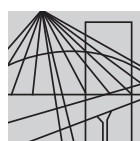


Patroni honorowi działu:



GŁÓWNY
URZĄD
NADZORU
BUDOWLANEGO



P O L S K A
I Z B A
I N Ż Y N I E R Ó W
B U D O W N I C T W A

Kontrola zarysowania elementów żelbetowych w świetle wymagań Eurokodu 2

Cracking control in design of RC members according to Eurocode 2

Kontrola szerokości rozwarcia rys w elementach żelbetowych ma na celu sprawdzenie zabezpieczenia zbrojenia przed oddziaływaniem środowiska oraz zapewnienie estetycznego wyglądu elementu. Zadaniem konstruktora jest wykazanie, że dla wskazanej w normie kombinacji oddziaływań, szerokość rys nie będzie przekraczała wartości uznanych za dopuszczalne.

Eurokod 2, podobnie jak wcześniejsze normy, koncentruje się na dwóch podstawowych aspektach związanych z zarysowaniem:

- zabezpieczeniu elementów przed nadmiernym zarysowaniem na skutek odkształceń wymuszonych (np. skurczu);
- zdefiniowaniu zasad kontroli szerokości rozwarcia rys wynikających z oddziaływań bezpośrednich.

Pierwsze z wymienionych zagadnień sprowadza się do sformułowania zasad wyznaczania zbrojenia minimalnego (punkt 7.3.2. normy [1]). Obliczanie rozwarcia rys wynikających z wpływów termiczno-skurczowych nie zostało ujęte w zaleceniach normowych. Podstawowym powodem jest złożoność zjawiska, a nadmierne uproszczenie jego opisu mogłoby skutkować rezultatami wyraźnie odbiegającymi od rzeczywistych. Pewne wytyczne w tym zakresie można znaleźć w innych normach poświęconych konkretnym typom konstrukcji, np. zbiornikom żelbetowym [3].

Omówione w Eurokodzie 2 metody kontroli szerokości rozwarcia rys dedykowane są głównie sprawdzaniu rys prostych do osi elementu wynikających z działania momentu zginającego i siły osiowej. W odróżnieniu od wcześniejszych norm, w Eurokodzie 2 projektant nie znajdzie zasad obliczania szerokości rozwarcia rys ukośnych wynikających z działania sił poprzecznych

i momentów skręcających. Można jednak uznać (punkt 7.3.3. (5) [1]), że spełnienie wymagań konstrukcyjnych zbrojenia na ścinanie lub skręcanie jest warunkiem wystarczającym zwalniającym projektanta z obowiązku kontroli rozwarcia tych rys. W tym przypadku wątpliwości budzi niezbyt fortunne określenie *oddziaływania styczne* (ang. *tangential action*) użyte w odniesieniu do określenia ścinania i skręcania. W złożonych stanach naprężenia dopuszcza się stosowanie metod opisanych w punkcie 7.3. normy [1] do kontroli rozwarcia rys w elementach rozciąganych typu T, będących składowymi modeli ST.

Dopuszczalna szerokość rozwarcia rys

Eurokod 2 wskazuje trzy podstawowe czynniki, które powinny skłaniać projektanta do ograniczenia szerokości rozwarcia rys w elementach. Są nimi: ogólnikowo rozumiane funkcjonowanie elementu, trwałość oraz akceptowalny wygląd. Gdy żaden z wymienionych czynników nie występuje, istnieje zezwolenie na zarysowanie bez podejmowania jakichkolwiek kroków mających na celu kontrolę szerokości rys.

Eurokod 2 [1] definiuje dopuszczalną szerokość rozwarcia rys dla wybranych klas ekspozycji. W odróżnieniu od PN-B-03264:2002 [2], norma [1] nie zamieszcza klasyfikacji środowisk (klas ekspozycji). Znajduje się ona w PN-EN 206-1 [4], a jej pominięcie w [1] wynika ze zintegrowania norm [1] i [4] w obrębie systemu norm PN-EN. W typowych sytuacjach wymagana jest obliczeniowa kontrola zarysowania dla sił wewnętrznych z prawie stałej kombinacji oddziaływań, będącej pewnym odpowiednikiem znanej z wcześniejszych norm kombinacji obciążeń dłu-

gotrwałych. W tabeli zestawiono graniczne szerokości rozwarcia rys w_{max} dla tych kombinacji, wymagane w przypadku elementów żelbetowych. Należy pamiętać, że wartości w_{max} są bardziej rygorystyczne w przypadku elementów sprężonych oraz w sytuacjach szczególnych, gdy np. wymagane jest uzyskanie wodoszczelności. Warto zauważyć, że w przypadku niektórych klas ekspozycji (X0, XC1 oraz wszystkich związanych z korozją chlorkową – klasy XD i XS) nastąpiła liberalizacja wymagań. Równocześnie, Eurokod 2 odstąpił od definiowania w_{max} dla klas związanych z zamarzaniem (XF) i agresją chemiczną (XA), pozostawiając to trudne rozstrzygnięcie do decyzji projektanta.

Tabela 1. Porównanie granicznych szerokości rozwarcia rys w elementach żelbetowych wg Eurokodu 2 oraz PN-B-03264:2002

Klasa ekspozycji	w_{max} [mm]	
	PN-EN 1992-1-1 [1]	PN-B-03264:2002 [2]
X0, XC1	0,4	0,3
XC2, XC3, XC4	0,3	0,3
XD1 – XD4, XS1 – XS3	0,3	0,2
XF1, XF3	–	0,3
XF2, XF4	–	0,2
XA1, XA2, XA3	–	0,2

