

МОНИТОРИНГ ПОВРШИНСКИХ АРМИРАНО БЕТОНСКИХ ЕЛЕМЕНАТА

Немања Марковић¹
Тамара Несторовић²
Драгослав Стојић³
Радован Цветковић⁴

УДК: 624.07.012.45:539.3

DOI:10.14415/konferencijaGFS 2015.027

Резиме: Овим радом је приказан активни систем детекције оштећења и мониторинга армирано бетонских површинских елемената помоћу пиезоелектричних плочица. Метода се базира на праћењу промене пропагације таласа у армирано бетонском елементу изазваног помоћу пиезоелектричних актуатора залепљеног или убаченог унутар елемента. Квантитативна вредност оштећења исказана је путем индекса оштећења, при чему је у раду представљен дводимензионални индекс оштећења прилагођен геометриском карактеру анализираних армирано бетонских елемената. Због тога што пиезоелектрични сензори/актуатори трајно остају залепљени или уграђени у армирано бетонски конструктивни елемент могуће је активно праћење стања, детекција настанка прелина као и праћење даље пропагације прелина.

Кључне речи: Мониторинг, армирани бетон, пиезоелектрични сензори, пропагација таласа

1. УВОД

Армирани бетон је највише коришћени материјал у историји градитељства. Тренутно, велика већина јавних и инфраструктурних објеката која су од великог значаја из културног, историјског и безбедносног разлога, направљене су од армираног бетона. Данашње методе за праћење стања ових објеката су пасивног типа и не обезбеђују довољно података за оцену њихове сигурности и поузданости. Са развојем савремених технологија у пољу материјала и електронике, ствара се могућност и развоја активних система мониторинга и

¹ Немања Марковић, дипл.инж. грађ., Универзитет у Нишу, Грађевинско-архитектонски факултет у Нишу, Александра Медведева 14, Ниш, Србија, е – mail: nemanja.markovic@gaf.ni.ac.rs

² Проф. др Тамара Несторовић, дипл.инж. маш., Ruhr University Bochum, [Faculty of Civil and Environmental Engineering](http://Faculty_of_Civil_and_Environmental_Engineering), Universitätsstraße 150 | 44801 Bochum, Germany.

³ Проф. др Драгослав Стојић, дипл.инж. грађ., Универзитет у Нишу, Грађевинско-архитектонски факултет у Нишу, Александра Медведева 14, Ниш, Србија.

⁴ Мр Радован Цветковић, дипл.инж. грађ., Универзитет у Нишу, Грађевинско-архитектонски факултет у Нишу, Александра Медведева 14, Ниш, Србија.

детекције оштећења. Активни систем мониторинга армирано бетонских површинских конструкција помоћу пиезоелектричних агрегата и на бази пропагације таласа биће приказан у овом раду. Сваки пасивни или активни недеструктивни метод мониторинга мора да да одговор на следећа три питања:

- 1) Да ли оштећење постоји,
- 2) Где се оштећење налази и
- 3) Колико је оштећење велико.

Пионирски рад који је приказао мултифункционалност пиезоелектричних агрегата који се могу користити за потребе детекције оштећења, одређивање раних чврстоћа бетона на лицу места као и одређивање ударне силе приликом удара возила у конструкцију приказани су у раду [1]. Експериментална анализа детекције оштећења армирано бетонског зидног платна помоћу пиезоелектричних агрегата приказана је у раду [2]. Једнодимензионални индекс оштећења на бази средњих квадратних одступања и wavelet анализи сигнала први пут је примењен за детектовање оштећења код хеликоптера [5]. Урађен је велики број експерименталних истраживања у овој области али за једнодимензионалне елементе (греде и стубове) [3], [4].

Приказани активни систем мониторинга помоћу пиезоелектричних агрегата је још увек у развоју и још увек није доживео већу практичну примену. Нумерички модели који симулирају детекцију оштећења могу допринети бржем развоју методе. Моделирање детекције оштећења код гредних и површинских елемената приказано је у радовима [6], [7], [8].

