



Modelowanie numeryczne budynków obciążonych wybuchowo

MACIEJ ŁUSZCZKI, JAROSŁAW SIWIŃSKI, ADAM STOLARSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. Celem pracy jest opracowanie modeli numerycznych budynków oraz przeprowadzenie analizy wyężenia budynków pod wpływem działania obciążeń wyjątkowych. Na podstawie naziemnego skaningu laserowego, dokumentacji archiwalnej oraz przeprowadzonej inwentaryzacji budowlanej opracowano dyskretne modele obliczeniowe konstrukcji budynków, wykorzystując możliwości programu metody elementów skończonych. Przeprowadzono analizę stanu wyężenia konstrukcji budynków pod działaniem obciążeń wybuchowych. Praca zawiera również analizę zachowania konstrukcji po usunięciu elementów uszkodzonych w wyniku oddziaływania wybuchu ładunku materiału wybuchowego.

Słowa kluczowe: obiekty budowlane, skaningu laserowy, metoda elementów skończonych, mechanika konstrukcji, obciążenie wybuchowe

1. Wstęp

W polskiej literaturze z zakresu mechaniki konstrukcji inżynierskich zagadnienie modelowania komputerowego i symulacji zachowania elementów konstrukcyjnych jest szeroko reprezentowane i potwierdza powszechność stosowania metod komputerowych, a szczególnie metody elementów skończonych, zarówno w badaniach naukowych, np. [1], jak i w praktyce inżynierskiej projektowej, np. [2]. Jednakże analiza komputerowa całych obiektów budowlanych w dużej skali, to jest budowli inżynierskich i budynków, jest trudna ze względu na konieczność specjalnego modelowania współdziałania dużej liczby różnorodnych elementów konstrukcyjnych, gruntu i oddziaływań zewnętrznych. Przede wszystkim brakuje zintegrowanego

podejścia do budowy cyfrowych modeli obiektów budowlanych z wykorzystaniem zaawansowanych geodezyjnych metod pomiarowych i rejestrujących. Przedmiotem większości prac są zasadniczo analizy obiektów obciążonych statycznie lub quasi-dynamicznym obciążeniem ruchomym, lub obciążeniem sejsmicznym, np. [3].

Powszechnie nie są znane przykłady analiz obiektów budowlanych poddanych oddziaływaniom wyjątkowym typu wybuchowego. Oddziaływania takie są często wynikiem działalności terrorystycznej. Prawdopodobny dostęp do najnowszych rodzajów środków rażenia, w tym także nietypowych niekonwencjonalnych ładunków wybuchowych, oraz potencjalne zagrożenie terroryzmem wskazuje na potrzebę identyfikacji możliwego zakresu zniszczeń i uszkodzeń w obiektach budowlanych. Świadomość wystąpienia zagrożeń pozwala na lepsze zabezpieczenie konstrukcji budowlanych narażonych na atak i w konsekwencji zminimalizowanie uszkodzeń.

Celem pracy jest opracowanie modeli numerycznych obiektów budowlanych oraz przeprowadzenie analizy wyteżenia budynków pod wpływem działania obciążeń wyjątkowych.

Praca dotyczy numerycznych badań odporności na eksplozję ładunku materiału wybuchowego dwu rodzajów istniejących i obecnie użytkowanych budynków: wysokiego, internatowo-hotelowego wykonanego z prefabrykowanych, zespolonych elementów żelbetowych oraz niskiego, szkoleniowo-administracyjnego o konstrukcji murowanej z monolitycznymi stropami żelbetowymi.

Na podstawie naziemnego skaningu laserowego, analizy budowlanej dokumentacji archiwalnej oraz przeprowadzonej inwentaryzacji opracowano dyskretne modele obliczeniowe konstrukcji budynków, wykorzystując możliwości znanego programu metody elementów skończonych [4].

