

Krzysztof CICHOCKI, Mariusz RUCHWA
Katedra Mechaniki Budowli, Politechnika Koszalińska
E-mail: krzysztof.cichocki@tu.koszalin.pl, ruchwa@wbiiis.tu.koszalin.pl

Przestrzenne konstrukcje żelbetowe obciążone wybuchem

1 Wstęp

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) była przedmiotem badań naukowych prowadzonych w ramach międzynarodowego programu badawczego COST TU0601 „Robustness of Structures”, których celem było 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 końcowego zakresu zniszczeń w materiale konstrukcji. Stanowi to ważne źródło informacji dla projektanta, umożliwiając mu kształtowanie konstrukcji pod kątem jej odporności na obciążenia wyjątkowe. Na przestrzeni ostatnich lat gwałtownie wzrosła liczba prac teoretycznych i doświadczalnych poświęconych tej tematyce. Przegląd ich zakresu, oraz stosowanych metod analizy zagadnienia można znaleźć m. in. w raportach publikowanych przez ASCE (American Society of Civil Engineers), w latach 1992 – 2011 [1–3] oraz National Research Council [4–6]. Źródła te wyczerpująco opisują aktualny stan wiedzy oraz kierunek podejmowanych prac badawczo-naukowych, nie tylko w Stanach Zjednoczonych ale także w innych krajach.

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

W sytuacjach obciążeń wyjątkowych, zwłaszcza charakteryzujących się dużą intensywnością i krótkim czasem działania (obciążenia impulsem) utrudnione jest uproszczone modelowanie zachowania konstrukcji. Powstanie zniszczeń w materiale konstrukcji wywołane jest propagacją fali naprężeń, jej odbiciem od powierzchni elementów konstrukcji, interferencją fali odbitej z padającą, itp. [7-8].

Istotnym zagadnieniem jest problem określenia jednoznacznych kryteriów oceny integralności, w miarę możliwości wyrażonych przy zastosowaniu niewielkiej liczby parametrów. Propozycje doboru takich parametrów przedstawione zostały w materiałach Joint Committee of Structural Safety [9] oraz w końcowym raporcie akcji COST TU0601 [10].

2 Problemy analizy zagadnienia

Problem będący przedmiotem niniejszej pracy cechuje wysoki stopień złożoności. Wynika to z następujących czynników:

- Obciążenia konstrukcji fala uderzeniową generowaną podczas wybuchu. Fala ciśnienia propagująca się w atmosferze z prędkością dźwięku posiada parametry silnie zależne od wielu powiązanych ze sobą czynników (przebieg procesu wybuchu, parametry fizyczne środowiska propagacji) oraz podlega zjawisku odbicia od podatnych elementów konstrukcji. Odbita fala wchodzi w interakcję z falą padającą, co skutkuje złożonym rozkładem pola ciśnienia, zmiennego w czasie i przestrzeni.
Dostępne są algorytmy modelowania propagacji fali w ośrodku (atmosfera, woda), wykorzystujące sformułowania ALE (*Arbitrary Lagrangian-Eulerian*). Wiąże się to jednak ze znacznym wzrostem rozmiaru modelu dyskretnego, wydłużeniem czasu obliczeń, trudnościami w modelowaniu warunków brzegowych (pochłanianie energii padającej fali), opisie kontaktu pomiędzy ośrodkiem propagacji a powierzchnią konstrukcji, itp.
W wielu praktycznych zastosowaniach skuteczne i wystarczające jest posługiwanie się empirycznymi sformułowaniami, pozwalającymi na obciążenie konstrukcji polem ciśnienia opisanym w postaci funkcji zależnych od czasu i współrzędnych przestrzennych. Rozwiązania te, opracowane na podstawie rozbudowanych serii badań eksperymentalnych, znane i stosowane są od lat 40-tych ubiegłego wieku (Cole [11], Bangash [12], Henrych [13]).
- Konieczności zastosowania modeli materiałowych uwzględniających całe spektrum odpowiedzi materiału konstrukcji na obciążenie o dużej intensywności. Modele te zależą od rodzaju materiału, ale zawsze muszą zawierać opis jego własności sprężystych, generowanie trwałych odkształceń na skutek uplastycznienia oraz pęknięcia materiału, aż do jego całkowitego zniszczenia. Opis zniszczenia materiału realizowany jest poprzez całkowitą redukcję parametrów wytrzymałości mechanicznej, przy zachowaniu masy (a więc i bezwładności). W przypadku znacznych stref zniszczenia problemem jest nieuwzględnianie współpracy zniszczonego materiału z resztą konstrukcji. W celu uniknięcia tych negatywnych zjawisk, konieczne jest stosowanie gęstych siatek elementów skończonych, co przy jawnym (*explicite*) schemacie całkowania równań ruchu skutkuje bardzo małym krokiem czasowym niezbędnym do zachowania stabilności rozwiązania, co znacznie wydłuża czas obliczeń.
- Trudności w ustaleniu metodologii rozwiązania, obejmującej zakres zapisywanych wyników, częstotliwość dokonywania zapisu, parametry sterujące przebiegiem obliczeń, analizowany czas odpowiedzi dynamicznej konstrukcji oraz przyjęte kryterium zakończenia obliczeń. Najczęściej wymaga to wielu wstępnych, próbnych analiz mających na celu ustalenie wspomnianych parametrów, ocenę rozmiaru problemu, potrzeb sprzętowych oraz spodziewanego czasu obliczeń.
Ze względu na najczęściej prowadzone analizy parametryczne (tj. określenie zależności rozwiązania od zmienności wybranego parametru), właściwie dobrana metodologia prowadzenia obliczeń pozwala na znaczne zaoszczędzenie czasu oraz optymalne wykorzystanie posiadanych zasobów sprzętowych i oprogramowania.

