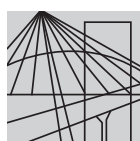


Patroni honorowi działu:



GLÓWNY
URZĄD
NADZORU
BUDOWLANEGO



P O L S K A
I Z B A
I N Ź Y N I E R Ó W
B U D O W N I C T W A

Projektowanie ściskanych elementów żelbetowych wg Eurokodu 2 – kryterium smukłości i długość efektywna

Design of Reinforced Concrete Members Under Compression According to Eurocode 2 – Slenderness Criterion

Występowanie dużych sił osiowych w mimośrodowo ściskanych elementach konstrukcyjnych może prowadzić do powstania efektów II rzędu o znacznych wartościach. Ich precyzyjne wyznaczenie jest trudne ze względu na istnienie wzajemnego sprzężenia pomiędzy siłami wewnętrznymi i deformacją elementu. Dodatkowo, w przypadku elementów żelbetowych, dochodzą utrudnienia związane m.in. z zarysowaniem elementów oraz pęłaniem betonu. W związku z tym do określenia efektów II rzędu stosowane są zależności przybliżone.

Konieczność uwzględniania efektów II rzędu (lub możliwość ich pominięcia) w wydzielonych elementach ściskanych wynika z kryterium smukłości. Jego sprawdzenie wymaga od projektanta wyznaczenia smukłości elementu (newralgiczną rolę pełni długość efektywna elementu) i porównania jej ze smukłością graniczną. Wiele różnic w podejściu do kontroli kryterium smukłości wg Eurokodu 2 [1] oraz PN-B-03264:2002 [2] skłania do przybliżenia Czytelnikom zasad i pojęć związanych z tym zagadnieniem. Jest to szczególnie istotne, ze względu na fakt, że niektóre propozycje zamieszczone w Eurokodzie 2 [1] mają charakter ogólnikowy i ich zastosowanie wymaga przyjęcia dodatkowych założeń.

W artykule ograniczę się do analizy elementów wydzielonych, w przypadku których rozważa się jedynie wpływ efektów II rzędu o charakterze lokalnym. Tego typu ograniczenie dopuszczane jest w sytuacjach, gdy ustrój

traktowany jako całość spełnia kryteria pomijania efektów o charakterze globalnym.

Projektowanie wydzielonych elementów ściskanych – uwagi ogólne

Tradycyjny sposób projektowania konstrukcji żelbetowych polega na prowadzeniu obliczeń statycznych wg teorii I rzędu (z pominięciem wpływu deformacji ustroju na wartości sił wewnętrznych). Dopiero na etapie wymiarowania elementów ściskanych koryguje się momenty zginające, uwzględniając w ten sposób wpływ deformacji. Dodatkowe momenty zginające (momenty II rzędu) wyznacza się, uwzględniając wiele czynników pomijanych w analizie statycznej. Można do nich zaliczyć wpływ zbrojenia, zarysowanie, pęłanie betonu wynikające z długotrwałości działania obciążeń, wartość siły osiowej, przebieg momentów na długości elementu, ograniczenie swobody odkształceń przez elementy sąsiadujące. Wszystkie wymienione czynniki brane są pod uwagę zarówno w metodzie projektowania elementów ściskanych wg dotychczasowej normy [2], jak i w metodach zalecanych w Eurokodzie 2 [1].

W PN-B-03264:2002 [2] oraz jej wcześniejszych edycjach występowała niekonsekwencja. Pomimo że przy określaniu efektów II rzędu brano pod uwagę wszystkie wymienione czynniki, to jednak kryterium smukłości decydujące o konieczności ich uwzględnienia było niezmiernie uproszczone i pomijało większość spośród nich.

Należy przypuszczać, że takie podejście wynikało z dążenia do uproszczenia obliczeń oraz wątpliwości związanych z prostym sformulowaniem tego kryterium.

