

水工混凝土裂缝的压电智能骨料感知试验与模拟

陈波^{1,2}, 刘庭赫^{1,2}, 初文婷^{1,2}, 周博^{1,2}

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:为有效监测裂缝的形成和发展,提出一种利用压电智能骨料量化识别裂缝的方法。制作压电智能骨料换能器,测试分析智能骨料接收信号的敏感性,优选智能骨料的传感元件类型、封装材质、输入电压和激励频率;开展裂缝位置、深度的量化传感试验,构建小波包相对能量指标,探明该指标与裂缝位置、深度间的关系;建立随机骨料有限元数值仿真模型,模拟裂缝对压电智能骨料传感信号的影响。结果表明:数值模拟结果和试验结果吻合,所构建压电智能骨料诊断指标可较好地监测混凝土结构裂缝状态,可实现连续、远程、实时监测裂缝发生和发展过程。

关键词:压电智能骨料;水工混凝土;能量指标;压电波动法;数值仿真

中图分类号:TV431 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)06-0001-06

Sensing experiment and simulation for cracks in hydraulic concrete based on piezoelectric smart aggregates//
CHEN Bo^{1,2}, LIU Tinghe^{1,2}, CHU Wenting^{1,2}, ZHOU Bo^{1,2} (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To effectively monitor the formation and development of cracks, a quantitative sensing method of static cracks using piezoelectric smart aggregates was proposed. The piezoelectric smart aggregate transducers were designed and the sensitivity of the sensing signals was tested and analyzed. The sensor shape, packaging material, input voltage and excitation frequency of smart aggregate were optimized. Quantitative sensing tests of crack location and depth were carried out, a relative energy index based on wavelet packet analysis was constructed, and the regular relationship among the energy indices and fracture location, depth was proved. Finally, a random aggregate FEM model was constructed to perform numerical simulation on the effect of cracks on the sensing signal. The results show that the numerical simulation results and the test results are well fitted, indicating that the use of piezoelectric intelligent aggregate can well monitor the crack damage of concrete structures. This method provides a new way for continuous, remote, and real-time monitoring of fracture occurrence and development.

Key words: piezoelectric smart aggregates; hydraulic concrete; energy index; piezoelectric wave-based method; numerical simulation

混凝土坝这类水工混凝土结构的服役过程中,受外界荷载和环境影响,常出现以裂缝为主的病害现象。国际大坝委员会(ICOLD)曾指出,世界范围内已建成的混凝土坝绝大部分或多或少地存在裂缝,其中遭受灾难性破坏的有243座,我国也约有72.9%的混凝土坝存在不同程度的裂缝问题^[1]。裂缝病害危及结构安全运行,必须对其进行实时监测才能保障结构健康服役。目前传统的水工混凝土裂缝监测常采用测缝计、应变计等原位监测仪器^[2],但裂缝发生往往是随机的,而且内观仪器经年使用容易老化,难以有效捕捉裂缝的实际状态,亟

须研发更科学、更便捷的结构裂缝发生和发展过程无损传感技术。

目前,裂缝无损检测研究的热点技术中,声发射技术常用于混凝土、岩石、金属等材料损伤定位监测,但该技术对已经扩展的裂缝不具备监测能力^[3-5];微震技术常用于矿山、边坡、隧洞等岩体损伤的被动监测,罕有水工混凝土开裂相关研究^[6-7];分布式光纤技术虽灵敏度高但必须进行接触式监测,限制了其感知裂缝的应用范围^[8-9]。

压电智能骨料与以上技术相比,不仅灵敏度高,耐用性好,使用寿命较长,还具有连续、远程、实时监

测裂缝等损伤的潜力,近年来在结构健康监测领域内受到广泛关注。自 Song 等^[10-14]首先将压电智能骨料应用到混凝土结构损伤检测以来,众多学者基于压电材料的波传特性,通过构造损伤指标,探索了桥梁等混凝土结构损伤的识别和监测方法,但对于损伤指标与损伤参数之间的具体联系研究并不深入,尤其是裂缝宽度、深度、走向等量化感知方面。在损伤数值模拟方面,Markovic 等^[15]采用显式有限元法建立了智能骨料和波传播模型,模拟了无损和有损工况下波的传播过程及能量变化;Song 等^[16-17]利用 ANSYS 软件包对压电陶瓷建模,模拟了波的产生与接收。这些成果为印证试验成果的可靠性提供了新途径。

为了更全面、精准地监测裂缝发生和发展过程,实时掌握裂缝位置、宽度等信息,本文基于压电智能材料的波动特性提出一种水工混凝土裂缝的压电智能骨料量化传感方法。首先分析压电智能骨料接收信号的敏感性,选择最合适的输入电压、激励频率等试验参数;然后应用上述参数进行水工混凝土结构裂缝位置、深度的监测量化传感试验,基于小波包分析构建裂缝损伤指标,分析该指标与裂缝位置、深度的联系;最后建立压电智能骨料监测混凝土结构损伤的数值仿真模型进行验证。

1 压电智能骨料的研制和传感指标的构建

1.1 压电智能骨料及研制

压电陶瓷(PZT)是典型的压电材料,利用正逆压电效应,可以同时具备驱动器和传感器的功能。但该材料材质较脆,防水性能差,与空气接触极易氧化,因此常将其封装在水泥等材料内形成压电智能骨料。本次试验采用的是型号为 PZT-5H 的 C 型和 R 型压电元件(压电常数为 $580 \times 10^{-12} \text{C/N}$,机电耦合系数 $K_t = 0.39$,机械品质因数 $Q_m = 90$)。C 型压电元件,尺寸为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$;R 型压电元件尺寸为 $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。压电智能骨料制作过程如下:首先将剪裁好的屏蔽线与压电元件焊接,之后将环氧树脂胶与固化剂按 2:1 混合均匀,涂抹在压电元件表面进行防水处理。待其晾干后,放入模具中准备封装。模具由直径 40 mm 的 PVC 管制成,切割成长度为 40 mm 的小段,并在每段圆柱筒壁的中心位置穿孔,孔径稍大于屏蔽线直径(可取 1.1 倍)。封装材料分别选择水泥砂浆和花岗石两种不同基质。图 1 所示为压电智能骨料制作过程。

1.2 小波包分解与损伤指标的构建

当结构出现损伤时,由于应力波的传播受到阻碍,压电智能骨料传感器接收到的信号(传感信号)往往是离散和不稳定的,用数学方法建立稳定的、能

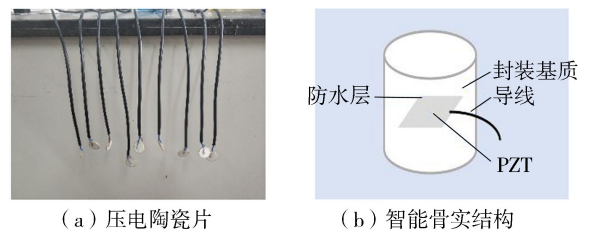


图 1 压电智能骨料的制作过程

够度量结构受损状态的能量损伤指标更合适。小波包分析是一种有效的信号处理工具,既可对信号的低频部分进行分解,也可对高频部分进行分解,进而可以实现更好的时域局部化分析,近年来在结构损伤监测领域被广泛应用^[18-19]。本文引入小波包分解法对信号进行处理,并构建损伤指标。