2. ПРИНЦИП МЕТОДЕ ЗА ДЕТЕКЦИЈУ ОШТЕЋЕЊА

Детекција оштећења армирано бетонских површинских елемената конструкције помоћу пиезоелектричних сензора/актуатора базира се на праћењу промене пропагације таласа. Једна пиезоелектрична плочица (актуатор) користи се да изврши пропагацију таласа, док се друга користи као сензор, односно, да прихвати долазећи талас. Захваљујући пиезоелектричним особинама материјала исту плочицу је могуће користити као актуатор и као сензор, што може значајно да смањи потребан број пиезо плочица за мониторинг једног армирано бетонског елемента. Конститутивне једначине понашања пиезоелектричних материјала могу се исказати следећим изразима:

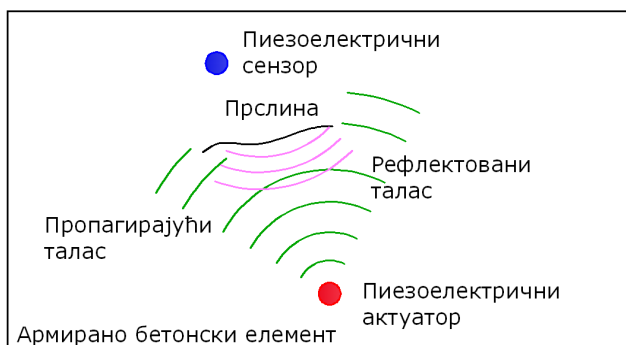
$$D_i = d_{i\lambda} \sigma_\lambda + \varepsilon_{ik}^T E_i \quad (1)$$

$$\varepsilon_\lambda = s_{\lambda\mu}^E \sigma_\mu + d_{i\lambda} E_i \quad (2)$$

Једначина (1) изражава директни пиезоелектрични ефекат, односно, ефекат сензора, док једначина (2) представља инверзни пиезоелектрични ефекат (актуатор ефекат), ознаке у приложеним једначинама могу се наћи у књизи [9].

Уколико се на путу између актуатора и сензора налази оштећење оно ће спречити потпуно, или у одређеној мери пропагацију таласа, што ће директно утицати на

смањење интензитета долазног таласа и смањење амплитуда излазног сигнала сензора у односу на неоштећену конструкцију (Слика 1). Са смањењем амплитуда излазног сигнала сензора долази до повећања индекса оштећења, јер је коришћени индекс оштећења базиран на промени енергије излазних сигнала. На овај начин могуће је праћење стања једног армирано бетонског површинског елемента од момента настанка оштећења до његовог даљег пропадања.



Слика 1. Принцип методе детектовања оштећења

3. ДВОДИМЕНЗИОНАЛНИ ИНДЕКС ОШТЕЋЕЊА

За одређивање оштећења површинског АБ елемента или појединог његовог дела потребно је најпре поделити га на n хоризонталних пресека и m вертикалних пресека формирајући $n \times m$ поддомена (Слика 2). Индекс оштећења се заснива на праћењу промене енергије излазног сигнала у сензору која се јавља приликом појаве оштећења. Оштећење као што су прсLINE или други облици оштећења онемогућавају таласу да се простира кроз конструкцију чиме се директно смањује енергија излазног сигнала. За декомпоновање сигнала користи се wavelet сигнал декомпозиција. Поступак одређивања индекса оштећења је следећи:

Корак 1: за изабрани пар актуатор-сензор читава се излазни сигнал у сензору. Затим се сигнал декомонује у 2^n декомпонованих сигнала $\{X_1, X_2, \dots, X_{2^n}\}$ помоћу wavelet сигнал анализе, при чему је сигнал X_j изражен помоћу одређеног броја сакупљених података $X_j = [x_{j,1}, x_{j,2}, \dots, x_{j,m}]$, где је m -број сакупљених података сигнала.

