

Jarosław MALESZA\*  
Politechnika Białostocka

## ZAKOTWIENIE ZBROJENIA W WĘZŁE RAMY, BADANIA DOŚWIADCZALNE I ANALIZA NUMERYCZNA

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wybrane rezultaty badań eksperymentalnych zewnętrznego węzła ramy ze sztywnym ryglem i wiotkim słupem. Przeprowadzono także analizę numeryczną. Badania doświadczalne i analityczne zrealizowano dla tradycyjnego sposobu kotwienia prętów zbrojeniowych rygli w słupach ram. Analizowano rozkłady naprężeń w prętach zbrojeniowych rygla zakotwionych w słupie, zarysowanie betonu oraz nośność elementów.

## BEAM REINFORCEMENT ANCHORAGE IN THE FRAME JOINT, EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS AND NUMERICAL ANALYSIS

**Summary.** The paper presents selected results of experimental tests and numerical analysis of reinforced concrete frame external joints. Experimental and analytical investigations were conducted for joints with typically developed and anchored in columns beam reinforcing bars. Distribution of stresses along the anchoring length of bars pattern of cracking and bearing capacity were traced and analysed.

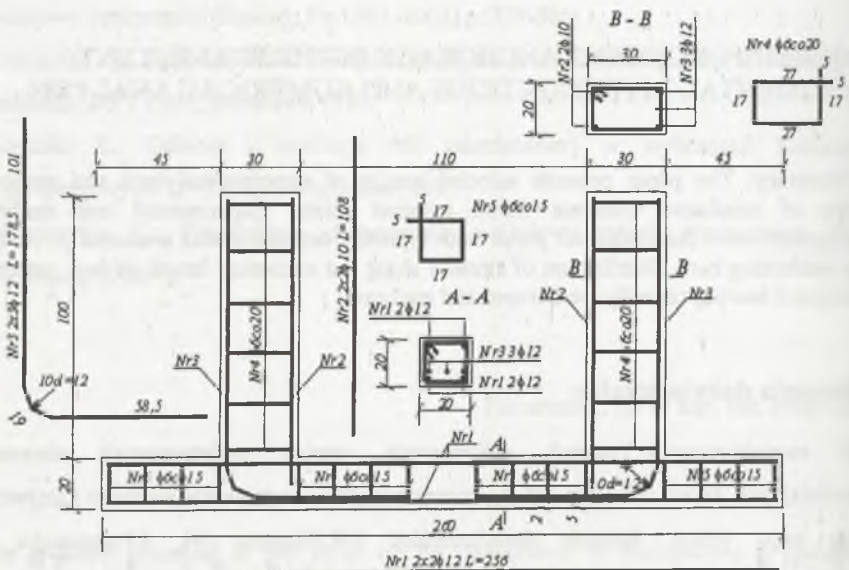
### 1. Badania doświadczalne

W monolitycznych ramach żelbetowych, oprócz podstawowych elementów konstrukcyjnych, takich jak rygle i słupy, istotny wpływ na zachowanie nośności i sztywności układu mają węzły. Badania doświadczalne I.H.Nilssona [4], J.Pędziwiatra [5], A.Czkwianianca i M.Kamińskiej [3] pokazały, że zarówno wymiary zewnętrzne, jak i układ zbrojenia rygli kotwione w węzłach ram wywołują złożony stan naprężeń i wpływają na nośność i pracę statyczną całej konstrukcji. Jednocześnie z badaniami doświadczalnymi poszukuje się rozwiązań analitycznych. S.J.Hwang i H.J.Lee [1] zaproponowali teorię „struts and ties” opartą na modelu kratownicowy żelbetu, M.Johanssona [2] i inni prowadzili analizy z zastosowaniem metody elementów skończonych.

\*Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Mikołaj Syczewski.

