

SYLWESTER KOBIELAK*, RADOSŁAW TATKO**

METODY PROJEKTOWANIA BUDYNKÓW ŻELBETOWYCH O ZWIĘKSZONEJ ODPORNOŚCI NA OBCIĄŻENIA WYJĄTKOWE

DESIGN METHODS OF THE REINFORCED CONCRETE BUILDINGS WITH INCREASED RESISTANCE TO THE ACCIDENTAL ACTIONS

Streszczenie

W niniejszym artykule dokonano przeglądu metod projektowania budynków o zwiększonej odporności na działanie obciążeń wyjątkowych, takich jak uderzenia pojazdów, wybuchy wewnętrzne gazu, błędy ludzkie, a także bombowe zamachy terrorystyczne. Ich skutkiem może być zjawisko postępującego bądź nieproporcjonalnego zawalenia. Jest ono inicjowane przez lokalne zniszczenie jednego elementu nośnego konstrukcji, które rozprzestrzenia się na inne elementy nośne połączone z początkowo uszkodzonym elementem. W efekcie końcowym dochodzi albo do całkowitego zawalenia, albo do zawalenia nieproporcjonalnie dużej części konstrukcji. Omówiono także metody: więzi łączących, elementu kluczowego i ścieżki zastępczej. Zaprezentowano również przykład analizy zachowania się konstrukcji żelbetowego budynku szkieletowego metodą ścieżki zastępczej. Celem artykułu jest zwrócenie uwagi na różnice w istniejących wytycznych i normach odnoszących się do metod projektowania budynków o zwiększonej odporności na obciążenia wyjątkowe.

Słowa kluczowe: postępujące zawalenie, nieproporcjonalne zawalenie, metoda ścieżki zastępczej, metoda więzi łączących, element kluczowy

Abstract

This paper presents review of design methods of buildings with increased resistance to accidental actions such as impacts, internal explosions, human errors or terrorist attacks. Result of this actions may be progressive or disproportionate collapse. This phenomenon can be initiated by local failure of one from the load-bearing members, which spreads to the other members joined initially damaged one. Total collapse or collapse of disproportionate large part of building has ensued at the end. The paper presents: tie force method, key element method and alternate path method. The paper presents an example of alternate path analysis in frame reinforced concrete building. The aim of the paper is taking note of differences in existing guidelines and standards related to design method of building with increased resistance to accidental actions.

Keywords: progressive collapse, disproportionate collapse, alternate path method, tie force method, key element method

* Prof. dr hab. inż. Sylwester Kobiela, Instytut Budownictwa, Wydział Budownictwa Lądowego, Politechnika Wroclawska.

** Dr inż. Radosław Tatko, Katedra Budownictwa i Infrastruktury, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu.

1. Wstęp

Zainteresowanie projektowaniem budynków o zwiększonej odporności na działanie obciążeń wyjątkowych w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat znacznie wzrosło. Do oddziaływań tych zalicza się obciążenia wywołane zderzeniami, wewnętrznymi eksplozjami gazu czy bombowymi zamachami terrorystycznymi. Ponieważ są to oddziaływania dynamiczne, wywołujące nieliniową odpowiedź konstrukcji, podejmowane były próby adaptowania metod projektowych stosowanych w inżynierii antysejsmicznej. Właściwe zaprojektowanie obiektu budowlanego w obu przypadkach powinno polegać na zachowaniu integralności konstrukcji, jej ciągłości i ciągłości. Jednak obie grupy obciążeń różnią się od siebie. Przykładowo obciążenia wybuchowe mają znacznie większe amplitudy i bardzo krótki okres trwania w porównaniu ze wstrząsami sejsmicznymi. Efekt działania obciążenia wyjątkowego ograniczony jest do lokalnego uszkodzenia konstrukcji, podczas gdy trzęsienie ziemi oddziałuje na całą konstrukcję niemal jednocześnie. Różnice te przesądziły o nieprzydatności metod inżynierii antysejsmicznej w tym zakresie. Obecnie trwają intensywne prace nad opracowaniem metod projektowych minimalizujących skutki działania obciążeń wyjątkowych. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie i porównanie istniejących metod.

