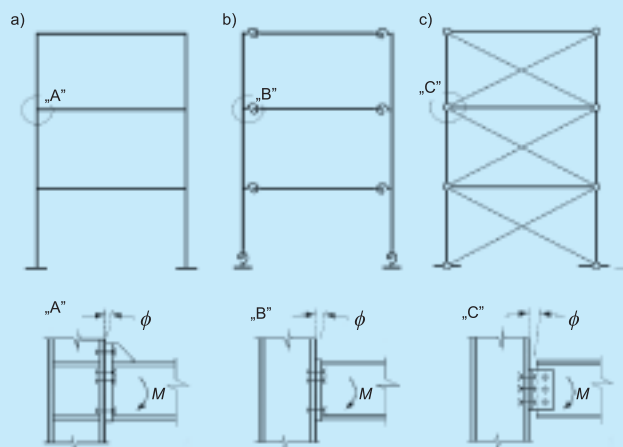


Projektowanie konstrukcji stalowych zgodnie z PN-EN 1993 – analiza konstrukcji

Design of steel structures according to PN-EN 1993 – structural analysis

Identyfikacja modeli obliczeniowych konstrukcji nośnej obiektu budowlanego jest jednym z ważniejszych etapów jego projektowania. Model obliczeniowy, to idealizacja ustroju nośnego, stosowana w celu wykonania obliczeń statyczno-wytrzymałościowych. Przystępując do oceny bezpieczeństwa konstrukcji, należy dokonać wyboru jej modelu obliczeniowego i metody analizy. Powinny one w sposób możliwie precyzyjny odwzorowywać zachowanie się konstrukcji rzeczywistej. Dotyczy to zarówno przyjęcia schematu statycznego i obciążeń ustroju, jak i modelu zachowania się materiału, całej konstrukcji oraz prętów, podpór i węzłów pod obciążeniem.

Szczególnie ważne jest właściwe odwzorowanie konstrukcyjne przyjętych (teoretycznych) modeli obliczeniowych. Należy przestrzegać podstawowej zasady identyfikacji, aby model obliczeniowy odwzorowywał z odpowiednią dokładnością zachowanie się konstrukcji rzeczywistej (w określonym stanie granicznym), a ustrój nośny obiektu był zrealizowany zgodnie z przyjętymi założeniami obliczeniowymi, np. w analizie globalnej konstrukcji należy uwzględnić typ ustroju nośnego w aspekcie połączeń. Na rysunku 1 pokazano konstrukcję o węzłach: sztywnych (rysunek 1a); podatnych (rysunek 1b) oraz przegubowych (rysunek 1c). Rozwiązania konstrukcyjne ich śrubowych styków montażowych belki ze słupem: sztywnego, podatnego i przegubowego pokazano odpowiednio na rysunkach 1d, 1e i 1f. Charakterystyki sztywnościowe tych węzłów $M-\phi$ (M – moment zginający, ϕ – kąt obrotu węzła) są odmienne zarówno w odniesieniu do nośności, jak i sztywności, dlatego też konstrukcje te analizuje się wg różnych modeli obliczeniowych.



Rys. 1. Konstrukcje wraz z odpowiadającymi im rozwiązaniami konstrukcyjnymi śrubowych styków montażowych belki ze słupem o węzłach: sztywnych (a); podatnych (b) i przegubowych (c)

W przypadku konstrukcji pełnociągłych (wg PN-EN 1993-1-1), o węzłach sztywnych (rysunek 1a) należy w analizie uwzględnić wyłącznie właściwości elementów. W konstrukcji prostej (wg PN-EN 1993-1-1) o węzłach przegubowych, pokazanej na rysunku 1c, węzły nie są zaprojektowane do przenoszenia momentów zginających (ich charakterystyki sztywnościowe nie mają wpływu na redystrybucję sił wewnętrznych w ustroju). W odniesieniu do konstrukcji niepełnociągłych (wg PN-EN 1993-1-1) o węzłach podatnych (rysunek 1b), należy w analizie statycznej uwzględnić zarówno właściwości elementów, jak i węzłów. Zasady oceny nośności i sztywności węzłów podano w PN-EN 1993-1-8:2006 Eurokod 3: *Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-8: Projektowanie węzłów*.

