



Ocena odporności konstrukcji żelbetowej na działanie wybuchu

MARIUSZ RUCHWA

Politechnika Koszalińska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska,
Katedra Mechaniki Budowli, 75-453 Koszalin, ul. Śniadeckich 2

Streszczenie. W publikacji przedstawiono sprawdzenie za pomocą analizy numerycznej, jaki wpływ na odporność konstrukcji żelbetowej ma użycie betonu wyższej klasy oraz zastosowanie osłony pochłaniającej część energii fali uderzeniowej. Analiza nawiązuje do znanego z literatury eksperymentu, dotyczącego płyt żelbetowych narażonych na działanie niekontaktowego wybuchu. Płyty różniły się między sobą klasą betonu oraz brakiem lub zastosowaniem dodatkowej osłony pochłaniającej część fali uderzeniowej. Problem rozwiązano Metodą Elementów Skończonych (MES). W poszczególnych wariantach analizy uwzględniono przestrzenny model płyt, nieliniowości geometryczne, sprężysto-plastyczny model betonu ze zniszczeniem, współpracę betonu ze zbrojeniem, warunki brzegowe, opcjonalne występowanie osłon o różnych rozmiarach oraz dynamiczne wymuszenie w postaci ciśnienia fali uderzeniowej. Równania ruchu całkowano metodą różnic centralnych, a narzędziem obliczeniowym był program ABAQUS. Uzyskane po przeprowadzonej serii obliczeń rezultaty dostarczają pewnej wiedzy na temat możliwości podniesienia odporności konstrukcji na działanie wybuchu. W analizie wyników zwrócono uwagę na rozkład stref uszkodzeń konstrukcji, przemieszczenia oraz poziom energii pochłoniętej przez analizowaną konstrukcję i opcjonalnie występującą osłonę.

Słowa kluczowe: dynamika, odporność udarowa, konstrukcje żelbetowe, Metoda Elementów Skończonych, wybuch

Symbole UKD: 624.012.45

1. Wprowadzenie

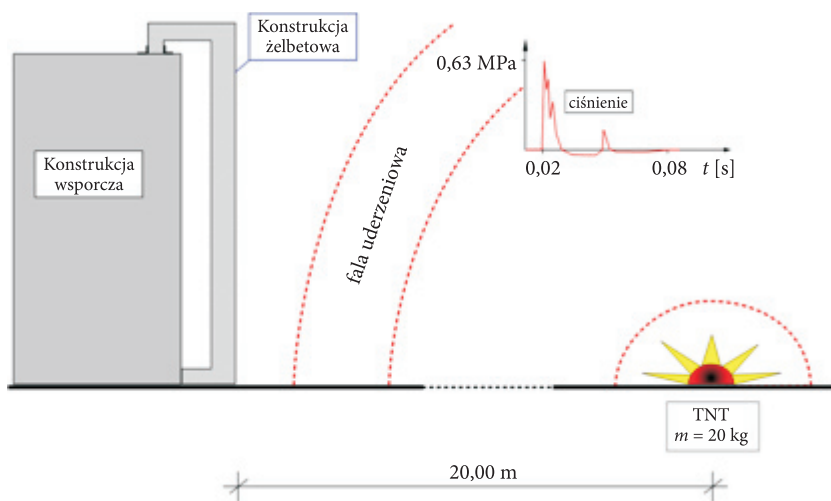
Kształtowanie konstrukcji żelbetowych odpornych na działanie wybuchu jest związane m.in. z rozstrzygnięciem problemu, czy istotnym elementem podniesienia odporności konstrukcji będzie zapewnienie odpowiednio wysokich parametrów

wytrzymałościowych betonu, czy też zastosowanie dodatkowych elementów osłonowych zabezpieczających zasadniczą konstrukcję.

Celem prezentowanych badań było sprawdzenie na drodze analizy numerycznej, jaki wpływ na odporność konstrukcji żelbetowej ma użycie wyższej klasy betonu oraz zastosowanie osłony pochłaniającej część energii fali uderzeniowej. Rozpatrywany jest przypadek niekontaktowego wybuchu powietrznego ładunku konwencjonalnego o znacznej energii.

