

mgr inż. Tomasz Stachoń¹⁾

Wpływ lokalizacji przyłożonego obciążenia na rozkład sił wewnętrznych w belce żelbetowej ze wspornikami krawędziowymi i o zredukowanej wysokości strefy przypodporowej

The influence of location of the applied load on the distribution of internal forces in reinforced concrete beam with cantilever brakes and reduced support zone

DOI: 10.15199/33.2015.10.27

(Oryginalny artykuł naukowy)

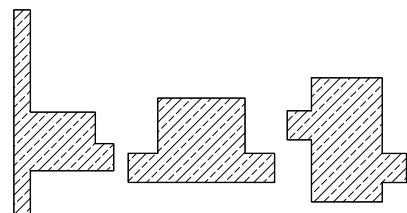
Streszczenie. W belkach żelbetowych o złożonym kształcie przekroju poprzecznego zaobserwowano, że miejsce przyłożenia obciążenia ma wpływ na rozkład naprężeń w elemencie, a w szczególności w strefie przypodporowej. Potwierdzają to przeprowadzone analizy numeryczne i laboratoryjne badania elementów w skali naturalnej. Wykazano również przestrzenny charakter pracy konstrukcji i jej wpływ na rozkład naprężeń wewnętrznych.

Słowa kluczowe: belki wspornikowe, strefa przypodporowa, obciążenia.

Abstract. In reinforced concrete beams with complex cross-sectional shapes, it was observed that the location of load affects the distribution of stresses in the element and in particular support zone. This is confirmed numerical analysis and laboratory testing of elements in the natural scale. It was also shown the spatial nature of the work of construction and its impact on the distribution of internal stress.

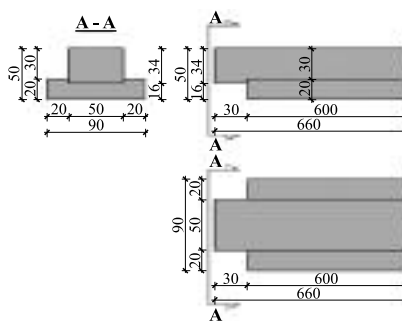
Keywords: cantilever beams, support zones, loads.

Belka żelbetowa jest jednym z elementów konstrukcji, którego przekrój poprzeczny często poddaje się modyfikacjom. Rysunek 1 przedstawia wybrane przekroje belek żelbetowych stosowanych w budownictwie. Rozwiązania te pozwalają uzyskać kompromis między wymaganiami konstrukcyjnymi i walorami estetyczno-użytkowymi konstrukcji. Taki efekt osiągnięto w przypadku belki żelbetowej przedstawionej na rysunku 2. Przez zastosowanie wsporników na końcach belki, w miejscu oparcia na słupach oraz wzdłuż osi elementu, przy jego dolnej krawędzi, znacznie



Rys. 1. Przykładowe przekroje belek żelbetowych stosowane w budownictwie

Fig. 1. Examples of cross-sections of reinforced concrete beams used in construction



Rys. 2. Kształt belki poddanej analizie numerycznej i badaniom laboratoryjnym

Fig. 2. The shape of the beam subjected to numerical analysis and laboratory testing

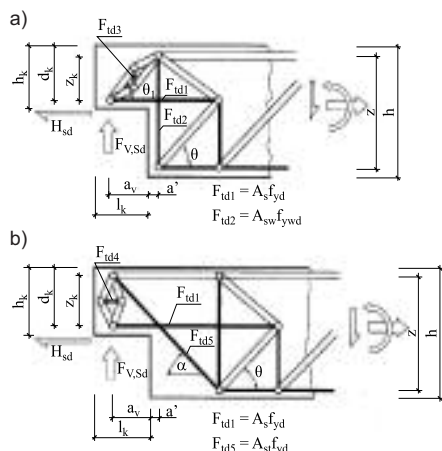
zmniejszono grubość stropu. Takie rozwiązanie skutkuje jednak bardzo złożonym rozkładem naprężeń wewnątrz elementu, zwłaszcza w strefach przypodporowych. Dostępna literatura [1 – 5] podaje wiele sposobów wymiarowania poszczególnych typów konstrukcji (wsporniki w miejscach podparcia belek żelbetowych czy biegnące wzdłuż ich osi), jednak trudno doszukać się opracowań ujmujących problem całościowo. Zazwyczaj są to metody uproszczone, mające na celu szybkie i efektywne projektowanie typowych elementów konstrukcyjnych. W artykule, na podstawie elementu

zaprezentowanego na rysunku 2, przedstawiono normowy sposób wymiarowania wsporników belek żelbetowych oraz porównano z wynikami analiz numerycznych i badań laboratoryjnych.

