

## OCENA WSPÓŁCZYNNIKA WRAŻLIWOŚCI NA SPRĘŻYSTĄ UTRATĘ STATECZNOŚCI PŁASKIEJ RAMY NOŚNEJ HALI

### Streszczenie

W pracy omówiono zastosowanie wzoru (5.2) normy PN-EN 1993-1-1: 2006 [5] na wyznaczenie współczynnika wrażliwości na wyboczenie. Wzór ten jest przybliżonym zapisem globalnej przechyłowej utraty stateczności układu konstrukcyjnego. Zamieszczono przykłady obliczeniowe słupa oraz ramy, wskazując na istotne aspekty zastosowania tego wzoru do wyznaczania parametru  $\alpha_{cr}$  dla elementów nośnych ram. Weryfikację parametru  $\alpha_{cr}$  uzyskano poprzez porównanie z wartościami otrzymanymi z innych metod: metody przemieszczeń, metody elementów skończonych. Utrata stateczności ramy, to przekroczenie jej wewnętrznej odporności, związanej ze zmianą stanu, ze stanu równowagi statecznej do stanu niestatecznej równowagi.

### 1. OBLICZENIA WSPÓŁCZYNNIKA $\alpha_{cr}$ DLA SŁUPA

Utrata stateczności ramy, jej ocena wrażliwości na przechył wyznaczona na podstawie wartości mnożnika obciążenia krytycznego  $\alpha_{cr}$ , rozstrzyga o rodzaju analizy statycznej I czy II rzędu oraz o zastosowanych formułach weryfikacyjnych do przekroju.

Analizę pierwszego rzędu można stosować, jeśli przyrost odpowiednich sił wewnętrznych lub momentów, lub jakakolwiek inna zmiana zachowania się konstrukcji w wyniku deformacji, może być pominięta. Przyjmuje się, że tak jest, jeśli spełnione jest odpowiednie kryterium [5, wzór (5.1)]:

$$\alpha_{cr} = F_{cr} / F_{Ed} \geq 10 \quad \text{to możliwa jest sprężysta analiza}$$

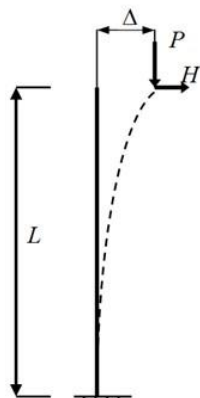
statyczna I rzędu,

gdzie:  $\alpha_{cr}$  - mnożnik obciążenia krytycznego w stosunku do obciążeń obliczeniowych, odpowiadający niestateczności sprężystej układu,

$F_{Ed}$  - obciążenie obliczeniowe działające na konstrukcję,

$F_{cr}$  - obciążenie krytyczne odpowiadające globalnej formie niestateczności sprężystej i początkowej sztywności sprężystej układu.

W stanie równowagi krytycznej związanej z wyboczeniem zachodzi równość momentów (rys. 1)



Rys. 1. Schemat obliczeniowy słupa

$$P\Delta = HL$$

Zapisując siłę  $P \rightarrow P_{cr} = \alpha_{cr}V$  oraz  $\delta \equiv \Delta$  i  $h \equiv L$  otrzymamy

$$\alpha_{cr} = \left( \frac{H}{V} \right) \left( \frac{h}{\delta} \right)$$

Jako przykład obliczeniowy wybrano pojedynczy słup utwierdzony przedstawiony na rys.1.

Dane geometryczne słupa: profil dwuteowy IPE 550, pole przekroju poprzecznego  $F = 134 \text{ cm}^2$ , moment bezwładności  $J = 67120 \text{ cm}^4$ ,  $L = 8 \text{ m}$ .