2. Przedmiot badań

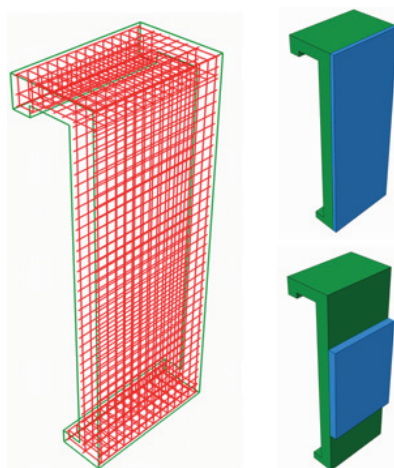
Za podstawowe dane do analizy przyjęto informacje dotyczące eksperymentu, jaki przeprowadzili pracownicy Uniwersytetu Ben-Gurion w Izraelu [1].



Rys. 1. Konstrukcja żelbetowa obciążona ciśnieniem generowanym przez wybuch

Przedmiotem badań były konstrukcje żelbetowe przypominające płyty osłonowe o załamanym kształcie, o wysokości 3,63 m, szerokości 1,40 m, grubości 0,25 m i długości załamania 0,89 m, z dodatkowym uźbrowaniem na końcach. Konstrukcje były wykonane w dwóch wariantach zastosowanej klasy betonu (B-30, B-100) i zbrojone prętami $\varnothing 12$ oraz $\varnothing 10$ mm ze stali klasy A-I. Dodatkową różnicą był brak lub zastosowanie osłony ze spienionego aluminium, pochłaniającej część energii fali uderzeniowej generowanej przez wybuch. Źródłem wybuchu był ładunek TNT o masie 1000 kg oddalony o 20 m od konstrukcji żelbetowych (rys. 1). Podczas jednej eksplozji analizowano kilka konstrukcji rozmieszczonych w tej samej odległości od miejsca wybuchu. W trakcie eksperymentu zarejestrowano przebieg

wartości ciśnienia działającego na konstrukcję oraz pomierzono maksymalne ugięcia konstrukcji. Zespół wykonujący doświadczenie udostępnił informacje dotyczące zbrojenia konstrukcji, wymiarów itp. Schematyczny układ zbrojenia oraz rozpatrywane sposoby ułożenia osłon przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat zbrojenia konstrukcji żelbetowej oraz układ osłon ze spienionego aluminium

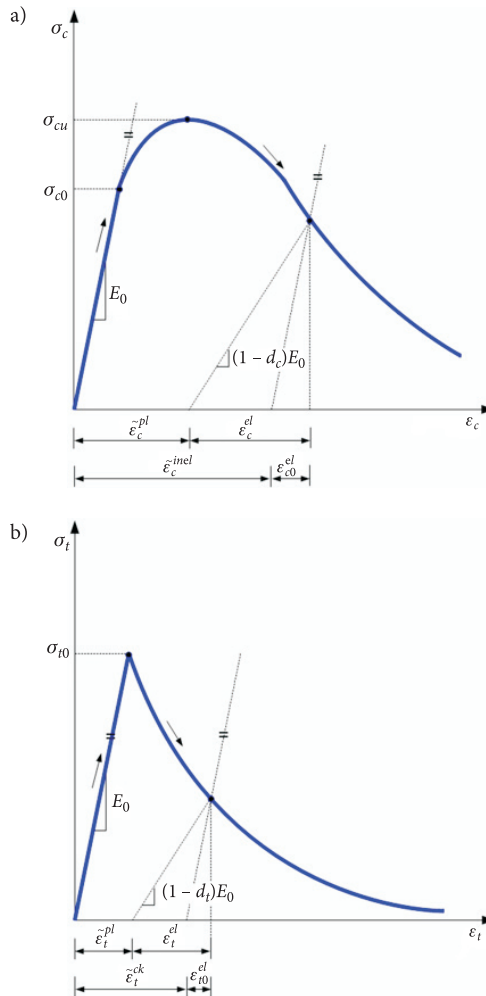
3. Model numeryczny

Zastosowanie metody numerycznego rozwiązania zadania w postaci Metody Elementów Skończonych (MES) [2, 3] oraz przyjęcie strategii obliczeń w postaci bezpośredniego, jawnego całkowania równań ruchu [4, 5] dyktuje podstawowe zasady dotyczące opracowania modelu numerycznego zagadnienia.