Modele analizy ustrojów prętowych

W analizie wytrzymałości konstrukcji wyróżnia się elementy krytyczne (przekroje elementów, pręty oraz węzły). Są to takie części ustroju, w których wskutek przyrostu obciążenia dochodzi do wyczerpania ich nośności, prowadzącego do zmiany konstrukcji w geometrycznie zmienną. Elementy krytyczne są przedmiotem wymiarowania i normowego sprawdzania ich bezpieczeństwa. Charakteryzowane są one parametrami nośności R_d , czyli zdolnością do przenoszenia określonych sił wewnętrznych, np. $N_{t,Rd}$ – obliczeniowa nośność pręta na rozciąganie, M_{Rd} – obliczeniowa nośność przekroju na zginanie, V_{Rd} – obliczeniowa nośność przekroju na ścinanie, $N_{b,Rd}$ – obliczeniowa nośność na wyboczenie elementu ściskanego.

Bezpieczeństwo konstrukcji (w odniesieniu do spełnienia warunku wytrzymałościowego) sprowadza się do kontroli stopnia wykorzystania nośności elementów (przekrojów) krytycznych w stosunku do prognozowanych sił wewnętrznych E_d (obliczeniowych efektów oddziaływań M_{Ed} , N_{Ed} , V_{Ed}), które mogą w nich wystąpić.

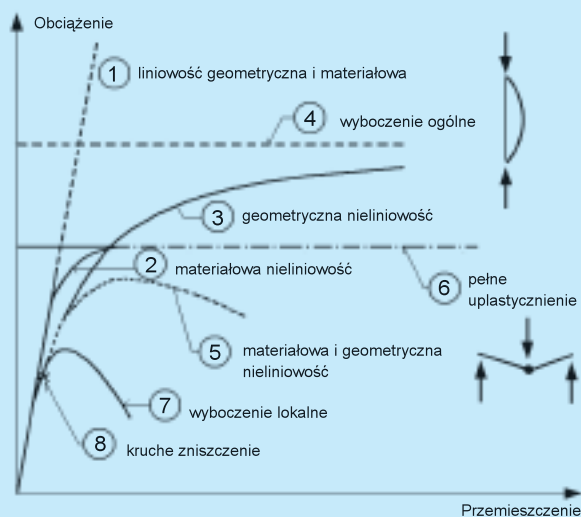
Przystępując do oceny bezpieczeństwa konstrukcji, należy dokonać wyboru jej modelu obliczeniowego i metody analizy.

Analiza globalna to wyznaczenie spójnego zbioru sił wewnętrznych i momentów zginających (M_{Ed} , N_{Ed} , V_{Ed}) lub naprężeń w konstrukcji, które są w równowadze z określonym zbiorem oddziaływań zewnętrznych. **Stosowane są następujące rodzaje analizy globalnej:**

- w aspekcie geometrii i równań statyki:
 - analiza I rzędu (geometria początkowa ustroju),
 - analiza II rzędu (geometria zdeformowana ustroju);
- w aspekcie właściwości materiału (stali):
 - analiza liniowo-sprężysta,
 - analiza nieliniowa (sprężysto-plastyczna).

W analizach wytrzymałości konstrukcji najczęściej stosuje się model stali liniowo-sprężysty lub sprężysto-plastyczny (model Prandtl'a). Na rysunku 2 pokazano poglądowo ścieżki równowagi statycznej (zależność: obciążenie – przemieszczenie) ustrojów prętowych oraz wzajemne relacje między metodami analizy konstrukcji, z których się obecnie korzysta w ocenie jej wytrzymałości.