Wyznaczmy wstępnie wartość siły krytycznej w sensie Eulera

$$P_{cr}^E = \frac{\pi^2 EJ}{4l^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 67120}{4 \cdot (800)^2} = 5434,14 \text{ kN}$$

Przyjmując obciążenie porównawcze w postaci siły normalnej  $N = 100 \text{ kN}$  otrzymano współczynnik

$$\alpha_{cr} = \frac{P_{cr}^E}{N} = \frac{5434,14}{100} = 54,34$$

Obliczenia za pomocą wzoru (5.2) Eurokodu [5] wymagają sprawdzenia warunku związanego z globalną imperfekcją przechyłową, gdy  $H_{Ed} \geq 0,15V_{Ed}$  to można pominąć imperfekcję przechyłową.

Ponieważ  $H_{Ed} = 0$  to należy uwzględnić imperfekcję przechyłową.

Globalną początkową imperfekcję przechyłową można wyznaczyć na podstawie wzoru

$$\phi = \phi_0 \alpha_h \alpha_m$$

gdzie:  $\phi_0$  - wartość podstawowa:  $\phi_0 = 1/200$ ,

$\alpha_h$  - współczynnik redukcyjny ze względu na wysokość:

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} = \frac{2}{\sqrt{8}} = 0,707 \quad \text{lecz} \quad \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0$$

$\alpha_m$  - współczynnik redukcyjny ze względu na liczbę słupów:

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left( 1 + \frac{1}{m} \right)} = 1$$

$m = 1$  - liczba słupów

Podstawiając do powyższych wyrażeń będzie

$$\phi = \phi_0 \alpha_h \alpha_m = \frac{1}{200} \cdot \frac{2}{\sqrt{8}} \cdot 1,0 = 0,00354 \text{ [rad]}$$

Imperfekcja przechyłowa wprowadzana jest w postaci równoważnej siły poziomej, która jest obliczana następująco

$$H_{EHF} = \phi V_{Ed} = 0,00354 \cdot 100 = 0,354 \text{ kN}$$

Wykonując obliczenia z udziałem równoważnej siły  $H_{EHF}$  i siły porównawczej  $P = 100 \text{ kN}$  otrzymamy przemieszczenie poziome  $\delta = 0,04286 \text{ cm}$ , aby ostatecznie wyznaczyć

$$\alpha_{cr} = \left(\frac{H}{V}\right) \left(\frac{h}{\delta}\right) = \left(\frac{0,354}{100}\right) \left(\frac{800}{0,04286}\right) = 66,076$$

Porównując do wartości mnożnika siły Eulera, błąd pomiędzy rozwiązaniami wynosi

$$\frac{66,076 - 54,341}{54,341} 100\% = 21,6\%$$

Następnie, przeprowadzono obliczenia za pomocą metody elementów skończonych programem Robot [8], rozwiązując wyznacznik

$$[K - \alpha_{cr} K(\sigma)]v = 0$$

gdzie:  $K$  - macierz sztywności liniowej,

$K(\sigma)$  - macierz sztywności naprężeniowej,

$\alpha_{cr}$  - współczynnik wrażliwości na wyoboczenie,

$v$  - wektor postaci wyoboczeniowych.

Otrzymano wartość  $\alpha_{cr} = 54,3422$ , zatem siła krytyczna wynosi

$$P_{cr} = 5434,22 \text{ kN}$$

Wykonując ponowne obliczenia statyczne z uwzględnieniem efektów II-rzędu [8] wyznaczono przemieszczenie  $\delta = 0,043614$ , co daje

$$\alpha_{cr} = \left(\frac{H}{V}\right) \left(\frac{h}{\delta}\right) = \left(\frac{0,354}{100}\right) \left(\frac{800}{0,043614}\right) = 64,933$$

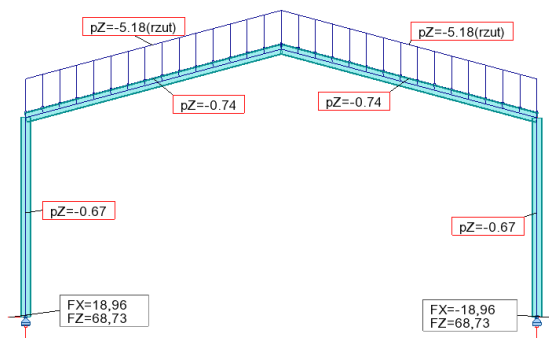
Otrzymany mnożnik nie wiele różni się od wcześniej otrzymanego, to jest wartości 66,076.

