

Niezawodność konstrukcji z betonu

Jeszcze do niedawna dominowało w budownictwie deterministyczne ujęcie zagadnień bezpieczeństwa budowli. Duże wartości globalnych współczynników bezpieczeństwa, uproszczone metody obliczeń i ogólny stan wiedzy inżynierskiej przyczyniły się do powszechnej akceptacji opinii, że możliwe i zalecane jest projektowanie konstrukcji absolutnie bezpiecznych. Nie świadczy to jednak o szczególnym tradycjonalizmie inżynierów budownictwa, bowiem obowiązywał wówczas niewzruszony i, jak się wydawało, oczywisty pogląd na temat determinizmu w przyrodzie.

Systematyczne badania doświadczalne materiałów, elementów i konstrukcji budowlanych, procesów ich realizacji, napraw i utrzymania oraz statystyki awarii i katastrof doprowadziły w ostatnich 20-30 latach do radykalnej zmiany poglądów na zagadnienie bezpieczeństwa budowli. Ze względu na niepewności w projektowaniu, wykonawstwie i użytkowaniu musimy się liczyć z małym, ale skończonym prawdopodobieństwem awarii i katastrofy wszystkich obiektów budowlanych. Spostrzeżenie, że wielkości charakteryzujące obciążenia lub/i nośność, a także wymiary geometryczne konstrukcji są zmiennymi losowymi, sformułowane niezależnie przez M. Mayera (1926), S. Streleckiego (1935) i W. Wierzbickiego (1936), było podstawą rozwoju probabilistycznych metod projektowania i oceny stanu konstrukcji. Od 1949 roku, kiedy w normach projektowania konstrukcji w ZSSR wprowadzono półprobabilistyczną metodę stanów granicznych, można mówić o systematycznym rozwoju zastosowań teorii prawdopodobieństwa, statystyki matematycznej i teorii niezawodności w badaniach, projektowaniu i kontroli jakości wyrobów i konstrukcji budowlanych. Kolejne etapy praktycznych zastosowań tych metod to w największym skrócie: ustanowienie normy polskiej PN-76/B-03264, publikacja normy CEB-FIP Model Code 1978, normy ISO - IS 2394-1993 i wdrażanie programu norm europejskich (eurokodów) w latach dziewięćdziesiątych XX wieku.

Niepewności w projektowaniu i analizie konstrukcji

Niemal wszystkie wielkości, którymi posługujemy się w obliczeniach inżynierskich (z wyjątkiem stałych matematycznych i fizycznych), są – w różnym stopniu – niepewne. W analizie niezawodności konstrukcji wyróżnia się zwykle trzy rodzaje niepewności:

1. Niepewność fizyczną, związaną z naturalną zmiennością właściwości mechanicznych materiałów budowlanych, obciążeń i oddziaływań oraz wymiarów geometrycznych elementów i konstrukcji
2. Niepewność statystyczną, wynikającą z braku pełnej informacji o rzeczywistych charakterystykach podstawowych zmiennych, związaną z metodami gromadzenia, opracowania i analizy wyników obserwacji i badań doświadczalnych
3. Niepewność modelową, która jest związana z opisem obciążeń, metodami obliczania sił wewnętrznych, nośności i odkształcalności konstrukcji.

Niepewność jest zazwyczaj kojarzona z losowym charakterem zdarzeń lub zjawisk, a prawdopodobieństwo jest powszechnie uważane za jej jedyną miarę. Niezależnie od definicji prawdopodobieństwa zdarzenia losowe są zawsze ściśle, jednoznacznie zdefiniowane, a niepewne jest ich wystąpienie. Niepewność związana z przypadkowością nie jest jednak jedynym rodzajem niepewności. Dotyczy bowiem często niejednoznaczności, braku precyzji i jakościowego lub subiektywnego charakteru dostępnych informacji.

Niezawodność, bezpieczeństwo i dobra jakość konstrukcji

Najważniejsze zagadnienia związane z projektowaniem niezawodnych konstrukcji obiektów budowlanych można sprowadzić do odpowiedzi na kilka podstawowych pytań. Odpowiedzi te można sformułować w sensie

ogólnym, opisowym (a) i ścisłym, matematycznym (b).

