

MARIUSZ ZYCH

Dr hab. inż., prof. PK, Politechnika Krakowska, e-mail: mzych@pk.edu.pl

MINIMALNY STOPIEŃ ZBROJENIA W KONTEKŚCIE METODY UPROSZCZONEJ KONTROLI ZARYSOWANIA WG NOWELIZACJI ZALECEŃ NORMOWYCH

s. 59-74

STRESZCZENIE

W artykule skomentowano i uszczegółowiono metodę uproszczoną kontroli zarysowania, zawartą w znowelizowanej normie EN 1992-1-1. Ponadto, przedstawiono propozycję określania dopuszczalnych naprężeń w stali zbrojeniowej od odkształceń wymuszonych dla elementu skrępowanego wzdłuż krawędzi. Przedstawiono zasadnicze zmiany w znowelizowanej normie EN 1992-1-1 względem EN 1992-1-1. Skomentowano przypadek jednoczesnego oddziaływania obciążeń zewnętrznych oraz odkształceń wymuszonych, w schemacie elementu skrępowanego na przeciwległych końcach oraz w elemencie skrępowanym wzdłuż krawędzi.

SŁOWA KLUCZOWE

Zarysowanie betonu, minimalny stopień zbrojenia, odkształcenia wymuszone, normy.

1. Wstęp

W analizie zarysowania żelbetowych konstrukcji masywnych (Kiernożycki [11]), jak również w bardziej powszechnych konstrukcjach średnio-masywnych (Flaga i inni [6], Halicka i Franczak-Balmas [9], Jędrzejewska i inni [10], Seruga i Zych [17]), duże znaczenie mają oddziaływania odkształceń wymuszonych. Zarówno obecne wytyczne EN 1992-1-1 [2], EN 1992-3 [3], jak i EN 1992-1-1 [7] w ograniczonym zakresie odnoszą się do efektów oddziaływania odkształceń wymuszonych. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie komentarza nt. uproszczonego sposobu kontroli szerokości rys (wg EN 1992-1-1 [7]), opartego na minimalnym stopniu zbrojenia, który oblicza się dla granicznych naprężeń w stali zbrojeniowej ($\sigma_{s,lim}$). Przedstawiono również propozycję uzupełnień modelu (opisanego w Załączniku informacyjnym S [7]) w zakresie oddziaływania odkształceń wymuszonych.

2. Postanowienia ogólne EN 1992-1-1 I EN 1992-1-1

Zbrojenie minimalne, w świetle obecnych wytycznych EN 1992-1-1 [2], może być obliczane z uwagi na: zabezpieczenie przed kruchym wyczerpaniem nośności (p. 9.2 [2]), ograniczenie naprężeń w stali zbrojeniowej do poziomu nie przekraczającego f_{yk} (aby uniknąć uplastycznienia stali zbrojeniowej). Ponadto, zależność opisująca minimalny stopień zbrojenia może być stosowana do wyznaczenia odpowiednio większej ilości zbrojenia, w którym naprężenia σ_s nie będą większe niż $\sigma_{s,lim}$ (gdzie $\sigma_{s,lim}$ jest poziomem naprężeń w stali zbrojeniowej, których nieprzekroczenie gwarantuje ograniczenie szerokości rys do założonej wartości $w_{k,lim}$). Większa ilość stali zbrojeniowej prowadzi do efektywniejszego przekazywania naprężeń rozciągających ze stali zbrojeniowej na beton. Skutkuje to zmniejszeniem się rozstawu rys, a w konsekwencji zmniejszeniem się ich szerokości. Komentarz na ten temat wraz z przykładami obliczeniowymi przedstawili m. in. Knauff [12], Knauff i inni [13].

Podstawowe zasady dotyczące obliczania zbrojenia minimalnego wg normy EN 1992-1-1 [7] są takie same jak w aktualnej normie, ale w wytycznych wprowadzono zmiany w istotnych szczegółach. Metoda uproszczona kontroli zarysowania oparta jest na zależnościach opisujących minimalny stopień zbrojenia. Podstawowa różnica polega na ograniczeniu naprężeń w zbrojeniu do wielkości $\sigma_{s,lim}$. Wielkość ta wynika z metody szczegółowej kontroli rys. Metoda uproszczona ograniczania szerokości rys w stosunku do metody szczegółowej jest prostsza, lecz jest tylko metodą alternatywną, a wyniki uzyskane na jej podstawie są przybliżeniem rozwiązań szczegółowych.

W [7] informacje na temat obliczania zbrojenia minimalnego (w kontekście uproszczonej metody kontroli szerokości rys), zostały przeniesione do Załącznika informacyjnego S. Wynika to z braku zastosowania tej metody, w niektórych krajach Europy. Należy zaznaczyć, że w Załączniku informacyjnym S w p. S.4 [7] zamieszczono również inną metodę, uproszczoną kontroli zarysowania, która wynika z innych założeń upraszczających i innych przekształceń zależności, opisujących metodę szczegółową. Metoda ta sprowadza się do określenia dopuszczalnej średnicy prętów zbrojeniowych lub dopuszczalnego ich rozstawu. Komentarz na ten temat wraz z propozycją zależności właściwych odkształceń wymuszonym, zarówno przy skrępowaniu elementu na jego przeciwległych końcach, jak również wzdłuż krawędzi przedstawiono w pracy [20]. Mimo, że ten sposób sprawdzania szerokości rys wg aktualnych wytycznych [2] wprost kojarzy się z koniecznością określenia naprężeń dopuszczalnych w stali zbrojeniowej (tj. $\sigma_{s,lim}$ w równaniu definiującym zbrojenie minimalne), to wg nowych wytycznych [7] obie te metody są niezależnymi sposobami uproszczonego ograniczania szerokości rys.

Ryzyko zarysowania w EN 1992-1-1 [7], w porównaniu do postanowień EN 1992-3 [3], zostało opisane w sposób bardzo uszczegółowiony, jednak sposób uwzględnienia tych odkształceń w obliczaniu szerokości rys uległ jedynie niewielkiej korekcie. Komentarz na ten temat przedstawili Zych i Jędrzejewska [19]. W rzeczywistości odkształcenia wymuszone mają miejsce zarówno w zasadniczym okresie dojrzewania betonu, tj. do 28 dni, jak również w kolejnych tygodniach, podczas których nadal może mieć miejsce wzrost właściwości mechanicznych betonu (zwłaszcza betonu wykonanego na cemencie wieloskładnikowym). W związku z tym, w EN 1992-1-1 [7] wprowadzono znaczące uzupełnienia i zmiany, które pozwalają na ściślejsze określenie zmian właściwości betonów zawierających cement o niższej kaloryczności. Wymiernych korzyści z ich zastosowania można oczekiwać w konstrukcjach średnio-masywnych oraz masywnych, gdyż zmniejszają one efektywnie termiczne odkształcenia wymuszone oraz ich

negatywne skutki, jakim jest zarysowanie. Komentarz na ten temat w świetle projektu normy prEN 1992-1-1 [8] przedstawiły Urbaniak i Jędrzejewska [18].

