

Krzysztof CICHOCKI  
Mariusz RUCHWA

## **PROPAGACJA ZNISZCZENIA W KONSTRUKCJI OBCIĄŻONEJ WYBUCHEM**

### **STRESZCZENIE**

Niniejsza praca przedstawia wyniki kontynuacji prac autorów nad zastosowaniem nieliniowego sprężysto-plastycznego modelu materiałowego betonu ze zniszczeniem do analizy zagadnień propagacji zniszczenia w konstrukcjach żelbetowych obciążonych wybuchem. Celem pracy jest określenie mechanizmu zniszczenia konstrukcji płytowej wykonanej z betonu zbrojonego, poddanej działaniu wybuchu o dużej intensywności, zainicjowanego w pewnej odległości od powierzchni konstrukcji. Całość analizy została wykonana przy zastosowaniu systemu obliczeniowego Abaqus, z zaimplementowanym własnym modelem materiałowym. Ze względu na dostępność wyników eksperymentalnych wybranej konstrukcji w literaturze, przeprowadzono porównanie uzyskanych wyników analizy numerycznej z analogicznymi rezultatami badań eksperymentalnych. Pozwoliło to na sformułowanie odpowiednich wniosków końcowych.

**Słowa kluczowe:** model materiałowy, beton, obciążenie wybuchem, symulacje numeryczne

### **1 WPROWADZENIE**

Zagadnienie propagacji zniszczenia w konstrukcjach budowlanych poddanych działaniu obciążeń o charakterze wyjątkowym (uderzenia, wybuchy) jest kluczowym problemem przy określeniu ich integralności, rozumianej jako zdolność konstrukcji do zachowania częściowej funkcjonalności po zniszczeniu części jej elementów. Stateczność oraz integralność konstrukcji budowlanych (a w szczególności budynków wielokondygnacyjnych) jest przedmiotem badań naukowych prowadzonych w ramach międzynarodowego programu badawczego COST TU0601 „Robustness of Structures”, których celem jest określenie kryteriów oceny konstrukcji pod względem jej integralności i odporności na lokalne uszkodzenia.

Ważnym narzędziem w tego rodzaju analizach są numeryczne symulacje wybranych przypadków układu konstrukcja-obciążenie. Oprócz analiz globalnych, dotyczących zachowania się całej konstrukcji, niezbędne są analizy numeryczne dotyczące typowych elementów konstrukcji: belek, płyt, itp. Pozwalają one na weryfikację zastosowanych modeli materiałowych, analizę mechanizmu propagacji zniszczenia, jak też wynikowego zakresu zniszczeń w materiale konstrukcji.

Wcześniejsze badania prowadzone przez autorów niniejszej pracy wykazały decydujący wpływ założonego w analizie modelu materiałowego na jakość wyników uzyskanych przy zastosowaniu algorytmu metody elementów skończonych. Problemem jest w dalszym ciągu dobór odpowiedniego modelu materiałowego betonu, ze względu na jego specyficzny mechanizm powstawania zniszczenia (inny przy ściskaniu, inny przy rozciąganiu).

## 2 OPIS MATERIAŁOWY

Zastosowano sprężysto-plastyczny model betonu ze zniszczeniem, bazujący na znanej koncepcji opisu zniszczenia wykorzystującej parametry skalarne, wprowadzonej przez Kachanova [1] oraz rozwiniętej w pracach Lemaitre'a [2]. Przyjęto założenia kontynuualnej mechaniki zniszczenia, podane przez Rabotnova [3], gdzie także omówiono pojęcie naprężeń efektywnych. Tensor naprężeń efektywnych dany jest zależnością:

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{D}_o : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^p) \quad (1)$$

gdzie  $\mathbf{D}_o$  jest liniowo-sprężystą macierzą konstytutywną czwartego rzędu,  $\boldsymbol{\varepsilon}$  jest tensorem odkształceń drugiego rzędu, zaś  $\boldsymbol{\varepsilon}^p$  jest tensorem odkształceń plastycznych.