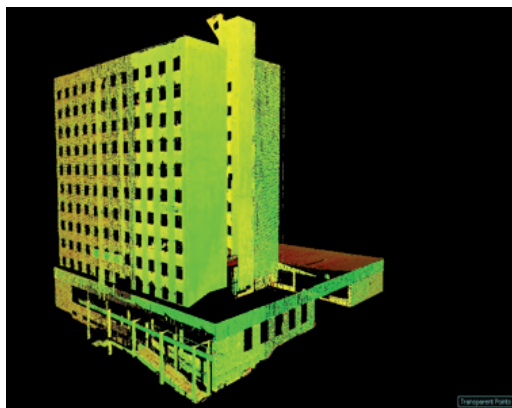
W celu skoncentrowania uwagi, analizę stanu wyteżenia konstrukcji budynków przeprowadzono dla jednoczesnego działania tylko ciężaru własnego i części długotrwałej obciążeń zmiennych oraz obciążenia wybuchowego. Przeprowadzono uproszczoną analizę zniszczenia budynków polegającą na badaniu zachowania konstrukcji po usunięciu elementów uszkodzonych w wyniku oddziaływania wybuchu ładunku materiału wybuchowego.

2. Modele numeryczne budynków

Opracowywanie modelu numerycznego przebiegało w trzech etapach.

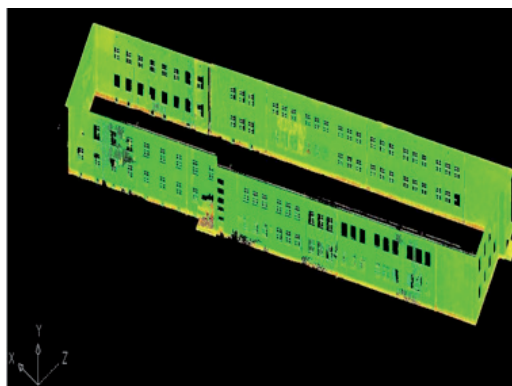
I etap — wykonanie modelu cyfrowego na podstawie przeprowadzonego skaningu laserowego z wykorzystaniem skanera Leica Scanstation 2.

Uzyskany model trójwymiarowy elewacji zewnętrznych pozwolił na dokładne określenie wymiarów budynków, otworów drzwiowych i okiennych, jak również różnego rodzaju wnęk oraz innych form geometrycznych (rys. 1 i 2).



Rys. 1. Model cyfrowy budynku wysokiego, internatowo-hotelowego z siatką punktów pomiarowych $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$

II etap — przeprowadzenie inwentaryzacji budowlanej obiektów, która umożliwiła pozyskanie informacji dotyczących konstrukcji budynków, takich jak rozmieszczenie, połączenia i wymiary elementów konstrukcyjnych oraz rodzajów materiałów, z jakich zostały wykonane.

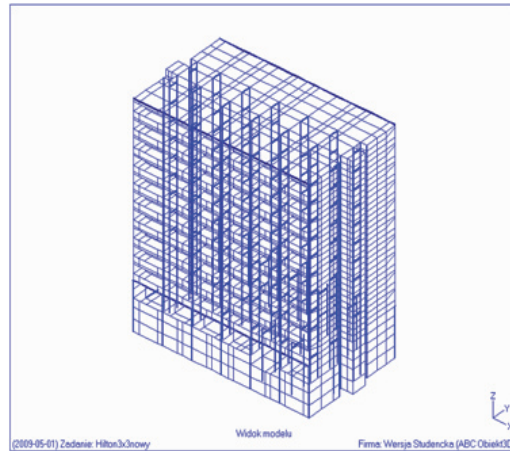


Rys. 2. Model cyfrowy budynku niskiego, szkoleniowo-administracyjnego z siatką punktów pomiarowych $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$

III etap — opracowanie modelu obliczeniowego metody elementów skończonych za pomocą programu obliczeniowego ABC Obiekt 6.6 [4].

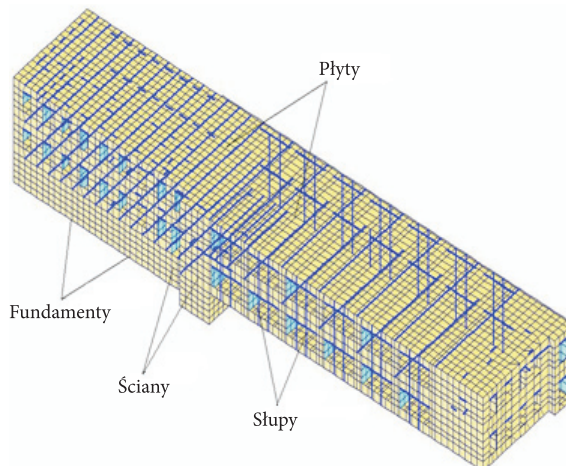
III A. Model obliczeniowy MES budynku wysokiego, internatowo-hotelowego zawiera 7885 elementów skończonych połączonych w 6214 węzłach (rys. 3). Wygenerowanych zostało ponad 40 000 równań. Większość z zastosowanych elementów skończonych (ponad 6300) to elementy powłokowe. Są to trzywęzłowe i czterowęzłowe elementy, o sześciu stopniach swobody w węźle, odwzorowujące

