

Izabela TYLEK¹
Krzysztof KUCHTA²

WPLYW PODATNOŚCI WĘZŁÓW NA PRZECHYŁ ZASTĘPCZY W POZASPREŻYSTEJ ANALIZIE SZKIELETÓW STALOWYCH

Zgodnie z zaleceniami współczesnych norm projektowania stalowych konstrukcji prętowych imperfekcje wprowadza się do modelu obliczeniowego już na etapie analizy statycznej. Najczęściej są to zastępcze imperfekcje geometryczne w postaci zastępczego przechyłu wstępnego szkieletu stalowego oraz zastępczego wygięcia wstępnego pręta ściskanego, które pozwalają pośrednio uwzględnić także imperfekcje różne od geometrycznych. W niniejszej pracy zagadnienia dotyczące imperfekcji analizowano przy zastosowaniu podejścia statystycznego, wykorzystując prętowo-tarczowy model szkieletu wielokondygnacyjnego wraz ze statystycznie uzasadnionymi imperfekcjami geometrycznymi. Wykorzystano model efektywnego losowego zastępczego przechyłu wstępnego sformułowanego przez Machowskiego na podstawie analizy statystycznej losowych przechyłów wstępnych słupów dla populacji szkieletów stalowych mających cechy próby reprezentatywnej. Celem pracy była wstępna analiza wpływu podatności węzłów na wartość statystycznie uzasadnionego zastępczego przechyłu wstępnego szkieletu w kontekście obowiązujących norm polskich. Obliczenia porównawcze przeprowadzono na przykładzie 9. kondygnacyjnego budynku o szkielecie stalowym, dla którego przyjęto dwuwymiarowy model prętowy o regularnej siatce dyskretyzacji. Konstrukcja była analizowana w zakresie sprężysto-plastycznym, model konstrukcji uwzględniał nieliniowość materiałową oraz nieliniowości geometryczne w postaci dużych przemieszczeń (tj. dużych translacji i dużych obrotów) oraz efekt wzmocnienia naprężeniowego. Zachowując nieodkształconą geometrię układu do modelu wprowadzono zastępcze poziome obciążenie imperfekcyjne związane zastępczymi losowymi przechyłami wstępnymi poszczególnych pięter lub zastępczym przechylem wstępnym całego szkieletu. Jako kryterium wyznaczenia wyznaczenia zastępczego losowego przechyłu wstępnego całego szkieletu przyjęto warunek zachowania przyrostu pracy

¹ Autor do korespondencji: Izabela Tylek, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków; tel. 12-6282372; itylek@pk.edu.pl

² Krzysztof Kuchta, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków; tel. 12-6282372; kkuchta@pk.edu.pl

obciążeń imperfekcyjnych układu z węzłami o zadanej sztywności odpowiadającej obciążeniu granicznemu. W analizowanym przypadku otrzymano wartości zastępczych losowych przechyłów wstępnych szkieletu zależne od sztywności początkowej węzłów rozpatrywanej ramy, co wskazuje na potrzebę dalszej analizy opisywanego zjawiska.

Słowa kluczowe: przechył zastępczy, szkielety stalowe, analiza pozasprężysta, węzły podatne

1. Wprowadzenie

Doskonalenie analizy stanów granicznych szkieletów stalowych wiąże się ze stosowaniem możliwie realistycznego modelu ustroju uwzględniającego nieliniowość geometryczną i fizyczną, podatność połączeń i węzłów oraz imperfekcje analizowanej konstrukcji. W analizie nośności i sztywności konstrukcji stalowych uwzględnia się obecnie dwa rodzaje imperfekcji: strukturalne i geometryczne. Wspomniane imperfekcje dotyczą zarówno pojedynczego pręta ściskanego (naprężenia własne, nieprostoliniowość osi pręta), jak i całego układu (niepionowość słupów, nieosiowość w stykach montażowych, naprężenia własne montażowe, losowa zależność moment-krzywizna w połączeniach podatnych).

Imperfekcje normowe stanowią uproszczone modele imperfekcji stwierdzonych doświadczalnie w prętach oraz szkieletach stalowych. We współczesnych zaleceniach normowych [2, 7, 8] przyjęto koncepcję uwzględniania imperfekcji na etapie obliczeń statycznych. Koncepcję tą realizuje się w sposób przybliżony, przyjmując do obliczeń zastępcze imperfekcje geometryczne w postaci: zastępczego przechyłu wstępnego szkieletu stalowego oraz zastępczego wygięcia wstępnego pręta ściskanego, pozwalające pośrednio uwzględnić także imperfekcje różne od geometrycznych.

Formuły zastępczego przechyłu wstępnego szkieletu ϕ_{0z} rekomendowane przez różne komitety normalizacyjne i autorów indywidualnych mają podobną multiplikatywną postać:

$$\phi = \phi_{0z}^{(1)} k_c(m) k_s(n) \quad (1)$$

gdzie: $\phi_{0z}^{(1)} = 1/200$ – wartość podstawowa przechyłu zastępczego pojedynczej kondygnacji słupa,

$k_c(m)$ i $k_s(n)$ – współczynniki redukcji przechyłu w zależności od liczby słupów na piętrze m i liczby kondygnacji n .

