

基于脉冲响应函数和虚拟脉冲响应函数的 挡土墙结构损伤诊断*

徐乾¹, 杨超², 陈建功³

- (1. 陕西理工大学土木工程与建筑学院, 陕西 汉中 723001;
2. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002;
3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 为了诊断挡墙结构的损伤, 基于脉冲响应函数及虚拟脉冲响应函数创建损伤特征向量谱、提出损伤识别指标。基于损伤特征向量谱和损伤指标, 提出了一种用于挡墙结构的损伤诊断方法。为了验证该损伤诊断方法的可行性和有效性, 对某桩板式挡墙进行了脉冲激励和环境激励下的振动测试, 通过损伤特征向量谱和损伤指标诊断其损伤。试验结果表明: 基于损伤特征向量谱可敏感判别挡墙损伤状态, 通过损伤指标走势曲面图可有效诊断挡墙损伤位置, 通过损伤指标与损伤程度间的定量关系可定量识别挡墙损伤程度。受激励影响, 脉冲激励下基于脉冲响应函数的损伤指标稳定性相对较差, 而环境激励下基于虚拟脉冲响应函数的损伤指标稳定性相对较强。

关键词: 挡土墙; 损伤诊断; 损伤指标; 脉冲响应函数; 虚拟脉冲响应函数

中图分类号: TU317 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2018) 03-0164-08

Damage diagnosis of retaining wall structures based on impulse response function and virtual impulse response function

XU Qian¹, YANG Chao², CHEN Jianguo³

- (1. School of Civil Engineering and Architecture, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China;
2. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: To diagnose damages within retaining wall structures, based on impulse response function and virtual impulse response function, the damage feature vector spectrum was created and a damage identification index was proposed. Based on the damage feature vector spectrum and damage index, a damage diagnosis method for retaining wall structures was proposed. In order to verify the feasibility and validity of this damage diagnosis method, vibration tests on a pile plate retaining wall were performed under impulse excitation and ambient excitation, the damages within the wall were diagnosed via the damage feature vector spectrum and damage index. The tests results show that the damage state of the wall can be sensitively distinguished by the damage feature vector spectrum, damage location of the wall can be valid-

* 收稿日期: 2017-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(41602301); 陕西省教育厅专项科学研究计划(17JK0157); 陕西理工大学人才启动项目(SLGQD2017-4)

作者简介: 徐乾(1986年生), 男; 研究方向: 岩土支挡结构健康诊断及安全预警; E-mail: xuqian20121601014@163.com

通信作者: 陈建功(1967年生), 男; 研究方向: 土木工程结构健康诊断及预警; E-mail: cqucjg@163.com

ly diagnosed through the damage index trend surface, and damage intensity of the wall can be quantitatively identified through the quantitative relationship between the damage index and damage intensity. Due to the influence of excitations, the stability of the damage index which is based on the impulse response function is poor relatively under impulse excitation, while the stability of the damage index which is based on the virtual impulse response function is much better under ambient excitation.

Key words: retaining walls; damage diagnosis; damage index; impulse response function; virtual impulse response function

挡土墙作为一种常见的支挡结构, 广泛用于建筑工程、交通工程、地下工程等领域。然而, 在环境侵蚀、材料老化、荷载变异等因素的综合作用下, 损伤(微裂隙、孔洞)会在挡墙内部不断出现并累积; 当这些损伤积累到一定程度, 就可能引发挡墙的破坏或失效。如: 2008 年杭州市地铁地下连续墙倒塌事故, 造成了 21 人丧生、24 人失踪、直接经济损失 4 961 万元; 2012 年福建南安申鹭百米挡墙塌陷, 造成大量民宅被毁、百余村民被迫撤离; 2014 年青岛市一挡墙发生坍塌, 事故造成 18 人死亡、3 人受伤; 2016 年福建泉州一别墅区挡墙坍塌, 造成 2 人死亡、6 人受伤。因此, 有必要定期或实时对挡墙结构的“健康状况”进行诊断, 以期及时发现损伤、及时处理。

目前, 关于土木工程结构的“健康诊断”大都针对梁^[1-2]、板^[3]、柱^[4]等结构构件, 或是建筑结构^[5-6]和桥梁结构等^[7-9]。刘礼标等^[10-11]基于动力参数法识别挡墙损伤。但, 挡墙结构具有大体积、高质量等特点, 损伤(尤其是局部损伤)对其动力参数(如频率、振型等)的影响较为微弱。在观测噪声干扰下, 精确测量频率或振型(尤其是高阶振型)变化十分困难^[12-14]。因此, 基于动力参数的损伤诊断方法仍然无法有效诊断挡墙损伤。而大量研究表明: 基于小波包变换的损伤诊断方法具有良好的损伤敏感性和鲁棒性, 可有效诊断结构损伤^[15-17]。基于此, 本文对挡墙结构系统脉冲响应函数及虚拟脉冲响应函数进行了小波包频带能量谱分析, 创建损伤特征向量谱、提出损伤识别指标, 基于损伤特征向量谱及损伤指标诊断挡墙损伤。

