

**Maciej MAJOR, Izabela MAJOR**

Politechnika Częstochowska

## EKOLOGICZNY KOMPOZYT ŚCIENNY BETONOWO-GUMOWY

Przedstawiono analizę numeryczną wpływu impulsu siły działającej na ścianę wykonaną z bloczków betonowych z gumowymi wkładkami. Bloczek betonowy ma zatopione w trakcie realizacji procesu technologicznego wkładki gumowe o odpowiednio dobranym kształcie. Dzięki temu ściana posiada właściwości umożliwiające redukcję impulsu siły działającej prostopadle do jej powierzchni. Impuls siły powoduje powstanie fal mechanicznych, których propagację można zaobserwować, analizując rozkład naprężeń w przekroju poprzecznym ściany. Mierząc wartości naprężeń na powierzchniach czołowych rozpatrywanego modelu ściany, można ocenić skuteczność zastosowanego rozwiązania w porównaniu do ściany bez gumowych wkładek. Analizę numeryczną wykonano w programie ADINA.

**Słowa kluczowe:** materiał hipersprężysty, Mooney-Rivlin, kompozyt, MES, Adina

### WPROWADZENIE

W obecnych czasach kompozyty są powszechnie stosowane ze względu na lepsze właściwości mechaniczne. Do najpopularniejszych materiałów wykorzystywanych w kompozytach używanych w budownictwie należą beton oraz stal. Materiały te w połączeniu ze sobą znacznie efektywniej przenoszą naprężenia ściskające i rozciągające. Istotne w rozwiązaniach konstrukcyjnych są również kompozyty oparte na połączeniu stali z gumą, stosowane np. na łożyska stalowo-gumowe. Pozwalają one na redukcję drgań powstałych w następstwie ruchu kołowego (drogowego lub szynowego). We współcześnie stosowanych rozwiązaniach technologiczno-materiałowych dotyczących kompozytów tylko niewielka ilość badań dotyczy połączenia betonu i gumy.

Za prekursorów badań materiałów gumowych uważa się Mooneya oraz Rivlina, którzy opracowali matematyczny model opisu gumy [1, 2]. Dalsze badania gum prowadził Zahorski, przedstawiając zmodyfikowany opis zachowania się gumy pod wpływem przyłożonych obciążeń [3, 4]. Badania propagacji fali w kompozytowych materiałach warstwowych zostały omówione w pracy [5]. Modelowanie zjawisk falowych w materiałach hipersprężystych Mooneya-Rivlina z wykorzystaniem programów opartych o MES rozpatrywano w pracach [6, 7].

W niniejszym opracowaniu dokonano analizy numerycznej ściany z elementów kompozytowych wykonanych z bloczków betonowych z gumowymi wkładkami, które zostały połączone między sobą za pomocą spoin cementowych. Analiza

numeryczna ma na celu wykazanie zakresu możliwości wytłumienia propagującej poprzecznie do ściany fali mechanicznej w następstwie impulsu siły działającej prostopadłe na ścianę wykonaną z kompozytów betonowo-gumowych w porównaniu do ściany z bloczków betonowych. W celu dokonania analizy wykorzystano oprogramowanie ADINA.

## 1. HIPERSPRĘŻYSTY MATERIAŁ MOONEYA-RIVLINA

Równania konstytutywne, zwane również związkami fizycznymi, opisują zachowanie się określonego ośrodka materialnego pod wpływem różnorodnych czynników zewnętrznych. Związek konstytutywny dla hipersprężystego materiału Mooneya-Rivlina ma następującą postać:

$$W(I_1, I_2) = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) \quad (1)$$

gdzie  $W$  oznacza energię sprężystą,  $C_1$ ,  $C_2$  są to stałe materiałowe, a  $I_1$ ,  $I_2$  - niezmienniki tensora deformacji.

