号接收器的总时长。根据冲击回波在材料内部结构中的传播频率,可计算构建缺陷部分的损坏尺度:

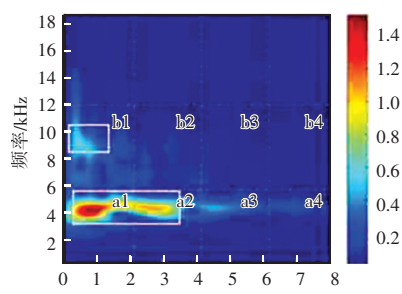
$$H = \frac{\omega v_p t'}{2} \quad (5)$$

式中: H 为测量所得缺陷部分损坏尺度; v_p 为信号探测纵波的传播速度; t' 为反射波发射到接收器的总时长。将时域特征与频域图谱相结合,形成具有时域特征的能量冲击回波频域图谱,将频域信号峰值与时域关系相结合,更清晰地突出缺陷部分回波信号分布位置,如图3所示。

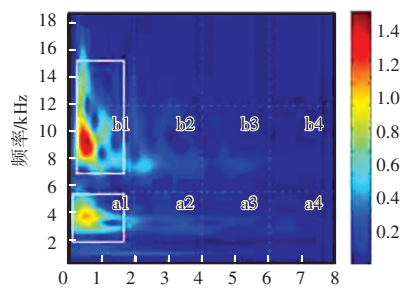
2.2 基于频谱特征分解的缺陷无损识别

采用小波分解方法对冲击回波时频域特征图谱进行分析,根据时域与关系结构确定小波分解固定窗口,代入时频域特征构建小波分解树,如图4所示,按照冲击回波频率变化确定分解树的分支关系,每个子节点包含大量频谱特征信号。

第一级为冲击回波信号原始输入数据,二级分支点表示低频冲击回波信号,三级分支代表高频波动回波信号,例如频域峰值信号。每一层之间的分



(a) ND 时频域



(b) DE 时频域

图3 时频域特征图谱

Fig. 3 Time frequency domain feature map

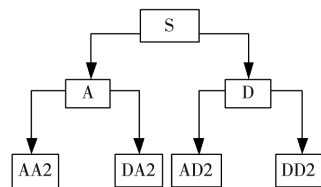


图4 时频域特征小波分解树

Fig. 4 Time frequency domain feature wavelet decomposition tree

层关系通过小波频带进行等量划分,小波频带计算公式如下:

$$E_i = \sum_{i=1}^n E_i^n \quad (6)$$

式中: E_i 为不同层级的小波频带能量; E_i^n 为在该层级不同序列节点的小波能量系数; n 为小波层级数量。每个小波系数节点包含不同信号特征,可反应该频带区间特征频谱信号强弱。根据冲击回波时频域特征频带,利用小波分解对不同黏结状态下的信号频谱进行能量特征频带分析,如图5所示。

按照时频划分频段对冲击回波小波频带进行分解,分析可知黏结质量较低的图谱低频区域比例较大,信号波传播频率趋于规律化,冲击回波信号值平滑,叠合板构件缺陷分布较少,损失程度低;黏结质量高的图谱表明高频域比例大,冲击回波信号峰值多、密度大,则缺陷损坏数量大且程度深。

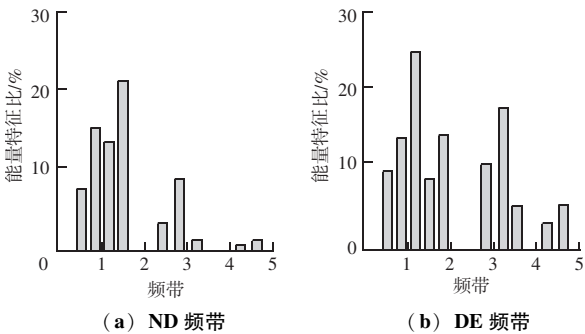


图 5 频带能量特征图谱
Fig. 5 Frequency band energy characteristic map

同时，在小波分解缺陷无损识别过程中，特征图谱维度越多，对探测目标物体缺陷识别越准确，并经过小波频带能量特征分析，可以弱化冲击回波信号反射过程中单一维度的干扰噪声影响，精简突出缺陷状况部位的时频域信号特征识别与描述，使叠合板构件缺陷无损识别效果更精确。