1 损伤识别指标

在外部激励作用下, 结构将产生动力响应。对结构损伤前后动力响应信号进行小波包分析, 可获得损伤信息。当外界激励恒定时, 对结构动力响应信号进行小波包频带能量谱分析, 可诊断结构损伤。然而, 基于响应信号的小波包频带能量谱并不

属于结构系统的固有动力属性; 当外界激励变化时, 基于响应信号的小波包频带能量谱随激励变化而变化。而结构系统激励与响应间脉冲响应函数(以下简称脉冲响应函数)或系统虚拟激励与虚拟响应间虚拟脉冲响应函数(以下简称虚拟脉冲响应函数)则属于结构系统固有属性^[18]。因此, 分别对脉冲响应函数和虚拟脉冲响应函数进行小波包频带能量谱分析, 提出损伤指标。

1.1 脉冲响应函数

对于一个多自由度线性阻尼结构系统, 其运动微分方程为:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F}(t) \quad (1)$$

式(1)中 $\mathbf{M} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 、 $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 、 $\mathbf{K} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 分别表示结构动力系统的质量矩阵、阻尼矩阵以及刚度矩阵。 $\mathbf{U} \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 与 $\mathbf{F} \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 分别为系统的位移矩阵和激励力矩阵。

在瞬时激励 $\mathbf{F}(t)$ 作用下, 结构系统响应为 $\mathbf{U}(t)$, 对激励和响应进行傅里叶变换, 在频域内满足下式:

$$\mathbf{U}(\omega) = \mathbf{H}(\omega) \cdot \mathbf{F}(\omega) \quad (2)$$

式(2)中 $\mathbf{H}(\omega)$ 是频率响应函数, $\mathbf{U}(\omega)$ 和 $\mathbf{F}(\omega)$ 分别为响应 $\mathbf{U}(t)$ 和激励 $\mathbf{F}(t)$ 的傅里叶变换, 其中

$$\mathbf{U}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} \mathbf{U}(t) dt \quad (3)$$

$$\mathbf{F}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} \mathbf{F}(t) dt \quad (4)$$

对频响函数 $\mathbf{H}(\omega)$ 进行傅里叶逆变换, 得到系统激励与响应间的脉冲响应函数 $\mathbf{H}(t)$:

$$\mathbf{H}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} \mathbf{H}(\omega) d\omega \quad (5)$$

通过以上分析可知, 不论激励恒定还是变化, 只要系统激励与响应已知, 即可求得脉冲响应函数。

1.2 虚拟脉冲响应函数

同样, 对于一个多自由度动力系统, 参考点 j 的响应 $u_j(t)$ (虚拟激励)的自谱密度 $G_{uu}(\omega, j)$

为:

$$G_{uu}(\omega, j) = U^*(\omega, j) \cdot U(\omega, j) \quad (6)$$

式(6)中 $U(\omega, j)$ 为虚拟激励 $u_j(t)$ 的傅里叶变换, $U^*(\omega, j)$ 为 $u_j(t)$ 的复共轭。

参考点 j 的响应 $u_j(t)$ 和测点 i 的响应 $u_i(t)$ (虚拟响应) 的互谱密度 $G_{yu}(\omega, i, j)$ 为:

$$G_{yu}(\omega, i, j) = U^*(\omega, j) \cdot U(\omega, i) \quad (7)$$

式(7)中 $U(\omega, i)$ 为响应 $u_i(t)$ 的傅里叶变换。根据激励和响应在频域内的关系, $U(\omega, j)$ 和 $U(\omega, i)$ 可分别表示为:

$$U(\omega, j) = H(\omega, j) \cdot F(\omega) \quad (8)$$

$$U(\omega, i) = H(\omega, i) \cdot F(\omega) \quad (9)$$

然后计算 $u_j(t)$ 和 $u_i(t)$ 间的虚拟频率响应函数 $H_{yu}(\omega, i, j)$:

$$\begin{aligned} H_{yu}(\omega, i, j) &= \frac{G_{yu}(\omega, i, j)}{G_{uu}(\omega, j)} = \frac{U^*(\omega, j) \cdot U(\omega, i)}{U^*(\omega, j) \cdot U(\omega, j)} = \\ &= \frac{(H^*(\omega, j) \cdot F^*(\omega)) \cdot (H(\omega, i) \cdot F(\omega))}{(H^*(\omega, j) \cdot F^*(\omega)) \cdot (H(\omega, j) \cdot F(\omega))} = \\ &= \frac{H^*(\omega, j) \cdot H(\omega, i)}{H^*(\omega, j) \cdot H(\omega, j)} \quad (10) \end{aligned}$$