stan płytowy. Elementy te wykorzystano do utworzenia modeli fragmentów konstrukcji takich jak: ściany, stropy i fundamenty. Fragmenty konstrukcji takie jak: belki podporujące strop, słupy, nadproża modelowane są za pomocą elementów belkowych, których ogólna liczba w modelu wynosi ponad 1500.



Rys. 3. Model obliczeniowy MES budynku wysokiego, internatowo-hotelowego

III B. Model obliczeniowy MES budynku niskiego, szkoleniowo-administracyjnego zawiera 13 271 elementów skończonych połączonych w 11 367 węzłach (rys. 4). Układ równań liczy ponad 69 500 równań. Większość z zastosowanych elementów skończonych (ponad 11 800) to elementy powłokowe. Liczba elementów belkowych w modelu wynosi 1443.

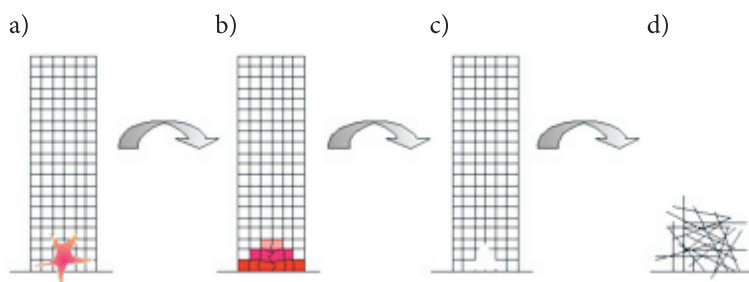


Rys. 4. Model obliczeniowy MES budynku niskiego, szkoleniowo-administracyjnego

Fundamenty były modelowane jako elementy podparte sprężystością w węzłach, znajdujących się w osiach ścian nośnych budynków, przy założeniu blokady przemieszczeń na kierunkach poziomych i podatności podpór w kierunku pionowym. $k = 10 \text{ kN/mm}$.

3. Założenia modelowania obciążenia i zniszczenia budynków

Przeprowadzono uproszczoną, dwufazową analizę zachowania budynków pod obciążeniem. Ideowy schemat dwufazowej analizy zniszczenia budynków przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Ideowy schemat dwufazowej analizy zniszczenia budynków (opis w tekście)

W pierwszej fazie analizie statyczno-wytrzymałościowej poddane zostały modele obliczeniowe MES budynków dla następującej wyjątkowej kombinacji obciążeń (rys. 5a):

1. Obciążenie charakterystyczne od ciężaru własnego wszystkich elementów konstrukcyjnych i części długotrwałej obciążeń zmiennych (technologicznych) działających na wszystkich stropach budynków. Obciążenie wyznaczono zgodnie z zasadami określonymi w normie PN-EN 1991-1-1:2004 [6].
2. Obciążenie wyjątkowe od wybuchu ładunku trotylu o masie 10 kg.

Zgodnie z zasadami określonymi w [5], dla podstawowych parametrów ładunku (masa $C = 10 \text{ kg}$), jego usytuowania względem przegród (średnia odległość ładunku od przegrody $r = 3 \text{ m}$) oraz oszacowania częstości drgań własnych budynków wyznaczono obciążenie $q = 1,96 \text{ MPa}$ budynku wysokiego (internatowo-hotelowego) oraz $q = 1,92 \text{ MPa}$ budynku niskiego (szkoleniowo-administracyjnego), które jest traktowane jako zastępcze obciążenie statyczne. Obciążenie to traktowane jest jako równomiernie rozłożone na powierzchni wszystkich przegród budowlanych bezpośrednio otaczających miejsce usytuowania ładunku wybuchowego.