3. Zbrojenie minimalne wg FprEN 1992-1-1

Zbrojenie minimalne z uwagi na ograniczenie naprężeń w stali zbrojeniowej do wartości f_{yk} wg EN 1992-1-1 [7], opisane jest wzorami (1) do (4). Zależności te dotyczą poszczególnych przypadków, tj. czystego zginania, osiowego rozciągania oraz zginania, z udziałem siły podłużnej.

$$A_{s,min,w1} \geq 0,2k_h \cdot f_{ct,eff} \cdot A_c / f_{yk} \quad (1)$$

$$A_{s,min,w1} = A_{s,min,w2} \geq 0,5k_h \cdot f_{ct,eff} \cdot A_c / f_{yk} \quad (2)$$

$$A_{s,min,w1} \begin{cases} \geq (0,3N_{Ed} + 0,2k_h \cdot f_{ct,eff} \cdot A_c) / f_{yk} \\ \geq 0 \\ \leq 0,5k_h \cdot f_{ct,eff} \cdot A_c / f_{yk} \end{cases} \quad (3)$$

$$A_{s,min,w2} = \frac{N_{Ed}}{f_{yk}} - A_{s,min,w1} \begin{cases} \leq A_{s,min,w1} \\ \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

gdzie: $A_{s,min,w1}$ – powierzchnia zbrojenia minimalnego dla rozważanej części przekroju po stronie bardziej rozciąganej; $A_{s,min,w2}$ – powierzchnia zbrojenia minimalnego dla rozważanej części przekroju po stronie mniej rozciąganej; N_{Ed} – siła osiowa w stanie granicznym użyteczności (ściskająca lub rozciągająca, ze znakiem plus gdy rozciąganie), przypadająca na rozważany przekrój, siła ta powinna być określona dla charakterystycznych wartości siły sprężającej i sił osiowych przy odpowiedniej kombinacji obciążeń; $f_{ct,eff}$ – efektywna wytrzymałość betonu na rozciąganie w chwili spodziewanego zarysowania, może być przyjęta jako wartość średnia wytrzymałości na rozciąganie f_{ctm} , którą dopuszcza się określić również dla przypadku $t > t_{ref}$ [18, 19]; f_{yk} – charakterystyczna wartość granicy plastyczności prętów zbrojeniowych; A_c – całkowity przekrój rozważanej części przekroju, np. średnik, półka; k_h – współczynnik, uwzględniający wpływ niejednorodnych samo-równoważących się naprężeń od skurczu betonu i ciepła hydratacji, który prowadzi do pozornej redukcji wytrzymałości betonu na rozciąganie (w [2] oznaczony jest on jako k). Współczynnik ten określony jest równaniem:

$$k_h = 0,8 - 0,6 \left(\min \left\{ \frac{b}{m}; \frac{h}{m} \right\} - 0,3 \right) \begin{cases} \leq 0,8 \\ \geq 0,5 \end{cases} \quad (5)$$

Zgodnie z Załącznikiem informacyjnym S [7], minimalna powierzchnia zbrojenia ($A_{s,min}$), która wynika z metody uproszczonej kontroli szerokości rys dla w/w przypadków obciążenia, (tj. czystego zginania, osiowego rozciągania oraz zginania z udziałem siły podłużnej), zdefiniowana jest wg zależności (6-9). Analogicznie jak w przypadku wzorów (1-4), wzory (6-9) dotyczą przekrojów prostokątnych, a w przypadku przekrojów złożonych (tj. teowych, skrzynkowych), dotyczą ich wydzielonych części, takich jak średnik, półka.

$$A_{s,min,w1} = 0,8 \frac{h-h_{c,eff}}{h} f_{ct,eff} \cdot \frac{A_{c,eff}}{\sigma_{s,lim}}; A_{s,min,w2} = 0 \quad (6)$$

$$A_{s,min,w1} = A_{s,min,w2} = f_{ct,eff} \cdot \frac{A_{c,eff}}{\sigma_{s,lim}} \quad (7)$$

$$A_{s,min,w1} = \left(0,5 - 0,4 \frac{h-h_{c,eff}}{h} \right) \frac{N_{Ed}}{\sigma_{s,lim}} + 0,8 \frac{h-h_{c,eff}}{h \cdot \sigma_{s,lim}} f_{ct,eff} A_{c,eff} \left\{ \begin{array}{l} \geq 0 \\ \leq f_{ct,eff} A_{c,eff} / \sigma_{s,lim} \end{array} \right. \quad (8)$$

$$A_{s,min,w2} = \frac{N_{Ed}}{\sigma_{s,lim}} - A_{s,min,w1} \left\{ \begin{array}{l} \geq 0 \\ \leq A_{s,min,w1} \end{array} \right. \quad (9)$$

gdzie: h – wysokość przekroju; $h_{c,eff}$ – wysokość efektywnie rozciąganej powierzchni betonu; $A_{c,eff}$ – efektywna powierzchnia betonu rozciąganego; $\sigma_{s,lim}$ – dopuszczalne naprężenie w stali zbrojeniowej, tuż po zarysowaniu. Według Załącznika informacyjnego S [7], naprężenia $\sigma_{s,lim}$ wynikają z metody szczegółowej ograniczenia szerokości rys do wartości dopuszczalnej $w_{lim,cal}$:

$$\sigma_{s,lim} \leq k_{\sigma 1} \cdot f_{ct,eff} \cdot (\varphi)^{-1} \left(-c + \sqrt{c^2 + k_{\sigma 2} \frac{E_s \cdot w_{lim,cal} \cdot \varphi}{k_w \cdot k_{1/r_simpl} \cdot f_{ct,eff}}} \right) \quad (10)$$

gdzie: φ – średnica zbrojenia; c – grubość otulenia; $k_{\sigma 1}$ – współczynnik równy 4.8 dla czystego zginania oraz 6.0 dla rozciągania osiowego; $k_{\sigma 2}$ – współczynnik równy 0.4 dla czystego zginania oraz 0.3 dla rozciągania osiowego; k_w – współczynnik konwertujący średnią szerokość rysy na maksymalną; k_{1/r_simpl} – współczynnik uwzględniający wzrost szerokości rysy przy zginaniu (11) na skutek krzywizny, określony wg uproszczonej zależności, która wg [15] wynika z aproksymacji liniowej do wyników szczegółowych oraz z założenia niskiego stopnia zbrojenia $\rho = 0.2\%$:

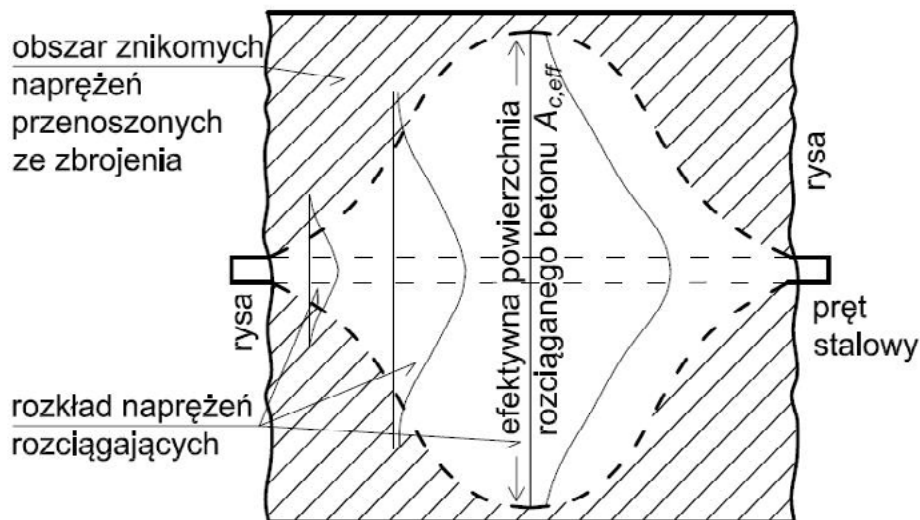
$$k_{1/r_simpl} = (1,2h/d - 0,1) \quad (11)$$