Kryterium smukłości dotyczące elementów wydzielonych

Podobnie jak dotychczasowe normy do projektowania konstrukcji żelbetowych, **Eurokod 2 [1] podtrzymuje możliwość pomijania efektów II rzędu w niektórych elementach ściskanych. Zgodnie z zapisami tej normy (punkt 5.8.2.6. [1]) nie mogą one przekraczać 10% odpowiednich efektów I rzędu.** Sformułowanie warunku dopuszczającego pomijanie efektów II rzędu bezpośrednio na podstawie ich wielkości nie miałooby głębszego sensu, gdyż wymagałoby ich wcześniejszego wyznaczenia. Z tego powodu norma [1] określa uproszczone sposoby ich oszacowania. Uznaje się, że w elementach wydzielonych spełnienie tego wymagania można sprowadzić do kontroli prostego warunku smukłości:

$$\lambda = \frac{l_0}{i} \leq \lambda_{lim} \quad (1)$$

gdzie:

l_0 – długość efektywna;
 i – promień bezwładności.

Znana więc z wcześniejszych edycji norm PN-B-03264 ogólna zasada wyrażona wzorem (1) pozostała bez zmian. Zgodnie z nią, elementy o smukłości λ nieprzekraczającej wartości granicznej λ_{lim} klasyfikowane są do grupy elementów krępych. W ich przypadku dopuszcza się po-

mijanie efektów II rzędu. Przekroczenie smukłości granicznej sprawia, że element klasyfikowany jest do grupy elementów smukłych, w przypadku których uwzględnienie efektów II rzędu staje się obligatoryjne.

W przypadku elementów dwukierunkowo mimośrodowo ściskanych Eurokod 2 zezwala na niezależne rozpatrywanie każdej z dwu płaszczyzn i ocenę konieczności uwzględnienia efektów II rzędu w zależności od spełnienia warunku smukłości dla każdej z nich z osobna.

Zgodnie z zapisami normy [1], smukłość elementu powinna zostać obliczona na podstawie promienia bezwładności i określonego dla niezarysowanego przekroju żelbetowego. W praktyce warunek smukłości kontroluje się zwykle, zanim wyznaczy się zbrojenie. Przyjęcie takiego założenia sprawia, że uzyskuje się nieco większą smukłość, co w świetle zapisów normy [1] można uznać za podejście bezpieczne.

W dotychczasowej normie [2] o konieczności uwzględniania efektów II rzędu decydowały jedynie cechy geometryczne elementu (długość i promień bezwładności) oraz warunki jego połączenia z elementami sąsiadującymi (uwzględniane przez współczynnik β stosowany do określania długości obliczeniowej). Wielkości te uwzględniane były w wyrażeniu po lewej stronie nierówności (1). Występująca po prawej stronie smukłość graniczna λ_{lim} wynosiła w przypadku elementów żelbetowych 25.

W Eurokodzie 2 smukłość graniczną oblicza się ze wzoru (2):

$$\lambda_{lim} = \frac{20ABC}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

Jej wartość zależy od kilku dotychczas pomijanych czynników:

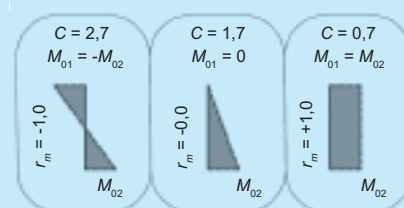
- pełzania i udziału obciążeń długotrwałych (współczynnik A): $A = 1/(1 + 0,2 \varphi_{ef})$;
- intensywności zbrojenia $\omega = (A_c f_{syd})/(A_c f_{cd})$ (współczynnik B): $B = \sqrt{1 + 2\omega}$;
- przebiegu momentów I rzędu na długości elementu (współczynnik C): $C = 1,7 - r_m$ (gdzie: r_m jest stosunkiem momentów zginających na dwóch przeciwnych końcach słupa);
- względnej siły osiowej: $n = N_{Ed}/(A_c \cdot f_{cd})$.

W związku z tym, że wymienione czynniki w istotny sposób wpływają na wielkość efektów II rzędu, jak najbardziej zasadne jest ich uwzględnienie już na etapie oceny smukłości. Postępowanie wg dotychczasowych norm mogło prowadzić do sytuacji, gdy ze względu np. na niewielką wartość siły osiowej efekty II rzędu były bardzo niewielkie, jednak sztywne kryterium smukłości nie pozwalało na ich pominięcie.