Dyskretny model konstrukcji utworzono poprzez podział modelu fizycznego, przy zastosowaniu kilku rodzajów przestrzennych elementów skończonych. Zasadniczą część konstrukcji (betonową) dyskretyzowano elementami bryłowymi (*solid*) o 8 węzłach i 24 stopniach swobody. Zbrojenie dyskretyzowano elementami prętowymi (*truss*) o 2 węzłach i 6 stopniach swobody. We wszystkich rodzajach elementów zastosowano liniowe funkcje kształtu oraz zredukowane całkowanie z kontrolą *hourglass* w celu zapewnienia zgodności opisu elementów ze sposobem przyjętej metody całkowania równań [2]. Współpraca zbrojenia z betonem została uwzględniona poprzez osadzanie elementów prętowych w siatce elementów bryłowych z zapewnieniem zgodności przemieszczeń (*embedded elements technique*) [5].

Szczególnie ważnym zagadnieniem modelowania było zapewnienie poprawności opisu właściwości materiałowych.

Do opisu właściwości betonu przyjęto sprężysto-plastyczny model ze zniszczeniem (*concrete damaged plasticity model*) zaimplementowany w systemie obliczeniowym ABAQUS (Simulia Inc.) [5]. Podstawowe zależności opisujące model są zgodne z propozycją J. Lubliner [6] oraz J. Lee [7]. Model uwzględnia sprężysto-plastyczny charakter pracy betonu przy ściskaniu oraz sprężysto-kruchy podczas rozciągania. W obu stanach obciążenia uwzględnia się rozwój uszkodzeń oraz degradację naprężeń przy pomocy niezależnych skalarnych parametrów zniszczenia (d_c — przy ściskaniu oraz d_t — przy rozciąganiu), co ilustruje rysunek 3. W modelu zastosowano warunek plastyczności bazujący na hiperbolicznej funkcji Druckera-Pragera oraz niestowarzyszone prawo płynięcia [5].



Rys. 3. Zależności naprężenie-odkształcenie w zastosowanym modelu materiałowym betonu: a) ściskanie; b) rozciąganie

Właściwości stali zbrojeniowej opisano jako sprężysto-plastyczne z warunkiem plastyczności Hubera-Misesa-Hencky'ego, stowarzyszonym prawem płynięcia oraz izotropowym wzmocnieniem plastycznym [8].

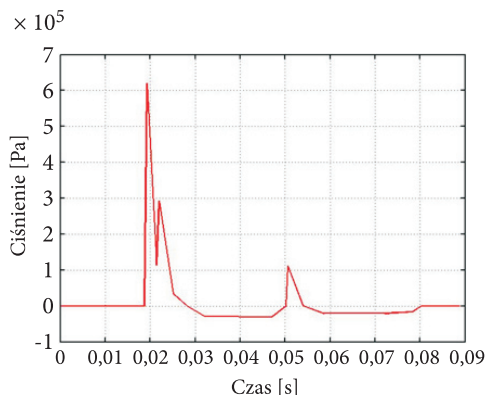
Zastosowanie wymienionych opisów materiałowych wymagało wcześniejszego określenia i zweryfikowania wszystkich koniecznych parametrów modeli.

Warunki brzegowe w analizowanym zadaniu wynikają ze sposobu oparcia konstrukcji o konstrukcję wsporczą oraz ograniczeń przemieszczeń wynikających z jej kształtu. Dlatego istotne fragmenty konstrukcji wsporczej modelowano za pomocą nieodkształcalnych, płaskich elementów skończonych (*rigid elements*) oraz zdefiniowano kontakt pomiędzy konstrukcją żelbetową i konstrukcją wsporczą. W tym celu zastosowano opis kontaktu typu *master-slave*.