对 $H_{yu}(\omega, i, j)$ 进行傅里叶逆变换, 即可求得 $u_j(t)$ 和 $u_i(t)$ 间的虚拟脉冲响应函数 $H_{yu}(t, i, j)$:

$$H_{yu}(t, i, j) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} H_{yu}(\omega, i, j) d\omega \quad (11)$$

从以上分析可知, 系统响应间虚拟频率响应函数 $H_{yu}(\omega, i, j)$ 与激励无关。同理可得, 响应间虚拟脉冲响应函数 $H_{yu}(t, i, j)$ 同样与激励无关。当两点响应已知时, 即可求得其虚拟脉冲响应函数。

1.3 损伤特征向量谱

对脉冲响应函数 $H(t)$ 或虚拟脉冲响应函数信号 $H_{yu}(t, i, j)$ 在 l 层尺度空间上进行小波包分解可得:

$$\begin{cases} H = \sum_{j=1}^{2^l} h_{j,l} \\ H_{yu} = \sum_{j=1}^{2^l} h_{yu,j,l} \end{cases} \quad (12)$$

式中, $h_{j,l}$ 和 $h_{yu,j,l}$ 表示 l 层尺度空间上的子频带信号分量。根据小波包频带能量谱理论, 任一子频带信号的能量 E_j 为:

$$\begin{cases} E_j = \sum |h_{j,r}|^2 \\ \text{或} \\ E_j = \sum |h_{yu,j,r}|^2 \end{cases} \quad (r = 1, 2, \dots, l) \quad (13)$$

式中, l 为信号采样点个数。因此, 信号的小波包

频带能量谱 E_l 可表示为:

$$E_l = [E_1 \ E_2 \ \dots \ E_j \ \dots \ E_{2^l}]^T \quad (14)$$

对 E_l 进行归一化处理, 并按大小进行排序后, 形成一个能量比序列 ER_l :

$$ER_l = [ER_1 \ ER_2 \ \dots \ ER_j \ \dots \ ER_{2^l}]^T$$

$$ER_j = \frac{E_j}{\sum_{j=1}^{2^l} E_j} \times 100 \quad (ER_j \geq ER_{j+1}) \quad (15)$$

在 ER_l 基础上, 定义能量比偏差 ERD_k :

$$ERD_k = |ER_k^U - ER_k^D| \quad (k = 1, 2, \dots, 2^l) \quad (16)$$

式中 ER_k^U 和 ER_k^D 分别表示结构无损状态和有损状态下第 k 个频带的能量比。基于 ERD_k 定义小波包频带能量比偏差向量谱 ERD_l :

$$ERD_l = [ERD_1 \ ERD_2 \ \dots \ ERD_j \ \dots \ ERD_{2^l}]^T \quad (17)$$

ERD_l 反映了每个子频带上的能量比变化情况, 若结构未发生损伤, $ERD_l = 0$; 若结构发生损伤, $ERD_l \neq 0$ 。由于观测噪声平均分布在每个子频带上, 那些能量较低频带上的能量比变化会被观测噪声所覆盖, 而无法有效反映损伤信息, 往往只有那些能量较大频带才能有效反映损伤信息。因此取 ER_l 中前 P 个能量比较大的频带, 使相对积累能量比 $\varepsilon_p \leq \varepsilon_0$, 其中 $\varepsilon_p = \sum_{j=1}^P ER_j$, 阈值 ε_0 一般取 85 ~ 95。

识别损伤除 ER_l 中这前 P 个频带外, 剩余的频带对损伤识别的贡献也不容忽视。于是把 ER_l 中剩余的频带合并为一个新的频带, 称之为剩余频带, 并定义其能量比 ER_{p+1} 为:

$$ER_{p+1} = 100 - \sum_{j=1}^P ER_j \quad (18)$$

这 $(P+1)$ 个频带就被称为特征频带, 于是构建小波包损伤特征向量谱 ERD_{p+1} :

$$ERD_{p+1} = [ERD_1 \ ERD_2 \ \dots \ ERD_p]^T \quad (19)$$

当 $ERD_{p+1} = 0$, 表明特征频带能量比无变化, 因此挡墙未发生损伤; 当 $ERD_{p+1} \neq 0$, 表明特征频带能量比已发生变化, 此时挡墙发生损伤。因此, 损伤特征向量谱可用于判别挡墙损伤状态。

基于 ERD_{p+1} , 提出损伤识别指标能量比均方差 $ERSD$:

$$ERSD = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{p+1} (ERD_k)^2}{P+1}} \quad (20)$$