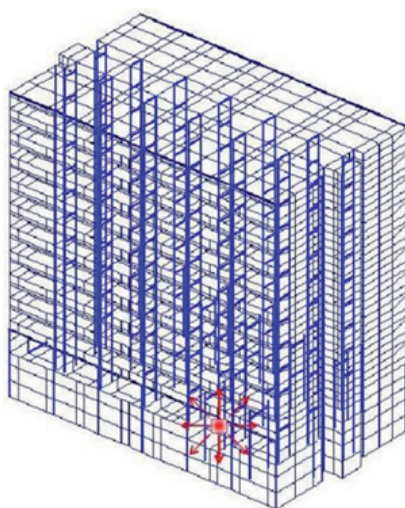
Pierwszą fazę analizy kończy identyfikacja obszarów konstrukcji, w których wartości naprężeń zredukowanych (zastępczych) przekraczają założone wytrzymałości charakterystyczne materiałów konstrukcyjnych (rys. 5b).

W drugiej fazie analizę wykonano dla zmodyfikowanych modeli obliczeniowych budynków (rys. 5c). W modelach tych usunięte zostały te elementy, w których w pierwszej fazie analizy stwierdzono przekroczenie zredukowanych naprężeń na ściskanie ponad wytrzymałości charakterystyczne równe 15 MPa dla elementów betonowych i murowych. W tej fazie analizy budynki były poddane wyłącznie obciążeniu charakterystycznemu od ciężaru własnego wszystkich elementów konstrukcyjnych i części długotrwałej obciążeń zmiennych działających na stropach budynków.

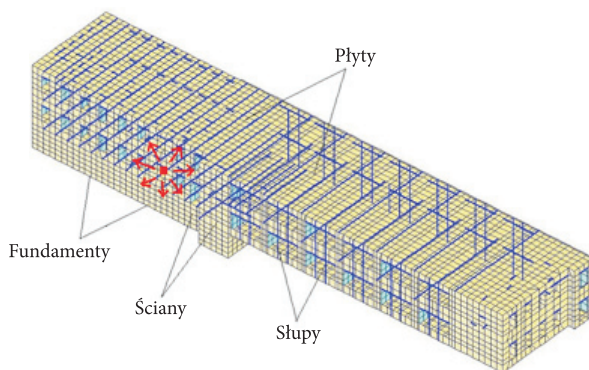
Drugą fazę analizy kończy wnioskowanie o wartościach naprężeń zredukowanych i przemieszczeniach elementów konstrukcyjnych. Jeżeli parametry te nie przekraczają — odpowiednio — wytrzymałości charakterystycznych materiałów konstrukcyjnych i dopuszczalnych wartości przemieszczeń, świadczy to o możliwości dostosowania konstrukcji budynku do podstawowej kombinacji obciążeń. W przeciwnym przypadku stwierdzenie w wyniku analizy wystąpienia obszarów przekroczenia wartości wytrzymałości charakterystycznych materiałów i dopuszczalnych wartości przemieszczeń elementów konstrukcyjnych wskazuje na możliwość zawalenia konstrukcji (rys. 5d).

4. Analiza zachowania budynków pod obciążeniem wybuchowym

Przedstawiono wyniki pierwszej fazy analizy obliczeniowej dla podstawowych modeli obliczeniowych budynków. Usytuowanie ładunku materiału wybuchowego przedstawiono na rysunkach 6 i 7.



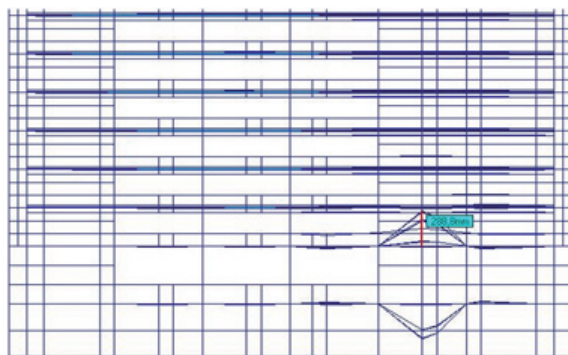
Rys. 6. Usytuowanie ładunku materiału wybuchowego w budynku wysokim, internatowo-hotelowym



Rys. 7. Usytuowanie ładunku materiału wybuchowego w budynku niskim, szkoleniowo-administracyjnym

Budynek wysoki, internatowo-hotelowy

Deformacje konstrukcji po wybuchu osiągają duże wartości — w kierunku pionowym stropy przemieszczają się prawie o 290 mm (rys. 8). Natomiast w kierunku poziomym przemieszczenia ścian nośnych narażonych bezpośrednio na działanie wybuchu wynoszą 25 mm, a przemieszczenia ściany szybu windowego — 28 mm (rys. 9).

