

TADEUSZ URBANKatedra Budownictwa Betonowego
Politechniki Łódzkiej

PRZYCZYNEK DO ZALECEŃ KRAJOWYCH EUROKODU 2 W ZAKRESIE NOŚNOŚCI NA PRZEBICIE

Opiniodawca: **prof. dr hab. inż. Tadeusz Godycki-Ćwirko**

W artykule przedstawiono propozycję zmiany przepisu zawartego we wzorze (6.53) EN 1992-1-1:2004+AC:2008, ograniczającego nośność na przebicie stropów ze zbrojeniem poprzecznym w strefach podporowych. Uszczegółowienie tej regulacji przewiduje Eurokod 2 poprzez odpowiednie zapisy w Załącznikach krajowych. Wartość $v_{Rd,max} = 0,5v_{fd}$ podaną w wersji oryginalnej normy należy jedynie traktować jako zalecenie. Wyniki badań eksperymentalnych i dotychczasowe regulacje normowe wielu norm krajowych wskazują na konieczność zaostrzenia tego przepisu. Zaproponowano dodatkowe ograniczenie $v_{Rd,max} = 0,36v_{fd}$ i $V_{Rd,s} \leq 1,75V_{Rd,c}$.

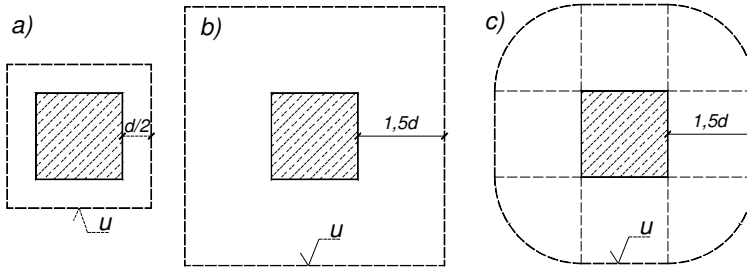
1. Dotychczasowe regulacje normowe dotyczące przebicia

Współcześnie stosowane normy narodowe umożliwiały wzmocnienie stref podporowych płaskich stropów za pomocą zbrojenia poprzecznego w ograniczonym zakresie. Przykładowo, w świetle przepisów wybranych norm, wzmocnienia te były możliwe:

- według normy amerykańskiej ACI 318-05 [1] – do 50% dla strzemion, 75% dla sztywnych wkładów,
- według normy niemieckiej DIN 1045-1 [2] – do 50% dla strzemion i prętów odgiętych,
- według normy brytyjskiej BS 8110 [3] – do 100%,
- według normy polskiej PN-B-03264:2002 [4] – do 40%.

Wszystkie te normy w swym podstawowym zakresie określają nośność na przebicie, jako iloczyn powierzchni przekroju betonowego determinowany długością obwodu kontrolnego pomnożony przez obliczeniowe naprężenia krytyczne. Usytuowanie obwodów kontrolnych jest zróżnicowane w poszczególnych przepisach (patrz rys. 1). W ACI-318 i PN obwód ten jest położony w odległości $d/2$ od krawędzi podpory, a w DIN 1045-1 i BS 8110 w odległości $1,5d$. Tym obwodom

kontrolnym, a ściślej mówiąc odpowiadających im powierzchniom, przypisane są stosowne obliczeniowe naprężenia krytyczne. W przypadku PN-B-03264 jest to wytrzymałość betonu na rozciąganie. Norma niemiecka i brytyjska wielkość naprężeń krytycznych uzależniono dodatkowo od stopnia zbrojenia płyty na zginanie w obszarze podpory.



