

# Sprawdzanie zakotwienia zbrojenia stóp fundamentowych według Eurokodu 2

Dr hab. inż. Tadeusz Urban, prof. PŁ, Politechnika Łódzka

## 1. Wprowadzenie

Eurokod 2 [1] określa w punkcie 9.8. warunki konstrukcyjne zbrojenia fundamentów. Wymagane jest m.in. sprawdzenie zakotwienia zbrojenia głównego. Siłę rozciągającą w zbrojeniu wyznacza się z warunków równowagi, biorąc pod uwagę wpływ ukośnego zarysowania. Równowagę sił należy przyjąć zgodnie ze schematem pokazanym na rysunkach 1 i 2. Siłę rozciągającą, która powinna być przeniesiona przez zakotwienie, określa wzór:

$$F_s = R \frac{z_e}{z_i} \quad (1)$$

w którym:

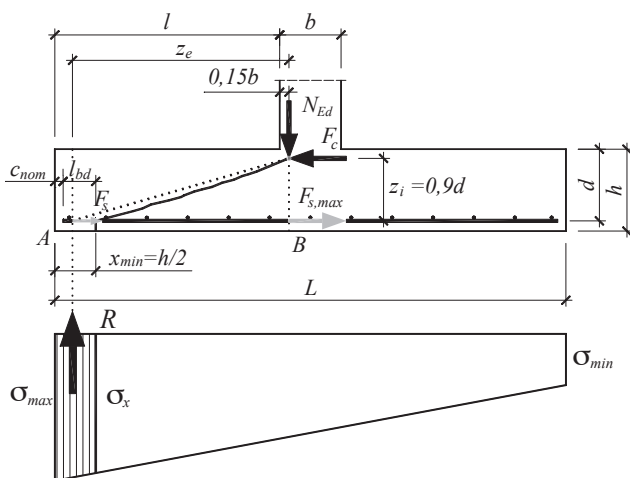
$R$  – jest wypadkową nacisku na grunt na odcinku  $x$ ,  
 $z_e$  – jest ramieniem sił zewnętrznych, tj. odległością między  $R$  i siłą pionową  $N_{Ed}$ ,

$N_{Ed}$  – jest siłą pionową wywieraną przez cały nacisk gruntu między przekrojami A i B,

$z_i$  – jest ramieniem sił wewnętrznych, tj. odległością między zbrojeniem i siłą poziomą  $F_c$ ,

$F_c$  – jest siłą ściskającą odpowiadającą maksymalnej sile rozciągającej  $F_{s,max}$ .

Ramiona sił  $z_e$  i  $z_i$  można wyznaczyć rozpatrując strefy ściskane o wymiarach koniecznych ze względu na siły



**Rys. 1.** Model do określania siły rozciągającej w zbrojeniu głównym z uwzględnieniem rys ukośnych dla stóp fundamentowych smukłych

$N_{Ed}$  i  $F_c$ . Jako uproszczenie można przyjmować  $z_i = 0,9 d$ , a  $z_e$  określa się przyjmując położenie osi siły  $N_{Ed}$  w odległości  $0,15 b$  od brzoju stopy, gdzie  $b$  jest bokiem stopy. Aby proste pręty zbrojenia głównego były odpowiednio zakotwione, powinien być spełniony warunek:

$$x = l_{bd} + c_{nom} \quad (2)$$

w którym:

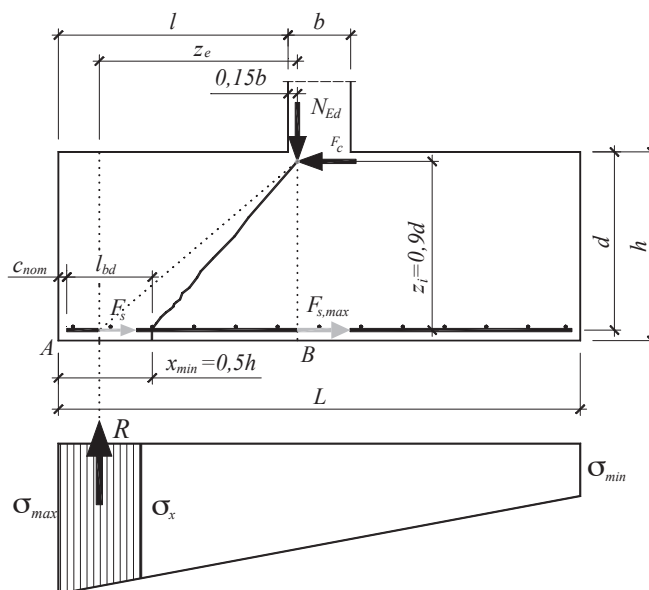
$l_{bd}$  – jest obliczeniową długością zakotwienia,

$c_{nom}$  – jest nominalnym otuleniem zbrojenia (odległością końca pręta od brzoju stopy).