1. Jak należy rozumieć i mierzyć niezawodność konstrukcji?

a) jako zdolność do pełnienia określonych wymagań (nośność, stateczność, użyteczność, trwałość itp.) w założonym okresie użytkowania konstrukcji

b) jako prawdopodobieństwo niezakłóconego użytkowania w czasie przewidzianym w projekcie.

2. Co oznacza „wystarczająca” lub „dostateczna” niezawodność konstrukcji?

a) dostatecznie małe prawdopodobieństwo zagrożenia życia i zdrowia ludzi

b) akceptowalne skutki ekonomiczne i społeczne zniszczenia lub wyłączenia budowli z eksploatacji.

3. Jak można uzyskać lub wymusić optymalną niezawodność konstrukcji?

a) wprowadzając odpowiednie zalecenia projektowe, wykonawcze i dotyczące kontroli jakości oparte na sprawdzonych w praktyce doświadczeniach

b) rozwijając probabilistyczne normy projektowania i kontroli jakości.

Wymagania dotyczące niezawodności konstrukcji budowlanych zawarte są w normach: międzynarodowych (International Organization for Standardization; ISO 2304, ISO 2394, ISO 9001, ISO 9002, ISO 9003, ISO), regionalnych (Comite Europeen de Normalisation, CEN; Eurokody EC 1, EC 2, ..., EC 9) i krajowych (Polski Komitet Normalizacyjny, PKN; PN-B-03264-1999 i inne). Na przykład według normy ISO 2304 (1998 r.) konstrukcja jest niezawodna jeśli: (a) nie wystąpią groźne uszkodzenia na skutek obciążeń i działań w czasie użytkowania, (b) nie wystąpią odkształcenia, zarysowania, drgania lub inne efekty szkodliwe w czasie użytkowania, (c) nie dojdzie do katastrofalnych szkód w wyniku działania żywiołów, błędów ludzi, wandalizmu itp.

Bezpieczeństwo konstrukcji, podobnie jak niezawodność, jest definiowane w sensie ogólnym, opisowym (a) i wąskim, matematycznym (b), jako:

a) brak zagrożenia związanego z utratą życia i zdrowia ludzi, strat materialnych i społecznych w okresie użytkowania obiektu

b) warunkowe prawdopodobieństwo, że konstrukcja, która spełniła odpowiednie warunki podczas odbioru, nie ulegnie zniszczeniu w przyjętym okresie użytkowania.

Według polskiego prawa budowlanego (1994 r.) wymagania bezpieczeństwa obiektów budowlanych dotyczą:

a) bezpieczeństwa konstrukcji polegającego na zapewnieniu jej stateczności i nośności, braku zagrożenia zniszczeniem lub zniszczeniem sygnalizowanym

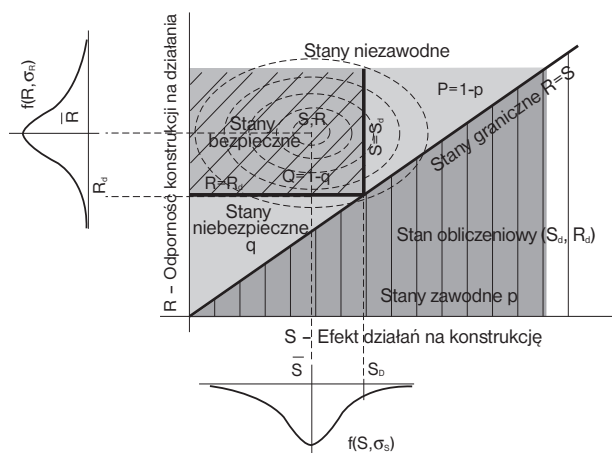
b) bezpieczeństwa pożarowego konstrukcji związanego z możliwością ewakuacji przed zniszczeniem wskutek pożaru i z ograniczeniem rozprzestrzeniania się ognia i dymu

c) bezpieczeństwa użytkowania, które jest związane z brakiem zagrożeń: upadku ludzi, części lub fragmentów konstrukcji bądź wykończenia, swobodnego przejścia itp.