当 $ERSD = 0$ 时, 挡墙结构无损; 当 $ERSD > 0$ 时, 挡墙有损。

2 试验研究

某桩板式挡土墙高 2.2 m、长 3.0 m，墙厚 0.2 m，挡墙锚固深度 0.6 m，墙后填土为杂填土，通过浆砌石约束墙后土体侧向变形，如图 1 中 (a) 所示。试验中损伤可采用降低弹模（如变换材料）、改变构件横截面积（如钻孔、削弱截面尺寸）、弱化构件连接性能等方式进行模拟。本文通过在无损挡墙上钻孔，用孔洞模拟局部损伤。孔洞直径 2 cm、深度为 10 cm，如图 1 中 (b) 中所示。随着孔洞数量的增加，损伤程度逐渐增加，损伤工况如表 1 所示。为了表征局部损伤程度 DI，令 $DI = V_D/V = (N \cdot V_h/V)$ ， N 表示钻孔数量， V_h 表示每个钻孔的体积， V 表示挡墙上局部损伤区域的体积，具体尺寸为 $V = 25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 。当 $DI = 0$ 时，挡墙不存在局部损伤；随着 DI 的增大，局部损伤程度逐渐增加。

表 1 损伤工况

Table 1 Damage cases

工况	1	2	3	4	5	6	7	8
DI/%	0	1.00	2.00	4.02	6.03	8.04	10.05	12.06

(a) 桩板式挡土墙



(b) 局部损伤



图 1 桩板式挡墙

Fig. 1 Pile plate retaining wall

对该挡墙进行脉冲激励和环境激励振动测试，如图 2 所示。施加脉冲激励的装置为 DFC-2 型力锤，该力锤可同步记录锤击脉冲信号。环境激励一般包括：车辆振动荷载、机械振动荷载、风荷载、地震荷载、爆炸荷载等及其组合，往往具有强烈的随机性和不可控制性。为了模拟环境激励，本文采用与文献[19]类似的方法，即通过多点随机激励模拟环境激励。具体做法是：由 3 个不同的实验人员，用不同型号的激励锤在任意 3 个不同的激励点进行连续锤击，如图 2 中 (b) 所示。由于激励锤的个体差异性以及试验人员的相互独立性，模拟激励必然具有较强的随机性和不可控制性，因此模拟的激励更为接近真实环境激励。

(a) 脉冲激励下的挡墙振动测试



(b) 环境激励下的挡墙振动测试



(c) 测点布置图

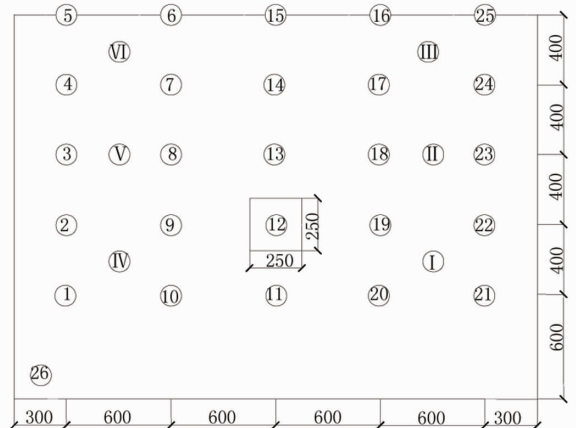


图 2 挡土墙动力测试

Fig. 2 Dynamic tests on the retaining wall

考虑到充足的测试数据是损伤定位精度的保证,在挡墙上布置了 26 个水平加速度传感器(941B 型拾振器)。信号采集系统为 JM3863A 型无线振动测试系统,采样频率 1 024 Hz;振动测试系统将记录的信号通过网关同步传输到计算机进行处理,网关为 JM1802 型无线网关;激励点位置如图 2 中(c)中的 I-VI 点所示。

通过信号处理,得到锤击脉冲与测点(1-25 号测点)响应信号间的脉冲响应函数,以及参考点(26 号测点)与计算点(1-25 号测点)响应信号间虚拟脉冲响应函数,采用 Daubechies18 小波函数对脉冲响应函数和虚拟脉冲响应函数进行小波包分解,分解层次为 7 层,通过阈值($\varepsilon_0 = 95$)确定特征频带数量。特征频带是否能够全面反映损伤信息,可以通过特征频带相对累积能量比这一指标来判断。以 12 号测点为例,当挡墙无损时,其脉冲响应函数前 5 阶特征频带的累积能量比占总能量比的 90%~95%,如图 3 中(a)所示。这说明,小波包频带能量谱的能量主要集中在少数频带上,而多数频带的能量则较小。另一方面,有损挡墙按照无损挡墙的频带阶次计算相对累积能量比时,前 5 阶频带的相对累积能量比与完好挡土墙基本相同。这说明,采用无损挡土墙确定的损伤特征频带可以有效地提取挡土墙损伤前后主要频带的能量信息,所选取的能量比积累阈值是合适的,由此确定的损伤特征频带能够较好地反映挡土墙的损伤信息。类似的,通过图 3 中的(b)也可得到相同的结论。