3 试验研究

为了验证无损识别技术的实用性，设计仿真试验，预制出筋叠合板进行缺陷布置，采用冲击回波频谱特征无损识别技术检测叠合板缺陷，并与红外图像缺陷检测技术、超声探测缺陷识别技术进行对比，分析该方法在缺陷区域的识别效果。

3.1 出筋叠合板缺陷预制

制作缺陷出筋叠合板构件，叠合板厚度为 160 mm，长宽尺寸分别为 2.5 m、1.5 m。选用混凝土、钢板、预制板、发泡塑料等材料，通过切割钻孔的方式在叠合板表面设置多种缺陷，缺陷设置实况图如图 6 所示。

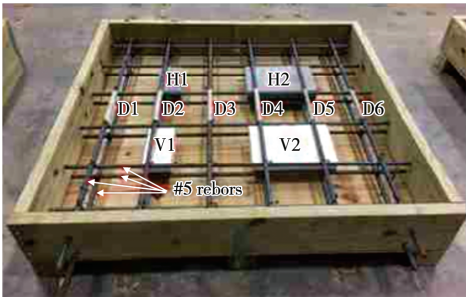


图 6 叠合板缺陷实况图
Fig. 6 Actual situation of defects in laminated boards

叠合板混凝土强度为 C40，根据厚度调试冲击设备参数，控制冲击波速为 4 000 m/s，测量并把控筋叠合板构件缺陷参数，统计缺陷信息数据见表 1。

表 1 出筋叠合板缺陷参数		
Table 1 Defect parameters of reinforced laminated plates		
编号	缺陷材质	缺陷尺寸/mm
V1	发泡塑料	100 × 100 × 10
D1、D5	混凝土加气块	50 × 50 × 5
D2、D4	混凝土加气块	100 × 100 × 10
V2	发泡塑料	100 × 100 × 5
H1	混凝土加气块	200 × 200 × 20
H2	混凝土加气块	150 × 150 × 10
D3、D6	建筑垃圾	50 × 50 × 20

3.2 试验结果与分析

对叠合板进行冲击回波缺陷无损检测，以叠合板中心横向轴线为探测线，如图 7 所示，并利用断面成像设备对接收到的叠合板厚度信息进行处理，统计成像得到叠合板厚度与缺陷尺度参数，如图 8 所示。对叠合板 D1 ~ D6 与 V1、V2 缺陷部分进行区域识别，识别出缺陷位置与实际位置相对应，说明对构件缺陷无损识别定位更准确；基于红外图像识别技术没有

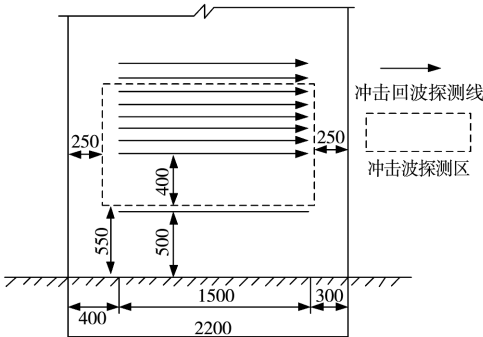


图 7 冲击回波探测示意图
Fig. 7 Schematic diagram of impact echo detection

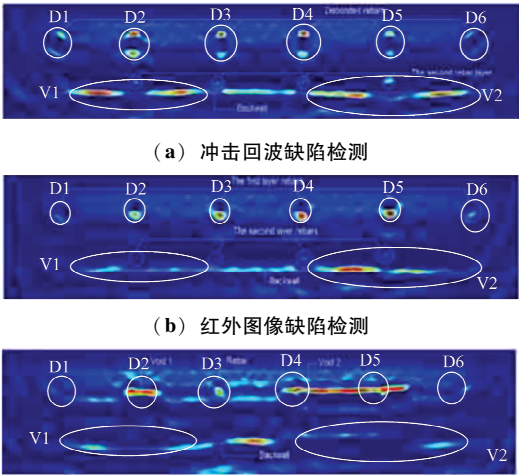


图 8 叠合板缺陷定位识别
Fig. 8 Defect localization and identification of laminated boards

研究与应用

识别出 D1、V1 缺陷；利用超声探测缺陷识别技术没有识别出 D1 缺陷，将 D4~D6 缺陷识别为连续断裂，对下方 V1、V2 缺陷识别错误，定位不清晰，识别结果不准确。缺陷深度无损识别结果如图 9 所示。