W obowiązującej obecnie metodzie stanów granicznych, stany niezawodne i stany bezpieczne konstrukcji można zilustrować w sposób przedstawiony na rys. 1. Losową nośność konstrukcji oznaczono przez $R = R(X_1, X_2, \dots, X_n)$, losowy efekt obciążeń konstrukcji przez $S = S(Y_1, Y_2, \dots, Y_k)$, a warunek nośności zapisano w postaci:

$$Z = Z(X_1, \dots, X_n, Y_1, \dots, Y_k) = R - S \geq 0$$

Dobra jakość konstrukcji rozumiana jest w sensie ogólnym jako dobry stan elementów, połączeń i całej konstrukcji, a w sensie wąskim, matematycznym jako prawdopodobieństwo, że konstrukcja w chwili odbioru nie ma określonych defektów.



Rys. 1. Stany niezawodne i stany bezpieczne konstrukcji

Wymagania jakości sformułowane są w normach PN – ISO 9000, ..., 9004. Całość działań mających na celu zapewnienie dobrej jakości obiektów budowlanych określa się jako „pętlę jakości”, tzn. planowanie, zaopatrzenie, wytwarzanie, kontrola, przechowywanie wyników, marketing, sprzedaż, obsługa, likwidacja, odzysk surowców.

Przyczyny awarii i minimalna niezawodność współczesnych konstrukcji

Na podstawie wyników zachodnioeuropejskich i amerykańskich badań statystycznych nad przyczynami awarii i katastrof konstrukcji obiektów budowlanych można zauważyć, że w ostatnich 30-40 latach jedynie 5-10% zarejestrowanych awarii i katastrof wydarzyło się wskutek „naturalnych”, niezależnych od wpływu ludzi przyczyn, między innymi: żywotowych obciążeń, nieznanych lub pominiętych w normach zjawisk i efektów, zastosowania nowych technologii i materiałów itp. Za pozostałe 90-95% awarii i katastrof budowlanych odpowiedzialni są ludzie, a dokładniej: błędy, ignorancja, niedbałość, niekompetencja, roztrągnięcie, chęć zysku, nadmierny pośpiech i nieuczciwość ludzi zaangażowanych w proces inwestycyjny. Około 45% tych błędów popełniają inżynierowie w procesie projektowania, około 48% w wykonawstwie, a za pozostałe 7% odpowiedzialność ponoszą użytkownicy budowli.

Zagadnienie ustalenia minimalnej niezawodności lub dopuszczalnego prawdopodobieństwa zniszczenia budowli jest współcześnie rozpatrywane na trzy sposoby, jako:

- wyбір wartości wynikających z wcześniej obowiązujących norm projektowania, pod warunkiem że konstrukcje zaprojektowane i wykonane zgodnie z tymi normami potwierdziły w odpowiednio długim czasie użytkowania dostateczną niezawodność. Jest to powszechny współcześnie sposób postępowania
- wyбір na podstawie społecznie akceptowanego poziomu zagrożenia życia i zdrowia ludzi. Według dostępnych obecnie danych (opracowanych głównie przez towarzystwa ubezpieczeniowe) w krajach rozwiniętych gospodarczo społecznie akceptowalne ryzyko śmierci lub utraty zdrowia ludzi, na 1 milion osób w okresie 1 roku, wynosi:
 - w zależności od przyczyny zagrożenia:

- siły przyrody (żywioty): trzęsienia ziemi 0,4, wyładowania atmosferyczne 0,5, huragany 0,4
- wypadki: wypadki drogowe 300,0, upadki osób i przedmiotów 90,0, zatrucia 20,0
- obiekty budowlane: katastrofy budowlane 0,14, pożary budynków 4,0
- w zależności od miejsca pracy (przemysłu) lub zajęcia:
 - praca w przemyśle: chemicznym 85,0, stoczniowym 105,0, rolnym i rolnictwie 110,0, budowlanym 150,0, kolejnictwie 180,0, górnictwie podziemnym 210,0, rybactwie dalekomorskim 2800,0
 - uprawianie sportów ekstremalnych: alpinizmu 45,0, szymbownictwa 400,0, lotniarstwa 1500,0, spadochroniarstwa 1900,0

c) wybór wartości optymalnej ze względu na całkowity koszt inwestycji i utrzymania oraz zniszczenia budowli, na przykład takiej, że koszt zniszczenia jest równy sumie kosztów realizacji i utrzymania w całym przewidzianym okresie użytkowania budowli.

