

Wpływ sił wewnętrznych w słupie na naprężenia w dolnym narożu krótkiego wspornika żelbetowego

Influence of internal forces in the column on the stress at the bottom corner of the reinforced concrete corbel

mgr inż. Aleksandra Walczak (ORCID: 0000-0003-2317-0750), dr hab. inż. Tomasz Trapko – opiekun naukowy, prof. uczelni (ORCID: 0000-0002-6375-7145), Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Wrocławska

DOI: 10.5604/01.3001.0054.6379

Streszczenie: W niniejszym artykule analizowano krótki wspornik żelbetowy. Bazując na literaturowych mechanizmach zniszczenia, wyszczególniono mechanizm zmiężdżenia betonu w dolnym narożu ściskanym. W rozważaniach sprawdzono wpływ sił wewnętrznych w słupie na wartość naprężeń ściskających w dolnym narożu. Analizie poddano wsporniki w słupach żelbetowych jednonawowej, dwukondygnacyjnej hali, na których opierają się podciągry stanowiące podporę dla płyt stropu międzykondygnacyjnego. W wyniku obliczeń za pomocą oprogramowania IDEA StatiCa Detail oraz Robot Structural Analysis Professional wskazano na zmianę wartości naprężeń w narożu wspornika wynikającą z sił wewnętrznych w słupie. Znalezione przypadki graniczne, dla którego procedury analityczne, niewrażliwe na siły wewnętrzne w słupie, spełniały stany graniczne, jednak wyniki analizy wspomaganą komputerowo wykazały przekroczenie dopuszczalnych naprężeń w narożu ściskanym dla tego samego przypadku z uwzględnieniem sił wewnętrznych.

Słowa kluczowe: krótki wspornik żelbetowy, naprężenia, siły wewnętrzne w słupie.

Abstract: This article analyzes a short reinforced concrete corbel. Based on literature destruction mechanisms, the concrete crushing mechanism in the lower compression corner was specified. The considerations examined the influence of internal forces in the column on the value of compressive stresses in the lower corner. The analysis covered the brackets in the reinforced concrete columns of a single-nave, two-story hall, on which the beams supporting the inter-story ceiling slabs rest. As a result of calculations using IDEA StatiCa Detail and Robot Structural Analysis Professional software, a change in stress values in the corner of the cantilever resulting from internal forces in the column was indicated. An extreme case was found for which analytical procedures, insensitive to internal forces in the column, satisfied the limit states, but the results of the computer-aided analysis showed that the allowable stresses at the compression corner were exceeded for the same case including internal forces.

Keywords: reinforced concrete corbel, stresses, internal forces in column.

1. Wprowadzenie

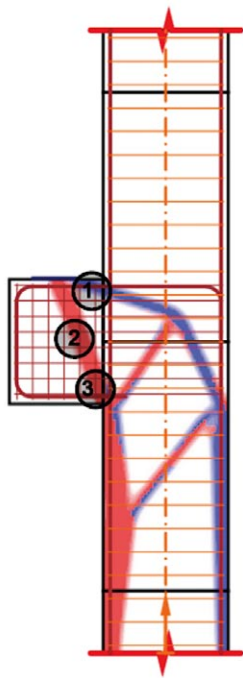
Krótkie wsporniki w efektywny sposób zapewniają przekazanie obciążeń z elementów, dla których stanowią oparcie, na słupy głównej konstrukcji nośnej. Znajdują szerokie zastosowanie w obiektach przemysłowych, budynkach użyteczności publicznej oraz konstrukcjach inżynierskich. Subtelne w porównaniu do elementów podpieranych i słupów, w których są utwierdzone, stanowią niezwykle odpowiedzialny element konstrukcji wsporczej. W niniejszym artykule przedstawiono wpływ sił wewnętrznych w słupie analizowanej ramy na wartość naprężeń w dolnym narożu krótkiego wspornika żelbetowego. Wykonano obliczenia analityczne bazujące na wytycznych normowych oraz z wykorzystaniem oprogramowania Robot Structural Analysis Professional i IDEA StatiCa Detail.

