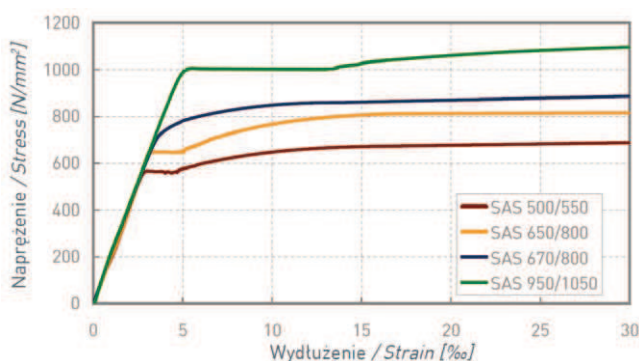


Wpływ zbrojenia przypowierzchniowego na szerokość rys w świetle norm PN-EN 1992-1-1 oraz ACI 318

Mgr inż. Iga Rewers, Politechnika Krakowska

1. Wprowadzenie

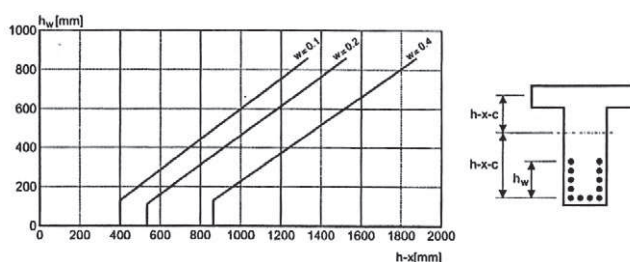
Na polskim rynku zaczęto stosować stal SAS 670/800. Jest to stal, której granica plastyczności znajduje się pomiędzy typowym zbrojeniem a stalą sprężającą. Aprobata [3] wskazuje przeznaczenie wspomnianej stali na zbrojenie elementów ściskanych. Zaczęto rozważać możliwość wykorzystania jej również do elementów belkowych. Niesie to jednak za sobą ryzyko nadmiernego zarysowania, spowodowane podwyższoną wytrzymałością na rozciąganie przy module sprężystości wynoszącym 205 GPa. Rozwiązaniem tego problemu mogłoby być zastosowanie zbrojenia przypowierzchniowego. Reguły dotyczące tego zbrojenia oraz zasady obliczania szerokości rys przedstawione są w niniejszym artykule. Praca nie obejmuje zagadnień związanych z zastosowaniem zbrojenia przypowierzchniowego w przypadkach oddziaływań pośrednich, takich jak skurcz i termika. Przypadki takie są omówione wyczerpująco między innymi w [4].



Rys. 1. Zależność naprężenie – odkształcenie [10]

2. Reguły dotyczące zbrojenia przypowierzchniowego

Według PN-EN 1992-1-1 [8] zbrojenie przypowierzchniowe należy stosować, gdy: średnica wiązki prętów lub pojedynczego pręta przekracza 32 mm, otulina zbrojenia jest większa niż 70 mm lub wysokość belki



Rys. 2. Wysokość, na jaką powinno sięgać zbrojenie przypowierzchniowe, aby zapobiec przekroczeniu szerokości rys poza efektywną strefą rozciągania [7]

przekracza 1000 mm. Norma [8] definiuje pole przekroju takiego zbrojenia, jego rozstaw oraz wysokość, na jaką powinno sięgać.

Norma ACI 318R [1] wymaga użycia zbrojenia przypowierzchniowego, gdy wysokość belki przekroczy 36 in., czyli 91 cm. Zbrojenie to ma sięgać do połowy wysokości belki, a jego rozstaw oblicza się ze wzoru:

$$s = 380 \left(\frac{280}{f_s} \right) - 2,5c_c \quad (1)$$

ale nie może przekraczać: $380 (280/f_s)$

gdzie:

f_s – obliczeniowe naprężenie zbrojenia znajdującego się najbliższej rozciąganej krawędzi elementu, można przyjmować wartość $2/3 f_y$, MPa,

c_c – najmniejsza odległość między powierzchnią zbrojenia a boczną krawędzią elementu, mm.

Norma [1] nie stawia wymagań co do średnicy zbrojenia powierzchniowego ani jego pola powierzchni.

Model Code 2010 [7] zawiera nomogram (patrz rys. 2), który umożliwia odczytanie wysokości, na jaką powinno sięgać zbrojenie przypowierzchniowe. Nie podaje natomiast wytycznych odnośnie wielkości średnicy prętów zbrojeniowych, ich pola powierzchni czy rozstawu.

3. Badania szerokości rys w belkach wysokich o zróżnicowanym zbrojeniu przypowierzchniowym

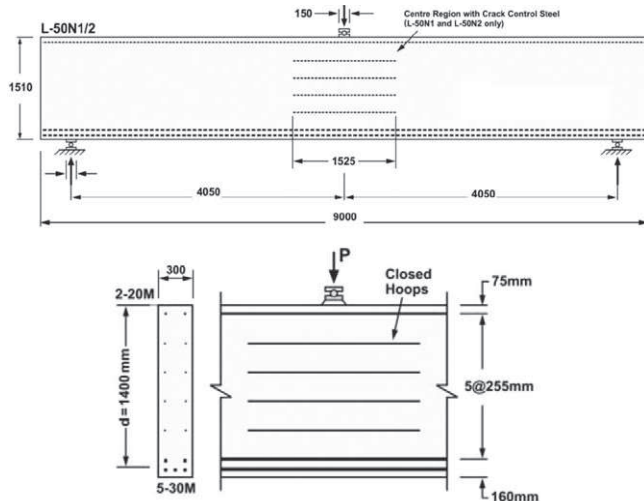
Badania zawarte w [9] miały na celu sprawdzenie, czy przepisy normowe mogą nie stawiać wymagań

co do średnicy zbrojenia przypowierzchniowego. W tym celu wysokie belki żelbetowe poddano trójpunktowemu zginaniu (patrz tab. 1., rys. 3). W badanych belkach zastosowano dwa typy zbrojenia przypowierzchniowego: zbrojenie z prętów D4 (element L-50N1) i z prętów 15M (element L-50N2). Element L-50N2 nie miał zbrojenia przypowierzchniowego.

Wyniki badań doświadczalnych zostały porównane z wynikami prognozowanymi według normy ACI 318 [1].

Tabela 1. Dane dotyczące wybranych elementów badanych w pracy [9]

Element	Wiek [dni]	f_c' [MPa]	Max rozmiar kruszywa [mm]	Średnica zbrojenia przypowierzchniowego
L-10N2	133	40,3	9,5	-
L-50N1	29	41,0	51	D4; 5,7 mm
L-50N2	48	40,1	51	15M; 16 mm



Rys. 3. Schemat badanych elementów i ich zbrojenia [9]

4. Kontrola szerokości i rozstawu rys

4.1. Podejście amerykańskie – ACI 318 [1]

Omówione poniżej prace [5], [6] stanowiły podstawę do wprowadzenia zmian w ACI-318R-05.

W 1999 r. Frosch R. J. opublikował pracę [5], w której zaproponował wzór na obliczanie szerokości rys, oparty na rozważaniu modelu fizycznego pęknięcia elementu:

$$w_c = \epsilon_s S_c \quad (2)$$

gdzie:

S_c – rozstaw rys,

ϵ_s – odkształcenie stali zbrojeniowej:

$$\epsilon_s = \frac{f_s}{E_s} \quad (3)$$

gdzie:

f_s – naprężenie w stali zbrojeniowej,

E_s – moduł sprężystości stali.

Równanie (2) jest oparte na założeniu, że odkształcenie stali jest jednakowe na długości pomiędzy rysami. Frosch R. J. świadomie pomija w nim udział betonu rozciąganego, co powoduje niewielkie przeszacowanie szerokości rys.

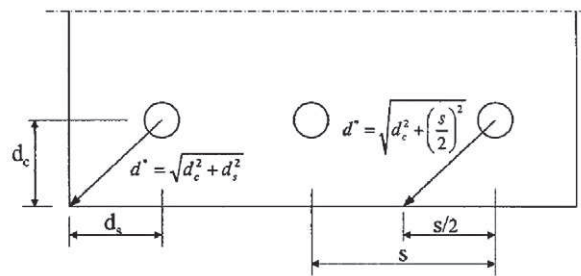
Wzór potrzebny do obliczenia szerokości rys ma następującą postać:

$$S_c = \Psi_s d^* \quad (4)$$

gdzie:

Ψ_s – współczynnik rozstawu rys, przyjmuje wartości: 1,0 dla minimalnego rozstawu rys, 1,5 dla średniego rozstawu rys i 2,0 dla maksymalnego rozstawu rys,

d^* – wielkość uwzględniająca otulenie pręta i jego odległość do najbliższego pręta lub do krawędzi elementu (patrz rys. 4).



Rys. 4. Graficzna interpretacja wielkości d^* [5]

W 2002 roku ukazała się kolejna praca R. J. Froscha [6] dotycząca szacowania szerokości rys. Jej celem było ujednoczenie zapisów dla rys na krawędziach dolnej i bocznych. Podany jest w niej wzór na obliczenie szerokości rozwarcia rys:

$$w_s = \Psi_s \epsilon_x d_x^* \quad (5)$$

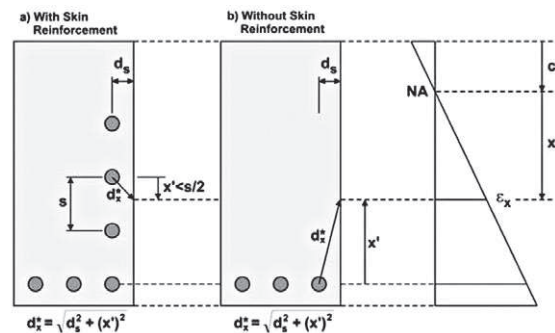
gdzie:

ϵ_x – podłużne odkształcenie w odległości x od osi obrotowej,

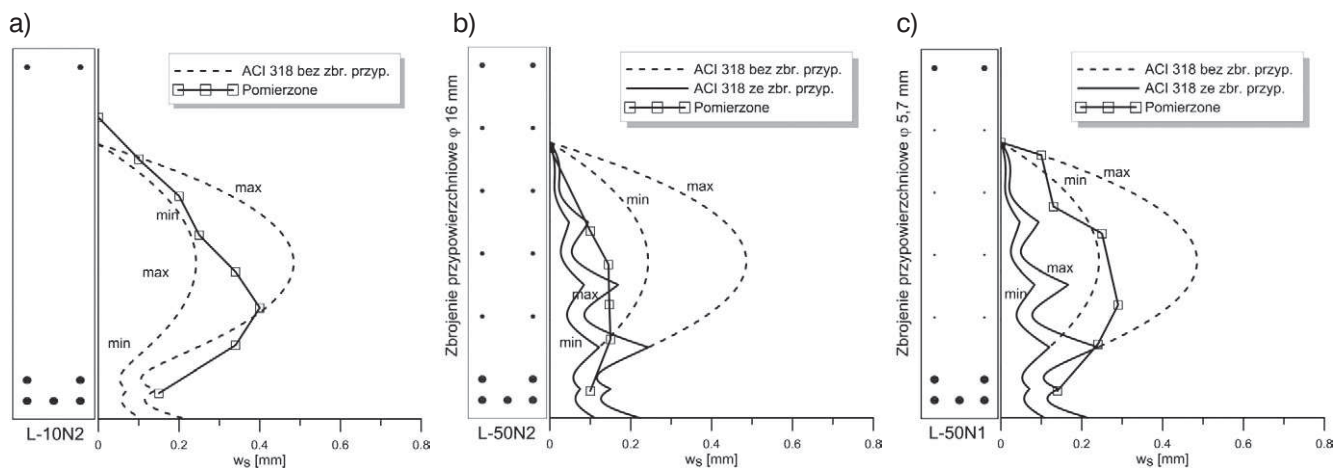
d_x^* – wielkość uwzględniająca grubość otuliny i odległość x od najbliższego pręta, równa $\sqrt{(x')^2 + d_s^2}$ (patrz rys. 5),

Ψ_s – j.w.,

x' – pionowa odległość punktu x do najbliższego pręta zbrojeniowego.



Rys. 5. Wpływ zbrojenia przypowierzchniowego [9]



Rys. 6. Najszersze pomierzone rysy w części środkowej belki (linia ciągła z kwadratowymi znacznikami) i prognozowane szerokości rys w przypadku występowania zbrojenia przypowierzchniowego (linia ciągła) oraz braku takiego zbrojenia (linia przerywana) [9]

Ze wzoru można wywnioskować, że rysy będą coraz szersze wraz z oddalaniem się od zbrojenia, co pokrywa się z badaniami. Wzory nie uwzględniają w bezpośredni sposób średnicy zbrojenia. Frosch R. J. uznał, że dowolna średnica pręta może być wykorzystana jako zbrojenie przypowierzchniowe. Wyniki badań Sherwooda E. G. [9] przeczą tej tezie (patrz rys. 6).

W przypadku braku zbrojenia przypowierzchniowego równanie (5) dobrze opisuje szerokości rys (rys. 6a). Pomierzone wartości mieszczą się pomiędzy minimalnymi a maksymalnymi prognozowanymi wielkościami wyliczonymi z założeniem odpowiednio $\Psi_s = 1,0$ i $\Psi_s = 2,0$.

Obliczone szerokości rys dla elementu ze zbrojeniem przypowierzchniowym o średnicy 16 mm również dobrze przewidują pomierzone wartości (rys. 6b). Zgodność ta nie występuje natomiast w przypadku zastosowania zbrojenia przypowierzchniowego o średnicy 5,7 mm. Jak widać (rys. 6c) w tym przypadku realne wielkości rys lepiej się wpisują w wykresy stworzone przy założeniu braku istnienia zbrojenia przypowierzchniowego, niż przy uwzględnieniu rzeczywistego zbrojenia.

Badania Sherwooda E. G. [9] wykazały, że średnica i pole powierzchni zbrojenia przypowierzchniowego mają jednak wpływ na szerokość rys. Nasuwa się wniosek, że w pozycjach normatywnych konieczny jest zapis wskazujący jakie średnice prętów należy stosować jako zbrojenie przypowierzchniowe.

4.2. Podejście europejskie – PN-EN 1992-1-1 [8]

Interesujące wydaje się, jak otrzymane wyniki badań Sherwooda E. G. [9] wpisują się w reguły zawarte w PN-EN 1992-1-1 [8]. Norma ta podaje wzór na obliczenie szerokości rys:

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

gdzie:

$s_{r,max}$ – maksymalny rozstaw rys,

ε_{sm} – średnie odkształcenie zbrojenia obliczone z uwzględnieniem wpływu odkształceń wymuszonych oraz wpływu usztywnienia przy rozciąganiu,

ε_{cm} – średnie odkształcenie betonu między rysami.

Różnicę średnich odkształceń betonu i stali oblicza się z poniższego wzoru:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_c \rho_{p,eff})}{E_s} \quad (7)$$

lecz nie mniej niż: $0,6 \sigma_s / E_s$

gdzie:

σ_s – naprężenie w zbrojeniu rozciągającym, przy założeniu, że przekrój jest zarysowany,

k_t – współczynnik zależny od czasu trwania obciążenia,

$\rho_{p,eff}$ – stopień zbrojenia obliczony ze wzoru (8),

α_c – stosunek E_s / E_{cm} ,

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}} \quad (8)$$

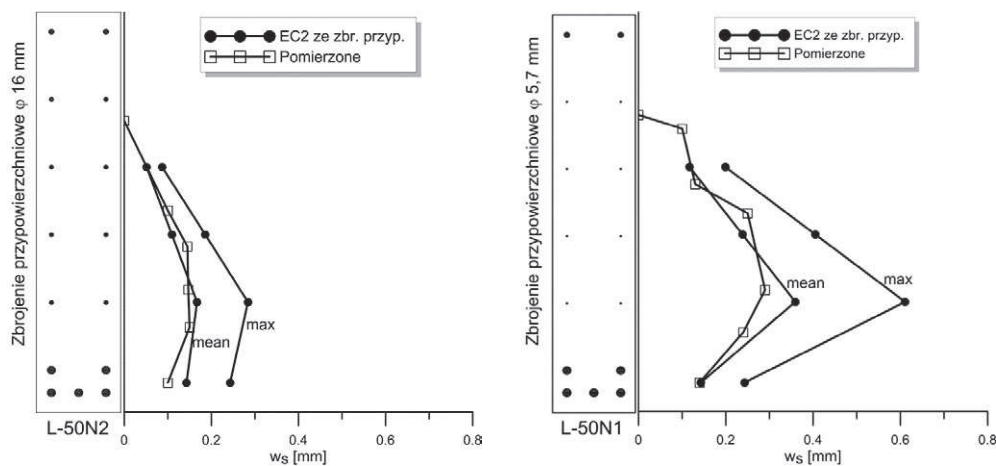
gdzie:

$A_{c,eff}$ – efektywne pole betonu rozciąganego otaczającego zbrojenie lub ciągną sprężające.

W związku z tym, że wzór na szerokość rys zawiera różnicę pomiędzy uśrednionymi odkształceniami stali i betonu, szerokości rys można obliczać wyłącznie w miejscach występowania prętów zbrojeniowych, a nie na dowolnej wysokości belki.

Norma [8] nie precyzuje, jak należy przyjmować $A_{c,eff}$ dla zbrojenia przypowierzchniowego. Autorka w obliczeniach posłużyła się zapisem znajdującym się w CSA [2], który pozwalał przyjąć wysokość efektywnego pola równą sumie średnicy zbrojenia i dwukrotności otuliny.