Przyjętą w pierwszych zaleceniach ECCS [3] i nadal stosowaną wartość zastępczego przechyłu wstępnego pojedynczego słupa $\phi_{0z}^{(1)} = 1/200$ (większą od normowej nietolerancji niepionowości $\phi^t = 1/300$) uzasadniono w pracach Vogla [10] i De Luca'i [1] na podstawie obliczeń ram płaskich, wprowadzając do obliczeń imperfekcje w postaci: przechyłu wstępnego $\phi_0 = 1/300$, wygięcie wstępnych słupów e_0 i naprężeń własnych w przekrojach prętów σ_0 . Jako kryterium wyznaczania zastępczego przechyłu wstępnego przyjęto warunek zachowania nośności ramy płaskiej jako całości.

Wspomniane podejście deterministyczne nie prowadzi jednak do uzasadnienia mających charakter statystyczny wartości współczynników redukcji przechyłu wstępnego $k_c(m)$ i $k_s(n)$. Nie mniej istotny jest fakt, że wartości normowe wspomnianych współczynników redukcji różnią się zdecydowanie między sobą w zależności od zaleceń normowych, co zostało pokazane w [6].

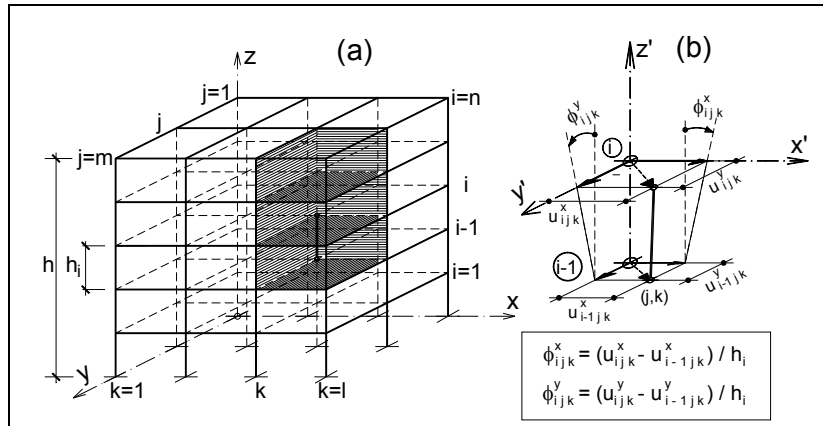
Efekty imperfekcji normowych często okazują się większe od efektów nieliniowych [5], zatem określenie jednoznacznych oraz bezpiecznych zasad wprowadzania imperfekcji obliczeń szkieletów stalowych jest zadaniem istotnym. W niniejszej pracy zagadnienia dotyczące imperfekcji analizowano przy zastosowaniu podejścia statystycznego, wykorzystując prętowo-tarczowy model szkieletu wielokondygnacyjnego wraz ze statystycznie uzasadnionymi imperfekcjami geometrycznymi.

Celem pracy była analiza wpływu podatności węzłów na wartość statystycznie uzasadnionego zastępczego przechyłu wstępnego szkieletu i porównanie otrzymanych wyników z zaleceniami normowymi. Obliczenia przeprowadzono na przykładzie 9. kondygnacyjnego budynku o szkielecie stalowym.

2. Model losowego przechyłu wstępnego pojedynczego słupa

Analiza statystyczna losowych przechyłów wstępnych słupów dla populacji szkieletów stalowych mających cechy próby reprezentatywnej, przeprowadzona przez Machowskiego [5], pozwoliła na uzasadnienie normowej wartości zastępczego przechyłu wstępnego pojedynczej kondygnacji słupa $\phi_{0z} = \phi_{0z}^{(1)} = 1/200$ jako wartości charakterystycznej zmiennej losowej ϕ_{0z} zastępującej efekty: przechyłu wstępnego słupa, mimośrodę w stykach montażowych słupów oraz naprężeń montażowych. Sformułowano również wnioski dotyczące rodzaju i parametrów rozkładu losowego przechyłu wstępnego pojedynczej kondygnacji słupa zdefiniowanego zgodnie z rys. 1 (przesunięcia poziome u_{ijk}^x i u_{ijk}^y górnego węzła i -tej kondygnacji słupa zlokalizowanego na przecięciu osi systemowych j oraz k są odmierzane

od prostej pionowej poprowadzonej przez punkt przecięcia osi słupa z płaszczyzną styku podstawy słupa z fundamentem).



Rys. 1. Przechyły wstępne słupów szkieletu ϕ_{ijk}^x i ϕ_{ijk}^y

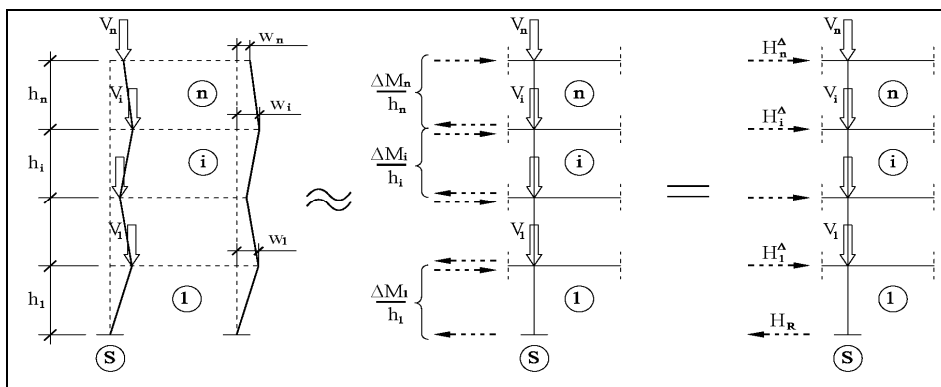
Fig. 1. Column initial tilts ϕ_{ijk}^x and ϕ_{ijk}^y