Zbrojenie minimalne

Ogólna idea stanowiąca podstawę wyznaczania zbrojenia minimalnego nie uległa zmianie w stosunku do dotychczasowej normy. W obszarach, w których spodziewane jest wystąpienie naprężeń rozciągających, musi zostać zastosowane zbrojenie o przekroju nie mniejszym niż:

$$A_{s,min} = \frac{k_c k_f k_{ct,eff} A_{ct}}{\sigma_s} \quad (1)$$

Warunek (1) musi być spełniony w każdym obszarze, w którym mogą wystąpić rozciągania. Szczególną uwagę należy zwrócić na miejsca, gdzie ich źródłem są odkształcenia wymuszone. Genealogia wzoru jest prosta i wynika z równości sił: w strefie rozciąganej betonu w chwili bezpośrednio poprzedzającej zarysowanie oraz w zbrojeniu minimalnym po zarysowaniu. Znaczenie poszczególnych symboli jest takie samo, jak było w dotychczasowej normie [2]. **Eurokod 2 wprowadził drobne zmiany do sposobu wyznaczania współczynnika k oraz uściślił zasady określania wartości współczynnika k_c odwzorowującego rozkład naprężeń w betonie w momencie poprzedzającym zarysowanie.** Norma [2] ograniczała się do podania wartości tego współczynnika dla rozciągania osiowego ($k_c = 1,0$) oraz zginania bez udziału siły podłużnej ($k_c = 0,4$). Eurokod 2 uogólnił zasady jego przyjęcia na przypadki mimośrodowego ściskania i rozciągania. W typowych sytuacjach zbrojenie minimalne oblicza się, podstawiając pod $f_{ct,eff}$ średnią wytrzymałość betonu na rozciąganie f_{ctm} , natomiast pod naprężenia w stali σ_s charakterystyczną granicę plastyczności stali f_{yk} . Zbrojenie minimalne obliczone wg tych założeń ma zapobiegać gwałtownemu, kruchemu zniszczeniu w momencie zarysowania. Tak obliczone zbrojenie w strefie rozciąganej w chwili powstania rysy ma za zadanie zastąpić niszczący się beton strefy rozciąganej. Jeżeli jednak wymagane jest równocześnie ograniczenie szerokości rozwarcia rys, we wzorze (1) należy przyjąć wartość naprężeń w stali σ_s niższą niż f_{yk} . W tym celu można posłużyć się tablicami 7.2N lub 7.3N [1], gdzie w zależności od średnicy prętów (dla belek) lub ich rozstawu (dla płyt) oraz wartości w_{max} można odczytać właściwą wartość σ_s . Oczywiście skutkiem ograniczenia naprężeń do wartości mniejszych niż f_{yk} jest większy przekrój zbrojenia minimalnego i jego uzależnienie od średnicy prętów (im większa średnica, tym większe $A_{s,min}$).

Eurokod 2 podnosi kwestię stosowania zbrojenia minimalnego w przekrojach o złożonych kształtach, wymagając obliczania i sytuowania tego zbrojenia niezależnie w każdej części takiej od przekroju (średniku, półkach).

Metody kontroli szerokości rozwarcia rys

Podobnie jak dotychczasowe normy Eurokod 2 proponuje dwie metody kontroli szerokości rozwarcia rys: pośrednią

lub bezpośrednią. Pierwsza z metod omówiona jest w podpunkcie 7.3.3. *Sprawdzanie zarysowania bez obliczania szerokości rys*, a druga w 7.3.4. *Obliczanie szerokości rys*. W rzeczywistości, metoda pośrednia jest uproszczoną formą odpowiednio skalibrowanej metody bezpośredniej. Stabelaryzowanie wyników w metodzie pośredniej jest efektem obliczeń przeprowadzonych metodą bezpośrednią przy przyjęciu przeciętnych wartości szeregu wielkości niezbędnych do wykonania pełnych obliczeń.

Metoda pośrednia. Stosowanie metody pośredniej zależy od rodzaju kontrolowanego elementu. W płytach żelbetowych sprowadza się do porównania rozstawu prętów z rozstawem uznanym za maksymalny, który odczytuje się z tablicy 7.2N [1] w zależności od naprężeń w stali zbrojeniowej i maksymalnej szerokości rozwarcia rys w_{max} . Taka forma kontroli szerokości rozwarcia rys nie występowała w dotychczasowych normach polskich. W przypadku belek wykorzystanie metody pośredniej sprowadza się do porównania średnicy zastosowanych prętów ze średnicą maksymalną ϕ_s gwarantującą spełnienie warunku zarysowania. Chociaż samo podejście jest znane z poprzednich edycji norm, to warto zwrócić uwagę na wprowadzone modyfikacje. Dotychczas [2] ten sposób podejścia dopuszczony był jedynie, gdy dopuszczalne rozwarcie rys wynosiło $w_{max} = 0,3$ mm. Eurokod 2 [1] rozszerza zakres stosowania tej metody na sytuacje, gdy w_{max} jest równe 0,2 lub 0,4 mm.

Zasadniczą ideą metody pośredniej była możliwość szybkiej oceny spełnienia warunku zarysowania. Niestety, w Eurokodzie 2 [1], przez dążenie do zwiększenia precyzji, utracony został główny walor tej metody, a mianowicie jej prostota. Zgodnie z PN-B-03264:2002 [2], załącznik D, zastosowanie metody pośredniej wymagało wykonania trzech prostych kroków:

- oszacowania wartości naprężeń w zbrojeniu σ_s z prostego wzoru (2), w którym ramię działania sił wewnętrznych $z = \zeta d$ dla elementów zginanych określone było w sposób przybliżony (w zależności od stopnia zbrojenia),

$$\sigma_s = \frac{M_{Ed}}{\zeta d A_{s1}} \quad (2)$$

- odczytania z tablicy maksymalnej średnicy prętów (przyporządkowanej do wartości naprężeń σ_s i wartości w_{max}),

- porównania zastosowanej średnicy ze średnicą maksymalną.