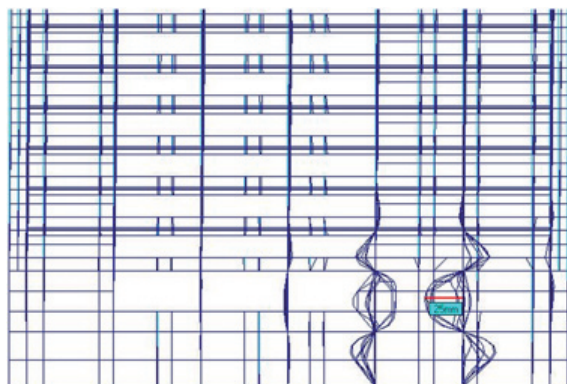


Rys. 8. Rozkład przemieszczeń pionowych pod wpływem działania wybuchu w budynku wysokim, internatowo-hotelowym (widok od frontu budynku)

Obserwacja stanu naprężenia umożliwia stwierdzenie, które elementy konstrukcyjne zostaną zniszczone. Najbardziej narażonymi elementami są ściany znajdujące się przy otworach drzwiowych oraz stropy, w których generują się duże siły wewnętrzne ze względu na ich grubość i rozpiętość.

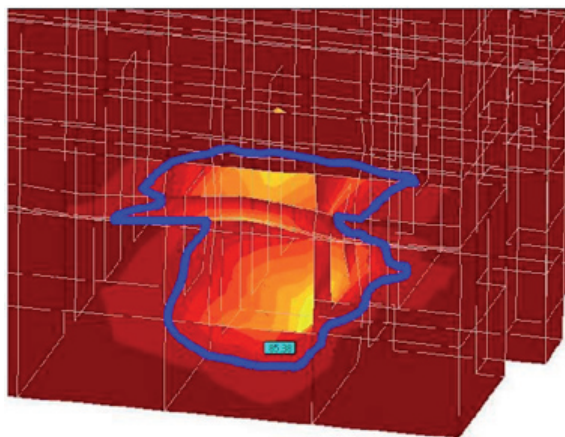
Maksymalne wartości naprężeń występują w stropie nad centrum wybuchu, naprężenia osiągają nierealne wartości 212 MPa, a w stropie pod centrum wybuchu

naprężenia wynoszą 188 MPa. Wartości tych naprężeń przekraczają wytrzymałość charakterystyczną betonu na ściskanie ponad 10-krotnie, a na rozciąganie ponad 100-krotnie.



Rys. 9. Rozkład przemieszczeń poziomych pod wpływem działania wybuchu w budynku wysokim, internatowo-hotelowym (widok od frontu budynku)

Na rysunku 10 przedstawiono rozkład naprężeń zredukowanych w elementach konstrukcyjnych oraz oznaczono granicę zasięgu tych naprężeń odpowiadającą wytrzymałości charakterystycznej równej 15 MPa dla elementów betonowych i murowych. Zgodnie z założoną metodyką postępowania przy uproszczonej analizie zniszczenia budynku, wszystkie elementy konstrukcyjne znajdujące się w tym obszarze zostaną potraktowane jako zniszczone i będą usunięte w modelu obliczeniowym.

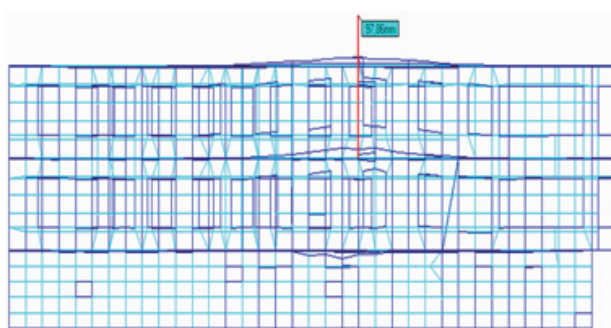


Rys. 10. Zasięg umownej strefy zniszczenia w budynku wysokim, internatowo-hotelowym