Zasadnicza różnica pomiędzy wzorami definiującymi minimalną powierzchnię zbrojenia z uwagi na nieprzekroczenie f_{yk} (1-4), a zależnościami dotyczącymi metody uproszczonej kontroli szerokości rysy (6-9) dotyczy dwóch kwestii. Pierwsza oczywista, to założenie zdecydowanie mniejszych niż f_{yk} dopuszczalnych naprężeń w stali zbrojeniowej ($\sigma_{s,lim}$). Druga kwestia związana jest z założeniem tzw. efektywnie rozciąganej powierzchni betonu ($A_{ct,eff}$), w miejsce rzeczywistej powierzchni betonu rozciąganego (A_{ct}). W związku z tym określa się wielkość efektywnego stopnia zbrojenia $\rho_{eff} = A_s/A_{ct,eff}$ zarówno do wyznaczenia maksymalnego rozstawu rys ($s_{r,max}$) oraz różnicy średnich odkształceń pomiędzy stalą i betonem ($\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$). W przypadku odkształcenia wymuszonego (EN 1992-3 [3]), wielkość tę uwzględnia się tylko w wyrażeniu definiującym maksymalny rozstaw rys. Podczas gdy różnica ($\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$) opisana jest w funkcji rzeczywistego stopnia zbrojenia (ρ). Według EN 1992-1-1 [2], w modelu zbrojenia minimalnego, przyjęto niekonsekwentnie założenie o udziale pełnej powierzchni betonu

rozciąganego (A_{ct}), zarówno gdy stosuje się ten model w celu uniknięcia uplastycznienia zbrojenia, czy też w celu ograniczenia szerokości rys do wartości $w_{lim,cal}$. Z tego też względu metoda uproszczona, w obecnym wydaniu [2] nie jest spójna z założeniami metody szczegółowej.

4. Efektywna powierzchnia beton rozciąganego $A_{c,eff}$

Powszechnie szerokości rys w elementach rozciąganych, o nierównomiernie rozmieszczonym zbrojeniu oraz w elementach zginanych, oblicza się wydzielając z całości elementu konstrukcyjnego efektywny obszar betonu rozciąganego, tj. pręt betonowy, w którym znajduje się zbrojenie efektywnie ograniczające szerokość rysy w tym obszarze (EN 1992-1-1 [2] i CEB-FIB [1]). Według Favre i innych [4] stosowanie efektywnej powierzchni betonu jest konieczne, z uwagi na ograniczony obszar betonu, na który przekazywane są efektywnie naprężenia rozciągające ze zbrojenia (rys. 1).



Rys. 1. Konceptualny rysunek rozkładu naprężeń rozciągających w betonie pomiędzy rysami [4]
 Fig. 1. Conceptual figure of the distribution of tensile stresses in concrete between cracks [4]

Inaczej niż w EN 1992-1-1 [2] w [7], na minimalną powierzchnię zbrojenia ($A_{s,min}$) obliczoną według metody uproszczonej kontroli rys, ma wpływ efektywna powierzchnia betonu rozciąganego $A_{c,eff}$. Wystarczające jest zatem rozmieszczenie zbrojenia jedynie w strefie $A_{c,eff}$ aby skutecznie zmniejszyć rozstaw rys i ich szerokości w tym obszarze. Jednak w pewnych przypadkach, rysy poza tym obszarem mogą być szersze [16]. W EN 1992-1-1 [7] zdefiniowano obszar efektywnie rozciąganej powierzchni betonu $A_{ct,eff}$ w zależności od rozmieszczenia prętów zbrojeniowych w danym przekroju oraz w zależności od rozkładu odkształceń. Wytyczne te w stosunku do obecnie obowiązujących wytycznych [2] zostały poszerzone o przypadki, gdy zbrojenie rozmieszczone jest nierównomiernie oraz gdy pręty rozmieszczone są po obwodzie elementu.

Zastosowanie efektywnej powierzchni betonu rozciąganego ($A_{c,eff}$) w wyrażeniach (6-8), skutkuje zmniejszeniem obliczeniowej wartości siły wypadkowej, która w rzeczywistości przyczynia się do powstania rys drugiego rodzaju. W związku z tym, w metodzie

uproszczonej (wg [7]) założono, że istotne są szerokości rys jedynie przy powierzchni elementu, tj. w bezpośrednim otoczeniu prętów zbrojeniowych.

Powszechnym przykładem ograniczenia szerokości rys, jedynie w obszarze $A_{c,eff}$ jest zginana belka, w której zbrojenie skoncentrowane jest możliwie najbliżej, najbardziej rozciąganego włókna betonu. Wtedy też w wysokich belkach pomiędzy osią obojętną, a górną granicą efektywnej powierzchni ($A_{c,eff}$), tj. w rozciąganej, lecz niezazbrojonej części przekroju mogą wystąpić rysy w większym rozstawie, a tym samym o większej szerokości. Z tego też względu w EN 1992-1-1 [7] wymaga się, aby **dotatkowe** zbrojenie obliczone ze wzoru (12), było rozmieszczone przy obu bocznych ściankach przekroju, w rozstawie nie przekraczającym 300 mm. Zbrojenie to winno być rozmieszczone równomiernie na odcinku pomiędzy warstwą najbardziej rozciąganego zbrojenia oraz osią obojętną elementu. W szczególności wzór (12) dotyczy belek, w których odległość od dolnej ich krawędzi do dolnej krawędzi płyty jest większa niż 600 mm.

$$A_{s,web} = 0,2 f_{ct,eff} \cdot b_w (d - x - a_1) / f_{yk} \quad (12)$$

gdzie: a_1 – 150 mm.

Innym przykładem, w którym zwykle sprawdzane są szerokości rys, tylko w obszarze $A_{c,eff}$ są średnio-masywne ściany. Jednak w przypadku silnego przypowierzchniowego zbrojenia ścian, największe szerokości rys występują w ich wnętrzu [17]. W takiej sytuacji spełniony będzie warunek związany z trwałością oraz estetyką konstrukcji. Natomiast w konstrukcjach, od których wymaga się pełnej wodoszczelności, tak duże zmiany szerokości rys po grubości ściany, (przy odpowiednio wyższym ciśnieniu hydrostatycznym), może skutkować nieszczelnością konstrukcji. Zdecydowanie bardziej asekuracyjnym podejściem w tym zakresie są aktualne wytyczne EN 1992-3 [3]. Obecnie, w metodzie szczegółowej obliczania szerokości rys dla elementu skrupowanego na przeciwległych końcach, w wyrażeniu ($\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$) stosuje się rzeczywisty stopień zbrojenia. W konsekwencji wypadkowa naprężeń rozciągających obliczona jest na podstawie pełnego pola przekroju betonu rozciąganego (A_{ct}). Niemniej jednak, projektanci obliczone zbrojenie rozmieszczają głównie przypowierzchniach tych ścian. Z tego względu Flaga [5] zaproponował stosowanie dodatkowej siatki zbrojenia w środku grubych ścian.