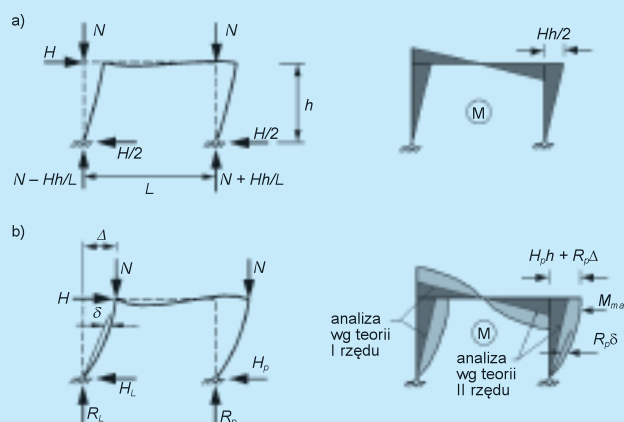
W obliczeniach wytrzymałości i zachowania się ustroju nośnego najczęściej stosuje się analizę I rzędu konstrukcji o idealnej (bez imperfekcji) oraz niezmienną się geometrii (bez uwzględnienia deformacji pod obciążeniem), z uwzględnieniem odkształceń sprężystych stali (linia prosta 1 na rysunku 2). Zbliżenie uzyskanych wyników do rzeczywistego zachowania się konstrukcji otrzymuje się, uwzględniając wpływ oddziaływań na konstrukcję odkształconą (geometrycznie nieliniową). Dodatkowe zastosowanie analizy II rzędu daje wyniki powiększone o efekty wpływu deformacji na wytrzymałość konstrukcji (krzywa 3 na rysunku 2). Często te efekty są pomijalnie małe, ale w niektórych przypadkach mogą być istotne i osiągać znaczne wartości. Wówczas należy uwzględnić nieliniowość geometryczną ustroju i wyznaczać siły przekrojowe z uwzględnieniem zginania II rzędu. Nieliniową ścieżkę równowagi statycznej przy założeniu sprężystego modelu wytrzymałości materiału i analizie konstrukcji wg teorii II rzędu oznaczono na rysunku 2 krzywą 5.



Rys. 2. Ścieżki równowagi statycznej konstrukcji prętowych

Na rysunku 3a na przykładzie przechyłowej ramy portalowej przedstawiono momenty zginające obliczone wg teorii I rzędu (tj. bez uwzględnienia przemieszczenia poziomego Δ), a na rysunku 3b momenty zginające wg teorii II rzędu (wyznaczone z uwzględnieniem przemieszczenia poziomego Δ).

Zgodnie z zaleceniami PN-EN 1993-1-1 w ocenie wytrzymałości konstrukcji należy uwzględnić wpływ imperfekcji, a także niekiedy dodatkowe efekty II rzędu (tzw. efekty $P-\Delta$). Stosownie do przyjętego sposobu obliczenia, wpływ imperfekcji uwzględnia się w dwojaki sposób za pomocą odpowiednich współczynników niestateczności lub na etapie analizy układu, przez wprowadzenie zastępczych obliczeniowych imperfekcji geometrycznych.



Rys. 3. Momenty zginające w ramie portalowej obliczone wg teorii I rzędu (a) oraz wyznaczone wg teorii II rzędu (b)

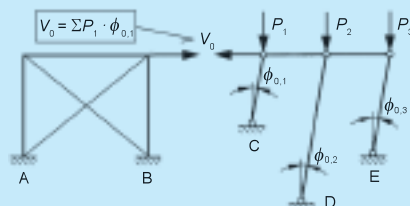
Imperfekcje lokalne i globalne ustrojów prętowych

Konstrukcje rzeczywiste są obarczone wstępnymi, losowymi niedoskonałościami (imperfekcjami). Są to wady konstrukcyjne (np. nieosiowe, mimośrodowe połączenia), technologiczne (np. naprężenia walcownicze, naprężenia spawalnicze), wykonawcze (np. wygięcia osi podłużnych prętów oraz płaszczyzn środkowych ich ścianek), montażowe (np. brak pionowości słupów), eksploatacyjne itp. W ocenie nośności konstrukcji stalowych uwzględnia się je jako zastępcze imperfekcje geometryczne. Ich wpływ na nośność konstrukcji jest zazwyczaj negatywny (zmniejszają wytrzymałość ustroju). Zgodnie z postanowieniami PN-EN 1993-1-1 rozróżnia się następujące niedoskonałości:

- imperfekcje globalne w postaci wstępnego przechyłu układów ramowych ϕ_0 ,

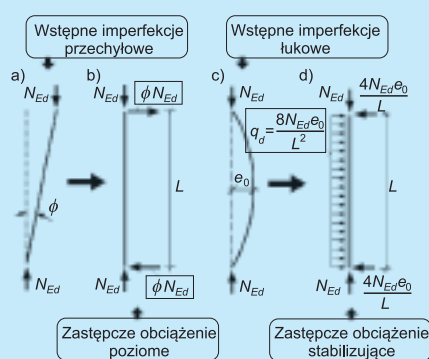
- imperfekcje lokalne w postaci wstępnego wygięcia łukowego pojedynczych elementów e_0/L .