3 Weryfikacja modelu obliczeniowego

Autorzy zdecydowali się poddać analizie proces generacji zniszczenia w wybranej sekcji budynku wielopiętrowego (słupy i stropy) o konstrukcji żelbetowej. Świadomie zdecydowano się na ograniczenie zakresu analizowanej konstrukcji, na podstawie dostępnych w literaturze wyników badań eksperymentalnych i symulacji numerycznych [14-16]. Takie założenie pozwala na określenie mechanizmu i zakresu rozwoju zniszczeń w konstrukcji, przy jednoczesnym ograniczeniu rozmiaru analizowanego problemu.

Na podstawie doświadczeń autorów z analizy podobnego typu zagadnień analizę przeprowadzono dwuetapowo.

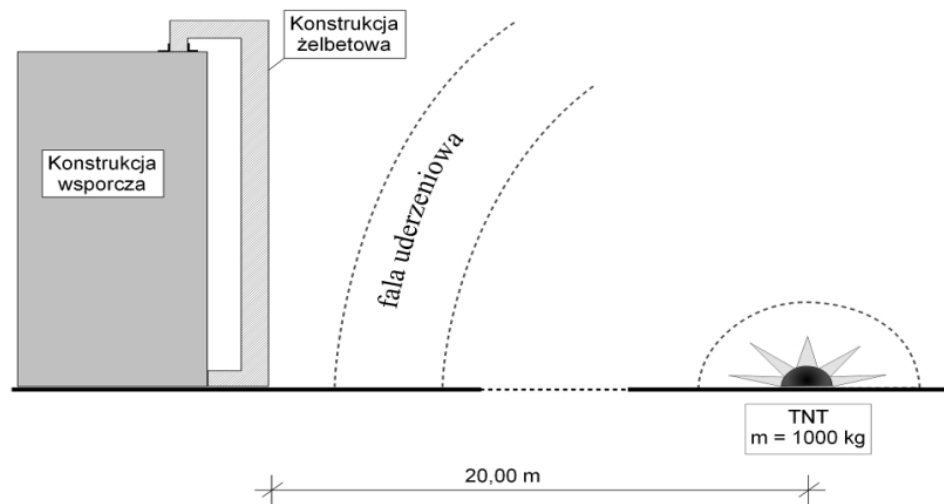
W pierwszym etapie wykonano symulację numeryczną prób doświadczalnych przeprowadzonych przez Schenkera i inn. [17], podczas których poddano działaniu wybuchu ładunku 1000 kg TNT serię płyt żelbetowych, znajdujących się w różnych odległościach od środka detonacji. Schemat przebiegu eksperymentu pokazano na Rys.1.

Badane płyty żelbetowe usytuowano w pozycji pionowej poprzez ich swobodne zawieszenie na masywnych i ciężkich betonowych konstrukcjach wsporczych. W ten sposób uzyskano prostopadłość działania frontu fali uderzeniowej do zewnętrznej powierzchni płyty, co znacznie uprościło analizy numeryczne oraz ułatwiło interpretację uzyskanych wyników. Pomierzony został przebieg ciśnienia na powierzchni płyty, jak też uzyskano dokładny opis zakresu i konfiguracji zniszczeń na płytach.

Głównym zamierzeniem autorów niniejszej pracy było zweryfikowanie przyjętych założeń dotyczących działającego obciążenia, sprawdzenie przyjętego modelu materiałowego betonu i stali, jak też innych parametrów analizy numerycznej, założonych przez autorów. Obliczenia wykonano przy zastosowaniu nieliniowego systemu dynamicznej analizy konstrukcji Abaqus/Explicit [18]. Opis modelu dyskretnego oraz metodologii prowadzenia analizy zamieszczono w pracach Cichockiego i Ruchwy [19-21]. Ze względu na dokładną dokumentację opisową przeprowadzonego eksperymentu (dokumentacja techniczna płyt, zarejestrowane przebiegi ciśnienia działającego na powierzchnię płyt, dokumentacja zakresu uszkodzeń) jest on niezwykle przydatny do celów weryfikacji opracowanego dyskretnego modelu numerycznego.

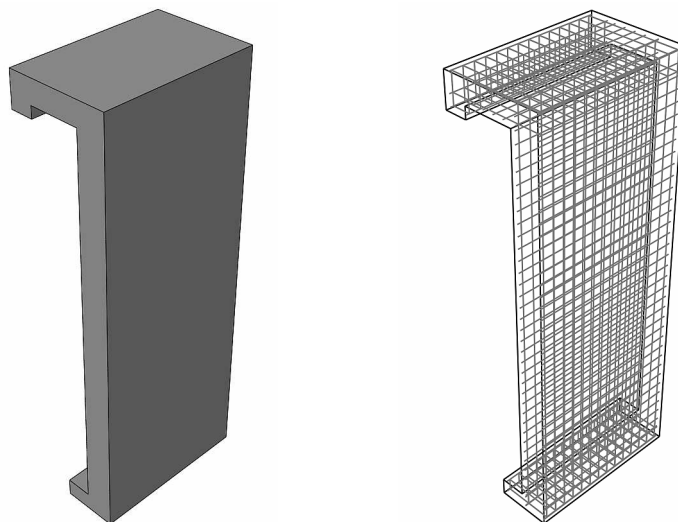
Rys. 2 pokazuje model numeryczny płyty żelbetowej wraz z zastosowanym zbrojeniem. W celu odpowiedniego modelowania współpracy pomiędzy betonem a znajdującym się w nim zbrojeniem wykorzystano dostępną w systemie Abaqus opcję pozwalającą na umieszczenie jednej siatki elementów w drugiej siatce - w tym przypadku prętowych elementów zbrojenia w przestrzennych elementach modelu betonu. Ten prosty sposób pozwala na staranne modelowanie m. in. konstrukcji z betonu zbrojonego, bez konieczności generowania wspólnych węzłów elementów betonu i stali. Obecność masywnej (a więc niepodatnej) konstrukcji wsporczej została zasymulowana poprzez założenie odpowiednich warunków brzegowych. Dodatkowo, przed obciążeniem konstrukcji falą uderzeniową od wybuchu, przyłożono do niej obciążenie statyczne ciężarem własnym a wynikowe naprężenia w ustroju są sumą oddziaływania ciężaru własnego oraz obciążenia wyjątkowego w postaci wybuchu.