Podsumowując, wg EN 1992-1-1 [7] zakłada się, że powstanie rys na całej rozciąganej powierzchni (w tym rys skrośnych) jest efektem oddziaływania większych sił przekrojowych niż sił powodujących powstanie rys drugiego rodzaju. Rysy II rodzaju wg modelu pręta wydzielonego powstają w przekroju $A_{c,eff}$ w którym ich rozstaw i ich szerokości są zdecydowanie mniejsze. W obliczeniach inżynierskich można zatem wyróżnić dwa rodzaje rys, co do których powstania można przyjąć zarówno innej wartości siły przekrojowej oraz inne założenia, co do dopuszczalnych ich szerokości lub dopuszczalnych naprężeń w zbrojeniu. Z tego też względu w EN 1992-1-1 [7], przyjęto zupełnie odrębne zależności (1-4) oraz (6-9) do obliczania minimalnej ilości zbrojenia w wyżej opisanych przypadkach. W pierwszej sytuacji, tj. powstania rys na całej rozciąganej powierzchni zakłada się dopuszczalny poziom naprężeń w zbrojeniu, na poziomie równym f_{yk} oraz całkowitą powierzchnią betonu rozciąganego (A_{ct}) tuż przed zarysowaniem. W drugiej sytuacji, tj. rys powstałych w efektywnie rozciągającym obszarze betonu ($A_{c,eff}$), gdzie konieczne jest ograniczenie szerokości rys do dopuszczalnej wartości ($w_{lim,ca}$), właściwym jest przyjęcie zdecydowanie niższego poziomu naprężeń w zbrojeniu, (tj. $\sigma_{s,lim}$ określonym na podstawie wzorów wynikających z metody szczegółowej). W jednej i drugiej sytuacji zakłada się, że wypadkowe siły wynikają z kryterium zarysowania, tj. osiągnięcia naprężeń rozciągających w betonie równych $f_{ct,eff}$

5. Minimalny stopień zbrojenia z uwagi na łączny aspekt powstania rys na całej powierzchni rozciąganego betonu oraz rys drugiego rodzaju

Zasadnicza różnica pomiędzy wzorami (1) i (2) wynika z innego rozkładu naprężeń tuż przed zarysowaniem. W EN 1992-1-1 [2] rozkład naprężeń uwzględniony jest we współczynniku k_c , który jest równy 0.4 dla zginania i 1.0 dla rozciągania osiowego. Skutkuje to zdecydowanie mniejszą ilością minimalnego zbrojenia w elementach zginanych, w stosunku do elementów rozciąganych. Współczynnik k_c dla przypadku zginania w [14] rozdzielono na iloczyn współczynników $k_{c1} \cdot k_{c2} = 0.8 \cdot 0.5$, gdzie $k_{c1} = 0.8$ dotyczy ramienia sił wewnętrznych przy zginaniu (i jest uwzględniony w równaniu (6)), natomiast współczynnik $k_{c2} = 0.5$ dotyczy rozkładu naprężeń w strefie rozciąganej tuż przed zarysowaniem. Wartość współczynnika $k_{c2} = 0.5$ w przypadku wysokich belek jest zbyt duża, gdyż dotyczy trójkątnego rozkładu naprężeń. Dlatego też założenie to nie jest adekwatne do rozkładu naprężeń w efektywnym polu wysokich elementów. Z tego względu współczynnik ten w wyrażeniach (6) i (8) został uwzględniony w funkcji wysokości przekroju [15]:

$$k_{c2} = (h - h_{c,eff}) / h \quad (13)$$

Następnie przyjmując bezwymiarową wartość siły podłużnej $v_i = N_{Ed} / (f_{ck} \cdot A_c)$ równania (8, 9), opisujące minimalną powierzchnię zbrojenia dla elementu mimośrodowo rozciąganego, przekształcono do zależności (14, 15) na minimalny stopień zbrojenia ρ_{min} oraz ρ'_{min} (tj. stopień zbrojenia odpowiednio po stronie bardziej i mniej rozciąganej). Równania (14, 15) opisują oba przypadki obliczeniowe, (tj. $\sigma_s \leq f_{yk}$ dla rys skośnych oraz $\sigma_s \leq \sigma_{s,lim}$ dla rys drugiego rodzaju):

$$\rho_{min} = \frac{0,5 - 0,4 \frac{h - h_{c,eff}}{h} \frac{h}{d} v_i f_{ck} + 0,8 \frac{h - h_{c,eff}}{h} \frac{h_{c,eff}}{d} f_{ct,eff}}{\sigma_{s,lim}} \begin{cases} \geq \frac{h}{d \cdot f_{yk}} (0,3 v_i f_{ck} + 0,2 k_h \cdot f_{ct,eff}) \\ \geq 0 \\ \leq \max \left(\frac{h_{c,eff}}{d} \frac{f_{ct,eff}}{\sigma_{s,lim}}; 0,5 k_h \frac{h}{d} \frac{f_{ct,eff}}{f_{yk}} \right) \end{cases} \quad (14)$$

$$\rho'_{min} = v_i \frac{h}{d} \frac{f_{ck}}{\sigma_{s,lim}} - \rho_{min} \begin{cases} \leq \rho_{min} \\ \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

Wartości graniczne siły osiowej zależne będą od rodzaju powstałej rysy, tj. rysy skośnej lub rysy II rodzaju. Z tego względu szczegółowe równania opisujące minimalny stopień zbrojenia w funkcji bezwymiarowej siły podłużnej v_i (które dotyczyłyby obu przypadków obliczeniowych musiałyby być bardziej złożone, tzn. należałoby za każdym razem dla wartości v_i określić, czy jest przypadek powstania rysy skośnej czy rysy w efektywnym przekroju. Z tego też względu, aby uprościć obliczenia w [15] po prawej stronie równania (14), (w stosunku do zależności (8)) dodano wyrażenia definiujące graniczne wartości ρ_{min} dla przypadków skrajnych. Wynikają one z kryterium powstania rys skośnych, w których dopuszcza się, aby naprężenia w zbrojeniu ograniczone były do wartości f_{yk} . Stąd też dodatkowa dolna granica $\rho_{min} = [h \cdot (0,3 v_i f_{ck} + 0,2 k_h \cdot f_{ct,eff})] / (d \cdot f_{yk})$ wynika z rozkładu naprężeń, przy którym $\rho'_{min} = 0$. Z kolei dodatkowa górna granica $\rho_{min} = (0,5 k_h \cdot h \cdot f_{ct,eff}) / (d \cdot f_{yk})$ dotyczy przypadku osiowego rozciągania [15]. W rzeczywistości w EN 1992-1-1 [7] przypadki powstawania rys skośnych oraz w efektywnym polu $A_{c,eff}$

opisywane są odrębnie, co oznacza, że należy przeprowadzić niezależne obliczenia wg jednych i drugich zależności, (tj. wg p. 9.2.2 [7] oraz p. S.3 [7]).

6. Graniczne naprężenia w zbrojeniu $\sigma_{s,lim}$

Wyznaczenie minimalnej powierzchni zbrojenia, bądź stopnia zbrojenia (wg wzorów (6-9) lub (14-15)) wymaga wcześniejszego obliczenia dopuszczalnych naprężeń w zbrojeniu ($\sigma_{s,lim}$). Wartości tych naprężeń zależne są od dopuszczalnych szerokości rys ($w_{lim,cal}$). Zależność na $\sigma_{s,lim}$ w [15] wyprowadzono w oparciu o zależności metody szczegółowej, które opisują szerokość rysy przy założeniu konkretnej średnicy prętów zbrojeniowych. Według [7] maksymalna szerokość rysy opisana jest wzorem:

$$w_{k,cal} = \beta_w \cdot k_{1/r} \cdot s_{r,m,cal} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (16)$$

W równaniu (16), $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$ jest różnicą pomiędzy średnimi odkształceniami zbrojenia i betonu. Natomiast $s_{r,m,cal}$ jest średnim, ustabilizowanym rozstawem rys. Wielkości te opisane są odpowiednio zależnościami (17) i (18) [16]:

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = (\sigma_{s,lim} - k_t \sigma_{sr}) E_s^{-1} \quad (17)$$

$$s_{r,m,cal} = 1,5c + k_f k_b \phi / 7,2 \rho_{p,eff} \quad (18)$$

Na tej podstawie równanie (16) przekształcono do równoważnej postaci:

$$w_{k,cal} = \beta_w \cdot k_{1/r} \left(1,5c + k_f k_b \phi / 7,2 \rho_{p,eff} \right) \frac{\sigma_{s,lim}}{E_s} \left(1 - k_t \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_{s,lim}} \right) \quad (19)$$

gdzie: k_{ff} – współczynnik uwzględniający rozkład naprężeń przed zarysowaniem, k_b – współczynnik uwzględniający pozycję pręta podczas betonowania, tj. warunki przyczepności betonu do prętów zbrojeniowych, k_t – współczynnik uwzględniający czas trwania obciążenia, jego charakter oraz stan zarysowania elementu, tj. ustabilizowany lub niustabilizowany układ rys, σ_{sr} – naprężenie w zbrojeniu, określone przy założeniu całkowicie zarysowanego przekroju, na skutek sił powodujących to zarysowanie.

W metodzie uproszczonej kontroli szerokości rys przyjęto, że $\sigma_s = \sigma_{sr}$. Założenie to wyklucza nie tylko przypadki, gdy $\sigma_s < \sigma_{cr}$ [12], ale również skrajne przypadki obciążeń większych niż te powodujące zarysowanie. Paradoksalnie założenie $\sigma_s = \sigma_{sr}$ dotyczy głównie przypadków o niustabilizowanym rozstawie rys, pomimo że rozstaw rys wg równania (17) obliczany jest przy założeniu ich ustabilizowanego rozstawu. Ponadto, określanie $\sigma_{s,lim}$ ma sens przy założeniu, że warunek powstania rys skrośnych nie jest decydującym warunkiem. Stąd też efektywny stopień zbrojenia na podstawie równania (8) został opisany w postaci [16]:

$$\rho_{p,eff} = \rho_{p,eff,min} = \frac{A_{s,min}}{A_{c,eff}} = \frac{1}{\sigma_{s,lim}} \left(\frac{N_{Ed,i}}{A_{c,eff}} \left(0,5 - 0,4 \frac{h - h_{c,eff}}{h} \right) + 0,8 \frac{h - h_{c,eff}}{h} f_{ct,eff} \right) \quad (20)$$

Po podstawieniu $\rho_{p,eff}$ wg równania (20) do równania (19) oraz założeniu w równaniu (20) $\sigma_{sr} = \sigma_{s,lim}$ otrzymano wyrażenie:

$$w_{k,cal} = \beta_w \cdot k_{1/r} \left(1,5c + \frac{1}{7,2} k_{\beta} k_b \phi \left(\frac{\sigma_{s,lim}}{(k_{p1} N_{Edi} / A_{c,eff}) + k_{p2} f_{ct,eff}} \right) \right) \frac{\sigma_{s,lim}}{E_s} (1 - k_t) \quad (21)$$

w którym: $k_{p1} = 0,5 - 0,4(h - h_{c,eff})/h$; $k_{p2} = 0,8(h - h_{c,eff})/h$.

Następnie po przekształceniach równania (21) z uwagi na $\sigma_{s,lim}$ otrzymuje się równanie drugiego stopnia:

$$\sigma_{s,lim}^2 + 1,5c \frac{(k_{p1} N_{Edi} / A_{c,eff}) + k_{p2} f_{ct,eff}}{k_{\beta} k_b \phi / 7,2} \sigma_{s,lim} - \frac{w_{k,cal} E_s}{\beta_w k_{1/r}} \frac{(k_{p1} N_{Edi} / A_{c,eff}) + k_{p2} f_{ct,eff}}{k_{\beta} k_b \phi (1 - k_t) / 7,2} = 0 \quad (22)$$

Skąd dopuszczalne naprężenie w stali zbrojeniowej określone jest na podstawie drugiego z pierwiastków tego równania wg wzoru:

$$\sigma_{s,lim} \leq \frac{(k_{p1} N_{Edi} / A_{c,eff}) + k_{p2} f_{ct,eff}}{k_{\beta} k_b \phi / 7,2} \left(-0,75c + \sqrt{0,56c^2 + \frac{w_{lim,cal} E_s k_{\beta} k_b \phi / \beta_w k_{1/r} 7,2}{(1 - k_t) ((k_{p1} N_{Edi} / A_{c,eff}) + k_{p2} f_{ct,eff})}} \right) \quad (23)$$

w którym wg EN 1992-1-1 [7]:

$$k_{\beta} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{h - x_g - h_{c,eff}}{h - x_g} \right) \quad (24)$$

gdzie: x_g – wysokość strefy ściskanej w przekroju niezarysowanym.

Równanie (23) definiuje $\sigma_{s,lim}$ dla przypadku ogólnego, tj. elementu zginanego z udziałem siły podłużnej. Metoda uproszczona opisana w EN 1992-1-1 [7] nie zawiera tego przypadku, co najprawdopodobniej podyktowane było koniecznością każdorazowego obliczenia wielkości k_{β} . Z kolei zmiany wartości k_{β} skutkowały niemożnością przyjęcia stałych wartości współczynników $k_{\sigma 1}$ i $k_{\sigma 2}$. Z tego względu równanie (23) w EN 1992-1-1 [7] przedstawiono w prostej postaci, tj. jedynie dla przypadków szczególnych, takich jak osiowe rozciąganie oraz czyste zginanie elementu o przekroju prostokątnym.

Ponadto, w [15] dla podstawowego przypadku zginania bez udziału siły podłużnej, przyjęto redukcję efektu usztywnienia poprzez współczynnik $k_t = 0,4$ oraz współczynnik $k_b = 0,9$, jak dla dobrych warunków przyczepności. Na podstawie tych założeń równanie (23) upraszcza się do postaci:

$$\sigma_{s,lim} \leq \frac{4,8 f_{ct,eff}}{\phi} \left(-c + \sqrt{c^2 + 0,46 \frac{E_s \phi w_{lim,cal} / \beta_w k_{1/r}}{f_{ct,eff}}} \right) \quad (25)$$

Przy założeniu słabych warunków przyczepności, tj. gdy współczynnik $k_b = 1,2$ nierówność przyjmuje postać:

$$\sigma_{s,lim} \leq \frac{3,6 f_{ct,eff}}{\phi} \left(-c + \sqrt{c^2 + 0,62 \frac{E_s \phi w_{lim,cal} / \beta_w k_{1/r}}{f_{ct,eff}}} \right) \quad (26)$$

Następnie dla elementu osiowo rozciąganego, (tj. $k_{\beta} = 1.0$ oraz analogicznych założeń jak wyżej, tj. odpowiednio dobrych i słabych warunków przyczepności) wartości dopuszczalnych naprężeń w zbrojeniu opisane są wg nierówności:

$$\sigma_{s,lim} \leq 6f_{ct,eff} / \phi \left(-c + \sqrt{c^2 + 0,37E_s \phi w_{lim,cal} / \beta_w f_{ct,eff}} \right) \quad (27)$$

$$\sigma_{s,lim} \leq 4,5f_{ct,eff} / \phi \left(-c + \sqrt{c^2 + 0,49E_s \phi w_{lim,cal} / \beta_w f_{ct,eff}} \right) \quad (28)$$