Rys. 1. Obwody kontrolne według: a) ACI-318 i PN, b) BS 8110, c) DIN 1045-1

Fig. 1. Control perimeter according to: a) ACI-318 and PN, b) BS 8110, c) DIN 1045-1

2. Podstawowe regulacje dotyczące przebiecia według PN-EN 1992-1-1

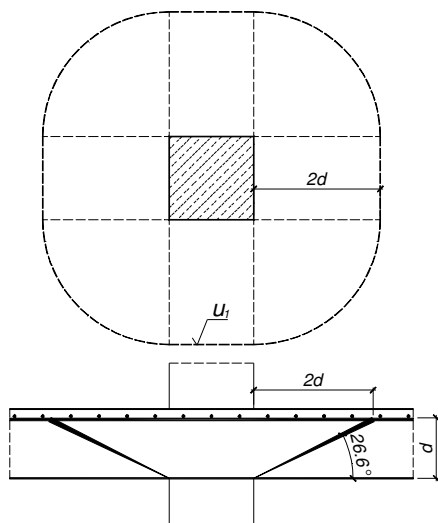
Eurokod 2 [5] przyjął obwód kontrolny w odległości $2d$ od krawędzi słupa (patrz rys. 2). Uzasadnieniem tego założenia było przyjęcie kąta nachylenia rysy ukośnej (krzyżulca ściskanego) równego $\theta = 26,6^\circ$. W odróżnieniu od elementów belkowych, gdzie kąt ten może przyjmować wartości od $26,6$ do 45° , przy przebieciu przyjęto wartość stałą. Obwód kontrolny jest więc odwzorowaniem wylotu rysy ukośnej w poziomie zbrojenia głównego płyty.

Nośność na przebiecie płyt żelbetowych, symetrycznie obciążonych bez zbrojenia poprzecznego, wyraża wzór:

$$V_{Rd,c} = (C_{Rd,c} k \sqrt[3]{100 \rho_l f_{ck}}) u_1 d \quad (1)$$

w którym:

- f_{ck} – wytrzymałość charakterystyczna betonu w MPa,
- $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$ – współczynnik skali (d podstawia się w mm),
- $\rho_l = \sqrt{\rho_{ly} \rho_{lz}} \leq 0,02$ – średni stopień zbrojenia głównego z obu kierunków,
- $C_{Rd,c} = 0,18 / \gamma_c = 0,1286$ – współczynnik empiryczny dostosowany do polskich postanowień krajowych, przy $\gamma_c = 1,4$.



Rys. 2. Podstawowy obwód kontrolny według Eurokodu 2

Fig. 2. Basic control perimeter according to Eurocod 2

Nośność na ścinanie przy przebiciu ze zbrojeniem poprzecznym należy wyliczać ze wzoru:

$$V_{Rd,cs} = 0,75V_{Rd,c} + 1,5 \frac{d}{s_r} A_{sw} f_{ywd,ef} \sin \alpha \cdot u_l d \quad (2)$$

w którym:

A_{sw} – pole powierzchni jednego obwodu zbrojenia na ścinanie dookoła słupa w mm^2 ,

s_r – promieniowy rozstaw obwodów zbrojenia na ścinanie w mm,

$f_{ywd,ef}$ – efektywna wytrzymałość obliczeniowa zbrojenia na ścinanie przy przebiciu, zgodnie ze wzorem:

$$f_{ywd,ef} = 250 + 0,25d \leq f_{ywd} \quad \text{w MPa} \quad (3)$$

d – średnia wysokość użyteczna z dwóch ortogonalnych kierunków w mm,

α – kąt między zbrojeniem na ścinanie i płaszczyzną płyty.

Analizując wzór (2) warto zauważyć, że nośność na przebicie płyt zbrojonych poprzecznie w znacznej mierze zależy od betonu, co wyraża pierwszy człon wzoru. W polskiej normie PN-B-03264:2002 na zbrojenie poprzeczne przekazuje się 100% siły przebijającej V_{Ed} .