Stałe sprężyste dla rozpatrywanej w niniejszym opracowaniu gumy przyjęto o wartościach  $C_1 = 6,278 \times 10^4$  Pa oraz  $C_2 = 8,829 \times 10^4$  Pa [3].

## 2. MODEL NUMERYCZNY ANALIZOWANEJ ŚCIANY

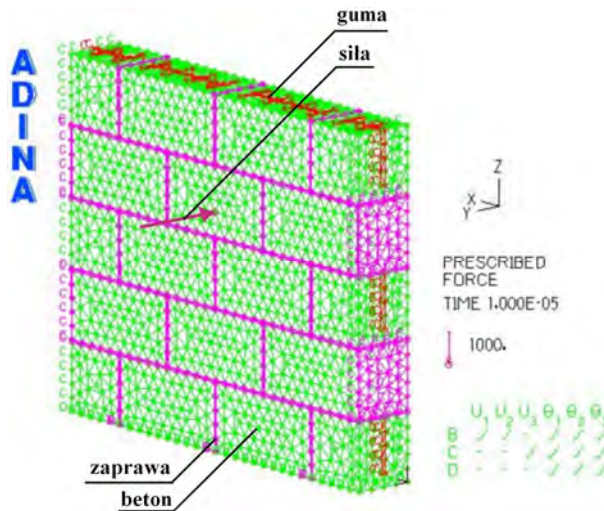
Do obliczeń numerycznych przyjęto model ściany o wysokości równej 129 cm, długości 153 cm i grubości 22 cm. Ściana składa się z bloczków betonowych o wysokości 25 cm, długości 50 cm i grubości 22 cm. Spoiny pionowe oraz poziome dla rozpatrywanej ściany przyjęto o grubości 1 cm. Dla przyjętego modelu zostały nałożone więzy na kierunkach osi przyjętego układu współrzędnych zgodnie z rysunkiem 1. Płaszczyzna dolna ściany „XY” została zablokowana na kierunku osi „Z”, natomiast płaszczyzny boczne „YZ” zablokowano na kierunku osi „X” oraz „Y”.

Obciążenie impulsem w postaci siły skupionej prostopadłej do powierzchni o wartości 1000 N przyłożono do węzła nr 6498 (punkt 1 na rys. 2). Siła osiąga swoją docelową wartość w czasie  $t = 1 \times 10^{-5}$  s, po czym obciążenie zostaje zdjęte z konstrukcji. Tak określony impuls siły wywołuje propagację zaburzenia w ścianie (tj. propagację fali mechanicznej).

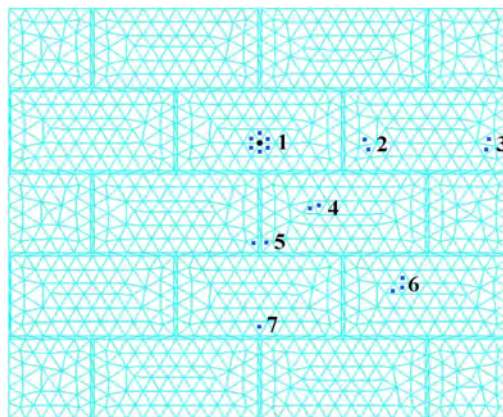
W kolejnych krokach czasowych wykonanej analizy numerycznej w następstwie przyłożonego impulsu siły dokonano odczytów wartości naprężeń w punktach pomiarowych o numerach 1-7, zgodnie z rysunkiem 2, odpowiednio dla czasów  $t = 1 \times 10^{-5}$  s oraz  $t = 6 \times 10^{-5}$  s.