Zniszczenie materiału jest określone przez dwie zmienne skalarne, przy rozciąganiu i ściskaniu. Dlatego konieczne jest rozdzielenie tensora naprężeń efektywnych (1) na składowe odpowiadające ściskaniu i rozciąganiu. Dla naprężeń głównych  $\bar{\boldsymbol{\sigma}}_i$  oraz ich kierunków określonych wektorami jednostkowymi  $\mathbf{p}_i$  uzyskujemy:

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}}^+ = \langle \bar{\boldsymbol{\sigma}} \rangle = \sum_{i=1}^3 \langle \bar{\boldsymbol{\sigma}}_i \rangle \mathbf{p}_i \otimes \mathbf{p}_i \quad (2)$$

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}}^- = \langle \bar{\boldsymbol{\sigma}} \rangle = \sum_{i=1}^3 \langle \bar{\boldsymbol{\sigma}}_i \rangle \mathbf{p}_i \otimes \mathbf{p}_i$$

Przyjęto formę swobodnej energii Helmholtza zaproponowaną przez Mazarsa i Pijaudier-Cabota [4]:

$$\Psi(\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\varepsilon}^p, d^+, d^-) = (1 - d^+) \Psi_0^+(\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\varepsilon}^p) + (1 - d^-) \Psi_0^-(\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\varepsilon}^p) \quad (3)$$

gdzie:

$$\Psi_0^+ = \Psi_0^+(\bar{\boldsymbol{\sigma}}(\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\varepsilon}^p)) = \frac{1}{2} \bar{\boldsymbol{\sigma}}^+ : \mathbf{D}_0^{-1} : \bar{\boldsymbol{\sigma}} \quad (4)$$

$$\Psi_0^- = \Psi_0^-(\bar{\boldsymbol{\sigma}}(\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\varepsilon}^p)) = \frac{1}{2} \bar{\boldsymbol{\sigma}}^- : \mathbf{D}_0^{-1} : \bar{\boldsymbol{\sigma}} \quad (5)$$

Wzory (4) i (5) określają swobodne energie sprężyste związane odpowiednio z rozciąganiem i ściskaniem, zaś parametry skalarne  $d^+, d^-$  określają zniszczenie materiału, i spełniają nierówności:

$$0 \leq d^+ \leq 1 \quad (6)$$

$$0 \leq d^- \leq 1$$

Ze względu na rozdzielenie tensora naprężeń (2), wprowadzone zostały pojęcia równoważnego efektywnego naprężenia rozciągającego  $\bar{r}^+$  oraz ściskającego  $\bar{r}^-$ ,

$$\bar{r}^+ = \sqrt{\bar{\boldsymbol{\sigma}}^+ : \mathbf{D}_0^{-1} : \bar{\boldsymbol{\sigma}}^+} \quad (7)$$

$$\bar{r}^- = \sqrt{\sqrt{3}(K\bar{\sigma}_{oct}^- + \bar{\tau}_{oct}^-)} \quad (8)$$

Jako kryteria zniszczenia wprowadzono za Simo i Ju [5]:

$$g^+(\bar{r}^+, r^+) = \bar{r}^+ - r^+ \leq 0 \quad (9)$$

$$g^-(\bar{r}^-, r^+) = \bar{r}^- - r^- \leq 0 \quad (10)$$

Bieżący przyrost tensora odkształceń plastycznych został określony jak niżej:

$$\dot{\epsilon}^p = \beta EH(d^-) \frac{\langle \bar{\sigma} : \dot{\epsilon} \rangle}{\bar{\sigma} : \bar{\sigma}} \mathbf{D}_0^{-1} : \bar{\sigma} \quad (11)$$

$E$  jest modułem Younga, zaś  $\beta$  parametrem materiałowym sterującym intensywnością deformacji plastycznych (wartość zerowa oznacza brak efektów plastycznych - model redukuje się do liniowo-sprężystego ze zniszczeniem).  $H(d^-)$  jest funkcją Heaviside'a, wprowadzoną w celu uniemożliwienia rozwoju zniszczenia przy odciażaniu podczas ściskania.