Ponadto analiza konstrukcji powinna uwzględniać wpływ imperfekcji obejmujących naprężenia własne oraz odchyłki geometryczne, takie jak brak prostokątności, brak prostości, brak przylegania oraz wszelkie mimośrodowe montażowe w węzłach konstrukcji nieobciążonej. Skutki występowania imperfekcji w postaci wstępnego przechyłu ϕ_0 na wytrzymałość konstrukcji pokazano na rysunku 4. W wyniku wstępnego pochyleń, słupy „wahacze” (w osiach C, D i E) przekazują dodatkową siłę poziomą V_0 na stężoną ramę portalową (w przęśle między osiami A i B), a więc powodują dodatkowe jej wytrzymałość.



Rys. 4. Schemat wytrzymałości konstrukcji ze wstępnym przechyłem słupów

W postanowieniach normy PN-EN 1993-1-1 następstwa losowych imperfekcji geometrycznych konstrukcji rzeczywistych uwzględnia się, obciążając ustrój nośny równoważnymi w skutkach obciążeniami zastępczymi. W ten sposób imperfekcje geometryczne konstrukcji traktuje się jako specyficzny rodzaj jej obciążeń. Imperfekcje geometryczne przechyłu (rysunek 5a) lub wygięcia łukowego (rysunek 5c) można zastąpić samo-



Rys. 5. Zastąpienie wstępnych imperfekcji geometrycznych przęchylu elementu ϕ_0 (a) i wygięcia łukowego elementu e_0/L (c) równoważnymi obciążeniami (b, d)

zrównoważonym układem sił, których schematy pokazano odpowiednio na rysunku 5b oraz rysunku 5d.

Parametry związane z przęchylm konstrukcji oblicza się ze wzoru:

$$\phi = \phi_0 \alpha_h \alpha_m \quad (1)$$

gdzie:
 ϕ_0 – wartość podstawowa imperfekcji przęchylu

$$\phi_0 = \frac{1}{200} \quad (2)$$

α_h – współczynnik redukcji ze względu na wysokość

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

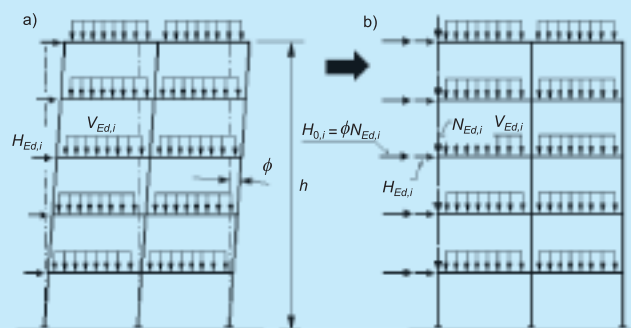
α_m – współczynnik redukcji ze względu na liczbę słupów

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m} \right)} \quad (4)$$

gdzie:

m – liczba słupów w rzędzie, które przenoszą obciążenie N_{Ed} nie mniejsze od 50% przeciętnego obciążenia słupa w rozpatrywanej płaszczyźnie pionowej.

W przedstawionym sposobie oceny wyęczenia konstrukcji z imperfekcjami przęchylowymi ϕ (rysunek 6a) analizuje się ustrój nośny bez tych niedoskonałości wstępnych (rysunek 6b), a wpływ imperfekcji na jej wyęczenie uwzględnia się, zwiększając obciążenia poziome.



Rys. 6. Schemat konstrukcji z imperfekcją przęchylu ustroju (a) oraz jej schemat obliczeniowy (b)

Zastępcze siły poziome od imperfekcji przęchylu kondygnacji ustroju ϕ wyznacza się ze wzoru

$$H_{0,i} = \phi N_{Ed,i} \quad (5)$$

gdzie:

$N_{Ed,i}$ – obliczeniowa siła pionowa w słupie i -tej kondygnacji konstrukcji.

W przypadku stalowych konstrukcji szkieletowych można pomijać globalne imperfekcje przęchylowe w analizie statycznej, gdy spełniony jest warunek

$$H_{Ed} \geq 0,15 V_{Ed} \quad (6)$$

gdzie:

H_{Ed} – wartość obliczeniowa sumarycznego obciążenia poziomego przenoszonego przez rozpatrywaną kondygnację;

V_{Ed} – sumaryczne obliczeniowe obciążenie pionowe u dołu kondygnacji.