W wybranych wariantach modelu numerycznego występował dodatkowy element w postaci okładziny wykonanej ze spienionego aluminium. W modelu numerycznym obszar okładziny był dyskretyzowany, podobnie jak część betonowa modelu, ośmiowęzłowymi elementami bryłowymi (*solid*). Właściwości materiału zostały opisane przy zastosowaniu sprężysto-plastycznego modelu kruchej pianki (*crushable foam plasticity model*) [5]. Model ten wykorzystuje opis zaproponowany przez V. S. Deshpande oraz N. A. Flecka [9].

Na styku aluminiowej okładziny oraz żelbetowej konstrukcji również został wykorzystany kontakt typu *master-slave*. Z uwagi na występujące w eksperymencie oderwania okładziny od konstrukcji przyjęto, że w fazie podciśnienia dynamicznego oddziaływania wybuchu następuje zerwanie kontaktu.

Dynamiczne obciążenie zostało uwzględnione w postaci ciśnienia działającego prostopadle na płaszczyznę konstrukcji i/lub płaszczyzny osłony (w zależności od wariantu modelu) znajdujące się od strony nadchodzącej fali uderzeniowej. Wartości ciśnienia przyjęto jako zależne od czasu na podstawie aproksymacji wyników pomiarów ciśnień działających na konstrukcję, zarejestrowanych podczas badania doświadczalnego. Schematyczny przebieg zmian ciśnienia ilustruje rysunek 4.



Rys. 4. Zmiany wartości ciśnienia działającego na konstrukcję w zależności od czasu

4. Analiza numeryczna

Z uwagi na charakter analizy przygotowano 10 wariantów modelu numerycznego różniących się przyjętą klasą betonu oraz rodzajem zastosowanej osłony. Podobnie jak w doświadczeniu, przyjęto dwie klasy betonu B-30 i B-100 oraz brak lub obecność osłony ze spienionego aluminium o grubościach 72 mm lub 144 mm, zabezpieczającej całą obciążoną powierzchnię konstrukcji lub tylko jej środkową część (jak na rysunku 2).

Siatka elementów skończonych i jednocześnie skala zadania zmieniała się w zależności od analizowanego wariantu. Liczba elementów skończonych w modelach wahała się pomiędzy 216 000 i 341 000, natomiast liczba stopni swobody – pomiędzy 712 000 i 1 024 000. Użycie takiej ilości elementów było podyktowane wymiarami konstrukcji oraz koniecznością przyjęcia możliwie gęstej siatki elementów z uwagi na dokładność obliczeń. Zasadnicza część siatki elementów skończonych została pokazana na rysunku 5.

We wszystkich wariantach analiz przyjęto oprócz opisu nieliniowości fizycznych również nieliniowości geometryczne.



Rys. 5. Siatka elementów skończonych konstrukcji żelbetowej

Analiza została podzielona na dwa etapy. Pierwszy etap stanowiła analiza statyczna związana z określeniem stanu przemieszczeń, odkształceń i naprężeń wynikających z obciążenia konstrukcji ciężarem własnym. Etap ten był rozwiązywany przyrostowo metodą Newtona przy zastosowaniu oprogramowania ABAQUS/Standard (Simulia Inc.) [5]. Drugi etap dotyczył rozwiązania silnie nieliniowego zagadnienia dynamicznego i był rozwiązywany przy pomocy jawnego, bezpośredniego całkowania równań ruchu metodą różnic centralnych przy wykorzystaniu programu ABAQUS/

/Explicit (Simulia Inc.). Początkowy stabilny krok (przyrost) czasowy wynosił pomiędzy $1,29E-6$ a $2,49E-6$ sekundy, w zależności od wariantu modelu.

W celu kontroli prawidłowości przebiegu obliczeń zwracano uwagę na przebiegi wybranych form energii, m.in. energii kinetycznej i energii dyssypowanej na odkształceniach plastycznych.

5. Wyniki obliczeń

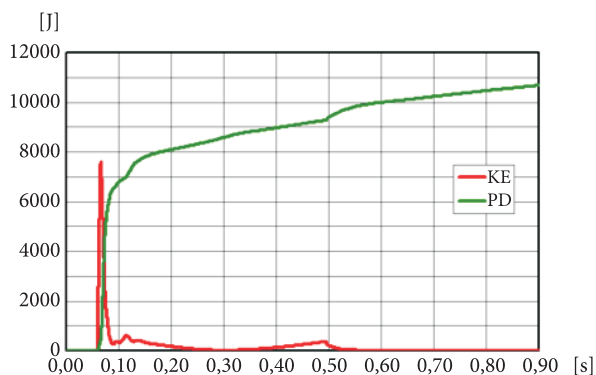
W uzyskanych wynikach obliczeń szczególną uwagę zwrócono na charakter przebiegu rozpatrywanego procesu. Sprawdzano przebiegi energii oraz przemieszczeń. Jednocześnie oceniano rozległość stref uszkodzeń materiałowych w modelu. Sprawdzano sposób rozwoju stref uszkodzeń oraz ich stan końcowy.

W niniejszej pracy prezentowane są tylko wybrane wyniki dotyczące 6 z 10 wykonanych wariantów obliczeń:

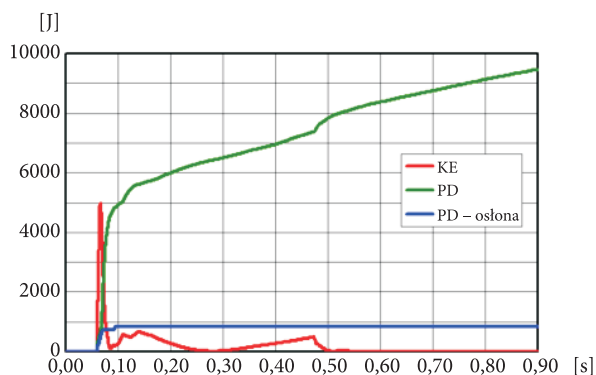
- bo — wariant konstrukcji bez osłony,
- oc — wariant konstrukcji z osłoną o grubości 72 mm, pokrywającą krytyczną płaszczyznę konstrukcji,
- ok — wariant konstrukcji z osłoną o grubości 144 mm, pokrywającą środkową część krytycznej płaszczyzny konstrukcji.

Każdy z trzech wymienionych wariantów był analizowany w dwóch wariantach zastosowanego betonu — B-30 i B-100.

Na rysunkach 6 i 7 pokazano wykresy dotyczące przebiegu funkcji energii kinetycznej (KE) oraz energii dyssypowanej na odkształceniach plastycznych (PD) dotyczące konstrukcji z betonu B-30. Rysunek 6 dotyczy konstrukcji bez osłony (wariant bo), natomiast rysunek 7 dotyczy konstrukcji z osłoną (wariant ok). Na rysunku 7 pokazano dwa przebiegi funkcji energii dyssypowanej na odkształceniach plastycznych — jeden dotyczy konstrukcji żelbetowej (PD), drugi dotyczy tylko osłony.

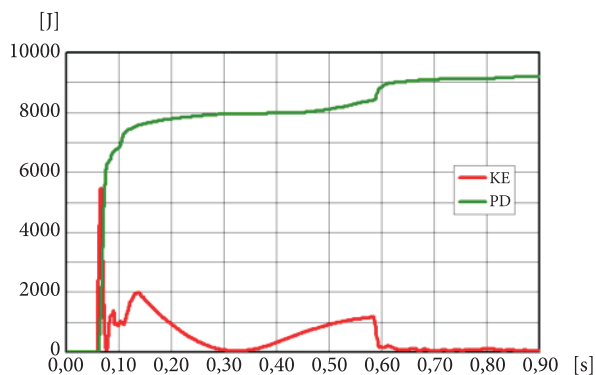


Rys. 6. Wybrane rodzaje energii (beton B-30, wariant bo)



Rys. 7. Wybrane rodzaje energii (beton B-30, wariant ok)

Rysunki 8 i 9 zawierają podobne informacje dotyczące konstrukcji z betonu B-100. Porównując zmiany wartości na rysunkach 6-9, można ocenić przebieg procesu dynamicznego oraz stwierdzić, jaki jest udział zastosowanych osłon w pochłanianiu energii. W przypadkach obu klas betonu można zauważyć spadek wartości maksymalnej energii kinetycznej z uwagi na zastosowanie osłon. Procentowy udział energii pochłoniętej przez osłony w całym procesie deformacji konstrukcji nie jest duży.

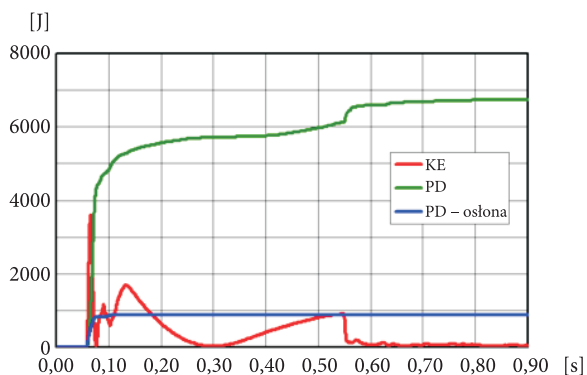


Rys. 8. Wybrane rodzaje energii (beton B-100, wariant bo)

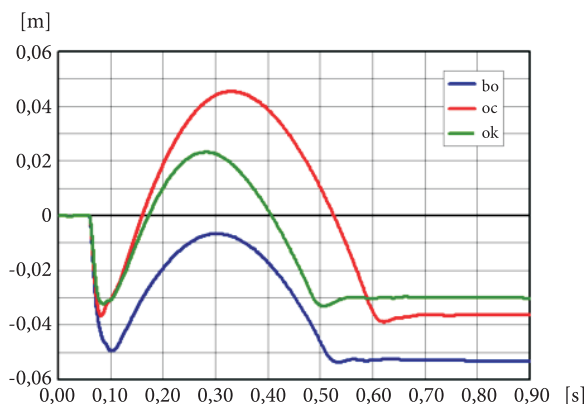
Rysunki 10 (beton B-30) i 11 (beton B-100) obrazują zmiany przemieszczenia poziomego punktu znajdującego się na środku płaszczyzny narażonej na oddziaływanie fali ciśnienia. Ujemne wartości oznaczają ruch w stronę konstrukcji wsporczej. Wartości minimalne (ujemne) wychyleń punktu zostały porównane z wartościami pomierzonymi podczas eksperymentu i można przyjąć, że rozwiązanie jest zgodne z wynikami doświadczenia. Różnice wartości wahają się pomiędzy 3-6 mm.

Można zauważyć, że w stosunku do zmian ciśnienia (rys. 4) oraz zmian energii kinetycznej (rys. 6-9) konstrukcja reaguje z pewnym opóźnieniem, a wybrany punkt

wykonuje ruch zarówno w stronę konstrukcji wsporczej, jak i w stronę przeciwną, co jest spowodowane nagromadzeniem energii sprężystej w konstrukcji i odbiciem się konstrukcji od konstrukcji wsporczej. Informacje z rysunku 10 wskazują jednoznacznie na istotny wpływ zastosowania osłony na stan przemieszczeń konstrukcji z betonu B-30. W przypadku konstrukcji z betonu B-100 zastosowanie osłon nie wpłynęło na istotną zmianę przemieszczeń (rys. 11).



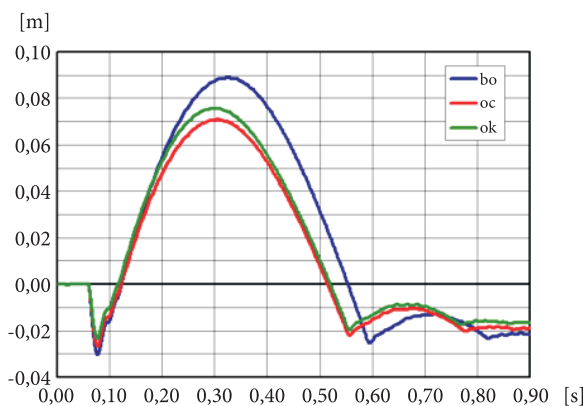
Rys. 9. Wybrane rodzaje energii (beton B-100, wariant ok)