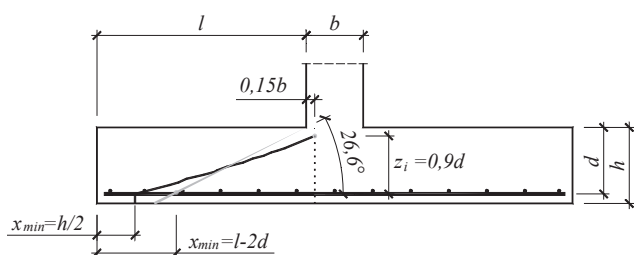
Dotychczas w praktyce inżynierskiej w Polsce problem ten na ogół nie był przedmiotem sprawdzeń obliczeniowych. Eurokod 2 powyższymi postanowieniami sugeruje, że mogą być trudności z zakotwieniem zbrojenia na końcu stopy w sąsiedztwie p. A – rys. 1. Problem ten został częściowo naświetlony w ostatnio wydanej monografii Prof. M. Knauffa [2]. W artykule niniejszym zostanie przedstawione podejście własne autora odnośnie zasygnalizowanego problemu.

## 2. Ustalenie krytycznego kąta nachylenia rysy ukośnej

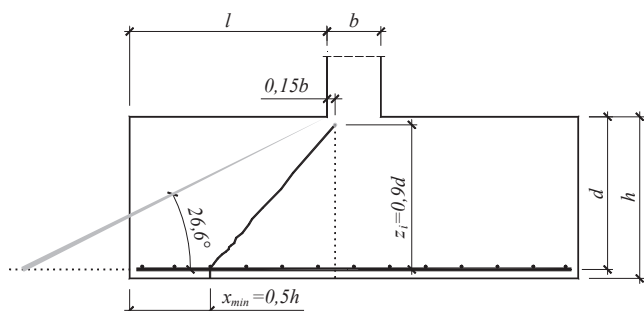
Podstawowym problemem w sprawdzaniu długości zakotwienia zbrojenia głównego stóp fundamentowych jest ustalenie odcinka  $x_{min}$ . Odmierzając ten odcinek od krawędzi stopy w kierunku słupa, na jego końcu powinien się znaleźć wylot rysy ukośnej. Norma [1] podpowiada, że dla prostych prętów bez końcowych zakotwień, krytyczna jest najmniejsza wartość  $x$ . Eurokod 2 zezwala dla takich przypadków przyjmować  $x_{min} = 0,5 h$ . W jaki sposób takie zalecenie wpływa na kąt nachylenia rysy ukośnej, pokazano na rysunku 1 dla stopy smukłej, a na rysunku 2 – dla stopy krępej. Takie uproszczenie może budzić wątpliwości co do jego poprawności. Zgodnie z p. 6.4 Eurokodu 2 stanowiącym o przebicciu płyt stropowych, kąt nachylenia rysy ukośnej jest stały i wynosi  $T = \arctan(1/2) \approx 26,6^\circ$ . Dla nośności ścinania przy przebicciu fundamentów (elementów krępych), Eurokod 2 w p. 6.4.4 wymaga sprawdzenia na ścinanie obwodów kontrolnych leżących w granicach  $2 d$  od skraju stopy. Oznacza to, że należy brać pod uwagę wszystkie możliwe kąty nachylenia rysy ukośnej w granicach  $26,6^\circ \div 90^\circ$ . W tej sytuacji wydaje się uzasadnione, aby w oblicze-



**Rys. 2.** Model do określania siły rozciągającej w zbrojeniu głównym z uwzględnieniem rys ukośnych dla stóp fundamentowych krępych



**Rys. 3.** Porównanie krytycznych odcinków  $x_{min}$  według zaleceń Eurokodu 2 i minimalnego kąta nachylenia rysy według teorii przebicia



**Rys. 4.** Rysy ukośne w przypadku stóp krępych

niach długości zakotwienia wprowadzono ograniczenia o najmniejszym kącie nachylenia rysy ukośnej do wartości  $\sim 26,6^\circ$ . Na rysunku 3 pokazano stopę smukłą, dla której takie ograniczenie ma uzasadnienie. Krytyczną długość  $x_{min}$  można obliczać wtedy ze wzoru:

$$x_{min} = l - 2d \quad (3)$$

Należy również zwrócić uwagę na fakt wyprowadzania rys ukośnych z różnych punktów przy analizie przebicia (rys. 6.16 w Eurokodzie 2) i w modelu do określa-

nia siły rozciągającej z uwzględnieniem rys ukośnych (rys. 9.13 w Eurokodzie 2). W pierwszym przypadku rysa wybiega z krawędzi stopy, a w drugim jest to punkt leżący w odległości  $0,15b$  od tej krawędzi, odmierzany w kierunku poziomym i przesunięty do dołu od wierzchu stopy o  $0,1d$ .

Na rysunku 4 pokazano stopę o proporcjach  $h$  do  $l$  częściej spotykaną w praktyce. Przyjęcie uproszczenia  $x_{min} = 0,5h$  będzie wtedy prowadzić do przyjęcia kąta nachylenia rysy ukośnej większego od  $26,6^\circ$ . Dla stóp bardzo krępych, może to nawet prowadzić do znacznych wartości kąta  $\theta$ . Trudno jednoznacznie w takich sytuacjach ocenić poprawność tego założenia bez szczegółowej analizy. W dalszej części artykułu zostanie przedstawiona analiza mająca na celu wyjaśnienie tego problemu.