## 2. OBLICZENIA $\alpha_{cr}$ DLA RAMY METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Dane geometryczne ramy z kształtownika IPE 360: rozstaw w osiach słupów 18 m, wysokość słupów 7 m, kąt pochylenia połaci dachowej 15°.

Wykonano analizę statyczną i stateczności ramy programem Robot [8] metody elementów skończonych, rozwiązując problem stateczności początkowej, otrzymano mnożniki obciążenia krytycznego  $\alpha_{cr}$  dla obciążeń obliczeniowych kombinacji:  $1^*1.15 + 2^*1.15 + 8^*1.5$  zamieszczono na rys.2,

- gdzie: 1 - ciężar własny elementów konstrukcyjnych,  
2 - ciężar płyt pokrycia dachowego i płyt ściennych,  
8 - obciążenie śniegiem równomiernym.

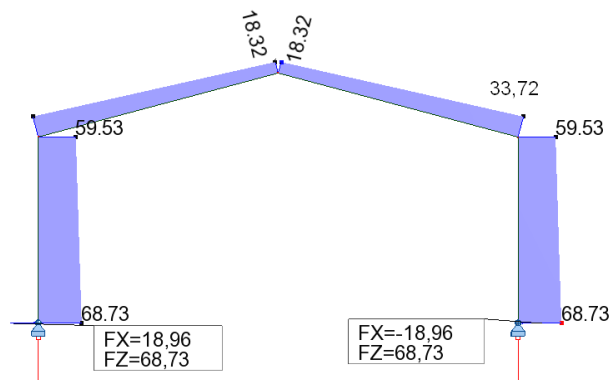


Rys.2. Obciążenia ramy kombinacją  $(1+2) \times 1,15 + 8 \times 1,5$

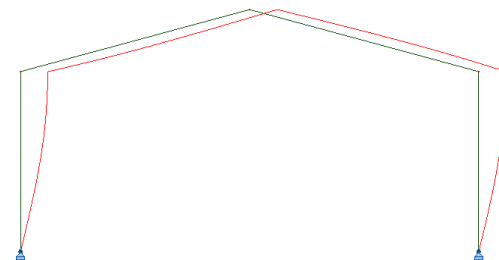
Biorąc obciążenia  $F_{Ed}$  jako kombinację najmniej korzystniejszych obciążeń, wyznaczono najmniejsze mnożniki obciążenia krytycznego (tab.1).

Tab.1. Mnożnik obciążenia krytycznego  $\alpha_{cr}$

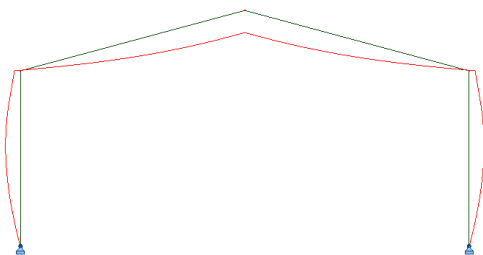
postać	współczynnik $\alpha_{cr}$
1	13,0355
2	80,555



Rys.3. Rozkład sił normalnych  $F_x$



Rys. 4. Pierwsza przechyłowa postać wyoboczeniowa ramy



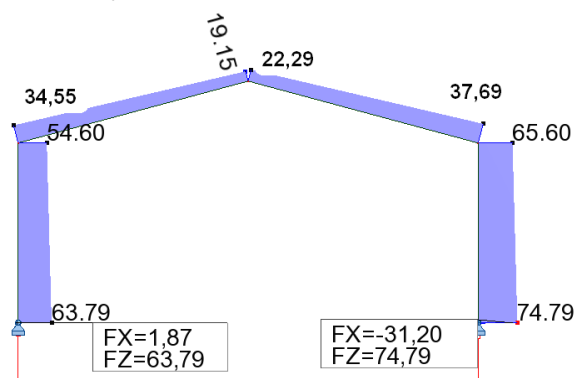
Rys. 5. Druga nieprzechyłowa postać wyoboczeniowa ramy