W ogólnym przypadku lokalne imperfekcje łukowe prętów ram mogą być pomijane w analizie statycznej. W obliczeniach

ram wrażliwych na przęchylowe efekty II rzędu zaleca się uwzględniać globalne imperfekcje przęchylowe i dodatkowo wprowadzić lokalne imperfekcje łukowe tych elementów ściskanych, w których przynajmniej jeden węzeł elementu przenosi moment zginający oraz względna smukłość spełnia warunek

$$\bar{\lambda} > 0,5 \sqrt{\frac{A f_y}{N_{Ed}}} \quad (7)$$

gdzie:

A – pole przekroju elementu;

f_y – granica plastyczności stali;

N_{Ed} – wartość obliczeniowa siły ściskającej.

Biorąc pod uwagę, że względną smukłość elementu opisuje zależność

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \quad (8)$$

warunek (7) ma postać:

$$\sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} > 0,5 \sqrt{\frac{A f_y}{N_{Ed}}} \quad (9)$$

czyli

$$N_{Ed} > 0,25 N_{cr} \quad (10)$$

gdzie:

N_{cr} – siła krytyczna obliczona z uwzględnieniem wyboczenia w płaszczyźnie układu przy założeniu przegubowego podparcia słupa na obu końcach:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I_y}{l_y^2} \quad (11)$$

Zastępcze imperfekcje wstępnego wygięcia łukowego elementów ściskanych e_0/L (rysunek 5c, d) uwzględnia się w ocenie wyęczenia stężeń. W PN-EN 1993-1-1 podano zasady obliczania poprzecznego stężenia o schemacie dźwigara jednoprzęsłowego (rysunek 7c).

Stabilizowanym, ściskany element dźwigarów przyporządkowuje się model prętów z wstępnymi wygięciami łukowymi o strzałce

$$e_0 = \alpha_m \frac{L}{500} \quad (12)$$

gdzie:

L – rozpiętość stężanych elementów;

α_m – współczynnik kumulacji oddziaływań stężanych m elementów obliczany ze wzoru (4), w którym m – liczba stężanych elementów (np. rygli dachowych).

Imperfekcyjne równomiernie rozłożone zastępcze (rysunek 5d) obciążenie stabilizujące q_d (rysunek 7c) wynosi

$$q_d = \sum_{i=1}^m 8 N_{Ed} \frac{e_0 + \delta_q}{L^2} \quad (13)$$

gdzie:

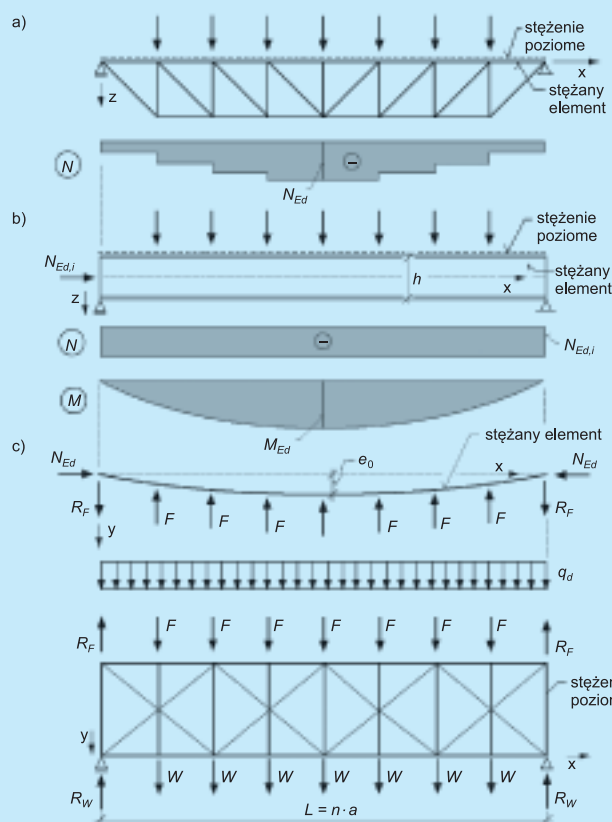
N_{Ed} – obliczeniowa, maksymalna siła ściskająca w stężanym elemencie;

δ_q – ugięcie stężenia od oddziaływania q_d i wszystkich obciążeń zewnętrznych, uzyskane z analizy I rzędu (w przypadku, gdy w analizie ustroju stosuje się teorię II rzędu, to można przyjąć $\delta_q = 0$).