W przypadku, gdy wariancja pomierzonych przechyłów wstępnych pojedynczych słupów nie przekracza $3(\%)^2$, można przyjąć, że zastępcze losowe przechyły wstępne słupów $\phi_{0z,ijk} = \phi_{ijk}$, zdefiniowane jak wyżej, tworzą gaussowski stacjonarny szum losowy o zerowej wartości średniej i stałej wariancji równej $\sigma_\phi = \sqrt{6} \%$. Stwierdzono występowanie jedynie słabych zależności autokorelacyjnych w ciągach poziomych i pionowych przechyłów wstępnych słupów tych samych pionowych układów płaskich, przy braku jakichkolwiek innych zależności korelacyjnych między przechyłami.

3. Efektywne zastępcze losowe przechyły wstępne

Omawiane poniżej zastępcze przechyły wstępne traktowane były jako wielkości efektywne, tj. wyznaczone na podstawie kryterium zachowania globalnych efektów obciążeń imperfekcyjnych [5, 6].

Odchylenia od idealnej geometrii szkieletu w postaci przechyłów wstępnych słupów powodują powstanie dodatkowych momentów zginających od układu sił pionowych (dla piętra lub całego szkieletu), przy niezmięnionej sumie sił tego układu – rys. 2. Warunek zachowania tych dodatkowych momentów był podstawą do wyznaczenia losowego przechyłu zastępczego, odpowiednio dla piętra lub całego szkieletu.



Rys. 2. Zastępcze losowe obciążenia imperfekcyjne

Fig. 2. Random equivalent imperfectional forces

Dla ciągu losowego przechyłów wstępnych słupów $\underline{\phi}_{ijk}$ zastępczy losowy przechył wstępny i -tego piętra $\underline{\phi}_i^{ef}$ wyznaczony został z warunku zachowania przyrostu momentu zginającego M_i^ϕ na piętrze [5]

$$\underline{\phi}_i^{ef} = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l w_{ijk} \underline{\phi}_{ijk} = \mathbf{w}_i \underline{\phi}_i^T \tag{2}$$

gdzie: $w_{ijk} = P_{ijk} / P_i$ – wagi, spełniające warunek unormowania $\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l w_{ijk} = 1$,

przedstawiające ilorazy obciążeń pionowych skumulowanych powyżej $i-1$ -szej kondygnacji dla całego budynku (P_i) i pojedynczego słupa (P_{ijk}).

Zastępczy losowy przechył wstępny piętra $\underline{\phi}_i^{ef}$ jako przekształcenie liniowe (2) skończonego gaussowskiego szumu losowego $\underline{\phi}_i$ z nielosowym wektorem wagowym \mathbf{w}_i jest zmienną losową normalną o zerowej wartości średniej i wariancji $\sigma_{\phi_i}^2 = k_{c,i}^2 \sigma_\phi^2$. Współczynnik przeliczeniowy (redukcyjny) wariancji $k_{c,i}^2$, dokładnie analizowany w [5], jest funkcją współczynników wagowych w_{ijk} i współczynników korelacji między przechyłami pojedynczych słupów. Ciąg losowy zastępczych przechyłów wstępnych pięter $\underline{\phi}_i^{ef}$ jest, podobnie jak ciąg losowy przechyłów pojedynczych słupów $\underline{\phi}_{ijk}$, szumem

gaussowskim o zerowej średniej lecz wartość wariancji jest zmienna, jeżeli współczynniki $k_{c,i}^2$ nie są jednakowe dla wszystkich pięter.

Losowy zastępczy przechył wstępny całego szkieletu $\underline{\phi}^{ef}$ może zostać wyznaczony w oparciu o kryterium zachowania momentów zginających M^ϕ od obciążeń pionowych dla całego szkieletu jako pionowego wspornika [5]

$$\underline{\phi}^{ef} = \sum_{i=1}^n w_i \underline{\phi}_i^{ef} = \mathbf{w} \underline{\phi}^T \quad (3)$$

gdzie: $w_i = P_i h_i / \sum_{i=1}^n P_i h_i$.

Tak określony zastępczy przechył wstępny $\underline{\phi}^{ef}$ jest zmienną losową normalną o zerowej wartości średniej i wariancji równej (przy stałym $k_{c,i}^2$ dla pięter) $\sigma_{\phi^{ef}}^2 = k_c^2 k_s^2 \sigma_\phi^2$. Współczynnik redukcyjny wariancji $k_s^2 = k_s^2(n)$ jest zależny od elementów odpowiednich wektorów wagowych oraz macierzy korelacyjnych przechyłów pięter i słupów na tych piętrach.