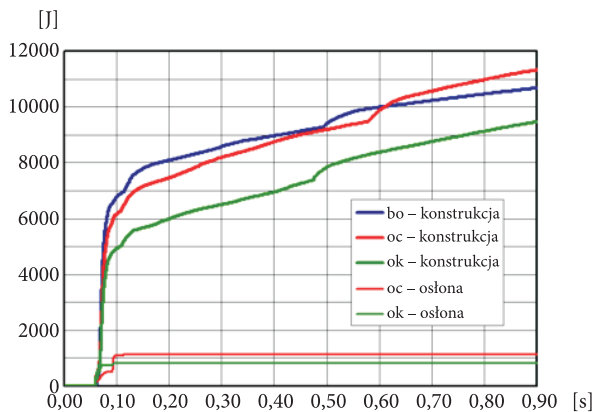
Rys. 10. Zmiany wartości przemieszczenia poziomego środka płyty w funkcji czasu (beton B-30)

Na rysunkach 12 i 13 pokazano zestawienie przebiegów energii dyssypowanych na odkształceniach plastycznych, dotyczących konstrukcji oraz osłon w różnych wariantach analizy. Widoczne są różnice w poziomach energii w zależności od wariantu modelu numerycznego.

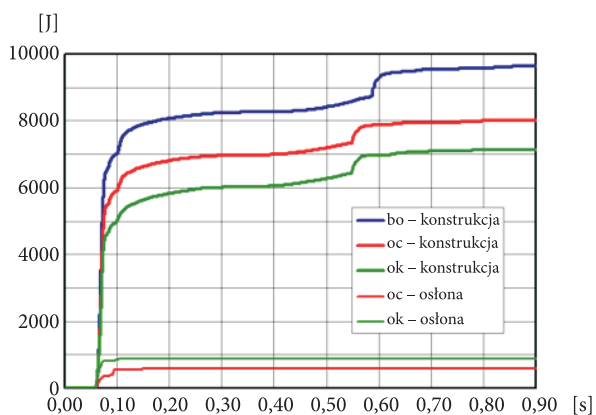
Rysunek 14 przedstawia przykładowe rozmieszczenie stref uszkodzeń materiałowych (kolor czerwony i żółty) w chwili końcowej analizy, dotyczących konstrukcji z betonu B-100 w wariantcie bez osłony (bo) oraz z osłoną w części środkowej (ok). Powstałe uszkodzenia zostały wywołane przez stan rozciągania, a różnice w rozkładzie stref nie są znaczące.



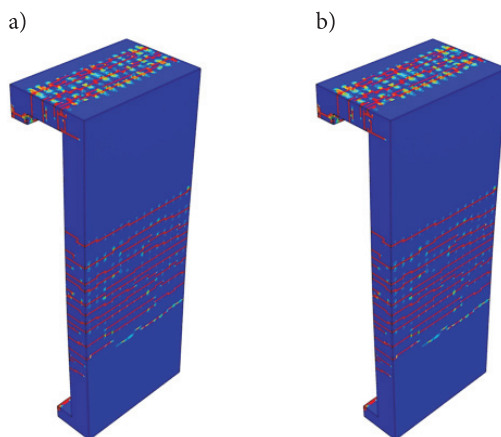
Rys. 11. Zmiany wartości przemieszczenia poziomego środka płyty w funkcji czasu (beton B-100)



Rys. 12. Wykresy energii dyssypowanych na odkształceniach plastycznych (beton B-30)



Rys. 13. Wykresy energii dyssypowanych na odkształceniach plastycznych (beton B-100)



Rys. 14. Końcowe rozkłady uszkodzeń materiałowych (beton B-100): a) wariant bo; b) wariant ok

6. Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych obliczeń wskazują na poprawność modelowania i dostarczają pewnej wiedzy na temat wpływu wytrzymałości betonu oraz braku lub zastosowania dodatkowej osłony pochłaniającej część energii fali uderzeniowej na odporność konstrukcji narażonej na działanie wybuchu (odległego).

Zastosowanie betonu B-30 do wykonania analizowanej konstrukcji skutkuje znaczną rozległością stref uszkodzeń materiałowych oraz najbardziej niekorzystnym stanem przemieszczeń prowadzącym do powstania największych trwałych deformacji konstrukcji.

Zastosowanie jakiegokolwiek wariantu osłony pochłaniającej energię w widoczny sposób zmienia rozkład przemieszczeń w funkcji czasu i skutkuje mniejszymi trwałymi deformacjami. Jednak rozkład uszkodzeń materiałowych nie ulega istotnej poprawie.