W normach międzynarodowych, regionalnych i krajowych można znaleźć zalecane wartości dopuszczalnego prawdopodobieństwa P_{fd} zniszczenia lub osiągnięcia stanów granicznych różnych klas i rodzajów konstrukcji. W tabeli 1 zestawiono wartości P_{fd} odpowiadające minimalnym wartościom wskaźnika niezawodności β przyjętym w Eurokodzie EC1: EN1990 z 2001 r.

Zmienność czynników decydujących

o nośności konstrukcji z betonu

Źródłami niepewności w obliczeniach związanych z projektowaniem i oceną nośności elementów i konstrukcji z betonu są przede wszystkim: zmienność właściwości materiałów (wytrzymałości, współczynników sprężystości itp.), procesy wytwarzania elementów i realizacji konstrukcji (wymiały geometryczne elementów i przekrojów, imperfekcje geometryczne itp.), metody obliczeń konstrukcji (uproszczenia, nieadekwatność modeli itp.). Najprostszą i powszechną miarą niepewności jest współczynnik zmienności $v = s_x/X_m$, gdzie: s_x to odchylenie standardowe, X_m – wartość oczekiwana (średnia) rozważanej zmiennej losowej X .

Zmienność wytrzymałości na ściskanie i współczynnika sprężystości betonu

Na podstawie badań statystycznych współczynnik zmienności wytrzymałości na ściskanie zwykłych betonów konstrukcyjnych wynosi $v_{fc} = 0,05-0,20 = 5\% - 20\%$.

Według normy polskiej PN-B-03264: 1999 i Eurokodu EC 2, odchylenie standardowe wytrzymałości betonów na ściskanie można przyjąć jako stałe $s_{fc} = 4,86$ MPa, niezależnie od klasy betonu. Oznacza to, że współczynnik zmienności v_{fc} zależy od klasy betonu (tzn. od jego wytrzymałości charakterystycznej f_{ck}). Na przykład dla betonu klasy B20 $\Rightarrow v_{fc} = 17,4\%$, dla B70 $\Rightarrow v_{fc} = 6,2\%$. Zmienność współczynnika sprężystości betonów jest z reguły zbliżona do zmienności wytrzymałości na ściskanie.

Losowo zmienna wytrzymałość betonu f_c jest najczęściej traktowana jako zmienna normalna **N**, niekiedy jako logarytmnormalna **LN** lub Weibulla **W**.

Tabela 1. Klasy niezawodności i dopuszczalne prawdopodobieństwa zniszczenia P_{fd} konstrukcji według Eurokodu EC1: EN1990, 2001 r.

Klasa niezawodności	Dopuszczalne prawdopodobieństwo zniszczenia P_{fd}			
	SGN	SGU	SGU	SGU
	$T_u = 1$ rok	$T_u = 50$ lat	$T_u = 1$ rok	$T_u = 50$ lat
RC 3	$5,2 \times 10^{-7}$	$8,6 \times 10^{-6}$		
RC 2	$4,7 \times 10^{-6}$	$7,2 \times 10^{-5}$	$1,87 \times 10^{-3}$	$6,8 \times 10^{-2}$
RC 1	$1,3 \times 10^{-5}$	$4,8 \times 10^{-4}$		
SGN, SGU – stany graniczne nośności, użyteczności, T_u – okres odniesienia				

Zmienność granicy plastyczności, wytrzymałości i współczynnika sprężystości stali

Współczynnik zmienności granicy plastyczności i wytrzymałości stali do zbrojenia konstrukcji żelbetowych, oszacowany na podstawie badań statystycznych, wynosi $v_s = 3-9\%$, a stali sprężającej $v_p = 1,5-4\%$. Większą zmienność wytrzymałości wykazują stale niższych klas. Współczynnik sprężystości stali charakteryzuje się, na ogół, zmiennością nieco mniejszą niż zmienność ich wytrzymałości.