Powyższe kryterium jest odpowiednie w przypadku, gdy do sprawdzenia niezawodności obiektu wystarcza znajomość momentu i sumy wszystkich obciążeń (np. sprawdzenie stateczności równowagi budowli) i jest ono równoważne kryterium zachowania mocy obciążeń dla mechanizmu płynięcia ramy spełniającej warunek mocnych słupów [5, 6].

Przy sprawdzaniu elementów szkieletu powinny zostać zachowane bezpieczne oceny dodatkowych momentów zginających M_i^ϕ dla każdego piętra szkieletu jako pionowego wspornika. Zatem bezpieczną aproksymację efektywnego losowego przechyłu wstępnego całego szkieletu $\underline{\phi}^{EF}$ można zdefiniować następująco

$$\underline{\phi}^{EF} = \max_{i=1}^n \left| \underline{\phi}_i^{EF} \right| \quad (4)$$

gdzie: $\underline{\phi}_i^{EF} = \sum_{t=i}^n V_t \sum_{q=i}^t h_q \underline{\phi}_q^{ef} \left(\sum_{t=i}^n V_t \sum_{q=i}^t h_q \right)$,

h_q – wysokość q -tej kondygnacji,

$\underline{\phi}_q^{ef}$ – zastępczy losowy przechył wstępny q -tego piętra wg (2),

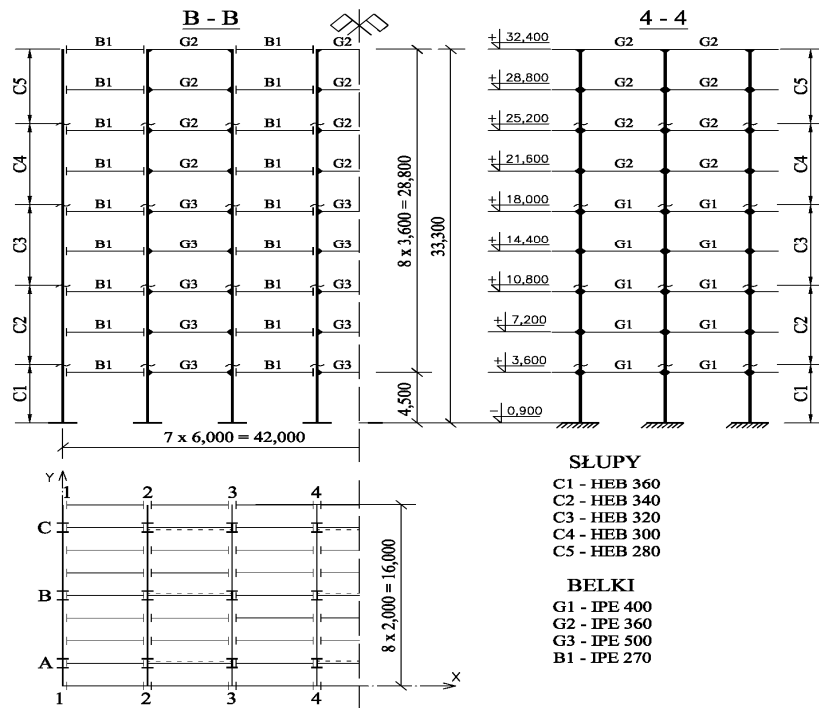
V_t – suma obciążeń pionowych działających bezpośrednio na t -tą kondygnację.

Szczegółową analizę rozkładu zastępczego losowego przechyłu wstępnego całego szkieletu ϕ^{EF} według (4) przeprowadzono w [5], stwierdzając m.in. że w ramach rozpatrywanej wyżej koncepcji nie ma podstaw do bezpiecznej redukcji przechyłu wstępnego ze względu na liczbę kondygnacji.

4. Losowy zastępczy przechył wstępny w analizie pozasprężystej układu z węzłami podatnymi

Zachowując nieodkształconą geometrię układu, wprowadzono do modelu zastępcze poziome obciążenie imperfekcyjne (por. rys. 2) związane zastępczymi losowymi przechyłami wstępnymi poszczególnych pięter ϕ_i^{ef} lub zastępczym przechyłem wstępnym całego szkieletu ϕ^{EF} .

Wpływ podatności węzłów na przechył zastępczy szkieletu w analizie sprężysto-plastycznej zbadano na przykładzie 9. kondygnacyjnego budynku B1 o szkielecie stalowym, składającym się z ośmiu poprzecznych ram nośnych, stężonych dziewięcioma jednonawowymi ramami podłużnymi (rys. 3).