Eurokodowska wersja metody pośredniej wymaga więcej wysiłku. Norma [1] nie podaje uproszczonej zależności do wyznaczania naprężeń σ_s w zbrojeniu oraz nie wskazuje, czy te naprężenia mają być określone z uwzględnieniem zjawiska usztywnienia przy rozciąganiu, czy też sposób kalibracji metody wymaga pominięcia tego korzystnego wpływu. Postępując w sposób zachowawczy, należy przyjąć, że naprężenie σ_s należy wyznaczać ze wzoru (2) wynikającego z warunków równowagi sił w przekroju w pełni zarysowanym. Brak wskazówek w kwestii uproszczonego przyjęcia ramienia sił wewnętrznych wymaga wyznaczenia wartości ζd w sposób dokładny:

$$\zeta d = d - x_{II}/3 \quad (3)$$

gdzie:

x_{II} – wysokość strefy ściskanej w przekroju przez rysę określona dla liniowo-sprężystego zachowania materiałów z uwzględnieniem (dla prawie stałej kombinacji oddziaływań) redukcji modułu sprężystości betonu wynikającej z wpływu pełzania.

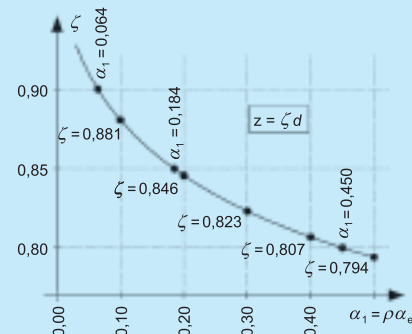
Konieczność obliczania wysokości x_{II} wydłuża procedurę przybliżonego sprawdzania zarysowania. W przypadku pojedynczo zbrojonych prostokątnych przekrojów zginanych można sugerować zastosowanie ścisłej (z punktu widzenia założeń metody) zależności:

$$\zeta d = d - \frac{x_{II}}{3} = d \left(1 + \frac{\alpha_1 - \sqrt{\alpha_1^2 + 2\alpha_1}}{3} \right) \quad (4)$$

odczytanie jej z wykresu (rysunek 1) lub bezpieczne przyjęcie wartości (wynikającej ze wzoru 4):

$$\begin{aligned} \zeta d &= 0,90d \text{ dla } \alpha_1 \leq 0,06, \\ \zeta d &= 0,85d \text{ dla } 0,06 < \alpha_1 \leq 0,18, \\ \zeta d &= 0,80d \text{ dla } 0,18 < \alpha_1 \leq 0,45, \end{aligned}$$

gdzie: $\alpha_1 = \rho \cdot \alpha_e$.



Rys. 1. Zależność $\zeta(\alpha_1)$

Kolejnym utrudnieniem jest sposób wyznaczania maksymalnej średnicy prętów ϕ_s . Średnicę tę określa się dwuetapowo. Najpierw, dla obliczonych ze wzoru (2) naprężeń σ_s i granicznej szerokości rozwarcia rys w_{max} odczytuje się z tablicy średnic

cę ϕ_s , a następnie przelicza się jej wartość, dostosowując ją do rzeczywistych cech elementu. Taki sposób postępowania wynika z faktu, że odczytywana z tablicy wartość ϕ_s została skalibrowana dla pewnych, z góry założonych wielkości, takich jak: wytrzymałość betonu na rozciąganie, otulina zbrojenia itd. (wykaz założeń jest podany pod tablicą 7.2.N [1]). Gdy rzeczywiste cechy elementu (klasa betonu i położenie zbrojenia) oraz stan naprężenia (wysokość strefy rozciąganej h_{cr}) są inne niż te przyjęte do określenia wartości ϕ_s , wymagane jest przeliczenie średnicy maksymalnej do wartości ϕ_s . Odbywa się ono za pomocą jednego z dwóch wzorów:

$$\varphi_s = \varphi'_s \cdot \frac{f_{ct,eff}}{2,9} \cdot \frac{k_c h_{cr}}{2(h-d)} \quad (5a)$$

$$\varphi_s = \varphi'_s \cdot \frac{f_{ct,eff}}{2,9} \cdot \frac{h_{cr}}{8(h-d)} \quad (5b)$$

Wybór zależności (5a) lub (5b) wynika ze stanu naprężenia panującego w przekroju, jednak użyte w normie [1] sformułowania dotyczące zakresu ich stosowania są nieprecyzyjne. Wzór (5a) jest tam opatrzony komentarzem *przy zginaniu (co najmniej część przekroju ściskana)*. Trudno wyobrazić sobie przekrój zginany, w którym nie występuje strefa ściskana, stąd też sformułowanie objęte nawiasami należy uznać za podstawowe i przyjąć, że wzór dotyczy wszystkich przekrojów, w których pewna jego część podlega ściskaniu. Podobnie nieprecyzyjne określenie, *równomierne rozciąganie osiowe* zastosowano do wskazania zakresu stosowania wzoru (5b). Jak wykazano w monografii [5], wzory (5a) i (5b) dotyczą sytuacji, gdy przynajmniej część przekroju jest ściskana (wzór 5a) i sytuacji, gdy strefa ściskana nie występuje (wzór 5b). Dodatkowo zastosowanie wzorów (5) należy uznać za uzasadnione, gdy zbrojenie rozciągane położone jest stosunkowo blisko krawędzi przekroju – nie dalej niż w odległości $0,1h$ w sytuacji opisanej wzorem (5a) i $0,2h$ w sytuacji objętej wzorem (5b).

Jak widać, stosowanie metody pośredniej nie jest już tak wygodne jak dotąd. Wyznaczone w ten sposób średnice maksymalne prętów, stanowiące kryterium spełnienia warunku zarysowania, są w rzeczywistości wynikiem zastosowania metody bezpośredniej z kilkoma założeniami upraszczającymi. W efekcie, metoda ta staje się konserwatywna, a brak możliwości spełnienia warunku $\phi \leq \phi_s$ wcale nie dyskwalifikuje przyjętego przekroju, jedynie wskazuje na konieczność weryfikacji metodą bezpośred-

nią. Zwiększony wydatnie nakład pracy przy stosowaniu metody pośredniej (w porównaniu z [2]) w połączeniu z gorszą jakością rezultatu (w porównaniu z metodą bezpośrednią) sprawia, że przydatność tej metody staje się wątpliwa. Moim zdaniem, biorąc pod uwagę dostępność narzędzi do automatyzacji obliczeń, warto korzystać przede wszystkim z metody bezpośredniej.