2. Postępujące zawalenie

Postępujące zawalenie jest to zjawisko zainicjowane przez lokalne zniszczenie jednego elementu nośnego konstrukcji, które rozprzestrzenia się na inne elementy nośne połączone z pierwotnie uszkodzonym elementem. W efekcie końcowym dochodzi albo do całkowitego zawalenia, albo do zawalenia nieproporcjonalnie dużej części konstrukcji [1, 6, 7]. Zjawisko to jest najniebezpieczniejszym skutkiem działania obciążeń wyjątkowych. Przykładami tego typu katastrof są:

- Katastrofa w Ronan Point (ryc. 1a) w Anglii (16.05.1968 r.), w której w mieszkaniu na osiemnastym piętrze dwudziestotrzykondygnacyjnego prefabrykowanego, żelbetowego budynku wybuchł gaz. Eksplozja wyrzuciła na zewnątrz fragment zewnętrznej ściany nośnej feralnego piętra, skutkiem czego powyżej położone pięć pięter straciło oparcie i spadło, niszcząc po kolei dolne kondygnacje. Zginęły trzy osoby.
- Zamach terrorystyczny na budynek Alfred P. Murrah (ryc. 1b) w Oklahomie w USA (19.04.1995 r.), podczas którego ciężarówka wyładowana materiałem wybuchowym eksplodowała blisko jednego ze słupów nośnych budynku. Eksplozja zniszczyła znaczną część budynku. Zginęło 168 osób.
- Zamach terrorystyczny na World Trade Center w Nowym Jorku (11.09.2001 r.), w którym porwane dwa samoloty pasażerskie uderzyły w dwie wieże WTC. Zderzenia i wywołane nimi pożary spowodowały ogromne zniszczenie kilku pięter budynków w okolicy uderzenia. W rezultacie obie wieże zawaliły się. Zginęło blisko 3000 osób.

Należy tu wymienić jeszcze zawalenie budynku Skyline Plaza w 1973 r., koszar amerykańskich w Libanie w 1983 r., budynku L'Ambiance Plaza w 1987 r., koszar Khabar Towers w 1996 r. oraz wybuch gazu w budynku mieszkalnym w Gdańsku w 1995 r.



Ryc. 1. Katastrofy budynków: a) Ronan Point w Anglii, b) Alfred P. Murrah w Oklahomie

Fig. 1. Collapses of buildings: a) Ronan Point, England, b) Alfred P. Murrah, Oklahoma

3. Metody projektowania i analiz

Metody projektowania budowli o zwiększonej odporności na obciążenia wyjątkowe podzielić można na dwie grupy:

- 1) metody pośrednie polegające na zapewnieniu przeszywnienia konstrukcyjnego, minimalnego poziomu ciągłości czy ciągłości poszczególnych elementów nośnych. Podstawową metodą z tej grupy jest metoda więzi łączących (*tie force method* – TF);
- 2) metody bezpośrednie, w których poszczególne elementy nośne projektuje się tak, aby zdolne były przenieść obciążenia wyjątkowe działające w sposób dowolny. Wyróżnić tu należy metodę elementu kluczowego (*key element method* – KE) oraz metodę ścieżki zastępczej (*alternate path method* – APM).

Nie wszystkie budynki muszą być w jednakowym stopniu zabezpieczane przed działaniem obciążeń wyjątkowych. Department of Defense USA (DoD) w swoich wytycznych [7] wyróżnił cztery poziomy zabezpieczenia budynków. Podobnie Eurokod 1 [5] wyróżnia cztery kategorie konsekwencji. W zależności od przynależności danego obiektu do jednej z kategorii bądź poziomu zabezpieczenia podczas projektowania budynku należy zastosować odpowiednią metodę. W zdecydowanej większości przypadków wystarczające jest zastosowanie metody więzi łączących, uzupełnionej dodatkowymi wymaganiami projektowo-konstrukcyjnymi. Jeśli nie zostaną spełnione wymagania tej metody, konstrukcję budynku należy przeprojektować. W pewnych przypadkach alternatywą jest zastosowanie

metody ścieżki zastępczej [7] lub metody elementu kluczowego [5]. Budynki, wobec których stawia się wyższe wymagania dotyczące poziomu zabezpieczeń obowiązkowo poddaje się analizom ścieżki zastępczej.