2. Charakterystyka krótkich wsporników

Żelbet będący materiałem kompozytowym niszczy się z uwagi na jeden z jego komponentów: stal lub beton. Optymalne projektowanie dąży do jednoczesnego wykorzystania nośności obu składowych. Na podstawie badań i obserwacji wyróżniono podstawowe mechanizmy zniszczenia krótkich wsporników. Newralgiczne obszary wspornika, odpowiedzialne za główne modele destrukcji, które są znaczące dla treści niniejszego artykułu przedstawiono na rysunku 1. Zgodnie z rysunkiem 1 wspornik może ulec zniszczeniu w wyniku: 1 – osiągnięcia granicy plastyczności przez zbrojenie główne; 2 – ukośnego rozłupania wspornika wzdłuż ściskanego krzyżulca betonowego; 3 – zmiężdżenia betonu w dolnym ściskanym narożu. Mechanizm nr 3 uwarunkowany jest osiągnięciem w dolnym narożu wspornika naprężeń przekraczających dopuszczalne.

Rys. 1. Mechanizmy zniszczenia krótkiego wspornika

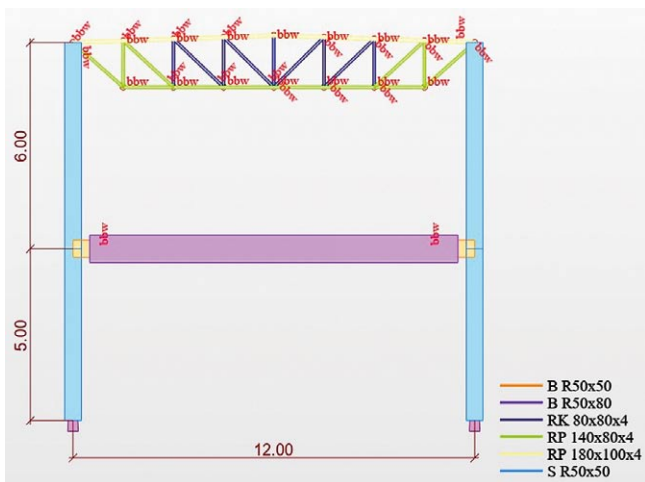
W tym miejscu, w analizach obliczeniowych, buduje się węzeł, dla którego limitowane naprężenia ściskające na jego krawędziach są równe obliczeniowej wytrzymałości betonu na ściskanie odpowiednio zmniejszonej z uwagi m.in. na zarysowanie [1], konsekwencje zniszczenia elementu [2].



3. Analiza przypadku – krótki wspornik żelbetowy w jednonawowej hali dwukondygnacyjnej

3.1. Konstrukcja hali

Analizie poddano dwukondygnacyjną, jednonawową halę. Osiowy rozstaw słupów hali wynosi 12,00 m. Ramy układów głównych w rozstawie 6,00 m. Słupy o wysokości 11,00 m i przekroju poprzecznym 0,50x0,50 m, wsporniki o przekroju poprzecznym 0,50x0,50 m z betonu klasy C30/37. Dźwigar kratowy ze stalowych profili prostokątnych i kwadratowych ze stali S355. W słupach przewidziano wsporniki na wysokości 5,00 m do oparcia belek prefabrykowanych. Belki oparte na wspornikach stanowią podciągi, na których spoczywają płyty sprężone HC o wysokości 0,20 m będące stropem międzykondygnacyjnym analizowanej hali. Podciągi sprężone o wymiarach przekroju poprzecznego 0,50x0,80 m. Słupy utwierdzone w fundamencie, podciągi oparte przegubowo na wspornikach, zaś dźwigar kratowy oparty przegubowo na słupach żelbetowych. Geometria schematu statycznego jest widoczna na rysunku 2.



Rys. 2. Geometria schematu statycznego analizowanej ramy

3.2. Analizowany przypadek

Analizie poddano wsporniki, na których opierają się podciągi prefabrykowane. Wspornik zwymiarowano metodami analitycznymi, korzystając z zaleceń normowych [1] i [2] oraz z wykorzystaniem oprogramowania IDEA StatiCa Detail. Wspornik obciążono siłą skupioną o wartości $G_k = 232,0$ kN, $\gamma_G = 1,35$, $Q_k = 148,5$ kN, $\gamma_Q = 1,50$. Zgodnie z zaleceniami [2] i [3] przyjęto w procesie wymiarowania siłę poziomą o wartości 20% siły pionowej działającej na wspornik. Zbrojenie główne wspornika z prętów $\varnothing 20$, strzemiona z prętów $\varnothing 8$, stal B500B. Zaprojektowano podkładkę o wysokości 10 mm i szerokości 200 mm przekazującą obciążenie na wspornik. Odległość osi przyłożenia obciążenia od lica słupa $a = 0,30$ m. Otulina $c_{nom} = 25$ mm.