Natomiast, najbardziej niekorzystną kombinacją obciążeń, dla której wyężenie przekroju jest największe, jest kombinacja z dodatkovym jeszcze obciążeniem wiatru:

$$1^*1.15 + 2^*1.15 + 6^*0.90 + 8^*1.5$$

gdzie: 6 - obciążenie wiatrem bocznym, i dla tej kombinacji wykonano ponowne obliczenia statyczne i wyoboczenia ramy.

Wyniki przedstawiono na rys.6, a wartość mnożników obciążenia krytycznego  $\alpha_{cr}$  zawiera tab.2.



Ryc.6. Rozkład siły normalnej  $F_x$

Tab.2. Mnożnik obciążenia krytycznego  $\alpha_{cr}$ 

przypadek	Wsp. $\alpha_{cr}$
1	12,884
2	76,429

### 3. WERYFIKACJA WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA $\alpha_{cr}$ WZOREM (5.2) Z EUROKODU 3

Przeprowadzono weryfikację wartości współczynnika wrażliwości na wyboczenie  $\alpha_{cr}$ , posługując się przybliżonym wzorem (5.2) z Eurokodu 3 [5]. Do wyznaczenia wielkości wchodzących do wzoru (5.2) wystarczy wykonać obliczenia statyczne I rzędu, a nie problemu własnego jak było wyżej dla obliczeń stateczności początkowej, i to jest zasadnicza zaleta wzoru (5.2).

Sprawdzenie warunku dotyczącego uwzględnienia imperfekcji przechyłowych.

Jeśli spełniony jest warunek

$$H_{Ed} \geq 0,15V_{Ed} \text{ to można pominąć imperfekcję przechyłową.}$$

Wypadkowe reakcje poziomych i pionowych wynoszą (rys.6)

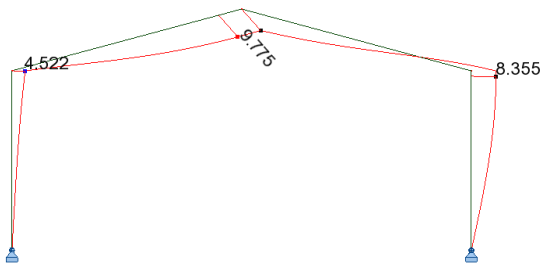
$$H_{Ed} = 1,87 - 31,20 = -29,33kN ,$$

$$V_{Ed} = 63,79 + 74,79 = 138,58kN ,$$

po podstawieniu do warunku będzie

$$H_{Ed} = 29,33 > 20,79 = 0,15 \cdot 138,58 = 0,15V_{Ed}$$

warunek jest spełniony, więc można pominąć początkową globalną imperfekcję przechyłową w dalszych obliczeniach.



Rys.7. Deformacja ramy

Z normy [5] punkt (4)B, narażone na przechył ramy portalowe z dachami o małym spadku (pochylenie nie przekracza 1:2 (kąt  $26^{\circ}33'54''$ ), (w projektowanej hali jest to  $15^{\circ}$ ), oraz układy słupowo-belkowe budynków można sprawdzać na podstawie analizy

pierwszego rzędu, jeśli kryterium (5.1), to jest  $\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10$  jest spełnione dla każdej kondygnacji.

W przypadku takich konstrukcji, gdy dodatkowo siły ściskające w słupach i belkach nie są znaczące, gdy  $N_{Ed} \leq 0,09N_{cr}$ , można posłużyć się wzorem (5.2) [5]

- dla słupa IPE 360 siła krytyczna (siła ze wzoru Eulera), zakładając przegubowe podparcie na końcach wynosi

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 EI_y}{L_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 16270}{700^2} = 6881,93kN$$

i podstawiając do warunku

$$N_{Ed} = 74,79 < 619,37 = 0,09N_{cr}$$

otrzymamy, że warunek jest spełniony - siła normalna nie jest znacząca.

