

Patroni honorowi działu:


 GŁÓWNY
URZĄD
NADZORU
BUDOWLANEGO

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

Wśród współczesnych metod analizy ścinania dominują modele ST (ang. *strut* – zastrzał, którego rolę zazwyczaj pełni beton oraz *tie* – ściągi, reprezentowany przez zbrojenie), których podstawą jest opublikowana w 1929 r. klasyczna analogia kratownicowa Mörscha. Metoda ta, dzięki założonej statycznej wyznaczalności kratownic oraz stałemu kątowemu nachyleniu krzyżulców betonowych (45°), zapewnia stosunkowo proste i przejrzyste rozwiązanie, ale niestety często zbyt niedokładne. Pracę zarysowanej belki wierniej odzwierciedla wielokrotnie statycznie niewyznaczalna (przedstawiona po raz pierwszy w 1961 r. przez Leonhardta i Waltera). Pozwala ona uwzględnić warunki nierozdzielności i różną sztywność elementów składowych, ale ze względu na statyczną niewyznaczalność rozwiązanie jest zbyt skomplikowane w zastosowaniu praktycznym. W efekcie podstawą rozwijanej w normach [1, 2, 3] metody kratownicowej stał się kompromisowy model statycznie wyznaczalnej kratownicy z uzmiennionym kątem nachylenia krzyżulców ściskanych.

Nośność na ścinanie elementów bez zbrojenia

Sprawdzanie nośności na ścinanie, zgodnie z wymaganiami Eurokodu 2 [1], odbywa się w dwóch stadiach. W pierwszym dokonuje się podziału na odcinki, na których nie jest wymagane obliczeniowe zbrojenie na ścinanie (dawniej zwane odcinkami I rodzaju) oraz odcinki ze zbrojeniem poprzecznym (zwane odcinkami II rodzaju). Kryterium podziału jest obliczeniowa nośność na ścinanie elementu bez zbrojenia $V_{Rd,c}$.

Takie zasady obowiązywały w Polsce już przed wprowadzeniem Eurokodu. Zasadnicza różnica dotyczy definicji wielkości $V_{Rd,c}$ (we wcześniejszych normach oznaczonej symbolem Q_{\min} [4] i V_{Rd1} [2]). Podobnie jak w wielu krajach europejskich pierwotnie obowiązywał wzór w postaci:

$$V_{Rd,c} = \tau_{Rd} b_w d \quad (1)$$

Projektowanie elementów poddanych ścinaniu

Designing of members under the shear

w którym graniczną wartość naprężeń stycznych τ_{Rd} wyrażano proporcjonalnie do wytrzymałości betonu na rozciąganie. Zgodnie z normą PN-84/B-03264 [4] osiągała ona $0,75R_{bz}$, gdzie przez R_{bz} określono wytrzymałość obliczeniową na rozciąganie betonu w konstrukcjach żelbetowych. Zależność wprowadzona wraz z normą przejściową PN-B-03264:1999 [3], nieco zmodyfikowana w 2002 r. [2] jest bardziej złożona. Pozwala uwzględnić wpływ zbrojenia podłużnego, efekt skali (współczynnik k) oraz wpływ siły podłużnej (zazwyczaj pochodzącej od sprężenia, wyrażonej przez uśrednione naprężenie od siły osiowej σ_{cp}):

$$V_{Rd,c} = [0,35k_{ctd}(1,2 + 40\rho) + 0,15\sigma_{cp}]b_w d \quad (2)$$

Dalsze prace nad rozwojem Eurokodu wykazały, że nośność określona zgodnie z ENV 1992-1-1 (będącą bazą dla norm [2], [3]) może być niebezpiecznie zawyżona w przypadku betonów wyższych klas [5]. Z drugiej strony, zaniżona była nośność elementów, w których wpływ zginania przy ścinaniu był stosunkowo niewielki (np. sprężone płyty kanałowe). Zdecydowało to o zastąpieniu w Eurokodzie zależności (2) przez:

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} k (100\rho_1 f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 0,15\sigma_{cp} \right] b_w d \quad (3)$$

W przypadku niskiego stopnia zbrojenia, nośność obliczona wg tego wzoru jest zaniżona (przyjęcie stopnia zbrojenia $\rho_1 = 0$ prowadzi do nielogicznego rezultatu $V_{Rd,c} = 0$). Z tych względów do normy zostało wprowadzone dolne ograniczenie opisane wzorem:

$$V_{Rd,c} \geq \left(0,035k^{\frac{3}{2}} f_{ck}^{\frac{1}{2}} + 0,15\sigma_{cp} \right) b_w d \quad (4)$$

gdzie współczynnik skali określa wzór

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 0,02$$

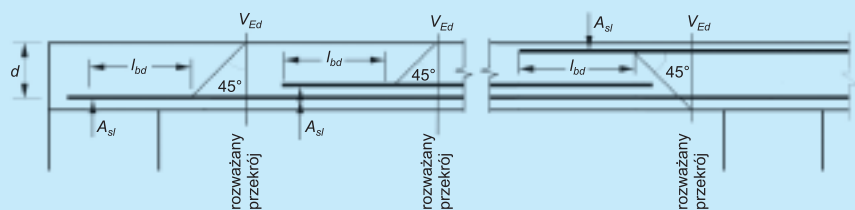
(d – wysokość użyteczna przekroju [mm]). Współczynnik $C_{Rd,c} = 0,18/\gamma_c$, a b_w (szerokość w poziomie zbrojenia rozciąganego lub, w przypadku poszerzenia strefy rozciąganej, minimalna szerokość średnika) należy przyjmować jako najmniejszą szerokość strefy rozciąganej przekroju.

$\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c$ jest uśrednionym naprężeniem ściskającym w betonie wywołanym przez siłę osiową (np. sprężającą). We wzorach (3), (4) należy przyjmować $\sigma_{cp} \leq 0,2f_{cd}$.

Rozciągane zbrojenie podłużne A_{sl} , które można uwzględnić przy wyznaczaniu stopnia zbrojenia $\rho_1 = A_{sl}/b_w d$ powinno sięgać poza rozpatrywany przekrój na odległość nie mniejszą niż $(l_{bd} + d)$ (rysunek 1).

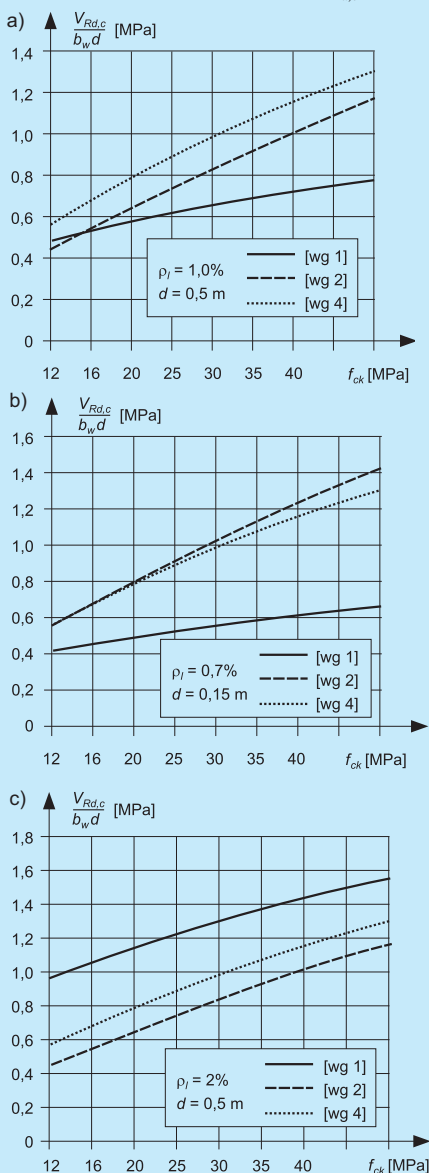
Konsekwencją przyjętego w Eurokodzie uzależnienia nośności $V_{Rd,c}$ od stopnia zbrojenia podłużnego (wzór 3) jest konieczność rozmieszczenia tego zbrojenia jeszcze przed przystąpieniem do wymiarowania strefy przypodporowej. Zadanie to może być dość kłopotliwe, szczególnie w strefach podpór wewnętrznych, gdzie ekonomiczne rozplanowanie zbrojenia wymaga sporządzenia obwiedni momentów zginających.