Losowo zmienna granica plastyczności stali zbrojeniowej f_y i wytrzymałość stali sprężającej f_p są najczęściej uznawane za zmienne normalne **N** lub logarytmnormalne **LN**.

Zmienność wymiarów geometrycznych

W obliczeniach konstrukcji wymiary geometryczne są traktowane jako wielkości zdeterminowane (nominalne) lub jako zmienne losowe o rozkładzie normalnym **N** i współczynniku zmienności $v_a = 0,1-5\%$.

Niepełność modeli obliczeniowych nośności

Oszacowanie niepewności modeli nośności elementów i konstrukcji jest zadaniem trudnym i tylko sporadycznie bezpośrednio uwzględnianym w obliczeniach. Na ogół zakłada się, że współczynnik korekcyjny związany z adekwatnością modeli obliczeniowych jest zmienną losową normalną **N**, o wartości średniej $\eta = 1,0$ i współczynniku zmienności $v_{\eta} = 5-20\%$.

Zmienność nośności wybranych elementów żelbetowych i sprężonych

Weryfikacja doświadczalna obliczeń nośności granicznej elementów żelbetowych i sprężonych, która jest zmienną losową, wymaga doświadczalnego oszacowania co najmniej dwóch parametrów rozkładu; wartości średniej N_R i współczynnika zmienności v_R . Wiąże się to z koniecznością zgromadzenia dość dużej liczby miarodajnych wyników badań. W odniesieniu do podstawowych rodzajów elementów konstrukcyjnych o typowych gabarytach, zaprojektowanych i wykonanych zgodnie z zasadami sztuki i spełniających minimalne wymagania dobrej jakości, wartości współczynnika zmienności nośności granicznej mieszczą się w podanych poniżej przedziałach:

- żelbetowe płyty jednokierunkowo zbrojone $v_R = 14-16\%$
- żelbetowe płyty dwukierunkowo zbrojone $v_R = 12-15\%$
- zginane belki żelbetowe $v_R = 8-12\%$
- ścinane belki żelbetowe $v_R = 17-21\%$
- żelbetowe słupy krępe $v_R = 14-16\%$
- żelbetowe słupy smukłe $v_R = 12-17\%$
- sprężone, zginane elementy strunobetonowe $v_R = 6-10\%$
- sprężone, zginane elementy kablobetonowe $v_R = 9-11\%$

Metody projektowania i oceny nośności konstrukcji

Historyczne metody projektowania i wznoszenia budowli, w tym zachowanych do dziś monumentalnych świątyń, rezydencji, grobowców, mostów itp., opierały się na zasadach proporcji wynikających z geometrii, obserwacji przyrody i intuicyjnego wyczucia praw statyki, weryfikowanych metodą prób i błędów, i przekazywanych przez pokolenia reguł praktycznego postępowania. Z punktu widzenia współczesnego konstruktora można przyjąć, że miarą niezawodności konstrukcji był wówczas „geometryczny współczynnik bezpieczeństwa”, którego wartość zależała w dużym stopniu od subiektywnych decyzji budowniczego dotyczących formy i wymiarów budowli. W zależności od przyjętej miary niezawodności konstrukcji, współczesne metody projektowania i oceny nośności konstrukcji można podzielić na cztery podstawowe grupy:

a) Metody deterministyczne (poziomu 0)

Wszystkie zmienne uwzględnione w obliczeniach są traktowane jako zdeterminowane, a miarą niezawodności są globalne współczynniki bezpieczeństwa s_1 lub s_2 . W projektowaniu konstrukcji z betonu były stosowane między innymi metody:

- naprężeń liniowych NL i naprężeń dopuszczalnych ND

$$\sigma \leq \sigma_{\text{dop}} = \sigma_{cr} / s_1$$

- obciążeń krytycznych OK lub odkształceń plastycznych OP

$$P_{\text{max}} \leq P_{cr} / s_2$$

gdzie: σ, P_{max} – naprężenia lub siły wewnętrzne w konstrukcji (efekt obciążeń), σ_{cr}, P_{cr} – naprężenia lub siły powodujące uplastycznienie materiału lub zniszczenie konstrukcji.

b) Metody półprobabilistyczne (poziomu 1)

Wszystkie zmienne losowe uwzględnione w obliczeniach są w pełni opisane za pomocą dwóch parametrów; wartości średniej i odchylenia standardowego (tzn. są potraktowane, uznane za normalne zmienne losowe). Miarą niezawodności są częściowe współczynniki bezpieczeństwa, $\gamma_m, \gamma_p, \gamma_n$ itd., związane z właściwościami materiałów, obciążeniami, dokładnością modeli obliczeniowych itd. Podstawową metodą poziomu 1 jest powszechnie dziś stosowana półprobabilistyczna metoda stanów granicznych SG (rys. 1).

c) Uproszczone metody probabilistyczne (poziomu 2)

Najbardziej znaną metodą poziomu 2 jest metoda wskaźnika niezawodności β , zalecana w Eurokodzie EC 1 jako metoda kalibrowania częściowych współczynników bezpieczeństwa stosowanych w metodach poziomu 1. Miarą niezawodności w tej metodzie jest wskaźnik niezawodności $\beta = Z_m / \sigma_z = 1/v_z$ (odwrotność współczynnika zmienności zapasu bezpieczeństwa $Z = R - S$) lub prawdopodobieństwo zniszczenia konstrukcji $P_r = \Phi(-\beta)$.

d) Metody probabilistyczne (poziomu 3)

Metody probabilistyczne, w których miarą niezawodności jest prawdopodobieństwo zniszczenia konstrukcji (lub osiągnięcia stanów granicznych) P_r , a wszystkie zmienne losowe uwzględnione w obliczeniach mają oryginalne, znane rozkłady prawdopodobieństwa. Metody probabilistyczne są dotychczas stosowane sporadycznie, do kalibrowania norm projektowania niższych poziomów, projektowania i obliczania niezawodności konstrukcji oraz do rozwiązywania zadań optymalizacji niezawodności. Wynika to głównie z braku niezbędnych danych statystycznych i trudności obliczeniowych.

Podsumowanie

Współczesna teoria niezawodności konstrukcji jest z powodzeniem stosowana do rozwiązywania wielu praktycznych zagadnień związanych z projektowaniem i oceną stanu konstrukcji, w tym również konstrukcji z betonu. Do ważniejszych zastosowań można zaliczyć między innymi:

- Projektowanie konstrukcji o założonej niezawodności z uwzględnieniem trwałości, kosztów realizacji i utrzymania w założonym okresie użytkowania budowli
- Ocenę niezawodności i okresu bezpiecznej eksploatacji istniejących konstrukcji
- Planowanie i optymalizację działań związanych z utrzymaniem konstrukcji (między innymi: inspekcji, konserwacji, bieżących napraw i remontów konstrukcji, itp.)
- Oceny i optymalizację zabezpieczeń przeciwpożarowych obiektów budowlanych
- Oceny zagrożeń związanych z uszkodzeniami i ewentualnym zniszczeniem konstrukcji.

prof. Szczepan Woliński
Politechnika Rzeszowska

Literatura

1. Murzewski J.; *Niezawodność konstrukcji inżynierskich*, Arkady, Warszawa 1989
2. Nowak A., Collins K.; *Reliability of Structures*. McGraw-Hill Int. Edition, 2000
3. Thoft-Christiansen P., Baker J. M.; *Structural Reliability Theory and its Applications*. Springer-Verlag, Berlin 1982
4. Matousek M.; *Outcomings of a Survey on 800 Construction Failures*. IABSE Colloquium on Inspection and Quality Control. Cambridge, England July 1977
5. Woliński Sz., Wróbel K.; *Niezawodność konstrukcji budowlanych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Skrypt PPZ, Rzeszów 2001.