W obszarze przylegającym do słupa powinna być spełniona nierówność:

$$v_{Ed} = \frac{\beta V_{Ed}}{u_0 d} \leq v_{Rd,max} \quad (4)$$

w której:

dla słupa wewnętrznego u_0 oznacza długość obwodu słupa,

dla słupa krawędziowego $u_0 = c_2 + 3d \leq c_2 + 2c_1$,

dla słupa narożnego $u_0 = 2d \leq c_1 + c_2$,

c_1, c_2 są wymiarami słupa,

$$v_{Rd,max} = 0,5v f_{cd} \quad (5)$$

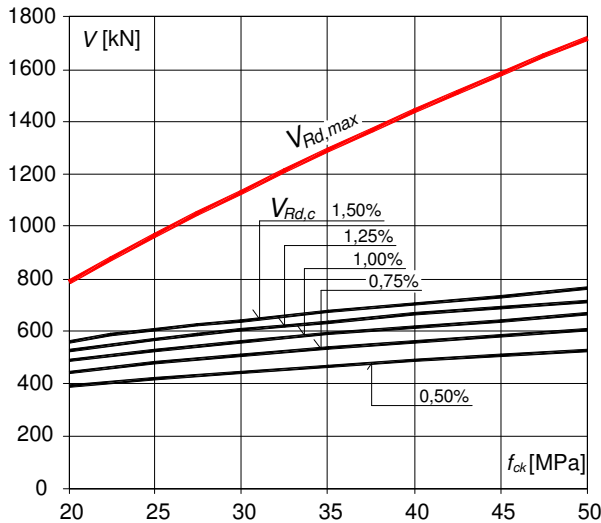
gdzie $v = 0,6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$, jest współczynnikiem redukcji wytrzymałości betonu zarysowanego przy ścinaniu f_{ck} w MPa.

β – współczynnik uwzględniający mimośród obciążenia w uproszczonych obliczeniach.

3. Analiza przepisów PN-EN 1992-1-1 w odniesieniu do $V_{Rd,max}$

Wzór (4), pomijając współczynnik β , możemy zapisać w postaci:

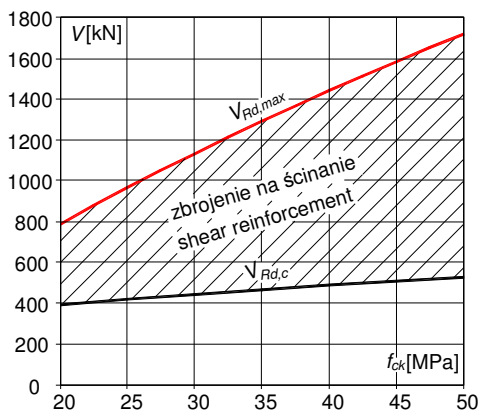
$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max} = 0,3 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) f_{cd} u_0 d. \quad (6)$$



Rys. 3. Porównanie nośności $V_{Rd,max}$ z $V_{Rd,c}$ dla złącza wewnętrznego z różnym stopniem zbrojenia na zginanie ρ_l

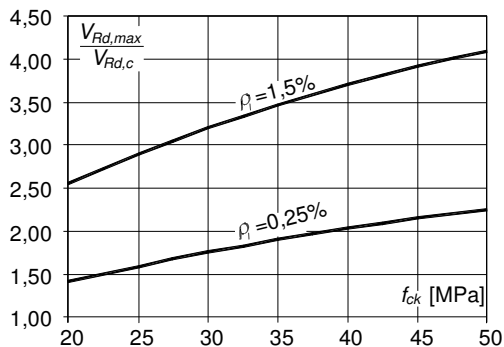
Fig. 3. The comparison of carrying capacity $V_{Rd,max}$ with $V_{Rd,c}$ for internal joint with the various reinforcement ratio of longitudinal reinforcement ρ_l