- dla rygla IPE 360 siła krytyczna, zakładając przegubowe podparcie na końcach

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 EI_y}{L^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 16270}{1863,4^2} = 971,17kN$$

gdzie  $L = 2l = 2 \cdot 9,317 = 18,634m$  - jest to długość rozwinięta pary rygli od słupa do słupa.

Podstawiając do warunku

$N_{Ed} = 37,69 < 87,41 = 0,09N_{cr}$  otrzymamy, że warunek jest spełniony.

Ostatecznie, mnożnik  $\alpha_{cr}$  można obliczać według następującego wzoru przybliżonego (5.2) [5]

$$\alpha_{cr} = \left( \frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \right) \left( \frac{h}{\delta_{H,Ed}} \right) = \left( \frac{29,33}{138,58} \right) \left( \frac{700}{6,431} \right) = 23,04$$

$$\delta_{H,Ed} = \frac{4,522 + 8,34}{2} = 6,431 \text{ - przemieszczenie poziome}$$

góry kondygnacji względem dołu kondygnacji, wywołane wszystkimi zewnętrznymi i fikcyjnymi obciążeniami poziomymi, przyłożonymi do układu ramowego.

Jak można zauważyć, wartości  $\alpha_{cr}$  z tych dwóch metod różnią się o  $\frac{23,04 - 12,88}{12,88} \cdot 100\% = 78,9\%$ ; wyjaśnienie rozbieżności

wyników jest proste. Otóż, wynik obliczeń  $\alpha_{cr}$  z metody elementów skończonych dotyczy bifurkacyjnej utraty stateczności, dla której przed wybočeniami brak jest przemieszczeń zgodnych (równoległych) z przemieszczeniami po wyboczeniu, inaczej - przemieszczenia przed i po wyboczeniu muszą być do siebie prostopadłe (ortogonalne).

Aby wynik obliczeń  $\alpha_{cr}$  ze wzoru (5.2) był zbliżony do wyniku z metody elementów skończonych, to należy dążyć do wykluczenia przemieszczeń przed wybočeniami, zgodnych z przemieszczeniami po wyboczeniu, będzie tak, jeśli nie zastosujemy obciążenia od wiatru.

Obliczenia  $\alpha_{cr}$  wzorem (5.2) dla kombinacji obciążeń  $(1+2) \times 1,15 + 8 \times 1,5$  nie zawierającej obciążenia od wiatru.

Zgodnie z zapisem normy, należy wykonać sprawdzenie warunku dotyczącego uwzględnienia imperfekcji przechyłowych.

Na tym etapie obliczeń, na wartość  $H_{Ed}$  składa się tylko wypadkowa z sił poprzecznych (reakcji) w słupach (rys.2)

$$H_{Ed} = 18,96 - 18,96 = 0 ,$$

$$V_{Ed} = 68,73 + 68,73 = 137,46kN$$

$$H_{Ed} = 0 < 20,62 = 0,15 \cdot 137,46kN = 0,15V_{Ed}$$

Warunek nie jest spełniony, należy więc uwzględnić globalną początkową imperfekcję przechyłową, którą należy wyznaczyć na podstawie wzoru

$$\phi = \phi_0 \alpha_h \alpha_m , \text{ gdzie: } \phi_0 \text{ - wartość podstawowa: } \phi_0 = 1/200 ,$$

$$\alpha_h \text{ - współczynnik redukcyjny ze względu na wysokość:}$$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} = \frac{2}{\sqrt{7}} = 0,76 , \text{ lecz } \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0$$

$$\alpha_m \text{ - współczynnik redukcyjny ze względu na liczbę słupów:}$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left( 1 + \frac{1}{m} \right)} = \sqrt{0,5 \left( 1 + \frac{1}{2} \right)} = 0,87$$

$m$  - liczba słupów w rzędzie, które przenoszą obciążenie przez siły normalne  $N_{Ed}$  nie mniejsze niż 50% przeciętnego obciążenia słupa w rozpatrywanej płaszczyźnie pionowej.

