

BADANIA I STUDIA – RESEARCH AND STUDIES

Lesław Brunarski*

Jan Pawlikowski**

OCENA BEZPIECZEŃSTWA ISTNIEJĄCYCH KONSTRUKCJI

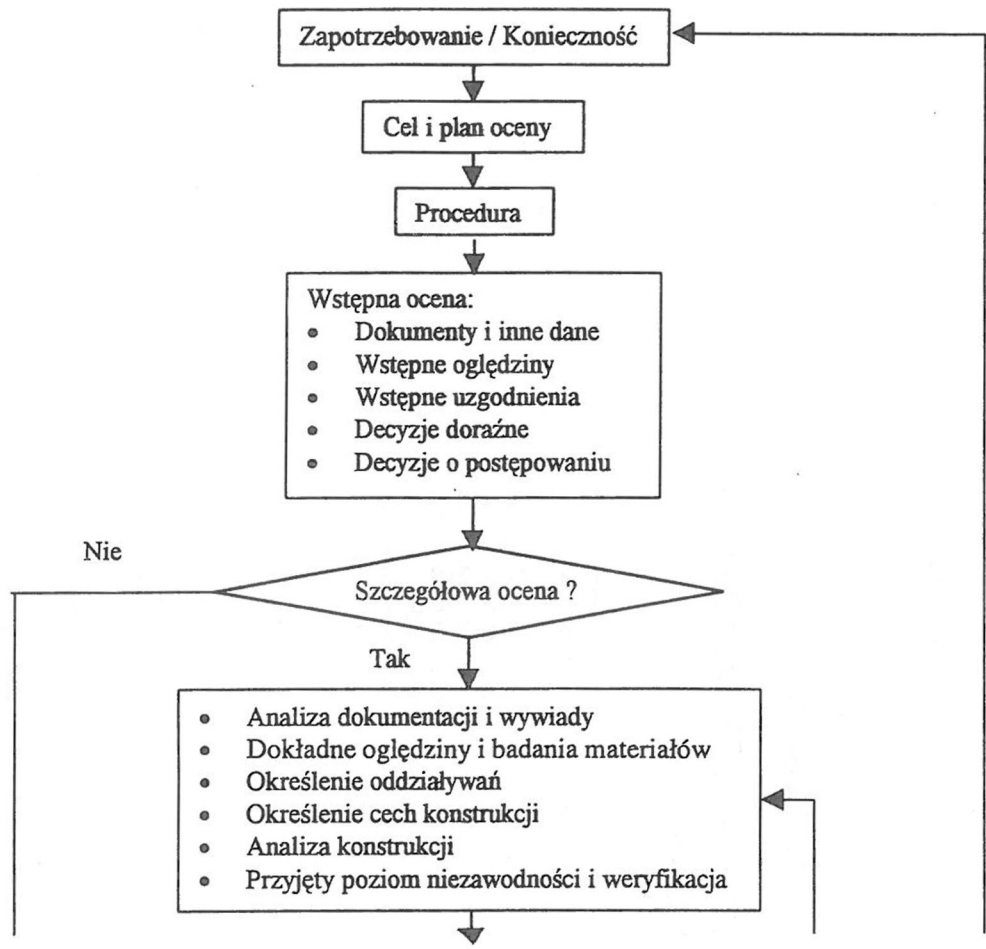
W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia dotyczące oszacowania bezpieczeństwa istniejących konstrukcji budowlanych z uwzględnieniem wyników oceny ich stanu technicznego. Po omówieniu wymagań i procedur oceny stanu technicznego istniejących obiektów, przyjętych w opracowywanym projekcie normy ISO/CD 13822 *Assessment of Existing Structures* (rys. 1), przeprowadzono analizę metod weryfikacji stanów granicznych istniejących konstrukcji metodami zalecanymi w tym dokumencie – zarówno tradycyjną (normową) częściowych współczynników bezpieczeństwa, jak również na podstawie analiz probabilistycznych. Możliwy efekt zastosowania obu metod zilustrowano przykładem oceny nośności płyty żelbetowej przeprowadzonej z uwzględnieniem wyników badań diagnostycznych betonu. Artykuł stanowi zmienioną i rozszerzoną wersję referatu przedstawionego na VI konferencji „Problemy rzeczoznawstwa budowlanego. Warsztat pracy”, Kielce 2000.