Siłę ściskającą N_{Ed} w stężanym pasie dźwigara kratowego (rysunek 7a), przyjmuje się z przedziału, w którym jest ona największa. Gdy stężenie stabilizuje ściskany pas zginanego dźwigara pełnościennego o stałej wysokości (rysunek 7b), to siłę N_{Ed} można wyznaczyć ze wzoru

$$N_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{h} \quad (14)$$

gdzie: h – całkowita wysokość elementu (rysunek 7b).



Rys. 7. Model obliczeniowy stężenia: e_0 – strzałka wstępnej łukowej imperfekcji geometrycznej; N_{Ed} – siła ściskająca element stężony; q_d – równoważne, równomierne rozłożone obciążenie od imperfekcji; F – siły skupione przyłożone w węzłach kratownicy będące wynikiem działania obciążenia q_d ; W – obciążenia od wiatru

Jeśli jest on ściskany i zginany, to należy przyjąć taką kombinację siły podłużnej $N_{Ed,i}$ oraz momentu zginającego $M_{Ed,i}$, która daje największą wartość siły podłużnej i obliczyć ze wzoru

$$N_{Ed} = \frac{N_{Ed,i}}{2} + \frac{M_{Ed}}{h} \quad (15)$$

gdzie:

$N_{Ed,i}$ – siła podłużna w analizowanym przekroju rygla dachowego;
 M_{Ed} – maksymalny obliczeniowy moment zginający w ryglu dachowym.

Wpływ deformacji na wyężenie ustrojów prętowych

Efekty towarzyszące deformacjom ustroju (efekty II rzędu) powinny być uwzględniane, jeśli powodują znaczny przyrost skutków oddziaływań lub wpływają istotnie na zachowanie się konstrukcji. Zgodnie z PN-EN 1993-1-1 w obliczeniach konstrukcji ramowych mogą być stosowane następujące sposoby oceny ich wyężenia:

- analiza konstrukcji z pominięciem jej imperfekcji wg teorii I rzędu (należy sprawdzać nośność przekrojów oraz stateczność elementów);
- analiza wg teorii I rzędu konstrukcji z uwzględnieniem jej imperfekcji przechyłu oraz efektu $P - \Delta$ (należy sprawdzać nośność przekrojów oraz stateczność elementów);
- analiza wg teorii II rzędu konstrukcji z uwzględnieniem jej imperfekcji przechyłu oraz imperfekcji lokalnych (należy sprawdzać tylko nośność przekrojów elementów).

W przypadku sposobu 3. nie ma potrzeby sprawdzania stateczności ogólnej elementów konstrukcji (wyboczenia lub zwirzenia). Zgodnie z PN-EN 1993-1-1 wyboru właściwego sposobu obliczeniowego konstrukcji dokonuje się na podstawie analizy mnożnika obciążenia krytycznego

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \quad (16)$$

gdzie:

F_{cr} – obciążenie krytyczne przy globalnej niestateczności sprężystej;
 F_{Ed} – obliczeniowe sumaryczne obciążenie pionowe.

Obliczeniowy sposób 1. stosuje się do konstrukcji nieprzechyłowych, gdy $\alpha_{cr} \geq 10$ (analiza wg teorii I rzędu). W przypadku konstrukcji przechyłowych, gdy $\alpha_{cr} < 3$, tj. wrażliwych na przechyłowe efekty II rzędu, zasadniczo należy stosować sposób 3. Opcję 2., tj. podejście uproszczone, stosuje się do układów regularnych i niezbyt smukłych, gdy $3 \leq \alpha_{cr} < 10$.

Zgodnie z Załącznikiem Krajowym w normie PN-EN 1993-1-1, analizę I rzędu bez uwzględnienia imperfekcji można stosować w przypadku konstrukcji nieprzechyłowych (sztywno stężonych), a także ram jednokondygnacyjnych układów przechyłowych.

W uproszczonym podejściu obliczeniowym (wg opcji 2.) stowarzyszone z przechyłem momenty zginające II rzędu wyznacza się na podstawie statyki I rzędu. Wówczas poziome oddziaływania ustroju należy odpowiednio powiększyć za pomocą współczynnika amplifikacji $(1 - 1/\alpha_{cr})^{-1}$, a sprawdzając stateczność elementów, przyjmuje się długość wyboczeniową równą jego długości teoretycznej $L_{cr} = L$.

