

Szczepan WOLIŃSKI¹

KSZTAŁTOWANIE KONSTRUKCJI ZE WZGLĘDU NA RYZYKO ZNISZCZENIA

Kształtowanie konstrukcji budowlanych można zdefiniować jako poszukiwanie formy lub nadawanie konstrukcji określonej postaci albo kształtu. W teorii konstrukcji kształtowanie utożsamia się często z optymalizacją elementów lub ustroju konstrukcyjnego obiektu budowlanego. Kryteria optymalizacji są jednak formułowane w różny sposób, jako kryteria jakościowe, ilościowe lub mieszane, ściśle zdefiniowane lub intuicyjne, dotyczące różnych właściwości konstrukcji, najczęściej sztywności, trwałości, zużycia materiałów, energii potencjalnej. Tradycyjne podejście do kształtowania konstrukcji oparte na wizualizacji i jakościowej optymalizacji „przepływu strumieni sił” ma nadal duże znaczenie praktyczne i dydaktyczne, a także inspirowanie do poszukiwania logicznie uzasadnionej topologii konstrukcji. Analizy przyczyn katastrof budowlanych wskazują, że najczęściej są one spowodowane przez wyjątkowe zdarzenia o znikomym prawdopodobieństwie wystąpienia lub ich kombinacje. Natomiast projektowanie i kształtowanie konstrukcji jest tradycyjnie ukierunkowane na standardowe sytuacje obliczeniowe, które mogą wystąpić w projektowanym okresie użytkowania. W pracy przedstawiono i uzasadniono autorską opinię, że na etapie kształtowania konstrukcji podstawowym kryterium wyboru formy i rozwiązań konstrukcyjnych powinno być dążenie do zapewnienia odporności na zdarzenia katastrofalne, adekwatnej do przewidywanego scenariusza zagrożeń w projektowanym okresie użytkowania konstrukcji i akceptowalnych konsekwencji zniszczenia. Jako syntetyczne, ilościowe kryterium optymalizacji i kształtowania konstrukcji uwzględniające oprócz standardowych wymagań podstawowych również odporność na zniszczenie i odporność poawaryjną, przyjęto ryzyko zniszczenia konstrukcji. Przedstawiono również przyporządkowanie czynników i działań decydujących o redukcji ryzyka do standardowych strategii postępowania oraz przykład ilustrujący sugerowaną procedurę obliczeń.

Słowa kluczowe: kształtowanie konstrukcji, zagrożenia, ryzyko zniszczenia, strategie kształtowania

¹ Autor do korespondencji: Szczepan Woliński, Politechnika Rzeszowska, ul. Poznańska 2, 35-084 Rzeszów, tel. 17 854 2974, e-mail: szwolkkb@prz.edu.pl

1. Wprowadzenie

Potoczne i najbardziej ogólne znaczenie pojęcia kształtowanie oznacza nadawanie określonego kształtu rzeczom materialnym. W odniesieniu do konstrukcji budowlanych kształtowanie jest rozumiane jako poszukiwanie formy lub nadawanie konstrukcji określonej postaci albo kształtu. W teorii konstrukcji kształtowanie utożsamia się zwykle z optymalizacją elementów lub ustroju konstrukcyjnego obiektu budowlanego. Kryteria optymalizacji są jednak definiowane w bardzo zróżnicowany sposób, na przykład jako kryteria jakościowe, ilościowe lub mieszane, intuicyjne lub ściśle sprecyzowane, a także dotyczące różnych właściwości konstrukcji, m.in.: sztywności, trwałości, zużycia materiałów, energii potencjalnej [1,2]. Wśród wybitnych konstruktorów powszechny jest pogląd, że sformalizowane metody optymalizacji konstrukcji są jedynie niezbyt istotnym elementem doskonalenia procesu projektowania wspomagającym twórcze kształtowanie konstrukcji oparte na intuicji, gruntownej znajomości zasad mechaniki budowli i właściwości materiałów konstrukcyjnych oraz na doświadczeniu i talencie projektanta [3,4]. Tradycyjne podejście do kształtowania konstrukcji oparte na wizualizacji i jakościowej optymalizacji „przepływu strumieni sił” [3] ma nadal duże znaczenie praktyczne i dydaktyczne, a także inspiruje do poszukiwania logicznie uzasadnionej topologii konstrukcji zgodnie z koncepcją funkcjonalizmu i konstruktywizmu w architekturze. Zapisy w prawie budowlanym i aktualnych europejskich normach konstrukcyjnych wprowadzają wiele wymagań związanych z projektowaniem, realizacją i użytkowaniem konstrukcji, które mogą być traktowane jako kryteria optymalizacji. Jednak większość z nich została sformułowana w sposób bardzo ogólny i trudny do kwantyfikacji lub wręcz w rozmytej formie. Dotyczy to, między innymi, wymagań związanych z zapewnieniem dostatecznej odporności konstrukcji na wyjątkowe oddziaływania i zdarzenia o katastrofalnych konsekwencjach [5]. Krótki przegląd tradycyjnych i nowszych kryteriów kształtowania konstrukcji przedstawiono w pracy [6].