Na rysunku 2 przedstawiono wpływ wytrzymałości betonu f_{ck} na nośność $V_{Rd,c}$ (sporządzoną do średniej wartości naprężeń ścinających), obliczoną wg norm z 1984 r. [4], 2002 [2] oraz PN-EN 1992-1-1 [1]. Przedstawiono kolejno: przeciętnie zbrojoną belkę (rysunek 2a), przeciętnie zbrojoną płytę (rysunek 2b) oraz silnie zbrojoną belkę (rysunek 2c). Zgodnie z intencją autorów Eurokodu, nośność przeciętnie zbrojonej



Rys. 1. Zasady przyjmowania powierzchni zbrojenia podłużnego do wyznaczenia $V_{Rd,c}$

belki (rysunek 2a), obliczona zgodnie ze wzorem (3), w przypadku betonów wyższych klas jest niższa o kilkadziesiąt procent. Podobną tendencję można zaobserwować w płytach (rysunek 2b). Wyjątek stanowią silnie zbrojone belki (rysunek 2c), których nośność obliczona zgodnie z Eurokodem jest o ok. 30% wyższa (częściowo wynika to ze złagodzenia w Eurokodzie warunku ograniczenia stopnia zbrojenia, dopuszczonego do przyjmowania przy wyznaczaniu $V_{Rd,c}$).



Rys. 2. Porównanie nośności $V_{Rd,c}$ wyznaczonej zgodnie z wymaganiami norm [1], [2] i [4] (opis w artykule)

Nośność elementów wymagających zbrojenia na ścinanie

Sprawdzanie nośności wg normy PN-EN 1992-1-1 bazuje na modelu kratownicowym z dopuszczalną zmiennością kąta na-

chylenia krzyżulców ściskanych (w zakresie $26,6^\circ \div 45^\circ$). Model składa się z dwóch pasów oraz środnika, w którym zakłada się wystąpienie rys na odcinku strefy ścinania, wydzielających ukośne bloki betonowe (krzyżulce ściskane), nachylone pod kątem Θ . Role prętów rozciąganych pełnią strzemiona i pręty odgięte. Pas rozciągany stanowi główne zbrojenie rozciągane, natomiast pas ściskany przeciwległa strefa betonu. W odróżnieniu od normy [4] pomija się nośność niezarysowanego betonu na ścinanie. Mechanizm pracy takiego schematu można opisać następująco: obciążenie z pasa górnego jest przyjmowane przez ukośny zastrzał betonowy i sprowadzone do pasa dolnego, gdzie przejmuje je zbrojenie poprzeczne i ponownie przekazuje do pasa górnego. Procedura powtarza się, aż do momentu odprowadzenia siły nad podporę. Im większy kąt nachylenia krzyżulców, tym większe tempo odprowadzania siły.

Sprawdzenie nośności elementu wymagającego zbrojenia na ścinanie sprowadza się do sprawdzenia elementów zastępującej go kratownicy. Oznacza to konieczność spełnienia warunków:

- nośności z uwagi na uplastycznienie zbrojenia poprzecznego $V_{Ed} \leq V_{Rd,s}$;
- nośności z uwagi na zmiażdżenie ściskanych krzyżulców betonowych $V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$;
- nośności zbrojenia podłużnego $A_{sf} f_{yd}$ zdolnego do przeniesienia sumarycznej siły od zginania M_{Ed}/z i ścinania ΔF_{td} .