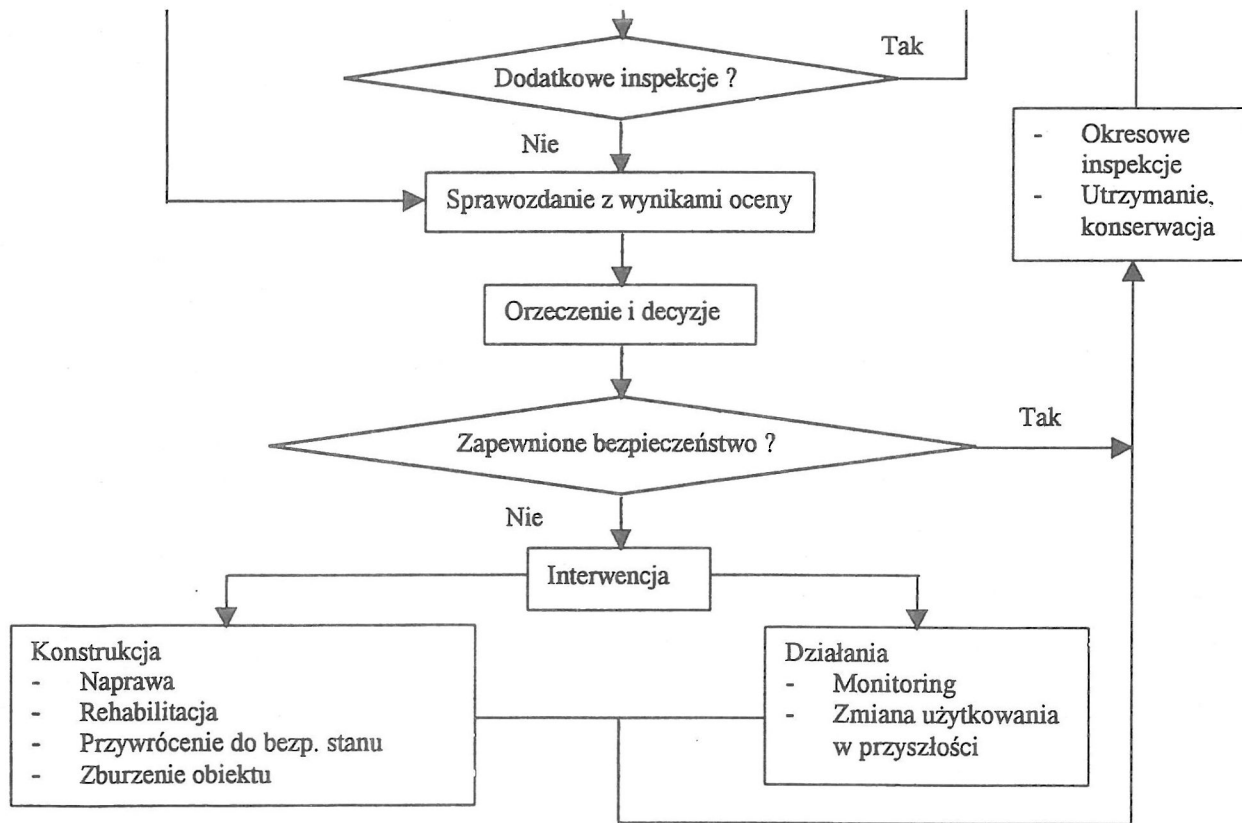
1. Wprowadzenie

Oszacowanie bezpieczeństwa istniejącej konstrukcji budowlanej jest jednym z podstawowych zadań rzeczoznawcy budowlanego. Warunkiem zapewnienia bezpieczeństwa jest nieprzekroczenie granicznych stanów nośności i użyteczności w każdym elemencie i w całej konstrukcji. Analiza stanów granicznych użyteczności nie zawsze jest konieczna – z uwagi na zwykle mniejsze konsekwencje ich przekroczenia oraz ze względu na możliwość wizualnej oceny skutków odkształceń lub zarysowania się istniejącej konstrukcji. Z tego względu w artykule ograniczono się do analizy pierwszego stanu granicznego.

* prof. dr inż.

** dr hab. inż. – prof. ITB





Rys. 1. Schemat oceny istniejących konstrukcji według ISO/CD 13822 Assessment of Existing Structures

Dotychczas brak jeszcze międzynarodowych lub polskich norm dotyczących procedur oceny bezpieczeństwa istniejących konstrukcji. Rozbieżności wynikające z różnej interpretacji ustaleń odnoszących się do konstrukcji nowo projektowanych zostały obszernie omówione przez autorów w pracy [1]. Komitet Techniczny ISO TC98/SC2/WG6 kontynuuje od lat prace nad projektem nowej normy dotyczącej oceny istniejących konstrukcji budowlanych i inżynierskich (dokument ISO/CD 13822 *Assessment of Existing Structures*). Prace te są w fazie końcowej, z tego też względu uznano za uzasadnione zarówno przedstawienie przyjętych w projekcie tej normy ogólnych procedur oceny istniejących konstrukcji, jak również poddanie analizie szczegółowych metod weryfikacji stanów granicznych nośności takich konstrukcji.

Wymagania i procedury oceny istniejących konstrukcji przyjęte w opracowywanej normie, wynikające z aktualnego stanu wiedzy na temat niezawodności konstrukcji i analizy jej zagrożenia, są w zasadzie zgodne z zaleceniami dotyczącej niezawodności normy ISO 2394 *General Principles on Reliability Structures*. Z uwagi na szczególne uwarunkowania ekonomiczne i społeczne związane z utrzymaniem obiektów budowlanych uwzględniają jednak ich specyfikę, dopuszczając na przykład zróżnicowanie przyjmowanych poziomów niezawodności.

Procedury oceny istniejących konstrukcji budowlanych lub inżynierskich przyjęte w dokumencie ISO/CD 13822 *Assessment of Existing Structures* obejmują działania przedstawione na rysunku 1 (wersja z roku 2000) i mają zastosowanie w przypadkach oceny bezpieczeństwa konstrukcji podejmowanej w związku z:

- przewidywaną modernizacją i zmianą warunków użytkowania lub stwierdzonym upływem terminu trwałości (okresu przydatności użytkowej) budowli,
- naprawą konstrukcji, podejmowaną wskutek destrukcji wywołanej starzeniem się materiałów konstrukcyjnych lub szkodliwym działaniem środowiska zewnętrznego,
- badaniami konstrukcji uszkodzonej przez działania wyjątkowe – w celu podjęcia decyzji w sprawie jej wyburzenia lub przywrócenia do stanu bezpiecznego,
- uzasadnionym życzeniem właściciela, użytkownika lub towarzystwa ubezpieczeniowego.

Zasady przyjęte w dokumencie ISO/CD 13822 mają zastosowanie do oceny bezpieczeństwa istniejących konstrukcji, obliczanych i projektowanych zgodnie z normami obowiązującymi w okresie ich realizacji, wykonanych z dowolnych materiałów konstrukcyjnych. Mogą być wykorzystywane przy ocenie budynków tradycyjnych, wykonanych według reguł sztuki budowlanej, bez wykorzystania norm. Zasady te nie dotyczą obiektów posadowionych na terenach eksploatacji górniczej oraz nie obejmują sprawdzania bezpieczeństwa pożarowego. Ponadto norma ta ma stanowić podstawę do przygotowania norm krajowych, zgodnych z warunkami technicznymi i ekonomicznymi poszczególnych krajów.

Stosowanie niektórych działań podanych w wykresie (rys. 1) nie zawsze jest konieczne. Dotyczy to na przykład elementów lub części konstrukcji nie podlegających zmianie warunków użytkowania, jeżeli zostanie stwierdzone ich zadowalające zachowanie się w przeszłości.