Metoda bezpośrednia. Polega ona na wyznaczeniu rozwarcia miarodajnej rysy w_k i bezpośrednim porównaniu jej z wartością dopuszczalną w_{max} . Eurokod 2 [1] sugeruje kontrolę warunku dla prawie stałej kombinacji oddziaływań. Wymaganie to sformułowane jest jednak w sposób niejednoznaczny i stąd warto zacytować je w oryginalnym brzmieniu: *Jeżeli nie stawia się szczególnych wymagań (np. wodoszczelności), to można przyjąć, że ograniczenie obliczeniowych szerokości rozwarcia rys do wartości w_{max} podanych w tablicy 7.1N jest na ogół wymaganiem dostatecznym ze względu na wygląd i trwałość elementów żelbetowych w budynkach przy prawie stałej kombinacji obciążeń*. Używając określeń takich jak *można* i *na ogół*, Eurokod 2 [1] przerzuca część odpowiedzialności na projektanta.

Do obliczenia szerokości rozwarcia rysy Eurokod 2 [1] proponuje zależność:

$$w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \leq w_{max} \quad (6a)$$

gdzie:

$s_{r,max}$ – maksymalny rozstaw rys, a $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$ jest różnicą średnich odkształceń stali i betonu na odcinku pomiędzy rysami.

W normie PN-B-03264:2002 [2], analogiczny wzór miał postać:

$$w_k = \beta s_{rm} \varepsilon_{sm} \leq w_{max} \quad (6b)$$

gdzie:

s_{rm} – średni, końcowy rozstaw rys;
 ε_{sm} – średnie odkształcenie zbrojenia;
 β – współczynnik wyrażający stosunek obliczeniowej szerokości rysy do szerokości średniej.

Idea obliczania szerokości rozwarcia rysy jest taka sama w obydwu normach.

Uznaje się, że szerokość rysy jest iloczynem odpowiednich odkształceń i odległości pomiędzy sąsiednimi rysami. Ze względu na losowy charakter, zarówno odległości między rysami, jak i rozwarcie nie są jednakowe.

We wzorze (6b) zróżnicowanie rozwarcia odwzorowywał współczynnik β , będący stosunkiem rozwarcia rys miarodajnych (największych) do średnich. Średnia szerokość rys obliczana była na podstawie średniej odległości pomiędzy nimi s_{rm} .

Za różne rozwarcie rys odpowiada ich nierównomierny rozstaw. W Eurokodzie taki

sposób rozumowania wyraża wzór (6a), w którym zamiast średniego rozstawu s_{rm} brany jest pod uwagę rozstaw maksymalny $s_{r,max}$.

$$s_{r,max} = \beta s_{rm} = 3,4c + 0,425k_1 k_2 \frac{\varphi}{\rho_r} \quad (7a)$$

$$s_{rm} = 2 \cdot 25 \text{ mm} + 0,25k_1 k_2 \frac{\varphi}{\rho_r} \quad (7b)$$

Wzory (7a) i (7b) są tylko z pozoru różne. Łączy je prosta relacja $s_{r,max} = \beta s_{rm}$, w której wartość $\beta = 1,7$ została uwzględniona w sposób niejawni. Współczynniki liczbowe 2 i 0,25 we wzorze (7b) zostały we wzorze (7a) zastąpione przez: $1,7 \cdot 2 = 3,4$ i $1,7 \cdot 0,25 = 0,425$.

Nowością w normie [1] jest uwzględnienie wpływu grubości otuliny c na odległość pomiędzy rysami. Wzór (7b) z dotychczasowej normy [2] bazował na założeniu, że $c = 25 \text{ mm}$. Dodatkowo, ogranicza się możliwość stosowania wzoru (7a) do sytuacji, w których pręty w przekroju rozmieszczone są nie rzadziej niż co $5(c + 0,5\phi)$.

Gdy odległość ta jest przekroczona, należy spodziewać się mniejszej liczby rys o większym rozstawie i w konsekwencji większej ich rozwartości. Wartość $s_{r,max}$ należy wtedy przyjmować jako 130% wysokości strefy rozciąganej przekroju:

$$s_{r,max} = 1,3(h - x) \quad (8)$$

Wzór (8) opisuje zależność pomiędzy rozstawem rys i wysokością strefy rozciąganej w elementach o rzadko rozstawionych prętach. Wnioskiem wypływającym z tej relacji jest fakt, że w elementach o małej wysokości przekroju i w związku z tym o małej wysokości strefy rozciąganej, rysy będą liczne, a ich rozwarcie niewielkie. Ta obserwacja leży u podstaw zalecenia, które dopuszcza pomijanie kontroli rozwarcia rys w zginanych płytach żelbetowych o grubości do 200 mm. Warunkiem zastosowania tej reguły jest brak znaczących sił rozciągających i spełnienie wymagań konstrukcyjnych stawianych płytom.

Obliczenie rozwarcia rysy (wzory 6) wymaga wyznaczenia różnicy średnich odkształceń zbrojenia ε_{sm} i betonu strefy rozciąganej ε_{cm} . Norma [1] (wzór 6a) stosuje precyzyjne oznaczenie do wyrażenia tej różnicy (wzór 9a). W zacytowanym z normy [2] wzorze (6b) za pomocą symbolu ε_{sm} (wzór 9b) wyrażona była także ta różnica. Tak więc, znaczeniowo różnica $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ we wzorze (6a) odpowiada wielkości oznaczonej symbolem ε_{sm} we wzorze (6b). Różne są jednak zasady obliczania odkształceń w porównywanych normach.