Wzory na nośność $V_{Rd,s}$ stanowiące podstawę obliczania potrzebnego zbrojenia poprzecznego, są jednakowe w Eurokodzie [1] i normie PN-B-03264:2002 [2].

W elemencie ze zbrojeniem ukośnym nachylonym pod kątem α nośność $V_{Rd,s}$ oblicza się ze wzoru:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} (\cot \Theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (5)$$

Przez przyjęcie kąta $\alpha = 90^\circ$ otrzymuje się wzór dla elementu ze strzemionami pionowymi:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cot \Theta \quad (6)$$

Jeśli jednocześnie stosuje się strzemiona i pręty odgięte (na zasadzie superpozycji), $V_{Rd,s}$ można wyrazić wzorem:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw1}}{s_1} z f_{ywd1} \cot \Theta + \frac{A_{sw2}}{s_2} z f_{ywd2} (\cot \Theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (7)$$

gdzie:

A_{sw1}, s_1, f_{ywd1} – odpowiednio pole przekroju, rozstaw i obliczeniowa granica plastyczności stali strzemion pionowych;

A_{sw2}, s_2, f_{ywd2} – odpowiednio pole przekroju, rozstaw i obliczeniowa granica plastyczności stali prętów ukośnych.

Ramię sił wewnętrznych określa się ze wzoru $z = 0,9d$.

W przypadku, gdy zbrojenie strzemionami i prętami odgiętymi stosuje się jednocześnie, to strzemiona powinny przenieść co najmniej 50% siły granicznej ze względu na ścinanie. Pojęcie „siły granicznej ze względu na ścinanie” nie zostało wcześniej zdefiniowane w Eurokodzie. Można przypuszczać, że chodzi o miarodajną siłę poprzeczną V_{Ed} służącą do wyznaczania zbrojenia (podobny warunek występował również w normie [2]). Siła poprzeczna z uwagi na nośność krzyżulca ściskanego, w elementach z ukośnym zbrojeniem na ścinanie, nie powinna być większa niż:

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} v f_{cd} b_w z \frac{\cot \Theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \Theta} \quad (8)$$

Przyjęcie kąta $\alpha = 90^\circ$, po przekształceniach prowadzi do wzoru na nośność elementu z pionowym zbrojeniem:

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} v f_{cd} b_w z \frac{1}{\cot \Theta + \tan \Theta} \quad (9)$$

Eurokod nie wskazuje zasad wyznaczania siły $V_{Rd,max}$ w sytuacji, gdy jednocześnie zastosowano zbrojenie pionowe i ukośne. Zastosowanie wzoru dla samych strzemion (9) zapewnia w tym przypadku zapas bezpieczeństwa. Zależności pozwalające na dokładne wyznaczenie nośności $V_{Rd,max}$ zawiera norma przejściowa [2]. Określa się ją, powiększając wielkość obliczoną dla samych strzemion o dodatek ΔV , wynikający z poziomej wypadkowej siły, którą mogą przenieść pręty odgięte:

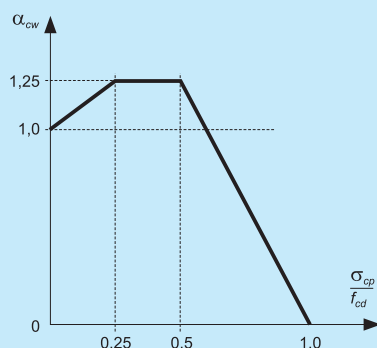
$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} v f_{cd} b_w z \frac{1}{\cot \Theta + \tan \Theta} + \frac{A_{sw2}}{s_2} z \cos \alpha \quad (10)$$

Jednocześnie (także wg normy [2]) wyznaczona w ten sposób siła nie może być większa niż:

$$V_{Rd,max} \leq \alpha_{cw} v f_{cd} b_w z \frac{2 \cot \Theta (\cot \Theta + \cot \alpha)}{(1 + \cot^2 \Theta)(2 \cot \Theta + \cot \alpha)} \quad (11)$$