2. Ogólne procedury oceny według ISO/CD 13822

2.1. Podstawa formalna działania

Podstawą formalną działania jest umowa, w której powinny być jednoznacznie zdefiniowane cel oceny i jej plan (zakres i harmonogram działań) oraz ewentualne dodatkowe życzenia (wymagania) użytkownika obiektu. W uzgodnionych przypadkach podpisanie umowy może nastąpić po wstępnych oględzinach obiektu.

2.2. Wstępna ocena konstrukcji

W fazie wstępnej oceny konstrukcji należy przede wszystkim ustalić dane dotyczące ocenianej istniejącej konstrukcji, a więc co najmniej: nazwę, lokalizację, plan sytuacyjny i skalę obiektu, rodzaj (system) konstrukcji, rok budowy, istnienie lub brak dokumentacji projektowej, historię napraw itp.

Podczas wstępnych oględzin *in situ* może być dokonywana ogólna ocena stanu technicznego obiektu, pozwalająca na podjęcie wstępnych decyzji w sprawie dalszego postępowania.

W zależności od wyniku wstępnej oceny (inspekcji) można podjąć decyzję, że inspekcja jest wystarczająca do opracowania sprawozdania z wynikami oceny i wydania orzeczenia, albo że zachodzi potrzeba dodatkowej szczegółowej oceny. W wyjątkowych sytuacjach zagrożenia, na przykład awarią budowlaną, efektem inspekcji może być decyzja o konieczności natychmiastowego zastosowania środków zabezpieczających, w skrajnych wypadkach – ewakuacji z obiektu, a nawet jego zburzenia. Wymaga się, aby inżynier przeprowadzający inspekcję miał dostateczną wiedzę w zakresie budownictwa oraz umiejętność samodzielnej oceny warunków pracy oraz stanu danej konstrukcji i zgodnie z tym podejmował odpowiedzialne decyzje. Użytkownik musi być zobowiązany do uwzględnienia przekazanych mu decyzji.

2.3. Szczegółowa ocena konstrukcji

Podczas szczegółowej oceny konstrukcji pierwszą czynnością powinno być zebranie i analiza:

- dokumentacji obiektu (obliczeń statycznych, rysunków i opisów technicznych, dzienników budowy, danych eksploatacyjnych itp.) udostępnionej przez użytkownika lub uzyskanej drogą poszukiwań w archiwach miejscowych lub z innych źródeł,
- wymagań i przepisów budowlanych z okresu budowy obiektu,
- aktualnych informacji o topografii terenu, podłożu gruntowym, na którym posadowiony jest obiekt, poziomie wód gruntowych itp.

Szczególną uwagę należy zwracać na kompletność i wiarygodność zgromadzonych danych, możliwość ich późniejszych modyfikacji, a także na ogólną ich spójność.

Przedmiotem dokładnych oględzin i badań mogą być wymiary geometryczne oraz właściwości materiałów konstrukcyjnych i podłoża.

W diagnostyce geometrii istniejących konstrukcji należy rozróżnić sprawdzenie wymiarów, kształtów i usytuowania elementów oraz wyznaczenie głównych osi i geometrii

całego obiektu. Technika samych pomiarów nie może być ujednoczona z uwagi na konieczność dostosowywania się do konkretnych indywidualnych warunków obiektu. Wynikiem pomiarów powinna być zawsze wartość zmierzona oraz błąd pomiaru.

Diagnostyka materiałów konstrukcyjnych (cechy, lokalizacja) zależy od ich rodzaju. Obejmuje ona stopień destrukcji oraz aktualne właściwości (wytrzymałość, gęstość, wilgotność itd.), określone na podstawie badań próbek pobranych z konstrukcji oraz badań nieniszczących *in situ*. Przy pobieraniu próbek z konstrukcji należy unikać miejsc, które mogą wpłynąć na nośność konstrukcji, a miejsca pobrania powinny być niezwłocznie naprawione. Diagnozowane charakterystyki materiałowe są zmiennymi losowymi, stąd ich estymatory powinny być określane za pomocą metod analizy statystycznej.

Diagnostyka podłoża powinna być prowadzona zgodnie z przedmiotowymi normami i instrukcjami.

Określenie oddziaływań na konstrukcję powinno być dokonane na podstawie norm, z uwzględnieniem planu i warunków dalszego użytkowania obiektu.

Cechy konstrukcji można określać na podstawie próbnych badań lub analizy statyczno-wytrzymałościowej. W analizie należy uwzględnić wszelkie zauważone uszkodzenia konstrukcji oraz ich możliwy rozwój w czasie dalszego użytkowania.

Weryfikacja niezawodności istniejącej konstrukcji powinna być przeprowadzona na podstawie aktualnych norm lub metod probabilistycznych (patrz p.3).

W projekcie normy ISO/CD 13822 podane są trzy sposoby postępowania przy ocenie bezpieczeństwa istniejących konstrukcji:

1. Ocena na podstawie zadowolającego zachowania się w przeszłości. Konstrukcje zaprojektowane i wykonane według wcześniejszych norm lub zgodnie z regułami sztuki budowlanej, bez stosowania norm, mogą być bez analizy stanów granicznych uznane za konstrukcje spełniające wymagania bezpieczeństwa przy oddziaływaniach objętych zakresem instrukcji, jeżeli:

- dokładna inspekcja *in situ* nie wykryje zniszczeń lub istotnych uszkodzeń,
- system konstrukcyjny jest uważnie przejrzany, a stateczność ogólna obiektu i szczegóły połączeń elementów – sprawdzone,
- konstrukcja nie budziła zastrzeżeń przez długi okres użytkowania, np. przez 25 lat,
- w okresie użytkowania nie nastąpiły zmiany, które mogłyby znacznie zwiększyć obciążenia konstrukcji lub wpłynąć na jej trwałość,
- nie są zamierzone zmiany warunków i czasu użytkowania budynku.

Ocena bezpieczeństwa nie jest konieczna w przypadku części istniejącej konstrukcji, która jest określona jako niewrażliwa na oddziaływania wynikające ze zmiany użytkowania lub modernizacji.

Zadowolające zachowanie się konstrukcji i podłoża w przeszłości odgrywa decydującą rolę w ocenie stanu granicznego użytkowności.