2.1 判别挡墙损伤状态

基于脉冲响应函数和虚拟脉冲响应函数,构建小波包损伤特征向量谱,如图 4-5 所示。如前所述,当损伤特征向量谱为零向量时,挡墙不存在损伤;当损伤特征向量谱为非零向量时,挡墙存在损伤。因此,基于脉冲响应函数和虚拟脉冲响应函数的小波包损伤特征向量谱均可判别挡墙损伤状态。然而,受损伤位置以及激励点位置等因素的影响,不同测点的损伤特征向量谱对损伤的敏感性不尽相同,如:7 号测点对损伤的敏感性相对较弱,而位于损伤区域的 12 号测点则具有良好的损伤敏感性。

2.2 诊断挡墙损伤位置

对于一个结构动力系统而言,结构局部刚度的变化必然引起系统动力响应的变化,且响应在局部刚度突变处变化尤为剧烈。同理,基于脉冲响应函数和虚拟脉冲响应函数的损伤指标在刚度变化处必然发生突变,据此诊断挡墙损伤位置。首先,计算

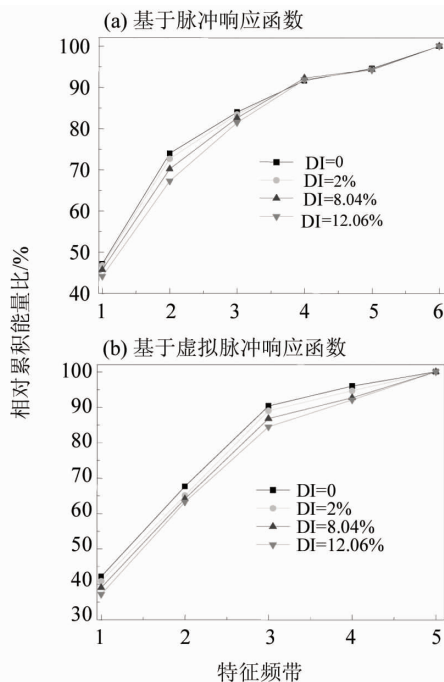


图 3 相对累积能量比

Fig. 3 Relative cumulate energy ratio

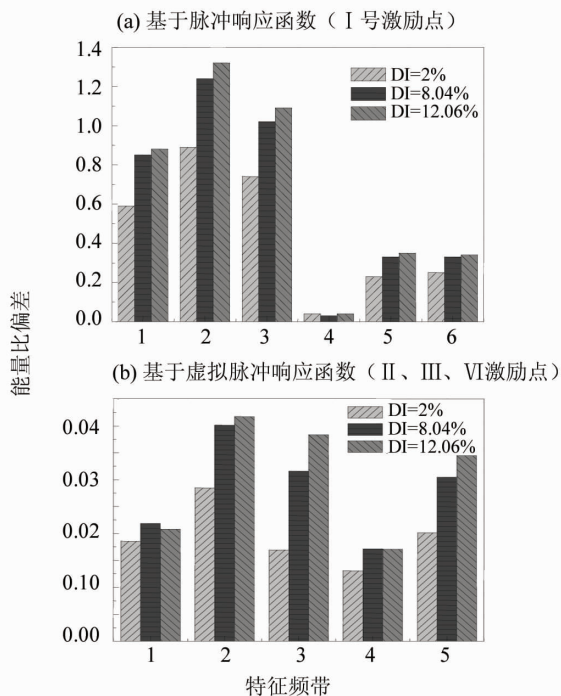


图 4 小波包损伤特征向量谱(7号测点)

Fig. 4 Wavelet packet damage feature vector spectrum (point 7)

不同损伤程度下 25 个测点对应的特征频带能量比偏差,然后根据(20)式计算损伤指标 $ERSD$, 可得到 25 个 $ERSD$ 值。通过 MATLAB 程序把这 25 个

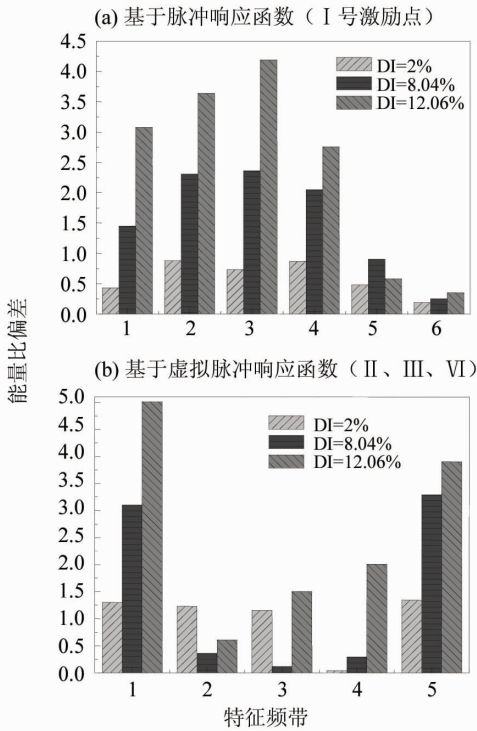


图 5 小波包损伤特征向量谱 (12 号测点)
Fig. 5 Wavelet packet damage feature vector spectrum (point 12)