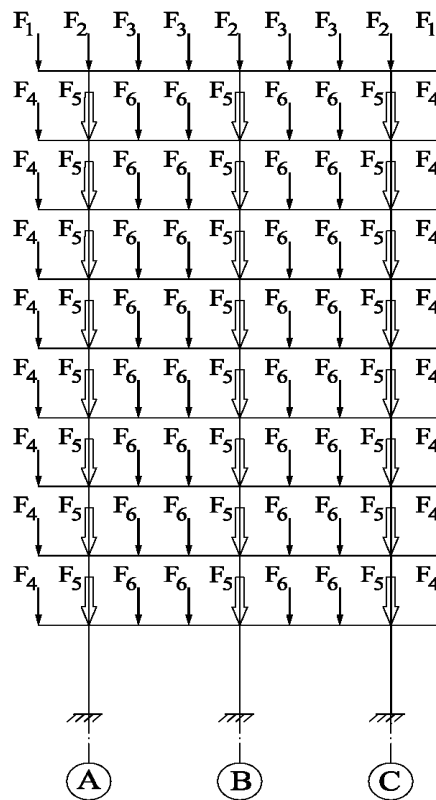


Rys. 3. Analizowany 9. kondygnacyjny budynek B1

Fig. 3. Analysed 9-story building B1

Założono, że ramy podłużne szkieletu są ramami o węzłach nominalnie sztywnych. Sztywność węzłów analizowanej ramy poprzecznej w osi 2-2 zmieniano w trakcie prowadzonych obliczeń. Pionowe układy płaskie budynku połączone były sztywnymi żelbetowymi tarczami stropowymi, zaś obudowę szkieletu stanowiły lekkie ściany osłonowe. Budynek został zaprojektowany według normy PN-B-03200:1990 [7], przy uwzględnieniu wartości obciążeń klimatycznych oraz technologicznych występujących w budownictwie miejskim, zgodnych z odpowiednimi normami polskimi (jako lokalizację budynku przyjęto Kraków).

Układ nielosowych obciążeń pionowych działających na analizowany układ płaski pokazano na rys. 4.



Obciążenie ramy w osi 2-2	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆
stałe G + zmienne Q [kN]	57	97	92	78	126	114

Rys. 4. Nielosowe obciążenia pionowe ramy poprzecznej 2-2 budynku B1

Fig. 4. Non-random vertical loads of building B1 transversal frame

Jako kryterium wyznaczenia wyznaczania zastępczego losowego przechyłu wstępnego całego szkieletu $\underline{\phi}^{EF}$ w zakresie analizy sprężysto-plastycznej przyjęto warunek zachowania przyrostu pracy obciążeń imperfekcyjnych układu z węzłami o zadanej sztywności odpowiadającej obciążeniu granicznemu. W tym celu przeanalizowano zachowanie przykładowej ramy poprzecznej w osi 2-2 pod działaniem nielosowych obciążeń pionowych (stałych i technologicznych) oraz losowych zastępczych obciążeń poziomych, odpowiadających losowym zastępczym przechyłom wstępnym pięter $\underline{\phi}_i^{ef}$.

W trakcie analizy zmieniano sztywność połączeń między ryglami ramy a słupami (połączenie wsporników ze słupami w każdym przypadku przyjęto jako nominalnie sztywne) Początkową sztywność k_p p -tego węzła rozpatrywanego ryglu ramy wyznaczano w zależności od zdefiniowanej w [4] umownej sztywności procentowej połączenia

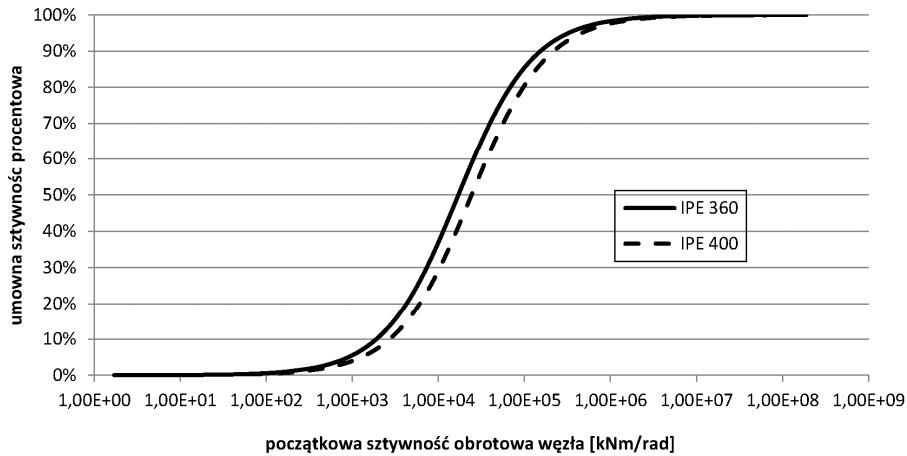
$$k_p = \frac{3 E I_y v_p}{(1 - v_p) L} \quad (5)$$

gdzie: v_p – współczynnik zamocowania, reprezentujący umowną sztywność procentową ($v_p = 0$ – połączenie przegubowe, $v_p = 1$ – połączenie sztywne),

I_y – moment bezwładności ryglu,

L – rozpiętość ryglu.

Rozpatrzono cztery wartości współczynnika zamocowania: $v_{p1} = 0,25$, $v_{p2} = 0,50$, $v_{p3} = 0,25$ (połączenia podatne zgodnie z klasyfikacją PN-EN-1993-1-8 [9] oraz $v_{p4} = 1,0$ (połączenia sztywne). Zależność między początkową sztywnością obrotową i umowną sztywnością procentową połączenia dla rozpatrywanych rygli pokazano na rys. 5.