Dyskretyzacji rozważanego modelu ściany dokonano elementami 4-węzłowymi (czworościanami), przyjmując rozmiar oczka  $\sim 0,05$  m dla bloczków betonowych. Dyskretyzacji obszarów elementów gumowych oraz spoin dokonano automatycznie w oparciu o uprzednio utworzone węzły na bloczkach betonowych. Bloczki

betonowe zamodelowano z betonu klasy C20/25, zaprawa łączeniowa ma wytrzymałość na ściskanie rzędu 4 MPa, natomiast wkładki gumowe stanowi nieliniowy hipersprężysty materiał Mooneya-Rivlina. Na podstawie powyższych założeń elementom skończonym w programie ADINA przyporządkowano odpowiednio następujące modele materiałów: bloczki betonowe - materiał Concrete, zaprawa - materiał DF-Concrete, guma - Mooney-Rivlin.



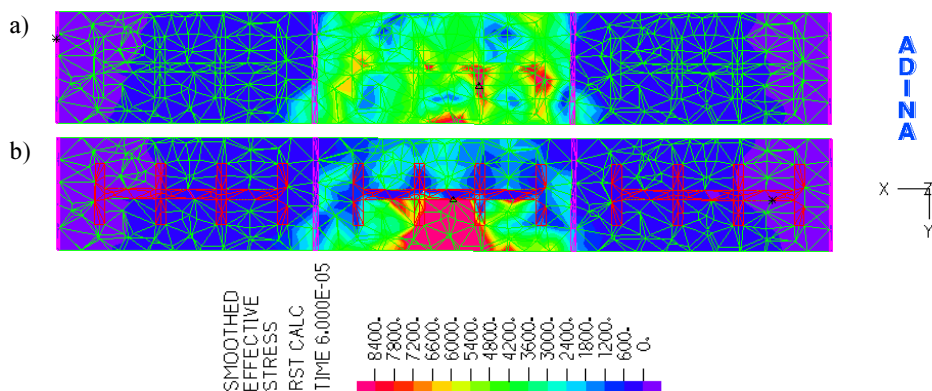
Rys. 1. Model ściany w programie ADINA



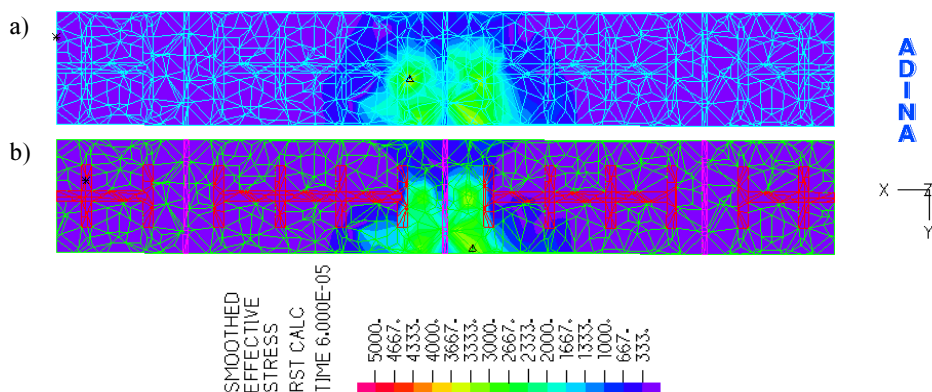
Rys. 2. Model dyskretny ściany oraz punkty pomiarowe dla naprężenia efektywnego. Punkty 1R-7R są odbiciem punktów 1-7 i są umiejscowione na tylnej stronie ściany

### 3. WYNIKI BADAŃ NUMERYCZNYCH

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono rozkłady naprężeń efektywnych w przekrojach poziomych poprowadzonych poprzez punkty 1/1R oraz 5/5R - rys. 2.