Ze względu na przejrzystość rysunku pominięto na nim siatkę elementów skończonych. Ponieważ w trakcie eksperymentu pomierzono przebieg ciśnienia fali uderzeniowej na powierzchni czołowej płyty (Rys. 3), posłużono się nim także w analizie modelu numerycznego. Sprawdzono empiryczne formuły na nadciśnienie fali odbitej od sztywnej, niepodatnej powierzchni wg [13].



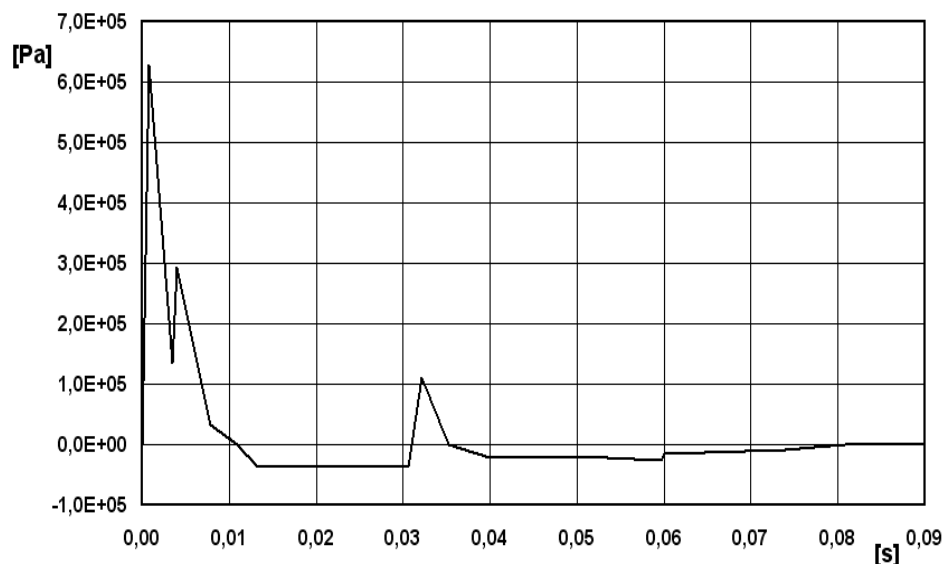
Rys. 1. Schemat eksperymentu (płyty żelbetowe $1.4 \times 3.63 \times 0.25$ m)

Fig. 1. Schematic view of the experimental setup
(reinforced concrete plates $1.4 \times 3.63 \times 0.25$ m)



Rys. 2. Widok analizowanej płyty żelbetowej oraz jej zbrojenia

Fig. 2. Overall view of the plate and its reinforcement



Rys. 3. Przebieg w czasie ciśnienia działającego na powierzchnię płyty (odległość 20 m)

Fig. 3. Function of pressure vs time (distance 20 m)

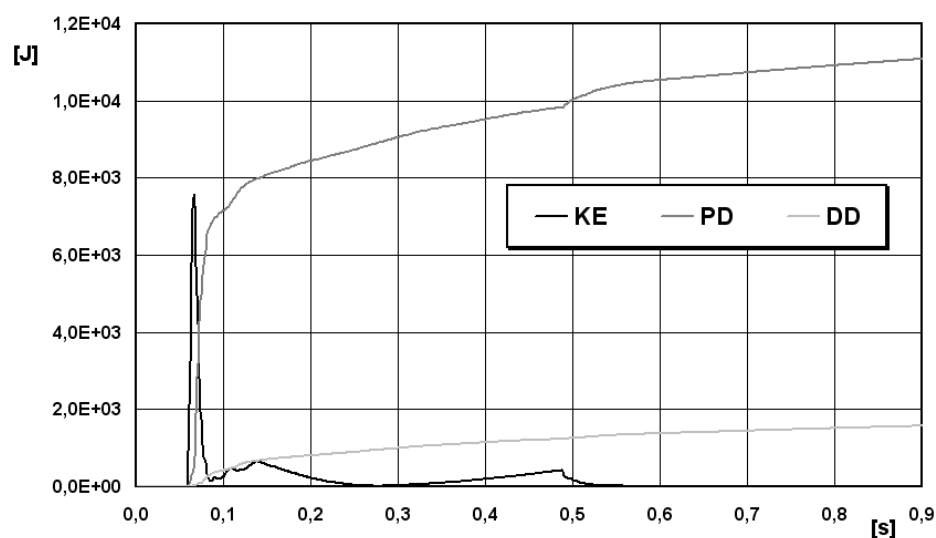
O ile maksymalna wartość obliczona ze wzorów empirycznych różni się od wartości zarejestrowanej podczas eksperymentu jedynie o około 10%, to obserwacja przebiegu ciśnienia na Rys. 3 wykazuje pewne charakterystyczne cechy, pomijane we wzorach empirycznych. W chwili $t = 0.003\text{s}$ występuje niewielkie zwiększenie (skok) ciśnienia, spowodowany niestabilnością procesu wybuchu. Jest to charakterystyczne zjawisko obserwowane przy detonacji dużych ładunków wybuchowych, gdy proces gwałtownej przemiany ciała stałego w gaz (Włodarczyk [22]) odbywa się w sposób nieciągły.

