

Porównanie nośności styku śrubowego doczołowego sprężonego według eurokodu i PN-B

Dr inż. Anna Szymczak-Graczyk, inż. Daria Schneider, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Instytut Budownictwa i Geoinżynierii

1. Wprowadzenie

Styki śrubowe doczołowe sprężone są obecnie bardzo często projektowanym połączeniem w konstrukcjach stalowych. Z jednej strony z uwagi na łatwość montażu, z drugiej ze względu na możliwość przenoszenia dużych sił przekrojowych. Śruby o wysokiej wytrzymałości zmniejszają liczbę łączników w styku, co powoduje często również zmniejszenie wielkości styku.

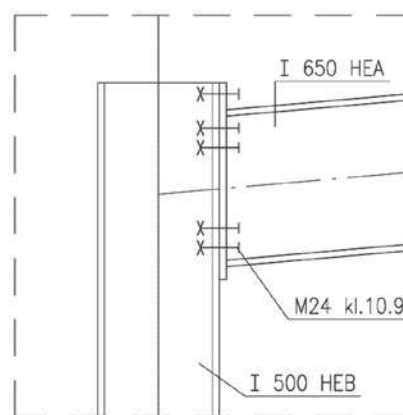
Celem przeprowadzonych obliczeń było dokonanie porównania nośności styku, który został zaprojektowany dwukrotnie, według PN-EN 1993-1-8: 2006 Projektowanie konstrukcji stalowych – część 1-8: Projektowanie węzłów [2] oraz według PN-90/B-03200 Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie [3]. Zgodnie z ustawą z dnia 12 września 2002 r. o normalizacji stosowanie polskich norm jest dobrowolne [5]. Zatem od decyzji projektanta zależy wybór sposobu projektowania. Dotyczy to również projektowania styków śrubowych. Przedstawiona w pracy analiza nośności pokazuje różnice w nośności styku w zależności od przyjętego sposobu obliczeń.

2. Przykład obliczeniowy

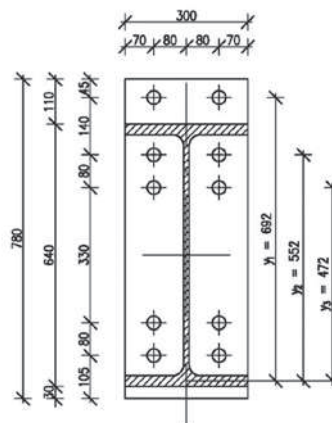
Obliczenia przeprowadzono dla węzła ramy, w której słup zaprojektowano z dwuteownika szerokostopowego 500 HEB natomiast rygiel z dwuteownika szerokostopowego 650 HEA, ze stali S235. Na rysunku 1 pokazano styk doczołowy przyjęty do obliczeń [4].

Założono, że połączenie wykonane będzie za pomocą śrub M24 kl. 10.9. Zgodnie z tabelą 3.2 normy [2] dla połączenia doczołowego kategorii E (połączenie sprężane) należy sprawdzić nośność na rozciąganie oraz nośność na przeciąganie. Natomiast zgodnie z tabelą 13 normy [3] dla połączenia kategorii E należy sprawdzić nośność na zerwanie śrub w pierwszym stanie granicznym oraz nośność na rozwarcie styku w drugim stanie granicznym.

Na rysunku 2 pokazano schemat styku doczołowego przyjętego do obliczeń.



Rys. 1. Widok styku doczołowego przyjętego do obliczeń



Rys. 2. Schemat styku doczołowego przyjętego do obliczeń

3. Obliczenia według PN-EN 1993-1-8: 2006 [2]

Wyznaczenie nośności na rozciąganie wykonano zgodnie ze wzorem z tabeli 3.4 normy [2].

Nośność strefy rozciąganej przedstawiono szczegółowo tylko dla pierwszego od góry szeregu śrub, stosując podział na obliczenie nośności średnika słupa oraz nośności blachy czołowej.

Rozciąganie średnika słupa wyznaczono następująco

(wymiar m , e i e_{min} przyjęto na podstawie rysunku 6.8 normy [2]):

$$m = \frac{w - 0,8 \cdot r_c \cdot 2 - t_{wc}}{2} = \frac{160 - 0,8 \cdot 27 \cdot 2 - 15,5}{2} =$$

$$= 51,15 \text{ mm}$$

$$e_{min} = e = 70 \text{ mm}$$

gdzie:

w – odległość między śrubami w rzędzie,

$$w = 160 \text{ mm},$$

r_c – promień zaokrąglenia w słupie, dla dwuteownika 500 HEB $r_c = 27 \text{ mm}$,

t_{wc} – grubość środnika słupa, dla dwuteownika 500 HEB

$$t_{wc} = 14,5 \text{ mm},$$

m – zakres rozciągania środnika słupa.

Gdy skrajny szereg śrub rozważany jest indywidualnie, wówczas $e_{min} = 45 + 74 = 119 \text{ mm}$.

Długości efektywne l_{eff} dla nieuzębrowanego pasa słupa wyznaczono zgodnie z tablicą 6.4 normy [2] z podziałem na mechanizmy kołowe i mechanizmy niekołowe zniszczenia połączenia. Mechanizmy kołowe wyznaczono jak niżej:

$$2\pi m = 2 \cdot \pi \cdot 51,15 = 321,2 \text{ mm}$$

$$\pi m + 2e_1 = \pi \cdot 51,15 + 2 \cdot 119 = 398,6 \text{ mm}$$

$$l_{eff, cp} = \min(321,2; 398,6) = 321,2 \text{ mm}$$

Natomiast mechanizmy niekołowe wyznaczono zgodnie ze wzorami poniżej:

$$4m + 1,25e = 4 \cdot 51,15 + 1,25 \cdot 70 = 292,1 \text{ mm}$$

$$2m + 0,625e + e_1 = 2 \cdot 51,15 + 0,625 \cdot 70 + 119 = 265,1 \text{ mm}$$

$$l_{eff, nc} = \min(292,1; 265,1) = 265,1 \text{ mm}$$

Gdy skrajny szereg śrub rozważany jest jako część grupy szeregów, wówczas odległość między szeregami śrub wynosi $p = d_2 = 140 \text{ mm}$.

Długości efektywne przy założeniu mechanizmów kołowych zniszczenia połączenia wyznaczono jak niżej:

$$\pi m + p = \pi \cdot 51,15 + 140 = 300,6 \text{ mm}$$

$$2e_1 + p = 2 \cdot 119 + 140 = 378,0 \text{ mm}$$

$$l_{eff, cp} = \min(300,6; 378,0) = 300,6 \text{ mm}$$

Natomiast długości efektywne dla mechanizmów niekołowych wyznaczono zgodnie ze wzorami poniżej:

$$2m + 0,625e + 0,5p = 2 \cdot 51,15 + 0,625 \cdot 70 + 0,5 \cdot 140 = 216,05 \text{ mm}$$

$$e_1 + 0,5p = 119 + 0,5 \cdot 140 = 189,0 \text{ mm}$$

$$l_{eff, nc} = \min(216,05; 189,0) = 189,0 \text{ mm}$$

Przyjęto dla zginanego pasa słupa $l_{eff} = 189,0 \text{ mm}$.

Współczynnik sztywności podstawowych części składowych węzła według tablicy 6.11 normy [2] dla pasa słupa zginanego w strefie rozciągania (gdy jeden szereg śrub podlega rozciąganiu) wyznaczono według wzoru:

$$k_4 = \frac{0,9 \cdot l_{eff} \cdot t_{fc}^3}{m^3} = \frac{0,9 \cdot 189,0 \cdot 28^3}{51,15^3} = 27,90 \text{ mm}$$

gdzie:

l_{eff} – najmniejsza dla rozpatrywanego szeregu długość efektywna wg tablicy 6.6 normy [2],

t_{fc} – grubość pasa słupa, dla dwuteownika 500 HEB

$$t_{fc} = 28 \text{ mm}.$$

Pas słupa jest zginany wskutek oddziaływań poprzecznych.

Poniżej wyznaczono kolejne modele zniszczenia.

– model zniszczenia 1 (całkowite uplastycznienie półki)

$$l_{eff, 1} = \min. (l_{eff, cp}; l_{eff, nc}) = \min. (321,2; 265,1) = 265,1 \text{ mm}$$

Obliczeniowa nośność plastyczna przy zginaniu dla modelu zniszczenia 1 wynosi:

$$M_{pl, 1, Rd} = 0,25 \Sigma l_{eff, 1} t_{fc}^2 (f_y / \gamma_{M0}) = 0,25 \cdot 265,1 \cdot 28^2 \cdot (235 / 1,0) = 12208,2 \cdot 10^3 \text{ Nmm}$$

Zatem nośność na rozciąganie dla modelu zniszczenia 1 wynosi:

$$F_{t, 1, Rd} = \frac{4M_{pl, 1, Rd}}{m} = \frac{4 \cdot 12208 \cdot 10^3}{51,15} = 954628 \text{ N} = 954,5 \text{ kN}$$

– model zniszczenia 2 (zniszczenie śrub wraz z uplastycznieniem półki)

$$l_{eff, 2} = l_{eff, nc} = 265,1 \text{ mm}$$

$$M_{pl, 2, Rd} = M_{pl, 1, Rd} = 12208,2 \cdot 10^3 \text{ Nmm}$$

Odległość od środka śruby do brzegu blachy oznaczono jako n przyjęto:

$$n = e_{min} = e = 70 \text{ mm}, \text{ lecz}$$

$$n \leq 1,25 m_x = 1,25 \cdot 51,15 = 63,9 \text{ mm}$$

Nośność śruby na rozciąganie wyznaczono ze wzoru podanego poniżej:

$$F_{t, Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 1000 \cdot 353}{1,25} = 254160 \text{ N}$$

gdzie:

k_2 – współczynnik zależny od rodzaju śruby według tablicy 3.4 normy [2],

f_{ub} – wytrzymałość stali śruby na rozciąganie,

A_s – pole przekroju czynnego śruby przy ścinaniu, dla M24 $A_s = 353 \text{ mm}^2$,

γ_{M2} – współczynnik częściowy według tablicy 2.1 normy [2], dla styków $\gamma_{M2} = 1,25$.

Nośność śruby na przeciąganie $B_{p, Rd}$ według tablicy 3.4 normy [2] wyznaczono ze wzoru podanego poniżej:

$$B_{p, Rd} = 0,6 \pi d_m t_p (f_u / \gamma_{M2}) = 0,6 \cdot \pi \cdot 38,8 \cdot 30 (360 / 1,25) = 631577 \text{ N}$$

gdzie:

d_m – średnia ze średnic wpisanej i opisanej na łbie śruby lub nakrętce (przyjmuje się mniejszą wartość średnią) wynosi $d_m = 0,5(36 + 41,6) = 38,8 \text{ mm}$.

t_p – grubość blachy czołowej,

f_u – wytrzymałość stali kształtownika na rozciąganie,

Przyjęto $F_{t,Rd} = 254160$ N jako wartość mniejszą.
Zatem nośność na rozciąganie dla modelu zniszczenia 2 wynosi:

$$F_{t,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n\Sigma F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 \cdot 12208 \cdot 10^3 + 63,90 \cdot 2 \cdot 254160}{51,15 + 63,90} = 494555 \text{ N}$$

gdzie:

$M_{pl,2,Rd}$ – obliczeniowa nośność plastyczna dla modelu zniszczenia 2,

m – rozciąganie środnika słupa,

n – odległość od środka śruby do brzegu blachy,

$F_{t,Rd}$ – nośność śruby na rozciąganie.

– model zniszczenia 3 (zniszczenie śrub)

Nośność na rozciąganie dla modelu zniszczenia 3 wynosi:

$$F_{t,3,Rd} = \Sigma F_{t,Rd} = 2 \cdot 254160 = 508320 \text{ N} = 508,30 \text{ kN}$$

Nośność pasa słupa wyznaczona tylko dla pierwszego szeregu śrub wynosi:

$$F_{t,1,fc,Rd} = \min. (F_{t,1,Rd}; F_{t,2,Rd}; F_{t,3,Rd}) = \min. (954,5; 494,6; 508,3) = 494,6 \text{ kN}$$

Obliczenia dla blachy czołowej, której grubość przyjęto równą $t_p = 30$ mm.

Na podstawie tablicy 6.6 oraz rysunku 6.11 normy [2] przyjęto podane poniżej odległości:

$$n = e_x = 45 \text{ mm}$$

$$m = m_x = d_1 - e_x - 0,8 \cdot a_f \sqrt{2} = 110 - 45 - 0,8 \cdot 13 \sqrt{2} = 50,3 \text{ mm}$$

gdzie:

d_1 – odległość od krawędzi pasa do końca blachy,

a_f – szerokość pasa słupa,

b_{ep} – szerokość blachy czołowej.

Poniżej zamieszczono obliczenia dla pierwszego szeregu śrub rozważanego indywidualnie (szereg śrub poza rozciąganiem pasem belki).

Długości efektywne dla mechanizmów kołowych zniszczenia połączenia podano poniżej:

$$2\pi m_x = 2 \cdot \pi \cdot 50,3 = 315,8 \text{ mm}$$

$$\pi m_x + w = \pi \cdot 50,3 + 160 = 317,9 \text{ mm}$$

$$\pi m_x + 2e = \pi \cdot 50,3 + 2 \cdot 70 = 297,9 \text{ mm}$$

$$l_{eff,cp} = \min. (315,8; 317,9; 297,9) = 297,9 \text{ mm}$$

Długości efektywne dla mechanizmów niekołowych wyznaczono według podanych niżej wzorów:

$$4m_x + 1,25e_x = 4 \cdot 50,3 + 1,25 \cdot 45 = 257,4 \text{ mm}$$

$$e + 2m_x + 0,625e_x = 70 + 2 \cdot 50,3 + 0,625 \cdot 45 = 198,7 \text{ mm}$$

$$0,5b_{ep} = 0,5 \cdot 300 = 150 \text{ mm}$$

$$0,5w + 2m_x + 0,625e_x = 0,5 \cdot 160 + 2 \cdot 50,3 + 0,625 \cdot 45 = 208,7 \text{ mm}$$

$$l_{eff,nc} = \min. (257,4; 198,7; 150; 208,7) = 150 \text{ mm}$$

Przyjęto minimalną długość efektywną wynoszącą:

$$l_{eff} = \min. (l_{eff,cp}; l_{eff,nc}) = (297,9; 150) = 150 \text{ mm}$$

Dla blachy czołowej zginanej w strefie rozciągania przyjmując do obliczeń jeden szereg śrub rozciąganych współczynnik sztywności podstawowych części składowych węzła k_s wynosi:

$$k_s = \frac{0,9 l_{eff}^3 t_p^3}{m^3} = \frac{0,9 \cdot 150,0^3 \cdot 30^3}{50,3^3} = 28,66 \text{ mm}$$

– model zniszczenia 1: $l_{eff,1} = \min. (l_{eff,cp}; l_{eff,nc}) = 150 \text{ mm}$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 \Sigma l_{eff,1}^2 t_p^2 (f_y / \gamma_{M0}) = 0,25 \cdot 265,1 \cdot 30^2 \cdot (235 / 1,0) = 7931,25 \cdot 10^3 \text{ Nmm}$$

$$F_{t,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m_x} = \frac{4 \cdot 7931,25 \cdot 10^3}{50,30} =$$

$$= 630841 \text{ N} = 630,8 \text{ kN}$$

– model zniszczenia 2: $l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 150 \text{ mm}$

$$M_{pl,2,Rd} = M_{pl,1,Rd} = 7931,25 \cdot 10^3 \text{ Nmm}$$

$$n = e_{min} = e_x = 45 \text{ mm, lecz}$$

$$n \leq 1,25 m_x = 1,25 \cdot 50,30 = 62,9 \text{ mm,}$$

przyjęto $n = 45,0 \text{ mm}$

Nośność śruby na rozciąganie wynosi

$$F_{t,Rd} = 254160 \text{ N}$$

Nośność śruby na przeciąganie wyznaczono ze wzoru:

$$B_{p,RD} = 0,6\pi d_m t_p (f_u / \gamma_{M2}) = 0,6 \cdot \pi \cdot 38,8 \cdot 30 (360 / 1,25) = 631577 \text{ N}$$

Jako miarodajną nośność przyjęto nośność mniejszą,

$$\text{tj. } F_{t,1,Rd} = 254160 \text{ N}$$

Nośność na rozciąganie dla drugiego modelu zniszczenia podano poniżej:

$$F_{t,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n\Sigma F_{t,Rd}}{m_x + n} = \frac{2 \cdot 7931,25 \cdot 10^3 + 45 \cdot 2 \cdot 254160}{50,3 + 45} = 406515 \text{ N}$$

– model zniszczenia 3

$$F_{t,3,Rd} = \Sigma F_{t,Rd} = 2 \cdot 254160 = 508320 \text{ N} = 508,30 \text{ kN}$$

Miarodajna nośność blachy czołowej wynosi:

$$F_{t,1,ep,Rd} = \min. (F_{t,1,Rd}; F_{t,2,Rd}; F_{t,3,Rd}) = \min. (630,8; 406,5; 508,3) = 406,5 \text{ kN}$$

Podsumowując przeprowadzone obliczenie dla pierwszego szeregu śrub, biorąc pod uwagę nośność pasa słupa oraz blachy czołowej, można określić, że nośność pierwszego szeregu śrub wynosi:

$$F_{t,1,Rd} = \min. (F_{t,1,fc,Rd}; F_{t,1,ep,Rd}) = \min. (494,6; 406,5) = 406,5 \text{ kN}$$

Analogicznie przeprowadzono obliczenia dla drugiego i trzeciego szeregu śrub.

Nośność drugiego szeregu śrub wynosi $F_{t,2,Rd} = 482,5$ kN (po redukcji nośności rozpatrując szereg 1 i 2 jako grupę szeregów).

Nośność trzeciego szeregu śrub wynosi $F_{t,3,Rd} = 508,3$ kN.

Ostatecznie nośność połączenia według normy [2] wynosi:

$$M_{j,Rd} = \sum_{r=1}^3 h_r F_{it,Rd} = 585 \cdot 406,5 + 445 \cdot 482,5 + 365 \cdot 508,3 = 638,04 \text{ kNm}$$

gdzie:

h_r – odległość szeregu śrub od środka ściskania,
 $F_{it,Rd}$ – nośność i-tego szeregu śrub.

Zatem po przeprowadzeniu obliczeń według [2] do dalszej analizy przyjęto miarodajną nośność styku wynoszącą $M_{Rd} = 638,04$ kNm.

4. Obliczenia według PN-90/B-03200 [3]

Na podstawie tabeli Z2-2 normy [3] przyjęto następujące dane śruby M24 kl. 10.9:

- wytrzymałość na rozciąganie $R_m = 1040$ MPa,
- granica plastyczności $R_e = 940$ MPa,
- nośność pojedynczej śruby na rozciąganie $S_{Rt} = 239$ kN,
- nośność pojedynczej śruby na ścinanie $S_{Rv} = 212$ kN,
- pole przekroju czynnego przy ścinaniu $A_s = 353$ mm².

Wyznaczenie nośności na zerwanie śrub wykonano zgodnie ze wzorem (89) normy [3].

$$M_{Rt} = S_{Rt} \sum_i \omega_i y_i = 239 \cdot (2 \cdot 0,8 \cdot 585 + 2 \cdot 1,0 \cdot 445 + 2 \cdot 0,8 \cdot 365) \cdot 10^{-3} = 576,0 \text{ kNm}$$

gdzie:

ω_i – współczynnik rozdziału obciążenia na śruby według tablicy 17 normy [3],

y_i – ramię działania sił w szeregu i względem osi pasa ściskanego; jeśli wysokość belki łączonej jest większa niż 400 mm należy w stanie granicznym styku zamiast y_i przyjmować $y_{ired} = y_i (h / 6)$

m_i – liczba śrub w szeregu.

Wyznaczenie nośności na rozwarcie styku wykonano zgodnie ze wzorem (90) normy [3].

gdzie:

$$S_{Rr} = 0,85 S_{Rt} = 0,85 \cdot 239 = 203,15 \text{ kN}$$

$$M_{Rr} = S_{Rr} \cdot \sum_i m_i \omega_i (y_i^2 / y_{max}) = 203,15 \cdot 2 \cdot 0,70 \cdot 585 + [(2 \cdot 1,00 \cdot 445^2 + 2 \cdot 0,80 \cdot 365^2) / 445] \cdot 10^{-3} = 444,5 \text{ kNm}$$

Zatem po przeprowadzeniu obliczeń całego styku według [3] do dalszej analizy przyjęto miarodajną nośność styku wynoszącą $M_{Rr} = 444,5$ kNm.

5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono obliczenia styku doczołowego sprężonego wykonane według dwóch algorytmów obliczeń. Badania rozkładu sił wewnętrznych w zginanych wielośrubowych stykach doczołowych blachownic opisano w pracy [1], gdzie uzyskano analogiczne do prezentowanych w artykule wnioski. Otrzymane na podstawie zamieszczonych w pracy obliczeń wyniki przedstawiają różnice w nośnościach połączeń przeprowadzonych dwiema metodami. Można zauważyć, że obliczenia prowadzone według eurokodu dają korzystniejszy wynik, tzn. nośność połączenia jest większa. Obliczenia dotyczące nośności połączenia w stanie granicznym na rozciąganie i przeciąganie styku są bardziej precyzyjne, lecz znacznie dłuższe i trudniejsze w wykonaniu. Sprawdzeniu na rozciąganie i ściskanie zgodnie z normami EC [2] podlega również środkowy słup. Obliczenia wykonane zgodnie z wcześniejszymi normami polskimi PN [2] są zdecydowanie krótsze i łatwiejsze do wykonania. Obejmują sprawdzone nośności połączenia w stanie granicznym zerwania trzypięci śrub oraz nośności połączenia w stanie granicznym styku. Sprawdzeniu wg PN [2] podlega również słup, który powinien być uźebrowany w styku. Nośność styku zaprojektowanego według Eurokodu [2] jest ponad 40% większa niż styku policzonego zgodnie z PN [3]. Dowodzi to celowości prowadzenia obliczeń precyzyjnych zamiast skróconych i uproszczonych. Należy jednak dodać, że przy zalecanych cieńszych blachach czołowych takich dużych różnic nośności nie stwierdza się.

W myśl ustawy [5], która zniósła obligatoryjność stosowania norm, to projektant dokonuje wyboru, który sposób obliczeń wybierze. Częściej wybierane są polskie normy zważywszy na szybsze i łatwiejsze obliczenia. Jednakże różnice, jakie otrzymuje się, porównując oba wyniki, dają powód do głębszej analizy przed wyborem danej metody obliczeniowej.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kawecki P., Kozłowski A., Badanie rozkładu sił wewnętrznych w zginanych wielośrubowych stykach doczołowych blachownic, Inżynieria i Budownictwo, 6/2017
- [2] PN-EN 1993-1-8: 2006 Projektowanie konstrukcji stalowych – część 1-8: Projektowanie węzłów
- [3] PN-90/B-03200 Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [4] Schneider D., Projekt styku śrubowego doczołowego sprężonego według eurokodu i PN, Praca inżynierska pod kierunkiem dr inż. Anny Szymczak-Graczyk, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Inżynierii Środowiska i Gospodarki Przestrzennej, Poznań 2017
- [5] Ustawa z dnia 12 września 2002 r o normalizacji (Dz.U. z 2002 r., Nr 169, poz. 1386 z późn. zm.)