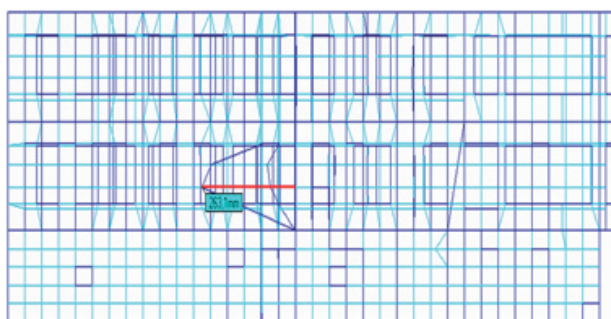
Budynek niski, szkoleniowo-administracyjny

Model obliczeniowy budynku ulega silnym odkształceniom w rejonie bezpośredniego oddziaływania wybuchu. Maksymalne przemieszczenia na kierunku pionowym w stropie wynoszą prawie 98 mm (rys. 11). W kierunku poziomym przemieszczenia ścian nośnych wynoszą 263 mm (rys. 12).

Maksymalna wartość naprężeń zredukowanych od wybuchu 10 kg trotylu wynosi ponad 99 MPa. Naprężenia te występują we wschodniej ścianie pomieszczenia administracyjnego, w którym nastąpił wybuch. Przewyższają one o ponad 1000% wytrzymałość muru ceglanego, z którego wykonana jest ta przegroda. Nośność przekroczona jest we wszystkich przegrodach, na które działa wybuch.



Rys. 11. Rozkład przemieszczeń pionowych pod wpływem działania wybuchu w budynku niskim, szkoleniowo-administracyjnym (widok od frontu budynku)



Rys. 12. Rozkład przemieszczeń poziomych pod wpływem działania wybuchu w budynku niskim, szkoleniowo-administracyjnym (widok od frontu budynku)

Na rysunku 13 przedstawiono rozkład naprężeń zredukowanych w elementach konstrukcyjnych oraz oznaczono granicę zasięgu tych naprężeń odpowiadającą wytrzymałości charakterystycznej równej 15 MPa dla elementów betonowych i murowych. Zgodnie z metodyką uproszczonej analizy zniszczenia budynku,

wszystkie elementy konstrukcyjne znajdujące się w tym obszarze potraktowano jako zniszczone i usunięto w modelu obliczeniowym.



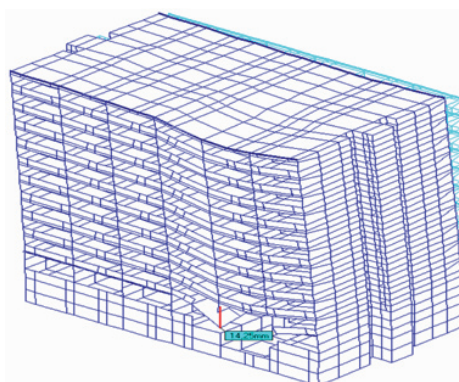
Rys. 13. Zasięg umownej strefy zniszczenia w budynku niskim, szkoleniowo-administracyjnym

5. Uproszczona analiza zniszczenia

Przedstawiono wyniki drugiej fazy analizy po usunięciu elementów uszkodzonych w wyniku wybuchu. W ten sposób możemy stwierdzić, jakim deformacjom i wyężeniu ulegnie konstrukcja budynków po zmianie modelu obliczeniowego.

Budynek wysoki, internatowo-hotelowy

Na rysunku 14 zostały przedstawione przemieszczenia pionowe dla nowego układu konstrukcji. Pomimo usunięcia zniszczonych elementów, ugięcia nie są duże, wynoszą 14,25 mm i nie przekraczają normowych wartości dopuszczalnych.