Podstawiając do powyższych wyrażeń będzie

$$\phi = \phi_0 \alpha_h \alpha_m = \frac{1}{200} \cdot \frac{2}{\sqrt{7}} \cdot 0,87 = 0,003288 \text{ [rad]}$$

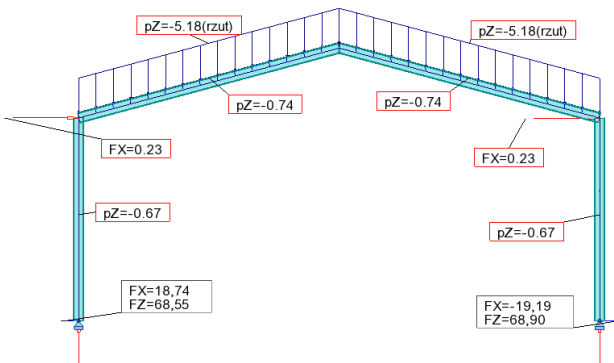
Początkowe imperfekcje przechyłowe mogą być rozważane na dwa sposoby:

- poprzez modelowanie ramy w odchyleniu od pionu,
- poprzez zastosowanie równoważnych sił poziomych  $H_{EHF}$ .

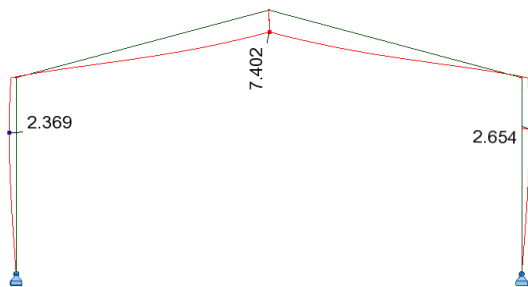
Zastosowanie równoważnych sił poziomych jest zalecanym wyborem w normie [5]. Równoważna siła pozioma obliczana jest w następujący sposób:

$$H_{EHF} = \phi V_{Ed} = 0,003288 \cdot 137,46 = 0,452 \text{ kN}$$

Wykonując obliczenia z udziałem równoważnej siły  $H_{EHF}$  (przyłożonej po połowie wartości do głowic słupów) i tak, jak poprzednio kombinacji obciążeń, wyznaczono  $\alpha_{cr}$ . Na rys.8 przedstawiono wartości reakcji w podporach z uwzględnieniem imperfekcji przechyłowej



Rys.8. Zestawienie obciążenia i wyznaczonej reakcji w podporach



Rys.9. Deformacja ramy z obliczeń statycznych

Wartość współczynnika krytycznego wynosi:

$$\alpha_{cr} = \left( \frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \right) \left( \frac{h}{\delta_{H,Ed}} \right) = \left( \frac{0,452}{137,46} \right) \left( \frac{700}{0,176} \right) = 13,078$$

$$\delta_{H,Ed} = (-1,781 + 2,133) / 2 = 0,176 \text{ cm}$$

- średnie przemieszczenie poziome.

#### Podsumowanie dotychczasowych wyników

Należy przeprowadzić właściwie porównania wyników

- 1) bez obc. wiatrem z m.e.s  $\alpha_{cr} = 13,036$   
i z (5.2)  $\alpha_{cr} = 13,078$  rozbieżność 0,3%
- 2) z obc. wiatrem z m.e.s  $\alpha_{cr} = 12,88$   
i z (5.2)  $\alpha_{cr} = 23,04$  rozbieżność 79%.

Jak widać w przypadku 2) wynik z (5.2) jest mniej dokładny, gdy występują obciążenia, które powodują przemieszczenia zgodne z przemieszczeniami postaci wybocheniowej, inaczej gdy przed wybocheniem pojawiają się stany zgięciowe, takie same jak przy wyboczeniu. Wzór (5.2) należy traktować jako uproszczoną metodę obliczeń [6], który, ponadto stosuje się tylko dla przechyłowej formy wybochenia.