### 1.1. Elementy badawcze

Elementy badawcze zaprojektowano na podstawie analiz statycznych rzeczywistych płaskich układów ramowych. Przeanalizowano dwa układy ramowe: jednonawowy trójkondygnacyjny i trójnawowy trójkondygnacyjny jako konstrukcje nośne budynków przemysłowych. Na podstawie analizy układów sprężystych ustalono, że stosunek momentu przywęzłowego w słupie do momentu przywęzłowego w ryglu w węzłach zewnętrznych wynosi 0,4 - 0,6. Zakotwienie prętów zbrojeniowych rygla ukształtowano w postaci łuku kołowego o promieniu  $10\phi$  i odcinka prostego o długości  $40\phi$  poniżej dolnej krawędzi rygla. Elementy badawcze zróżnicowano pod względem sztywności słupów, zmieniając przekroje poprzeczne betonu i zbrojenia. W elemencie o mniejszej sztywności, przedstawionym na rysunku 1, przyjęto słup  $20 \times 20$  cm zbrojony symetrycznie  $4\phi 12$ . W elemencie o większej sztywności zaprojektowano słup o przekroju  $20 \times 27$  cm i zbrojeniu  $6\phi 18$ . Rygle miały przekrój  $20 \times 30$  cm i zbrojenie  $3\phi 12$  górą.



Rys. 1. Element badawczy o mniejszej sztywności  
Fig. 1. Geometrical and reinforcement details of specimen

Na podstawie zbadanych charakterystyk wytrzymałościowych betonu (B25) i stali (AIII) oraz wymiarów elementów obliczono nośności charakterystyczne zginanych przekrojów przywęzłowych słupa i rygla oraz wartości momentów rysujących, które zamieszczono w tabelcy 1.

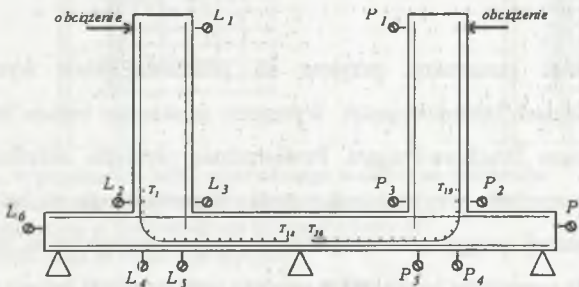
Tablica 1

Nośności charakterystyczne i momenty rysujące belek i słupów  
elementów badawczych

Element	Przekrój		Nośność $M_{Rd}$ [kNm]		Moment rysujący $M_{cr}$ [kNm]	
	Rygiel	Słup	Rygiel	Słup	Rygiel	Słup
B 1			44,07	23,13	7,80	3,66
B 2			44,07	87,75	7,80	6,32

## 1.2. Stanowisko i przebieg badań laboratoryjnych

Stanowisko do badań doświadczalnych skonstruowano na stendzie badawczym znajdującym się w Laboratorium Katedry Konstrukcji Betonowych i Murowych Politechniki Białostockiej. Do budowy stanowiska wykorzystano zewnętrzną ścianę stendu, która stanowi zamkniętą ramę stalową z kształtowników HEB 500. Rygiel dolny oraz słupy stendu stanowiły podstawowe elementy stanowiska, na których zamontowano podpory badanych elementów, poduszki do montażu siłowników hydraulicznych oraz przyrządy pomiarowe, zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 2. W badanych elementach mierzono tensometrami elektrooporowymi odkształcenia stali zbrojeniowej w punktach  $T_1 + T_{36}$ , ugięcia belek ( $L_1, P_1$ ), a pionowe przemieszczenia węzłów w punktach  $L_4, L_5, P_4, P_5$  czujnikami indukcyjnymi. Poziome przemieszczenia elementu badawczego mierzono w punktach  $L_2,$



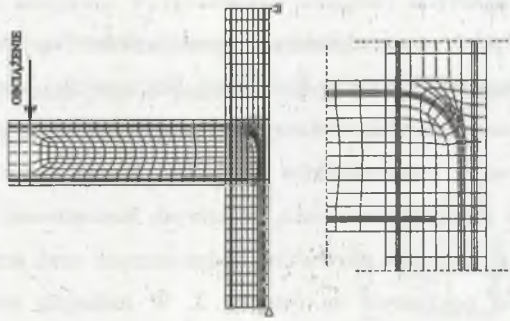
Rys. 2. Schemat obciążenia i miejsca pomiaru odkształceń i przemieszczeń badanych elementów  
Fig. 2. Diagram of loading and strains and displacements measure points

$L_3, L_6, P_2, P_3, P_6$  przy wykorzystaniu czujników zegarowych o dokładności pomiarów 0,01 mm. Na podstawie pomierzonych przemieszczeń określono obroty węzłów.