Krytyczny kąt nachylenia rysy ukośnej  $\theta$ , zdaniem autora, powinien wynikać z analizy przebicia. W tym celu zostanie wykorzystana metodyka przedstawiona w pracy [3], która polega na przeanalizowaniu możliwych obwodów kontrolnych  $u$ , korespondujących z kątami  $\theta$  od  $26,6^\circ$  do  $90^\circ$ . Jako miarodajny kąt  $\theta$  należy uznać taki, dla którego zostanie osiągnięte ekstremum ilorazu:

$$\max \left\{ \frac{\beta V_{Ed,red}}{V_{Rd}} \right\} \quad (9)$$

gdzie:

$\beta$  – współczynnik zwiększający siłę przebijającą ze względu na mimośród obciążenia, można obliczać ze wzoru:

$$\beta = 1 + k \frac{M_{Ed} u}{V_{Ed,red} W} \quad (10)$$

w którym:

$k$  – jest współczynnikiem zależnym od stosunku  $c_1/c_2$ , należy go określać na podstawie Tablicy 6.1 normy [1],  $c_1$  – oznacza wymiar stopy równoległy do mimośrodu obciążenia,  $c_2$  – oznacza wymiar stopy prostopadły do mimośrodu obciążenia.

$$V_{Ed,red} = V_{Ed} - \Delta V_{Ed} \quad (11)$$

$V_{Ed}$  – siła działająca na fundament,

$\Delta V_{Ed}$  – odpór gruntu pomniejszony o ciężar fundamentu, działający w granicach rozważanego obwodu kontrolnego,

$M_{Ed}$  – moment działający na fundament,

$W$  – wskaźnik odpowiadający rozkładowi naprężeń stycznych na rozważanym obwodzie kontrolnym  $u$ , należy obliczać go ze wzoru:

$$W = 0,5c_1^2 + c_1c_2 + 2c_2a + 4a^2 + \pi ac_1 \quad (12)$$

Wzór (12) jest analogiczny do wzoru (6.41) w Eurokodzie 2. Różnica polega tylko na zamianie  $2d$  na  $a$ , które jest odległością rozważanego obwodu kontrolnego  $u$  od boku stopy,

$V_{rd}$  – nośność na przebicie fundamentu niezbrojonego na ścinanie, należy obliczać ze wzoru:

$$V_{Rd} = v_{Rd} u d \quad (13)$$

w którym:

$$v_{Rd} = C_{Rd,c} k \sqrt[3]{100 \rho_l f_{ck}} \cdot \frac{2d}{a} \quad \text{lecz nie} \quad v_{\min} \frac{2d}{a} \quad \text{mniej niż} \quad (14)$$

$$C_{Rd,c} = 0,18 / \gamma_c = 0,1286 \quad - \text{współczynnik empiryczny dostosowany do polskich postanowień krajowych } \gamma_c = 1,4.$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2 \quad - \text{współczynnik skali (} d \text{ poddawia się w mm),}$$

$$\rho_l = \sqrt{\rho_{ly} \rho_{lz}} \leq 0,02 \quad - \text{średni stopień zbrojenia głównego z obu kierunków,}$$

$$f_{ck} \quad - \text{wytrzymałość charakterystyczna betonu w MPa,}$$

$$v_{\min} = 0,035 k^{\frac{3}{2}} f_{ck}^{\frac{1}{2}} \quad - \text{wzór (6.3N) normy [1].}$$

Sprawdzenie zakotwienia zbrojenia głównego fundamentów polega na udowodnieniu spełnienia warunku (2), który możemy zapisać w postaci:

$$\frac{x}{l_{bd} + c_{nom}} \geq 1 \quad (15)$$

Długość zakotwienia zgodnie z normą [1] określamy ze wzorów:

$$l_{b,rqd} = \frac{\sigma_{sd}}{4f_{bd}} \quad (16)$$

$$\sigma_{sd} = \frac{4F_s}{n \pi \varnothing^2} \quad (17)$$

$$f_{bd} = \frac{2,25 \eta_1 \eta_2 f_{ctk,0,05}}{\gamma_c} \quad (18)$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{b,rqd} \quad \text{lecz nie mniej } l_{b,min} \quad (19)$$

w których:

$\varnothing$  – jest średnicą pręta,

$\sigma_{sd}$  – jest naprężeniem w zbrojeniu głównym w miejscu zakotwienia,

$F_s$  – jest siłą przeniesioną przez zbrojenie główne na końcu odcinka  $x$ ,

$n$  – jest liczbą prętów na szerokości rozważanego przekroju stopy,

$f_{bd}$  – jest wartością obliczeniową granicznego naprężenia przyczepności dla prętów żebrowanych,

$\eta_1$  – jest współczynnikiem zależnym od jakości warunków przyczepności i pozycji pręta w czasie betonowania,  $\eta_1 = 1,0$ , gdy są dobre,  $\eta_1 = 0,7$  – w pozostałych przypadkach,

$\eta_2$  – zależy od średnicy pręta, dla  $\varnothing \leq 32$  mm należy przyjmować  $\eta_2 = 1,0$ ,