Od chwili $t = 0.011\text{s}$ rozpoczyna się działanie podciśnienia, również typowe zjawisko opisywane np. przez Krzewińskiego i Rekuckiego [23]. Chwilowy skok ciśnienia w momencie $t = 0.032\text{s}$ spowodowany jest dojściem do powierzchni fali odbitej od sąsiedniej płyty. Całość działania obciążenia kończy się po 0.08s .

Ze względu na odległość płyty od środka wybuchu, można założyć, że czoło fali uderzeniowej dochodzi do wszystkich punktów na powierzchni jednocześnie. Nie jest więc konieczne różnicowanie funkcji obciążenia w poszczególnych punktach płyty.

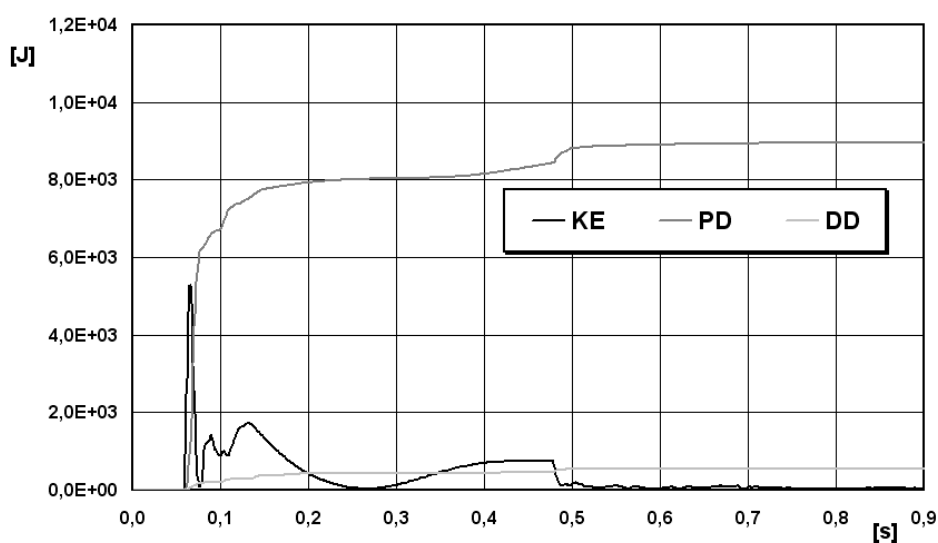
Analizie poddano dwie konfiguracje płyt, różniące się jedynie zastosowaną klasą betonu – beton zwykły klasy C25/30 (B30) oraz beton o podwyższonej wytrzymałości B100. Obie konfiguracje były także stosowane w teście eksperymentalnym. Celem tego zróżnicowania było zbadanie wpływu wytrzymałości betonu na rozkład oraz intensywność jego zniszczenia.

Na podstawie wstępnych analiz numerycznych określono niezbędny do analizy przedział czasowy – o długości 0.9s . Po tym okresie następuje praktycznie zakończenie zjawiska przyrostu odkształceń trwałych oraz zniszczenia w materiale.



Rys. 4. Przebiegi wybranych energii, model obciążony wybuchem (beton B30)

Fig. 4. Energies in time, load by explosion (concrete B30)

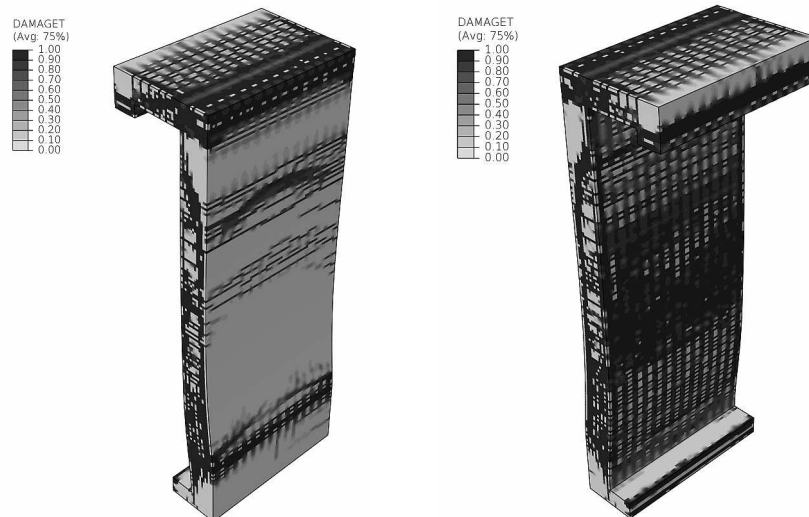


Rys. 5. Przebiegi wybranych energii, model obciążony wybuchem (beton B100)

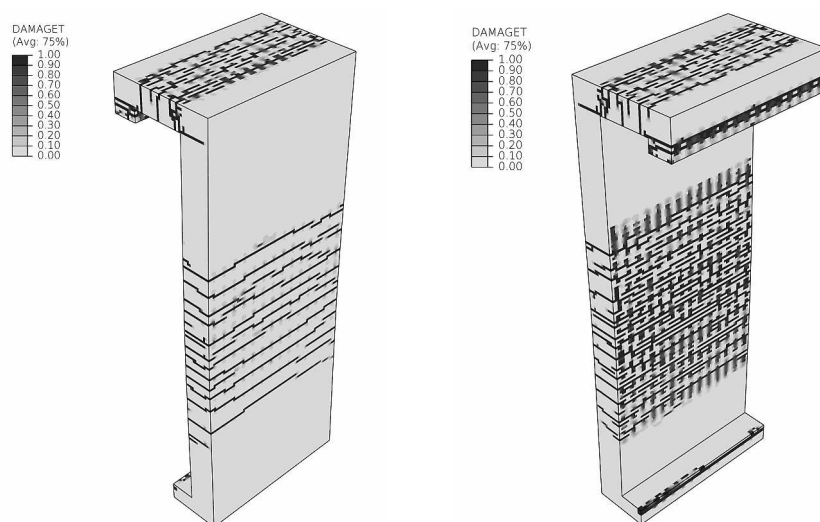
Oznaczenia (Rys. 4.-5.): KE – energia kinetyczna, PD – energia dysypowana podczas trwałej deformacji, DD – energia dysypowana podczas pęknięcia