3.1. Metoda więzi łączących

Metodę więzi łączących stosuje się m.in. w wytycznych DoD [7]. W przypadku budynków żelbetonowych wytyczne te oparto na betonowej normie brytyjskiej [2]. Wprowadzono ją także do Eurokodów [5]. Metoda ta polega na wytworzeniu w ustroju nośnym budynku więzi łączących poszczególne jego elementy nośne poprzez zapewnienie ciągłości zbrojenia i ciągłości konstrukcji. Więzi te mają za zadanie ułatwić redystrybucję sił wewnętrznych w przypadku uszkodzenia któregoś z elementów nośnych budynku. Zwykle wykorzystuje się w tym celu typowe elementy konstrukcyjne budynku, projektowane zgodnie z konwencjonalnymi procedurami. Rozróżnia się więzi poziome: obwodowe, wewnętrzne, łączące słupy krawędziowe i narożne, oraz pionowe. Wszystkie więzi muszą być geometrycznie proste, a zmiany ich kierunku w celu ominięcia otworów i podobnych nieciągłości są niedopuszczalne. W tablicy 1 przedstawiono przykładowe porównanie sił rozciągających, jakie muszą przenosić więzi poziome: wewnętrzne i obwodowe w szkieletowych budynkach żelbetonowych wg [7] i [5].

Po spełnieniu warunków niniejszej metody teoretycznie budynek powinien być zdolny do przeniesienia obciążeń wyjątkowych i jeśli nastąpi zniszczenie jednego z elementów nośnych, to możliwe będzie powstanie alternatywnej ścieżki przeniesienia obciążeń, a tym samym nie nastąpi postępujące zawalenie budynku.

Tablica 1

Sił w więziach łączących

Typ więzi	Siła projektowa wg UFC 4-023-03 [7]	Siła projektowa wg PN-EN 1991-1-7 [5]
Więzi wewnętrzne	$\max z: \begin{cases} \frac{1,0 \cdot D + 1,0 \cdot L}{7,5} \cdot \frac{l_r}{5} \cdot F_t \\ 1,0 \cdot F_t \end{cases}$	$\max z: \begin{cases} 0,8 \cdot (g_k + \psi \cdot q_k) \cdot s \cdot L \\ 75 \text{ kN} \end{cases}$
Więzi obwodowe	$1,0 \cdot F_t$	$\max z: \begin{cases} 0,4 \cdot (g_k + \psi \cdot q_k) \cdot s \cdot L \\ 75 \text{ kN} \end{cases}$
Oznaczenia	D – obciążenie stałe L – obciążenie zmienne l_r – długość więzi $F_t = \min : (20 + 4n_0)$ lub 60 kN n_0 – liczba kondygnacji	g_k – obciążenie stałe q_k – obciążenie zmienne ψ – wsp. obciążeń dla kombinacji wyjątkowej [4] s – rozstaw więzi L – długość więzi

3.2. Metoda ścieżki zastępczej

Metoda ścieżki zastępczej zalecana jest w wytycznych DoD [7] oraz General Services Administration USA (GSA) [6] przy projektowaniu i remontowaniu budynków rządowych i administracyjnych w USA. Eurokod 1 [5] dopuszcza również jej zastosowanie jako alter-

natywną metodę do metody więzi łączących w przypadku niektórych budynków. Polega ona na poddaniu analizie odpowiedzi budowli po usunięciu jednego głównego elementu nośnego. Wymaga to prowadzenia tej analizy dla kilku lokalizacji tego elementu:

- na parterze w pobliżu środka dłuższej ściany budynku,
- na parterze w pobliżu środka krótszej ściany budynku,
- na ogólnodostępnym i niekontrolowanym parterze i/lub parkingu podziemnym wewnątrz budynku względem obwodowej linii słupów/ścian,
- na ogólnodostępnym i niekontrolowanym parterze i/lub parkingu podziemnym w miejscu, w którym geometria rzutu budynku znacząco się zmienia.