Występująca we wzorze wielkość α_{cw} wyraża wpływ siły osiowej na nośność krzyżulca ściskanego. Przyjmuje się, że niewielkie wartości osiowej siły ściskającej ($\sigma_{cp} \leq 0,5 f_{cd}$) korzystnie wytwarzają stan dwuosiowego ściskania. Po przekroczeniu $0,5 f_{cd}$ niebezpieczny zaczyna być sumaryczny wpływ ściskania krzyżulca od siły poprzecznej powiększony przez wypadkową siły osiowej. Zmienność współczynnika α_{cw} obrazującego wpływ siły osiowej na nośność $V_{Rd,max}$ przedstawia rysunek 3.

Współczynnik zmniejszający wytrzymałości betonu na ścinanie w krzyżulcu $v = 0,6 (1 - f_{ck}/250)$ wyraża konieczność jej redukcji, wynikającą z wpływu poprzecznych naprężeń rozciągających.



Rys. 3. Wpływ siły podłużnej na nośność $V_{Rd,max}$

Konsekwencją założonego modelu kratownicowego jest konieczność uwzględnienia **dotkowanej siły rozciągającej w zbrojeniu podłużnym** (pełniącym rolę pasa rozciąganego kratownicy). Eurokod [1] przewiduje dwie możliwości uwzględnienia tej siły, przez rozsuniecie obwiedni sił o odcinek a_1 lub obliczenie dodatkowej siły ΔF_{id} ze wzoru:

$$\Delta F_{id} = 0,5 V_{Ed} (\cot\Theta - \cot\alpha) \quad (12)$$

Jednocześnie maksymalna wartość siły w zbrojeniu $F_{id} = (M_{Ed}/z) + \Delta F_{id}$ nie może być większa od $F_{id,max} = M_{Ed,max}/z$. Wynika to z faktu, że w przekrojach występowania maksymalnych momentów $M_{Ed,max}$ (przesłowym i podporowym) nachylenie rys jest prawie pionowe. Można zatem przyjąć, że: $\Theta \rightarrow 90^\circ$, czyli, $\cot\Theta \rightarrow 0$, a zatem $\Delta F_{id} = 0$.

Określanie kąta Θ

Najbardziej dyskusyjnym zagadnieniem w metodzie analizy ścinania jest możliwość dowolnego przyjmowania kąta Θ w zakresie $1,0 \leq \cot\Theta \leq 2,0$ (w oryginalnej wersji Eurokodu nawet $1,0 \leq \cot\Theta \leq 2,5$), szczególnie że wartość przyjętego kąta Θ istotnie wpływa na wyniki.

W zakładanym modelu kratownicowym projektowanie strefy ścinania belki można przyrównać do projektowania kratownicy. Dzięki dowolności kształtowania kątów nachylenia krzyżulców możemy wpływać na wielkość występujących w nich sił. Zmniejszaniu nachylenia krzyżulca ściskanego towarzyszy wzrost siły w tym krzyżulcu, ale jednocześnie zmniejsza się obciążenie skratowań rozciąganych (zbrojenia poprzecznego), przy jednoczesnym wzroście sił w pasie dolnym (reprezentowanym w belce przez zbrojenie rozciągane). Oznacza to, że **konsekwencją przyjęcia $\cot\Theta = 1$ jest konieczność zastosowania silnego zbrojenia poprzecznego**. Jednocześnie w mniejszym stopniu obciążony jest beton krzyżulców ściskanych oraz główne zbrojenie rozciągane belki. **Przyjęcie $\cot\Theta = 2$ oznacza mniejsze zbrojenie poprzeczne, ale jedno-**

ześnie silniejsze obciążenie ukośnie ściskanych krzyżulców betonowych oraz głównego zbrojenia rozciąganego. Teoretycznie zatem rozwiązania optymalnego należy poszukiwać, analizując metodą kolejnych przybliżeń warunki nośności dla krzyżulca ściskanego, zbrojenia rozciąganego i zbrojenia podłużnego.

Opis procesu zniszczenia belki i kształtowania się krzyżulców będący podstawą przyjęcia zakresu zmienności kąta Θ można znaleźć w komentarzu do Eurokodu 2 [6]. Nachylenie kierunków odkształceń głównych, wynoszące przed zarysowaniem 45° , zaczyna powoli się zmniejszać wraz z pojawianiem się i rozwojem rys ukośnych. Postępującemu obrotowi w przekroju rysy, zwłaszcza przyspieszonemu po uplastycznieniu zbrojenia poprzecznego, towarzyszy wzrost naprężeń ściskających w betonie. W konsekwencji, w ostatniej fazie pracy zazwyczaj dochodzi do zmiążdżenia krzyżulca betonowego. Oczywiście, belki silniej zbrojone mogą ulec zniszczeniu przed uplastycznieniem strzemion, jednak w zdecydowanej większości przypadków zniszczenie będzie inicjowane przez uplastycznienie zbrojenia. Na rysunku 4 zestawiono za czerpniętą z [6] wyniki badań nośności na ścinanie w przypadku różnej intensywności zbrojenia poprzecznego. Na wykresie oznaczono również linie odpowiadające nośności określonej przy założeniu granicznych wartości $\cot\Theta$. Wszystkie nośności określone w badaniach znajdują się nad linią odpowiadającą $\cot\Theta = 2,0$, co oznacza, że dla wszystkich porównań ekonomicznie uzasadnione, jest przyjęcie $\cot\Theta = 2,0$.



Rys. 4. Zależność nośności na ścinanie od intensywności zbrojenia poprzecznego (wyniki badań na podstawie [6])

W świetle przedstawionych rozważań najbardziej zasadne wydaje się rozpoczęcie projektowania od przyjęcia maksymalnej wartości $\cot\Theta = 2,0$. W przypadku gdy nie ma możliwości spełnienia warunku $V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$, wartość $\cot\Theta$ należy odpowiednio zredukować.

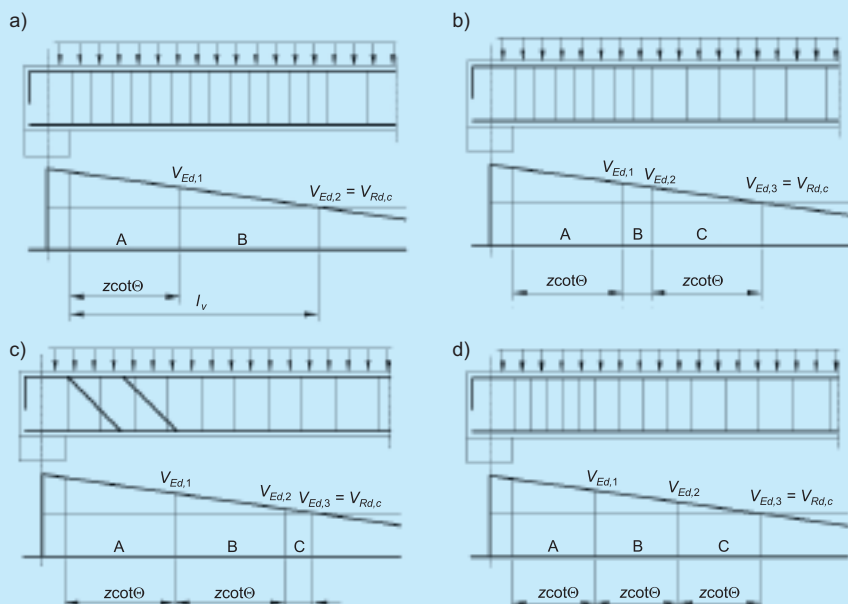
Trzeba jednak podkreślić, że w praktyce sytuacja taka może wystąpić wyjątkowo rzadko, np. w prefabrykowanych belkach o przekroju dwuteowym z bardzo pocienionym średnikiem lub w przypadku osłabienia strefy przypodporowej średnika otworami. Drugą przesłanką dla przyjęcia $\cot\Theta < 2,0$ mogą być kłopoty z zapewnieniem wystarczającego przekroju zbrojenia podłużnego zdolnego do przejścia siły ΔF_{id} . Dotyczyć to może górnego zbrojenia nad podporami wewnętrznymi belek ciągłych, gdyż zbrojenie dolne zazwyczaj jest doprowadzane do podpór ze znacznym nadmiarem.