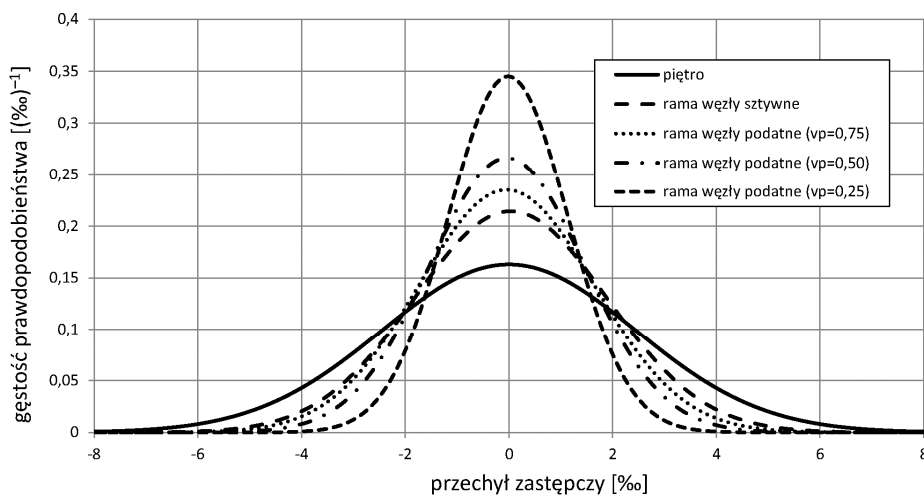
Rys. 5. Zależność między sztywnością obrotową a umowną sztywnością procentową połączenia

Fig. 5. Relationship between rotational spring stiffness and connection percentage

Dla każdego z 5. rozpatrywanych modeli ramy wygenerowano 450 realizacji ciągu losowych zastępczych przechyłów wstępnych pięter $\underline{\phi}_i^{ef}$ wg (2), a następnie wyznaczono odpowiadające im losowe zastępcze obciążenia imperfekcyjne. W obliczeniach założono stałą wartość współczynnika redukcyjnego $k_{c,i} = k_c = 1.0$ dla wszystkich kondygnacji rozpatrywanej ramy, pominięto również słabe zależności korelacyjne pomiędzy przechyłami wstępnymi pięter $\underline{\phi}_i^{ef}$. Zgodnie z przyjętą procedurą dla każdej realizacji układu zastępczych obciążeń imperfekcyjnych wyznaczano przebieg ścieżki równowagi statycznej, a dla obciążeń granicznych określono wartość przyrostu pracy od losowych obciążeń imperfekcyjnych. Następnie z warunku zachowania tej pracy dobrano wartość zastępczego przechyłu wstępnego całej ramy $\underline{\phi}^{EF}$. Znak globalnego przechyłu zastępczego $\underline{\phi}^{EF}$ przyjęto na podstawie kierunku przesuwu układu odpowiadającego nośności granicznej ramy: dodatni przy przesuwie w prawo, ujemny przy przesuwie w lewo. Dodatkowo sprawdzano czy przyjęta wartość przechyłu zastępczego ramy $\underline{\phi}^{EF}$ pozwala na bezpieczne oszacowanie nośności ramy (nośność graniczna ramy z ciągiem przechyłów losowych $\underline{\phi}_i^{ef}$ nie mniejsza niż ramy z odpowiadającym globalnym przechyłem zastępczym $\underline{\phi}^{EF}$). Obliczenia prowadzone były przy założeniu obciążeń jednoparametrowych.

Zaawansowaną analizę konstrukcji w zakresie sprężysto-plastycznym przeprowadzono wykorzystując program komputerowy ANSYS 12.0, oparty na przemieszczeniowej wersji metody elementów skończonych. Przyjęto dwuwymiarowy prętowy model konstrukcji o regularnej siatce dyskretyzacji. Zastosowano ramowy element skończony typu BEAM23, którego długość uzależniono od wysokości przekroju dyskretyzowanego elementu konstrukcji. Do obliczeń wprowadzono biliniowy sprężysto-plastyczny model materiału, którego opis w stanie uplastycznienia oparto na: kryterium plastyczności Hubera-Misesa-Hencky'ego, stowarzyszonym prawie plastycznego płynięcia oraz prawie wzmocnienia kinematycznego. Wartość współczynnika sprężystości podłużnej stali E przyjęto zgodnie z PN-EN-1993-1-1 [8] równą 210 GPa. W fazie płynięcia zastosowano współczynnik wzmocnienia równy $E/10000$. Rozwój skończonych stref plastycznych uwzględniono wprowadzając 3 punkty całkowania Gaussa na długości elementu z 5 punktami całkowania na wysokości przekroju w każdym z punktów Gaussa. Geometrię przekroju poprzecznego definiowano podając wysokość przekroju oraz zastępcze elementarne pola A_i , reprezentujące zespół włókien zlokalizowanych pomiędzy punktami całkowania wzdłuż wysokości przekroju. Macierz sztywności elementu pracującego w stanie plastycznym wyznaczono pomijając pracę sił poprzecznych (przyjęto model pręta Bernoulliego zakładający, że po odkształceniu przekrój poprzeczny pozostaje płaski i prostopadły do odkształconej osi belki). W przyjętym modelu płaskiej konstrukcji ramowej, oprócz wspomnianej wyżej nieliniowości materiałowej uwzględniono również nieliniowości geometryczne w postaci: dużych przemieszczeń (tj. dużych translacji i dużych obrotów) oraz efekt wzmocnienia naprężeniowego. Model nie uwzględniał dużych odkształceń, w obliczeniach stosowano „inżynierską” miarę odkształceń Cauchy'ego.