Tablica 2

Obciążenia w metodzie ścieżki zastępczej

Typ analizy	Obciążenia wg UFC 4-023-03 [7]	Obciążenia wg GSA [6]
Statyczna	dla całej konstrukcji: $(0,9 \text{ lub } 1,2) \cdot D + (0,5 \cdot L \text{ lub } 0,2 \cdot S) + 0,2 \cdot W$ dla elementów bezpośrednio przylegających do usuniętego elementu oraz leżących nad usuniętym elementem: $2 \cdot [(0,9 \text{ lub } 1,2) \cdot D + (0,5 \cdot L \text{ lub } 0,2 \cdot S)] + 0,2 \cdot W$	dla całej konstrukcji: $2 \cdot [D + 0,25 \cdot L]$
Dynamiczna	dla całej konstrukcji: $(0,9 \text{ lub } 1,2) \cdot D + (0,5 \cdot L \text{ lub } 0,2 \cdot S) + 0,2 \cdot W$	dla całej konstrukcji: $D + 0,25 \cdot L$
Gdzie:	D – obciążenie stałe, L – obciążenie zmienne, S – obciążenie śniegiem, W – obciążenie wiatrem	

Wymienione lokalizacje usuwanego elementu pochodzą z wytycznych GSA [6]. DoD [7] zaleca analizy te rozszerzyć dla tych samych elementów zlokalizowanych na każdej kondygnacji. Eurokod 1 [5] nakazuje przeprowadzenie takich analiz dla każdej kondygnacji i dla każdego słupa, każdej belki podpierającej słup lub każdego fragmentu ściany nośnej budynku.

Wyróżnia się trzy dopuszczalne metody analiz:

- 1) analiza liniowa statyczna, która opiera się na założeniu małych przemieszczeń i liniowo sprężystych właściwościach materiałowych;
- 2) nieliniowa statyczna, w której stosuje się nieliniowe modele materiałów (np. sprężysto-plastyczne). Analizy przemieszczeń konstrukcji prowadzi się w zakresie dużych przemieszczeń. Metoda ta jest najbardziej zbliżona do metody „push-over” stosowanej w analizach sejsmicznych;
- 3) nieliniowa dynamiczna.

W zależności od wybranego typu analizy wytyczne podają odpowiednie kombinacje obciążeń, jakie przyłożyć należy do konstrukcji podczas analizy. Kombinacje te zestawiono w tabl. 2.

Wynikiem analiz przeprowadzonych metodą ścieżki zastępczej jest określenie zakresu zniszczeń, które mogą nastąpić wskutek utraty elementu nośnego. Każdy z omawianych dokumentów w różny sposób opisuje dopuszczalne zakresy zniszczeń. Zestawiono je w tabl. 3.

Dopuszczalny zakres zniszczeń

Źródło	Usunięcie zewnętrznego słupa / fragmentu ściany nośnej	Usunięcie wewnętrznego słupa / fragmentu ściany nośnej
UFC 4-023-03 [7]	<ul style="list-style-type: none"> • powierzchnia zawalanej części stropu nad usuniętym elementem: $< 70 \text{ m}^2$ i $< 15\%$ powierzchni całkowitej stropu • strop poniżej usuniętego elementu nie może się zawalić • zawalenie nie może wykroczyć poza elementy dochodzące do elementu usuniętego 	<ul style="list-style-type: none"> • powierzchnia zawalanej części stropu nad usuniętym elementem: $< 140 \text{ m}^2$ lub $< 30\%$ powierzchni całkowitej stropu • strop poniżej usuniętego elementu nie może się zawalić • zawalenie nie może wykroczyć poza przęsła bezpośrednio połączone z usuniętym elementem
GSA [6]	<ul style="list-style-type: none"> • powierzchnia zawalanej części stropu nad usuniętym elementem: $< 167 \text{ m}^2$ i • zawalenie nie może wykroczyć poza przęsła bezpośrednio przylegające do usuniętego elementu 	<ul style="list-style-type: none"> • powierzchnia zawalanej części stropu nad usuniętym elementem: $< 334 \text{ m}^2$ i • zawalenie nie może wykroczyć poza przęsła bezpośrednio przylegające do usuniętego elementu
PN-EN 1991-1-7 [5]	<ul style="list-style-type: none"> • powierzchnia zawalanej części stropu nad usuniętym elementem: $< 100 \text{ m}^2$ i $< 15\%$ powierzchni całkowitej stropu • powierzchnia zawalanej części stropu pod usuniętym elementem: $< 100 \text{ m}^2$ i $< 15\%$ powierzchni całkowitej stropu 	

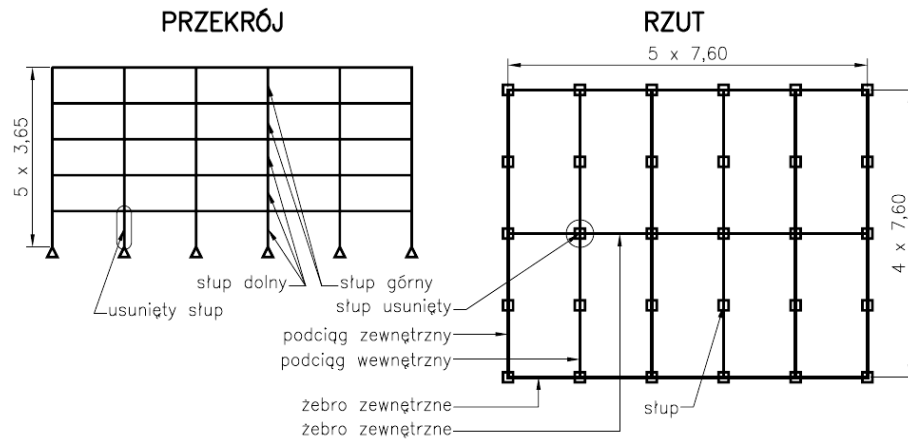
3.3. Metoda elementu kluczowego

Elementem kluczowym nazywamy element nośny, którego zniszczenie może doprowadzić do przekroczenia dopuszczalnego zakresu zniszczeń (patrz tabl. 3). Element taki, zgodnie z normą [5], należy zaprojektować w taki sposób, aby był w stanie przenieść obciążenie 34 kN/m^2 , działające na niego w dowolnym kierunku.

4. Przykład liczbowy

Analizie metodą ścieżki zastępczej poddano przestrzenną konstrukcję żelbetowego budynku szkieletowego, którego schemat statyczny przedstawiono na ryc. 2. Obliczenia przeprowadzono tylko dla jednej lokalizacji usuniętego elementu nośnego – środkowego słupa parteru – zgodnie z wytycznymi DoD [7].

Konstrukcja budynku przed przeprowadzeniem niniejszej analizy spełniała typowe warunki normowe dotyczące konstrukcji żelbetowych. Przyjęte wymiary i zbrojenie poszczególnych elementów nośnych budynku zestawiono w tabl. 4. Analizę metodą statyczną nieliniową przeprowadzono w programie SAP 2000. Na rycinie 3 przedstawiono deformację układu i powstałe w konstrukcji przeguby plastyczne, których nośność została przekroczona. Na tej podstawie stwierdzono, że dopuszczalny wg DoD [7] zakres zniszczeń konstrukcji został przekroczony.



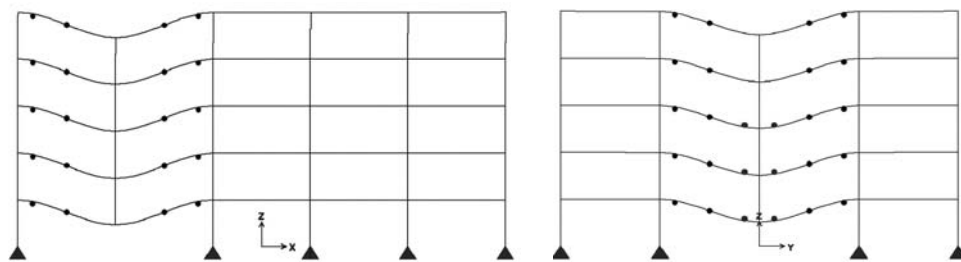
Ryc. 2. Schemat budynku

Fig. 2. Model of the building

Tablica 4

Wymiary i zbrojenie elementów nośnych

Nazwa elementu	Przed analizą ścieżki zastępczej			Po analizie ścieżki zastępczej		
	wymiary [mm]	zbroj. dolne [cm ²]	zbroj. górne [cm ²]	wymiary [mm]	zbroj. dolne [cm ²]	zbroj. górne [cm ²]
Żebra zewn.	600×500	11,35	15,48	niezmienione		
Żebra wewn.	600×500	11,35	15,48	600×750	28,39	38,71
Podciąg wewn.	750×500	15,61	28,90	600×750	39,00	72,26
Podciąg zewn.	750×500	14,19	20,97	niezmienione		
Słupy dolne	500×500	51,62		750×750	77,42	
Słupy górne	500×500	40,77		niezmienione		



Ryc. 3. Schemat deformacji modelu z przegubami plastycznymi

Fig. 3. Deformation of the model with plastic hinges

Konstrukcję przeprojektowano w sposób pokazany w tabl. 4, co pozwoliło na ograniczenie zakresu zniszczeń. Aby można było uznać konstrukcję za zabezpieczoną przed postępującym zawaleniem, analizę należy powtórzyć jeszcze dla innych lokalizacji usuniętego elementu.

5. Podsumowanie

Zabezpieczenie budynku przed skutkami obciążeń wyjątkowych za pomocą metody więzi łączących wymaga przeprowadzenia jedynie prostych ręcznych obliczeń. Jednak metoda ta nie w pełni zabezpiecza budynek przed reakcją łańcuchową wywołaną zniszczeniem jednego z elementów nośnych, co jest do przyjęcia w przypadku budynków o mniejszym znaczeniu. Zabezpieczenie budynków o większej randze wymaga poznania możliwych mechanizmów zniszczenia. Jednym ze sposobów ujawnienia tych mechanizmów może być metoda ścieżki zastępczej. Jej zastosowanie w podejściu liniowo statycznym możliwe jest z użyciem standardowego oprogramowania komputerowego. Analizy nieliniowe statyczne i dynamiczne są bardziej skomplikowane i wymagają zaawansowanego oprogramowania, ale jak wykazują aktualne badania, dzięki nim możliwe jest wprowadzenie znaczących zabezpieczeń przed skutkami obciążeń wyjątkowych.

Literatura

- [1] ASCE 7-05 – *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, American Society of Civil Engineers, Structural Engineering Institute, 2005.
- [2] BS 8110 Part 1: 1997, *Structural use of concrete*, Part 1. *Code of practice for design and construction*, British Standard.
- [3] Kobiela S., *Współczesne betonowe budowle ochronne. Wybrane zagadnienia projektowania*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
- [4] PN-EN 1990:2004, *Eurokod – Podstawy projektowania konstrukcji*.
- [5] PN-EN 1991-1-7:2006, *Eurokod 1 – Oddziaływania na konstrukcje*, Część 1-7: *Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wyjątkowe*.
- [6] *Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects*, United States General Services Administration, 2003.
- [7] UFC 4-023-03, *Unified Facilities Criteria, Design of buildings to resist progressive collapse*, Department of Defense USA, Washington 2005.