2. Ocena na podstawie badań diagnostycznych i weryfikacji obliczeniowej. Przedmiotem oceny bezpieczeństwa istniejących konstrukcji są przede wszystkim stany graniczne nośności [1], [2]. Analiza stanów granicznych użytkowności nie zawsze jest konieczna z uwagi na możliwość wizualnej oceny skutków odkształceń lub zarysowań konstrukcji.

Jeżeli stan graniczny jest weryfikowany na podstawie badań diagnostycznych konstrukcji, stopień wiedzy o konstrukcji może być uwzględniony poprzez zwiększenie lub obniżenie nośności obliczeniowej. Podstawowe kryteria oceny prawdopodobieństwa niewystąpienia stanów granicznych mogą więc stanowić:

- postanowienia zawarte w aktualnych normach,
- ustalenia wprowadzone na podstawie analiz probabilistycznych.

W przypadku pierwszym stany graniczne nośności należy sprawdzać przyjmując wymiary geometryczne, charakterystyczne wartości wytrzymałości materiałów i obciążeń stałych oraz częściowe współczynniki bezpieczeństwa materiałowe na podstawie badań diagnostycznych. Muszą być uwzględnione aktualne warunki geotechniczne. Wartości pozostałych charakterystyk obliczeniowych należy przyjmować zgodnie z aktualnymi normami. Poprzednie normy, ważne w okresie wykonania istniejącej konstrukcji, powinny być traktowane jako ważne dokumenty informacyjne.

W przypadku drugim stany graniczne nośności należy sprawdzać przyjmując wskaźniki bezpieczeństwa β lub prawdopodobieństwa zniszczenia p . Jako dane wejściowe do analizy należy przyjąć parametry rozkładów prawdopodobieństw wybranych charakterystyk obliczeniowych, oszacowanych w wyniku badań diagnostycznych, oraz pozostałych, przyjętych na podstawie aktualnego stanu wiedzy.

Podejście normowe jest z reguły konserwatywne i może prowadzić do nieekonomicznej oceny stanu istniejącej konstrukcji.

Podejście probabilistyczne, wymagające wprowadzenia większego nakładu pracy i specjalistycznego przygotowania, powinno być stosowane w przypadkach, kiedy wyniki uzyskane według postanowień normowych wskazują na potrzebę kosztownego wzmocnienia lub wyłączenia obiektu z eksploatacji.

Szczegółowa metodyka oceny stanów granicznych za pomocą obu metod według ISO 2394 została podana w p. 3.

Warto przypomnieć, że zgodnie z polskimi przepisami wynikającymi z Prawa budowlanego dopuszcza się przy przebudowie, modernizacji i zmianie sposobu użytkowania istniejących budynków możliwość pewnych odstępstw od wymagań, czyli na przykład korygowania częściowych współczynników bezpieczeństwa materiałowych oraz obciążeń, współczynników jednoczesności obciążeń, wskaźników bezpieczeństwa lub uwzględniania wpływu statycznej niewyznaczalności niektórych ustrojów na nośność istniejących konstrukcji, uzasadnionego aktualnym udokumentowanym stanem wiedzy.

W przypadku stwierdzenia lokalnych destrukcji istniejącej konstrukcji powinien być zidentyfikowany mechanizm i chronologia powstawania tych zniszczeń w przeszłości, a ocena bezpieczeństwa powinna być przeprowadzona przy zastosowaniu modelu obliczeniowego z uwzględnieniem założonego czasu użytkowania.

3. Ocena na podstawie obciążeń próbných. Jeśli metody obliczeniowe oceny bezpieczeństwa (niezawodności) uznaje się za niewystarczające – z uwagi na niejasne przyczyny złego zachowania się konstrukcji, a trudno określić wymiary elementów i właściwości materiałów konstrukcyjnych, można przeprowadzić obciążenia próbne dotyczące stanu granicznego nośności lub użytkowalności.

Według ISO 2394 na podstawie próbnych obciążeń można formułować wnioski dotyczące nie tylko obciążanego elementu, ale również innych elementów i obciążeń oraz zachowania się konstrukcji. Obciążenia próbne pozwalają scharakteryzować zachowanie się konstrukcji, ale nie dają podstaw do oceny elementu pod obciążeniem długotrwałym, stąd analiza obliczeniowa jest zawsze wymagana.

Przed podjęciem decyzji o obciążeniu próbnym istniejącej konstrukcji, dla której brak dokumentacji projektowej, należy oszacować jej nośność. Obciążenia próbne powinny być prowadzone w sposób zabezpieczający konstrukcję przed niekontrolowanym zniszczeniem. Jeżeli część badanej konstrukcji wykazuje w czasie próby widoczne oznaki zniszczenia, powinna być uznana za zniszczoną i ponowne jej badania nie są dozwolone.

Z uwagi na niepowtarzalność przypadków sposób przeprowadzenia obciążenia próbnego powinien być ustalany indywidualnie.

Sprawozdanie z wynikami oceny powinno zawierać pełną dokumentację stanu istniejącej konstrukcji, w tym szczegółowe dane o konstrukcji, opisy badań, metody i wyniki weryfikacji. Do sprawozdania należy dołączyć wszelkie notatki uzgadniające, zdjęcia, rysunki itp.

2.4. Podejmowanie decyzji o istniejącej konstrukcji

Decyzje są podejmowane na podstawie przeprowadzonych badań diagnostycznych i weryfikacji stanu granicznej nośności konstrukcji.

Jeżeli bezpieczeństwo dalszego użytkowania konstrukcji jest zapewnione, ewentualne decyzje mogą dotyczyć zaleceń okresowych inspekcji oraz warunków utrzymania i konserwacji. W przeciwnym przypadku możliwe są decyzje o różnego rodzaju interwencjach dotyczących konstrukcji (naprawie, rehabilitacji, przywróceniu do stanu bezpiecznego, zburzeniu) lub warunków jej użytkowania (monitoringu, zmianie użytkowania w przyszłości).

Decyzja o zburzeniu obiektu, który został oceniony jako nie spełniający wymagań bezpieczeństwa (niezawodności) konstrukcji, jest zawsze rozwiązaniem ostatecznym z punktu widzenia zachowania walorów lokalnego środowiska i dlatego w omawianej normie ISO zaleceniem generalnym jest przywrócenie obiektu do stanu pierwotnego lub mówiąc ogólniej – bezpiecznego. Projekt „przywracania” – w zależności od oceny stanu konstrukcji – może obejmować niezbędne naprawy konstrukcji albo jej wzmocnienie, jeżeli to konieczne z powodu zwiększenia obciążeń na konstrukcję i fundamenty, zmiany w środowisku lub wydłużenie okresu użytkowania.

3. Analiza zalecanych w ISO/CD 13822 metod weryfikacji stanów granicznych istniejących konstrukcji

3.1. Zasady ogólne

Weryfikacja stanów granicznych ma wykazać akceptowalny poziom niezawodności (bezpieczeństwa) istniejącej konstrukcji [3], [4], [5]. W przypadku stanów granicznych nośności sprawdza się różnicę losowej nośności R i siły wewnętrznej S :

$$R - S \geq 0 \quad (1)$$

lub zgodnie z konwencją normową różnicę obliczeniową nośności i siły wewnętrznej

$$R_d - S_d \geq 0 \quad (2)$$

przy czym wartości mogą być określane według metod probabilistycznych lub normowych.

Miarą niezawodności jest prawdopodobieństwo zniszczenia

$$p(z \geq 0) \quad (3)$$

lub wskaźnik bezpieczeństwa

$$\beta = \frac{\bar{z}}{\sigma_z} \quad (4)$$

przy czym \bar{z} , σ_z są odpowiednio wartością średnią i odchyleniem standardowym rozkładu funkcji $Z = R - S$ zmiennych losowych X_i (określających R i S).

Należy zwrócić uwagę, że prawdopodobieństwo $p(z \geq 0)$ wyrażone za pomocą wskaźnika bezpieczeństwa β według wzoru (2) może być dokładnie oszacowane pod warunkiem, że zmienne losowe X_i mają rozkłady normalne, a funkcja Z jest liniowa. W innych przypadkach oszacowanie p wymaga zastosowania ściślejszych metod probabilistycznych (wielowymiarowego całkowania, metod symulacyjnych).

Na podstawie aktualnego stanu wiedzy przyjmuje się następujące oszacowania prawdopodobieństwa zniszczenia p istniejących konstrukcji:

- przy ocenie konstrukcji projektowanych według norm – wartości $p = 5,2 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-8}$ [5],
- w analizach porównawczych z prawdopodobieństwami innych zdarzeń o charakterze katastroficznym – wartości $p = 10^{-5} - 10^{-7}$ [6],
- przy ocenie na podstawie przesłanek ekonomicznych – średnio wartość $p = 3,6 \cdot 10^{-5}$ [5], [6]

z ewentualnym dalszym różnicowaniem odpowiednio do kosztu obiektu i konsekwencji jego zniszczenia.

W przypadku stanów granicznych użyteczności konsekwencje ich przekroczenia są mniejsze, w związku z czym można przyjmować wyższe prawdopodobieństwo ich wystąpienia (na poziomie 0,05).

Według zaleceń Eurokodu EC-1 wartości prawdopodobieństw p odniesione do 1 roku użytkowania wynoszą 10^{-6} w przypadku stanów granicznych nośności (czemu odpowiada wskaźnik $\beta = 4,7$) oraz około $6 \cdot 10^{-2}$ (wskaźnik $\beta = 1,5$) w przypadku stanów granicznych użyteczności nieodwracalnych.

W dokumencie ISO/CD 13822 są podane wartości wskaźników bezpieczeństwa β przy założeniu okresu odniesienia równego 10 lat w stanach granicznych nośności, odpowiednio w przypadkach bardzo niskich, niskich, przeciętnych i dużych konsekwencji zniszczenia równe 2,3; 3,1; 3,8; 4,3 oraz w stanach granicznych użyteczności – w granicach od 0 do 1,5. Podobne wartości podane są również w EC-1.

W omawianym dokumencie ISO, podobnie jak w normie ISO 2394, niezawodność (bezpieczeństwo) istniejących konstrukcji może być określana po ustaleniu danych

dotyczących właściwości materiałów i elementów konstrukcji oraz modeli obliczeniowych przy wykorzystaniu metod:

- częściowych współczynników bezpieczeństwa (I stopnia),
- probabilistycznej (II lub III stopnia), analitycznej lub symulacyjnej.

W obu przypadkach wymagana jest znajomość parametrów rozkładu podstawowych zmiennych losowych w celu oszacowania wartości charakterystycznych i częściowych współczynników bezpieczeństwa lub danych wejściowych do analizy probabilistycznej funkcji stanu granicznego. Poglądy na temat typów rozkładów zmiennych losowych zalecanych do analiz probabilistycznych nie są jednolite. Uważa się, że mogą to być rozkłady normalne wytrzymałości materiałów, wymiarów geometrycznych i obciążeń stałych oraz ekstremalne Gumbela I typu w przypadku obciążeń zmiennych. Podkreśla się przydatność trójparametrowych rozkładów niesymetrycznych, np. Pearsońska III typu i 3-parametrowego logarytmowo-normalnego, uwzględniających skośność rozkładu zmiennych losowych.

Poniżej przedstawiono obie wspomniane metody oszacowania nośności obliczeniowej istniejących konstrukcji. W praktyce najbardziej znana, a więc i najczęściej stosowana jest metoda częściowych współczynników bezpieczeństwa. Metody probabilistyczne [5], [7], [8] dotychczas wykorzystywane były głównie do kalibracji wartości częściowych współczynników oraz projektowania konstrukcji o specjalnym przeznaczeniu. Dokładne metody probabilistyczne są dość skomplikowane, w związku z czym w normach ISO 2394 i Eurokodzie 1 podano przybliżoną metodę wartości obliczeniowych. W przyszłości zarówno w przypadkach projektowania wspomaganego badaniami, jak również przy ocenie stanu granicznego nośności istniejących konstrukcji rola metod probabilistycznych będzie wzrastała.

3.2. Metoda częściowych współczynników bezpieczeństwa

Obliczeniowe nośności R_d i siły wewnętrzne S_d według ISO 2394 w większości przypadków można wyrazić za pomocą funkcji

$$R_d = R(f_d, a_d, \theta_d \dots) \quad (5)$$

$$S_d = S(F_d, \psi_o, a_d, \theta_d \dots)$$

w których:

$F_d = \gamma_f F_k$ – wartość obliczeniowa oddziaływania,

$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m}$ – wartość obliczeniowa wytrzymałości materiału,

F_k, f_k – wartości charakterystyczne oddziaływania i wytrzymałości materiału,

γ_f, γ_m – współczynniki bezpieczeństwa w odniesieniu do oddziaływań i wytrzymałości materiałów,

$a_d = a_{nom} + \Delta a$ – wartość nominalnego wymiaru geometrycznego powiększonego o jego tolerancję (np. wyrażoną w postaci niezamierzonego mimośrod),

ψ_o – współczynnik kombinacji obciążeń,

θ_d – współczynnik niedokładności modelu obliczeniowego.

Współczynnik niedokładności modelu może być uwzględniany w postaci częściowych współczynników bezpieczeństwa niezależnych γ_R, γ_S lub współczynników γ_F, γ_M odnoszących się do zmiennych losowych X_i , przy czym $\gamma_M > \gamma_m > \gamma_F > \gamma_f$.

Wzory (5) są zalecane w normach polskich, z tym że siłę wewnętrzną S_d oblicza się z dodatkowym współczynnikiem γ_n , uwzględniającym konsekwencje zniszczenia.

Przy weryfikacji istniejących konstrukcji wielkości występujące w (5) powinny być ustalane na podstawie badań diagnostycznych. Dodatkowo (zdaniem autorów artykułu) można by uwzględnić współczynnik $\gamma_{stn} \geq 1$, wyrażający zróżnicowanie poziomów niezawodności konstrukcji statycznie niewyznaczalnych i wyznaczalnych.

W przypadku stosowania wzorów normowych zawierających ukryte zapasy bezpieczeństwa z uwagi na niepewność obliczeń, współczynnik θ_d jest pomijany i wzory (5) mają postać:

$$R_d = \gamma_{stn} R \left(\frac{f_k}{\gamma_m}, a_{nom} \pm \Delta a \right) \quad (6)$$

$$S_d = \gamma_n S \left(\gamma_f F_k, \Sigma_o, a_{nom} \pm \Delta a \right)$$

W przypadku stosowania wzorów bez ukrytych zapasów bezpieczeństwa z uwagi na niepewność obliczeń, należy we wzorach (6) zamiast γ_m, γ_f przyjąć współczynniki γ_M, γ_F , albo zastosować zależności

$$R_d = \frac{\gamma_{stn}}{\gamma_R} R \left(\frac{f_k}{\gamma_m}, a_{nom} \pm \Delta a \right) \quad (7)$$

$$S_d = \frac{\gamma_n}{\gamma_S} \left(\gamma_f F_k, \Psi_o, a_{nom} \pm \Delta a \right)$$

Wartości sił wewnętrznych z uwzględnieniem współczynników kombinacji obciążeń są obliczane z zależności

$$S_d = c_G \gamma_G G_k + c_{Q1} \gamma_{Q1} Q_{k1} + c_{Q2} \gamma_{Q2} Q_{k2} + \dots \quad (8)$$

w której wielkości c są współczynnikami wpływu transformującymi obciążenia w siły wewnętrzne, wielkości zaś G_k, Q_{k1}, Q_{k2} oznaczają odpowiednio charakterystyczne obciążenia stałe oraz zmienne dominujące i nie dominujące.

3.3. Przybliżona metoda probabilistyczna

Przy założeniu ogólnej postaci funkcji stanu granicznego

$$g(X_1, X_2, X_3 \dots X_n) \geq 0 \quad (9)$$

warunek obliczeniowy niewystąpienia tego stanu granicznego można przedstawić za pomocą nierówności

$$g(X_{id}) \geq 0 \quad (10)$$

gdzie: X_i – zmienne losowe wyrażające właściwości materiałów i obciążeń, niedokładności modelu obliczeniowego itd.,

- x_{id} – wartości obliczeniowe zmiennych losowych X_i , zależne od:
- postaci funkcji rozkładów zmiennych losowych,
 - wartości parametrów tych rozkładów,
 - wartości wskaźnika bezpieczeństwa β przypisanego „docelowemu” prawdopodobieństwu zniszczenia,
 - współczynnika wrażliwości α_i , wyrażającego ilościowy wpływ poszczególnych zmiennych losowych na łączny zapas bezpieczeństwa.

Przy założeniu, że zmienne losowe X_i mają rozkłady normalne ze współczynnikiem zmienności V_i , wartości obliczeniowe x_{id} określa wzór

$$x_{id} = \bar{x}_{id} (1 - \alpha_i \beta V_i) \quad (11)$$

Przy założeniu, że wytrzymałość charakterystyczna x_{ik} jest kwantylem rzędu 0,05, wartość częściowego współczynnika bezpieczeństwa można określić za pomocą wzoru

$$\gamma_m = \frac{1 - 1,64 V_i}{1 - \alpha_i \beta V_i} \quad (12)$$

Określenie wartości współczynników wrażliwości α_i wymaga zastosowania procedur iteracyjnych [6]. W normach ISO 2394 i EC-1, przy najczęściej występujących w praktyce wartościach stosunków odchyień standardowych efektów oddziaływań do odchyień standardowych nośności σ_S / σ_R w przedziale od 0,16 do 6,6, są zalecane następujące wartości współczynników α_i w przypadku:

- dominującej zmiennej losowej określającej nośność + 0,80,
- nie dominującej zmiennej losowej określającej nośność + 0,32,
- dominującej zmiennej losowej określającej obciążenie – 0,70,
- nie dominującej zmiennej losowej określającej obciążenie – 0,28.