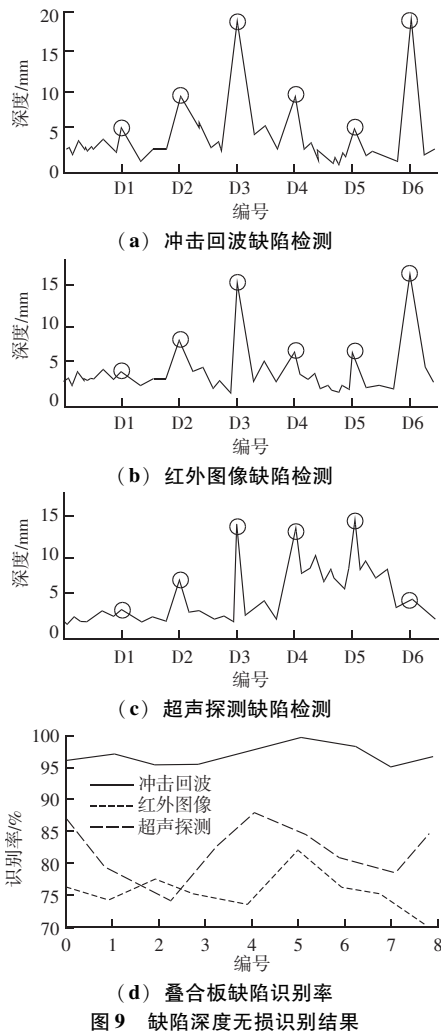


图9 缺陷深度无损识别结果

Fig. 9 Results of non-destructive identification of defect depth

基于冲击回波频谱特征的缺陷识别技术识别率均在 90% 以上，最高可达 96.2%。基于红外图像缺陷检测技术识别率平均值为 76%，最高仅有 81.3%。超声探测缺陷识别技术的识别率平均可达 82.5%，但存在一定的不稳定性，识别率最高为 88.9%，最低为 69.8%，识别率极差较大，影响叠合板缺陷无损识别效率。

综上所述，研究的无损识别技术，不仅能够更真实准确的获取叠合板缺陷区域定位，而且对缺陷位置的识别效率更高，能够更精准地检测出叠合板存在的多处不同类型缺陷，对叠合板本身几乎没有

造成伤害，满足缺陷无损检测技术要求。

4 结束语

文中试验研究通过引入冲击回波频谱特征分析，为预制出筋叠合板缺陷的无损识别提供了新的解决思路。相较于传统方法，该技术不仅显著提高了缺陷的识别准确率，还实现了对缺陷参数的精准量化。通过优化冲击波信号传播路径与频率特性，结合先进的小波分解技术，本研究揭示了缺陷与频谱特征之间的内在联系。试验验证的高识别率表明，该技术具有广阔的应用前景，有望在未来的建筑质量检测中发挥重要作用，为提升建筑结构安全提供坚实的技术支撑。

参 考 文 献

[1] 丁克伟, 张星辰, 刘运林, 等. 负弯矩作用下含角钢连接件的叠合板组合梁力学性能研究 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2022, 45 (12): 1643-1648, 1704.

[2] 文安飞, 张政, 霍志强, 等. 级配再生细骨料及粉煤灰掺量对活性粉末混凝土性能影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (5): 17-21.

[3] 陈劲, 陈晓东, 赵辉, 等. 基于红外热成像法和超声波法的钢管混凝土无损检测技术的试验研究与应用 [J]. 建筑结构学报, 2021 (增刊2): 42-46.

[4] 耿豪劼, 刘荣桂, 蔡东升, 等. 冲击回波法检测混凝土构件内部缺陷大小研究 [J]. 混凝土, 2021, 22 (11) 1-5.

[5] 姚菲, 陆幸奇, 陈光宇. 基于冲击回波法的混凝土-围岩缺陷检测与信号处理研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 79 (10): 31-35.

[6] 崔珑, 刘文政, 张效玲. 装配式混凝土结构叠合构件结合面缺陷检测试验研究 [J]. 建筑技术, 2021 (11): 52-56.

[7] 汪梦甫, 吴曦, 刘泽龙. 两层带新型连接节点预制叠合剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41 (4): 1-12.

[8] 孙兆霖, 杨璐, 马跃飞, 等. 基于 GPR 和 PAUT 的混凝土叠合板无损检测方法研究 [J]. 振动与冲击, 2024, 43 (20): 318-324, 342.

[9] 蒋俣, 魏晓斌, 孙正华, 等. 装配式混凝土叠合构件缺陷无损检测技术研究 [J]. 建筑结构, 2022, 52 (增刊1): 2144-2149.

