

**Grzegorz ŚWIT, Michał TEODORCZYK**

Politechnika Świętokrzyska, Polska

## **Zastosowanie tensora momentu w procedurze SiGMA**

### **Wstęp**

Infrastruktura transportowa pełni ważną funkcję w każdym kraju. Rozwój transportu wpływa przede wszystkim na bezpieczne podróże, lepszą jakość życia, a tym samym przyczynia się do rozwoju turystyki i przedsiębiorstw. Na infrastrukturę drogową składają się drogi i autostrady, ale również mosty i wiadukty. To właśnie mosty i wiadukty są jednym z wielu czynników, które mogą spowodować paraliż w komunikacji transportowej kraju. Ocena stanu technicznego obiektów mostowych i wynikające z niej naprawy, ograniczenia w ruchu, a nawet wyłączenie z eksploatacji staje się istotnym problemem w dobie XXI w. [Gołaski, Świt 2005: 151–159].

Na Politechnice Świętokrzyskiej w zespole prof. L. Gołaskiego opracowana została metoda identyfikacji aktywnych procesów destrukcyjnych (IADP) bazująca na technice emisji akustycznej dla konstrukcji sprężonych, której współtwórcą był dr hab. inż. G. Świt, prof. nadzw. PŚk. Wyniki tych prac zostały opublikowane w rozprawie habilitacyjnej [Świt 2011: 179] oraz zawarte w patencie nr 212628. Metoda oparta jest na rejestracji i pomiarze sygnałów emisji akustycznej towarzyszącej powstaniu i rozwojowi uszkodzeń. Zastosowanie tej metody nie osłabia konstrukcji, a pozwala obiektywnie ocenić jej stan techniczny, np. diagnostyka mostów w województwie świętokrzyskim. Obecnie trwają badania wykonywane przez Zespół w Katedrze Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji Betonowych, które mają być podstawą opracowania metody emisji akustycznej dla konstrukcji żelbetowych.

Polska Norma mająca status normy europejskiej do badań nieniszczących [PN-EN 1330-9] określa termin emisja akustyczna (AE) jako fala sprężysta wywołana przez wyzwolenie energii w materiale lub przez proces. W Katedrze prowadzone są badania propagacji sygnałów emisji akustycznej w elementach żelbetowych. Obecnie planowana jest analiza fal z wykorzystaniem aparatury pomiarowej wyposażonej w moduł SiGMA 3D z zastosowaniem tensora momentu. Moduł pozwala zlokalizować w przestrzeni elementu źródło sygnału emisji akustycznej, ocenić, jaka była przyczyna jego powstania oraz zinterpretować graficznie obszar propagacji fali. Procedura rozróżnia pęknięcie betonu powstałe w wyniku rozciągania lub ścinania elementu. Na podstawie prac [Ohtsu 2008a: 175–200; Ohtsu 2008b: 149–174] przedstawiono teoretyczne

podejście do procedury SiGMA i tensora momentu dla betonu opisując ruch fali emisji akustycznej powstający w wyniku pęknięcia materiału.

### Tensor momentu

Teoria emisji akustycznej przedstawia falę emisji akustycznej jako falę sprężystą powstałą w wyniku uszkodzenia ciała stałego. Aby zdefiniować falę emisji akustycznej wywołaną pęknięciem elementu z betonu, zakłada się, że jest to materiał izotropowy. Równanie ruchu fali emisji akustycznej  $u_k(x, t)$ , powstałego w wyniku pęknięcia [Ohtsu 2008a: 175–200] ma postać:

$$u_k(x, t) = G_{kp,q}(x, y, t) M_{pq} * S(t), \quad (1)$$

gdzie:  $G_{kp,q}(x, y, t)$  to przestrzenna pochodna funkcji Greena,  $M_{pq}$  to tensor momentu i  $S(t)$  to funkcja źródło-czas dla ruchu pęknięcia.

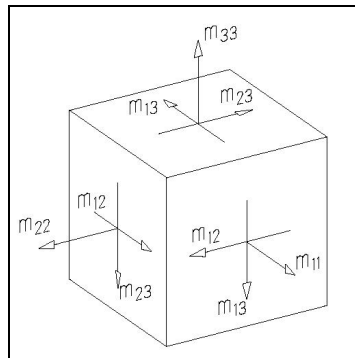
Zajmijmy się tensorem momentu, który opisany jest równaniem:

$$M_{pq} = C_{pqkl} l_k n_l \Delta V, \quad (2)$$

gdzie:  $C_{pqkl}$  to stałe sprężystości,  $l_k$  to wektor kierunkowy,  $n_l$  to wektor normalny do powierzchni pęknięcia i  $\Delta V$  to objętość pęknięcia.