Miarodajna siła poprzeczna

Sprawdzenie warunków nośności polega na porównaniu siły poprzecznej z odpowiednią nośnością V_{Rd} . W związku z zmiennością sił poprzecznych na długości rozpatrywanego przedziału projektant powinien przyjąć tzw. miarodajną siłę poprzeczną V_{Ed} (rysunek 5). Miejsce występowania tej siły oraz wynikająca z tego wartość mogą być różne, w zależności od sprawdzanego warunku nośności. Nie zawsze jest to największa siła poprzeczna występująca na analizowanym odcinku ścinania.

W przypadku, gdy obciążeniem dominującym jest obciążenie równomiernie rozłożone na górnej powierzchni, to na odcinku przypodporowym do sprawdzenia nośności $V_{Rd,c}$ stosuje się siłę poprzeczną w odległości d od krawędzi podpory. Jednocześnie w elemencie zbrojonym na ścinanie warunek nośności z uwagi na ukośne ściskanie betonu $V_{Rd,max}$ należy sprawdzać dla siły V_{Ed} występującej na krawędzi podpory, natomiast warunek nośności ze względu na zbrojenie $V_{Rd,s}$ dla najmniejszej siły występującej na odcinku $z \cot(\Theta)$ od krawędzi podpory, czyli zazwyczaj na końcu tego odcinka (szerzej zagadnienie omówiono w [7]).

Podobnie jak w dotychczasowych normach, Eurokod 2 zezwala na redukcję miarodajnej wartości siły poprzecznej w sytuacjach, gdy jej wartość wynika z obciążenia skupionego przyłożonego w nieznacznej odległości od krawędzi podpory. Warunkiem jest poprawne zakotwienie zbrojenia podłużnego na podporze. Siłę skupioną na odcinku $0,5d \leq a_v \leq 2d$ można przemnożyć przez



Rys. 5. Zasady określania miarodajnej siły poprzecznej do obliczania zbrojenia poprzecznego

współczynnik zmniejszający $\beta = a/2d$. Jeżeli siła znajduje się w odległości $a_v \leq 0,5d$, należy przyjąć $\beta = 0,25$. Dodatkowo, z uwagi na ukośne ściskanie, miarodajna siła poprzeczna określona bez współczynnika zmniejszającego powinna spełniać warunek $V_{Ed} \leq 0,5b_w d v_{f,cd}$

Wprowadzone w normie PN-EN 1992-1-1 zasady redukcji miarodajnej siły poprzecznej V_{Ed} obejmują sytuacje, gdy obciążenie znajduje się na górnej powierzchni elementu i dotyczy wyłącznie przypadków, w których sprawdzana jest nośność z uwagi na umowne „ukośne rozciąganie”, tzn. sprawdzenia warunków nośności $V_{Rd,c}$ i $V_{Rd,s}$. Warunek z uwagi na ukośne ściskanie powinien być zawsze sprawdzany dla maksymalnej, niezredukowanej siły poprzecznej. Jeżeli obciążenie nie występuje na górnej powierzchni, to wszystkie warunki nośności należy sprawdzać dla maksymalnej siły poprzecznej na odcinku ścinania.

Odcinki ścinania

Całkowitą długość odcinka l_v , na którym należy zaprojektować zbrojenie na ścinanie, definiuje warunek $V_{Ed} \leq V_{Rd,c}$. Długość odcinka ścinania można wyznaczyć metodą graficzną przez przecięcie wykresu obwiedni sił poprzecznych prostą, odpowiadającą poziomowi nośności $V_{Rd,c}$.