Tym samym zależność opisująca cztery w/w przypadki, tj. czyste zginania i osiowe rozciąganie, zarówno dla dobrych oraz słabych warunków przyczepności przyjmuje postać [7]:

$$\sigma_{s,lim} \leq k_{\sigma 1} f_{ct,eff} / \phi \left(-c + \sqrt{c^2 + k_{\sigma 2} E_s \phi w_{lim,cal} / \beta_w k_{1/r} f_{ct,eff}} \right) \quad (29)$$

gdzie: $k_{\sigma 1}$ – współczynnik naprężeń w zbrojeniu, który uwzględnia m. in. warunki przyczepności oraz rodzaj obciążenia. Współczynnik ten jest równy 4.8 dla zginania oraz 6 dla osiowego rozciągania (przy dobrych warunkach przyczepności) oraz odpowiednio 3.6 i 4.5 przy słabych warunkach przyczepności; $k_{\sigma 2}$ – współczynnik naprężeń w zbrojeniu, który uwzględnia m. in. warunki przyczepności, rodzaj obciążenia oraz efekt usztywnienia po zarysowaniu. Współczynnik ten jest równy 0.46 dla zginania oraz 0.37 dla osiowego rozciągania (przy dobrych warunkach przyczepności) oraz odpowiednio 0.62 i 0.49 przy słabych warunkach przyczepności.

7. Graniczne naprężenia w zbrojeniu przy oddziaływaniu odkształceń wymuszonych

Graniczne naprężenia w zbrojeniu określone wzorem (29) są właściwe dla obciążeń zewnętrznych oraz dla odkształceń wymuszonych w elemencie skrępowanym, na przeciwległych końcach. Zgodność ta wynika z identycznych założeń, dotyczących obliczania szerokości rys wg metody szczegółowej dla obu w/w przypadków [7]. Wyjątek stanowi element skrępowany wzdłuż krawędzi, dla którego wg metody szczegółowej różnica średnich odkształceń pomiędzy stałą zbrojeniową oraz betonem ($\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$) określona jest wg wzoru:

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = R_{ax} \varepsilon_{free} - k_t f_{ct,eff} / E_{cm} \quad (30)$$

gdzie: R_{ax} – współczynnik skrępowania, ε_{free} – swobodne odkształcenia wymuszone. Z tego względu zależność opisująca szerokość rys (wg metody szczegółowej [7]) dla tego przypadku ma postać:

$$w_{k,cal} = \beta_w k_{1/r} (1,5c + k_{\beta} k_b \phi / 7,2 \rho_{p,ef}) \left[R_{ax} \varepsilon_{free} - k_t f_{ct,eff} / E_{cm} \right] \quad (31)$$

co po uproszczeniu wyrażenia opisującego efektywny stopień zbrojenia jak dla pasma wydzielonego elementu osiowo rozciąganego, tj.:

$$\rho_{p,ef} = f_{ct,eff} / \sigma_{s,lim} \quad (32)$$

oraz po przekształceniach prowadzi do zależności:

$$\sigma_{s,lim} \leq 10,8 f_{ct,eff} / k_b \phi \left(\frac{0,39 w_{lim,cal}}{R_{ax} \varepsilon_{free} - k_t \varepsilon_{ctu}} - c \right) \quad (33)$$

Podsumowując równania (29, 33), dają podstawę do określenia dopuszczalnych naprężeń od odkształceń wymuszonych, odpowiednio w elemencie skrępowanym na przeciwległych końcach i w elemencie skrępowanym wzdłuż krawędzi. W pierwszym przypadku jest możliwość superponowania naprężeń w zbrojeniu od tych odkształceń z naprężeniami od obciążeń zewnętrznych.

8. Analizy obliczeniowe

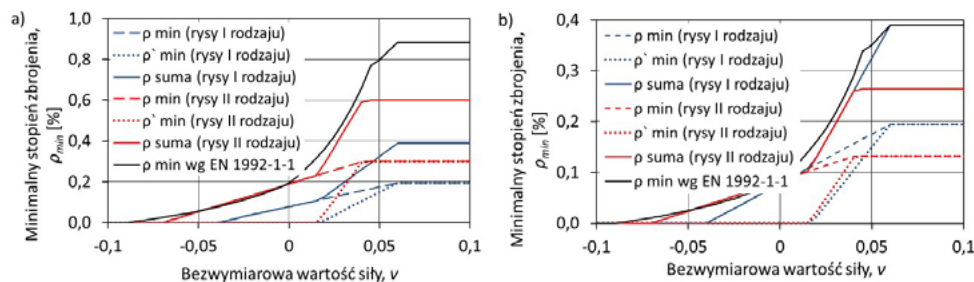
7.1. Minimalny stopień zbrojenia w elemencie zginanym w zależności od bezwymiarowej siły podłużnej

Na rysunku 2 przedstawiono zmianę minimalnego stopnia zbrojenia (ρ_{min} , ρ'_{min}) w elemencie zginanym, w zależności od bezwymiarowej siły podłużnej v . Obliczenia wykonano dla przekroju o wysokości $h = 0,6$ m (z uwzględnieniem współczynnika k_b), klasy betonu C30/37, średnicy zbrojenia $\Phi = 16$ mm, stosunku $d/h = 0,923$ oraz grubości otulenia $c = 30$ mm. W obliczeniach przyjęto zgodnie z [7], iż w chwili powstania rys I rodzaju dopuszczalne naprężenia w zbrojeniu są równe $f_{yk} = 500$ MPa, podczas gdy przy powstaniu rys II rodzaju przyjęte są dwa warianty naprężeń $\sigma_{s,lim} = 220$ MPa (rys. 2a) oraz 500 MPa (rys. 2b). Ponadto, minimalny stopień zbrojenia obliczono wg EN 1992-1-1 [2] dla obu wariantów $\sigma_{s,lim}$. W pierwszym wariantcie o ilości zbrojenia minimalnego (wg [7]) decyduje warunek dotyczący rys II rodzaju, tj. warunek związany z koniecznością ograniczenia szerokości rys w obszarze efektywnego pola $A_{ct,eff}$ (linie czerwone).

W drugim wariantcie (rys. 2b), tj. gdy nie narzuca się warunku związanego z ograniczeniem szerokości rys do konkretnej wartości o ilości zbrojenia:

- w elemencie rozciągany (począwszy od wartości $v = 0,015$), decyduje warunek związany z powstaniem rys I rodzaju (niebieska przerywana linia),
- w elemencie mimośrodowo ściskanym, decyduje warunek związany z powstaniem rys II rodzaju (czerwona ciągła linia),
- w pozostałym zakresie (tj. $v \in (0; 0,015)$), sumy minimalnego stopnia zbrojenia po przeciwległych stronach ($\rho_{min} + \rho'_{min}$) są porównywalne dla warunku powstania rys I oraz II rodzaju.

Z obliczeń wykonanych wg aktualnej normy [2] wynika, że przy założeniu dopuszczalnych naprężeń na poziomie $f_{yk} = 500$ MPa, wyniki są (z pewną asekuracją) zgodne z [7] (rys. 2b). Natomiast dla wariantu naprężeń $\sigma_{s,lim} = 220$ MPa (rys. 2a) wg wytycznych [2], otrzymano zdecydowanie większą ilość wymaganego stopnia zbrojenia dla przypadku osiowego rozciągania. Wynika to z założenia w [2] całej rozciąganej powierzchni betonu (A_{ct}), a nie efektywnej powierzchni $A_{ct,eff}$.