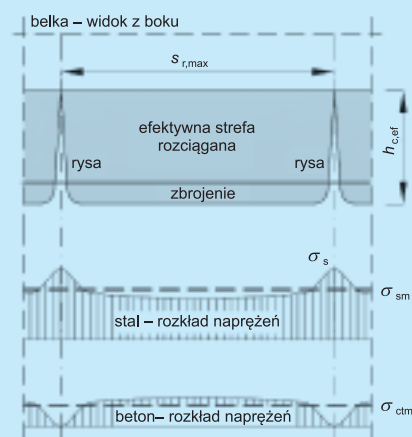
Dla zobrazowania zasad określania odkształceń, wzór z normy [1] przekształcono do równoważnej postaci:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - \sigma_{ctm} / \rho_{p,eff}}{E_s} - \frac{\sigma_{ctm}}{E_{cm}} \quad (9a)$$

gdzie:

$\sigma_{ctm} = k_t f_{ct,eff}$ – średnie (na odcinku pomiędzy rysami) naprężenie w strefie rozciąganej betonu w fazie ustabilizowanego zarysowania.

Rozkłady naprężeń w stali i betonie na odcinku pomiędzy rysami wraz z zaznaczeniem wartości uśrednionych pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Rozkłady naprężeń w stali i betonie na odcinku pomiędzy rysami

W PN-B-03264:2002 [2] odkształcenie miarodajne do obliczenia rysy wyrażał wzór:

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_s}{E_s} \left[1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \right] \quad (9b)$$

Punktem wyjścia jest wyznaczenie naprężenia w stali σ_s w przekroju przez rysę (bez współpracy z betonem strefy rozciąganej). Oblicza się go, wykorzystując proste warunki równowagi sformułowane dla właściwej kombinacji oddziaływań. W obszarach pomiędzy rysami, gdzie beton strefy rozciąganej współpracuje ze stalą, naprężenia w stali są niższe. Wydłużenie zbrojenia oblicza się, uśredniając wartości tych naprężeń, co ujmuje licznik pierwszego członu wzoru (9a).

W Eurokodzie 2 [1] obowiązuje nieco inna niż w [2] zasada uwzględniania współpracy stali i betonu strefy rozciąganej, tzw. usztywnienia przy rozciąganiu (ang. *tension stiffening*). W normie [2], redukcja naprężeń w stali σ_s była tym mniejsza, im było ono większe (miarą było od-

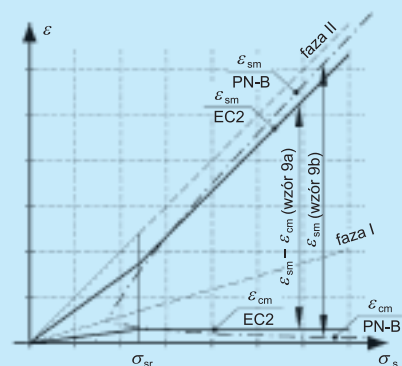
dalenie od naprężenia w momencie zarysowania σ_{sr}). Tak więc przyjmowano, że wraz z przyrastającym obciążeniem naprężenia w betonie strefy rozciąganej stają się coraz mniejsze. W [1], niezależnie od poziomu naprężeń w stali, zakłada się stałą wartość naprężeń w betonie strefy rozciąganej po zarysowaniu σ_{ctm} . Są one iloczynem wytrzymałości betonu $f_{ct,eff}$ i zależnego od czasu współczynnika k_t (równego 0,4 dla obciążeń długotrwałych). Naprężenie σ_{ctm} odpowiada stanowi ustabilizowanego zarysowania, gdy nie powstają już kolejne rysy, a jedynie otwierają się te istniejące.

Określając średnią wartość naprężeń w stali $\sigma_{sm} = \sigma_s - \sigma_{ctm} / \rho_{p,eff}$ (rysunek 2), bierze się pod uwagę stopień zbrojenia efektywnej strefy rozciąganej $\rho_{p,eff}$. Im stopień zbrojenia jest wyższy (większa ilość zbrojenia lub mniejszy przekrój efektywnej strefy rozciąganej betonu $A_{c,eff}$), tym redukcja naprężeń w stali staje się niższa. Efekt ten jest dosyć oczywisty i wynika z porównania sił rozciągających w przekroju przez rysę i w efektywnej strefie rozciąganej (poza rysę):

$$\sigma_s A_{s1} = \sigma_{sm} A_{s1} + \sigma_{ctm} A_{c,eff} \quad (10)$$

Pewna redukcja rozwarcia rys wynika z wydłużania się betonu, co wyrażone jest przez drugi człon wzoru (9a). Zależności między odkształceniami i naprężeniami określonymi wg norm [1] i [2] przedstawia rysunek 3.

Nierzadko zdarza się, że siły wewnętrzne dla kombinacji prawie stałej są mniejsze od tych powodujących zarysowanie. Jeżeli jednak obciążenia całkowite (kombinacja charakterystyczna) wywołują zarysowanie, to rysy będą występowały i powinno się określać ich rozwarcie dla kom-



Rys. 3. Zasada określania odkształceń wg norm [1] i [2]

binacji prawie stałej. Wykonanie obliczeń dla takiej sytuacji za pomocą wzorów z normy [2] było niemożliwe, gdyż zakres ich stosowania ograniczał się do przypadków, w których $\sigma_s > \sigma_{sr}$. Wykonanie obliczeń dla tej sytuacji wg normy [1] jest możliwe, jednak wymaga wprowadzenia dodatkowego warunku [11] ograniczającego redukcję odkształceń stali do maks. 40%.

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (11)$$

dr inż. Grzegorz Wandzik
Politechnika Śląska w Gliwicach

Streszczenie

Artykuł przedstawia zasady kontroli szerokości rozwarcia rys oraz wyznaczania zbrojenia minimalnego w elementach żelbetonowych według zaleceń Eurokodu 2. Podstawowym celem omówienia jest nawiązanie do dotychczasowej normy polskiej PN-B-03264:2002 i wskazanie istniejących podobieństw i różnic pomiędzy wspomnianymi normami. W artykule opisane zostały pośrednia i bezpośrednia metoda kontroli szerokości rozwarcia rys. Krótko scharakteryzowane zostały założenia teoretyczne, stanowiące podstawę wzorów normowych. W tekście wskazane zostały również zmiany w przyjęciu dopuszczalnych szerokości rozwarcia rys w zależności od klas ekspozycji.

Słowa kluczowe: zarysowanie, stany graniczne użytkowalności, zbrojenie minimalne, konstrukcje żelbetowe, Eurokod 2.

Abstract

Information about the background of some modifications in RC members cracking control introduced in Eurocode 2 have been presented. Methods of calculations and assumptions have been discussed regarding approach used in the former standard.

Literatura

- [1] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [2] PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [3] PN-EN 1992-3:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 3: Silosy i zbiorniki na ciecze.
- [4] PN-EN 206-1:2003 Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [5] Knauff M., Podstawy projektowania konstrukcji żelbetonowych i sprężonych według Eurokodu 2, rozdział 11: Stany graniczne użytkowalności. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław 2006 r.

PARTNERZY DZIAŁU

SILIKATY
GRUPA
ZESPÓŁ BUDOWANIA ZAUFANIA

SOLBET

Sopro

CPJS
Centrum Promocji Jakości Stali

SBPB

cę ϕ_s , a następnie przelicza się jej wartość, dostosowując ją do rzeczywistych cech elementu. Taki sposób postępowania wynika z faktu, że odczytywana z tablicy wartość ϕ_s została skalibrowana dla pewnych, z góry założonych wielkości, takich jak: wytrzymałość betonu na rozciąganie, otulina zbrojenia itd. (wykaz założeń jest podany pod tablicą 7.2.N [1]). Gdy rzeczywiste cechy elementu (klasa betonu i położenie zbrojenia) oraz stan naprężenia (wysokość strefy rozciąganej h_{cr}) są inne niż te przyjęte do określenia wartości ϕ_s , wymagane jest przeliczenie średnicy maksymalnej do wartości ϕ_s . Odbywa się ono za pomocą jednego z dwóch wzorów:

$$\varphi_s = \varphi_s' \cdot \frac{f_{ct,eff}}{2,9} \cdot \frac{k_c h_{cr}}{2(h-d)} \quad (5a)$$

$$\varphi_s = \varphi_s' \cdot \frac{f_{ct,eff}}{2,9} \cdot \frac{h_{cr}}{8(h-d)} \quad (5b)$$

Wybór zależności (5a) lub (5b) wynika ze stanu naprężenia panującego w przekroju, jednak użyte w normie [1] sformułowania dotyczące zakresu ich stosowania są nieprecyzyjne. Wzór (5a) jest tam opatrzony komentarzem *przy zginaniu (co najmniej część przekroju ściskana)*. Trudno wyobrazić sobie przekrój zginany, w którym nie występuje strefa ściskana, stąd też sformułowanie objęte nawiasami należy uznać za podstawowe i przyjąć, że wzór dotyczy wszystkich przekrojów, w których pewna jego część podlega ściskaniu. Podobnie nieprecyzyjne określenie, *równomierne rozciąganie osiowe* zastosowano do wskazania zakresu stosowania wzoru (5b). Jak wykazano w monografii [5], wzory (5a) i (5b) dotyczą sytuacji, gdy przynajmniej część przekroju jest ściskana (wzór 5a) i sytuacji, gdy strefa ściskana nie występuje (wzór 5b). Dodatkowo zastosowanie wzorów (5) należy uznać za uzasadnione, gdy zbrojenie rozciągane położone jest stosunkowo blisko krawędzi przekroju – nie dalej niż w odległości $0,1h$ w sytuacji opisanej wzorem (5a) i $0,2h$ w sytuacji objętej wzorem (5b).

Jak widać, stosowanie metody pośredniej nie jest już tak wygodne jak dotąd. Wyznaczone w ten sposób średnice maksymalne prętów, stanowiące kryterium spełnienia warunku zarysowania, są w rzeczywistości wynikiem zastosowania metody bezpośredniej z kilkoma założeniami upraszczającymi. W efekcie, metoda ta staje się konserwatywna, a brak możliwości spełnienia warunku $\phi \leq \phi_s$ wcale nie dyskwalifikuje przyjętego przekroju, jedynie wskazuje na konieczność weryfikacji metodą bezpośred-

nią. Zwiększony wydatnie nakład pracy przy stosowaniu metody pośredniej (w porównaniu z [2]) w połączeniu z gorszą jakością rezultatu (w porównaniu z metodą bezpośrednią) sprawia, że przydatność tej metody staje się wątpliwa. Moim zdaniem, biorąc pod uwagę dostępność narzędzi do automatyzacji obliczeń, warto korzystać przede wszystkim z metody bezpośredniej.

Metoda bezpośrednia. Polega ona na wyznaczeniu rozwarcia miarodajnej rysy w_k i bezpośrednim porównaniu jej z wartością dopuszczalną w_{max} . Eurokod 2 [1] sugeruje kontrolę warunku dla prawie stałej kombinacji oddziaływań. Wymaganie to sformułowane jest jednak w sposób niejednoznaczny i stąd warto zacytować je w oryginalnym brzmieniu: *Jeżeli nie stawia się szczególnych wymagań (np. wodoszczelności), to można przyjąć, że ograniczenie obliczeniowych szerokości rozwarcia rys do wartości w_{max} podanych w tablicy 7.1N jest na ogół wymaganiem dostatecznym ze względu na wygląd i trwałość elementów żelbetowych w budynkach przy prawie stałej kombinacji obciążeń*. Używając określeń takich jak *można* i *na ogół*, Eurokod 2 [1] przerzuca część odpowiedzialności na projektanta.

Do obliczenia szerokości rozwarcia rysy Eurokod 2 [1] proponuje zależność:

$$w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \leq w_{max} \quad (6a)$$

gdzie:

$s_{r,max}$ – maksymalny rozstaw rys, a $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$ jest różnicą średnich odkształceń stali i betonu na odcinku pomiędzy rysami.

W normie PN-B-03264:2002 [2], analogiczny wzór miał postać:

$$w_k = \beta s_{rm} \varepsilon_{sm} \leq w_{max} \quad (6b)$$

gdzie:

s_{rm} – średni, końcowy rozstaw rys;
 ε_{sm} – średnie odkształcenie zbrojenia;
 β – współczynnik wyrażający stosunek obliczeniowej szerokości rysy do szerokości średniej.

Idea obliczania szerokości rozwarcia rysy jest taka sama w obydwu normach.

Uznaje się, że szerokość rysy jest iloczynem odpowiednich odkształceń i odległości pomiędzy sąsiednimi rysami. Ze względu na losowy charakter, zarówno odległości między rysami, jak i rozwarcie nie są jednakowe.

We wzorze (6b) zróżnicowanie rozwarcia odwzorowywał współczynnik β , będący stosunkiem rozwarcia rys miarodajnych (największych) do średnich. Średnia szerokość rys obliczana była na podstawie średniej odległości pomiędzy nimi s_{rm} .

Za różne rozwarcie rys odpowiada ich nierównomierny rozstaw. W Eurokodzie taki

sposób rozumowania wyraża wzór (6a), w którym zamiast średniego rozstawu s_{rm} brany jest pod uwagę rozstaw maksymalny $s_{r,max}$.

$$s_{r,max} = \beta s_{rm} = 3,4c + 0,425k_1 k_2 \frac{\varphi}{\rho_r} \quad (7a)$$

$$s_{rm} = 2 \cdot 25 \text{ mm} + 0,25k_1 k_2 \frac{\varphi}{\rho_r} \quad (7b)$$

Wzory (7a) i (7b) są tylko z pozoru różne. Łączy je prosta relacja $s_{r,max} = \beta s_{rm}$, w której wartość $\beta = 1,7$ została uwzględniona w sposób niejawnny. Współczynniki liczbowe 2 i 0,25 we wzorze (7b) zostały we wzorze (7a) zastąpione przez: $1,7 \cdot 2 = 3,4$ i $1,7 \cdot 0,25 = 0,425$.

Nowością w normie [1] jest uwzględnienie wpływu grubości otuliny c na odległość pomiędzy rysami. Wzór (7b) z dotychczasowej normy [2] bazował na założeniu, że $c = 25$ mm. Dodatkowo, ogranicza się możliwość stosowania wzoru (7a) do sytuacji, w których pręty w przekroju rozmieszczone są nie rzadziej niż co $5(c + 0,5\phi)$.

Gdy odległość ta jest przekroczona, należy spodziewać się mniejszej liczby rys o większym rozstawie i w konsekwencji większej ich rozwartości. Wartość $s_{r,max}$ należy wtedy przyjmować jako 130% wysokości strefy rozciąganej przekroju:

$$s_{r,max} = 1,3(h - x) \quad (8)$$

Wzór (8) opisuje zależność pomiędzy rozstawem rys i wysokością strefy rozciąganej w elementach o rzadko rozstawionych prętach. Wnioskiem wypływającym z tej relacji jest fakt, że w elementach o małej wysokości przekroju i w związku z tym o małej wysokości strefy rozciąganej, rysy będą liczne, a ich rozwarcie niewielkie. Ta obserwacja leży u podstaw zalecenia, które dopuszcza pomijanie kontroli rozwarcia rys w zginanych płytach żelbetowych o grubości do 200 mm. Warunkiem zastosowania tej reguły jest brak znaczących sił rozciągających i spełnienie wymagań konstrukcyjnych stawianych płytom.

Obliczenie rozwarcia rysy (wzory 6) wymaga wyznaczenia różnicy średnich odkształceń zbrojenia ε_{sm} i betonu strefy rozciąganej ε_{cm} . Norma [1] (wzór 6a) stosuje precyzyjne oznaczenie do wyrażenia tej różnicy (wzór 9a). W zacytowanym z normy [2] wzorze (6b) za pomocą symbolu ε_{sm} (wzór 9b) wyrażona była także ta różnica. Tak więc, znaczeniowo różnica $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ we wzorze (6a) odpowiada wielkości oznaczonej symbolem ε_{sm} we wzorze (6b). Różne są jednak zasady obliczania odkształceń w porównywanych normach.

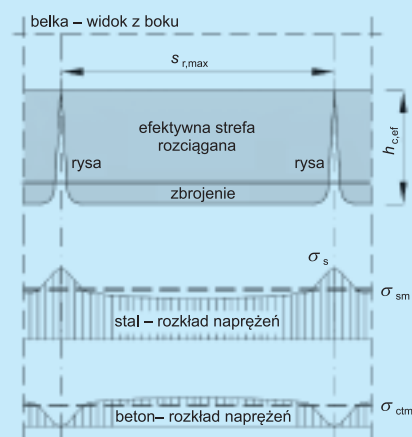
Dla zobrazowania zasad określania odkształceń, wzór z normy [1] przekształcono do równoważnej postaci:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - \sigma_{ctm} / \rho_{p,eff}}{E_s} - \frac{\sigma_{ctm}}{E_{cm}} \quad (9a)$$

gdzie:

$\sigma_{ctm} = k_t f_{ct,eff}$ – średnie (na odcinku pomiędzy rysami) naprężenie w strefie rozciąganej betonu w fazie ustabilizowanego zarysowania.

