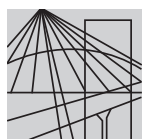


Patroni honorowi działu:



GŁÓWNY
URZĄD
NADZORU
BUDOWLANEGO



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

Kontrola przebiccia zgodnie z Eurokodem 2

Punching shear control according to Eurocode 2 – general remarks

Tworzony przez wiele lat Eurokod 2 był źródłem wielu propozycji przyjętych w PN-B-03264:2002 [2]. Dzięki temu, w ostatecznie opublikowanej wersji Eurokodu 2 [1] odnajdujemy wiele zależności, do których zdążyliśmy się już przyzwyczaić. Zupełnie inaczej jest z przebicciem. Wraz z ukazaniem się Eurokodu 2 stykamy się z podejściem, które istotnie odbiega od tego znanego z PN-B-03264:2002 [2].

Zasady kontroli przebiccia wg Eurokodu 2 przedstawię w dwóch kolejnych artykułach w serii *Eurokody w praktyce*. Pierwszy z nich poświęcony jest warunkom ogólnym, natomiast drugi przebicciu mimośrodowemu oraz elementom ze zbrojeniem na przebiccie.

Normowe podejście do kontroli przebiccia

Przebiccie jest stanem zniszczenia elementów powierzchniowych pod wpływem miejscowego obciążenia czynnego (np. obciążenia stopy fundamentowej przez słup) lub biernego (np. reakcji słupa na płytę stropu płaskiego). Jest ono zjawiskiem o złożonym, przestrzennym charakterze, w którym o zniszczeniu decyduje wiele wzajemnie powiązanych czynników. Wiele lat prowadzenia badań laboratoryjnych i analiz teoretycznych doprowadziło do powstania licznych, często wyrafinowanych, modeli próbujących opisać mechanizm zniszczenia. Złożoność obliczeniowa tych modeli oraz brak możliwości ich uogólnienia sprawiły, że nie zostały one wdrożone do przepisów normowych.

Kłopoty z wypracowaniem uniwersalnego sposobu kontroli przebiccia spowodowały, że w normach zaleca się stosowanie podejścia charakteryzującego się prostotą nieadekwatną do złożoności zjawiska.

Podstawę określania nośności na osiowe przebiccie elementów bez zbrojenia poprzecznego stanowi iloczyn trzech wielkości: długości obwodu kontrolnego u ; wysokości użytecznej elementu d oraz cechy wytrzymałościowej betonu dostosowanej do obwodu kontrolnego. Na tym jednak podobieństwo metod normowych się kończy. Wspólna jest jedynie ich ogólna idea. **Nie ma jednak dwóch norm, które proponowałyby jednakowy sposób wyznaczania pierwszej i trzeciej z wymienionych wielkości. Ogromna jest również liczba wariantów uwzględniania innych czynników wpływających na nośność, w efekcie czego uzyskuje się wyniki różniące się nawet o kilkadziesiąt procent.**

Porównanie metod kontroli przebiccia

Metody kontroli przebiccia wg normy PN-B-03264:2002 [2] i Eurokodu 2 [1] różnią się zasadniczo i ich obliczeniowe porównanie nie ma większego sensu. W normie [2] wiele istotnych

czynników wpływających na przebiccie było pomijanych lub traktowanych marginalnie. W dalszej części artykułu porównam metody proponowane w obu normach.

Warunki nośności i relacja pomiędzy przebicciem i ścinaniem. Zjawisko przebiccia często traktowane jest jako przestrzenna forma ścinania, a w Eurokodzie wielokrotnie używa się określenia *przebiccie przez ścinanie* (ang. *punching shear*), abstrahując od giętej formy tego zjawiska. W normie PN-B-03264:2002 trudno było dopatrzeć się jakichkolwiek podobieństw w sprawdzaniu tych dwóch stanów. Zupełnie inaczej jest w Eurokodzie 2, gdzie do określania nośności na przebiccie używane są trzy wytrzymałości na ścinanie (graniczne naprężenia styczne) oznaczone symbolami $v_{Rd,c}$, $v_{Rd,max}$ i $v_{Rd,cs}$. Odpowiadają one (nie tylko znaczeniowo) granicznym siłom poprzecznym $V_{Rd,c}$, $V_{Rd,max}$ i $V_{Rd,s}$ stosowanym przy kontroli ścinania. **Sposób wykorzystania wymienionych granicznych naprężeń stycznych w projektowaniu jest następujący:**