Projektowanie konstrukcji jest tradycyjnie ukierunkowane na standardowe sytuacje obliczeniowe, które mogą wystąpić w projektowanym okresie użytkowania [7]. Tymczasem analizy przyczyn katastrof budowlanych jednoznacznie wskazują, że dominującą przyczyną katastrof i poważnych awarii są zdarzenia lub sytuacje nadzwyczajne, sporadycznie występujące, bardzo często związane z działaniami lub brakiem działań ludzi, zarówno związanymi, jak i niezwiązanymi bezpośrednio z procesem budowlanym. Zdarzenia katastrofalne można sklasyfikować według różnych kryteriów, m.in. według przyczyny wystąpienia na spowodowane: działaniami żywiołów (ognia – pożary wewnętrzne i zewnętrzne, powietrza (huragany, cyklony, tornada), wody (powódzie, tsunami, erozja), ziemi (osuwiska, zjawiska sejsmiczne i wulkaniczne), łączne działania żywiołów, a także wywołane działaniami lub zaniedbaniami ludzi, m.in.: związanymi z procesem budowlanych (roboty ziemne, górnicze, melioracyjne, ze-

wewnętrzne eksplozje), niezwiązane z procesem budowlanym (błędy projektowe i wykonawcze, wandalizm, akty wandalizmu i terroru), brak lub/i błędy związane z użytkowaniem konstrukcji (przeciążenie, brak zabezpieczeń przeciwpożarowych, brak przeglądów, roboty remontowe). W praktyce projektowej wzajemne powiązanie i usztywnienie elementów konstrukcji jest często traktowane jedyny sposób uzyskania dostatecznej odporności konstrukcji w obliczeniowych sytuacjach wyjątkowych. Wobec tego, nasuwa się pytanie czy w przypadku konstrukcji, których katastrofa powoduje poważne zagrożenie życia ludzkiego lub bardzo duże konsekwencje ekonomiczne, społeczne i środowiskowe, proces projektowania konstrukcji, a zwłaszcza jego pierwszy etap, czyli kształtowanie, powinien być ukierunkowany na standardowe sytuacje obliczeniowe. Zdaniem autora niniejszej pracy na etapie kształtowania konstrukcji podstawowym kryterium wyboru formy i rozwiązań konstrukcyjnych powinno być dążenie do zapewnienia odporności na zdarzenia katastrofalne, adekwatnej do przewidywanego scenariusza zagrożeń w projektowanym okresie użytkowania konstrukcji.

W niniejszej pracy przedstawiono i uzasadniono propozycję procedury kształtowania konstrukcji ze względu na ryzyko zniszczenia z uwzględnieniem standardowych scenariuszy zagrożenia i akceptowalnych konsekwencji zniszczenia.

2. Uwagi na temat ryzyka w projektowaniu konstrukcji

Konstrukcję obiektu budowlanego można przedstawić jako system połączonych elementów o zróżnicowanych właściwościach, gabarytach i funkcjach, poddany oddziaływaniom i wpływom, których pojawienia się można oczekiwać podczas wykonywania i użytkowania obiektu w projektowanym okresie użytkowania. Podstawowe wymagania sformułowane w aktualnych normach projektowania konstrukcji obejmują bardzo wiele aspektów, w tym dotyczących sytuacji standardowych, jak i odporności na oddziaływania wyjątkowe oraz odporności poawaryjnej [5, 7]. Ze względu na dobrze znane ograniczenia zalecanych metod weryfikacji niezawodności konstrukcji (półprobabilistycznej metody częściowych współczynników i uproszczonej probabilistycznej metody wskaźnika niezawodności β), ilościowa weryfikacja i optymalizacja konstrukcji uwzględniająca zawarte w normach wymagania podstawowe, jest w praktyce nierealna [5, 7, 8].

Syntetycznym ilościowym kryterium optymalizacji i kształtowania konstrukcji uwzględniającym oprócz standardowych wymagań podstawowych również odporność na zniszczenie i odporność poawaryjną, jest ryzyko zniszczenia konstrukcji R . Ryzyko jest definiowane jako funkcja, najczęściej suma iloczynów, prawdopodobieństwa $p(H_i)$ i miary konsekwencji $C(H_i)$ zniszczenia konstrukcji wskutek zagrożeń

$$R = \sum_{i=1}^n p(H_i)C(H_i) \quad (1)$$

Uwzględniając możliwość wystąpienia różnych uszkodzeń konstrukcji spowodowanych przez każde z uwzględnionych zagrożeń i różnych konsekwencji tych uszkodzeń, w normach ISO 13824 [9] i PN-EN 1991-1-7 [5], ryzyko zniszczenia konstrukcji R zdefiniowano jako miarę kombinacji prawdopodobieństw wystąpienia określonych zdarzeń i ilościowo wyrażonych konsekwencji ich wystąpienia:

$$R = \sum_{i=1}^{N_H} p(H_i) \sum_{j=1}^{N_D} \sum_{k=1}^{N_S} p(D_j|H_i)p(S_k|D_j)C(S_k) \quad (2)$$

gdzie: N_H – liczba zdarzeń (zagrożeń), N_D – liczba różnych sposobów uszkodzenia, N_S – liczba niekorzystnych stanów konstrukcji S_k , powodujących konsekwencje $C(S_k)$, $p(H_i)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia H_i , $P(D_j|H_i)$ – warunkowe prawdopodobieństwo stanu uszkodzenia j powodującego zagrożenie i , $p(S_k|D_j)$ – warunkowe prawdopodobieństwo stanu S_k powodującego stan D_j uszkodzenia S_k .

Na podstawie wzoru (2) można sformułować znane skądinąd podstawowe strategie redukcji ryzyka zniszczenia konstrukcji:

- a) Pierwsza grupa to strategie oparte na redukcji liczby N_H i prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożeń $p(H_i)$, polegające na kontroli oraz działaniach zapobiegających wystąpieniu zagrożeń. W praktyce sprowadzają się one do spełnienia zbioru reguł normatywnych.
- b) Grupa druga obejmuje strategie związane z redukcją liczby N_D i warunkowego prawdopodobieństwa wystąpienia lokalnych uszkodzeń $P(D_j|H_i)$, znane jako strategie projektowania na przeniesienie przez konstrukcję oddziaływań wyjątkowych.

Trzecia grupa to strategie polegające na zmniejszeniu liczby niekorzystnych stanów konstrukcji N_S , warunkowego prawdopodobieństwa $p(S_k|D_j)$ i konsekwencji uszkodzeń $C(S_k)$. Do tej grupy można zaliczyć między innymi strategię polegającą na kreowaniu alternatywnych ścieżek obciążenia.