对信号 S 进行第 i 层小波包分解得到 2^i 个子节点, j 为第 i 层节点编号, $S_{i,j}$ 为第 i 层分解节点(i, j)上的压电信号,每个节点频带内信号 $S_{i,j}$ 的能量 $E_{i,j}$ 可表示为 $E_{i,j} = \sum |S_{i,j}|^2$,其中 $j = 0, 1, 2, \dots, 2^i - 1$ 。信号 S 的第 i 层小波包能量谱向量表示为 $\mathbf{E}_i = (E_{i,j})$,其中 $j = 0, 1, 2, \dots, 2^i - 1$ 。实测信号的小波包总能量 E 等于其分解所得各频带信号所含能量之和,即 $E = \sum_{j=1}^m E_{i,j}$,其中, i 为分解层数, m 为分解的频带总数。

当混凝土结构出现损伤后,分解的某个节点的信号将会改变,使总能量发生变化,因此可根据结构在损伤工况下的总能量 E 和无损工况下的总能量 E_0 之比,即相对能量 $E_r = E/E_0$ 来表示结构的损伤状态。

2 压电智能骨料量化传感混凝土结构裂缝的模型试验

2.1 试验系统

试验系统见图 2,信号由 Agilent 任意波形发生器产生,然后激励嵌入在结构中的压电驱动器。为去除交流电产生的噪声,将压电传感器连接至数字滤波器,接收信号经数字滤波后由 DSPACE 信号采集系统和数字示波器完成采集。其中, DSPACE 信号采集系统是基于 Matlab/Simulink 的控制系统开发与结构测试平台,通过 A/D 模块实现对压电传感信号的采集,采样频率取 5 kHz。

2.2 传感器敏感性试验

试验首先研究输入电压、激励频率、压电元件类型和封装材料对所制成压电骨料接收信号幅值的影响,以研制性能优异的智能骨料传感器。共浇筑 3 个相同的混凝土构件,混凝土强度等级为 C30,细骨料为河沙,粗骨料选用粒径不大于 1 cm 的石子,混

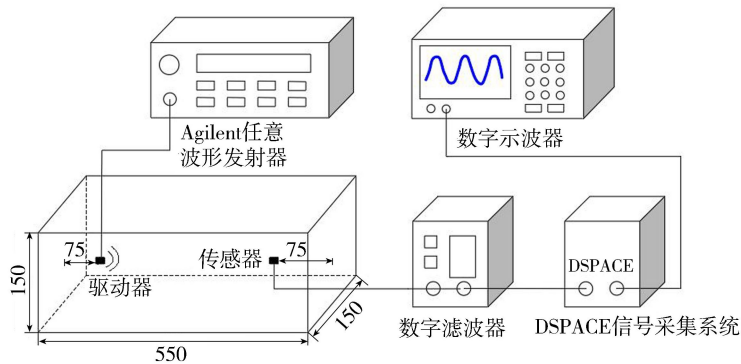


图2 基于智能骨料的结构监测系统(单位:mm)

凝土配合比根据《水工混凝土结构设计规范》和真实工程筑坝混凝土资料选取,水泥:水:细骨料:粗骨料为1:0.45:1.21:2.83,且在相同养护条件下养护28 d。试验设计方案见表1。

表1 混凝土构件及换能器编号

混凝土构件	驱动器	传感器
B0	Ce-C-A1	Ce-C-S1
B1	Ce-R-A1	Ce-R-S1
B2	G-R-A1	G-R-S1

注:B表示混凝土构件;Ce和G分别表示水泥基和花岗石基智能骨料;C和R分别表示C型和R型压电元件;A和S分别表示智能骨料驱动器和智能骨料传感器。

分别研究了不同输入电压、不同激励频率下3个混凝土构件接收信号幅值的变化过程,图3和图4分别为输入电压、激励频率与接收信号幅值的关系。从图3中可以看出,各传感器接收信号幅值都远小于设定的输入电压,这是由于应力波在混凝土介质中传播时发生衰减和散射的结果。图3中3条曲线的趋势相同,表现接收信号的幅值与输入电压成正比。对比B0和B1对应曲线,输入电压相同时,R型压电片传感器接收信号幅值大于C型压电片传感器,说明该试验条件下的R型压电片传感器对信号的接收更为敏感;对比B0和B2的拟合结果可知,花岗石基的传感器拟合效果更好,但斜率小于水泥基传感器,即输入电压相同时,水泥基智能骨料传感器接收信号幅值更大。由图4可知3种不同特征的压电智能骨料反映出类似的变化规律,接收信