Momenty zginające wg teorii II rzędu wyznacza się ze wzoru

$$M^I(H, V) \cong M(H^*) + M(V_{Ed}) \quad (17)$$

gdzie:

H – obciążenia poziome;

V – obciążenia pionowe;

V_{Ed} – sumaryczne, obliczeniowe obciążenia pionowe u dołu kondygnacji;

H^* – amplifikowane oddziaływanie poziome.

Amplifikowane oddziaływanie poziome konstrukcji wynosi

$$H^* = \frac{H_1}{1 - \alpha_{cr}^{-1}} \quad (18)$$

w którym:

$$H_1 = H_0 + H_{Ed} \quad (19)$$

gdzie:

H_0 – siły poziome (fikcyjne) od imperfekcji przechyłu kondygnacji;

H_{Ed} – obliczeniowe obciążenie poziome (np. od wiatru lub inne) u dołu kondygnacji.

Mnożnik α_{cr} można wyznaczyć z następującego wzoru przybliżonego

$$\alpha_{cr} = \left(\frac{H_1}{V_{Ed}} \right) \left(\frac{h}{\delta_{H,Ed}} \right) \quad (20)$$

gdzie:

h – wysokość kondygnacji;

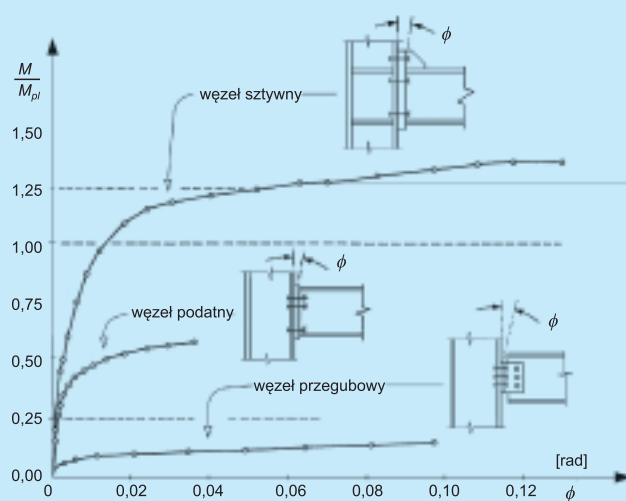
$\delta_{H,Ed}$ – przemieszczenie poziome góry kondygnacji względem dołu kondygnacji, wywołane wszystkimi zewnętrznymi i fikcyjnymi obciążeniami poziomymi, przyłożonymi do układu ramowego.

Podatność węzłów i połączeń ustrojów prętowych

Stosowane w praktyce połączenia nie zawsze spełniają w sposób ścisły wymagania określone w odniesieniu do węzłów idealnie sztywnych i idealnie przegubowych, a ich wła-

ściwości przybliżają się do tych ekstremalnych wymagań. Rzeczywiste węzły i styki mogą być połączeniami podatnymi. Stosowanie węzłów podatnych wynika więc często z dążenia do uproszczeń technologicznych (eliminowanie żeber, usztywnień, zastępowanie węzłów spawanych połączeniami na śruby).

Połączenia węzłów ustrojów nośnych może cechować różna sztywność oraz różna nośność. Na rysunku 8 pokazano wyniki badań doświadczalnych zależności $M - \phi$ styków montażowych belki ze słupem o różnej sztywności: doczołowego *sztywnego* i doczołowego *podatnego* oraz nakładkowego *przegubowego*. Przedstawione przykłady charakterystyk $M - \phi$ połączeń należy traktować umownie, gdyż o podatności węzłów decyduje nie tylko rodzaj styku, ale liczba śrub, uźebrowanie, grubość elementów przylgowych złącza.



Rys. 8. Charakterystyki sztywnościowe śrubowych połączeń belki ze słupem: przegubowego, sztywnego i podatnego

Należy zwrócić uwagę, że charakterystyki sztywnościowe węzłów $M - \phi$ (gdzie M – moment przenoszony przez węzeł, ϕ – lokalny kąt obrotu węzła) mają wpływ na wyężenia i przemieszczenia konstrukcji. Zagadnienia podatności węzłów i połączeń prętowych konstrukcji stalowych są ujęte w PN-EN 1993-1-1 i PN-EN 1993-1-8.