ERSD 值绘制在一张曲面上，通过曲面的变化特征诊断损伤位置，如图 6-7 所示 (其中 H 表示挡墙高度， L 表示挡墙长度)。不难发现，ERSD 曲面的

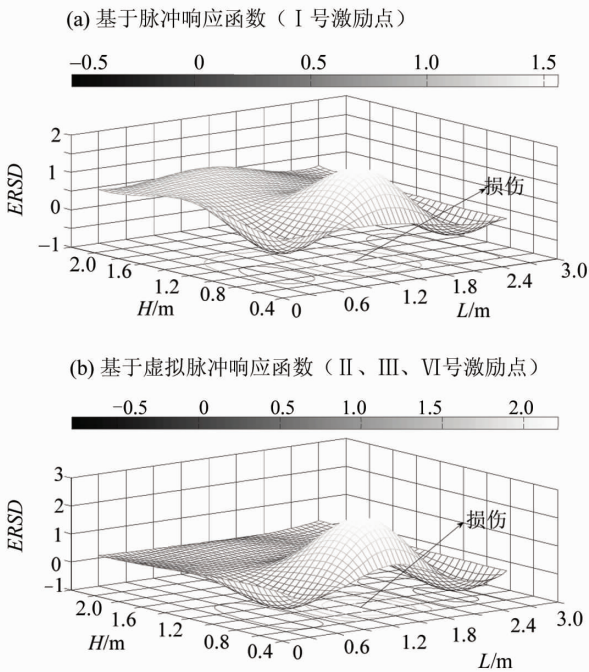


图 6 损伤指标走势曲面图 (DI = 8.04%)
Fig. 6 Trend surface of the damage index (DI = 8.04%)

峰值坐标出现在 ($L = 1.5 \text{ m}$, $H = 1.0 \text{ m}$) 附近区域，而此处正是试验模拟的损伤中心。因此，通过 ERSD 曲面的峰值位置可诊断挡墙局部损伤位置。

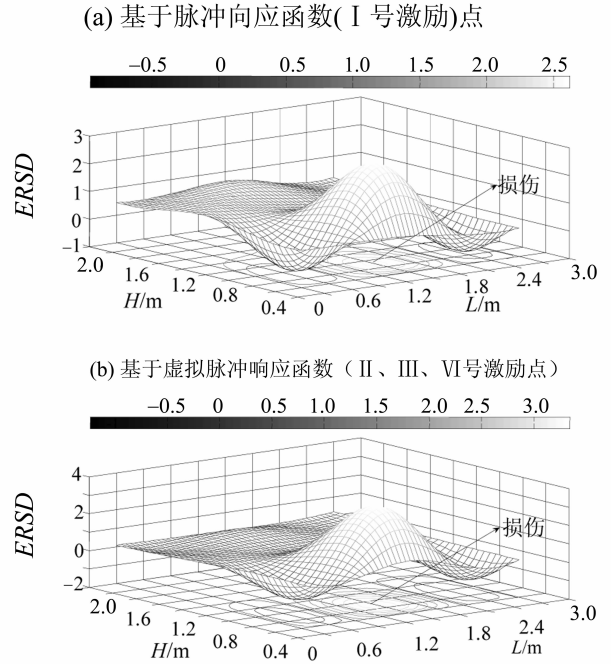


图 7 损伤指标走势曲面图 (DI = 12.06%)

Fig. 7 Trend surface of the damage index (DI = 12.06%)

2.3 识别挡墙损伤程度

对位于损伤区域的 12 号测点在不同激励位置、相同损伤程度下的损伤指标取平均值，记为 \overline{ERSD} 。直接对损伤程度 DI 与损伤指标进行多项式拟合，会导致多项式阶数较高，以及多项式系数巨大。所以，将相对损伤程度 D_i 与损伤指标间的定量关系进行多项式拟合，得到 D_i 与 \overline{ERSD} 之间的定量关系式：

$$Y = -0.24x^5 + 2.57x^4 - 9.28x^3 + 12.89x^2 - 0.88x + 0.14 \quad (21)$$

$$Y = 0.12z^5 - 0.31z^4 - 1.47z^3 + 4.79z^2 + 1.05z + 0.09$$

式中， Y 均表示相对损伤程度 D_i ，且 $D_i = DI \times 100$ ， x 和 z 分别表示基于脉冲响应函数和虚拟脉冲响应函数的损伤指标均值 \overline{ERSD} 。