Rozstaw zbrojenia rozciąganego nie przekraczał 5 $(c + \varphi / 2)$, dlatego przy obliczaniu rozstawu rys należało skorzystać ze wzoru:



Rys. 7.
Porównanie obliczonych szerokości rys wg PN-EN 1992-1-1 [8] z wartościami pomierzonymi w badaniu [9]

$$s_{r,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \frac{\varphi}{\rho_{p,eff}} \quad (9)$$

gdzie:

c – grubość otuliny zbrojenia podłużnego,

φ – średnica zbrojenia,

k_1 – współczynnik zależny od przyczepności zbrojenia,

k_2 – współczynnik zależny od rozkładu odkształceń,

k_3 – wartość zalecana $2 \cdot 1,7 = 3,4$,

k_4 – wartość zalecana $0,25 \cdot 1,7 = 0,425$.

Warto zwrócić uwagę, że rozstaw rys powinno się obliczać dla każdego poziomu zbrojenia osobno, gdyż realny rozstaw jest zmienny po wysokości belki.

Jak widać, wg PN – EN 1992-1-1 [8] przy obliczaniu szerokości rys brany jest pod uwagę nie tylko rozstaw zbrojenia, ale i jego średnica. Przy tym samym rozstawie zbrojenia, ale różnych wielkościach średnic prognozowane szerokości rys wg EC2 znacznie od siebie odbiegają (rys 7a i b)). Natomiast bez względu na wielkość średnicy zbrojenia obliczenia te dobrze przewidyują szerokości rys.

5. Podsumowanie

W pracy przedstawione zostały wymagania dotyczące zbrojenia przypowierzchniowego stawiane przez PN-EN 1992-1-1 [8], ACI 318 [1], Model Code 2010 [7]. Następnie zaprezentowano badania sprawdzające wpływ średnicy zbrojenia przypowierzchniowego na szerokości rys. Ich wyniki zostały porównane z wartościami obliczonymi wg ACI 318 [1] i PN-EN 1992-1-1 [8].

Wykonanie obliczeń szerokości rys wymagało szczególnego podejścia do zapisów PN-EN 1992-1-1 [8], ponieważ reguły w nim zawarte są przeznaczone dla zbrojenia skoncentrowanego u dołu belki, a nie rozmieszczonego po jej wysokości. Natomiast wzór Froscha R. J. jest sformułowany dla zbrojenia przypowierzchniowego.

W artykule zwrócono uwagę, że wzory na wyznaczenie szerokości rys zawarte w ACI 318 [1] nie uwzględniają

w sposób bezpośredni wartości średnicy zbrojenia przypowierzchniowego. Badania E. G. Sherwooda [9] wykazały, że średnica i pole powierzchni tego zbrojenia mają wpływ na szerokość rys. Można wnioskować z tego, że wytyczne mówiące o zbrojeniu przypowierzchniowym powinny zawierać informacje nie tylko o rozstawie, ale również o średnicy wymaganego zbrojenia lub o jego polu powierzchni.

Procedura obliczania rys zawarta w PN-EN 1992-1-1 [8] dobrze opisuje wyniki badań E. G. Sherwooda [9].

Autorka planuje wykonanie analizy numerycznej w programie Abaqus obejmującej belki L-50N1 i L-50N2 w celu porównania wyników analitycznych z doświadczalnymi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 318R-14, American Concrete Institute, Farmington Hills
- [2] CSA Committee A23.3, Design of Concrete Structures, Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario, 2004
- [3] ETA-13/0840, Europejska Aprobata Techniczna. System zbrojenia wysokiej wytrzymałości SAS 670
- [4] Flaga K., Naprężenia skurczowe i zbrojenie przypowierzchniowe w konstrukcjach betonowych, Monografia 391, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2011
- [5] Frosch R. J., Another look at cracking and crack control in reinforced concrete, ACI Structural Journal, Vol. 96, No. 3, Maj, str. 437-442, 1999
- [6] Frosch R. J., Modelling and control of side face beam cracking, ACI Structural Journal, Vol. 99, No. 3, Maj-Czerwiec, str. 376-385, 2002
- [7] Model Code 2010, final draft, Volume 2, International Federation for Structural Concrete, 2012
- [8] PN-EN 1992-1-1:2008 – Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [9] Sherwood E. G., One-way shear behaviour of large, lightly-reinforced concrete beams and slabs, Department of Civil Engineering, University of Toronto, 2008
- [10] System zbrojenia wysokiej wytrzymałości SAS 670/800. Materiały firmowe ATM Sp. z o.o.