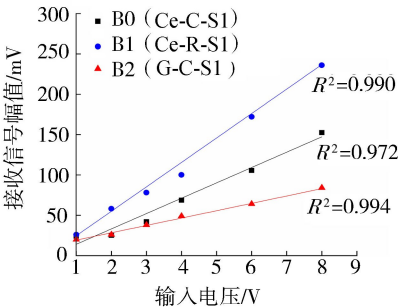


图3 输入电压与接收幅值关系

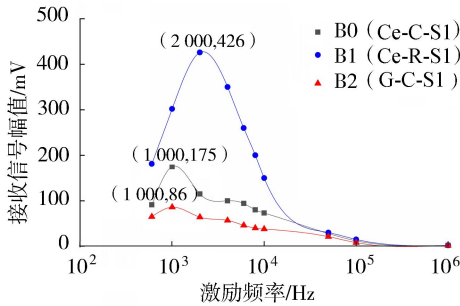


图4 激励频率与接收幅值关系

号幅值都是先上升再下降,将使接收信号幅值最大的激励信号频率记为 f_u 。图中B0和B2对应 f_u 均为1 kHz,可以看出封装材料对于激励信号频率 f_u 影响很小;而图中B1对应的 f_u 为2 kHz,对比B1和B0可知,R型压电片在激励频率2 kHz时能达到较大的信号接收幅值。

综上所述,输入电压越大,传感器接收信号越敏感,因此选择10 V的峰值输入电压;输入电压相同时,在该试验条件下水泥基智能骨料传感器信号接收幅值比花岗石基更大,因此封装材料选用水泥基;而该试验中R型压电片对于信号接收性能更敏感,且在激励频率2 kHz时能达到较大的信号接收幅值,因此选用R型压电片,激励频率选择2 kHz。

2.3 裂缝量化传感试验

试验新浇筑了两个相同的混凝土构件,记为B3、B4,每个构件内均埋置一对接收和发射性能良好的智能骨料(SA1和SA2、SA3和SA4)。试验研究裂缝位置、裂缝深度与传感指标的关系,基于上文试验结果,激励信号选择2 kHz、10 V的正弦激励信号,在该试验条件下采用对压电信号幅值较为敏感的R型压电片,用水泥砂浆封装。裂缝位置用裂缝与智能骨料驱动器之间的距离 X 表示,根据不同驱动器分为8 cm、16 cm、24 cm和32 cm,见表2。每种裂缝位置均设置无损($d=0$)、有损($d=1$ cm)和有损($d=2$ cm)这3种裂缝深度,用切缝机沿混凝土梁的横截面方向切割。对每种工况,利用智能骨料传感器测量压电接收信号。

表 2 混凝土构件编号及裂缝位置

编号	驱动器	传感器	X/cm
B3	SA1	SA2	16
	SA2	SA1	24
B4	SA3	SA4	32
	SA4	SA3	8

注:表中的智能骨料均选用 R 型压电片 and 水泥砂浆封装材料。

裂缝位置和深度任一发生变化,都会对信号接收幅值造成不同程度的影响,这是因为裂缝的存在阻碍了波的传播,削弱了波的能量。为了进一步量化裂缝位置、深度与传感信号间的关系,采用本文构建的小波包相对能量指标 E_r 对接收到的信号进行处理。

图 5(a) 为能量指标分别在裂缝深度 $d=1\text{ cm}$ 和 $d=2\text{ cm}$ 时随裂缝位置 X 的变化曲线,可以看出,同一深度的裂缝,当 $X<16\text{ cm}$ 时, E_r 变化很小,且 E_r 随 X 的增大而增大;当 $X>16\text{ cm}$ 时, E_r 随 X 的增大表现为逐渐减小的趋势,且变化幅度较大。这说明当驱动器与裂缝距离较近时,应力波传播中能量的衰减是小幅度的,而当驱动器与裂缝的距离大于一定临界值后,传感器接收到的应力波能量随距离的增加而逐渐减小。图 5(b) 为能量指标分别在不同裂缝位置时随裂缝深度的变化曲线。图中可见对应不同位置的裂缝, E_r 随裂缝深度的增加而减小。以上说明裂缝深度对传感指标有较大影响,裂缝深度增大会导致应力波能量损失增多,使传感器接收到的信号能量变小,但这种规律与裂缝位置关系不大。试验结果表明,该能量指标可良好反映不同裂缝位置和深度的损伤状况。

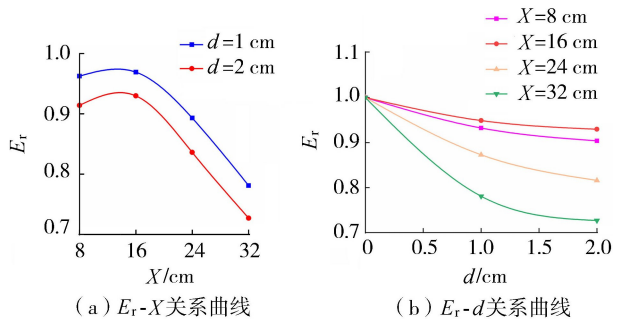


图 5 能量指标随裂缝位置、深度变化关系曲线

3 有限元数值模拟验证

3.1 压电本构方程及建模

利用 ABAQUS 软件对上述模型试验问题进行仿真验证,主要包括对智能骨料和波传播过程的建模。文献[15]给出了基于机电耦合作用的两种形式的压电材料本构方程。对于非均质介质中波传播过程的建模,有限元模型常设置为动态隐式,但该方

法效率较低。动态显式算法相比之下不需要平衡迭代和直接求解切线刚度,计算速度较快,一般不存在收敛性问题。因此采用动态显式算法(中心差分法)模拟波的传播。该模型的稳定性取决于时间增量 Δt ,文献[20]中式(5)(6)给出了 Δt 需满足的两个条件,本文采用 $\Delta t=0.2\text{ }\mu\text{s}$ 。使用四边形单元划分网格,单位波长对应的有限元数量对解的精度也有重要影响,Drozdz^[21] 建议单位波长包含的有限元数目不应小于 7,本文将单位波长包含的有限元数目取为 20,满足低频波的传播建模。为了研究裂缝带来的波动变化,无损和切缝工况确保单元划分一致,避免网格剖分带来的影响;采用应力-电荷本构模型对压电陶瓷建模,弹性常数矩阵 $\mathbf{c}$ 、压电应力常数矩阵 $\mathbf{e}$ 及相对介电常数矩阵 $\boldsymbol{\lambda}$ 分别取值如下:

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} 12.7 & 8.02 & 8.47 & 0 & 0 & 0 \\ 8.02 & 12.7 & 8.47 & 0 & 0 & 0 \\ 8.47 & 8.47 & 11.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.35 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.30 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.30 \end{bmatrix} \times 10^{10}$$
$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -6.62 \\ 0 & 0 & -6.62 \\ 0 & 0 & 23.24 \\ 0 & 0 & 0 \\ 17.03 & 0 & 0 \\ 0 & 17.03 & 0 \end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{\lambda} = \begin{bmatrix} 1.7 & 0 & 0 \\ 0 & 1.7 & 0 \\ 0 & 0 & 1.43 \end{bmatrix} \times 10^{-8}$$

3.2 随机骨料模型

为了描述混凝土构件的非均质特性,基于 Python 对 ABAQUS 软件进行二次开发,建立了随机骨料模型。该模型随机分布混凝土骨料,剩余部分由水泥砂浆填充。随机骨料模型构建过程如下:首先设定骨料满足 Fuller 级配曲线(最大粒径为 5 mm)得到骨料的尺寸分布,采用蒙特卡罗法模拟生成满足给定随机分布的圆形离散颗粒,再切割成多边形。将构件划分好网格后就可以按粒径从大到小的顺序投放骨料,映射到剖分好的网格中。值得注意的是,如果出现骨料之间相互干涉、边界交叉或水泥砂浆面有间隙等问题,需要重新投放骨料。获得的随机骨料模型见图 6,材料参数见表 3。

3.3 有限元模拟成果分析

图7分别为混凝土结构在无损和有损情况(以

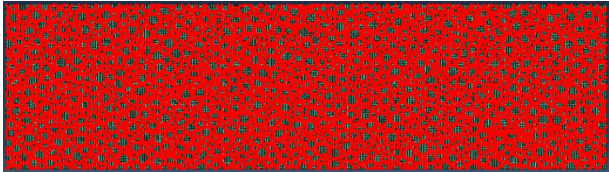


图 6 随机骨料模型

表 3 材料参数

材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
水泥砂浆	30	0.2	2400
骨料	80	0.2	2800
压电片 (PZT-5H)	75	0.32	7500

$X=16\text{ cm}$ 为例)下的波场传播快照。图 7(a)(b)是无损状态下压电驱动器产生入射波的传播情况,图中波的传播是对称的,未受到干扰,在边界处发生反射。图 7(c)(d)分别模拟了裂缝深度为 1 cm 和 2 cm 时波的传播情况,可以看出由于裂缝的存在对波的传播产生影响,波的传播不再对称,且遇到裂缝的波传播受到抑制,其余波绕过裂缝正常向前传播。裂缝越深,波的衰减程度越明显,这会直接导致信号能量的减少。通过监测传感器的输出信号,可以对混凝土的损伤严重程度作出判断。对不同工况下传感器接收到的信号进行处理,试验和有限元分析获得的损伤指标见图 8,得到的损伤指标较为接近,有限元计算结果普遍略大,但反映出的规律一致,这也验证了试验的准确性。

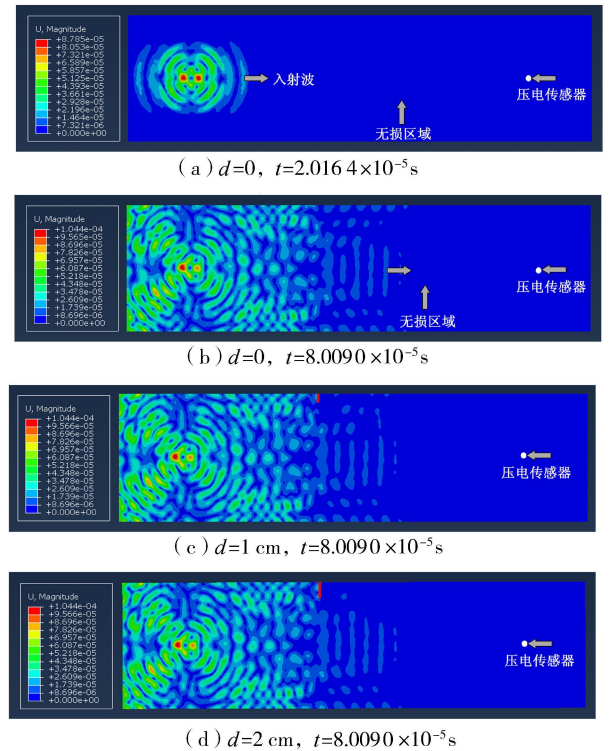


图 7 压电驱动器产生的波场传播快照

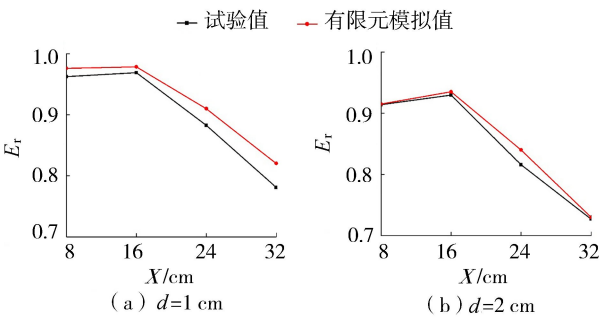


图 8 试验和有限元计算得到的损伤指标

4 结 论

a. 本文提出一种混凝土裂缝的压电智能骨料量化传感方法,首先通过压电智能骨料接收信号的敏感性分析优选适用的智能骨料,然后研究混凝土裂缝位置、深度与所构建损伤指标的量化关系,最后利用有限元建立了压电智能骨料检测混凝土损伤的数值模型。

b. 输入电压、激励频率及封装材料均对智能骨料接收信号幅值产生影响,该试验条件下选择 2 kHz 、 10 V 的正弦激励信号,R 型压电元件,水泥砂浆封装智能骨料接收性能更敏感。

c. 裂缝位置和深度任一发生变化,都会对信号的接收幅值造成不同程度的影响。小波包分析是一种有效的信号处理工具,构建的小波包相对能量指标 E_r 与裂缝位置和深度存在规律性,能够较好地反映裂缝位置、深度与损伤程度之间的关联。

d. 利用有限元建立的压电智能骨料仿真模型能够模拟波的传播过程。为体现混凝土的非均质性,建立随机骨料模型。通过对比无损、无损状况下的波场,验证了压电智能骨料检测混凝土裂缝损伤的有效性;有限元得到的损伤指标与试验结果相近,验证了压电智能骨料检测混凝土裂缝损伤的可行性。该方法为检测混凝土结构裂缝的发生、发展提供了新的思路。

参考文献:

[1] 吴中如,顾冲时,苏怀智,等. 水工结构工程分析计算方法回眸与发展 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2015,43(5) :395-405. (WU Zhongru, GU Chongshi, SU Huaizhi, et al. Review and prospect of calculation analysis methods in hydro-structure engineering [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015,43(5) :395-405. (in Chinese))

[2] XIANG Y, WANG L, WANG Z J, et al. Key techniques for evaluation of safety monitoring sensors in water conservancy and hydropower engineering [J]. Water

- Science and Engineering, 2012, 5(4): 440-449.
- [3] 李胜利, 石鸿帅, 毋光明, 等. 声发射技术在混凝土空心板桥裂缝检测中的应用[J]. 桥梁建设, 2017, 47(5): 83-88. (LI Shengli, SHI Hongshuai, WU Guangming, et al. Application of acoustic emission technique to crack detection of concrete hollow slab bridges [J]. Bridge Construction, 2017, 47(5): 83-88. (in Chinese))
- [4] 梅明星. 基于声发射技术的损伤检测应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [5] 明攀, 耿晓明, 陆俊, 等. 基于声发射监测的堤防管涌试验[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(4): 33-38. (MING Pan, GENG Xiaoming, LU Jun, et al. Experimental study on monitoring embankment piping based on acoustic emission technology [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(4): 33-38. (in Chinese))
- [6] 徐奴文, 梁正召, 唐春安, 等. 基于微震监测的岩质边坡稳定性三维反馈分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊1): 3093-3104. (XU Nuwen, LIANG Zhengzhao, TANG Chun'an, et al. Three-dimensional feedback analysis of rock slope stability based on microseismic monitoring [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Sup1): 3093-3104. (in Chinese))
- [7] 原富珍, 马克, 庄端阳, 等. 基于微震监测的董家河煤矿底板突水通道孕育机制[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1846-1856. (YUAN Fuzhen, MA Ke, ZHUANG Duanyang, et al. Preparation mechanism of water inrush channels in bottom floor of Dongjiahe coal mine based on microseismic monitoring [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1846-1856. (in Chinese))
- [8] 何弯弯, 曾捷, 夏裕彬, 等. 空间柔性充气结构分布式光纤裂纹损伤监测方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(3): 297-304. (HE Wanwan, ZENG Jie, XIA Yubin, et al. Monitoring method for crack damage of space flexible inflatable structure based on distributed optical fiber sensor [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(3): 297-304. (in Chinese))
- [9] 李洁, 张宏战, 任亮, 等. 分布式光纤传感技术在蜗壳模型试验中的应用[J]. 压电与声光, 2019, 41(1): 17-20. (LI Jie, ZHANG Hongzhan, REN Liang, et al. Application of distributed optical fiber sensing technology in model test of spiral case [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2019, 41(1): 17-20. (in Chinese))
- [10] SONG G, MO Y L, OTERO K, et al. Health monitoring and rehabilitation of a concrete structure using intelligent materials[J]. Smart Materials and Structures, 2006, 15(2): 309-314.
- [11] SONG G, GU H, MO Y L, et al. Concrete structural health monitoring using embedded piezoceramic transducers[J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(4): 959-968.
- [12] DUMOULIN C, KARAIKOS G, SENER J, et al. Online monitoring of cracking in concrete structures using embedded piezoelectric transducers[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23: 11501611.
- [13] 孙威, 阎石, 焦莉, 等. 基于压电波动法的混凝土裂缝损伤监测技术[J]. 工程力学, 2013, 30(增刊1): 206-211. (SUN Wei, YAN Shi, JIAO Li, et al. Monitoring technology for crack damage of concrete structure based on piezoelectric wave method [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(Sup1): 206-211. (in Chinese))
- [14] 卿龙邦, 聂雅彤. 基于起裂韧度准则的混凝土裂缝黏聚区特性[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(2): 37-42. (QING Longbang, NIE Yatong. Characteristics of cohesive zone of concrete cracks based on initial fracture toughness criterion [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(2): 37-42. (in Chinese))
- [15] MARKOVIC N, NESTOROVIC T, STOJIC D. Numerical modeling of damage detection in concrete beams using piezoelectric patches[J]. Mech Res Commun, 2015, 64: 15-22.
- [16] SONG F, HUANG G L, KIM J H, et al. On the study of surface wave propagation in concrete structures using a piezoelectric actuator/sensor system[J]. Smart Materials & Structures, 2008, 17(5): 055024.
- [17] PARK S, AHMAD S, YUN C B, et al. Multiple crack detection of concrete structures using impedance-based structural health monitoring techniques[J]. Experimental Mechanics, 2006, 46: 609-618.
- [18] 钟登华, 刘肖军, 佟大威, 等. 考虑施工质量影响的碾压混凝土坝地震动力响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 215-222. (ZHONG Denghua, LIU Xiaojun, TONG Dawei, et al. Study on seismic responses of RCC dams considering influences of construction quality [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(3): 215-222. (in Chinese))
- [19] 沈超, 钱德玲. 基于小波包能量的地基土对框筒结构地震损伤影响试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(16): 174-180. (SHEN Chao, QIAN Deling. Experimental investigation of the seismic damage effect of foundation on frame-core tube structures considering foundation soil based on the wavelet packet energy [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(16): 174-180. (in Chinese))
- [20] STOJIC D, NESTOROVIC T, MARKOVIC N, et al. Detection of damage to reinforced-concrete structures using piezoelectric intelligent modules[J]. Gradevinar, 2016, 68: 371-380.
- [21] DROZDZ M B. Efficient finite element modeling of ultrasonic waves in elastic media[D]. London: University of London, 2008.

(收稿日期: 2021-03-25 编辑: 骆超)