W obliczeniach smukłości granicznej λ_{lim} , Eurokod 2 dopuszcza stosowanie podejścia uproszczonego polegającego na przyjmowaniu „bezpiecznych” wartości współczynników A , B i C . Ich wartości wynoszą wtedy: $A = 0,7$, $B = 1,1$, $C = 0,7$.

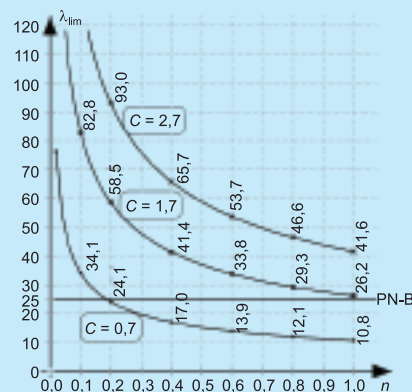
Dopuszczenie takiego postępowania ma na celu umożliwienie szybkiej oceny smukłości bez szczegółowej analizy stanów obciążenia i występującego w elemencie zbrojenia. Można przyjąć, że tak założone wartości A , B i C są wielkościami małymi, a uzyskiwana na ich podstawie smukłość graniczna jest określona w sposób zachowawczy. W sytuacji, gdy uproszczony sposób postępowania prowadzi do zaklasyfikowania elementu do grupy elementów smukłych, zwykle warto pójść o bardziej szczegółową analizę urealnijając wartości tych współczynników. Jej efektem może być zmiana sposobu zaklasyfikowania elementu do grupy elementów krępych, a w konsekwencji mniej pracochłonny sposób prowadzenia obliczeń z pominięciem efektów II rzędu. W tym kontekście, szczególnie istotne jest zwrócenie uwagi na przebieg momentów zginających na długości elementu i wynikającą z niego wartość współczynnika C (rysunek 1). Przyjęcie zachowawczej wartości $C = 0,7$ odpowiada sytuacji, w której na końcach elementu występują jednoznakowe momenty o tych samych wartościach. Ze względu na jednakową krzywiznę na długości słupa, jego wrażliwość na występowanie efektów II rzędu jest w tej sytuacji największa. Najmniej podatne na tego typu efekty są elementy obciążone jednakowymi momentami o przeciwnych znakach ($C = 2,7$).

Łatwo wykazać, że w przypadku dwóch jednakowych słupów różniących się tylko i wyłącznie rozkładem momentów zginających na długości



Rys. 1. Wpływ rozkładu momentów zginających na wartość współczynnika C

można uzyskać smukłość graniczną λ_{lim} różniącą się niemal czterokrotnie ($2,7/0,7 = 3,85$). Przykładową zależność pomiędzy smukłością graniczną λ_{lim} i względną siłą osiową n w przypadku trzech różnych rozkładów momentów zginających (współczynniki $C = 0,7; 1,7; 2,7$), przy założonych domyślnych wartościach współczynników $A = 0,7$ i $B = 1,1$, przedstawia rysunek 2. Widać na nim, że nawet przy bardzo silnie obciążonych słupach ($n = 1,0$), przy rozkładzie momentów odpowiadającym współczynnikowi $C = 2,7$, smukłość graniczna przekracza 40.



Rys. 2. Zależność pomiędzy względną siłą osiową n i smukłością graniczną λ_{lim} (opis w tekście)

We wszystkich elementach nieusztynionych oraz usztynionych, w których dominujący wpływ na powstanie momentów I rzędu mają obciążenia poprzeczne lub imperfekcje, Eurokod 2 [1] zaleca przyjmowanie $C = 0,7$.

Wpływ intensywności zbrojenia ω na smukłość graniczną λ_{lim} nie jest tak duży, jak wpływ rozkładu momentów. Najlepiej ilustruje to prosty przykład. W przypadku zbrojenia ze stali o granicy plastyczności $f_{yk} = 500$ MPa, domyślna wartość $B = 1,1$ odpowiada intensywności zbrojenia $\omega = 0,105$, uzyskiwanej dla stopnia zbrojenia ρ wynoszącego od ok. 0,6% dla betonu klasy