Projektowanie zgodnie z Eurokodem 2 [2] i PN-B 03264:2002 [1]

Zarówno PN 06234:2002 [1], jak i Eurokod 2 [2] podają dwa schematy kratownicowe do wymiarowania belek z podcięciem (rysunki 3a i b). Jeden schemat zakładał zastosowanie zbrojenia ortogonalnego do przeniesienia sił wewnętrznych (rysunek 3a), natomiast w drugim kluczową rolę odgrywały pręty ukośne (rysunek 3b). Poza schematami zaprezentowanymi na rysunku 3, obie normy podają wiele warunków konstrukcyjnych, które należy spełnić, aby wsporniki były prawidłowo zaprojektowane. Dopuszczają też równoczesne stosowanie obu proponowanych schematów, zakładając, że każdy z nich przenosi połowę przyłożonego obciążenia. Punktem wyjścia do projektowania na podstawie obu schematów jest wyznaczenie wartości reakcji podporowych H_{sd} i $F_{V, sd}$, a następnie obliczenie powierzchni zbrojenia po-

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego;
e-mail: tomasz.stachon@pwr.edu.pl



Rys. 3. Schematy kratownicowe wg [1, 2]
Fig. 3. Schemes of trusses by [1, 2]

szczególnych elementów schematu kratownicowego. Podejście zaprezentowane w obu normach nie uwzględnia jednak miejsca i sposobu przyłożenia obciążenia, przez co nie ujmuje przestrzennego charakteru pracy elementu.

Analiza numeryczna płaskiego modelu kratownicy zastępczej wspornika żelbetowego

Analizie poddano modele kratownicowe proponowane w normach [1, 2]. Zmodyfikowano układ podpór, a obciążenie przyłożono do wybranych węzłów. Przyjęto dwa warianty obciążenia, z których jeden zakładał przyłożenie sił do górnych węzłów kratownicy, co miało odpowiadać obciążeniu belki na jej górnej powierzchni, a drugi przewidywał obciążenie węzłów dolnych, odwzorowując działanie sił w dolnej strefie belki. Oba warianty zastosowano w dwóch proponowanych przez normy schematach kratownicy zastępczej. W każdym przypadku sumaryczna wartość sił skupionych wynosiła 100 kN. Analizowane schematy statyczne wraz z otrzymanymi wartościami sił osiowych przedstawiono na rysunkach 4 i 5.

Wyniki wyraźnie wskazują na rozbieżności w siłach osiowych prętów pionowych obu schematów, odzwierciedlających strzemiąta pionowe w rzeczywistej konstrukcji. W celu dokładniejszego zbadania zjawiska przeprowadzono analizy numeryczne trójwymiarowego modelu belki.

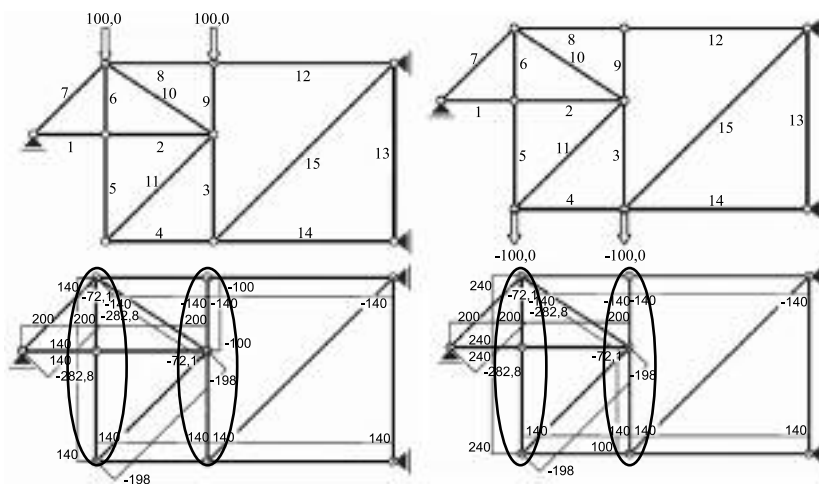
Analiza numeryczna trójwymiarowego modelu belki żelbetowej