Tensometry indukcyjne i elektrooporowe oraz siłowniki sprzęgnięto z komputerowym systemem do akwizycji danych. Prowadzono także inwentaryzację stanu zarysowania.

## 2. Analiza numeryczna zewnętrznego węzła ramy

Analizę numeryczną zewnętrznego węzła ramy przeprowadzono metodą elementów skończonych z wykorzystaniem komputerowego programu MES DIANA. Siatkę węzłów pokazaną na rysunku 3 generowano automatycznie po zdefiniowaniu węzłów makroelementów. Elementy siatki budowano, zachowując regularność o stosunku długości boków nie przekraczającym 3. Siatkę zagęszczono w obszarze połączenia rygla ze słupem przy modelowaniu krzywizny prętów. Pręty zbrojenia opisano dwuwęzłowymi elementami belkowymi połączonymi z czterowęzłowymi elementami interfejsowymi modelującymi przyczepność betonu do zbrojenia.



Rys. 3. Schemat dyskretyzacji węzła zewnętrznego ramy

Fig. 3. Discretization of analysed exterior beam-column joint and detail at the bend-down bars

### 2.1. Model betonu

Parametry betonu konstrukcji przyjęto na podstawie cech wytrzymałościowych określonych w badaniach laboratoryjnych. Wyężenie ściskanego betonu opisano sprężysto-plastycznym modelem Druckera-Pragera. Powierzchnię płynięcia określano na podstawie aktualnego stanu naprężeń, przyjmując kąt tarcia wewnętrznego w betonie równy  $35^{\circ}$ . W analizie numerycznej przyjęto, że zarysowanie betonu następowało w momencie, gdy maksymalne główne naprężenia rozciągające osiągają wytrzymałość betonu na rozciąganie.

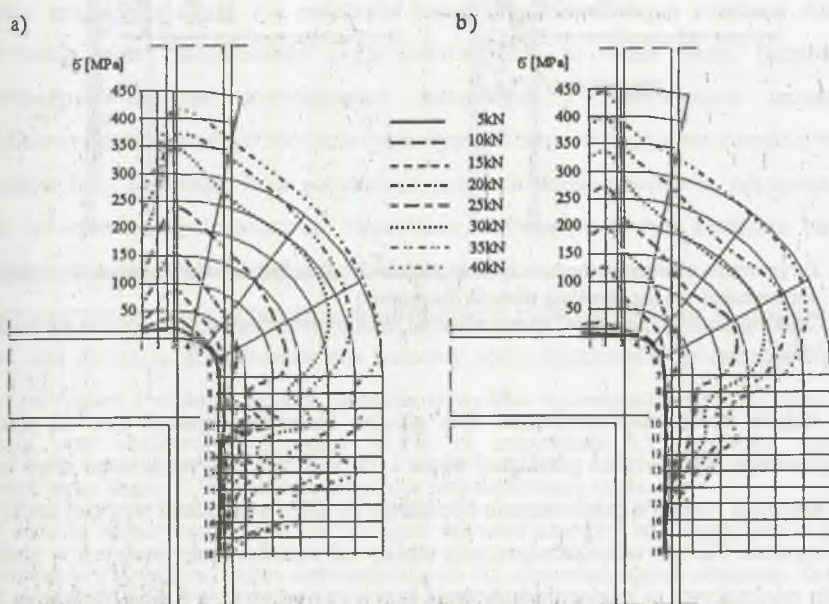
### 2.2. Model stali zbrojeniowej

Odształcenia stali zbrojeniowej uwzględniono w modelu numerycznym, przyjmując kryterium plastyczne Missesa z obszarem płynięcia i izotropowymi odształceniami umocnienia. Pręty zbrojenia modelowano, przyjmując niezależne elementy belkowe złożone z elementami interfejsowymi opisującymi zależność poślizgu i naprężeń przyczepności

między zbrojeniem i otaczającym betonem. W modelu numerycznym przyjęto następujące charakterystyki mechaniczne stali zbrojeniowej: moduł sprężystości Younga  $E_s=200000$  MPa, granicę plastyczności  $f_{yk}=445$  MPa, wytrzymałość na rozciąganie  $f_{tk}=660$  MPa, odkształcenia przy umocnieniu 2,5% i maksymalne odkształcenia wynoszące 10%.

### 3. Rozkład naprężeń w zbrojeniu rygla zakotwionym w węźle ramy

Normalne naprężenia rozciągające w prętach zbrojenia uzyskane na podstawie badań doświadczalnych przedstawiono na rysunku 4a.