$f_{ctk,0,005}$  – jest charakterystyczną wytrzymałością betonu na rozciąganie z kwantylem 5%,

$\gamma_c$  – współczynnik częściowy dla betonu (według polskich postanowień 1,4),

$l_{bd}$  – obliczeniowa długość zakotwienia według p.8.4.4 normy [1],

$$l_{b,min} = \max\{0,3l_{b,rqd}; 10\varnothing; 100 \text{ mm}\}.$$

Korzystając z powyższych wzorów, za pomocą programu EXCEL można sporządzić wykres siły  $F_s$  lub naprężeń  $\sigma_{sd}$  w funkcji odcinka zakotwienia  $x$  (rys. 8). Jak z tego wykresu widać, maksymalna wartość siły jest osiągnięta w przekroju  $B$  (rys. 1 i 2). Warto również zauważyć, że na końcu zbrojenia siła nie spada do zera, co wynika z faktu istnienia otuliny. Wielkość  $x = c_{nom}$  generuje pewną wielkość siły oporu gruntu  $R$ , która na końcu prętów zbrojenia wywołuje „teoretyczną siłę” większą od zera.

Podobnie można przedstawić wykres ilorazu  $x/(l_{bd} + c_{nom})$  i na jego podstawie ustalić odcinek  $x$  spełniający warunek (15). Jeśli w ten sposób ustalone  $x \leq (l - a_{kr})$ , to warunek zakotwienia jest zachowany. Symbol  $a_{kr}$  jest krytyczną odległością obwodu kontrolnego  $u$  od boku słupa, korespondującą z kątem nachylenia rysy ukośnej  $\theta$  spełniającej warunek (9).

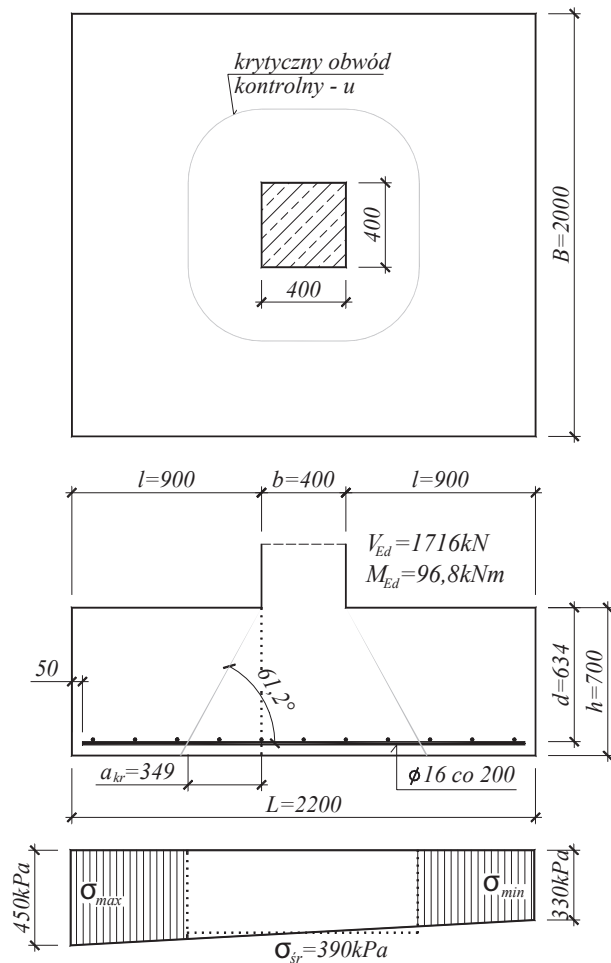
W celu przybliżenia procedury poszukiwania miarodajnego obwodu kontrolnego  $u$ , czyli inaczej najbardziej niekorzystnego nachylenia rysy ukośnej  $\theta$  oraz sprawdzenia zakotwienia, przedstawiono dalej przykłady obliczeniowe.

### 3. Przykład stopy o typowych proporcjach

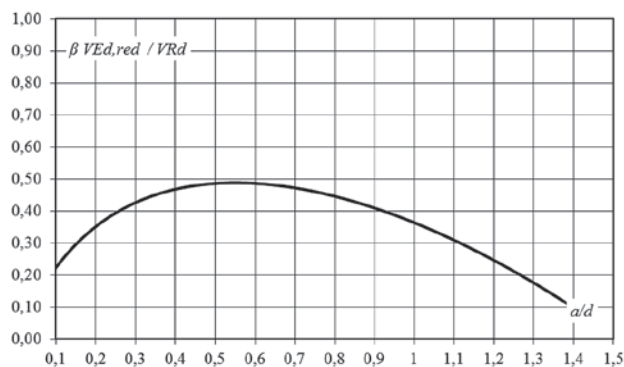
Stopa ma wymiary w rzucie 2,2 x 2,0 m i wysokość 0,7 m. Słup osiowo usytuowany w stosunku do stopy ma przekrój kwadratowy o boku  $b = 0,4$  m. Obciążenie działające na stopę wynosi  $V_{Ed} = 1716$  kN i  $M_{Ed} = 96,8$  kNm. Zbrojenie główne przyjęto jednokowe w obu kierunkach  $\varnothing 16$  co 200 mm. Otulina nominalna wynosi 50 mm, a wysokości użyteczne w odpowiednich kierunkach wynoszą:  $d_L = 642$  mm i  $d_B = 626$  mm, zaś średnia wysokość użyteczna  $d = 634$  mm. Średni stopień zbrojenia głównego wynosi  $\rho_l = 0,001585$ . Działające obciążenie wywołuje nacisk na grunt o wartościach wynoszących:  $\sigma_{max} = 450$  kPa i  $\sigma_{min} = 330$  kPa, średnio  $\sigma_{sr} = 390$  kPa. Podstawowe dane analizowanej stopy pokazano na rysunku 5.