Na rys. 6 przedstawiono funkcje gęstości prawdopodobieństwa zmiennych losowych $\underline{\phi}^{EF}$ w zależności od wprowadzonej do obliczeń sztywności węzłów rozpatrywanej ramy. Linia ciągłą zaznaczono gęstość wyjściowego rozkładu normalnego $N(0, \sigma_{\phi_i})$ losowych zastępczych przechyłów wstępnych pięter $\underline{\phi}_i^{ef}$, natomiast liniami przerywanymi gęstości rozkładów normalnych $N(\bar{\phi}^{-EF}, \sigma_{\phi_{EF}})$ o parametrach wyznaczonych na podstawie analizy statystycznej losowych zastępczych przechyłów wstępnych ramy $\underline{\phi}^{EF}$ (tabl. 1).



Rys. 6. Porównanie rozkładu prawdopodobieństw przechyłów wstępnych pięter $\underline{\phi}_i^{ef}$ i przechyłów zastępczych rami $\underline{\phi}^{EF}$ dla różnych wartości współczynników zamocowania v_p

Fig. 6. Comparison of probability distributions of story initial tilts $\underline{\phi}_i^{ef}$ and frame equivalent tilts for different value of fixity factors

Tablica 1. Parametry rozkładu normalnego losowych zastępczych przechyłów wstępnych ram o różnych współczynnikach zamocowania v_p

Table 1. Parameters of normal distribution random equivalent initial tilts of frames with different fixity factors v_p

Węzły rami	Wartość średnia $\bar{\phi}^{EF}$ [‰]	Odchylenie standardowe $\sigma_{\phi_{EF}}$ [‰]
Sztywne	0,035	1,884
Podatne – $v_p = 0,75$	-0,043	1,695
Podatne – $v_p = 0,50$	-0,036	1,498
Podatne – $v_p = 0,25$	-0,015	1,156

5. Wnioski

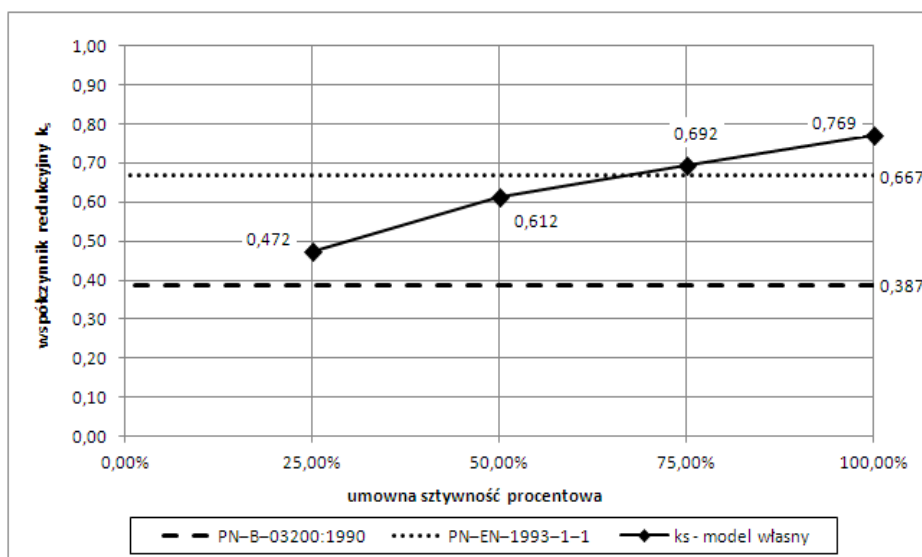
Na podstawie przeprowadzonych analiz obliczono wartości współczynnika redukcyjnego k_s (por. wzór (1)) dla przykładowej rami poprzecznej z imperfekcjami w postaci losowych zastępczych przechyłów wstępnych pięter i zadanymi sztywnościami węzłów

$$k_s = \frac{\sigma_{\phi EF}}{\sigma_{\phi i}} \quad (6)$$

gdzie: $\sigma_{\phi EF}$ – wyznaczone na podstawie analiz numerycznych odchylenie standardowe losowego zastępczego przechyłu wstępnego ramy $\underline{\phi}^{EF}$ zastępującego ciąg losowych zastępczych przechyłów wstępnych pięter $\underline{\phi}_i^{ef}$,
 $\sigma_{\phi i}$ – odchylenie standardowe losowego zastępczego przechyłu wstępnego piętra $\underline{\phi}_i^{ef}$ (por. (2)).

Zgodnie z p. 2 i 3 niniejszej pracy do wyznaczania współczynnika redukcyjnego k_s przyjęto $\sigma_{\phi i} = \sqrt{6}$ ‰.

Wartości współczynnika redukcyjnego k_s wyznaczone ze wzoru (6) na podstawie analizy zaawansowanej przykładowej ramy płaskiej 9-cio kondygnacyjnego szkieletu stalowego nie są wartościami stałymi, lecz zmieniają się w zakresie od 0,472 do 0,769 wraz ze wzrostem umownej sztywności procentowej węzłów rozpatrywanej ramy, co pokazano na rys. 7.