## 4. OBLICZENIA WYBOCZENIA RAMY METODĄ PRZEMIESZCZEŃ

W metodzie przemieszczeń przeprowadzamy rozwiązania zakładając przechyłową i nieprzechyłową postać wybochenia ramy, stosując uproszczone wyrażenia [1],[2]. Rozpatrzono postać przechyłową dla słupa i nieprzechyłową dla ryglu.

### Przechyłowa postać wybochenia słupa

Współczynnik sztywności słupa z dwuteownika IPE 360

$$K_c = \frac{I_y}{h_c} = \frac{16270}{700} = 23,24$$

Współczynnik sztywności ryglu z dwuteownika IPE 3

$$K_{11} = 1,5 \frac{I_y}{L_{11}} = 1,5 \frac{16270}{1863,4} = 13,097$$

Stopnie podatności węzłów: 1-połączenie słupa w głowicy i 2-połączenie słupa w stopie

$$\eta_1 = \frac{K_c}{K_c + K_{11}} = \frac{23,24}{23,24 + 13,097} = 0,64$$

$$\eta_2 = \frac{K_c}{K_c} = 1,0$$

Współczynnik długości krytycznej wybocheniowej słupa

$$\mu = \frac{l_{cr}}{l} = \sqrt{\frac{1 - 0,2(\eta_1 + \eta_2) - 0,12\eta_1\eta_2}{1 - 0,8(\eta_1 + \eta_2) + 0,6\eta_1\eta_2}}$$

$$= \sqrt{\frac{1 - 0,2(0,64 + 1,0) - 0,12 \cdot 0,64 \cdot 1,0}{1 - 0,8(0,64 + 1,0) + 0,6 \cdot 0,64 \cdot 1,0}} = 2,875$$

$$l_{cr} = \mu l = 2,875 \cdot 700 = 2012,5 \text{ cm} = 20,125 \text{ m}$$

Siła krytyczna dla słupa wynosi

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EJ}{l_{cr}^2} = \frac{\pi^2 2,1 \cdot 10^4 \cdot 16270}{2012,5^2} = 832,6 \text{ kN}$$

$$\alpha_{cr} = \frac{832,6}{(59,53 + 68,73) / 2} = 12,98$$

i jak widać, wartości z metody przemieszczeń  $\alpha_{cr} = 12,98$  i metody elementów skończonych  $\alpha_{cr} = 13,036$  różnią się o 0,4%.

### Nieprzechyłowa postać wybochenia ryglu

Współczynnik sztywności ryglu z dwuteownika IPE 360

$$K_c = \frac{I_y}{h_c} = \frac{16270}{1863,4} = 8,73$$

Współczynnik sztywności słupów z dwuteownika IPE 360

$$K_{11} = K_{21} = 0,75 \frac{I_y}{L_{11}} = 0,75 \frac{16270}{700} = 17,43$$

Stopnie podatności węzłów 1 i 2

$$\eta_1 = \eta_2 = \frac{K_c}{K_c + K_{11}} = \frac{8,73}{8,73 + 17,43} = 0,334$$

Współczynnik długości wybocheniowej ryglu

$$\mu = \frac{l_{cr}}{l} = 0,5 + 0,14(\eta_1 + \eta_2) + 0,055(\eta_1 + \eta_2)^2 = 0,618$$

Siła krytyczna dla ryglu wynosi

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EJ}{l_{cr}^2} = \frac{\pi^2 2,1 \cdot 10^4 \cdot 16270}{(0,618 \cdot 1863,4)^2} = 2542,83 \text{ kN}$$

$$\alpha_{cr} = \frac{2542,83}{(18,32 + 33,72) / 2} = 97,73$$

i jak widać, wartości z metody przemieszczeń  $\alpha_{cr} = 97,73$

i metody elementów skończonych  $\alpha_{cr} = 80,56$  różnią się o 21,3%.