3.3. Wymiarowanie krótkiego wspornika – metody analityczne

Obliczenia analityczne wykonano, bazując na wytycznych zawartych w [1] oraz [2]. Ilość zbrojenia wyznaczono wykorzystując warunki równowagi sił w modelu obliczeniowym. W celu wyznaczenia ramienia działania sił wewnętrznych dobrano rozmiary strefy węzłowej w narożu ściskanym wspornika determinowane przez dopuszczalne naprężenia. Wartości dopuszczalnych naprężeń zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Dopuszczalne naprężenia w dolnym narożu ściskanym wspornika

	A	B
	[2]	[1, 4]
σ_{max} [MPa]	17,0	18,8

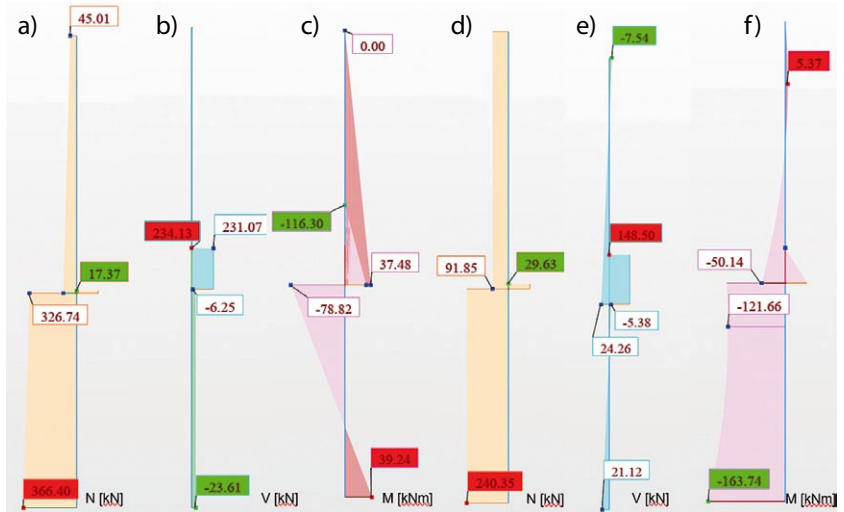
Dla metody ST (kolumna B w tabeli 1) dopuszczalne naprężenia w węźle wyznaczono dla węzła ściskanego bez zakotwionych w nim rozciąganych prętów. Obliczeniowa wytrzymałość betonu na ściskanie jest zmniejszana ze względu na zarysowanie betonu. Norma [2] (kolumna A w tabeli 1) redukuje obliczeniową wytrzymałość betonu na ściskanie ze względu na katastrofalne skutki po zniszczeniu wspornika (współczynnik a_{cc}). Siły w zbrojeniu głównym wyznaczone zgodnie z powyższymi podejściami obliczeniowymi zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Siły w zbrojeniu głównym na podstawie obliczeń analitycznych

	A	B
	[2]	[1, 4]
F_{Td} [kN]	465,7	460,6

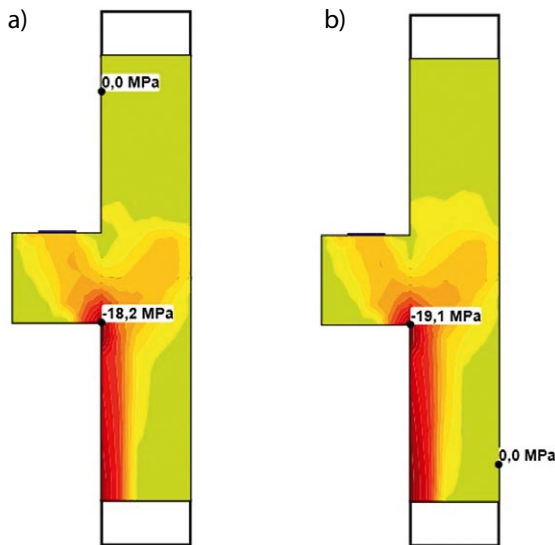
Zaprojektowano zbrojenie w ilości $4\varnothing 20$. Powyższe wyniki wskazują, że dopuszczalne naprężenia, a co za tym idzie rozmiar strefy węzłowej, mają niewielki wpływ na wartość siły w rozciąganych zbrojeniu głównym (różnica ok. 1%).