Rys. 7. Zależność współczynnika redukcyjnego k_s od umownej sztywności procentowej węzłów na podstawie analizy sprężysto-plastycznej oraz według zaleceń normowych

Fig. 7. Dependence of reduction coefficient k_s on connection percentage on the basis of elastic-plastic analysis and according to Standard recommendations

Wartości współczynnika k_s wynikające z zaleceń normowych są stałe i nie zależą od podatności węzłów analizowanego układu, a jedynie od jego wysokości: według PN-EN 1993-1-1 [8]: $2/3 \leq k_s = 2/\sqrt{h} \leq 1$, a zgodnie z PN-B-03200 [7]:1990 $k_s = \sqrt{5/h} \leq 1$ (gdzie h – wysokość szkieletu).

W przypadku rozpatrywanych przykładowych ram 9. kondygnacyjnych i umownej sztywności węzłów w zakresie do ok. 70%, bezpieczne oszacowania współczynnika redukcyjnego $k_s(n)$ podaje jedynie norma PN-1993-1-1. W przedziale wartości umownej sztywności węzłów powyżej 70%, redukcja zastępczego przechyłu wstępnego, zależna od wysokości szkieletu, przeprowadzona na podstawie zaleceń normowych jest większa niż wynika to z przeprowadzonej analizy zaawansowanej.

Otrzymane wyniki wskazują na celowość bliższego zbadania potrzeby zróżnicowania wartości imperfekcji zastępczej w zależności od sztywności węzłów rozpatrywanego układu. W tym celu należałoby przeprowadzić szczegółowe analizy obejmujące m.in. wpływ wysokości, schematu statycznego, rodzaju układu stężającego oraz sztywności węzłów szkieletu na wartość statystycznie uzasadnionego zastępczego przechyłu wstępnego. Porównanie uzyskanych wyników z zaleceniami normowymi (w szczególności w kontekście obniżenia wymaganej nośności lub sztywności układu) mogłoby być podstawą do sformułowania wniosków modyfikujących zalecenia normowe dotyczące redukcji zastępczego przechyłu wstępnego ramy.

Literatura

- [1] De Luca A. & Mele E.: Analysis of steel frames in the light of Eurocode 3 and new research results, [w:] Plastic hinge based methods for advanced analysis and design of steel frames ed. by D.W. White and W.F. Chen. SSRC, Lehigh Univ. Bethlehem, PA USA 1993, pp.97-152.
- [2] DIN 18800:1990. Teil 2: Stahlbauten, Stabilitätsfälle, Knicken von Stäben und Stabwerken.
- [3] European specifications for steel structures. 1st ed, ECCS, 1993.
- [4] Kartal M.E., Başıga H.B., Bayraktar A., Muvafik M.: Effects of semi-rigid connection on structural responses, Electronic Journal of structural Engineering, (10) 2010, pp. 22-34, <http://www.ejse.org>
- [5] Machowski A.: Zagadnienia stanów granicznych i niezawodności szkieletów stalowych budynków wielokondygnacyjnych, Monografia 262, Seria Inżynieria Łąkowa, Politechnika Krakowska, Kraków 1999.
- [6] Machowski A., Tylek I.: Conceptions of equivalent imperfections in analysis of steel frames, Advanced Steel Construction, Vol.4, No.1 (2008), pp. 13-25.
- [7] PN-B-03200:1990: Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [8] PN-EN 1993-1-1:2005: Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

- [9] PN-EN 1993-1-8:2006: Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8: Projektowanie węzłów.
[10] Vogel U: Calibrating frames, Stahlbau, No.10/1985, pp. 295-301.

INFLUENCE OF JOINTS RIGIDITY ON STEEL BUILDING FRAMES EQUIVALENT TILT IN POST-ELASTIC ANALYSIS

Summary

According to contemporary standard recommendations for design of steel structures imperfections are taking into account in the stage of static analysis. Most often these are equivalent geometrical imperfections in the form of equivalent initial tilt of frame as a whole and equivalent initial bow of compressed bar which indirectly allow to take into consideration also imperfections other than geometrical. In this paper imperfection problems were analyzed with the use of statistical approach, utilizing bar-disk model of multistory building frame and statistically based geometrical imperfections. Model of effective random equivalent initial tilt formulated by Machowski on the basis of steel skeleton column initial tilts statistical analysis was used.

The aim of this paper was analysis influence of joints rigidity on statistically based frame equivalent initial tilt value in the context of Polish standards currently in force. Comparative calculations were conducted for exemplary 9-story steel building frame. Two-dimensional bar structure model with regular mesh and elastic-plastic (bilinear) model of material was assumed. Large displacements (translations and rotations) and effect of stress stiffening were take into account. Random initial tilts of column or whole structure were introduced in the form of random horizontal equivalent forces. Random equivalent initial tilt for frame as a whole was determined according to criterion of imperfectional forces work increase for limit point on equilibrium path. In analyzed case values of frame random equivalent initial tilts turned out to be dependent on joint rigidity what indicates need of further analysis of described phenomenon.

Keywords: equivalent tilt, steel skeletons, post-elastic analysis, semi-rigid joints

DOI: 10.7862/rb.2013.32

Przesłano do redakcji: w kwietniu 2013 r.

Przyjęto do druku: w sierpniu 2013 r.