Dla powyższych danych, najbardziej wyęziony obwód kontrolny występuje w odległości  $a \approx 349$  mm od boku słupa. Na rysunku 6 pokazano krzywą zależności  $\beta V_{Ed,red} / V_{Rd}$  w funkcji stosunku  $a/d$ . Ekstremum ilorazu jest osiągnięte dla  $a/d = 0,55$ , co odpowiada kątowi  $\theta = 61,2^\circ$ . Można również zauważyć, że nośność stopy na przebiecie jest zapewniona ze znacznym zapasem ( $\beta V_{Ed,red} / V_{Ed} = 0,49 < 1$ ).

Na rysunku 7 pokazano schemat miarodajny do sprawdzenia zakotwienia zbrojenia w kierunku dłuższego boku stopy  $L$ . W schemacie tym uwzględniono uproszczone zasady co do ramion równoważących siły wewnętrzne  $z_e$  i  $z_i$ , zgodnie z zaleceniami Eurokodu 2. Odcinek możliwej realizacji zakotwienia przyjęto zgodnie z analizą krytycznego kąta nachylenia rysy ukośnej.



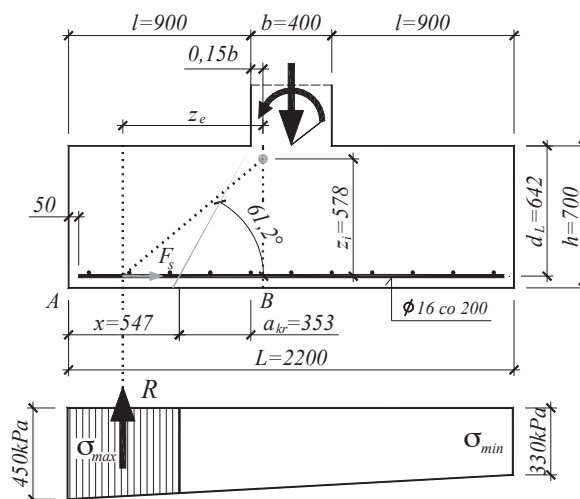
**Rys. 5.** Analizowana stopa fundamentowa o typowych proporcjach z najbardziej niekorzystną rysą ukośną wyznaczoną zgodnie z zasadami teorii przebiecia według Eurokodu 2 [1]



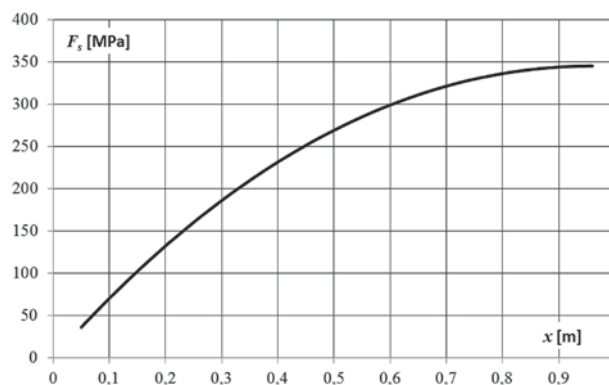
**Rys. 6.** Krzywa ilorazu  $\beta V_{Ed,red} / V_{Rd}$  w funkcji  $a/d$

Wykres na rysunku 8 przedstawia funkcję siły  $F_s$  w zbrojeniu na odcinku A-B. Jest to parabola trzeciego stopnia osiągająca maksymalną wartość w punkcie B. W szczególnym przypadku równomiernego odporu gruntu krzywa będzie parabolą drugiego stopnia.

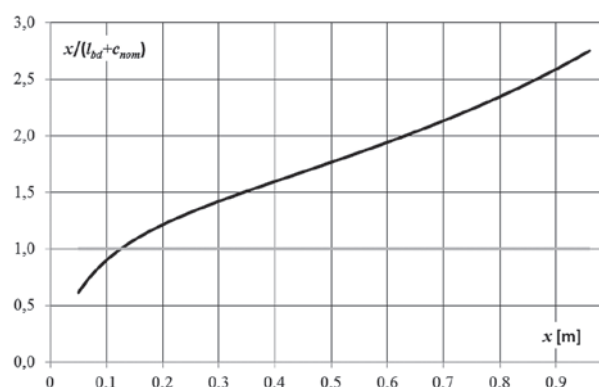
Na rysunku 9 pokazano krzywą (czarna linia) stosunku odcinka  $x$  do odpowiadającej mu długości zakotwienia  $l_{bd}$  powiększonej o wielkość nominalnego otulenia  $c_{nom}$ .