Do kompletnego określenia omawianego modelu materiałowego konieczne jest podanie zależności na rozwój skalarnych parametrów opisujących zniszczenie. W tym celu przyjęto następujące sformułowania:

$$d^+ = 1 - \frac{r_0^+}{\bar{r}^+} e^{A^+(1-\frac{\bar{r}^+}{r_0^+})} \quad (12)$$

$$d^- = 1 - \frac{r_0^-}{\bar{r}^-} (1 - A^-) - A^- e^{B^-(1-\frac{\bar{r}^-}{r_0^-})} \quad (13)$$

Sposób określenia parametrów materiałowych  $A^+$ ,  $A^-$ ,  $B^-$  oraz wielkości początkowych  $r_0^+$  oraz  $r_0^-$  podany został przez Olivera i Farię [6], zaś procedury numeryczne omówiono w pracy Cichockiego [7]. Parametr  $b$  obliczany jest przy zastosowaniu procedury przedstawionej przez Yankelevsky'ego i Reinhardta [8], bazującej na obserwacji wyników próby cyklicznego jednoosiowego ściskania próbek betonowych.

W celu uwzględnienia wpływu prędkości odkształceń na odpowiedź dynamiczną, która w przypadku betonu jest znaczna (Bishoff i Perry [9]), zastosowano procedurę podobną do propozycji Simo i Ju [5]. Według niej rozwój skalarnych parametrów zniszczenia zależy m.in. od parametru zmienności zniszczenia  $\vartheta$ , będącego parametrem materiałowym. Przy nieskończonej wartości tego parametru uzyskuje się, że rozwój zniszczenia nie zależy od prędkości odkształcenia (*rate independent*). Wartość zerowa oznacza brak rozwoju zniszczenia - odpowiedź liniowo-sprężystą. Na podstawie tych założeń zmodyfikowano równania (7) i (8) używając następujące wyrażenia na przyrost odpowiednich parametrów:

- rozciąganie:

$$\dot{d}^+ = \frac{\vartheta^+}{(f_u^+)^{a^+/2}} \langle \bar{r}^+ - r^+ \rangle^{a^+} \frac{\partial G^+(\bar{r}^+)}{\partial \bar{r}^+} \quad (14)$$

$$\dot{r}^+ = \frac{\vartheta^+}{(f_u^+)^{a^+/2}} \langle \bar{r}^+ - r^+ \rangle^{a^+} \quad (15)$$

- ściskanie:

$$\dot{d}^- = \frac{\vartheta^-}{(f_u^-)^{a^-/2}} \langle \bar{r}^- - r^- \rangle^{a^-} \frac{\partial G^-(\bar{r}^-)}{\partial \bar{r}^-} \quad (16)$$

$$\dot{r}^- = \frac{\vartheta^-}{(f_u^-)^{a^-/2}} \langle \bar{r}^- - r^- \rangle^{a^-} \quad (17)$$

Parametry zmienności  $\vartheta^+$ ,  $\vartheta^-$  dotyczą odpowiednio rozciągania i ściskania, zaś  $a^+$ ,  $a^-$  są dodatnimi wykładnikami. Wszystkie te parametry są własnościami materiałowymi, wyznaczanymi z jednoosiowych prób rozciągania i ściskania. Odrębne wartości parametrów w obu stanach obciążenia (rozciągania i ściskania) pozwalają na uwzględnienie większej zależności odpowiedzi dynamicznej betonu od prędkości odkształcenia przy obciążeniu rozciągającym niż przy ściskającym.

### 3 PRZYKŁAD NUMERYCZNY

Omawiany przykład dotyczy żelbetowej płyty będącej przedmiotem serii testów eksperymentalnych opisanych szczegółowo przez Schenkera i inn. [10] i analizowanych numerycznie przez Ruchwę [11]. Poniżej (Fig.1) pokazano rysunek płyty oraz jej zbrojenia, wraz z elementami wsporczymi.