Fig. 5. Energies in time, load by explosion (concrete B100)

Legend (Fig. 4.-5.): KE – kinetic energy, PD – energy dissipated on plastic effects, DD – energy dissipated by cracking



Rys. 6. Rozkład uszkodzeń konstrukcji (beton B30)
 Fig. 6. Distribution of damages (concrete B30)



Rys. 7. Rozkład uszkodzeń konstrukcji (beton B100)
 Fig. 7. Distribution of damages (concrete B100)

Obserwując, przedstawione na Rys. 4 oraz 5, wykresy energii:

- kinetycznej (KE),
- dysypowanej podczas przyrostu odkształceń plastycznych (PD),
- dysypowanej podczas pęknięcia materiału (DD),

można zauważyć, że w przypadku konstrukcji z betonu B30 (Rys. 4) wartości energii dysypowanych asymptotycznie dążą do stałych wartości, zaś energia kinetyczna spada praktycznie do zera. Podobne wykresy w przypadku konstrukcji z betonu B100 wykazują znacznie wcześniejsze zakończenie dysypacji energii, przyjmującej stałe wartości w chwili $t = 0.2$ s (energia dysypowana na odkształceniach plastycznych) oraz $t = 0.5$ s (energia dysypowana podczas pęknięcia materiału). Wartości energii dysypowanej w tych dwóch wariantach klas betonu są różne (mniejsze w przypadku B100 z uwagi na wyższą wytrzymałość betonu).

Obserwacja przebiegu funkcji energii w czasie pozwala na określenie, czy zjawisko rozwoju zniszczenia zostało zakończone, czy konieczne jest wydłużenie czasu analizy. Arbitralne określenie czasu analizy bez obserwacji stanu energii może prowadzić do przerwania obliczeń przed osiągnięciem przez konstrukcję stanu spoczynku. W przypadku złożonych konstrukcji o elementach wchodzących ze sobą w kontakt analiza taka może być utrudniona, ponieważ po początkowym rozwoju odkształceń plastycznych i pęknięć dochodzi do efektów wtórnych np. spowodowanych uderzeniami o konstrukcję przez spadające jej uszkodzone elementy. W przypadku tzw. *progressive collapse* efekty wtórne mogą być wielokrotnie większe od pierwotnych, znacznie więcej energii dysypowanej powstaje na skutek uderzeń elementów o siebie, niż na skutek bezpośredniego działania wybuchu. Zjawisko to jest wysoce niekorzystne ze względu na bezpieczeństwo osób przebywających w budynkach lub w ich pobliżu. Zagadnieniom tym poświęcona jest praca Starossek'a i Haberlanda [24], w której omówiono terminologię zagadnienia, jego mechanizm i kryteria oceny.

Analizy przeprowadzone zostały przy zastosowaniu systemu obliczeniowego Abaqus/Explicit. Oprócz pokazanych powyżej wykresów energii uzyskano warstwyce (mapy) stanu przemieszczenia, odkształcenia i naprężenia w wybranych chwilach czasowych. Przykładowe warstwyce pokazano na Rys. 6. i 7. Obrazują one jeden tylko skalarny parametr opisu zniszczenia przy rozciąganiu (DAMAGE), przybierający wartości od 0 do 1. Zerowa wartość parametru oznacza brak zniszczenia, wartość równa jeden oznacza całkowite zniszczenie materiału na skutek rozciągania. Oczywiście, przy zmianie stanu obciążenia z rozciągania na ściskanie materiał przenosi te obciążenia tak, jakby nie był zniszczony.

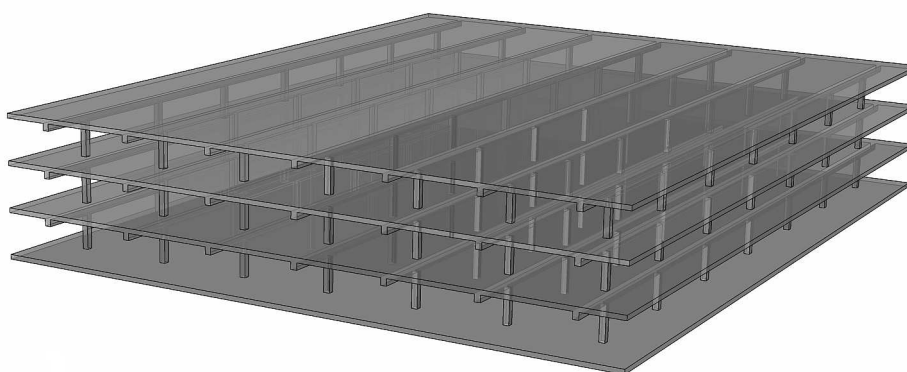
Analizując rozkład warstwicy na Rys. 6. i 7. widać, że w przypadku betonu B100 zniszczenia mają charakter lokalny, zaś w przypadku B30 widoczny jest znaczny obszar częściowych zniszczeń, gdzie materiał jest jeszcze w stanie przenosić część obciążenia. Kształt i rozkład uszkodzeń jest zgodny z wynikami uzyskanymi podczas prób eksperymentalnych. Pojawienie się zniszczeń od rozciągania po obu stronach płyt związane jest z efektem opisanym przez Gebekkena [25], gdy propagująca się w materiale fala naprężeń ściskających ulega odbiciu od swobodnej krawędzi, co z kolei skutkuje powstaniem fali naprężeń rozciągających propagującej się w odwrotnym kierunku. W betonie, materiale źle pracującym na rozciąganie, powoduje to natychmiastowe powstanie stref całkowitego zniszczenia materiału.

Analizie poddano także inne wielkości charakteryzujące zniszczenie w konstrukcji: skalarny opis zniszczenia przy ścisaniu (DAMAGEC), wartości przemieszczeń trwałych (tj. związanych z trwałą deformacją płyt), jak też rozwój tych wielkości w czasie oddziaływania obciążenia generowanego podczas wybuchu. Wykazały one dobrą korelację z wynikami badań eksperymentalnych, co pozwoliło uznać model numeryczny za zweryfikowany i poprawny.

4 Przykład obliczeniowy

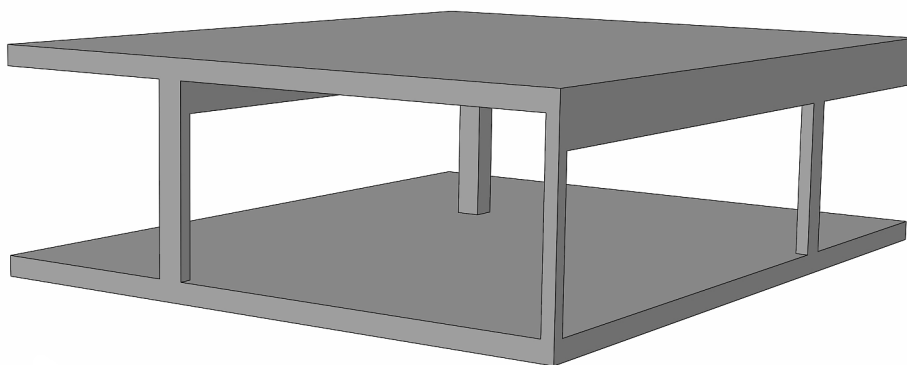
Pozytywnie zweryfikowany model materiałowy oraz opis obciążenia wywołanego wybuchem posłużył do przeprowadzenia zasadniczej analizy numerycznej, będącej przedmiotem niniejszej pracy. Dotyczy ona działania wybuchu na żelbetową konstrukcję szkieletową garażu podziemnego. Podstawowa konfiguracja garażu została pokazana na Rys. 8.

Dokładnej analizie numerycznej poddano element konstrukcji pokazany na Rys. 9. Obejmuje on fragment $\frac{1}{4}$ wycinka piętra, w części środkowej garażu, ze słupami, podciągami i płytami stropowymi. Założono symetrię w dwóch płaszczyznach, zrealizowaną poprzez założenie na nich odpowiednich warunków brzegowych.



Rys. 8. Widok konstrukcji budynku

Fig. 8. Overall view of the building



Rys. 9. Analizowany fragment modelu

Fig. 9. Analysed section of the model

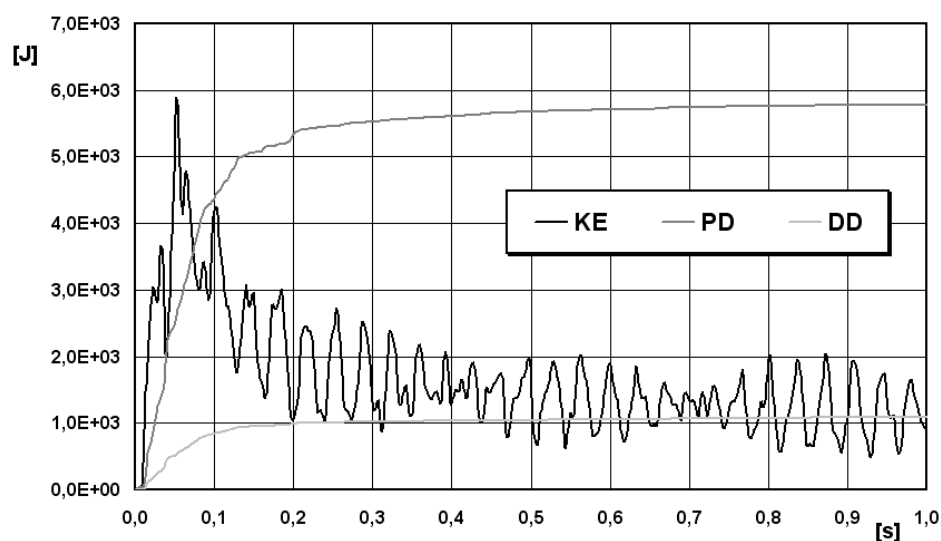
Ze względu na niewielki rozmiar elementów bryłowych na powyższym rysunku nie pokazano siatki elementów skończonych. Ogółem model zawiera około 1.5 mln elementów bryłowych (beton) oraz elementów prętowych (zbrojenie).

Obciążenie zrealizowano poprzez podprogram generujący obciążenie od wybuchu w postaci pola ciśnienia zmiennego w czasie i przestrzeni. Zaimplementowano sprawdzone zależności empiryczne podane w pracach Bangasha [11] i Henrycha [12]. Założono ładunek wybuchowy TNT o masie 30 kg, przyłożony w okolicy środkowego słupa wycinka modelu pokazanego na Rys. 9.

Przyjęto beton klasy C45/C55 (B55), o parametrach zweryfikowanych poprzez symulację numeryczną analogiczną do wcześniej omówionej w poprzednim rozdziale, natomiast zbrojenie stałą klasy A.

Analiza przebiegu energii (Rys. 10.) wykazała praktyczne ustanie dysypacji energii w czasie 0.2 s od początku działania wybuchu. Ze względów poznawczych (obserwacja swobodnych drgań konstrukcji, analiza rozwoju niewielkich uszkodzeń w czasie) analizę przedłużono do czasu 1.0 s, co jednak nie miało wpływu na wyniki końcowe.

Niezerowa wartość energii kinetycznej związana jest z propagacją fali naprężenia w materiale, wraz z jej odbijaniem się od granic modelu. Efekt ten, wynika z przyjętych uproszczeń w modelowaniu, jednak nie ma wpływu na uzyskany rozkład zniszczeń w konstrukcji.