Wzór (12) był stosowany do kalibracji częściowych współczynników materiałowych betonu i stali przyjętych w polskiej normie projektowania konstrukcji żelbetonowych PN-84/B-03264, przy założeniu iloczynu współczynników $\alpha_i \beta = 3,09$ oraz współczynników zmienności V_i wytrzymałości betonu 0,135 i stali 0,08. Obliczone w ten sposób wartości częściowych współczynników $\gamma_S = 1,15$ i $\gamma_C = 1,3$ są podstawiane do normowych wzorów obliczeniowych na nośność przekroju bez uwzględnienia częściowego współczynnika bezpieczeństwa z uwagi na niedokładność wzorów (modeli) obliczeniowych.

Ograniczając się do dominujących wartości zmiennych losowych, odpowiednie wartości obliczeniowe nośności i sił wewnętrznych można określać ze wzorów:

$$R_d = R_m (1 - \alpha_R \beta V_R) \quad (13)$$

$$S_d = S_m (1 - \alpha_S \beta V_S)$$

gdzie $\alpha_S = -0,7$, $\alpha_R = 0,8$.

Zależności (13) interpretuje się jako podział łącznego zapasu bezpieczeństwa na dwie części składowe wyrażone równaniami

$$\begin{aligned} p(R \leq R_d) &= \text{const} \\ p(S > S_d) &= \text{const} \end{aligned} \quad (14)$$

Parametry rozkładów zmiennych losowych R , S są ustalane na podstawie analiz probabilistycznych. Wysoce przydatna jest metoda momentów [4], [9], [10], szczególnie w przypadku funkcji liniowych S i niesymetrycznych rozkładów obciążeń. Pozwala ona na przykład na obliczenie sił wewnętrznych z pominięciem współczynników kombinacji (jednoczesności) obciążeń, przy założeniu $p(S \geq S_d) = \text{const}$.

3.4. Przykład oceny nośności obliczeniowej istniejącej płyty żelbetowej jednokierunkowo zbrojonej, zamocowanej na przeciwległych krawędziach

Dane projektowe:

- grubość płyty $h = 0,16$ m,
- wysokość użyteczna przekroju $d = 0,135$ m,
- rozpiętość płyty $l = 6,0$ m,
- klasa betonu B20 (wytrzymałość obliczeniowa $f_{cd} = 11,5$ MPa),
- stal A-III (wytrzymałość charakterystyczna $f_{yk} = 420$ MPa, obliczeniowa $f_{yd} = 360$ MPa),
- stopień zbrojenia $\rho = 0,0031$,
- obciążenie obliczeniowe $q_d = 8,6$ kN/m²,
- określony graniczny moment zginający M , czyli obliczeniowa siła wewnętrzna o wartości

$$M = S_d = \frac{q_d l^2}{16} = 19,35 \text{ kNm}$$

Dane na podstawie badań diagnostycznych betonu:

- średnia wytrzymałość kostkowa betonu $f_{15m} = 12$ MPa,
- współczynnik zmienności wytrzymałości $V_c = 0,10$.

Weryfikacja nośności płyty według metody częściowych współczynników bezpieczeństwa (metoda PN z aktualizacją wartości obliczeniowej wytrzymałości betonu na podstawie wyników badań diagnostycznych):

- wytrzymałość obliczeniowa betonu $f_{cd} = 5,5$ MPa,
- zgodnie ze wzorami normowymi

$$\alpha = \rho \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = 0,203; \quad R_d = \alpha (1 - 0,5 \alpha) b d^2 f_{cd} = 18,3 \text{ kNm}$$

a więc nośność płyty jest mniejsza od siły wewnętrznej $S_d = 19,35$ kNm.

Weryfikując na podstawie metody normowej należałoby więc uznać, że nośność płyty nie jest wystarczająca.

Weryfikacja nośności płyty według przybliżonej metody probabilistycznej z ograniczeniem się do uwzględnienia rozkładu zmiennej losowej nośności płyty według wzoru (13):

- charakterystyki rozkładu wytrzymałości betonu:

$$f_{cm} = f_{15m} (0,76 - 0,001 f_{15m}) = 9 \text{ MPa}; V_c = 0,10$$

- charakterystyki rozkładu wytrzymałości stali:

$$f_{ym} = \frac{f_{yk}}{1 - 1,64 V_y} = 483 \text{ MPa}; V_y = 0,08$$

- w przypadku analizowanej płyty współczynnikowi

$$\alpha_m = \rho \frac{f_{ym}}{f_{cm}} = 0,166$$

na podstawie zależności określonych w pracy [4] odpowiadają wielkości:

$$\bar{M} = 27,85 \text{ kNm}; V_M = 0,06$$

- w przykładzie założono przeciętne konsekwencje zniszczenia – stąd przyjęto $\beta = 4,2$
- nośność płyty, obliczona ze wzoru (13), wynosi

$$R_d = 27,85 (1 - 0,8 \cdot 4,2 \cdot 0,06) = 22,2 \text{ kNm}$$

czyli jest większa od siły wewnętrznej $S_d = 19,35 \text{ kNm}$.

Weryfikując na podstawie metody probabilistycznej można więc uznać, że nośność płyty jest wystarczająca.

4. Podsumowanie

W pierwszej części artykułu omówiono procedury oceny istniejących konstrukcji przyjęte w opracowywanym projekcie normy ISO/CD 13822 *Assessment of Existing Structures* (wersja z 2000 r.). Wprowadzie dokument nie jest jeszcze zatwierdzony, ale procedury mogą być użyteczne w praktyce eksperckiej, uzupełniając między innymi Instrukcję ITB 361/99 [11].

Jako istotne w tej procedurze można uznać rozróżnianie znaczenia wyników inspekcji wstępnej *in situ* od wyników szczegółowych badań diagnostycznych obiektu podlegającego ocenie. Dotyczy to szczególnie oszacowań cech wytrzymałościowych materiałów konstrukcyjnych.