Przeprowadzenie analizy numerycznej belki miało na celu określenie rozkładu naprężeń w elemencie, w zależności od miej-

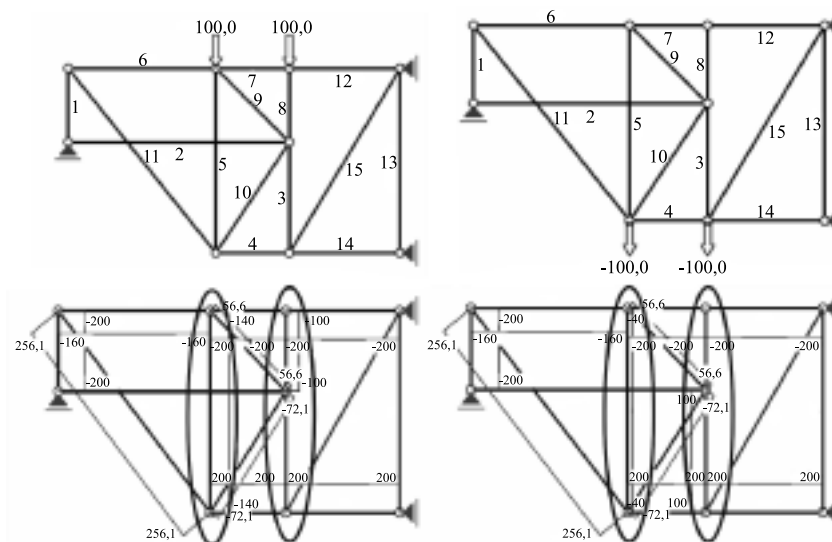
sca i sposobu przyłożenia obciążenia. Przyjęto cztery schematy obciążenia (rysunek 6 a-d) realizowane w dwóch wariantach. Pierwszy wariant przewidywał przyłożenie obciążenia równomiernie rozłożonego o określonej wartości do górnej powierzchni elementu, natomiast drugi wariant obciążenie określonej powierzchni dwóch wsporników zlokalizowanych po bokach belki. Sumaryczna wartość obciążenia we wszystkich schematach była jednakowa. W każdym przypadku zaobserwowano różnice w rozkładzie i wartościach naprężeń, ale największe rozbieżności uzyskano w trzecim schemacie obciążenia. Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono rozkład naprężeń w wybranych przekrojach belki. Wyniki otrzymane w analizie 3D potwierdzają spostrzeżenia uzyskane w przypadku schematów kratownicowych, ukazując jednocześnie przestrzenny charakter pracy ustroju.

Badania laboratoryjne elementów w skali naturalnej

W celu potwierdzenia spostrzeżeń uzyskanych w analizach numerycznych opracowano program badań laboratoryjnych, w którym przygotowano trzy belki żelbetowe w naturalnej skali. Na etapie montażu zbrojenia, w wybranych wspornikach wprowadzono niewielkie modyfikacje dotyczące liczby i rozstawu strzemion pionowych oraz prętów poziomych łączących wsporniki krańcowe. Pozwoliło to uzyskać dodatkowe informacje o rozkładzie naprężeń w strefie przypodporowej. Badania realizowano w dwóch wariantach, z których pierwszy przewidywał obciążanie belki przez boczne wsporniki. Wariant drugi to obciążanie belki przez górną powierzchnię środnika. W obu przypadkach testowano zarówno wsporniki wzmocnione dodatkowym zbrojeniem