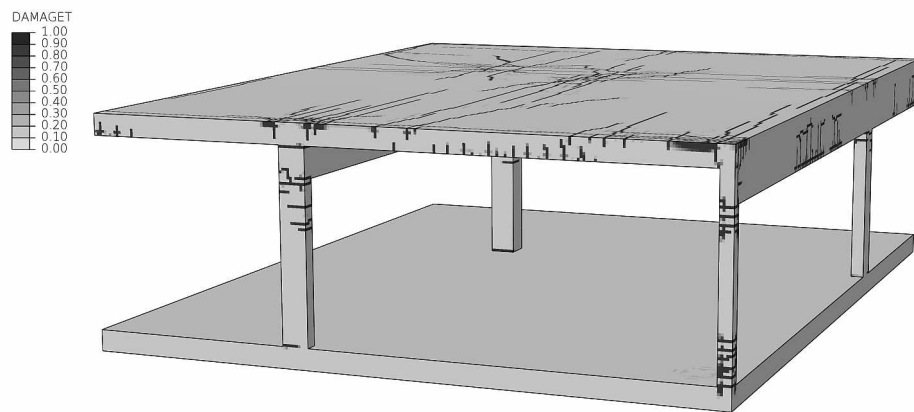


Rys. 10. Przebiegi wybranych energii, model obciążony wybuchem

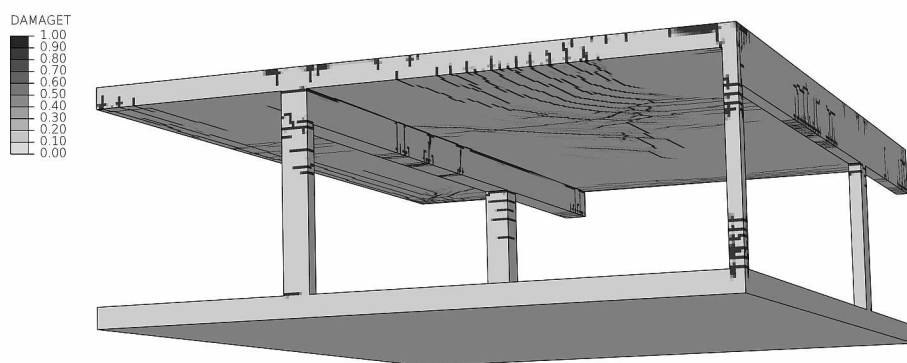
Oznaczenia: KE – energia kinetyczna, PD – energia dysypowana podczas trwałej deformacji, DD – energia dysypowana podczas pęknięcia

Fig. 10. Energies in time, load by explosion

Legend: KE – kinetic energy, PD – energy dissipated on plastic effects, DD – energy dissipated by cracking



Rys. 11. Rozkład uszkodzeń konstrukcji (widok z góry)
 Fig. 11. Distribution of damages (upper view)



Rys. 12. Rozkład uszkodzeń konstrukcji (widok od dołu)
 Fig. 12. Distribution of damages (lower view)

W porównaniu z Rys. 4. i 5. wartości dysypowanych energii są mniejsze, co jest związane ze znacznie mniejszym ładunkiem wybuchowym generującym obciążenie. W związku z tym zniszczenia mają bardziej lokalny charakter. Dlatego autorzy przewidują kolejne analizy zastosowaniem większych ładunków wybuchowych, a także materiały inne niż TNT. Zgodne jest to z zaleceniami podanymi w raporcie [6].

Na Rys. 11. i 12. przedstawiono wybrane wyniki analizy w postaci warstwic parametru (DAMAGET) opisującego zniszczenie betonu przy rozciąganiu.

Jak widać, wystąpiły liczne uszkodzenia oraz zniszczenie słupa środkowego, wynikające m.in. ze znacznych sił rozciągających generowanych podczas działania obciążenia na płytę stropową. Uszkodzenia w płycie stropowej oraz podciągach wykazują lokalne zniszczenia o dużej intensywności. Analiza stanu uszkodzeń w przekrojach konstrukcji wykazała, że wszystkie widoczne z zewnątrz zniszczenia sięgają do środka materiału na znaczną głębokość, co oznacza zdecydowaną redukcję nośności uszkodzonych w ten sposób elementów konstrukcyjnych.

5 Wnioski końcowe

Analiza odpowiedzi dynamicznej przestrzennych ustrojów szkieletowych wykonanych ze zbrojonego betonu i poddanych działaniu wybuchu wskazuje na istotne znaczenie zastosowanego modelu materiałowego, uwzględniającego nieliniowe charakterystyki oraz zniszczenie. Złożoność zjawiska, jego zależność od wielu wzajemnie wpływających na siebie czynników, wymaga zastosowania rozbudowanej symulacji numerycznej oraz złożonego modelu dyskretnego konstrukcji i działającego na nią obciążenia.

Fundamentalne znaczenie dla jakości uzyskanych wyników ma przyjęcie właściwej metodologii prowadzenia rozwiązania. Obejmuje to zarówno prawidłową budowę dyskretnego modelu, ale także przyjęcie koniecznych założeń upraszczających, określenie zakresu archiwizowanych wyników, kryterium zakończenia analizy, itp. W dalszym ciągu jest to zależne od doświadczenia i wnikliwej wstępnej analizy istoty problemu przez zespół badawczy. Niezbędna jest wstępna weryfikacja przyjętych założeń, poprzez analizy numeryczne zagadnień, w których znane jest rozwiązanie (symulacja numeryczna prób eksperymentalnych).