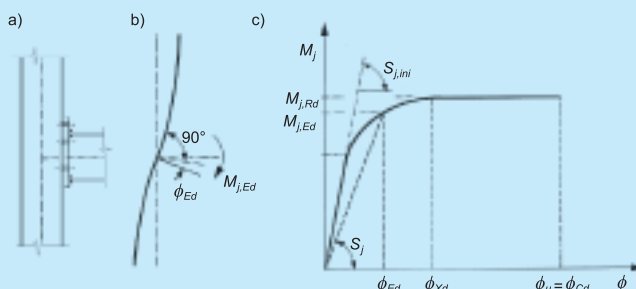
Na potrzeby analizy globalnej, ze względu na modele połączeń i ich klasy w aspekcie zginania, rozróżnia się modele węzłów:

- **prosty** (przegubowy), gdy można przyjąć, że węzeł nie przenosi momentów zginających (rysunki 1c, f);
- **o pełnej ciągłości** (sztywny), gdy można przyjąć, że zachowanie się węzła nie wpływa na analizę (rysunki 1a, d);
- **o niepełnej ciągłości** (podatny), gdy zachowanie się węzła trzeba w analizie brać pod uwagę (rysunki 1b, e).

Wpływ zachowania się węzłów na rozkład sił wewnętrznych i deformacji konstrukcji może być zazwyczaj pominięty, ale np. w ustrojach z węzłami podatnymi należy go uwzględnić w analizie statyczno-wytrzymałościowej.

Znajomość ścieżek równowagi statycznej połączeń umożliwia uwzględnienie w przyjmowanych schematach obliczeniowych wyznaczania sił wewnętrznych, precyzyjniejszych modeli opisujących sztywność i przemieszczenia

węzłów i styków. Doświadczalne i analityczne badania izolowanych węzłów ram umożliwiają: sporządzenie ścieżek równowagi statycznej w postaci krzywych $M - \phi$; określenie nośności granicznej na zginanie M_{u} ; sztywności $S = M/\phi$; zdolności do obrotu ϕ_u połączeń oraz identyfikację ich mechanizmów zniszczenia. Na podstawie tych badań, w analizach teoretycznych są stosowane modele aproksymujące krzywe $M - \phi$, prognozujące podatność węzłów. Charakterystykę standardowego modelu węzła podatnego konstrukcji stalowych wg PN-EN 1993-1-8 przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Charakterystyka $M - \phi$ węzła podatnego wg PN-EN 1993-1-8

Rzeczywiste charakterystyki węzłów podatnych $M - \phi$ są nieliniowe, ponieważ ich sztywność jest funkcją aktualnego stanu ich wyężenia. Określenie rozkładu sił wewnętrznych w konstrukcji z węzłami podatnymi jest więc zagadnieniem skomplikowanym, wymagającym zaawansowanych modeli analizy ustroju. Kierując się potrzebami praktyki inżynierskiej, rzeczywistą nieliniową charakterystykę węzła podatnego najczęściej ustala się, wykorzystując liniową charakterystykę zastępczą (oznaczoną linią przerywaną na rysunku 9), w której stosuje się moduł sieczny

$$S_j = \frac{S_{j,ini}}{\eta} \text{ dla } M_{j,Ed} \leq \frac{M_{j,Rd}}{\eta_R} \quad (21)$$

gdzie:

- $S_{j,ini}$ – sztywność początkowa węzła opisana styczną do krzywej $M - \phi$ w początku układu współrzędnych;
- $M_{j,Rd}$ – nośność graniczna węzła;
- η – współczynnik umożliwiający odwzorowanie wpływu rzeczywistej charakterystyki węzła na rozkład sił wewnętrznych;
- η_R – współczynnik do określenia zakresu ważności charakterystyki zastępczej.

Projektowanie konstrukcji z węzłami podatnymi wymaga znajomości dwóch parametrów charakterystyki węzła ($M_{j,Rd}$, $S_{j,ini}$) oraz dwóch współczynników (η , η_R).

Zagadnienie oceny granic, które umożliwiają zakwalifikowanie badanych węzłów do sztywnych, podatnych lub przegubowych zostało wystarczająco dobrze rozpoznane. W PN-EN 1993-1-8 podano zasady zarówno dotyczące modelowania, jak i klasyfikacji sztywności (tabela) i nośności węzłów podatnych.

Literaturę podano w artykule *Projektowanie konstrukcji stalowych zgodnie z PN-EN 1993* opublikowanym w nr 6/2013 miesięcznika „Materiały Budowlane” str. 38 – 42.

prof. dr hab. inż. Antoni Biegus

Politechnika Wrocławska