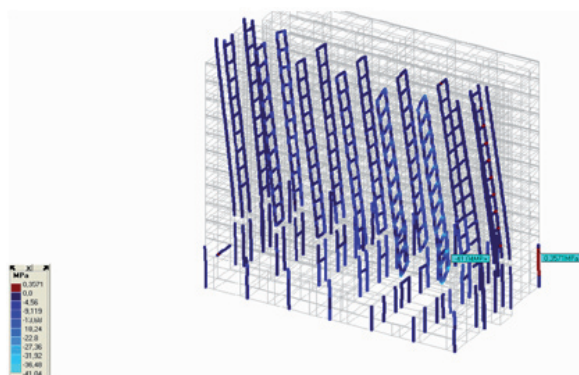


Rys. 14. Rozkład przemieszczeń pionowych w budynku wysokim, internatowo-hotelowym po zmianie schematu obliczeniowego

W wyniku analizy stanu naprężenia zauważyć można, że naprężenia w większym stopniu oddziaływać będą na zewnętrzną ścianę nośną przy prawym trzonie

komunikacyjnym. Gwałtowny wzrost sił tarczowych wskazuje, które elementy są najbardziej narażone na zniszczenie po wybuchu.

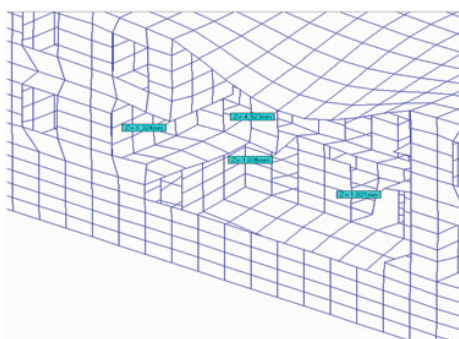
Po usunięciu słupów podtrzymujących elementy z wyższych kondygnacji konstrukcja ulegnie zniszczeniu. W słupach i ryglach znajdujących się przed szybem windowym występują naprężenia rzędu 41 MPa. Elementy te ulegną znacznym deformacjom prowadzącym do kolejnej zmiany schematu obliczeniowego, co w konsekwencji doprowadzi do ich zniszczenia (rys. 15).



Rys. 15. Rozkład maksymalnych naprężeń elementów belkowych w budynku wysokim, internatowo-hotelowym po zmianie schematu obliczeniowego

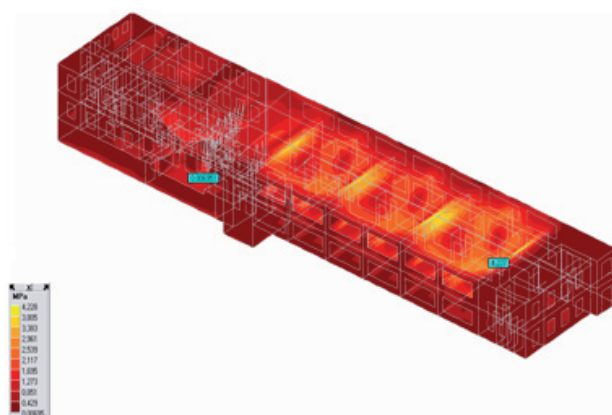
Budynek niski, szkoleniowo-administracyjny

Obserwuje się znaczny wzrost ugięć pionowych stropodachu, który pozbawiony jest podparcia w postaci ściany zewnętrznej. Budynek, w rejonie zniszczeń powybuchowych, tj. usuniętych przegród budowlanych, nie wykazuje znacznych przemieszczeń poziomych (rys. 16).



Rys. 16. Rozkład przemieszczeń pionowych w budynku niskim, szkoleniowo-administracyjnym po zmianie schematu obliczeniowego

Stwierdzono, że usunięcie zniszczonych przegród nie powoduje znaczącego wzrostu naprężeń pozostałych elementów konstrukcji. Wartości maksymalne naprężeń występują po przeciwnej stronie obiektu i są spowodowane ciężarem własnym konstrukcji (rys. 17).



Rys. 17. Rozkład naprężeń zredukowanych w budynku niskim, szkoleniowo-administracyjnym po zmianie schematu obliczeniowego

6. Zakończenie — wnioski

Niniejsza praca stanowi początkowe stadium opracowania metody cyfrowego modelowania obiektów budowlanych z wykorzystaniem geodezyjnych metod pomiarowych oraz analizy zachowania modeli tych obiektów pod wpływem obciążenia wyjątkowego metodą elementów skończonych w zakresie odkształceń sprężystych.

W celu opracowania siatki podziału na elementy skończone budynku, wykorzystano zaledwie 10% informacji, które wystarczyły do opisanie siatki elementów skończonych dla powierzchni zewnętrznych budynku. Umożliwiły one dokładne odwzorowanie w modelu obliczeniowym otworów okiennych oraz drzwiowych, jak również różnego rodzaju wnęk i uskoków. Pomimo dużej dokładności skanera Leica Scanstation 2 można stwierdzić, że należy poszukiwać bardziej efektywnej metody pomiarów wymaganych do opracowania cyfrowego modelu budynku.