Rys. 4. Naprężenia w przekrojach pręta zakotwionego w ścipie na podstawie:

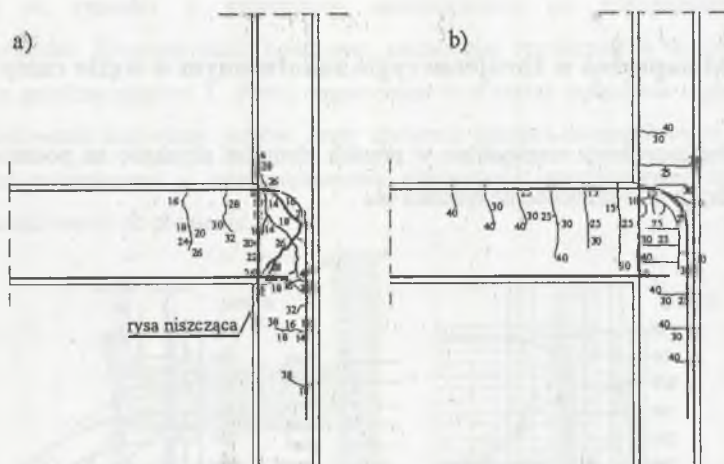
a) badań doświadczalnych, b) analizy numerycznej

Fig. 4. Stresses distribution in the bent-down bar on the basis of:

a) experimental tests b) numerical analysis

Przed powstaniem rys największe naprężenia rozciągające w prętach zbrojeniowych wystąpiły w przekrojach przywęzłowych rygla i ścipa (odpowiednio przekroje 3 i 10). Na podstawie pomiarów tensometrycznych naprężenia wynosiły odpowiednio  $\sigma_3=18$  MPa i  $\sigma_{10}=12$  MPa. Moment, przy którym powstała rysa w przekroju rygla, wyniósł  $M_{cr} = 8$  kNm, a w przekroju ścipa  $M_{cr} = 10$  kNm. W zarysowanych przekrojach nastąpił lokalny wzrost naprężeń rozciągających w pręcie zbrojeniowym. Dla obciążenia wspornika siłą 15 kN naprężenia w punktach 3 i 10 wynosiły  $\sigma_3=92$  MPa i  $\sigma_{10}=58$  MPa. Dla tego samego

obciążenia najmniejsze naprężenia w niezarysowanym przekroju węzła wyniosły  $\sigma_7=7$  MPa. Zwiększenie obciążenia spowodowało powstanie kolejnych rys z jednoczesnym zwiększeniem rozwartości istniejących. Inwentaryzację zarysowania badanego elementu pokazano na rysunku 5a.



Rys. 5. Zarysowanie elementów badawczych na podstawie: a) badań doświadczalnych, b) analizy numerycznej (cyfry określają wartość obciążenia)

Fig. 5. Cracking pattern obtained in: a) experimental tests, b) numerical analysis (digits are loading value)

W trakcie badań zaobserwowano dwa główne kierunki ekspansji rys: od przekroju przywęzłowego rygla wzdłuż przekątnej węzła i od przekroju przywęzłowego słupa wzdłuż dolnej krawędzi rygla. Po przekroczeniu obciążenia 10 kN wzrósł udział wygiętej części pręta w zakotwieniu. Na tym odcinku naprężenia malały od wartości maksymalnych w punkcie 3 pręta do minimalnych w miejscu zakończenia krzywizny w punkcie 8. Dla obciążenia 25 kN różnica naprężeń wyniosła około 200 MPa. Prostoliniowy odcinek pręta zakotwiono w słupie równoległe do zbrojenia głównego. Na tym odcinku pręta wykres naprężeń był mocno zróżnicowany. Największe naprężenia notowano w miejscu maksymalnego momentu zginającego słup. W kolejnych zarysowanych przekrojach słupa w punktach 10 i 13 naprężenia w zbrojeniu były większe niż w punktach pomiędzy rysami (11 i 15). Dla obciążenia 25 kN naprężenia wynosiły  $\sigma_{10}=120$  MPa,  $\sigma_{13}=52$  MPa i  $\sigma_{11}=42$  MPa,  $\sigma_{15}=22$  MPa.