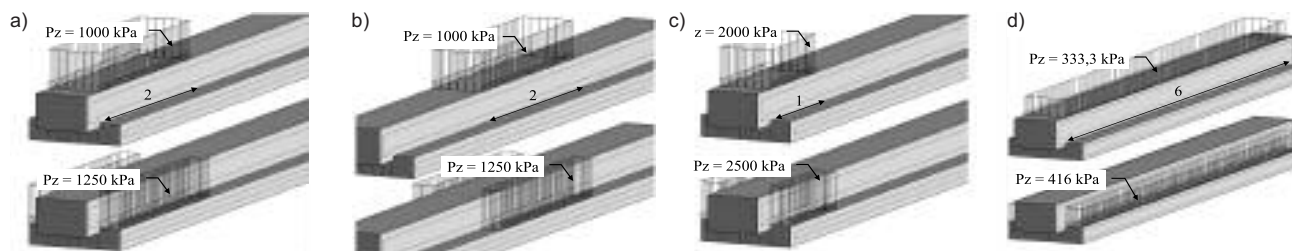


Rys. 4. Wyniki analizy statycznej pierwszego schematu kratowniczowego
Fig. 4. The results of a static analysis of the first scheme of truss



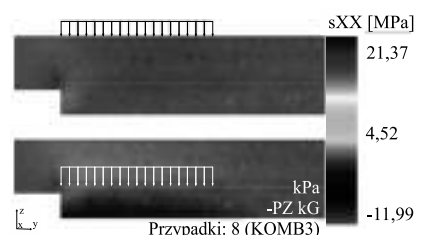
Rys. 5. Wyniki analizy statycznej drugiego schematu kratowniczowego
Fig. 5. The results of a static analysis of the second scheme of truss

70 lat Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego



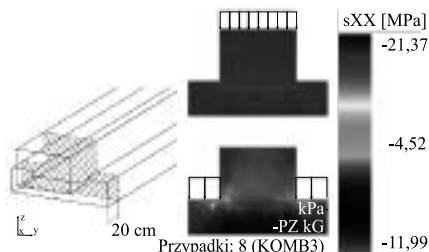
Rys. 6. Schematy obciążenia: a – nr 1; b – nr 2; c – nr 3; d – nr 4

Fig. 6. Load scheme: a – no. 1; b – no. 2; c – no. 3; d – no. 4



Rys. 7. Mapy naprężeń w kierunku X w przypadku przekroju środkowego (schemat obciążenia nr 3)

Fig. 7. Maps stresses in the X direction for the central section – the third case load

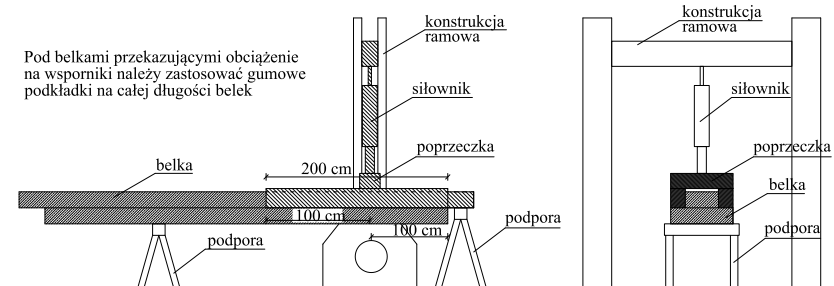


Rys. 8. Mapy naprężeń w kierunku X w przypadku przekroju poprzecznego (schemat obciążenia nr 3) oraz lokalizacja przekroju w elemencie

Fig. 8. Maps stresses in the X direction to the cross-section and its location – the third case load

(seria A), jak i niewzmocniane (seria B). Stanowisko składało się z ramy trwale związanej z podłożem, do której zamontowany był hydrauliczny siłownik (rysunek 9).

W celu zapewnienia równomiernego rozkładu obciążenia i uniknięcia lokalnych przeciążeń wywołanych imperfekcjami powierzchni betonu pod poprzeczkami zastosowano gumowe podkładki o długości 200 cm, przez które obciążenie było przekazywane na betonowy element.