Najprostszą metodą określania potrzebnego zbrojenia jest przyjęcie miarodajnej siły poprzecznej dla całego odcinka ścinania. Oczywiście konsekwencją tego założenia jest konieczność zastosowania jednakowego zbrojenia na całej długości l_v . W przypadku, gdy długość strefy ścinania jest większa od dwukrotnej wysokości belki, można rozważyć jej podział na krótsze odcinki, na których zaprojektowane zbrojenie będzie zróżnicowane, stosownie do zmian miarodajnej siły poprzecznej. Podział na krótsze odcinki może być również spowodowany np. zmianą typu stosowanego zbrojenia (bardzo często na początku strefy ścinania stosuje się równocześnie strzemiona i pręty odgięte, natomiast na końcu wyłącznie strzemiona – rysunek 5c). Przykłady możliwych podziałów stref ścinania pokazano na rysunku 5. Zgodnie z przedstawionymi wcześniej regułami optymalizacji kąta Θ , obliczenia najlepiej rozpoczynać, zakładając maksymalną, dopuszczoną normą [1] wartość $\cot\Theta = 2$. Rysunek 5a przedstawia najprostsze rozwiązanie, w którym zrezygnowano z podziału na krótsze odcinki, a zbrojenie obliczono ze względu na miarodajną siłę poprzeczną $V_{Ed,1}$ określoną w odległości $z \cot\Theta$ od podpory. Zbrojenie rozmieszczono równomiernie na całej długości odcinka ścinania. Na rysunku 5b dokonano podziału strefy ścinania

na krótsze odcinki. Zbrojenie na odcinku A obliczono ze względu na miarodajną siłę poprzeczną $V_{Ed,1}$ określoną w odległości $z \cot\Theta$ od podpory, na odcinku C ze względu na miarodajną siłę poprzeczną $V_{Ed,3}$ na końcu tego odcinka, a na odcinku B można zastosować zbrojenie w identycznym rozstawie jak na odcinku A lub obliczyć dla siły $V_{Ed,2}$. Ze względu na pręty odgięte na rysunku 5c dokonano podziału na krótsze odcinki. Zbrojenie na odcinku A obliczono ze względu na miarodajną siłę poprzeczną $V_{Ed,1}$, określoną na końcu tego odcinka (pręty odgięte muszą równomiernie pokrywać całą długość tego odcinka), na odcinku B rozstaw strzemion należy obliczyć stosownie do siły $V_{Ed,2}$, natomiast na odcinku C można zastosować identyczne zbrojenie jak na odcinku B. Na rysunku 5d dokonano równomiernego podziału strefy ścinania na $n = 3$ odcinki. Kryterium podziału było zachowanie $1,0 \leq \cot\Theta = n l_v / z \leq 2,0$. Zbrojenie na każdym z odcinków obliczono ze względu na miarodajne siły na ich końcach, tzn. odpowiednio $V_{Ed,1}$, $V_{Ed,2}$ oraz $V_{Ed,3}$. Ten sposób podziału zazwyczaj nie pozwala na optymalizację kąta Θ i w konsekwencji prowadzi do zażyczenia zbrojenia poprzecznego.

Abstract

The paper presents commentary to the given in Eurocode 2 method for shear analysis. Special attention was paid to the principles of determining the angle and changes regarding to the previous standards.

Literatura

- [1] PN-EN 1992-1-1 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-B-03264:1999 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [4] PN 84/B-03264 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [5] Walraven J.C.: CEB-Bulletin d'Information 180, „Shear in Prestressed Concrete” str. 68 – 71.
- [6] Commentary Eurocode 2, European Concrete Platform ASBL, Bruksela, czerwiec 2008.
- [7] Knauff M.: Obliczanie konstrukcji żelbetowych według Eurokodu 2, PWN Warszawa 2013.

dr inż. Rafał Krzywoń
Politechnika Śląska

PARTNERZY DZIAŁU

SILIKATY
GRUPA
ZESPÓŁ BUDOWANIA ZAUFANIA

SOLBET

Sopro

CPJS
Centrum Promocji Jakości Stali

SBPB