Na rysunku 3 pokazano wartości $V_{Rd,max}$ i $V_{Rd,c}$ dla wewnętrznego połączenia płyty ze słupem w funkcji wytrzymałości betonu w zakresie $f_{ck} = 20\div 50$ MPa. Analizowano płytę o wysokości użytecznej $d = 200$ mm i słup o przekroju kwadratowym $c = 250$ mm. Rozważano możliwe stopnie zbrojenia ρ_l od 0,5 do 1,5%. Przestrzeń pomiędzy krzywymi reprezentującymi nośności na przebicie płyt niezbrojonych poprzecznie $V_{Rd,c}$ i maksymalną nośnością na przebicie $V_{Rd,max}$ jest możliwa do „zagospodarowania” przez zbrojenie poprzeczne (patrz rys. 4). Jak widać na tym rysunku, możliwość wzmocnienia płyty na przebicie za pomocą zbrojenia według EC2 jest znaczna. W zależności od stopnia zbrojenia ρ_l i wytrzymałości betonu f_{ck} , możliwe jest wzmocnienie na przebicie od 140 do ponad 300%. Na rysunku 5 pokazano stosunek $V_{Rd,max}/V_{Rd,c}$ w funkcji wytrzymałości betonu dla rozważanego połączenia płyty o $d = 200$ mm i $c = 250$ mm.



Rys. 4. Możliwość wzmocnienia złącza wewnętrznego na przebicie za pomocą zbrojenia na ścinanie według PN-EN 1992-1-1

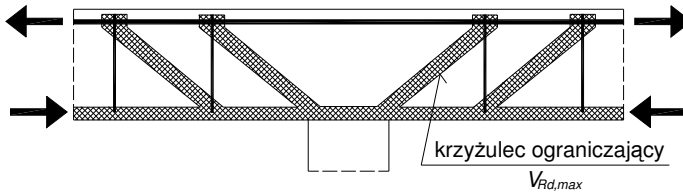
Fig. 4. The possibility of strengthening internal joints for punching by shear reinforcement, according to PN-EN 1992-1-1



Rys. 5. Relacja $V_{Rd,max} / V_{Rd,c}$ w funkcji wytrzymałości betonu

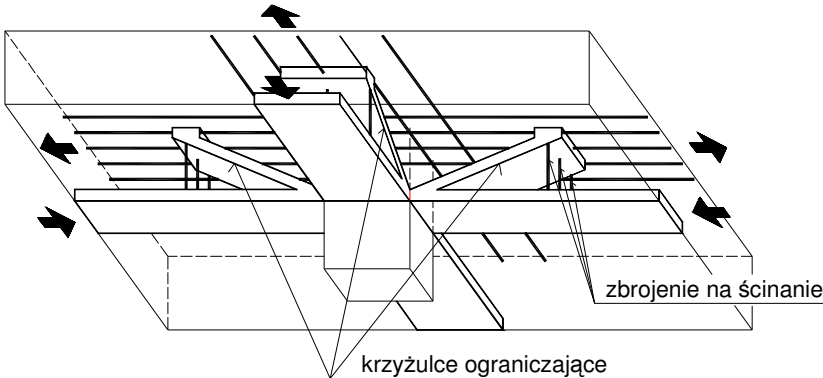
Fig. 5. $V_{Rd,max} / V_{Rd,c}$ ratio versus the compressive strength of concrete

Zgodnie z dotychczasowymi przepisami normowymi stosunek $V_{Rd,max}/V_{Rd,c}$ jest ograniczony do wielkości $1,4 \div 2,0$. Tak drastyczna zmiana musi budzić niepokój wśród projektantów i ekspertów konstrukcji budowlanych. Analizując przepisy EC2 można dopatrywać się źródeł takiej sytuacji w przeniesieniu rozumowania adekwatnego dla ścinania w elemencie belkowym na zagadnienie przebicia płaskich płyt. Na rysunku 6 pokazano model kratownicowy strefy podporowej słupa wewnętrznego z krzyżulcem ograniczającym nośność tej strefy ($V_{Rd,max}$). Rysunek 7 jest analogią przestrzenną modelu kratownicy belkowej dla wewnętrznej strefy podporowej połączenia płytowo-słupowego. W rzeczywistości w modelu przestrzennym krzyżulce rozszerzają się w kierunku górnej powierzchni płyty. O nośności będzie więc decydował najwęższy odcinek przy słupie, gdzie beton znajduje się w trójosiowym stanie naprężenia. Przyjęcie takiego modelu musi budzić zastrzeżenia.