Rys. 3. Naprężenia efektywne dla  $t = 6 \times 10^{-5}$  s w przekroju płaszczyzną przechodzącą przez punkt 1/1R: a) ściana z bloków betonowych, b) ściana wykonana z kompozytów

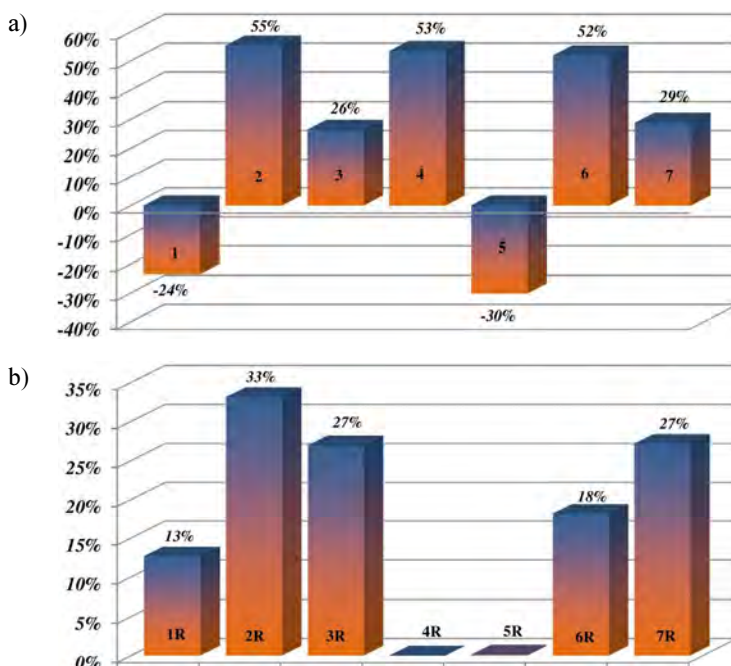


Rys. 4. Naprężenia efektywne dla  $t = 6 \times 10^{-5}$  s w przekroju płaszczyzną przechodzącą przez punkt 5/5R: a) ściana z bloków betonowych, b) ściana wykonana z kompozytów

Na rysunkach 3 i 4 wyraźnie widać, że w ścianie wykonanej z kompozytu (błoczek betonowy z wkładką gumową) dochodzi do znacznego zmniejszenia wartości naprężeń przenoszonych przez falę po stronie zewnętrznej ściany w porównaniu ze ścianą wykonaną z pełnych bloków.

Na rysunku 5 przedstawiono procentowo zakres tłumienia fali mechanicznej pomiędzy ścianą wykonaną z elementów kompozytowych a ścianą z pełnych bloków betonowych na frontowej (punkty pomiarowe 1-7) oraz tylnej (punkty pomiarowe 1R-7R) powierzchni obu ścian dla czasu  $t = 6 \times 10^{-5}$  s. Zgodnie z tym co przedstawiono na rysunku 5a, wzrost naprężenia występuje w punktach nr 1 i 5 (odpowiednio o 24 i 30%), co spowodowane jest interferencją odbitej fali od elementu gumowego. W pozostałych punktach pomiarowych, tj. 2, 3, 4, 6 oraz 7, odnotowano spadek naprężeń mieszczący się w przedziale 26÷55%. Rozpatrując wyniki z rysunku 5b, gdzie przedstawiono procentowe tłumienie fali mechanicznej na tylnej powierzchni ściany, można zaobserwować, że w zależności od położenia punktu zakres tłumienia waha się w przedziale 13÷33%. W przypadku punktów 4R

i 5R w zadanym czasie, tj.  $t = 6 \times 10^{-5}$  s, nie odnotowano naprężeń, co oznacza, że fala mechaniczna nie dotarła w określonym czasie do zadanych punktów pomiarowych.



Rys. 5. Tłumienie fali mechanicznej propagującej w ścianie kompozytowej dla  $t = 6 \times 10^{-5}$  s:  
a) na powierzchni czołowej „XZ”, b) na powierzchni tylnej „XZ”

Pomimo wzrostu naprężeń w pewnych punktach analizowanej struktury na skutek propagującej fali mechanicznej kompozyt, jakim jest bloczek betonowy z wkładką gumową, pozwala na znaczną redukcję, tj. aż do 55% propagującej fali. Jest to aspekt szczególnie istotny w przypadku, gdy projektowana ściana miałaby stanowić barierę dla niepożądanych drgań pochodzących od maszyn lub innych źródeł. Dodatkowo prezentowana struktura pozwala na przenoszenie znacznych obciążeń w płaszczyźnie muru, co w przypadku innego rodzaju elementów kompozytowych wykonanych w połączeniu z elementami gumowymi jest zazwyczaj niemożliwe.