- w przypadku, gdy w przekroju kontrolnym średnie naprężenie styczne nie przekracza wartości $v_{Rd,c}$ ($v_{Ed} \leq v_{Rd,c}$), to element nie wymaga stosowania zbrojenia poprzecznego;

- naprężenie graniczne $v_{Rd,max}$ wyznacza górną granicę naprężeń stycznych w przekroju otaczającym pole obciążenia, a spełnienie warunku $v_{Ed} \leq v_{Rd,max}$ może w niektórych sytuacjach wymagać pogrubienia płyty lub zastosowania betonu wyższej klasy;

- naprężenie $v_{Rd,cs}$ określa nośność elementu ze zbrojeniem poprzecznym, a równość $v_{Ed} = v_{Rd,cs}$ sformułowana dla przekroju kontrolnego stanowi podstawę wyznaczenia niezbędnego zbrojenia poprzecznego na przebiccie.

Podobieństwa pomiędzy wymienionymi trzema granicznymi naprężeniami stycznymi v_{Rd} i odpowiadającymi im granicznymi siłami poprzecznymi przy ścinaniu V_{Rd} nie ograniczają się tylko i wyłącznie do sposobu ich wykorzystania w projektowaniu. Wiele podobieństw dotyczy również sposobu wyznaczania ich wartości. Wzór służący do obliczania $v_{Rd,c}$ (1a) jest kopią wzoru na $V_{Rd,c}$ (1b), a różnica wynika z pominięcia w tej pierwszej zależności wymiarów przekroju $b_w d$ oraz konieczności uśrednienia stopnia zbrojenia ρ_1 i naprężeń σ_{cp} dla dwóch kierunków w związku z przestrzennym charakterem przebiccia.

- przebiccie:

$$v_{Rd,c} = \max\{C_{Rd,c} k(100\rho_1 f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}; v_{min} + k_1 \sigma_{cp}\} \quad (1a)$$

- ścinanie:

$$V_{Rd,c} = \max\{C_{Rd,c} k(100\rho_1 f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} b_w d; (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d\} \quad (1b)$$

Podobieństwo zależności określających maksymalne naprężenie ścinające przy przebicciu $v_{Rd,max}$ i siłę maksymalną przy ści-

naniu $V_{Rd, max}$ jest także łatwo zauważalne. Graniczne naprężenia ścinające $v_{Rd, cs}$ stosowane do wyznaczania zbrojenia poprzecznego przy przebiciu są odpowiednikiem siły $V_{Rd, s}$. Różnica oznaczeń nie jest przypadkowa. W ścinanych elementach ze zbrojeniem poprzecznym uwzględnia się jedynie nośność zbrojenia (litera „s” w symbolu), natomiast przy przebiciu bierze się dodatkowo pod uwagę wpływ betonu (stąd „cs”).

Inaczej sformułowane są podstawowe warunki nośności w normach [1] i [2]. W pierwszej porównuje się naprężenia ścinające w przekroju kontrolnym (2a), natomiast w drugiej siły (2b).

$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{u_c d} \leq v_{Rd,c} \quad (2a)$$

$$N_{Sd} \leq N_{Rd} = f_{ctd} u_p d \quad (2b)$$

Nowym zaleceniem, nieznanym z dotychczasowej normy [2], jest wymagane przez Eurokod 2 ograniczenie naprężeń stycznych w przekroju na obwodzie pola obciążenia:

$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{u_c d} \leq v_{Rd, max} = 0,4v_{fd} \quad (3)$$

Obwód kontrolny (kształt i długość). Obwód oraz przekrój kontrolny są podstawowymi wielkościami wykorzystywanymi przy sprawdzaniu nośności na przebicie. Eurokod 2 wprowadza pojęcie **podstawowego obwodu kontrolnego**, będącego najkrótszym obwodem otaczającym pole obciążenia i znajdującym się w odległości $2d$ (rysunek 1) od niego. Konieczność minimalizacji długości sprawia, że obwód kontrolny w sąsiedztwie naroży wypukłych tworzą odcinki łuków kołowych (w przypadku słupów prostokątnych są nimi ćwiartki okręgów).

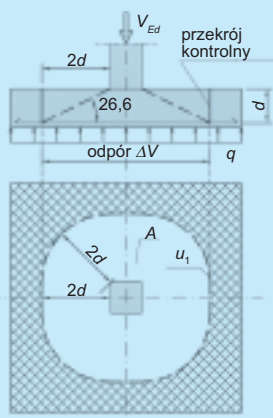
Rys. 1. Podstawowe obwody kontrolne dla kołowego i prostokątnego pola obciążenia

Kształt i wielkość podstawowego obwodu kontrolnego wyznaczone wg [1] są zdecydowanie inne niż wg [2]. Różnice są efektem przyjęcia innych założeń:

- w normie [1] bryłę przebicia tworzą linie nachylone do poziomu pod kątem $\theta = 26,6^\circ$ ($\text{ctg}(\theta) = a/d = 2$), a obwód podstawy bryły przebicia w poziomie zbrojenia rozciąganego (odległy o $2d$ od pola obciążenia) jest równocześnie podstawowym obwodem kontrolnym (rysunek 2);

- w normie [2] bryłę przebicia wyznaczały linie nachylone pod kątem 45° ($\text{ctg}(\theta) = a/d = 1$), a obwód kontrolny był średnim obwodem obydwu podstaw bryły przebicia i znajdował się w odległości $d/2$ od pola obciążenia.

Proponowany w Eurokodzie kąt nachylenia płaszczyzn przebicia wynoszący $26,6^\circ$ jest stosunkowo niewielki i bliski najmniejszemu war-



Rys. 2. Kontrola przebicia w słupach fundamentowych (podstawowy obwód kontrolny)

tościom obserwowanym w badaniach laboratoryjnych. Warto podkreślić, że wynikająca z tego założenia duża długość obwodu kontrolnego nie prowadzi do uzyskania zdecydowanie większej nośności wg [1] niż wg [2]. O jej wartości decyduje skorelowanie długości obwodu z odpowiednią cechą charakteryzującą wytrzymałość betonu. W Eurokodzie 2 jest nią umowna wartość granicznych naprężeń ścinających $v_{Rd,c}$, przyjmująca zdecydowanie mniejszą wartość niż stosowana w [2] wytrzymałość betonu na rozciąganie f_{ctd} . Wielkość $v_{Rd,c}$ uwzględnia dodatkowo wpływ efektu skali oraz zbrojenia podłużnego na nośność.

Podstawowy obwód kontrolny (w odległości $2d$ od pola obciążenia) nie musi być jedynym wymagającym sprawdzenia. Kontrola obwodów o innym położeniu lub kształcie może być wymagana w następujących sytuacjach:

- 1) obciążenia przy krawędzi stropu lub otworu;
- 2) w elementach o zmiennej grubości;
- 3) w elementach ze zbrojeniem poprzecznym;
- 4) w fundamentach w związku z redukcją siły przebijającej.

Sytuacje (1) i (3) omówione zostaną w kolejnym artykule, natomiast sytuacja (4) we fragmencie poświęconym wpływowi sposobu przyłożenia obciążenia.

Wpływ zbrojenia podłużnego na nośność. Zbrojenie podłużne przez tzw. efekt klockujący (ang. *dowel action*) wpływa na nośność połączenia na przebicie. Ilość zbrojenia decyduje o nachyleniu powierzchni bocznych bryły przebicia w momencie zniszczenia. Norma PN-B-03264:2002 [2] niemal całkowicie pomijała ten wpływ. Uwzględniane było jedynie położenie zbrojenia definiujące wysokość użyteczną d . Norma [2] wymagała, aby stopień zbrojenia dla każdego kierunku był nie mniejszy niż 0,5%, a spełnienie tego warunku upoważniało do stosowania proponowanych w normie zależności. Większa ilość zbrojenia nie przekładała się jednak na uzyskanie większej nośności.

W Eurokodzie 2 wpływ zbrojenia podłużnego na nośność wyraża stopień zbrojenia ρ_1 ujęty we wzorze na maksymalne średnie naprężenia ścinające $v_{Rd,c}$ (1a). Jako wartość miarodajną przyjmuje się stopień zbrojenia ρ_1 , będący średnią geometryczną dla dwóch ortogonalnych kierunków.

Rozważa się w tym przypadku zbrojenie w pasmach szerokości równej odpowiedniemu wymiarowi przekroju słupa powiększonemu o $3d$ w każdą stronę – czyli z obszaru minimalnie poszerzonego w stosunku do objętego podstawowym obwodem kontrolnym. Uznaje się, że efektywność zbrojenia nie wzrasta po przekroczeniu $\rho_1 = 0,02$.

Warto zwrócić uwagę na postać wzoru (1a) określającego graniczne naprężenia $v_{Rd,c}$. Uzyskiwana wartość jest silnie zależna od stopnia zbrojenia podłużnego ρ_1 , jednak zbrojenie może być uwzględniane tylko wtedy, gdy jest skutecznie zakotwiczone po obydwu stronach powierzchni przebicia. Jeżeli nie spełnia warunków zakotwienia ($\rho_1 = 0$) i nie występuje poprzeczne ściskanie wynikające z działania siły osiowej ($\sigma_{cp} = 0$), to uzyskuje się $v_{Rd,c} = 0$. Wynikałoby z tego nieprawdziwy wniosek, że beton nie wykazuje jakiejkolwiek zdolności do przenoszenia naprężeń stycznych. Korektę tego założenia stanowi v_{min} ograniczające z dołu wielkość $v_{Rd,c}$ (wzór 1a). Z tego typu sytuacji można zetknąć się przy projektowaniu stóp fundamentowych, gdy przekrój kontrolny znajduje się blisko krawędzi podstawy stopy, co może dyskwalifikować uwzględnienie zbrojenia głównego w omawianym wzorze.

Wpływ kształtu pola obciążenia. Normowe metody kontroli przebicia osiowego bazują na założeniu o równomierności roz-

kładu średnich naprężeń stycznych na długości obwodu kontrolnego. Założenie można uznać za poprawne w przypadku niezbyt dużej długości tego obwodu oraz w przypadku pól obciążenia o zwartym kształcie. **Znaczna długość obwodu kontrolnego lub wydłużony kształt pola obciążenia (za taki uważano kształt, w którym proporcja długości boków przekraczała 2) sprawiają, że przyjęcie założenia o równomierności rozkładu średnich naprężeń stycznych prowadzi do przeszacowania nośności.** Normy [1] i [2] nie zwracają uwagi na ten fakt. Tego typu zalecenia znajdują się w normie amerykańskiej oraz we wcześniejszych edycjach Eurokodu 2 (z lat 1991 i 1999). Występująca w takich sytuacjach koncentracja naprężeń w okolicy krótszych boków uwzględniana była przez redukcję obwodu kontrolnego.

Wpływ sposobu przyłożenia obciążenia. Metoda określania nośności na przebicie odnosi się do sytuacji, w których do elementu przyłożone są: z jednej strony siła skupiona, a z drugiej równoważące ją obciążenie rozłożone.

Przyjęto założenie, że obciążenie rozłożone występuje na proporcjonalnie dużym obszarze – w większości na zewnątrz podstawy bryły przebiecia (obwodu kontrolnego). Taki sposób przyłożenia obciążenia jest najbardziej niekorzystny. Koncentracja obciążeń równoważących siłę skupioną w obszarze znajdującym się w niewielkiej odległości od słupa wpływa korzystnie (wzrost nośności) na zachowanie obliczanego elementu. Tego typu sytuacja występuje w stopach fundamentowych lub głowicach palowych. W sytuacjach gdy analizuje się przebicie pod innym kątem, gdy obwód kontrolny położony jest bliżej (w odległości a od pola obciążenia), a jego długość mniejsza, należy skorygować wartość granicznych naprężeń stycznych $v_{Rd,c}$ (przez pomnożenie ich przez $2d/a$). Eurokod 2 dopuszcza również redukcję siły przebijającej V_{Ed} do wartości $V_{Ed,red} = V_{Ed} - \Delta V$ w związku z występowaniem składowej odporu ΔV na powierzchni bryły przebiecia przeciwległej do pola obciążenia. Ten sposób postępowania znany był również z normy [2], ale redukcja była nieco mniejsza ze względu na mniejszą powierzchnię tego obszaru. Uwzględniając jednak tę zmniejszoną wartość siły V_{Ed} należy pamiętać, że warunek przebiecia powinien zostać sprawdzony nie tylko dla podstawowego obwodu kontrolnego, ale także obwodów położonych bliżej pola obciążenia.

Eurokod 2 wyraźnie wskazuje, że obniżenie siły przebijającej do wartości $V_{Ed,red}$ dotyczy tylko fundamentów. W przypadku stropów redukcja ta byłaby niewielka, dlatego też w świetle brzmienia punktu 6.4.3.(7) normy [1] należy sugerować rezygnację z takiego postępowania.

Dopuszczenie redukcji siły przebijającej w połączeniu ze znaczną odległością podstawowego obwodu kontrolnego od słupa może sprawiać, że wartość $V_{Ed,red}$ będzie niewielka, a spełnienie warunku nośności bezproblemowe. W tym przypadku wymagane jest wykazanie, że warunek nośności spełniony jest również w przypadku przekrojów kontrolnych położonych bliżej niż w odległości $2d$. W tych przekrojach, większej wartości siły przebijającej $V_{Ed,red}$ (mniejsza redukcja wynikająca z mniejszego obszaru objętego obwodem kontrolnym)

odpowiada większa nośność płyty (efekt pomnożenia nośności podstawowej przez czynnik $2d/a$). W przypadku słupa o przekroju kwadratowym o boku c , przebicie osiowe dla obwodu kontrolnego oddalonego o a od jego krawędzi określa warunek:

$$v_{Ed,red} = \frac{V_{Ed} - qA_a}{u_a d} \leq v_{Rd,c} \frac{2d}{a} \quad (4)$$

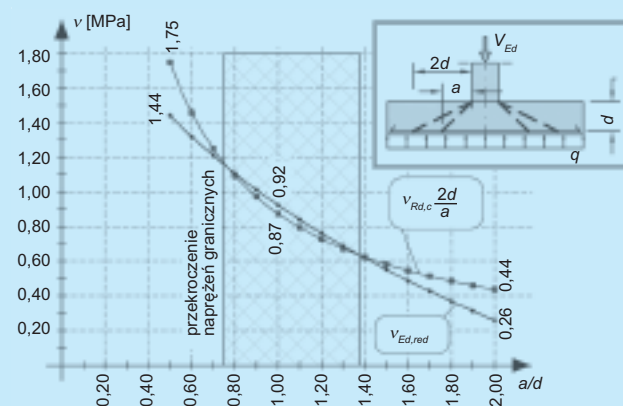
gdzie:

q – odpór gruntu;

u_a – długość obwodu kontrolnego;

A_a – pole powierzchni fragmentu podstawy fundamentu ograniczonego przez obwód kontrolny. Wielkości te można wyznaczyć ze wzorów: $A_a = c^2 + 4ca + \pi a^2$; $u_a = 4c + 2\pi a$.

Na rysunku 3 pokazano wykres ilustrujący kontrolę warunku nośności (4) w przypadku stopy fundamentowej w zależności od przyjętego położenia obwodu kontrolnego: (odległość $a = 0,5d + 2,0d$ od słupa). Dwie linie na wykresie symbolizują lewą i prawą stronę warunku (4) w funkcji a . Jak widać, mogą zdarzyć się sytuacje, gdy warunek nośności jest spełniony dla podstawowego obwodu kontrolnego ($a/d = 2,0$), natomiast nie jest spełniony dla obwodów położonych bliżej słupa (fragment zakreskowany). Nie są to jednak sytuacje powszechne i mogą wystąpić przede wszystkim wtedy, gdy pod fundamentem występuje duży odpór gruntu.



Rys. 3. Warunek nośności (4) w funkcji położenia przekroju kontrolnego

Abstract

Article is dedicated to explanation of punching control according to Eurocode 2 requirements. Differences between Eurocode 2 and former polish standard were indicated. Some aspects such as: control perimeter shape, main reinforcement impact, relationship between shear and punching have been discussed.

Literatura

[1] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

[2] PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.

dr inż. Grzegorz Wandzik
Politechnika Śląska w Gliwicach

PARTNERZY DZIAŁU