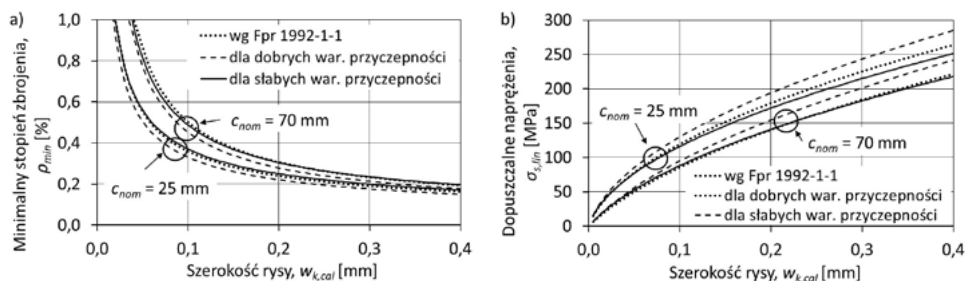
Rys. 2. Minimalny stopień zbrojenia w zależności od naprężeń $\sigma_{s,lim}$ w przekroju rys II rodzaju: a) $\sigma_{s,lim} = 220$ MPa i b) $\sigma_{s,lim} = 500$ MPa

Fig. 2. Minimum degree of reinforcement depending on the stresses $\sigma_{s,lim}$ in the cross-section of type II cracks: a) $\sigma_{s,lim} = 220$ MPa and b) $\sigma_{s,lim} = 500$ MPa

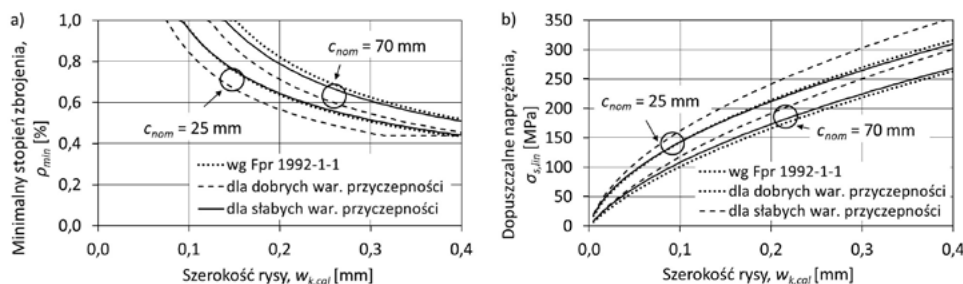
7.2. Minimalny stopień zbrojenia oraz dopuszczalne naprężenia w zbrojeniu dla przypadków podstawowych

Na kolejnych rysunkach 3 i 4 przedstawiono zmiany minimalnego stopnia zbrojenia oraz dopuszczalnych naprężeń $\sigma_{s,lim}$ odpowiednio dla czystego zginania i osiowego rozciągania. W obliczeniach przyjęto wysokość przekroju $h = 0,5$ m, stosunek $d/h = 0,9$, średnicę zbrojenia $\varnothing = 12$ mm oraz klasę betonu C30/37. Obliczenia wykonano dla dwóch wariantów otulenia jak w [15]: $c = 25$ i 70 mm. Obliczenia wykonano kolejno dla: współczynników zawartych w [7], wg propozycji uszczegółowionej oraz dla słabych warunków przyczepności. W komentarzu [15] zaprezentowano odmienne wyniki dla normy [7], co wynika z omyłkowej zamiany współczynników, właściwych dla czystego zginania i osiowego rozciągania. W związku z tym, że w [7] przyjęto zmniejszone wartości współczynników k_{o2} , odpowiednio z 0.46 do 0.4 dla czystego zginania i z 0.37 do 0.3 dla osiowego rozciągania, obliczenia wykonano również dla wartości dokładnych. Z otrzymanych wyników można wnioskować, że rezultaty wg EN 1992-1-1 [7] są po stronie bezpiecznej i są one bliższe rozwiązaniu jak dla słabych warunków przyczepności. Tym samym można stwierdzić, że wartości współczynników k_{o2} w propozycji EN 1992-1-1 [7] są przyjęte konserwatywnie.

W elementach zginanych dla szerokości rys od 0.3 do 0.4 mm, stopień zbrojenia minimalnego wynosi około 0.2 % (rys. 3a). W przypadku osiowego rozciągania wartości i różnice w ρ są zdecydowanie większe, przez co w tym przypadku bardziej zasadne jest uwzględnienie doprecyzowanych wartości współczynników k_{o1} i k_{o2} .

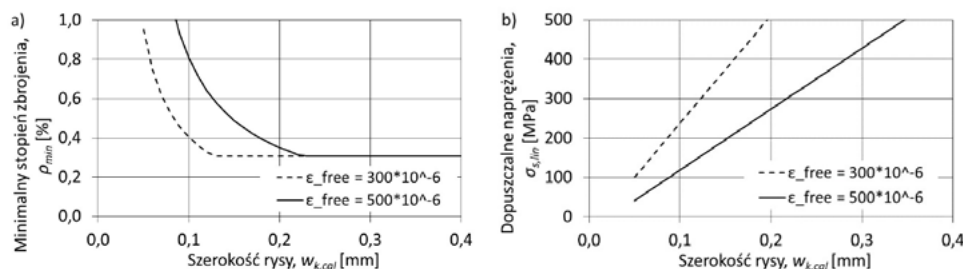


Rys. 3a) Minimalny stopień zbrojenia w elemencie zginanym, w zależności od szerokości rys II rodzaju, b) dopuszczalne naprężenia w elemencie zginanym wg wzoru (29), w zależności od szerokości rys II rodzaju
Fig. 3a) Minimum degree of reinforcement in the bending element depending on the width of type II cracks, b) permissible stresses in the bending element according to formula (29) depending on the width of type II cracks



Rys. 4a) Minimalny stopień zbrojenia w elemencie rozciągany, w zależności od szerokości rys II rodzaju, b) dopuszczalne naprężenia w elemencie rozciągany wg wzoru (29) w zależności od szerokości rys II rodzaju
 Fig. 4a) Minimum degree of reinforcement in the tensile element depending on the width of type II cracks, b) permissible stresses in the tensile element according to eq. (29) depending on the width of type II cracks

Na rysunkach 5a i b przedstawiono, odpowiednio minimalny stopień zbrojenia oraz dopuszczalne naprężenia $\sigma_{s,lim}$ dla elementu skrupowanego wzdłuż krawędzi. W obliczeniach przyjęto $f_{ct,eff} \approx 0.7f_{ctm}$ (jak dla dojrzewającego betonu klasy C30/37), słabe warunki przyczepności $k_b = 1.2$, współczynnik $k_t = 0.4$ jak dla nieustabilizowanego układu rys, współczynnik skrupowania $R_{ox} = 0.5$, grubość otulenia $c = 40$ mm, średnicę zbrojenia $\varnothing = 20$ mm oraz odkształcenie graniczne dojrzewającego betonu $\epsilon_{ctu} = 0.00005$. Przyjęto również dwa warianty możliwych odkształceń ϵ_{free} równe odpowiednio 300 i $500 \cdot 10^{-6}$ (rys. 5b). Nieliniowe części wykresu na rys. 5a wynikają z nieliniowych zmian dopuszczalnych naprężeń $\sigma_{s,lim}$. Część liniowa wykresu wynika z warunku ograniczenia naprężeń $\sigma_{s,lim}$ do wartości 500 MPa. Tym samym można stwierdzić, że znaczenie wzoru (33) ma miejsce jedynie dla dużych wartości odkształcenia ϵ_{free} , przy jednoczesnej konieczności ograniczenia szerokości rys do wartości nie większych niż 0.2 mm. Sytuacja ta często występuje w konstrukcjach średnio-masywnych oraz masywnych, w których wymaga się spełnienia warunku wodoszczelności.