Na rysunkach 4b i 5b przedstawiono wyniki analizy numerycznej. Podobnie jak w badaniach eksperymentalnych zaobserwowano największe naprężenia w prętach w tych samych przekrojach rygla i słupa. Dla obciążenia 25 kN naprężenia wynosiły  $\sigma_3=228$  MPa,

$\sigma_8=53$  MPa i  $\sigma_{10}=50$  MPa. Rozkłady naprężeń na zakrzywionej części pręta miały podobny przebieg do uzyskanych w badaniach eksperymentalnych. Na prostoliniowym odcinku zakotwionego pręta naprężenia malały jednostajnie od wartości maksymalnych w punkcie 10 do 0 w punkcie 16.

#### 4. Podsumowanie

Przedstawiony w pracy przypadek dotyczy zewnętrznego węzła ramy, w którym były połączone wiotki słup i sztywny rygiel. Sztywność obu elementów konstrukcji ma wpływ na charakter zniszczenia węzła. Na podstawie badań eksperymentalnych uzyskano dokładny obraz pracy pręta zbrojonego rygiela zakotwionego w węźle ramy. Bezpośrednio w przenoszeniu naprężeń rozciągających związanych z zakotwieniem uczestniczył prostoliniowy odcinek górnego zbrojenia rygiela wprowadzony do słupa wraz z częścią wygiętą w kształcie łuku kołowego. Rola pozostałego prostoliniowego odcinka w zakotwieniu nie mogła być określona jednoznacznie. Naprężenia rozciągające w tym zbrojeniu powstały w efekcie kotwienia zbrojenia rygiela i zginania słupa.

Pierwsza rysa powstała w przekroju przywęzłowym rygiela rozwijała się w obszarze węzła wzdłuż linii zbrojenia. Kształtowała ona końcowy obraz zniszczenia. Zniszczenie węzła ze sztywnym ryglem i wiotkim słupem nastąpiło w wyniku wyczerpania nośności słupa, które powstało przy obciążeniu wspornika 42 kN, co odpowiada 0,93 nośności przekroju przywęzłowego słupa i 0,95 nośności przekroju przywęzłowego rygiela.

W analizie numerycznej uzyskano mniejsze wartości naprężeń rozciągających w prętach w porównaniu z wynikami badań doświadczalnych dla odpowiadających obciążeń. Rozkłady naprężeń miały bardziej równomierny charakter, a zarysowanie nie wywoływało lokalnego zwiększenia ich wartości. Największe naprężenia powstały w miejscach maksymalnych momentów zginających. Można przyjąć, że analiza numeryczna dobrze opisała rzeczywisty charakter pracy zewnętrznego węzła ramy żelbetowej.

#### LITERATURA

1. Hwang S.J., Lee H. J.: Analytical model for predicting shear strength of exterior reinforced concrete beam-column joints for seismic resistance. ACI Structural Journal Vol.96, No.5, 1998.

2. Johansson M.: Nonlinear finite element analyses of concrete frame corners. *Journal of Structural Engineering*, Vol.126, No. 2, 2000.
3. Kamińska M., Czekwianiec A.: Redystrybucja sił wewnętrznych w żelbetowych ramach o węzłach przesuwnych – badania doświadczalne. XXXIX Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1993.
4. Nilsson I.H.E.: Reinforced concrete corners and joints subjected to bending moment. Document No D7, Stockholm 1973.
5. Pędziwiatr J.: Analiza procesów zachodzących podczas obciążenia zarysowanych elementów żelbetowych. XL Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1994.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Leonard Runkiewicz

#### Abstract

Paper presents selected test results of frame exterior joint, where the rigid beam is connected with flexible column. The comparable stiffness of both elements strongly influences behaviour and failure of joint. Results of experimental test shows behaviour of beam reinforcing bars anchored in the frame joint. The straight part of bar developed into column and bent-down section of bar take part in transfer of tensile anchorage stresses. The first crack arises in the section of beam at column interface being then developed within joint along the reinforcing bars. That crack created the final failure pattern. The failure of joint connecting rigid beam and flexible column became in result of exhaust of bearing capacity under load of 42 kN, what corresponds to 0,95 of bearing capacity of beam and 0,93 of column bearing capacity. The numerical analysis indicates lower values of tensile stresses in the bars comparing to experimental test results. The highest values arise in the section of maximum adequately describes the real behaviour of the frame exterior joint.