Minimalizacja ryzyka wydaje się bardzo obiecującym kryterium kształtowania konstrukcji. Ze względu na trudności związane z oceną prawdopodobieństw warunkowych i konsekwencji uszkodzeń, jego przydatność i dokładność mogą wydawać się problematyczne. Dodatkowo, wybór i określenie wartości miar konsekwencji utraty życia i zdrowia ludzi budzi poważne kontrowersje natury etycznej [8]. Ponadto można zauważyć, że normowe definicje klasy konsekwencji bu-

dynków, sposób formułowania wymagań, dopuszczalnych konsekwencji przekroczenia stanów granicznych i uszkodzeń wskutek oddziaływań wyjątkowych mają zwykle charakter zmiennych lingwistycznych, w rodzaju „zadowolający poziom odporności” [5]. Jednym ze sposobów kwantyfikacji tego zmiennych lingwistycznych, subiektywnych i nieprecyzyjnych jest zastosowanie koncepcji zmiennych rozmytych [10]. Zarówno prawdopodobieństwa, jak i konsekwencje uszkodzeń występujące we wzorze (2) można zdefiniować jako liczby rozmyte o najprostszych, trójkątnych funkcjach przynależności μ_X opisanych za pomocą wartości dominującej m_X i przedziału zmienności $[a_X, b_X]$:

$$\tilde{p} \Rightarrow \mu_p(m_p, a_p, b_p) \quad (3)$$

$$\tilde{C} \Rightarrow \mu_C(m_C, a_C, b_C) \quad (4)$$

Ryzyko obliczone przy założeniu rozmytego charakteru zmiennych jest również zmienną rozmytą \tilde{R} . Kształtując konstrukcję ze względu na minimum ryzyka z wykorzystaniem standardowych procedur optymalizacji w dziedzinie deterministycznej rozmyte ryzyko należy wyostrzyć, na przykład do wartości dominującej m_R . Na ogół nie określa się dopuszczalnej wartości bezwzględnej ryzyka lecz postępuje się zgodnie z zasadą, iż należy dążyć do uzyskania jak najmniejszego ryzyka w określonej, konkretnej sytuacji obliczeniowej.

3. Czynniki decydujące o wyborze strategii kształtowania

Standardowa procedura projektowania konstrukcji budowlanych polega na wyborze rodzaju i topologii ustroju konstrukcyjnego obiektu, opartym na analizie istniejących rozwiązań konstrukcyjnych podobnych obiektów oraz wiedzy i intuicji inżynierskiej, a następnie zwymiarowaniu elementów, połączeń i detali na oddziaływania występujące w trwałej sytuacji obliczeniowej. Weryfikacja nośności w sytuacji wyjątkowej, przejściowej lub sejsmicznej dotyczy z reguły konstrukcji już ukształtowanej i zwymiarowanej. Normowe podejście do weryfikacji konstrukcji w wyjątkowych sytuacjach obliczeniowych polega na uwzględnieniu odpowiednich zaleceń konstrukcyjnych dotyczących zapewnienia integralności, spójności i stateczności konstrukcji, a w określonych przypadkach również weryfikację nośności lub/i zakresu zniszczenia konstrukcji na podstawie jednej z dwóch zalecanych strategii, opartej na określonych wartościach oddziaływań wyjątkowych lub polegającej na ograniczeniu przewidywanego zasięgu zniszczeń.

Proponowane zmiany procedury projektowania dotyczą dwóch zasadniczych kwestii; rozpoczęcia procesu projektowania od kształtowania konstrukcji w sytuacjach wyjątkowych lub na zdarzenia katastrofalne z uwzględnieniem kryterium minimum ryzyka zniszczenia, a następnie weryfikacji stanów granicznych w trwałej oraz przejściowych sytuacjach obliczeniowych. Do ważniejszych prze-

słanek decydujących o wyborze strategii kształtowania konstrukcji należy zaliczyć charakterystyki sytuacji lub zdarzeń wyjątkowych oraz odpowiedzi konstrukcji na te sytuacje lub zdarzenie.

Tabela 1. Przyporządkowanie czynników i działań decydujących o redukcji ryzyka do standardowych strategii postępowania (na podstawie [11, 12]).

Table 1. Assignment of elements and actions deciding on risk reduction to the standardized strategies (on the basis of papers [11, 12]).

Czynniki/ działania	Strategia postępowania w sytuacji wyjątkowej / w wypadku możliwości wystąpienia zdarzenia katastrofalnego				
	Zalecenia projekto- we	Kontrola zdarzeń	Redukcja konse- kwencji	Projekto- wanie na nośność	Ograniczenie zasięgu znisz- czenia
Nośność	+			+	
Styczna niewy- znaczalność					+
Stężenia i spójność konstrukcji	+				+
Druga linia obrony	+		+		+
Eliminacja kruche- go zniszczenia	+	+			
Zabezpieczenie przed lawinowym zniszczeniem			+		
Konstrukcje zabezpieczające			+		+
Lokalne osłony kluczowych elementów			+		
Kształtowanie sztywności	+			+	
Wykorzystanie wzmocnienia plastycznego				+	+
Ostrzeżenie, akcja ratunkowa		+	+		
Projektowanie wspomagane badaniami				+	+
Monitoring, kontrola jakości, zapobieganie		+	+		
Urządzenia me- chaniczne		+			

W szczególności istotne są odpowiedzi na pytania dotyczące: bezpośredniego lub pośredniego charakteru oddziaływania wywołanego przez rozważane zdarzenie, powtarzalności oddziaływań, ekstremalnych wartości oddziaływań (obciążeń, przemieszczeń, energii, itp.), konsekwencji zajścia rozważanych zdarzeń (uszkodzeń konstrukcji, inicjacji kolejnych niekorzystnych zdarzeń). Na podstawie formuły (2) można zestawić listę czynników i działań umożliwiających redukcję ryzyka zniszczenia konstrukcji, związanych ze standardowymi strategiami postępowania w sytuacjach wyjątkowych. Czynniki i działania uwzględniane w standardowych strategiach redukcji ryzyka zestawiono w Tabeli 1.

4. Przykład

Przedmiotem analizy jest budynek 3 klasy konsekwencji [5] o słupowo-płytkowej, monolitycznej konstrukcji żelbetowej. Sytuacja wyjątkowa konstrukcji jest spowodowana poważnym błędem wykonawstwa, oznaczonym jako zagrożenie H_1 , (np. lokalne, znaczne zaniżenie wytrzymałości betonu, defekt materiałowy, nieprawidłowo skonstruowane zbrojenie lub jego brak), który może wystąpić z prawdopodobieństwem $p(H_1) = 0,01$ i spowodować uszkodzenie lokalne w strefie przebicia płyty D_1 lub zniszczenie jednego słupa D_2 , z prawdopodobieństwem warunkowym: $p(D_1|H_1) = 0,1$ i $p(D_2|H_1) = 0,01$. Skutki lokalnych uszkodzeń w skali całej konstrukcji zdefiniowano jako zniszczenie fragmentu konstrukcji S_1 (100 m² powierzchni stropu lub 15% powierzchni kondygnacji [5]), oraz zniszczenie większych fragmentów lub całej konstrukcji S_2 , a ich warunkowe prawdopodobieństwa ich wystąpienia oszacowano jako: $p(S_1|D_1) = 0,1$; $p(S_2|D_1) = 0,01$; $p(S_1|D_2) = 0,5$; $p(S_2|D_2) = 0,05$. Konsekwencje zniszczenia fragmentu konstrukcji oszacowano na: $C(S_1) \approx 1,5 \times 10^6$, a całej konstrukcji na $C(S_2) = 50 \times 10^6$. Według wzoru (2) obliczono ryzyko:

$$R = p(H_1) \sum_{j=1}^{N_D=2} \sum_{k=1}^{N_S=2} p(D_j|H_1) p(S_k|D_j) C(S_k) = 14875$$

Akceptowalne ryzyko zniszczenia konstrukcji zaliczonej do klasy niezawodności RC3 dla okresu odniesienia 50 lat [1], z uwzględnieniem kosztów inwestycji w pełnym cyklu życia obiektu $C(S) \approx 20 \times 10^6$, wynosi:

$$R_{ac} = p_{fd} \times C(S) = 8,5 \times 10^{-6} \times 20 \times 10^6 = 170$$

Stosunek ryzyka związanego ze zniszczeniem konstrukcji w wyniku rozpatrywanej sytuacji wyjątkowej i ryzyka akceptowalnego wynosi:

$R/R_{ac} = 14875/170 = 87.5$ i znacznie przekracza poziom akceptowalny. Należy podjąć odpowiednie działania w celu jego redukcji, m.in. wymienione w Tabelicy 1, na przykład zmniejszenie prawdopodobieństwa wystąpienia błędu wykonawstwa w wyniku bardziej skuteczne procedury inspekcji do wartości albo rozważyć zmianę ukształtowania konstrukcji, np. lokalnego pogrubienia płyty stropowej wokół słupów. W rezultacie tej zmiany prawdopodobieństwo warunkowe przebicia płyty wskutek zagrożenia H_I zredukowano do wartości około $p(D_I|H_I) = 0,01$. Wartości pozostałych czynników uwzględnionych we wzorze (2) nie uległy zmianie, a koszt wykonania lokalnych pogrubień płyty pominięto jako niewielki w porównaniu z kosztem inwestycji $C(S) \approx 20 \times 10^6$.

Ryzyko zniszczenia zmodyfikowanej konstrukcji obliczone według (2) wynosi: $R = 390$, a stosunek ryzyka związanego ze jej zniszczeniem w wyniku rozpatrywanej sytuacji wyjątkowej i ryzyka akceptowalnego wynosi: $R/R_{ac} = 390/170 \cong 2,3$ i jest znacznie mniejszy niż w przypadku płyt gładkich.

5. Podsumowanie

Tradycyjne procedury kształtowania konstrukcji oparte na wiedzy, doświadczeniu i intuicji projektanta, dość często z wykorzystaniem jakościowej optymalizacji „przepływu strumieni sił” w konstrukcji, mają duże znaczenie praktyczne i dydaktyczne. Inspirują ponadto do poszukiwania ustroju i formy konstrukcji nawiązujących do koncepcji konstruktywizmu i konstruktywizmu w architekturze. Wymagania współczesnego prawa budowlanego i norm projektowania konstrukcji budowlanych mają jednak charakter kompleksowy i tradycyjne kryteria kształtowania nie pozwalają na syntetyczne uwzględnienie wielu wymagań dotyczących bezpieczeństwa, użyteczności, trwałości oraz odporności na oddziaływanie wyjątkowe i odporności poawaryjnej. W związku z tym, konstrukcje kształtowane na minimalne zużycie materiałów lub na największą wytrzymałość czy sztywność na ogół nie spełniają innych wymagań, lub spełniają je w sposób daleki od optymalnego.

Kryterium minimum ryzyka ma zalety uniwersalnego kryterium kształtowania, wymiarowania oraz oceny stanu konstrukcji. Umożliwia uwzględnienie zarówno ilościowych, jak i jakościowych wymagań stawianych współczesnym konstrukcjom. Powszechnie stosowaną miarą ryzyka jest iloczyn prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń, które mogą spowodować uszkodzenie lub zniszczenie konstrukcji oraz bezpośrednich i pośrednich konsekwencji tych zdarzeń.