## PODSUMOWANIE

Przedstawione wyniki obliczeń  $\alpha_{cr}$  dla słupów z trzech metod: metody elementów skończonych, wzór normy i metody przemieszczeń są do siebie mocno zbliżone.

Identyczność otrzymanych wyników świadczą o ich prawdziwości wartościach, a zastosowane metody nadają się do wyznaczania parametrów wyboczeniowych, dla przechyłowej utraty stateczności. Należy podkreślić, iż są to metody przybliżone.

Większe rozbieżności wyników są spowodowane różnicą w modelowaniu i w zapisie sztywności elementów składowych ramy, np. w metodzie elementów skończonych zapis sztywności ramy dotyczy wszystkich jej elementów, natomiast zastosowane wzory metody przemieszczeń są wyprowadzone przy uwzględnieniu sztywności tylko sąsiadujących elementów z analizowanym elementem.

Najlepiej uwzględnić wpływ czynników dotyczących całej ramy, wówczas otrzymamy najbardziej miarodajny wynik z analizy stateczności globalnej tak, jak jest to przy zastosowaniu metody elementów skończonych.

Wyboczenie pojedynczego elementu ramy np. słupa czy rygla jest na ogół powiązane z globalną utratą stateczności ramy, a więc z uwzględnieniem rozkładu sztywności ramy, sposobu podparcia, rodzaju obciążenia itd. a to oznacza, że miarodajnym jest wynik z analizy całej ramy, tak jak jest ona modelowana w metodzie elementów skończonych.

W przypadku zastosowania wzoru (5.2) normy [5] do obliczeń  $\alpha_{cr}$  dla pręta przegubowo podpartego na końcach, otrzymano  $\alpha_{cr} = 1057,09$  co jest zdecydowanie wartością błędną, gdyż utrata stateczności tego słupa jest nieprzechyłową wówczas  $\alpha_{cr} = 217,37$ . Zatem widocznym jest, że powyższy wzór obowiązuje tylko dla utraty stateczności przechyłowej. Z tego też powodu nie zastosowano go do obliczeń  $\alpha_{cr}$  dla rygla, dla którego wystąpi nieprzechyłowa utrata stateczności.

## BIBLIOGRAFIA

1. Bródka J., Barszcz A., Giżejowski M., Kozłowski A., Sztywność stalowych ram przechyłowych o węzłach podatnych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2004r.
2. Goczek J., Supel Ł., Gajdzicki M., Przykłady obliczeń konstrukcji stalowych, Politechnika Łódzka, Łódź 2010r.
3. Misiak J., Stateczność konstrukcji prętowych, PWN, Warszawa 1990r.
4. Rykaluk K., Zagadnienia stateczności konstrukcji metalowych, DWE, Wrocław 2012r.
5. PN-EN 1993-1-1:2006, Eurokod 3, cz.1-1: Projektowanie konstrukcji stalowych
6. SN004a-PL-EU, Access steel, Obliczanie mnożnika alfa-cr
7. Weiss S., Giżejowski M., Stateczność konstrukcji metalowych, Arkady, Warszawa 1991r.
8. Autodesk Robot Structural Analysis

## EVALUATION OF THE COEFFICIENT OF SENSITIVITY TO ELASTIC STABILITY LOSS OF THE PLANE BEARING FRAME OF A HALL

*Abstract*

*A derivation of the formula (5.2) of PN-EN 1993-1-1: 2006 standard for determination of the buckling sensitivity coefficient is presented in the paper. This formula is an approximate notation of the global tilt stability loss of structural system. Analytical examples referring a column and frames are presented and important aspects of using this formula for determination of the parameter  $\alpha_{cr}$  for frames bearing elements are pointed. A verification of the parameter  $\alpha_{cr}$  was obtained by comparison with the values got from other methods: displacement method, Finite Element Method, nonlinear approximate method.*

Autor:

Dr inż. **Sławomir Stachura**

Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu