

MODELLIZZAZIONE DELLA PROPAGAZIONE ULTRASONICA IN CALCESTRUZZO DANNEGGIATO CON DIFETTI MULTIPLI: APPROCCIO TEORICO E SIMULAZIONE NUMERICA

G. Angiulli, M. Cacciola, Mario Versaci

Università Mediterranea degli Studi di Reggio Calabria
Dipartimento DICEAM
Via R. Zehender (ex Via Graziella Feo di Vito), 89122 Reggio Calabria (Italy)

Filippo Laganà
Cooperativa TEC
Technology Engineering Cooperative
Via Nazionale 439, 89134 Pellaro, Reggio Calabria (Italy)

La presente memoria si inserisce nel contesto delle attività di ricerca del progetto PRIN 2022 dal titolo “Integration of Artificial Intelligence and Ultrasonic Techniques for Monitoring, Control and Self-Repair of Civil Concrete Structures (CAIUS (cod. 2022AZPLL8) e mira a fornire una formulazione matematica avanzata per la descrizione della propagazione delle onde acustiche nel calcestruzzo danneggiato. Tale contesto multidisciplinare, che integra modelli numerici, tecniche ultrasoniche e intelligenza artificiale, ha come obiettivo la diagnosi non distruttiva, il monitoraggio e l’autoriparazione intelligente di strutture civili in calcestruzzo. Le equazioni fondamentali del modello sono:

$$\frac{1}{c^2 \rho} \frac{\partial^2 p_t}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left(\left(1 + \frac{\beta p_t}{\rho c^2} \right) u_t \right) = Q_m, \quad \rho \frac{\partial u_t}{\partial t} + \nabla \cdot (p_t \mathbf{I}) = \mathbf{q} \quad (1)$$

dove ρ è la densità del materiale (kg/m^3), c la velocità degli ultrasuoni nel calcestruzzo (m/s), β il coefficiente di comprimibilità non lineare ($\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$), p_t rappresenta la pressione acustica istantanea nel mezzo (calcestruzzo) al tempo t , (Pa), u_t è la velocità delle particelle (m/s), funzione del tempo e dello spazio, mentre \mathbf{I} è il tensore identità, Q_m ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$) è il termine sorgente (e l’eventuale contributo dei difetti). Il termine \mathbf{q} , definito come $\sum_{i=1}^N \rho \mu_i \chi_{D_i} u_t$, con N numero complessivo di difetti, introduce l’effetto dei difetti attraverso il coefficiente locale di coercitività μ_i (adimensionale) e la funzione caratteristica χ_{D_i} (adimensionale) del dominio difettoso D_i . Una parte fondamentale del modello riguarda la correzione non lineare della velocità del suono, che tiene conto della natura porosa e microfessurata del calcestruzzo.

Una parte fondamentale del modello riguarda la correzione non lineare della velocità del suono, che tiene conto della natura porosa e microfessurata del calcestruzzo. La densità viene espressa in funzione della pressione come $\rho(p_t) = \rho_0 + \frac{1}{c^2} p_t + \frac{\beta p_t^2}{\rho c^2}$, da cui si ricava una velocità del suono effettiva $c_{eff} \approx c^2 \left(1 + \frac{\beta p_t}{\rho c^2} \right)$ dove ρ_0 è la densità di equilibrio (kg/m^3) e c_{eff} rappresenta la velocità del suono corretta (m/s) in presenza di non linearità. Questa formulazione mostra che la velocità dell’onda acustica dipende localmente dalla pressione, riflettendo le condizioni microstrutturali del materiale. Il sistema (1) è stato riformulato come problema evolutivo in spazi funzionali, con l’introduzione della variabile $v_t = \frac{\partial p_t}{\partial t}$ (Pa/s), e scritto nella seguente forma astratta:

$$\frac{dU}{dt} + AU = F, \quad U[p_t, v_t, u_t]^T \quad (2)$$

in cui l'operatore A è definito come lineare e quasi-dissipativo, e F include Q_m ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-2}$) e il contributo dei difetti. Gli spazi funzionali adottati sono $H = L^2(\Omega)$, $V = H^1(\Omega)$, con il consueto schema di immersione $V \subset H \cong H' \subset V'$, in modo da poter verificare su (2) le ipotesi del teorema di esistenza e unicità di Lions. La soluzione U si dimostra appartenente allo spazio $L^2(0, T; V) \cap H^1(0, T; V')$, dove T rappresenta l'intervallo temporale di indagine garantendo così resistenza. Unicità, regolarità anche dell'energia. Implementando (2) tramite uno schema alle differenze finite, si è osservato un comportamento delle onde in presenza di diversi tipi di difetti modellati tramite variazioni del parametro μ_i : difetti con $\mu_i > 0$, come inclusioni rigide o vuoti chiusi, producono una riflessione ordinata delle onde e mantengono la stabilità energetica del sistema; difetti con $\mu_i < 0$, come cricche aperte o porosità connettiva, inducono dissipazione di energia e distorsione dell'onda; difetti con $\mu_i \approx 0$, come cricche sigillate, producono un effetto trascurabile sulle dinamiche globali evidenziando che esistono difetti (in forma e dimensioni) che pur introducendo non-linearità, il modello è risolvibile mediante tecniche lineari. Inoltre, si è dimostrata la possibilità di distinguere la tipologia di difetto a partire dalla sola osservazione della risposta acustica, suggerendo applicazioni dirette nell'identificazione inversa tramite segnali ultrasonici. Inoltre, il sistema è sensibile alle variazioni geometriche dei difetti: piccole modifiche nella forma o nella posizione dei difetti determinano cambiamenti misurabili nella risposta acustica, il che rende il modello potenzialmente utile anche in contesti di monitoraggio progressivo del danno. Infine, è stato evidenziato che μ_i permette non solo la classificazione, ma anche una valutazione quantitativa della severità del difetto, rendendo possibile la definizione di soglie critiche per interventi strutturali automatizzati all'interno del paradigma di auto-riparazione richieste dal progetto CAIUS.

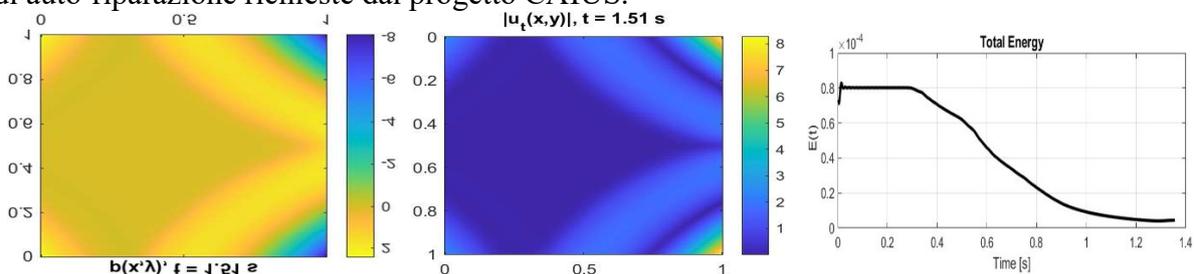


Fig. 1 Propagazione di un'onda acustica all'interno di un mezzo contenente un'inclusione rigida. La forma compatta del difetto provoca una riflessione netta delle onde incidenti e una distribuzione della pressione altamente localizzata. All'interno dell'inclusione, la velocità delle particelle è quasi nulla, indicando un comportamento restitutivo tipico dei materiali rigidi.

La Fig. 1 illustra come un difetto con $\mu_i < 0$ alteri la propagazione dell'onda acustica, causando deformazioni, attenuazione e riflessioni locali. Questo conferma l'effetto destabilizzante del difetto, associato a una perdita di energia e a una trasmissione irregolare nel mezzo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Angiulli G, Burrascano P, Ricci M, Versaci M. Advances in the Integration of Artificial Intelligence and Ultrasonic Techniques for Monitoring Concrete Structures: A Comprehensive Review *Journal of Composite Sciences*, 8(2), 531, 2024.
- [2] Hassani S, Dackermann U. A systematic review of advanced sensor technologies for non-destructive testing and structural health monitoring. *Sensors*. 23(3), 2204, 2023.