Rys. 3. Siły wewnętrzne w analizowanym słupie ze wspornikiem: a) obciążenia stałe, N [kN], b) obciążenia stałe, V [kN], c) obciążenia stałe, M [kNm], d) obciążenia zmienne, N [kN], e) obciążenia zmienne, V [kN], f) obciążenia zmienne, M [kNm]



3.4. Wpływ sił wewnętrznych w słupie na wartość naprężeń ściskających w narożu wspornika

W programie IDEA StatiCa Detail analizie poddano przypadek wspornika jednostronnego analizowanej ramy. Przypadek rozważono bez uwzględnienia sił wewnętrznych w słupie oraz ze zdefiniowanymi siłami. Siły wewnętrzne otrzymano z obliczeń statycznych ramy w programie Robot Structural Analysis Professional. Analizowano wspornik ze zbrojeniem głównym dobranym w procedurze analitycznej (punkt poprzedni niniejszego artykułu, zgodnie z [1]). Dopuszczalne naprężenia według [1]. Wynikiem istotnym dla niniejszego opracowania były otrzymane naprężenia w dolnym ściskanym narożu wspornika. Siły wewnętrzne w analizowanym słupie zaprezentowano na rysunku 3, natomiast mapę naprężeń dla analizowanego wspornika przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wartości naprężeń w analizowanym wsporniku ze słupem: a) bez zdefiniowanych sił wewnętrznych, b) ze zdefiniowanymi siłami wewnętrznymi

Dla przypadku z rysunku 4a (bez zdefiniowanych sił wewnętrznych) wartości naprężeń ściskających w dolnym narożu wspornika osiągają wartość $-18,2$ MPa. Należy zauważyć, że ich wartość jest mniejsza od dopuszczalnej zgodnie z [1], co zostało zawarte w tabeli 1. Dla kontrastu zdefiniowano przypadek z rysunku 4b, w którym zamodelowano siły wewnętrzne słupa ramy. Wynik analizy przypadku (b) wskazał na naprężenia

w dolnym narożu na poziomie $-19,1$ MPa, co jest wartością przekraczającą dopuszczalne naprężenia [1]. Procedury analityczne są niewrażliwe na wartości sił w słupie i zgodnie z procedurami obliczeniowymi stany graniczne są spełnione. Wynioskować można, że wspornik jednostronny jest podatny na wpływ sił wewnętrznych w słupie. Warto zaakcentować, że podobne wnioski wyciągnęli ze swoich badań Franz i Nieldenhoff [5]. Należy podkreślić, że procedury obliczeniowe normowe [1] i [2] opierają wymiarowanie zbrojenia głównego wspornika na rozmiarze węzła w narożu ściskanym, przy założeniu maksymalnych dopuszczalnych naprężeń ściskających. Jak prezentowano powyżej (punkt 3.3.), siła w zbrojeniu głównym nie jest szczególnie wrażliwa na wartości naprężeń ściskających (rozmiar węzła). Wyniki analityczne są niezależne od układu sił wewnętrznych w słupie. Na podstawie powyższej analizy widać, że układ sił wewnętrznych w słupie jest znaczący dla wartości naprężeń w narożu.

4. Podsumowanie

Prezentowane analizy pokazały, że krótkie wsporniki słupów są wrażliwe na siły wewnętrzne występujące w słupie w aspekcie zmiany naprężeń w dolnym ściskanym narożu wspornika. Omówiono wybrany przykład, jednak należy mieć na względzie, że różnice będą zależne od układu i wartości sił wewnętrznych, a także schematu statycznego i stosunku obciążenia wspornika do układu sił wewnętrznych. Problem jest o tyle istotny, że analizowane miejsce jest niewrażliwe w krótkim wsporniku, jak wskazano we wstępie.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu- Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [2] PN-B-03264:2002: Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [3] ACI 318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete
- [4] Urban T., Przykłady projektowania żelbetowych wsporników, Zeszyt 2, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2012
- [5] Nagrodzka-Godycka K., Wsporniki żelbetowe: badania, teoria, projektowanie., Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2001