Projektowanie konstrukcji jest współcześnie ukierunkowane na standardowe sytuacje obliczeniowe, które mogą wystąpić w projektowanym okresie użytkowania. Jednak statystyki przyczyn katastrof i poważnych awarii budowlanych wskazują, że są nimi zdarzenia lub sytuacje wyjątkowe, sporadycznie

występujące, bardzo często związane z działaniami lub zaniedbaniami ludzi, zarówno związanymi, jak i niezwiązanymi bezpośrednio z procesem budowlanym. Przedstawiona i uzasadniona w niniejszej pracy propozycja kształtowania konstrukcji ze względu na ryzyko zniszczenia, z uwzględnieniem standardowych i indywidualnie ustalonych scenariuszy zagrożenia i akceptowalnych konsekwencji zniszczenia, umożliwia uwzględnienie wniosków z tych obserwacji i statystyk.

Literatura

- [1] Szymczak C.: Elementy teorii projektowania. PWN, Warszawa, 1998.
- [2] Fu G., Frangopol D.M.: Balancing-weight system reliability and redundancy in multi-objective optimization framework. *Structural Safety*, 1990, 7 (2-4), pp. 165-175.
- [3] Zalewski W.: Kształtowanie konstrukcji. Wprowadzenie i przykłady. VII Symposium Kształtowanie Konstrukcji. Rzeszów, 3-4 lutego 2005. Referaty, Tom 1, s. 49-72, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2005.
- [4] Kuś S.: Ogólne zasady kształtowania konstrukcji. Rozdział 2 w pracy zbiorowej: *Budownictwo ogólne*. Tom 3, s. 11-71, Arkady, Warszawa 2008.
- [5] PN-EN 1991-1-7: 2008. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-7: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wyjątkowe. PKN, Warszawa, 2008.
- [6] Woliński Sz.: O kryteriach kształtowania konstrukcji. *Wiadomości Projektanta Budownictwa*, 2013, Nr 1 (264), s. 8-11.
- [7] PN-EN 1990: 2004. Podstawy projektowania konstrukcji. PKN, Warszawa, 2004.
- [8] Woliński Sz.: Projektowanie konstrukcji z betonu w obliczeniowych sytuacjach wyjątkowych. *ZN Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, z. 59, t.3, 2012, s.141-150.
- [9] ISO Standard 13824:2009. General principles on risk assessment of systems involving structures. ISO Geneve, 2009.
- [10] Li H., Yen C.: *Fuzzy sets and fuzzy decisions-making*. CRC Press, Boca Raton, New York 1995.
- [11] Knoll F., Vogel T.: Design for robustness. *Structural Engineering Documents*, 11, IABSE, ETH Zurich, 2009.
- [12] Woliński Sz.: Projektowanie konstrukcji wspomaganie analizą ryzyka. *Budownictwo i Architektura*, Vol. 13(2) 2014, s. 367-374.

SHAPING BUILDING STRUCTURES WITH REGARD TO RISK

Summary

The paper presents some aspects of the risk based criteria for shaping building structures. Traditional approach to shaping based on visualization of the flows of forces in structures inspires to seek a rational topology of structures and still remains of great practical and didactical significance. Shaping of structures is often identified with opti-

mization of structural system of a building. The optimization criteria, however, are defined in a different way, for example: as the qualitative, quantitative or mixed, well-defined, fuzzy or intuitive, related to the various properties of the structure, e.g. stiffness, durability, the potential energy, etc. Analysis of the causes of structural failures indicate that they are most often caused by exceptional events with a negligible probability of occurrence or combinations of that events. In contrast, the design and development of structures is traditionally focused on standard design situations that may occur in the lifetime performance. Author's suggestion that criteria for structural shaping should be taken into account to provide resistance of a structure to catastrophic events, appropriate to the hazard scenario and acceptable consequences of damages and collapse of a structure, is presented and discussed in the paper. In other words, the design of building structures should involve the consideration of risk associated with hazards as the main criterion of shaping which can be used as the synthetic optimization criterion. The risk assessment, the assignment of factors and decisive activities to reduce risk according to standard strategies, and an example to illustrate the calculation procedures are also presented.

Keywords: shaping of structures, hazards, failure risk, shaping strategies

Przesłano do redakcji: 30.05.2015

Przyjęto do druku: 1.12.2015

DOI: 10.7862/rb.2015.169