Корак 2: када се уради декомпозиција излазних сигнала сензора за оштећену и неоштећену конструкцију потребно је срачунати енергије свих декомпонованих сигнала при чему се са $E_{i,j}$ означава вектор енергије оштећеног површинског АБ

елемента а са $E_{h,j}$ вектор енергије неоштећеног. Сада је могуће срачунати једнодимензионални индекс оштећења помоћу следеће једначине:

$$DI = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{2^n} (E_{i,j} - E_{h,j})^2}{\sum_{j=1}^{2^n} E_{h,j}^2}} \quad (3)$$

Корак 3: пошто се ради о дводимензионалним АБ елементима, могуће је извршити мерење раздвојено у n хоризонталних пресека и m вертикалних пресека. Приликом одабира актуатор-сензор парова потребно је узети најудаљеније пиезоелектричне плочице у одговарајућим правцима. Индекси оштећења за хоризонталне пресеке обележићемо са DI_{Hi} ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), док за вертикалне индексе оштећења користићемо ознаке DI_{Vj} ($j = 1, 2, 3, \dots, m$). Дводимензионални индекс оштећења се може исказати помоћу следеће матрице:

$$M_{i,j} = DI_{Hi} \cdot DI_{Vj} \quad (4)$$

при чему $M_{i,j}$ представља средњу вредност индекса оштећења у i - j поддомену.

1-1	1-2	...	1-m
2-1	2-2		⋮
⋮		⋱	
n-1	...		n-m

Слика 2. Подела површинског АБ елемента на поддомене

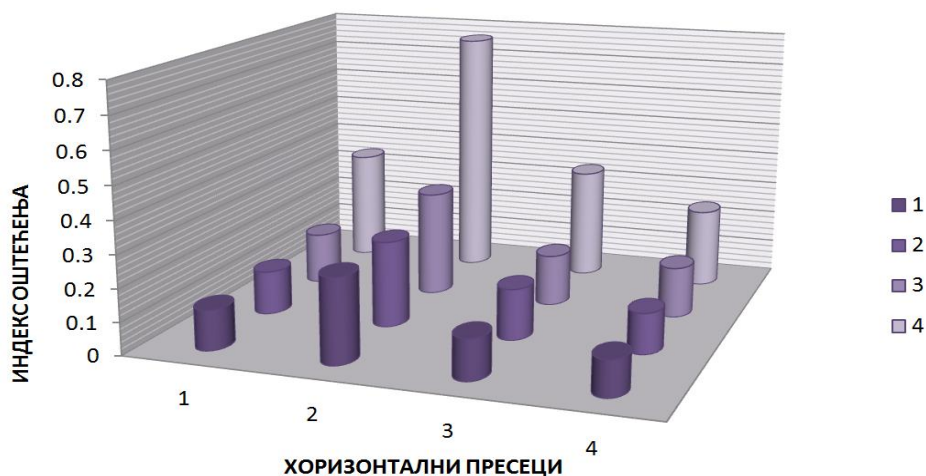
Корак 4: укупни индекс оштећења целокупног конструктивног елемента може се исказати следећим изразом:

$$R_o = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_{i,j} M_{i,j} \quad (5)$$

При чему је n и m број хоризонталних и вертикалних пресека на којима је извршено мерење, $\alpha_{i,j}$ представља тежински коефицијент:

$$\alpha_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_{i,j}}, (i = 1,2,3,\dots,n; j = 1,2,3,\dots,m) \quad (6)$$

Помоћу индекса оштећења $M_{i,j}$ могуће је праћење стања појединих поддомена површинског армирано бетонског елемента, односно, тиме је могуће на изванредан начин локализовати оштећење. На пример, уколико се оштећење налази у 2-4 поддомену то ће резултирати највећим индексима оштећења за хоризонтални пресек 2 и вертикални пресек 4, односно, њиховим множењем индекс оштећења $M_{2,4}$ биће далеко већи од осталих чиме је се оштећење детектовало и локализовало у зони поддомена (Слика 3). У зависности од густине (броја) поддомена зависи и величина зона на којима се оштећење детектује. Помоћу индекса оштећења R_o дефинисан је укупни износ оштећења целог армирано бетонског површинског елемента.