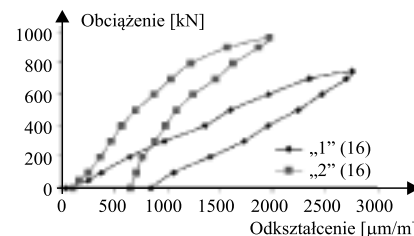
Rys. 9. Schemat stanowiska do badania wsporników belek żelbetonowych

Fig. 9. The scheme of the reinforced concrete beams brackets test stand

zywane na betonowy element. Podczas badania rejestrowano odkształcenia betonu na powierzchni elementów oraz stali zbrojeniowej w ok. 20 punktach strefy przypodporowej. Porównanie wyników uzyskanych dla obu wariantów obciążenia wykazało zwiększone wartości odkształceń w strzemiach pionowych w przypadku belek obciążanych przez wsporniki krawędziowe w stosunku do odkształceń zarejestrowanych w elementach obciążanych przez górną powierzchnię środkową. Zaobserwowano również, że największe różnice odkształceń występują w strzemiach zlokalizowanych tuż przy krawędzi podcięcia wspornika belkowego i zanikają w miarę oddalania się od niej. W odległości równej wysokości przekroju belki odkształcenia obu wariantów obciążenia ulegają wyrównaniu. Rysunek 10 przedstawia wykres odkształceń strzemięcia zlokalizowanego przy krawędzi podcięcia wspornika dla obu wariantów obciążenia. W przypadku schematu nr 1 belka obciążona była przez wsporniki krawędziowe zlokalizowane symetrycznie przy dolnej powierzchni elementu, natomiast nr 2 – obciążenie realizowano przez górną powierzchnię środkową.

Uwagi i wnioski

Zaprezentowane wyniki badań jednoznacznie wskazują, że lokalizacja miejsca przyłożenia obciążenia ma znaczny wpływ na rozkład naprężeń wewnątrz elementu żelbetonowego. Jest to szczególnie widoczne w strefach przypodporowych, w których występuje zwiększona koncentracja obciążenia. Zaobserwowano, że w obiektach obciążonych



Rys. 10. Odkształcenia tensometrów nr 16 na stali zbrojeniowej w belkach obciążonych wg schematu nr 1

Fig. 10. Deformation strain gauges No. 16 on steel reinforcement in the beams under No. 1 load scheme

żonych równomiernie na całej długości (czwarty schemat obciążenia na rysunku 6) wpływ lokalizacji obciążenia na siły wewnętrzne w belce jest zauważalny, ale różnice w wartościach naprężeń są niewielkie. Badania laboratoryjne i modelowanie przestrzenne wykazały przestrzenny charakter pracy elementu, który powinien zostać uwzględniony w trakcie wymiarowania. Wskazane jest więc indywidualne podejście do wymiarowania belek żelbetonowych o nietypowych kształtach przekroju poprzecznego. Na uwagę zasługuje również sposób konstruowania szkieletu zbrojenia stref przypodporowych tego typu obiektów. Gęsta siatka prętów zbrojeniowych może stwarzać problemy związane z prawidłowym wypełnieniem i zagęszczeniem mieszanki betonowej oraz uzyskaniem wymaganej grubości otuliny. W związku z tym, w przypadku silnie obciążonych belek, należy rozważyć zastosowanie innych, bardziej bezpiecznych i skutecznych rozwiązań, które pozwolą na bezawaryjną pracę konstrukcji.

Literatura

- [1] PN-B 03264:2002, Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [2] Eurokod 2 – 1 (PN-EN 1992-1 – 1:2006): Projektowanie konstrukcji z betonu.
- [3] Nagrodzka-Godycka K. Wsporniki żelbetowe. Badania, teoria, projektowanie. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2001.
- [4] Starosolski W.: Konstrukcje żelbetowe wg PN-B-03264-2002 i Eurokodu 2 – Tom 1, PWN, Warszawa 2007.
- [5] Łapko A.: Projektowanie konstrukcji żelbetowych, Arkady, Warszawa 2000.

Przyjęto do druku: 25.08.2015 r.