损伤指标与损伤程度间的关系曲线，如图 8 中 (a) 所示。不难发现，拟合曲线具有良好的拟合程度，这表明经过多项式拟合得到的定量关系式能较好地表征挡墙损伤程度与损伤指标间的定量关系。当损伤程度与损伤识别指标定量关系已知时，通过损伤识别指标可求出损伤程度。以基于虚拟脉

冲响应函数的损伤指标为例, 当 12 号测点的 $ERSD = 1$ 时, 相对损伤程度 $Di = 4.27$, 绝对损伤程度 $DI = Di/100 = V_D/V = 4.27\%$, 当 $V = 6.25 \times 10^5 \text{ mm}^3$ 时, 损伤体积 $V_D = 2.67 \times 10^4 \text{ mm}^3$ 。因此, 通过该定量关系式可实现对挡土墙局部损伤程度的定量识别。

受激励影响, 同一损伤程度对应的损伤指标值具有一定的波动现象。为了刻画波动的程度, 对同一损伤程度下的 $ERSD$ 进行标准差分析, 并绘制 $ERSD$ 标准差曲线, 如图 8 中 (b) - (c) 所示。相比之下, 基于虚拟脉冲响应函数的损伤指标波动较小, 基于脉冲响应函数的损伤指标波动相对较大。因此, 基于虚拟脉冲响应函数的损伤指标具有更强的稳定性。

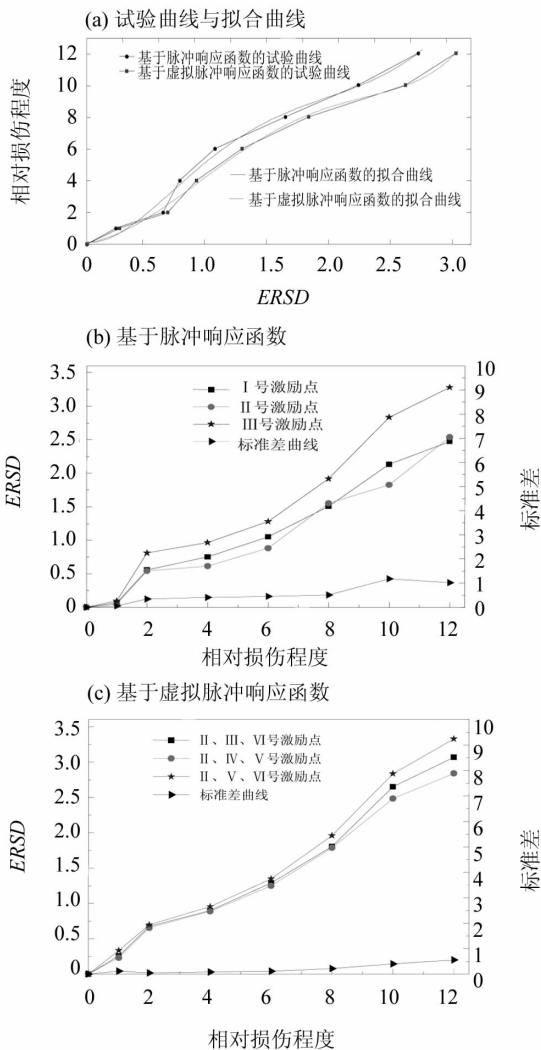


图 8 损伤指标与损伤程度关系曲线

Fig. 8 Relationship curve between the damage index and damage intensity

3 结 论

对脉冲响应函数及虚拟脉冲响应函数进行小波包频带能量谱分析, 构建了损伤特征向量谱, 并提出了损伤指标。当损伤特征向量谱为零向量时, 挡墙无损; 当损伤特征向量谱为非零向量时, 挡墙发生损伤。局部损伤会导致损伤区域测点损伤指标值突变, 通过损伤指标走势曲面图的变化特征可有效诊断挡墙损伤位置。通过损伤指标与损伤程度关系曲线可定性识别挡墙损伤程度, 分析损伤程度与损伤指标间的定量关系, 可实现对损伤程度的定量识别。基于脉冲响应函数及虚拟脉冲响应函数的损伤特征向量谱及损伤指标均可敏感判别挡墙损伤状态, 有效诊断挡墙损伤位置以及定量识别挡墙损伤程度。

虚拟脉冲响应函数只与结构响应有关, 与外界激励无关。因此, 基于虚拟脉冲响应函数的损伤指标不受外界激励影响, 具有较强的稳定性。受锤击脉冲激励时程及激励位置影响, 基于脉冲响应函数的损伤指标稳定性相对较差。因此, 基于虚拟脉冲响应函数的损伤指标更适于诊断挡墙损伤。