[10] 郑丹, 谭帅帅. 基于红外图像增强算法的混凝土内部缺陷检测研究 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2021 (11): 17-21.

对比来说,滑坡变形趋势随时间持续具有变化特征,其中,滑坡中部(DD4 监测点)始终具变形增加特征,对应后缘、前缘变形后续具减小趋势,即其变形趋于稳定。

将滑坡变形趋势评价结果与预测结果对比,两者对滑坡后续变形特征分析结果具有较优的一致性,即在滑坡主滑面上,滑坡后缘、前缘的变形速率将趋于减弱,即累计变形趋于稳定,但滑坡中部的变形速率虽具减小趋势,但也具增加特征,累计变形仍趋于不利。

3 结论

通过老滑坡复活成因分析及其后续变形研究,主要得出如下结论:

(1) 老滑坡复活成因相对较多,其中,固有因素包括地层岩性、地形地貌及地质构造,诱发因素包括降雨和人类工程活动,两类因素共同作用造成了滑坡复活。

(2) 在滑坡后续变形研究中,IBA-ELM-CT 模型具有较高的预测精度,并经外推预测,得出滑坡中部监测点的后续变形速率趋于增大,其余 2 个监测点则与之相反;同时,根据 M-K 分析,滑坡中部始终具变形增加特征,对应后缘、前缘变形后续变形趋于稳定。两者结果对比,滑坡变形趋势评价结果与预测结果具有较好的一致性,相互佐证两类方法的准确性。

参 考 文 献

- [1] 李春阳,贾升安,段顺荣. 黄河深切区巨型老滑坡的稳定性评价及后续预警研究 [J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2023, 59 (3): 119-125.
- [2] 王长虹,杜昊东,柳伟,等. 考虑非饱和渗透系数随机场统计特征的库岸老滑坡稳定性分析 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45 (2): 327-335, 443.
- [3] 宋琨,陈伦怡,刘艺梁,等. 降雨诱发深层老滑坡复活变形的动态作用机制 [J]. 地球科学, 2022, 47 (10): 3665-3676.
- [4] 黄金勇,陈志伟,沈艺璇. 库水位下降速率对库岸老滑坡间歇性复活的影响 [J]. 水电能源科学, 2020, 38 (1): 147-150.
- [5] 吴艾祺,宋飞,闵瑶臻,等. 岐山县宋家尧村滑坡基本特征与演化机理分析 [J]. 西北地质, 2019, 52 (2): 190-197.
- [6] 魏昌利,陈亮,杨志华,等. 岷江上游俄寨村滑坡成因与稳定性预测 [J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17 (3): 185-192.
- [7] 曹博,汪帅,宋丹青,等. 基于蚁群算法优化极限学习机模型的滑坡位移预测 [J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33 (2): 172-178.
- [8] 杨芳,杨晓龙,仇新迪,等. 基于双判据联合判别的滑坡监测预警研究 [J]. 人民长江, 2021, 52 (5): 95-100.
- [9] 雷恒,周晓岚,王永强. 基于多重形特征和分项组合预测联合响应的滑坡预警预测研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42 (9): 885-891.
- [10] 廖康,吴益平,李麟玮,等. 基于时间序列与 GWO-ELM 模型的滑坡位移预测 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50 (3): 619-626.
- [11] 李锐鹏,张宁晓,魏中凯. 顾及混沌特征识别的黄土滑坡变形预测与稳定性评价 [J]. 河南科学, 2022, 40 (11): 1802-1810.
- [12] 许鑫浩,徐福泉,刘英利,等. 超声法检测预制构件混凝土内部缺陷的试验研究 [J]. 施工技术, 2021 (10): 76-80.
- [13] 金解放,张琦,袁伟,等. 具有轴向静应力的变截面岩石应力波频散特性 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52 (8): 2622-2633.
- [14] 陈结,陈紫阳,蒲源源. 基于频谱分析和卷积神经网络的岩石声发射信号定位研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41 (增刊 2): 3271-3281.
- [15] 陈伟婷,陆铭慧,朱颖,等. 多层包铁结构超声反射频谱数值仿真 [J]. 压电与声光, 2022, 44 (6): 998-1006.
- [16] 吕立翔,杨卓然,刘剑,等. 基于超声反射法的环氧树脂复合材料内部缺陷检测与频谱分析研究 [J]. 绝缘材料, 2024, 57 (9): 131-139.