Zniszczenia konstrukcji żelbetowej obciążonej wybuchem mają złożony mechanizm, zależny od charakteru obciążeń i generowanych przez nie naprężeń (inaczej w przypadkach ściskania i rozciągania), jak też uwarunkowana jest współpracą betonu ze stalą zbrojeniową. Wszystko to wymaga zastosowania pełnego modelu zbrojenia z wykorzystaniem elementów prętowych umieszczonych w przestrzennej siatce elementów bryłowych. Uzyskane wyniki wskazują na istotne znaczenie falowego charakteru zjawiska, powodującego generowanie uszkodzeń poza miejscami bezpośredniego działania obciążenia wybuchem. Zdaniem autorów zjawisko to powinno być poddane dalszej analizie eksperymentalnej i numerycznej, ponieważ może być przyczyną poważnych uszkodzeń konstrukcji, powodujących utratę jej globalnej nośności. Prowadzić to może do postępującej awarii obejmującej cały ustrój, nawet jeżeli sam wybuch uszkodził stosunkowo niewielką część konstrukcji.

Literatura

1. ASCE (American Society of Civil Engineers): *Design of Structures to Resist Nuclear Weapons Effects, Manual 42*, Washington DC, 1985.
2. ASCE (American Society of Civil Engineers): *Structural Design for Physical Security – State of the Practice*, ASCE Structural Engineering Institute, Washington DC, 1999.
3. ASCE (American Society of Civil Engineers): *Proceedings of the Seminar "Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities"*, Houston TX, 2003.
4. National Research Council: *Protecting Buildings from Bomb Damage*, National Academy Press., Washington DC, USA, 1995.
5. National Research Council: *Protecting People and Buildings from Terrorism*, National Academy Press, Washington DC, USA, 2001.
6. National Research Council: *Science and Technology for Army Homeland Security. Report 1*, National Academy Press, Washington DC, USA, 2003.
7. Cichocki K.: *Numerical Analysis of Concrete Structures under Blast Loading*, Koszalin University of Technology, 2008.
8. Cichocki K.: *Rozwój zniszczenia w żelbetowych płytach obciążonych wybuchem*. Inżynieria i Budownictwo , Vol. 6, 320-323, 2008.
9. Joint Committee of Structural Safety (ed MH Faber), *Risk Assessment in Engineering Principles, System Representation and Risk Criteria*, ISBN 978-3-909386-78-9, 2008.
10. Rizzuto E., Cichocki K.: *Acceptance criteria, Robustness of Structures: Proceedings of the Final Conference of COST Action TU0601*, Prague, 2011.
11. Cole R.H.: *Underwater Explosions*, Princeton University Press, Princeton – New Jersey, 1948.
12. Bangash M.Y.H.: *Impact and Explosion – Analysis and Design*, Blackwell Scientific Publications, 1993.
13. Henrych J.: *The Dynamics of Explosion and Its Use*, Elsevier, 1989.
14. Beshara F.B.A., Virdi K.S.: *Prediction of dynamic response of blast-loaded reinforced concrete structures*, Comp.& Struct, Vol. 44, No. 1/2, pp. 297-313, 1992.
15. Beshara F.B.A.: *Modeling of blast loading on aboveground structures - I. General phenomenology and external blast*, Comp.& Struct., Vol. 51, pp. 597-606, 1994.
16. Beshara F.B.A.: *Modeling of blast loading on aboveground structures - II. Internal blast and ground shock*, Comp.& Struct., Vol. 51, pp. 607-628, 1994.
17. Schenker A., Anteby I., Gal E. i inni: *Full-scale field tests of concrete slabs subjected to blast loads*, International Journal of Impact Engineering, 35, 184-198, 2008.
18. *Abaqus Analysis User's Manual*, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence 2012.
19. Ruchwa M.: *Ocena odporności konstrukcji żelbetowej na działanie wybuchu*, Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, LIX, 4, 269-280, 2010.
20. Cichocki K., Ruchwa M.: *Robustness oriented analysis of structures under extreme loads*, 19th International Conference on Computer Methods in Mechanics - CMM-2011, Short papers, Warsaw, Poland, 155-156, 2011.

21. Cichocki K., Ruchwa M.: *Propagacja zniszczenia w konstrukcji obciążonej wybuchem*. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, seria: Budownictwo i Inżynieria Środowiska, Z.58 (3/11/III), Nr 276., 17-24, 2011.
22. Włodarczyk E., *Wstęp do mechaniki wybuchu*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1994.
23. Krzewiński R., Rekucki R.: *Roboty budowlane przy użyciu materiałów wybuchowych*, Polcen, 2005.
24. Starossek U., Haberland M.: *Disproportionate Collapse: Terminology and Procedures*, Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 24, 519-528, 2010.
25. Gebekken N., Ruppert M., *On the Concrete Material Response to Explosive Loading – Numerical Simulations*, International Symposium on Structures under Shock and Impact, Thessaloniki, Greece, 773-782, 1998.

Streszczenie

Celem niniejszej pracy jest określenie integralności konstrukcji budynków wielokondygnacyjnych poddanych działaniu obciążeń o charakterze wyjątkowym (wybuchy). Określono główne problemy związane z analizą numeryczną budynków wielokondygnacyjnych, budowy modelu dyskretnego konstrukcji oraz modelowaniu obciążenia o charakterze nagłym. Przeprowadzono także przykładową analizę numeryczną wybranej konstrukcji budynku wielokondygnacyjnego Metodą Elementów Skończonych, jako ilustrację omawianych zagadnień. Wyniki wykonanych analiz numerycznych pozwoliły na sformułowanie wniosków końcowych

Space reinforced concrete frames under blast load

Summary

The main goal of his study is to evaluate the integrity of multistorey space buildings subjected to exceptional loads due to blast. Fundamental problems for such kind of analyses were defined and discussed, concerning the discrete numerical model of the structure and the description of the exceptional impulsive load. The example of such analysis has been performed and discussed, using the Finite Element Method computer code. Final conclusions based on the analysis results were also formulated.