Obciążenie od wybuchu modelowano jako zastępcze obciążenie statyczne. Należy podkreślić, że analiza mechanizmu zniszczenia budynków ma charakter uproszczony i opiera się na założeniu eliminacji elementów uznanych za zniszczone w modelu obliczeniowym.

W wysokim budynku internatowo-hotelowym, pod wpływem działania nadciśnienia od wybuchu przyjętego ładunku trotylu, zniszczeniu ulegną bezpośrednio narażone elementy konstrukcyjne. Analiza wyłączenia konstrukcji po usunięciu

elementów zniszczonych przez wybuch wskazuje, że elementy powłokowe nie ulegną całkowitej destrukcji. Natomiast połączenia elementów belkowych i słupowych ulegną nadmiernym deformacjom, co w konsekwencji doprowadzi do dalszych defektów konstrukcji i ewentualnego zawalenia budynku.

W niskim budynku szkoleniowo-administracyjnym pod wpływem działania wybuchu zniszczeniu uległy wszystkie przegrody, na które oddziaływał wybuch ładunku o zadanej masie. Budynek nie jest całkowicie odporny na działanie tak wielkiej siły niszczącej. Jednakże po usunięciu elementów uznanych za zniszczone i obciążeniu konstrukcji oddziaływaniami normowymi nie następuje gwałtowny wzrost naprężeń, co wskazuje, że pozostałe elementy nie ulegną zniszczeniu — budynek nie ulegnie zawaleniu.

Praca jest podstawą do dalszych badań w kierunku opracowania złożonych modeli obliczeniowych budynków uwzględniających nieliniowości fizyczne materiałów, nieliniowości geometryczne konstrukcji oraz wiernie odzwierciedlających oddziaływanie wybuchu i reakcję dynamiczną konstrukcji.

Podziękowanie. Autorzy składają podziękowanie pracownikom naukowym Zakładu Teledetekcji Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji WAT Annie Fryśkowskiej, Michalinie Wilińskiej i Michałowi Kędzierskiemu za pomoc udzieloną przy wykonaniu skaningu laserowego budynków będących przedmiotem niniejszej pracy.

Artykuł wpłynął do redakcji 2.12.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w marcu 2010 r.

LITERATURA

- [1] G. RAKOWSKI, Z. KACPRZYK, *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji*, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005.
- [2] W. STAROSOLSKI, *Komputerowe modelowanie betonowych ustrojów inżynierskich. Wybrane zagadnienia*, tom 1 i 2, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2009.
- [3] M. MROZEK, D. MROZEK, *Analiza dynamiczna murowych budynków uszkodzonych*, prace naukowe doktorantów, pr. zb. pod red. A. Wawrzynka, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2009, 219-27.
- [4] K. GRAJEK, ABC Rama 3D, ABC Płyta ABC Obiekt 3D, Wersja 66. Opis programu, Pro-Soft, Gliwice, 2004.
- [5] R. KRZEWIŃSKI, *Dynamika wybuchu*, Część I. *Metody określania obciążeń*, WAT, Warszawa, 1982; Część II. *Działanie wybuchu w ośrodkach inercyjnych*, WAT, Warszawa, 1983.
- [6] PN-EN 1991-1-1:2004, *Oddziaływania na konstrukcje, Część 1-1. Oddziaływania ogólne. Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach*, PKN, Warszawa, 2004.

M. ŁUSZCZKI, J. SIWIŃSKI, A. STOLARSKI

Numerical modelling of building under explosive loading

Abstract. The elaboration of the numerical models of building objects is the aim of the paper as well as execution of the analysis of effort of the buildings under the influence of the accidental loadings. Using the possibilities of the program of the finite element method, the discreet computational model of the buildings construction were worked out on the basis of ground-based laser scanning, archival documentation and conducted inventory control. The analysis of the effort state of the construction of buildings for explosive loadings was conducted. The paper also contains the analysis of the construction behaviour after removal of elements damaged in the result of the explosion action of the explosive material charge.

Keywords: building objects, laser scanning, finite element method, mechanics of structures, explosive loading