Rys. 5 a) Minimalny stopień zbrojenia elementu skrupowanego wzdłuż krawędzi, b) dopuszczalne naprężenia $\sigma_{s,lim}$ dla elementu skrupowanego wzdłuż krawędzi
 Fig. 5 a) Minimum degree of reinforcement of an element restrained along the edges, b) permissible stresses $\sigma_{s,lim}$ for an element restrained along the edges

9. Wnioski

W niniejszym artykule skomentowano i uszczegółowiono metodę uproszczoną kontroli zarysowania, zawartą w znowelizowanej normie EN 1992-1-1 [7]. Uszczegółowienie obejmuje warunki przyczepności, jakie mogą mieć miejsce głównie w konstrukcjach średnio-masywnych i masywnych. Zaprezentowane uzupełnienie ma większe znaczenie w przypadku elementu osiowo rozciąganego, niż przy czystym zginaniu.

Przedstawiono propozycję określania dopuszczalnych naprężeń w stali zbrojeniowej, od odkształceń wymuszonych dla elementu skrępowanego wzdłuż krawędzi. Zależności te mają znaczenie w przypadkach o znacznej wartości odkształceń wymuszonych i przy jednoczesnej konieczności dopełnienia warunku wodoszczelności.

Zasadniczą zmianą w znowelizowanej normie EN 1992-1-1 [7] względem EN 1992-1-1 [2], jest rozróżnienie rys powstałych na całej rozciąganej powierzchni betonu (A_{cr}) oraz rys powstałych w efektywnym polu ($A_{c,eff}$), tj. rys pierwszego i drugiego rodzaju. Podział ten przy zastosowaniu metody uproszczonej kontroli rys daje podstawę do ekonomiczniejszego wyznaczenia ilości zbrojenia minimalnego, zwłaszcza w przypadku elementów osiowo rozciąganych, o większym przekroju poprzecznym.

Nowelizacja normy EN 1992-1-1 [7] w zakresie określania zbrojenia minimalnego, w kontekście metody uproszczonej kontroli zarysowania, ma bardziej spójną postać z metodą szczegółową, niż ma to obecnie miejsce w aktualnej normie EN 1992-1-1 [2]. Jest to związane z zastosowaniem w [7] efektywnego stopnia zbrojenia w metodzie uproszczonej kontroli szerokości rys II rodzaju. W tym też zakresie norma [2] prezentuje bardzo konserwatywne rozwiązanie.

W przypadku jednoczesnego oddziaływania obciążeń zewnętrznych oraz odkształceń wymuszonych, w schemacie elementu skrępowanego na przeciwległych końcach, zasadne jest porównanie naprężeń σ_s będących łącznym efektem tych oddziaływań, z wartością dopuszczalną $\sigma_{s,lim}$ określoną wg równania uogólnionego. W przypadku elementu skrępowanego wzdłuż krawędzi również należy dokonywać superponowania naprężeń σ_s , a wartość tę należy porównać z mniejszą spośród wartości $\sigma_{s,lim}$ określonych dla obciążeń zewnętrznych oraz odkształceń wymuszonych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] CEB-FIP fib Model Code 2013. Model code for concrete structures 2010. Ernst & Sohn.
- [2] EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2004.
- [3] EN 1992-3: Eurocode 2: Design of concrete structures Part 3: Silos and tanks, 2006.
- [4] Favre R., et al.: Cracking and deformations, Comite Euro-International du Beton, Suisse 1985.
- [5] Flaga K.: Naprężenia skurczowe i zbrojenie przypowierzchniowe w konstrukcjach betonowych. Monografia 391 Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2011. ISSN 0860-097X.
- [6] Flaga K., Klemczak B., Knoppik-Wróbel A.: Wczesne rysy termiczno-skurczowe w ścianach przyczółków mostowych. W. Inżynieria i Budownictwo 4/2013. ISSN 0021-0315.
- [7] EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-1: General rules and rules for buildings, 11-2023.
- [8] prEN 1992-1-1: Draft of Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-1: General rules and rules for buildings, 09-2021.
- [9] Halicka A., Franczak-Balmas D.: Żelbetowe zbiorniki na ciecze i materiały sypkie, PWN, Warszawa 2020. ISBN 9788301211196.
- [10] Jędrzejewska, A., Kanavaris, F., Zych, M., Schlicke, D., Azenha, M.: Experiences on early age cracking of wall-on-slab concrete structures. W. Structures 27/2020. ISSN 2352-0124.
- [11] Kiernożycki W.: Betonowe konstrukcje masywne, Polski Cement, Kraków 2003. ISBN 83-89478-00-5.
- [12] Knauff M.: Obliczanie konstrukcji żelbetowych wg Eurokodu 2, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2018. ISBN 978-83-01-18146-8.
- [13] Knauff A., Golubińska A., Knyziak P.: Tablice i wzory do projektowania konstrukcji żelbetowych z przykładami obliczeń. PWN, Warszawa 2014. ISBN 9788301203481.
- [14] Perez Caldentey A., García R., Corres Peiretti H.: Minimum reinforcement revisited. W. Structural Concrete, 19/2018, ISSN 1464-4177.
- [15] Perez Caldentey A.: Background document to subsection 9.2.3 of prEN 1992-1-1, 2021.
- [16] Schlicke D., Tue N. V.: Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite unter Berücksichtigung des tatsächlichen Bauteilverhaltens, Teil 2: Anwendung für Wände auf Fundamenten und Abgrenzung zum Risskraftnachweis nach EC2. W. Beton- und Stahlbetonbau 111(4)/2016. ISSN 0005-9900.
- [17] Seruga A., Zych M.: Research on Thermal Cracking of a Rectangular RC Tank Wall under Construction. I: Case Study. W. J. Perform. Constr. Facil. 30(1)/2016. ISSN 0887-3828.
- [18] Urbaniak E., Jędrzejewska A.: Rozwój właściwości betonu w ujęciu draftu prEN 1992-1-1:2021, W. Przegląd Budowlany 1112/2022. ISSN 0033-2038.
- [19] Zych M., Jędrzejewska A.: Komentarz do Załącznika D prEN 1992-1-1 w zakresie odkształceń wymuszonych. W. Inżynieria i Budownictwo 1112/2021. ISSN 0021-0315.
- [20] Zych M.: Metoda uproszczona sprawdzania stanu granicznego zarysowania od obciążeń zewnętrznych i wymuszonych w projekcie nowelizacji zaleceń normowych. W. Inżynieria i Budownictwo 12/2023. ISSN 0021-0315.

MINIMUM DEGREE OF REINFORCEMENT IN THE CONTEXT OF THE SIMPLIFIED METHOD OF CRACK CONTROL IN THE AMENDMENT TO STANDARD RECOMMENDATIONS

ABSTRACT

The simplified method of crack control proposed in the amendment of EN 1992-1-1 standard is commented on and further refined. Specification of allowable strain imposed stresses in reinforcing steel for a member restrained along its edges is proposed. Substantial amendments to the amendment of EN 1992-1-1 compared with EN 1992-1-1 are presented. A case of simultaneous impact of external loads and imposed strains in the scheme of a member restrained at its opposite ends and a member restrained along its edges is discussed.

KEYWORDS

Cracking of concrete, minimum degree of reinforcement, imposed strains, codes



Artykuł udostępniony na licencjach Creative Commons/ Article distributed under the terms of Creative Commons licenses: Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0). License available: www.creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/