Tensor momentu oznacza moment w jednostce [Nm] i jest to iloczyn stałych sprężystości  $C_{pqkl}$  [ $N/m^2$ ] i objętość pęknięcia  $\Delta V$  [ $m^3$ ] [Ohtsu 2008b]. Objętość pęknięcia można wyznaczyć korzystając z modelu Griffith opisującego pęknięcie oraz wprowadzając pojęcie pęknięcia równoważnego i objętości pęknięcia równoważnego. Jest to korzystne dla złożonego mechanizmu pęknięcia betonu i pozwala na wprowadzenie pewnych uproszczeń [Świt 2004].

Tensor momentu opisuje ruch źródła sygnału emisji akustycznej w wyniku pęknięcia materiału. Składowe tensora reprezentują ruch rozciągający i ruch ścinający [Ohtsu 2008a: 175–200]. Rys. 1 przedstawia składowe tensora momentu przyłożone do elementu sześciennego.



Rys. 1. Graficzna interpretacja tensora momentu [Ohtsu 2008b: 149–174]

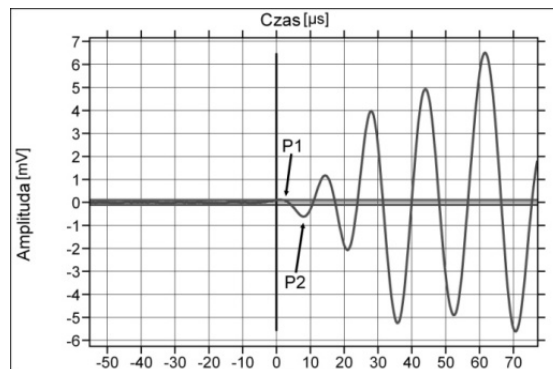
## Procedura SiGMA

Fala sprężysta powstała w wyniku pęknięcia wewnątrz ośrodka stałego rozchodzi się w postaci drgań podłużnych i poprzecznych. Fala podłużna ma największą prędkość i jest istotna w diagnostyce konstrukcji [Teodoreczyk 2012]. Aby zlokalizować źródło emisji akustycznej, została opracowana procedura SiGMA, która wykorzystuje falę podłużną. Procedura ma na celu wyznaczyć wszystkie składowe tensora momentu oraz uprościć funkcje Greena tylko dla fali podłużnej. Równanie ruchu fali podłużnej  $U_i(x,t)$  w nieograniczonej przestrzeni [4] ma postać:

$$U_i(x,t) = \frac{1}{4\pi\rho v_p^3} \frac{r_i}{R} r_p r_q M_{pq} \frac{dS(t)}{dt}, \quad (3)$$

gdzie:  $\rho$  to gęstość materiału i  $v_p$  to prędkość fali podłużnej.  $R$  jest to odległość między źródłem  $y$  a punktem obserwacji  $x$ , którego kierunek przedstawia się  $r = (r_1, r_2, r_3)$ .

Aby wyznaczyć lokalizację źródła emisji akustycznej i składowe tensora momentu, fala podłużna powinna zostać zarejestrowana przez minimum sześć czujników. Liczba czujników jest niezbędna, ponieważ tensor momentu posiada sześć składowych  $m_{11}, m_{12}, m_{13}, m_{22}, m_{23}, m_{33}$ . Analiza SiGMA wykorzystuje dwa parametry fali podłużnej emisji akustycznej. Są to czas przybycia (P1) i amplituda pierwszego ruchu (P2) [Ohtsu 2008a: 175–200]. Parametry te zostały zaznaczone na rys. 2.