## WNIOSKI

Obecnie jako izolację akustyczną budynków stosuje się najczęściej styropian lub wełnę mineralną, natomiast kompozyt, jakim jest bloczek betonowy z wypełnieniem gumowym, mógłby stanowić materiał innowacyjny, pozwalający na jednocześnie przenoszenie ściskających obciążeń konstrukcji, a dodatkowo stanowiłby barierę dla drgań pochodzących ze środowiska zewnętrznego. Zmniejszenie nośnoś-

ci muru na skutek zastosowanej gumy byłoby nieznaczne, podczas gdy korzyści wynikające z połączenia elementów betonowych z gumą stanowiłyby podstawę do stosowania takich elementów w miejscach, w których czasowo mogą występować drgania mechaniczne. Ponadto wykonanie przedstawionego elementu kompozytowego w postaci bloczka betonowego z wypełnieniem gumowym byłoby proste z technologicznego punktu widzenia, gdyż w momencie formowania bloczków betonowych zatapiała byłaby forma pozwalająca po jej usunięciu na włożenie bądź też wtłoczenie gumy. Wytworzenie, eksploatacja, a następnie proces rozbiórki obiektu wykonanego z takich kompozytów nie wpływałyby negatywnie na środowisko naturalne, gdyż zarówno beton, jak i guma są materiałami podlegającymi recyklingowi. Warto również zwrócić uwagę na fakt, że aktualnie prowadzone badania numeryczne pozwalają na zmniejszenie kosztów procesu projektowania materiałów innowacyjnych w porównaniu do tradycyjnych metod doświadczalno-laboratoryjnych. Przedstawiona w pracy idea ściany kompozytowej jest jedynie modelem koncepcyjnym, który może być wstępem do dalszych modyfikacji i badań tego typu struktur.

## LITERATURA

- [1] Mooney M., A theory of large deformations, J. Appl. Phys. 1940, 11.
- [2] Rivlin R.S., Saunders D.W., Large elastic deformations of isotropic materials, VII Experiments of the deformation of rubber, Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. 1951, 243, 251-288.
- [3] Zahorski S., Doświadczalne badania niektórych własności mechanicznych gumy, Rozprawy inżynierskie 1962, tom 10(1).
- [4] Zahorski S., A form of elastic potential for rubber-like materials, Arch. of Mechanics 1959, 5.
- [5] Kosiński, S., Fale sprężyste w gumopodobnych kompozytach warstwowych, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2007.
- [6] Major I., Major M., Comparative analysis of the distribution of effective stress in Mooney and Zahorski materials using ADINA software, Advanced Material Research 2014, 1020, 165-170.
- [7] Major I., Major M., Travelling waves in a thin layer composed of nonlinear hyperelastic Zahorski material, Journal of Theoretical and Applied Mechanics 2009, 47, 1, 109-126.

## ECOLOGICAL CONCRETE-RUBBER WALL COMPOSITE

**Paper presents numerical analysis considering the influence of dynamical force perpendicularly acting on the wall made of concrete blocks with rubber inserts. Concrete blocks during production technology process have rubber inserts with properly adapted shape. According to that, wall properties allow to reduce acting to the wall surface dynamic force impulse. By measuring the stress values on the surface of the analysed wall structure model with rubber inserts, the effectiveness of proposed solution can be examined comparing to the wall made of concrete blocks. Numerical analysis was performed using ADINA software.**

**Keywords:** hyperelastic material, Mooney-Rivlin, composite, FEM, Adina