W przypadku zastosowania znacznie wyższej klasy betonu (B-100) można zauważyć, że zastosowanie osłon w bardzo niewielki sposób wpływa na przebieg deformacji konstrukcji. Przemieszczenia są bardzo bliskie rozwiązaniu bez zastosowania osłony.

Również w przypadku konstrukcji z betonu B-100 brakuje istotnych różnic w rozkładzie stref uszkodzeń materiałowych pomiędzy wariantami z użyciem osłon oraz bez nich.

Analizując rozwiązywane zagadnienie w zakresie dwóch klas betonu (B-30 i B-100) oraz osłon z pianki aluminiowej (grubości 72 mm i 144 mm), można stwierdzić, że istotniejsze jest podwyższenie wytrzymałości betonu niż zastosowanie osłony, ponieważ uzyskujemy mniejsze końcowe deformacje konstrukcji oraz mniejszy obszar uszkodzeń w konstrukcji. W przypadku konstrukcji z betonu o niższej wytrzymałości, osłony mogą w istotny sposób wpłynąć na zmianę końcowych przemieszczeń.

Można przypuszczać, że pożądanym, optymalnym efektem podniesienia odporności konstrukcji żelbetowej na działanie rozpatrywanego, dynamicznego wymuszenia może przynieść jednoczesne zastosowanie betonu o pewnej pośredniej, w stosunku do rozpatrywanych, wytrzymałości oraz wykorzystanie energochłonnej osłony.

Artykuł wpłynął do redakcji 22.12.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w czerwcu 2010 r.

LITERATURA

- [1] A. SCHENKER, I. ANTEBY, E. GAL, Y. KIVITY, E. NIZRI, O. SADOT, R. MICHAELIS, O. LEVINTANT, G. BEN-DOR, *Full-scale field tests of concrete slabs subjected to blast loads*, International Journal of Impact Engineering, 35, 3, 2008, 184-198.
- [2] T. BELYTSCHKO, W. K. LIU, B. MORAN, *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures*, John Wiley & Sons, 2000.
- [3] K. L. BATHE, *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1996.
- [4] M. KLEIBER, *Metoda elementów skończonych w nieliniowej mechanice kontinuum*, PWN, Warszawa-Poznań, 1985.
- [5] *ABAQUS Analysis User's Manual*, Simulia, Providence, RI, USA, 2008.
- [6] J. LUBLINER, J. OLIVER, S. OLLER, E. ONATE, *A Plastic-Damage Model for Concrete*, International Journal of Solids and Structures, 25, 1989, 299-329.
- [7] J. LEE, G. L. FENVES, *Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures*, Journal of Engineering Mechanics, 124, 8, 1998, 892-900.
- [8] T. BEDNARSKI, *Mechanika plastycznego płynięcia w zarysie*, PWN, Warszawa, 1995.
- [9] V. S. DESHPANDE, N. A. FLECK, *Isotropic Constitutive Model for Metallic Foams*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 48, 2000, 1253-1276.

M. RUCHWA

Assessment of reinforced concrete structure resistance to blast

Abstract. This paper deals with checking through the numerical analysis what influence on reinforced concrete resistance has concrete of higher class and application of a shield absorbing portion of a shock wave. The analysis refers to an experiment known from literature regarding reinforced concrete slabs exposed to open-air explosion. The slabs differed in concrete class and lack, or use, of an extra shield absorbing portion of the shock wave. The problem was solved by application of the Finite Elements Method. The slab spatial model, geometric nonlinearity, concrete damaged plasticity model, concrete interaction with the reinforcement, boundary conditions, optional application of variable dimension shields and dynamic loading in form of the shock wave pressure were considered in particular analysis variants. The motion equations were being integrated by application of the central-difference method and the calculation tool applied was there ABAQUS software. The results obtained from a series of calculations performed provide some knowledge on a possibility to increase resistance of a structure to blast. Attention was focused, during results analysis, on distribution of the structure damage zones, displacements and level of energy absorbed by the analysed structure and optional shield.

Keyword: dynamic, impact resistance, reinforced concrete structures, Finite Elements Method, blast load

Universal Decimal Classification: 624.012.45