Ważne jest też przyjęcie w ISO/CD 13822 zasady, że podstawą oceny istniejącej konstrukcji jest weryfikacja stanu granicznego nośności, mająca wykazać akceptowalny według obowiązujących norm poziom jej bezpieczeństwa (niezawodności). Poprzednie

normy z okresu wykonania istniejącej konstrukcji mogą być jednak traktowane jak istotne dokumenty dodatkowe. Jest to stwierdzenie szczególnie przydatne wobec przepisu zawartego w obowiązujących przepisach polskich wynikających z Prawa budowlanego. Przepisy te dopuszczają – przy przebudowie, modernizacji i zmianie sposobu użytkowania istniejących budynków – możliwość pewnych odstępstw od wymagań, m.in. normowych, w ekspertyzach (ocenach) wykonywanych przez właściwe jednostki badawczo-rozwojowe albo rzeczoznawców budowlanych.

Warte odnotowania są też kwestie dotyczące uwzględniania zadowalającego zachowania się konstrukcji w przeszłości i wyników obciążeń próbnych, a także priorytetowej generalnej zasady przywracania obiektu do stanu pierwotnego i traktowania decyzji o jego zburzeniu jako rozwiązania ostatecznego z punktu widzenia nienaruszania walorów lokalnego środowiska.

W części drugiej artykułu przeprowadzono analizę porównawczą zalecanych w dokumencie ISO/CD 13822 sposobów weryfikacji akceptowalnego poziomu bezpieczeństwa (niezawodności) istniejących konstrukcji według zasad metody częściowych współczynników bezpieczeństwa albo na podstawie analiz probabilistycznych.

W przypadku pierwszym stany graniczne nośności takich konstrukcji sprawdza się przyjmując wymiary geometryczne, charakterystyczne wartości wytrzymałości materiałów i obciążeń stałych oraz częściowe współczynniki bezpieczeństwa materiałowe ustalone na podstawie wyników badań diagnostycznych. Wartości pozostałych charakterystyk obliczeniowych należy przyjmować zgodnie z aktualnymi normami.

W przypadku drugim stany graniczne należy sprawdzać przyjmując określony wskaźnik bezpieczeństwa β lub prawdopodobieństwo zniszczenia p . Jako dane wejściowe do analizy należy przyjąć parametry rozkładów prawdopodobieństw zmiennych losowych wybranych charakterystyk oszacowanych w wyniku badań diagnostycznych oraz pozostałych, przyjętych na podstawie aktualnego stanu wiedzy.

Podejście pierwsze (tradycyjne – normowe) jest z reguły konserwatywne i może prowadzić do nieekonomicznej oceny stanu istniejącej konstrukcji. Podejście probabilistyczne, wymagające wprowadzenia większego nakładu pracy i wiedzy specjalistycznej [2], może być więc użyteczne w przypadkach, kiedy wyniki oceny uzyskane w sposób tradycyjny wskazują na potrzebę kosztownego wzmocnienia lub wyłączenia obiektu z eksploatacji. Poglądowo efekt zastosowania podejścia probabilistycznego, pozwalającego na uściślenie założeń obliczeniowych, ilustruje zamieszczony przykład analizy nośności elementu żelbetowego poddanego czystemu zginaniu. Zachęcające wnioski wynikające z tego przykładu nie mogą być jeszcze uogólnione w przypadku innych elementów, na przykład jednocześnie ściskanych i zginanych, bez odpowiednich analiz probabilistycznych. Analizy tego rodzaju są przedmiotem wielu prac, między innymi drugiego z autorów.

Na zakończenie należy podkreślić, że w artykule ograniczono się do omówienia podstawowych zaleceń przyjętych w dokumencie ISO/CD 13822, które już w chwili obecnej mogą być wykorzystane w praktyce. Pominięto natomiast zalecenia wymagające jeszcze – zdaniem autorów – dalszej podbudowy naukowej i weryfikacji obliczeniowej. Dotyczy to między innymi metod analiz niezawodności (bezpieczeństwa) konstrukcji z uwzględnieniem wpływu czasu oraz sposobów oszacowywania danych wejściowych.

Literatura

- [1] Brunarski L., Pawlikowski J.: Ocena istniejących konstrukcji wg ISO. Materiały III Konferencji WPRB, Kielce 1997
- [2] Brunarski L., Pawlikowski J.: Ocena nośności obliczeniowej istniejących konstrukcji z betonu. Zeszyt specjalny PW z okazji jubileuszu prof. W. Stachurskiego. Warszawa 1996
- [3] Murzewski J.: Niezawodność konstrukcji inżynierskich. Arkady, Warszawa 1989
- [4] Pawlikowski J.: Analiza probabilistyczna zapasu bezpieczeństwa żelbetowych elementów zginanych. KILiW PAN, Studia z zakresu inżynierii nr 25, PWN, Warszawa 1987
- [5] Tichy M., Vorliček M.: Statistical Theory of Concrete Structures. Acad. Prague Publishing House, 1972
- [6] Rationalization of Safety and Serviceability Factors in Structural Codes. CIRIA Report 63, 1976
- [7] Östlund L.: An Estimation of γ Values. Application of Probabilistic Method. CEB Bulletin d'Information 202, July 1991
- [8] Vrounwenvelde T.: Codes of Practice for the Assessment of Existing Structures. Report IABSE Colloquium Copenhagen 1993
- [9] Pawlikowski J.: Analysis of Standard Safety Margins in Case of One-Component Permanent and Variable Actions Effect. Inter. Conf. on Design and Assessment of Building Structures, Praga 1996
- [10] Pawlikowski J.: Estimation of Probabilities of Failure of Light-Weight Roof Structures Subjected to Snow Loads. Intern. Conf. Lightweight Structures in CE, Warsaw 1995
- [11] Runkiewicz L., Kowalewski J.: Instrukcja ITB 361/99 Zasady oceny bezpieczeństwa konstrukcji żelbetowych. ITB, Warszawa 1999

ASSESSMENT OF SAFETY OF EXISTING BUILDING STRUCTURES

Summary

This paper deals with the procedures and methods for assessment of safety of existing structures adopted in ISO/CD 13822 Assessment of Existing Structures. Attention is paid to the possibility of more exact estimation of input data from diagnostic test than in case of newly design structures. Two methods for verification of ultimate states are presented standard partial coefficients method and approximate probabilistic one. An example of verification of safety of existing reinforced concrete slabs under bending is given.

Praca wpłynęła do Redakcji 22 VIII 2000