参考文献:

- [1] KIM D G, LEE S B. Structural damage identification of a cantilever beam using excitation force level control [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24 (6): 1814 - 1830.
- [2] 徐华东, 王立海, 胡志栋. 运用曲率模态技术的木梁损伤定量识别[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(1): 110 - 114.
XU H D, WANG L H, HU Z D. Quantitative identification of wood beam using modal curve theory [J]. Journal of Vibration, Measure & Diagnosis, 2011, 31(1): 110 - 114.
- [3] LEE U, SHIN J. A structural damage identification method for plate structures [J]. Engineering Structures, 2002, 24(9): 1177 - 1188.
- [4] ZHANG X Z, YAO W J, CHEN B, et al. Damage identification of a pile based on vibration characteristics [J]. The Scientific World Journal, 2014: 1 - 8.
- [5] WANG X, WEI B H, ZHAO B M. Damage alarming analysis for ancient wood structures based on wavelet packet energy spectrum [J]. Multidiscipline Modeling in Materials and Structures, 2014, 10(4): 593 - 610.
- [6] NOH H, RAJAGOPAL R, KIREMIDJIAN A S. Sequential structural damage diagnosis algorithm using a change point detection method [J]. Journal of Sound and Vibra-

- tion, 2013, 332(24): 6419 – 6433.
- [7] MEKJAVIC I. Damage identification of bridges from vibration frequencies [J]. Tehnicki Vjesnik – Technical Gazette, 2013, 20(1): 155 – 160.
- [8] 战家旺, 王伟, 张楠, 等. 基于模型修正理论的铁路桥墩损伤定量评估方法[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(5): 28 – 35.
ZHAN J W, WANG W, ZHANG N, et al. Quantitative damage evaluation method for railway piers based on model updating theory [J]. China Railway Science, 2015, 36(5): 28 – 35.
- [9] 于菲, 刁延松, 佟显能, 等. 基于振型差值曲率与神经网络的海洋平台结构损伤识别研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(10): 183 – 187.
YU F, DIAO Y S, TONG X N, et al. Damage identification on an offshore platform based on curvature of modal shape difference and BP neural network [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(10): 183 – 187.
- [10] LIU L B, ZHANG Y X, CHEN J G, et al. Damage Identification of cantilever retaining wall based on modal mean curvature difference [J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 17: 3117 – 3127.
- [11] 刘礼标, 张永兴, 陈建功. 改进多种群遗传算法在墙土系统损伤识别中的应用[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(3): 1 – 6.
LIU L B, ZHANG Y X, CHEN J G. Application of improved multi – population genetic algorithm to damage identification of soil – wall system [J]. Journal of Civil, Architecture and Environmental Engineering, 2013, 35(3): 1 – 6.
- [12] XU Q, CHEN J G. Damage identification investigation on retaining wall structures [J]. Journal of Information and Computational Science, 2015, 12(13): 5119 – 5131.
- [13] 徐乾, 陈建功. 基于损伤特征向量谱的桩板式挡土墙损伤预警[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(6): 2053 – 2057.
XU Q, CHEN J G. Damage alarming on pile plate retaining wall based on damage character vector spectrum [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(6): 2053 – 2057.
- [14] XU Q. Damage identification investigation of retaining wall structures based on a virtual impulse response function [J]. Shock and Vibration, 2016: 1 – 13.
- [15] 丁幼亮, 李爱群, 邓扬. 小波包分析和信息融合在结构损伤预警中的联合应用[J]. 工程力学, 2010, 27(8): 72 – 76.
DING Y L, LI A Q, DENG Y. Combined application of wavelet packet analysis and information fusion on structural damage alarming [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(8): 72 – 76.
- [16] 常鹏, 杨娜, 张国培. 多分辨率分析和小波能量曲率的框架结构损伤识别[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(6): 170 – 176.
CHANG P, YANG N, ZHANG G P. Damage identification of the frame structure based on multi – resolution analysis and wavelet energy curvature [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(6): 170 – 176.
- [17] 刘习军, 商开然, 张素侠, 等. 基于改进小波包能量的梁式结构损伤识别[J]. 振动与冲击, 2016, 35(13): 179 – 185.
LIU X J, SHANG K R, ZHANG S X, et al. Damage detection method for beam structures based on improved Wavelet Packet energy [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(13): 179 – 185.
- [18] 李爱群, 丁幼亮. 工程结构损伤识别理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 30 – 38.
LI A Q, DING Y L. Engineering structures damage alert theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2006: 30 – 38.
- [19] 安永辉. 基于振动信息的结构损伤识别的集中新方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
AN Y H. Several new methods for Vibration-based damage identification of structures [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.