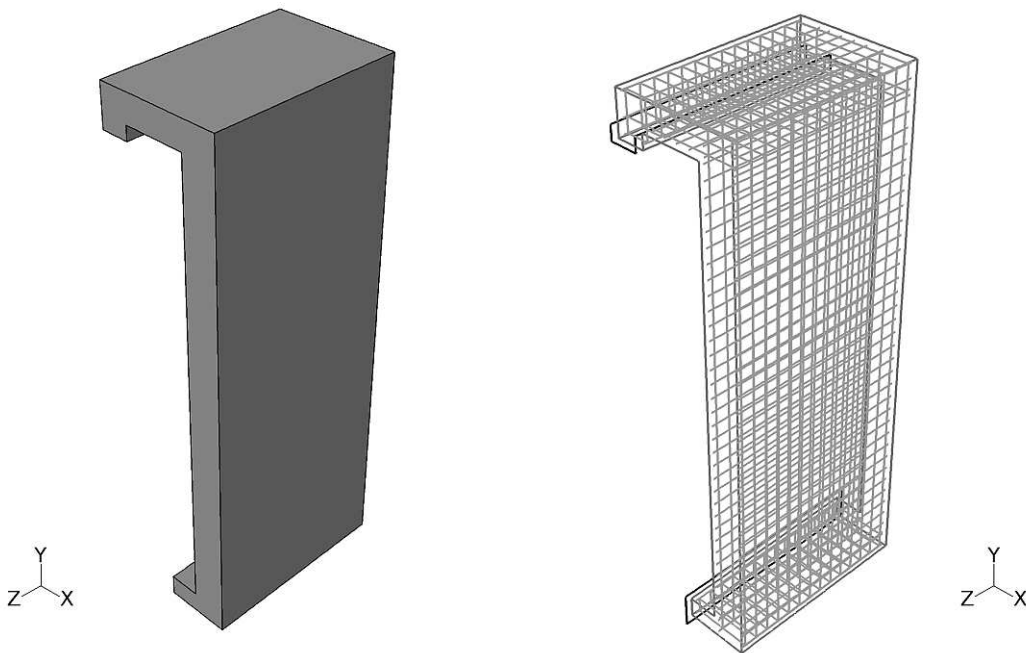


Fig. 1. Widok płyty oraz jej zbrojenia wraz z elementami wsporczymi.

Żelbetowe płyty umieszczone pionowo na masywnych blokach oporowych poddane zostały działaniu fali uderzeniowej będącej wynikiem wybuch 900 kg TNT, uformowanego w postaci półkuli, w odległości 20 m od konstrukcji. W rozpatrywanym przykładzie przyjęto, że konstrukcja jest wykonana z betonu B50 zbrojonego stalą A-II. Pozostałe informacje dotyczące m.in. opisu stanowiska badawczego, wykresu ciśnienia działającego na powierzchnię płyt, znajdują się w pracach [10, 11].

Wspomnieć należy, że zasadnicza część impulsu obciążenia fala uderzeniową działa na konstrukcję w czasie ok. 0.01 s, po czym następuje okres drgań swobodnych połączonych z

propagacją uszkodzeń w rozpatrywanej płycie. Rozwój uszkodzeń kończy się (w przybliżeniu) po upływie czasu 0.03 s.

Jednym z podstawowych problemów analizy numerycznej konstrukcji obciążonych w sposób nagły (wybuch, uderzenie), jest założenie długości przedziału czasu, w którym należy przeprowadzać obliczenia. Krótkotrwałość działania obciążenia nie oznacza, iż w podobnie krótkim okresie rozwiną się strefy zniszczenia w konstrukcji. Szczególnie w przypadku masywnych konstrukcji istotny jest efekt propagacji w materiale fali uderzeniowej, powodującej zniszczenia przy odbiciu od brzegu.

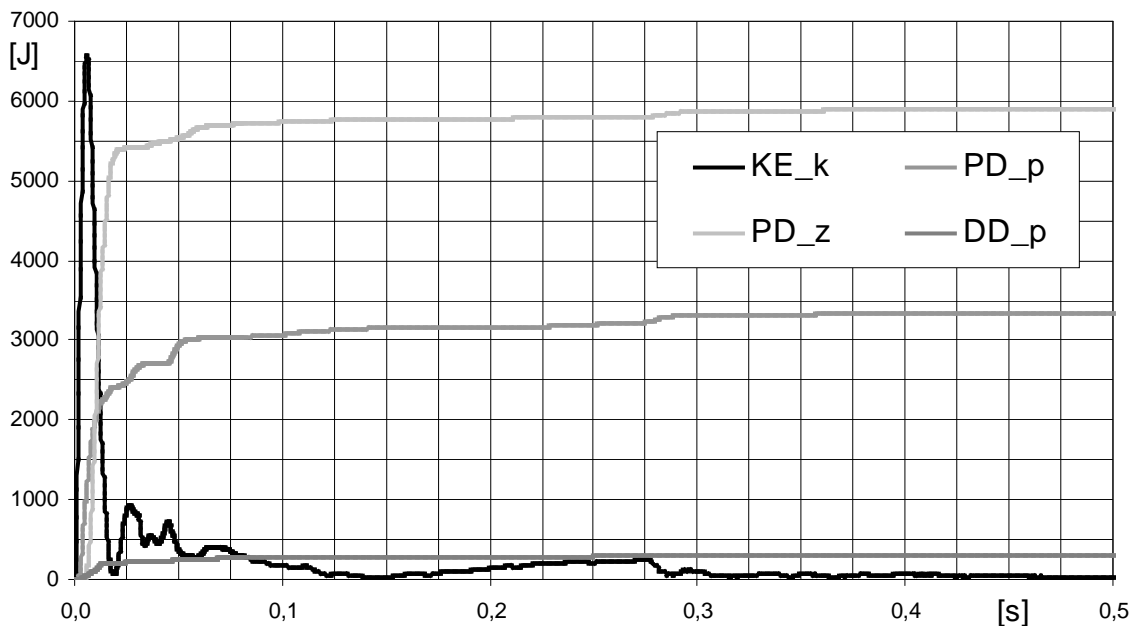


Fig. 2. Wykresy zmienności wybranych funkcji energii w zależności od czasu. Oznaczenia: KE\_k – energia kinetyczna całej konstrukcji, PD\_p – dyssypowana przez płytę (tylko beton), PD\_z – dyssypowana przez zbrojenie, DD\_p – dyssypowana na pękaniu płyty (betonu).

W związku z niemożnością przewidzenia czasu w którym zakończy się rozwój stref zniszczenia, konieczne jest przeprowadzenie analizy dla stosunkowo długiego przedziału czasu i analiza wykresów wartości energii całej konstrukcji. Pozwala to na precyzyjne określenie momentu ustania dyssypacji energii poprzez odkształcenia plastyczne oraz zniszczenie. Wykresy dotyczące omawianego przypadku podano na Fig.2. Analiza była prowadzona do chwili  $t=1$  s, natomiast wykres podano w przedziale (0, 0.5 s), dalej wykresy energii dyssypowanej prezentowały stałe wartości, bez wzrostów. Jak można zauważyć, wykresy prezentują gwałtowny wzrost w przedziale czasu do  $t=0.05$  s, a następnie stopniowe niewielkie zwiększanie wartości aż do  $t=0.3$  s, po czym nie zauważa się dalszych przyrostów energii dyssypowanej. Energia kinetyczna całego układu stopniowo maleje ze względu na obecność tłumienia materiałowego.

Na dalszych rysunkach pokazano rozwój zniszczenia w płycie betonowej od rozciągania (parametr  $d_t$ ). Parametr ten zawiera się w przedziale od 0 (brak zniszczenia) do 1.0 (całkowite zniszczenie materiału).

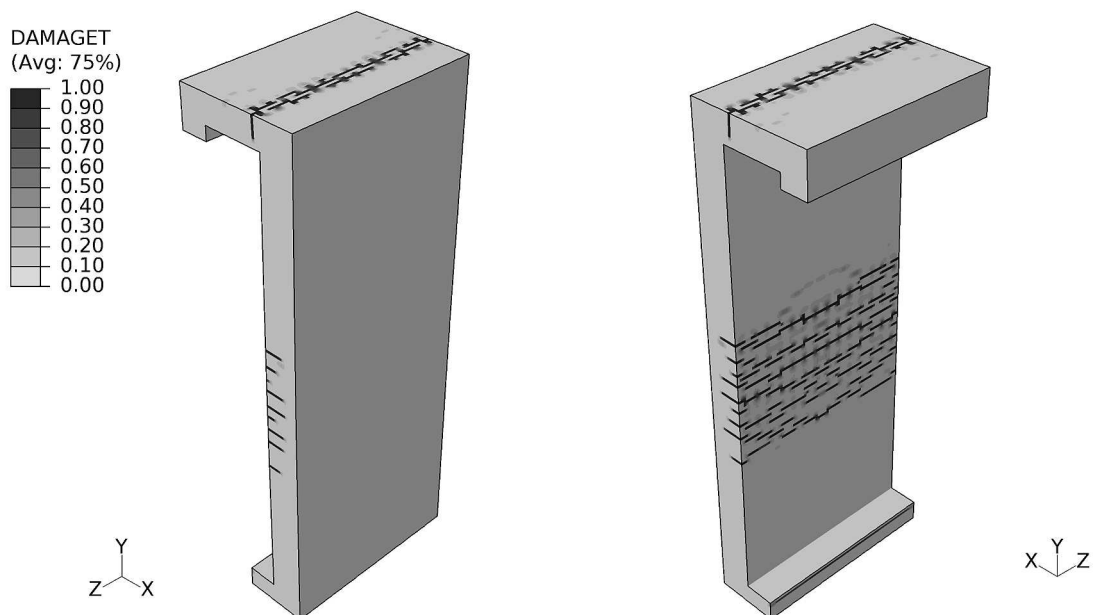


Fig. 3. Rozkład zniszczenia betonu przez rozciąganie, czas  $t = 0.004$  s.

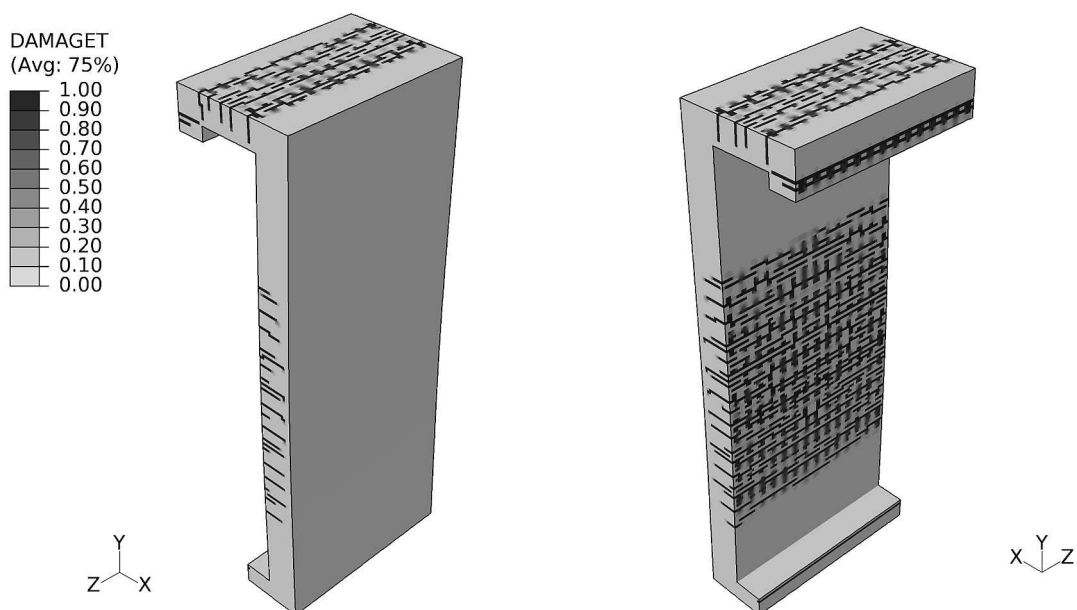


Fig. 4. Rozkład zniszczenia betonu przez rozciąganie, czas  $t = 0.01$  s.

Fig.3 pokazuje rozkład zniszczeń w chwili czasu  $t = 0.004$  s. Jak widać zniszczenia zlokalizowane są w górnej części płyty (strefa podporowa) oraz w środku przęsła, po zewnętrznej stronie płyty (przeciwnie do powierzchni na którą działa fala uderzeniowa od wybuchu). Zgodne jest to z obserwacjami zanotowanym w trakcie eksperymentu, gdzie we wstępnej fazie obciążenia zniszczenie płyty miało taki właśnie rozkład w materiale płyty.

W celu obserwacji rozwoju zniszczenia w materiale płyty sporządzono analogiczne obrazy warstwic zniszczenia w wielu chwilach czasowych. Na rysunkach Fig. 3 – Fig. 5, pokazano jedynie wybrane wykresy.

Obserwując rozkłady całkowitych zniszczeń (parametr  $d_t = 1.0$ ) w konstrukcji można zauważyć ich stopniowy rozwój oraz pojawienie się zniszczeń po drugiej stronie płyty (synergiczny efekt drgań swobodnych płyty oraz odbicia propagującej się w materiale fali uderzeniowej od brzegu płyty).

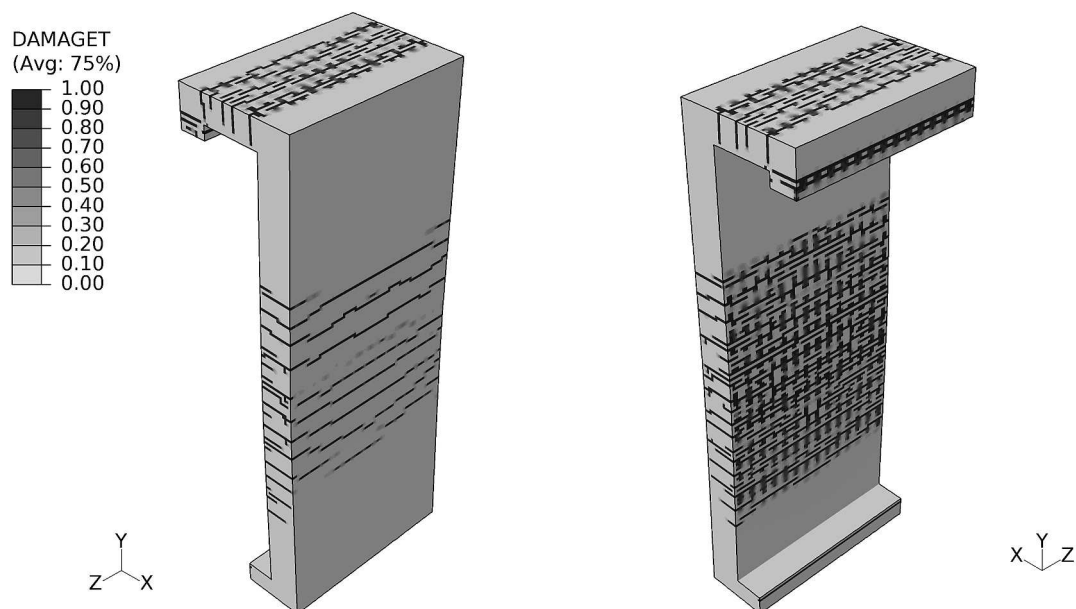


Fig. 5. Rozkład zniszczenia betonu przez rozciąganie, czas  $t = 0.03$  s.

#### 4 PODSUMOWANIE

Wyniki symulacji numerycznych przeprowadzone dla wybranych przykładów płyt żelbetonowych obciążonych wybuchem wskazują na możliwość zastosowania omawianego modelu materiałowego do analizy propagacji oraz zasięgu zniszczenia w materiale konstrukcji poddanej tego rodzaju obciążeniom. Ma to szczególne znaczenie w przypadku, gdy mechanizm zniszczenia konstrukcji jest trudny do intuicyjnego założenia *a priori*. Spotykane rozwiązania zakładające proste usunięcie z konstrukcji niektórych elementów nośnych i sprawdzenie jej integralności, nie biorą pod uwagę iż zniszczenia propagują się w znacznej części konstrukcji, co ma istotny wpływ na stabilność oraz integralność.

Porównanie rozkładu stref całkowitego zniszczenia materiału, określonych przy zastosowaniu symulacji numerycznych z odpowiednimi wynikami testów eksperymentalnych, omawianej płyty przez Schenkera i inn. [10], wskazuje na przydatność prezentowanego modelu materiałowego do określania mechanizmu rozwoju zniszczenia w konstrukcji obciążonej w sposób nagły. W trakcie badań eksperymentalnych utrudniona jest obserwacja rozwoju zniszczenia w czasie, wyniki zwykle dotyczą końcowego stanu konstrukcji. Mankament ten nie występuje w przypadku analizy numerycznej, pozwalającej na badanie stanu konstrukcji w dowolnej chwili czasowej.

*Praca została zrealizowana w ramach międzynarodowego niewspółfinansowanego projektu 457/N-COST/2009/0 "Analiza stateczności i integralności budynków wielokondygnacyjnych poddanych obciążeniom wyjątkowym".*

## PIŚMIENNICTWO

1. Kachanov L.M.: Introduction to Continuum Damage Mechanics. Netherlands, Martinus Nijhoff, 1986.
2. Lemaitre J., A continuum damage mechanics model for ductile fracture. Journal of Engineering Materials Technology, 1985, Vol. 107, pp. 83–89.
3. Rabotnov Y.N.: Creep rupture. Proc. of 12 Int. Congr. Appl. Mech., 1968, pp. 342-349.
4. Mazars, J., Pijaudier-Cabot, Continuum damage theory: application to concrete. Journal of Engineering Mechanics, 1989, Vol. 115, pp. 345–365.
5. Simo J.C., Ju J.W.: Strain- and stress-based continuum damage models; I – Formulation, II – Computational aspects. Int. J. Solids Structures, 1987, Vol. 23, pp. 821-869.
6. Faria R., Oliver X.: A Rate Dependent Plastic-Damage Constitutive Model for Large Scale Computations in Concrete Structures. CIMNE, 1993.
7. Cichocki K., Numerical Analysis of Concrete Structures under Blast Loading. Koszalin University of Technology, 2008.
8. Yankelevsky, D.Z., Reinhardt H.W.: Model for Cyclic Compressive Behavior of Concrete. Journal of Structural Engineering, 1987, Vol. 113, pp. 228-240.
9. Bischoff P.H., Perry S.H.: Compressive Behavior of Concrete at High Strain Rates, Materials and Structures. 1991, Vol. 24, pp. 425-450.
10. Schenker A., Anteby I., Gal E. i inni: Full-scale field tests of concrete slabs subjected to blast loads. International Journal of Impact Engineering, 2008, Vol. 35, No. 3, pp. 184-198.
11. Ruchwa M.: Ocena odporności konstrukcji żelbetowej na działanie wybuchu. Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, 2010, Vol. LIX, 4 (660), s. 269-280.

## PROPAGATION OF DAMAGES IN STRUCTURES UNDER BLAST LOAD

### Summary

The main purpose of this work was the application of nonlinear elasto–plastic material model with damage for concrete in analysis of damages propagation in structures subjected to a blast load. The damage mechanism for the reinforced plate has been analyzed in details using the nonlinear FEM computer code Abaqus with implemented material subroutine. Due to the availability of experimental results for this example in the literature it was possible to compare the results of numerical analyses with adequate experimental data. This allowed for the formulation of remarks and final conclusions.

Document from <http://www.eng.kmb.tu.koszalin.pl/publications>