Rys. 6. Model kratownicowy belki w sąsiedztwie podpory wewnętrznej

Fig. 6. Truss model for shear reinforced members near internal support



Rys. 7. Model kratownicy przestrzennej dla płyty w sąsiedztwie podpory wewnętrznej

Fig. 7. Truss spatial model for slab near internal support

Wzór na nośność krzyżulca ściskanego dla belek żelbetowych zbrojonych pionowym zbrojeniem na ścinanie według PN-EN ma postać:

$$V_{Rd,max} = \frac{b_w z v_1 f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} \quad (7)$$

Przyjmując minimalny kąt nachylenia rysy ukośnej $\theta = 26,6^\circ$, tak jak dla przebiecia zakłada norma oraz $z = 0,9d$ i $v_1 = v = 0,6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$, otrzymujemy:

$$V_{Rd,max} = 0,216 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) f_{cd} b_w d \quad (8)$$

Dla przebiecia analogiczny wzór normowy ma postać:

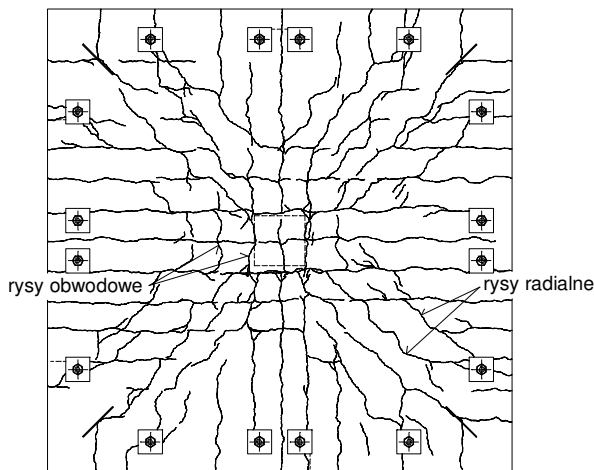
$$V_{Rd,max} = 0,3 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) f_{cd} u_0 d \quad (9)$$

Jak widać, we wzorze dla przebiecia ekwiwalentem szerokości środnika belki b_w jest obwód słupa u_0 . Założenie to w sposób nieuzasadniony zwiększa dla przebiecia wartości $V_{Rd,max}$. Dodatkowo współczynnik przed nawiasem jest o około 39% większy, co wynika z faktu, że we wzorze tym nie uwzględniono następujących relacji:

$$z = 0,9d, \quad \frac{1}{\cot 26,6^\circ + \tan 26,6^\circ} = 0,4 \text{ zamiast } 0,5 \text{ jak jest we wzorze (5).}$$

Zakładając, że ograniczenie ścinania nośnością krzyżulca ściskanego ma być analogiczne jak w elementach belkowych, przy przyjętym kącie $\theta = 26,6^\circ$ (wzór 8), należałoby wzór (5) przyjąć w postaci:

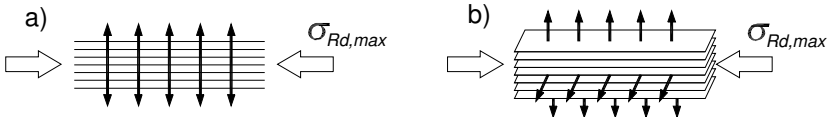
$$v_{Rd,max} = 0,36 v f_{cd} \cdot \quad (10)$$



Rys. 8. Obraz zarysowania płyty w strefie podporowej symetrycznie obciążonej

Fig. 8. Crack pattern slab in support zone symmetrically loaded

Kolejnym elementem, który należałoby rozważyć, jest poprawność wzoru na współczynnik v redukujący wytrzymałość betonu zarysowanego na ścinanie. W przypadku belek mamy do czynienia z płaskim stanem naprężenia i rysami powstającymi w jednej płaszczyźnie. W przypadku strefy podporowej płyty płaskiej mamy rysy radialne i obwodowe (patrz rys. 8). Sytuację krzyżulca ściskanego dla obu przypadków ilustruje rys. 9. Należy sobie zadać pytanie, czy dla tych obu sytuacji można posługiwać się taką samą zależnością na współczynnik redukujący wytrzymałość betonu? Norma EC2 nie wyjaśnia tego zagadnienia.



Rys. 9. Wytrzymałość obliczeniowa betonu w poprzecznie rozciąganych prętach-S: a) rozciąganie w jednej płaszczyźnie, b) rozciąganie w dwóch płaszczyznach

Fig. 9. Design strength of concrete struts in transverse tension:
a) tension in one plane, b) tension in two planes

4. Wnioski

Mając na uwadze aktualny stan rozeznania zjawiska, wydaje się, że stosowny warunek ograniczający nośność na przebicie płyt ze zbrojeniem poprzecznym można zapisać w prostszy sposób uwzględniając jednocześnie wyniki badań eksperymentalnych. Austriacy w swych zaleceniach krajowych [6] wprowadzili ograniczenie w postaci wzorów, spośród których decyduje wartość mniejsza:

$$V_{Rd,max} \leq 0,5 v u_0 d \quad (11)$$

$$V_{Rd,max} \leq 1,65 v_{Rd,c} u_1 d . \quad (12)$$

Wzór (11) pozostawia przepis EC2 w jego oryginalnym sensie, ale jednocześnie wzór (12) ogranicza możliwość wzmocnienia strefy przystupowej za pomocą zbrojenia na ścinanie tylko o 65% .

Zdaniem autora analogiczne ograniczenia powinny znaleźć się również w polskich postanowieniach krajowych. Proponuje się następujące zapisy:

$$v_{Rd,max} = 0,36 v f_{cd} \quad (13)$$

$$V_{Rd,max} \leq 1,75 v_{Rd,c} u_1 d . \quad (14)$$

Wzór (13) ograniczałby nośność krzyżulca ściskanego zgodnie z zasadami analogicznymi, jakie są przewidziane dla belek żelbetowych z uwzględnieniem maksymalnej wartości $\cot\theta = 2$ i ramienia sił wewnętrznych $z = 0,9d$. Wzór (14)

nawiązywałyby natomiast do współczesnego stanu wiedzy i wyników doświadczeń eksperymentalnych z zakresu przebicia płyt żelbetowych.

LITERATURA

- [1] ACI 318-05 Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05), ACI Manual of Concrete Practice 2005 Part.3, ss. 443.
- [2] BS 8110: Structural use of concrete, Part 1. Code of practice for design and construction, British Standard Institution, March 1997.
- [3] DIN 1045-1, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 1: Bemessung und Konstruktion, Juli 2001, Beton Kalender 2002.
- [4] PN-B-03264:2002, Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [5] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2, Projektowanie konstrukcji z betonu, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [6] ÖNORM EN 1992-1-1, Eurocode 2: Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1992-1-1.

CONTRIBUTION TO EC2 NATIONAL PROVISIONS IN RANGE OF PUNCHING PROBLEMS

Summary

The paper propose change in formula given by equation (6.53) of EN 1992-1-1, with limits punching load carrying capacity of slabs, with shear reinforcement in support zones. More particulars are given in EC2 by adequate national provisions. Value of $v_{Rd,max} = 0,5v_f f_{cd}$ given in original standard may be regarded as inexact (sometimes dangerous) recommendation. Experimental results and up to date standard codes indicate for necessity to sharpen this provision. Additional limit of $v_{Rd,max} = 0,5v_f f_{cd}$ i $V_{Rd,s} \leq 1,75V_{Rd,c}$ was proposed.