**Rys. 7.** Model obliczeniowy do sprawdzenia długości zakotwienia zbrojenia w płaszczyźnie działania momentu w przykładzie stopy o typowych proporcjach

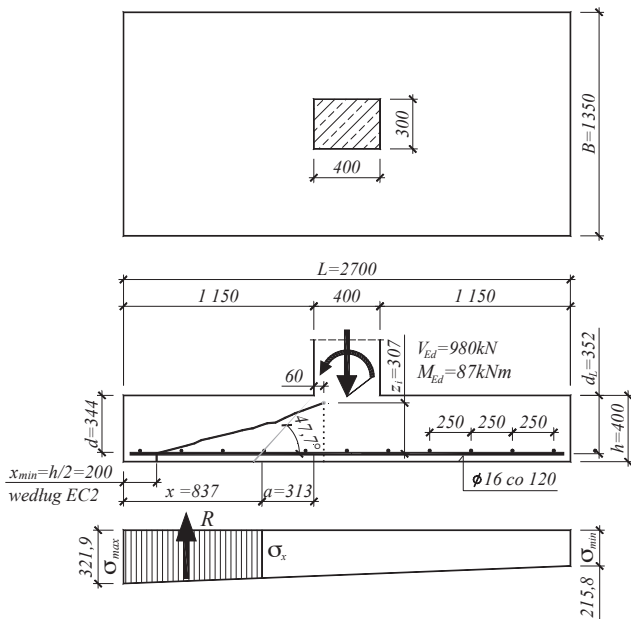


**Rys. 8.** Wykres siły w zbrojeniu głównym w funkcji  $x$  dla analizowanego przykładu stopy o typowych proporcjach

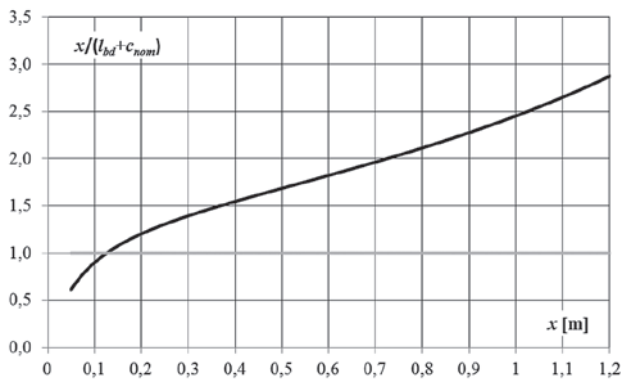


**Rys. 9.** Wykres ilorazu  $x / (l_{bd} + c_{nom})$  w funkcji odcinka  $x$  w przykładzie stopy o typowych proporcjach

Wartość tego ilorazu powyżej jedności oznacza bezpieczne zakotwienie zbrojenia. Jeśli przyjąć, że najbardziej prawdopodobny wylot rysy ukośnej (w poziomie zbrojenia równoległego do boku L) powstanie w odległości  $x = 0,547$  m od krawędzi stopy, to możemy stwier-



Rys. 10. Przykład stopy smukłej



Rys. 11. Wykres ilorazu  $x/(l_{bd} + c_{nom})$  w funkcji odcinka  $x$  w przykładzie stopy smukłej

dzić, że bezpieczeństwo zakotwienia jest zachowane ze znacznym zapasem ( $x/(l_{bd} + c_{nom}) = 1,852$ ). Gdyby przyjąć za  $x_{min} = h/2 = 350$  mm, zgodnie z zaleceniami Eurokodu 2, to również będzie można stwierdzić możliwość bezpiecznego zakotwienia prostego zbrojenia ( $x/(l_{bd} + c_{nom}) \approx 1,5$ ). Uprozczone zalecenia normowe można w tym przypadku uznać za bezpieczne.

#### 4. Przykład stopy smukłej

Aby rozeznaczyć problem w przypadku innych proporcji konstrukcji, zostanie przeanalizowany przykład stopy smukłej o geometrii pokazanej na rysunku 10. Wymiary podszwy wynoszą 2,7 x 1,35 m. Wysokość całkowita stopy  $h = 400$  mm i odpowiednie wysokości  $d_L = 352$  mm – wysokość użyteczna w analizie zakotwienia zbrojenia w kierunku  $L$ ,  $d = 344$  mm – średnia wysokość użyteczna stosowana w analizie przebicia. Wymiary poprzeczne słupa przyjęto 400 x 300 mm. Analiza została przeprowadzona