Rozkłady naprężeń w stali i betonie na odcinku pomiędzy rysami wraz z zaznaczeniem wartości uśrednionych pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Rozkłady naprężeń w stali i betonie na odcinku pomiędzy rysami

W PN-B-03264:2002 [2] odkształcenie miarodajne do obliczenia rysy wyrażał wzór:

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_s}{E_s} \left[1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \right] \quad (9b)$$

Punktem wyjścia jest wyznaczenie naprężenia w stali σ_s w przekroju przez rysę (bez współpracy z betonem strefy rozciąganej). Oblicza się go, wykorzystując proste warunki równowagi sformułowane dla właściwej kombinacji oddziaływań. W obszarach pomiędzy rysami, gdzie beton strefy rozciąganej współpracuje ze stalą, naprężenia w stali są niższe. Wydłużenie zbrojenia oblicza się, uśredniając wartości tych naprężeń, co ujmuje licznik pierwszego członu wzoru (9a).

W Eurokodzie 2 [1] obowiązuje nieco inna niż w [2] zasada uwzględniania współpracy stali i betonu strefy rozciąganej, tzw. usztywnienia przy rozciąganiu (ang. *tension stiffening*). W normie [2], redukcja naprężeń w stali σ_s była tym mniejsza, im było ono większe (miarą było od-

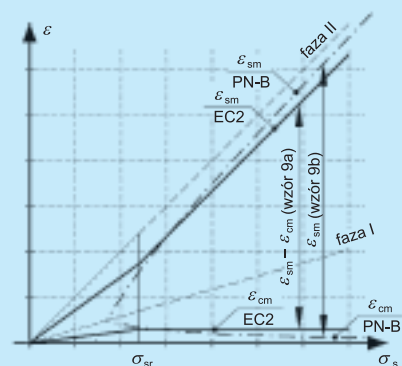
dalenie od naprężenia w momencie zarysowania σ_{sr}). Tak więc przyjmowano, że wraz z przyrastającym obciążeniem naprężenia w betonie strefy rozciąganej stają się coraz mniejsze. W [1], niezależnie od poziomu naprężeń w stali, zakłada się stałą wartość naprężeń w betonie strefy rozciąganej po zarysowaniu σ_{ctm} . Są one iloczynem wytrzymałości betonu $f_{ct,eff}$ i zależnego od czasu współczynnika k_t (równego 0,4 dla obciążeń długotrwałych). Naprężenie σ_{ctm} odpowiada stanowi ustabilizowanego zarysowania, gdy nie powstają już kolejne rysy, a jedynie otwierają się te istniejące.

Określając średnią wartość naprężeń w stali $\sigma_{sm} = \sigma_s - \sigma_{ctm} / \rho_{p,eff}$ (rysunek 2), bierze się pod uwagę stopień zbrojenia efektywnej strefy rozciąganej $\rho_{p,eff}$. Im stopień zbrojenia jest wyższy (większa ilość zbrojenia lub mniejszy przekrój efektywnej strefy rozciąganej betonu $A_{c,eff}$), tym redukcja naprężeń w stali staje się niższa. Efekt ten jest dosyć oczywisty i wynika z porównania sił rozciągających w przekroju przez rysę i w efektywnej strefie rozciąganej (poza rysę):

$$\sigma_s A_{s1} = \sigma_{sm} A_{s1} + \sigma_{ctm} A_{c,eff} \quad (10)$$

Pewna redukcja rozwarcia rysy wynika z wydłużania się betonu, co wyrażone jest przez drugi człon wzoru (9a). Zależności między odkształceniami i naprężeniami określonymi wg norm [1] i [2] przedstawia rysunek 3.

Nierzadko zdarza się, że siły wewnętrzne dla kombinacji prawie stałej są mniejsze od tych powodujących zarysowanie. Jeżeli jednak obciążenia całkowite (kombinacja charakterystyczna) wywołują zarysowanie, to rysy będą występowały i powinno się określać ich rozwarcie dla kom-



Rys. 3. Zasada określania odkształceń wg norm [1] i [2]

binacji prawie stałej. Wykonanie obliczeń dla takiej sytuacji za pomocą wzorów z normy [2] było niemożliwe, gdyż zakres ich stosowania ograniczał się do przypadków, w których $\sigma_s > \sigma_{sr}$. Wykonanie obliczeń dla tej sytuacji wg normy [1] jest możliwe, jednak wymaga wprowadzenia dodatkowego warunku [11] ograniczającego redukcję odkształceń stali do maks. 40%.

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (11)$$

dr inż. Grzegorz Wandzik
Politechnika Śląska w Gliwicach

Streszczenie

Artykuł przedstawia zasady kontroli szerokości rozwarcia rys oraz wyznaczania zbrojenia minimalnego w elementach żelbetonowych według zaleceń Eurokodu 2. Podstawowym celem omówienia jest nawiązanie do dotychczasowej normy polskiej PN-B-03264:2002 i wskazanie istniejących podobieństw i różnic pomiędzy wspomnianymi normami. W artykule opisane zostały pośrednia i bezpośrednia metoda kontroli szerokości rozwarcia rys. Krótko scharakteryzowane zostały założenia teoretyczne, stanowiące podstawę wzorów normowych. W tekście wskazane zostały również zmiany w przyjęciu dopuszczalnych szerokości rozwarcia rys w zależności od klas ekspozycji.

Słowa kluczowe: zarysowanie, stany graniczne użytkowalności, zbrojenie minimalne, konstrukcje żelbetonowe, Eurokod 2.

Abstract

Information about the background of some modifications in RC members cracking control introduced in Eurocode 2 have been presented. Methods of calculations and assumptions have been discussed regarding approach used in the former standard.

Literatura

- [1] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [2] PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetonowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [3] PN-EN 1992-3:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 3: Silosy i zbiorniki na ciecze.
- [4] PN-EN 206-1:2003 Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [5] Knauff M., Podstawy projektowania konstrukcji żelbetonowych i sprężonych według Eurokodu 2, rozdział 11: Stany graniczne użytkowalności. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław 2006 r.

PARTNERZY DZIAŁU

SILIKATY
GRUPA
ZESPÓŁ BUDOWANIA ZAUFANIA

SOLBET

Sopro

CPJS
Centrum Promocji Jakości Stali

SBPB