Rys. 2. Charakterystyczny kształt fali podłużnej z zaznaczonymi parametrami P1 i P2

Amplituda  $A(x)$  pierwszego ruchu jest obliczana według wzoru (4) i uwzględnia efekt odbicia od powierzchni w ciele stałym, np. element betonowy.

$$A(x) = C_s \frac{Re(t, r)}{R} (r_1 \ r_2 \ r_3) \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{12} & m_{22} & m_{23} \\ m_{13} & m_{23} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

gdzie:  $C_s$  to współczynnik kalibracji czujnika,  $t$  to kierunek czułości czujnika,  $Re(t, r)$  to współczynnik odbicia w miejscu obserwacji  $x$ ;  $m_{11}$ ,  $m_{22}$ ,  $m_{33}$  – składowe tensora momentu opisujące ruch rozciągający;  $m_{12}$ ,  $m_{13}$ ,  $m_{23}$  – składowe tensora momentu opisujące ruch ścinający.

Lokalizacja źródła sygnału emisji akustycznej odbywa się na podstawie różnicy czasu przybycia fali podłużnej do sześciu czujników. Natomiast składowe tensora momentu wyznaczone są na podstawie amplitudy pierwszych ruchów w sześciu czujnikach. Analiza wartości tensora momentu pozwala rozróżnić pęknięcie od rozciągania i od ścinania materiału, jakim jest beton.

### Literatura

- Gołaski L., Świt G. (2005), *Acoustic Non Destructive Techniques as a New Method for Evaluation of Damages in Prestressed Concrete Structures: Failure of Concrete Structures*. Workshop of COST 534 on NTD Assessment and New Systems in Prestressed Concrete Structures, Brussels–Kielce, COST SCIENTIFIC REPORTS, ISBN 83-7204-447-3.
- Ohtsu M. (2008a), *Moment tensor analysis* [w:] *Acoustic Emission Testing*, red. C.U. Grosse, M. Ohtsu, Springer.
- Ohtsu M. (2008b), *Source mechanisms of AE* [w:] *Acoustic Emission Testing*, red. C.U. Grosse, M. Ohtsu, Springer.
- PN-EN 1330-9 (październik 2002), *Badania nieniszczące. Terminologia, cz. 9: Terminy stosowane w badaniach emisji akustycznej*.
- Świt G. (2004), *Evaluation of compliance change in concrete beams reinforced by GRP using AE*, „Journal of Materials in Civil Engineering”, American Society of Civil Engineering, USA, Vol. 16, No 5.
- Świt G. (2011), *Analiza procesów destrukcyjnych w obiektach mostowych z belek strunobetonowych z wykorzystaniem zjawiska emisji akustycznej*, Kielce, PL ISSN 1897-2691.
- Teodorczyk M. (2012), *Analiza tłumienia prędkości fali podłużnej w elemencie żelbetowym z zarysowaniem*, „Edukacja – Technika – Informatyka”, r. nauk. nr 3, cz. 1, Rzeszów.

### Streszczenie

Na Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach realizowany jest projekt badawczy dotyczący opracowania metody emisji akustycznej do oceny stanu technicznego konstrukcji żelbetowych. Jednocześnie prowadzone są badania nad analizą propagacji fali sprężystej w elementach żelbetowych. W pracy zaprezentowano teoretyczne podejście do procedury SiGMA i tensora momentu opisującego ruch fali emisji akustycznej powstały w wyniku pęknięcia betonu.

W praktyce planowane jest badanie propagacji fali sprężystej w elementach betonowych z wykorzystaniem aparatury pomiarowej wyposażonej w moduł SiGMA 3D. Moduł wykorzystuje procedurę SiGMA i tensor momentu, aby zlokalizować źródło sygnału emisji akustycznej i przedstawić graficznie propagację fali w ośrodku.

**Słowa kluczowe:** analiza fali sprężystej, emisja akustyczna, moment tensor, procedura SiGMA.

### **Application of the moment tensor in the SiGMA procedure**

#### **Abstract**

The research project is carried out at Kielce University of Technology for the development of an acoustic emission method for the evaluation of structural condition of reinforced concrete structures. At the same time, the analysis of an elastic wave propagation in reinforced concrete elements is carried out. This paper presents theoretical treatment of the acoustic emission wave due to cracking in concrete. It is represented by tensor moment and SiGMA procedure.

Authors are going to do research on the acoustic emission wave propagation using a SiGMA 3D module in the reinforced concrete elements. It is possible by appropriate test equipment. The SiGMA 3D module can locate the source and provide the graphical wave propagation in the medium.

**Key words:** elastic wave analysis, acoustic emission, tensor moment, SiGMA procedure.