Слика 3. Пример дводимензионалног индекса оштећења

4. ЗАКЉУЧАК

У раду је приказан савремени метод активног мониторинга и детекције оштећења армирано бетонских конструкција помоћу пиезоелектричних агрегата.

Метода има велики потенцијал за практичну употребу, међутим, потребно је урадити још пуно истраживања како би метода одговорила на све захтеве поузданости и сигурности добијених података.

Дводимезионални индекс оштећења приказан у раду даје могућност праћења стања површинских армирано бетонских елемената конструкције.

Помоћу овог индекса оштећења могуће је детектовати оштећење и пратити његово даље пропагирање, међутим, није могуће ближе локализовање оштећења и није нам позната тачна величина оштећења.

Због тога, потребно је радити на методама за локализовање оштећења који ће употпунити ову методу и приближити је могућности за будуће практичне примене.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Song, G., Gu, H., Mo Y.L.: Smart aggregates: multi-functional sensors for concrete structures – a tutorial and a review. *Smart materials and Structures*, **2008.**, vol. 17.
- [2] Hou, S., Zhang, H.B., Ou P.J.: A PZT-based smart aggregate for seismic shear stress monitoring. *Smart materials and Structures*, **2013.**, vol. 22.
- [3] Dumoulin, C., Karaiskos, G., Deraemaeker, A.: Monitoring of crack propagation in reinforced concrete beams using embedded piezoelectric transducers. *VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures FraMCoS-8*, March 10-14, 2013, Toledo-Spain.
- [4] Hu, B., Kundu, T., Grill, W., Liu, B., Toufigh, V.: Embedded piezoelectric sensors for health monitoring of concrete structures. *ACI Materials Journal*, **2013.**, стр. од 149 до 158.
- [5] Samuel, P.D., Pines, J.D.: Classifying helicopter gearbox faults using a normalized energy metric. *Smart materials and Structures*, **2001.**, vol. 10.
- [6] Марковић, Н., Несторовић, Т., Стојић Д.: Numerical modeling of damage detection in concrete beams using piezoelectric patches. *Mechanics Research Communications*, **2015.**, vol. 64, стр. од 15 до 22.
- [7] Song, F., Huang, G.L., Kim J.H., Haran, S.: On the study of surface wave propagation in concrete structures using a piezoelectric actuator/sensor system. *Smart materials and Structures*, **2008.**, vol. 17.
- [8] Марковић, Н., Несторовић, Т., Стојић, Д., Цветковић, Р.: Моделирање пропације таласа у армирано бетонским конструкцијама за потребе детекције оштећења. *Друштво грађевинских конструктора Србије ДГКС*, 24-26 Септембар **2014.**, Нови Сад, Србија, стр. од 521 до 530.
- [9] Giurgiutiu, V.: Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors. *Elsevier*, **2008.**

MONITORING OF REINFORCED CONCRETE PLATE ELEMENTS

Summary: *This paper presents the active monitoring and damage detection systems for reinforced concrete plate elements using piezoelectric patches. The method is based on monitoring of changes in wave propagation in reinforced concrete elements induced by piezoelectric actuators bonded or embedded inside the concrete structure. The quantitative value of damage is defined by damage index, where in this paper is presents a two-dimensional damage index adapted for geometrical characteristics of analyzed reinforced concrete plate-like elements. Because piezoelectric sensors/actuators remain permanently bonded or embedded in reinforced concrete structural elements, it is possible to actively monitor structural condition, to detect crack occurrence and monitoring further crack propagation.*

Keywords: *Monitoring, reinforced concrete, piezoelectric sensors, wave propagation*