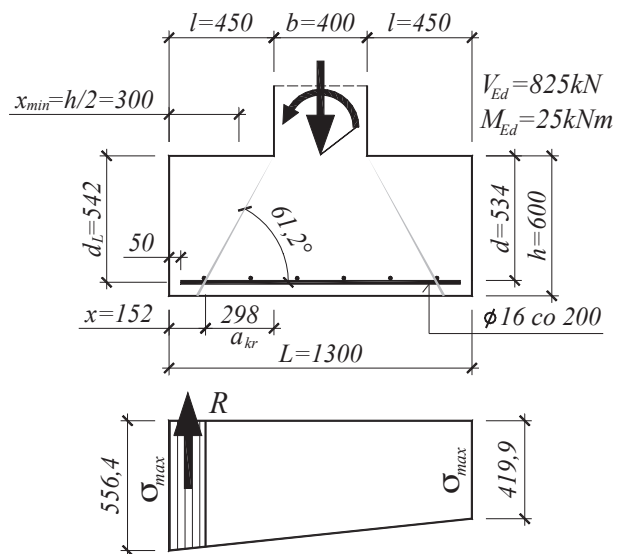
dla sił działających na stopę o wielkościach  $V_{Ed} = 980$  kN i  $M_{Ed} = 87$  kNm, które wywołują nacisk na podłoże gruntowe o wartościach:  $\sigma_{max} = 321,9$  kPa i  $\sigma_{min} = 215,8$  kPa, średnio  $\sigma_{sr} = 268,9$  kPa. Zbrojenie główne stopy przyjęto w kierunku dłuższego boku –  $\varnothing 16$  co 120 mm i w kierunku krótszego boku –  $\varnothing 16$  co 200 mm.

W wyniku analizy przebicia ustalono najbardziej niekorzystny kąt nachylenia rysy ukośnej, który dla analizowanego elementu wynosi  $\theta = 47,7^\circ$ . Odpowiada to obwodowi kontrolnemu w odległości  $a = 313$  mm od krawędzi słupa. Przyjmując ten kąt za miarodajny, w analizie zakotwienia zbrojenia uzyskujemy  $x = 837$  mm. Jest to wartość wielokrotnie większa od zalecanego przez Eurokod  $2x_{min} = h/2 = 200$  mm. Na rysunku 11 pokazano krzywą ilorazu  $x/(l_{bd} + c_{nom})$  dla analizowanego przykładu stopy smukłej. Wartość ilorazu  $x/(l_{bd} + c_{nom}) \geq 1$  zaczyna się już od  $x = 126$  mm. Oznacza to zapewnienie bezpiecznego zakotwienia prostych prętów zarówno dla  $x_{min} = h/2$  i  $x$  ustalonego według propozycji autora.

#### 5. Przykład stopy bardzo krępej

Dwa powyższe przykłady, mimo znacznej różnicy w proporcjach wysięgu  $l$  do wysokości  $h$ , nie wykazały problemu z zakotwieniem zbrojenia. Aby sprawdzić, czy istnieje możliwość otrzymania innego wyniku – braku możliwości prostego zakotwienia, przedstawiono kolejny przykład bardzo krępej stopy. Należy przy tym pamiętać, że bardzo krępe stopy o proporcjach  $h/l \geq 2$  nie wymagają zbrojenia. Do analizy przyjęto wymiary niepełniające tego kryterium, ale bliskie tym proporcjom  $h/l \approx 1,33$  (rys. 12).

Analiza przebicia wykazała, że nachylenie krytyczne rysy wynosi  $61,2^\circ$ , odpowiada to wylotowi rysy w poziomie zbrojenia w kierunku  $L$  w odległości od słupa  $a_{kr} = 294$  mm. Odcinek, na którym powinno być zakotwione

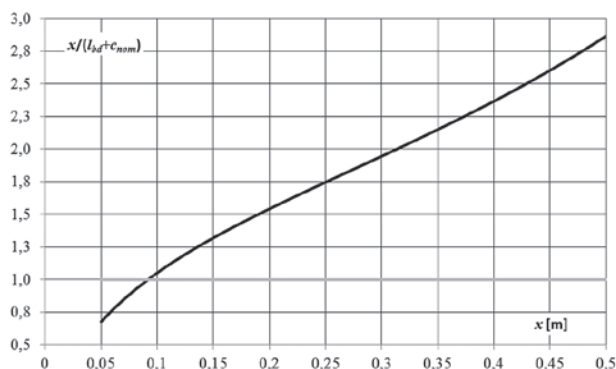


Rys. 12. Dane do przykładu stopy bardzo krępej z ukośną rysą krytyczną określoną na podstawie analizy przebicia

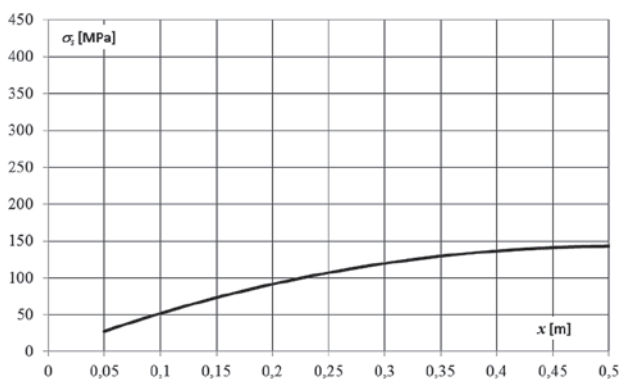
zbrojenie,  $x = 156$  mm. Przyjmując za  $x = h/2 = 300$  mm otrzymujemy większą wartość. Niezbędny odcinek na zakotwienie odczytujemy z wykresu na rysunku 13 i wynosi on  $\sim 92$  mm. Uwzględniając nominalne otulenie 50 mm, na zakotwienie pozostaje  $\sim 42$  mm. Wartość ta nie spełnia długości minimalnego zakotwienia  $l_{b,min} = 10\varnothing = 160$  mm. Aby zakotwienie było bezpieczne, niezbędny jest odcinek  $x = 50 + 160 = 210$  mm. Odcinek  $x = 156$  mm, ustalony zgodnie z kryterium krytycznej rysy ze względu na przebicie, jest za krótki. Przyjęcie zaś za  $x_{min} = h/2 = 300$  mm oznacza przeciwny wniosek. Wydaje się, że propozycja Eurokodu 2 w tym przypadku jest zbyt ryzykowna.

Rozważając niebezpieczeństwo zakotwienia w analizowanym przykładzie, nie można pozostawić bez komentarza faktu, że wyężenie stopy na przebicie wynosi tylko około 25,4%  $V_{Rd,red}$ . Oznacza to brak możliwości powstania rysy ukośnej od odziaływań przyjętych w obliczeniach. Również w tym przykładzie mamy znikome wykorzystanie zbrojenia w przekroju przy krawędzi słupa –  $\sigma_s \approx 146$  MPa (rys. 14). Taki stan rzeczy wynika z przyjęcia zbrojenia głównego z warunku minimalnego zbrojenia (wzór 9.1N Eurokodu 2).

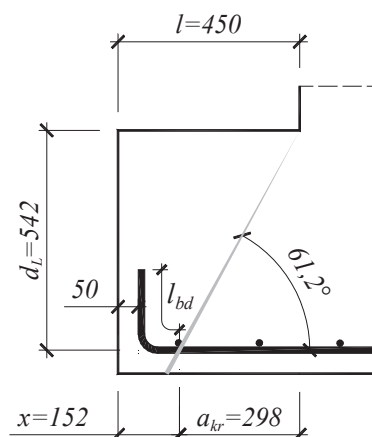
Mając na uwadze spełnienie wymogów normowych w analizowanym przykładzie, zakotwienie zbrojenia można zapewnić poprzez odgięcie ku górze, co pokazano na rysunku 15.



**Rys. 13.** Wykres ilorazu  $x/(l_{bd} + c_{nom})$  w funkcji odcinka  $x$  w przykładzie stopy bardzo krępej



**Rys. 14.** Naprężenia w zbrojeniu w funkcji  $x$  w przykładzie stopy bardzo krępej



**Rys. 15.** Zakotwienie zbrojenia rozciąganego przy dowolnym kształcie pręta mierzone wzdłuż jego osi

## 6. Podsumowanie

Eurokod 2 wprowadził wymóg sprawdzania zakotwienia zbrojenia głównego stóp fundamentowych przedstawiając model obliczeniowy w punkcie 9.8. W dotychczasowej praktyce inżynierskiej zagadnienie to nie było przedmiotem szczegółowych analiz obliczeniowych. Wprowadzenie tego problemu do normy [1] może budzić pewien niepokój, że zakotwienie zbrojenia może być problematyczne i wymagać specjalnych rozwiązań konstrukcyjnych. Zaproponowana przez autora analiza problemu wykazała, że w stopach fundamentowych o zwykle stosowanych w praktyce proporcjach  $h$  do  $l$ , nie powinno być problemu z prostym kotwieniem zbrojenia. Potencjalny kąt nachylenia rysy ukośnej, wynikający z teorii przebicia fundamentów według [1], zwykle mieści się w przedziale od  $40^\circ$  do  $63^\circ$ .

Sugerowany przez Eurokod 2 uproszczony sposób określania  $x_{min} = h/2$  można uznać za bezpieczny dla stóp o typowych proporcjach. W przypadku smukłych stóp, prowadzi do przyjmowania nachylenia rys ukośnych o zbyt małym nierealnym nachyleniu. W stopach bardzo krępych o proporcjach  $h/l$  w przedziale od 1 do 2, przyjmowanie uproszczone  $x_{min} = h/2$  może być błędne.

Wydaje się, że lepszym uproszczeniem byłoby przyjmowanie stałego kąta nachylenia rysy ukośnej  $\theta = 45^\circ$ , tak jak to ma miejsce w polskiej normie z 2002 roku [4]. Konieczność stosowania specjalnych sposobów zakotwienia może dotyczyć stóp krępych o proporcjach  $1 \leq h/l < 2$ . Proporcje  $h/l \geq 2$  upoważniają do stosowania stóp betonowych, zgodnie z uproszczonym warunkiem zawartym w p.12.9.3 normy [1].

### LITERATURA:

- [1] PN-EN 1992-1-1:2008, Projektowanie konstrukcji z betonu, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [2] Knauff M., Obliczanie konstrukcji żelbetonowych według Eurokodu 2, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012
- [3] Urban T., Komentarz do zasad obliczania fundamentów na przebicie według PN-EN 1992-1-1:2008/NA:2010. Inżynieria i Budownictwo, Nr 03/2011, s. 123÷126
- [4] PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetonowe sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie