

WPŁYW PARAMETRÓW MATERIAŁOWYCH NA PRACĘ WĘZŁA RAMY ŻELBETOWEJ

Jarosław MALESZA*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

Streszczenie: W pracy opisano zagadnienie wpływu cech wytrzymałościowych betonu na rozkład naprężeń w zewnętrznych węzłach ramy żelbetowej. Uzyskane rezultaty pokazują, iż odstępstwa od założeń projektowych mają niekorzystny wpływ na pracę statyczną konstrukcji, a w szczególności na obniżenie jej nośności granicznej.

Słowa kluczowe: węzeł ramy, wytyczenie przekrojów, stan zarysowania.

1. Wprowadzenie

Wymiarowanie konstrukcji żelbetowych oparte o wytyczne normowe skupia się na najbardziej wytyczonych przekrojach elementów. Informacje o miejscu i stopniu wytyczenia uzyskuje się w następstwie analizy statycznej sił wewnętrznych. W procedurach obliczeniowych często zastępuje się rzeczywistą konstrukcję schematem, w którym pręty łączy się w umownych węzłach. Taka analiza traktuje połączenia belek ze słupami w sposób uproszczony. Zakłada się, że węzły są punktami o dużej sztywności, pozostawiając ich wymiarowanie jedynie wytycznym konstrukcyjnym. Ze względu na złożony stan naprężeń w węzłach bardzo trudno jest ustalić jednoznaczne procedury obliczeniowe. Istnieje szereg publikacji (Kordina, 1997; Czkwianianc, 1999; Johansson, 2001; Bodzak i Czkwianianc, 2001), w których autorzy na podstawie badań eksperymentalnych poszukują optymalnych rozwiązań konstrukcyjnych upraszczających procesy projektowe. Gwarancja bezpiecznych rozwiązań przy minimalizacji skomplikowanych obliczeń jest często niemożliwym do osiągnięcia kompromisem. Dziś, gdy konieczne jest projektowanie ekonomiczne skłaniające projektantów do balansowania na granicy bezpieczeństwa, musimy mieć pewność, że przekroje, dla których brak schematów obliczeniowych nie stanowią najsłabszych punktów konstrukcji.

W pracy wykazano, że poprawnie skonstruowane zbrojenie w węzłach ramy nie jest jedynym czynnikiem wpływającym na jego pracę pod obciążeniem. Przedstawione badania własne autora pokazują, że połączenia belek ze słupami są miejscami wrażliwymi

na jakość zastosowanych materiałów i mogą decydować o nośności całego ustroju.

2. Badania doświadczalne

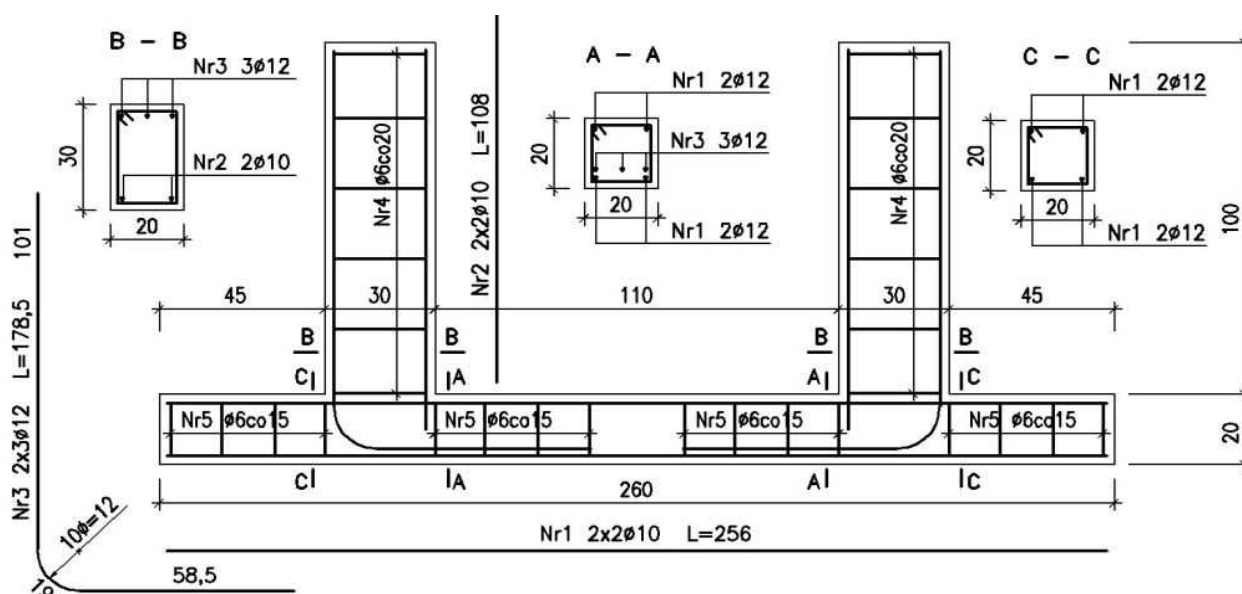
2.1. Element do badań

Do celów analizy przygotowano elementy do badań symulujące zachowanie zewnętrznego węzła ramy żelbetowej pod obciążeniem statycznym. Projekt elementów do badań opracowano na bazie analizy wielokondygnacyjnej konstrukcji ramowej. Na podstawie obliczeń statycznych ustrojów ramowego ustalono miejsca zerowe momentów zginających w prętach ramy zbiegających się w jednym węźle. Badany element, pokazany na rysunku 1, odwzorowywał fragmenty konstrukcji o długościach rygła i słupa odpowiadających odległościom od węzła do miejsc zerowych momentów. Sposób przyłożenia obciążenia gwarantował zachowanie proporcji momentu przywęzłowego w słupie do momentu przywęzłowego w ryglu równej 0,5, będącej wskaźnikiem charakterystycznym dla tego typu połączenia.

Wykonano dwa elementy badawcze oznaczone B1.1 i B1.2. W każdym elemencie połączono dwa rygle do wspólnego słupa, tak aby można było badać w jednym doświadczeniu jednocześnie dwa węzły. Powstała konstrukcja stanowiła ustrój statycznie niewyznaczalny, co pozwoliło na obserwację zjawiska redystrybucji sił wewnętrznych w procesie obciążania.

Przekroje poprzeczne elementów zwymiarowano na obciążenie skupione rygli równe 50 kN oraz parametry betonu odpowiadające według normy klasie C25/30. Przyjęto długość wsporników ryglowych równą 100 cm

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: j.malesza@kmb.pb.edu.pl



Rys. 1. Wymiary i układ zbrojenia elementu do badań

i przekrój poprzeczny o wymiarach 20×30 cm. Zbrojenie główne stanowiły 3 pręty o średnicy 12 mm, ze stali klasy 34GS, a zbrojenie montażowe 2 pręty $\phi 10$ mm. Całkowita długość słupa była równa 260 cm, a przekrój poprzeczny 20×20 cm. Zbrojenie przyjęto w postaci czterech prętów o średnicy 12 mm rozmieszczonych w narożach przekroju. Pręty zbrojenia rygla zakotwiono w słupie na odległość równą 40-tu średnicom poniżej dolnej krawędzi rygla.

2.2. Parametry wytrzymałościowe betonu

Do badań materiałowych przygotowano próbki sześciennie o bokach równych 15 cm. Betonowanie każdego elementu odbywało się w sześciu etapach. Podczas każdego etapu wykonano po jednej próbce. Łącznie otrzymano 12 próbek do oceny wytrzymałości betonu na ściskanie. Uzyskane wyniki (tab. 1 i 2) w znacznym stopniu odbiegały od wielkości projektowanych.

Konieczne stało się określenie wytrzymałości betonu w konstrukcji inną wiarygodną metodą w celu potwierdzenia lub weryfikacji uzyskanych wcześniej wyników. W związku z powyższym zdecydowano się po zakończeniu eksperymentu na wycięcie próbek z konstrukcji metodą odwiertu. Powszechnie przyjmuje się, iż badanie odwiertów rdzeniowych pobieranych bezpośrednio z konstrukcji jest najbardziej wiarygodnym źródłem informacji. Badania przeprowadzone na próbkach wyciętych z odwiertów zwykle przesądza o ocenie jakości wbudowanego betonu. Przy wyborze średnicy odwiertu w pierwszej kolejności należy brać pod uwagę wielkość ziaren kruszywa zastosowanego w mieszance betonowej. W betonie o wielkości ziaren kruszywa do 20 mm średnica odwiertu powinna wynosić nie mniej niż 100 mm. W takim przypadku wytrzymałość odwiertów nieznacznie różni się od próbek normowych przygotowywanych w chwili układania mieszanki betonowej. Przyjmując zgodnie z pracą (Moczko, 2004), że wytrzymałość na ściskanie oznaczana na próbkach

kostkowych o wymiarze „a” jest równa wytrzymałości uzyskiwanej na walcach o wysokości i średnicy równej „a”, pomnożonej przez współczynnik równy 1,12 – można łatwo wykazać, że wytrzymałość betonu na ściskanie, określana na odwiertach, których średnica jest równa ich długości i wynosi 100 mm, odpowiada wytrzymałości betonu badanej na próbkach sześciennych o wymiarze boku równym 150 mm:

$$R_{kostkowa}(a = 100\text{mm}) = 1,12 \cdot R_{walcowa}(a = h = 100\text{mm}),$$

ponadto

$$R_{kostkowa}(a = 150\text{mm}) = 0,9 \cdot R_{walcowa}(a = 100\text{mm})$$

dlatego

$$R_{kostkowa}(a = 150\text{mm}) = 1,12 \cdot 0,9 \cdot R_{walcowa}(a = h = 100\text{mm})$$

i

$$R_{kostkowa}(a = 150\text{mm}) = R_{walcowa}(a = h = 100\text{mm})$$

Fakt ten ma bardzo istotne znaczenie praktyczne, który został usankcjonowany w propozycji europejskich przepisów normowych, dotyczących zasad oceny wytrzymałości betonu w istniejących konstrukcjach budowlanych (PN-EN 12504-1:2009. *Badania betonu konstrukcyjnych – Część 1: Odwierty rdzeniowe – Wycinanie, ocena i badanie wytrzymałości na ściskanie*). Przepisy te stanowią, że jeśli badania wytrzymałościowe są realizowane przy wykorzystaniu próbek wyciętych z odwiertów, których średnica jest równa ich długości i mieści się w przedziale od 100 do 150 mm, to uzyskiwane wartości wytrzymałości betonu na ściskanie odpowiadają wytrzymałości określonej na normowych próbkach sześciennych o boku równym 150 mm, wykonywanych i dojrzewających w tych samych warunkach.

W tablicy 3 i 4 zestawiono wytrzymałości betonu na ściskanie uzyskane na próbkach wyciętych z obu elementów badawczych.

Tab. 1. Wytrzymałość betonu na ściskanie w elemencie B1.1, badana na próbkach sześciennych

Element	Nr próbki		1	2	3	4	5	6
B1.1	wymiar	[cm]	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
	pole przekroju	[m ²]	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	siła niszcząca	[kN]	1200,0	1225,0	1232,5	1150,0	1175,0	1212,5
	wytrzymałość na ściskanie f_{ci}	[MPa]	53,33	54,44	54,78	51,11	52,22	53,89

Tab. 2. Wytrzymałość betonu na ściskanie w elemencie B1.2, badana na próbkach sześciennych

Element	Nr próbki		1	2	3	4	5	6
B1.2	wymiar	[cm]	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
	pole przekroju	[m ²]	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	siła niszcząca	[kN]	1050,0	1002,5	1005,0	1110,0	1025,0	1020,0
	wytrzymałość na ściskanie f_{ci}	[MPa]	46,67	44,56	44,67	49,33	45,56	45,33

Tab. 3. Wytrzymałość betonu na ściskanie w elemencie B1.1, badana na odwiertach

Element	Nr próbki		1	2	3	4	5	6
B1.1	średnica	[cm]	10,00	10,00	10,03	10,00	10,08	9,98
	wysokość	[cm]	10,02	10,10	10,05	10,16	10,15	10,08
	siła niszcząca	[kN]	352,5	295,0	310,0	285,0	300,0	325,0
	wytrzymałość na ściskanie f_{ci}	[MPa]	44,90	37,58	39,25	36,31	37,61	41,57

Tab. 4. Wytrzymałość betonu na ściskanie w elemencie B1.2, badana na odwiertach

Element	Nr próbki		1	2	3	4	5	6
B1.2	średnica	[cm]	10,00	10,10	10,20	9,98	10,10	10,10
	wysokość	[cm]	10,12	9,98	9,96	11,98	11,02	10,06
	siła niszcząca	[kN]	275,0	265,0	270,0	242,5	220,0	265,0
	wytrzymałość na ściskanie f_{ci}	[MPa]	35,03	33,09	33,06	31,02	27,47	33,09

Ze względu na zachowane wymiary próbek uznano, że uzyskane rezultaty odzwierciedlały wytrzymałości sześciennych próbek normowych o boku 150 mm. Określona na tej podstawie wytrzymałość minimalna $f_{cmin,cube}$, będąca wyznacznikiem klasy betonu, była równa 36,31 MPa w elemencie B1.1 i 27,47 MPa w elemencie B1.2, co odpowiadało klasom betonu C25/30 i C20/25.

Badania materiałowe wskazywały, że w obu elementach do badań zastosowano beton o zróżnicowanych parametrach wytrzymałościowych. Różnice te skłoniły autora do ponownej analizy nośności zaprojektowanych elementów. Kierując się wytycznymi normy (PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2 *Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków*) określono, iż dla przyjętych przekrojów betonu i stali nośność powinna być określana jako funkcja wytrzymałości i przekroju wkładki zbrojenia. Oznaczało to, że niezależnie od klasy betonu oba elementy badawcze mają porównywalną nośność na zginanie przekrojów słupa i rygła.

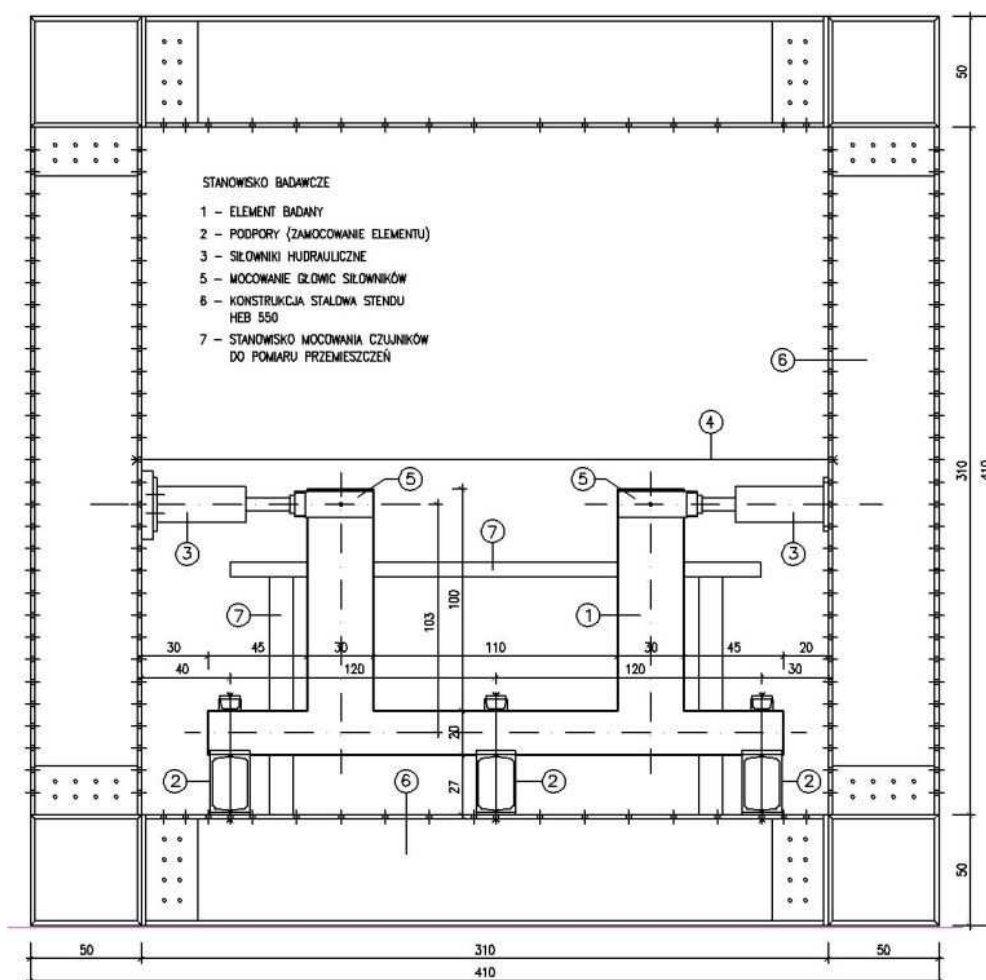
2.3. Stanowisko do badań

Stanowiska badawcze przygotowano tak, aby zapewnić wewnętrzne zrównoważenie obciążeń przekazywanych na element badawczy (Malesza, 2004). Stend do badań

eksperymentalnych stanowiła przestrzenna samonośna rama stalowa wykonana z kształtowników HEB 500. Obciążenie realizowano za pomocą siłowników hydraulicznych mocowanych poziomo do słupów stendu. Przyrządy pomiarowe ustawiono na niezależnej konstrukcji stalowej odseparowanej od miejsca ustawienia konstrukcji. Na rysunku 2 przedstawiono stanowisko do badań i sposób zamocowania badanego elementu. Przygotowane stanowisko zapewniało rozkład sił wewnętrznych odzwierciedlający pracę statyczną konstrukcji ramowej.

W trakcie badań mierzono przemieszczenia wybranych punktów konstrukcji, odkształcenia prętów zbrojenia głównego rygła zakotwionych w słupie oraz szerokości rozwarcia rys w betonie. Ugięcia rygli rejestrowano za pomocą czujników indukcyjnych umieszczonych w osi działającego obciążenia. Odkształcenia stali zbrojeniowej mierzono za pomocą tensometrów elektrooporowych przyklejonych do prętów. Czujniki rozmieszczono co 5 cm na długości pręta. Odczyty z czujników oraz siłowników zapisywano za pomocą komputerowego systemu pomiarowego.

Badania prowadzono do momentu wyczerpania nośności przekrojów elementów. Obciążenie zwiększano stopniami – co 10% ustalonego wcześniej obciążenia maksymalnego.



Rys. 2. Stanowisko do badań węzłów ram

3. Rezultaty badań

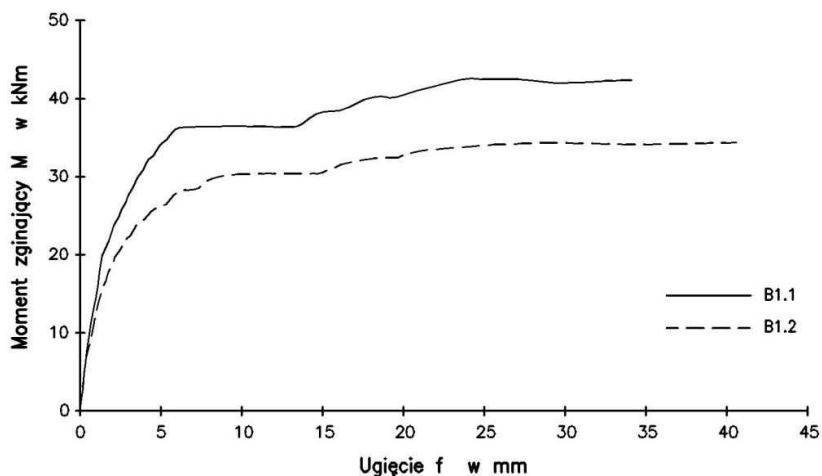
Na podstawie pomiaru przemieszczeń sporządzono wykresy ugięć wsporników ryglowych. Przedstawione na rysunku 3 linie przemieszczeń można podzielić na charakterystyczne odcinki odpowiadające fazom pracy konstrukcji. Prostoliniowy odcinek sprężystej odpowiedzi konstrukcji na zadawane obciążenia kształtował się odpowiednio do obciążenia około 10 kN w elemencie B1.2 i do około 12 kN w B1.1. Zamieszczone wykresy naprężeń w przekrojach zbrojenia oraz rys w betonie potwierdzają te spostrzeżenia. Z chwilą pojawienia się pierwszych rys w elementach rozpoczęły się procesy nieliniowych odkształceń. W elemencie B1.1 intensywność nieliniowych odkształceń zwiększyła się po przekroczeniu obciążenia równego 20 kN. Ugięcia pogłębiały się płynnie do obciążenia równego około 36 kN, po czym rozpoczął się proces utraty nośności. Świadczy o tym gwałtowny wzrost ugięcia przy nieznacznie zmieniającym się obciążeniu. Pełne zniszczenie węzła ramy zaobserwowano przy sile P równej około 42 kN.

W elemencie B1.2 ugięcia w poszczególnych etapach były większe niż w elemencie B1.1 o około 10%. Maksymalne obciążenie przyłożone w trakcie badań,

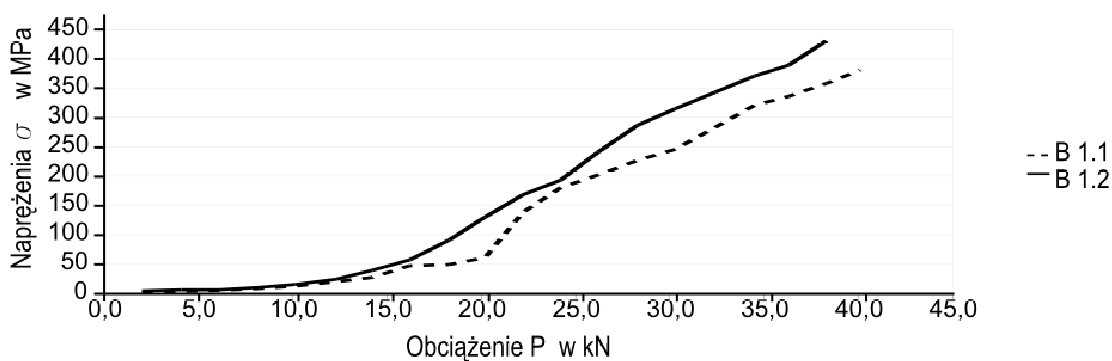
towarzystające zniszczeniu konstrukcji w węźle nie przekroczyło 32 kN.

Analizę rozkładu naprężeń w węźle ramy przeprowadzono w trzech różnych przekrojach: przekroju przywęzłowym rygla (rys. 4), słupa pod węzłem (rys. 5) i wewnątrz węzła na środku kuliści wygiętego pręta (rys. 6). Na kolejnych wykresach (rys. 7-9) przedstawiono rozkłady naprężeń w przekrojach pręta zbrojenia w funkcji obciążenia P . Wyniki jednoznacznie wskazują, że w elemencie B1.2 po przekroczeniu wielkości obciążenia rysującego, we wszystkich analizowanych przekrojach, zanotowano większe naprężenia. Na etapie pracy sprężystej, odpowiedzi konstrukcji były niemal identyczne. Pierwsze rysy (rys. 7) zostały zauważone w obu badanych elementach w przekroju przywęzłowym słupa na wysokości dolnej krawędzi rygla. W elemencie B1.1 zanotowano wówczas obciążenie równe 12 kN, a w elemencie B1.2 – 10 kN.

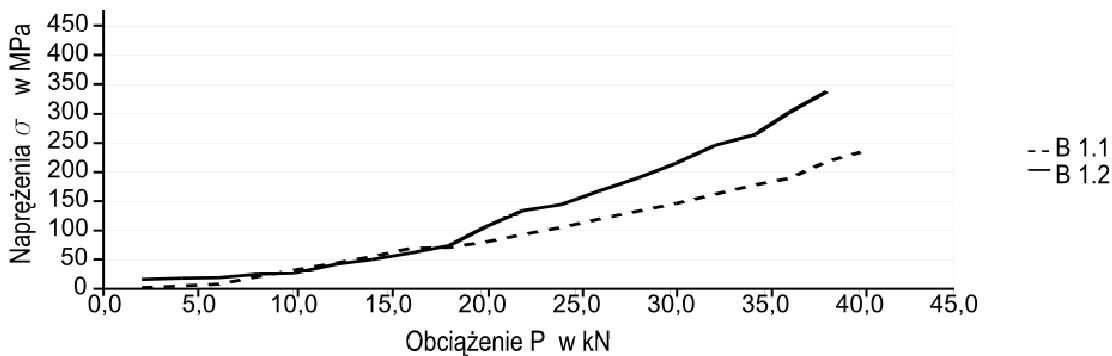
Pojawienie się zarysowania odnotowano jako załamanie linii na wykresie naprężeń. Kolejne pęknięcia pojawiły się w obu elementach w przekroju przysłupowym rygla. Zanotowano wówczas jednakowe obciążenie równe 14 kN. Największe różnice naprężeń zaobserwowano w obszarze samego węzła, gdzie w kolejnych etapach eksperymentu rozwinęło się więcej rys niż poza nim (rys. 8).



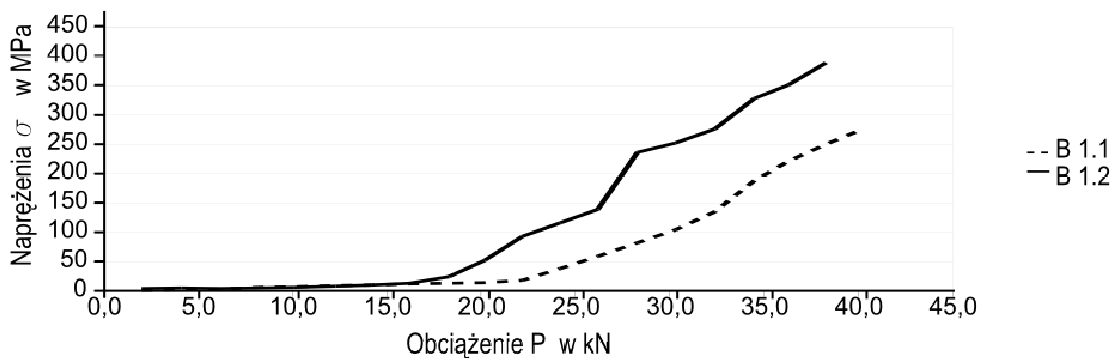
Rys. 3. Ugięcia rygli mierzone na końcach wsporników ryglowych



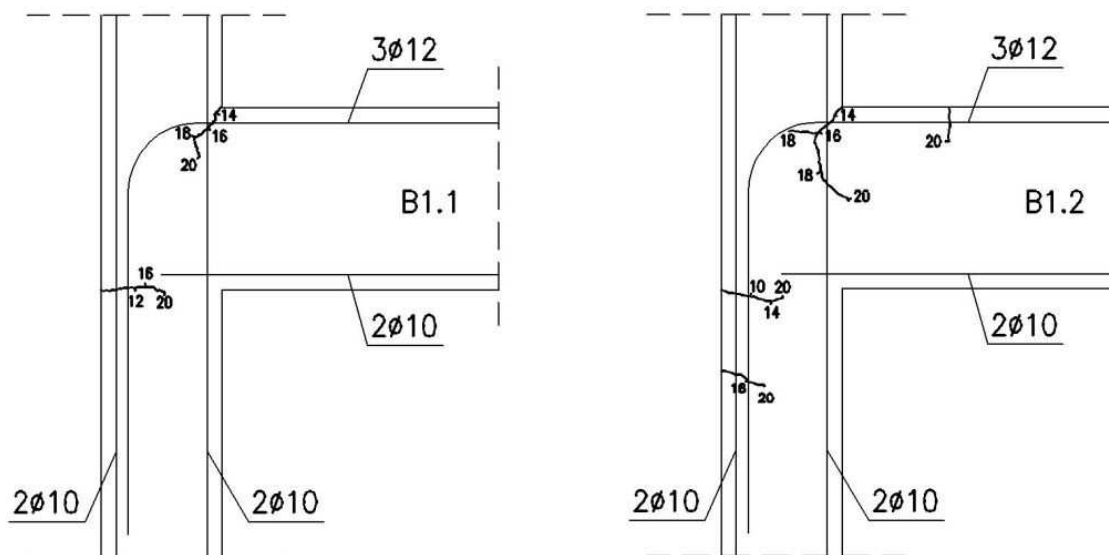
Rys. 4. Naprężenia w prętach zbrojenia mierzone w przekroju przywęzłowym rygla



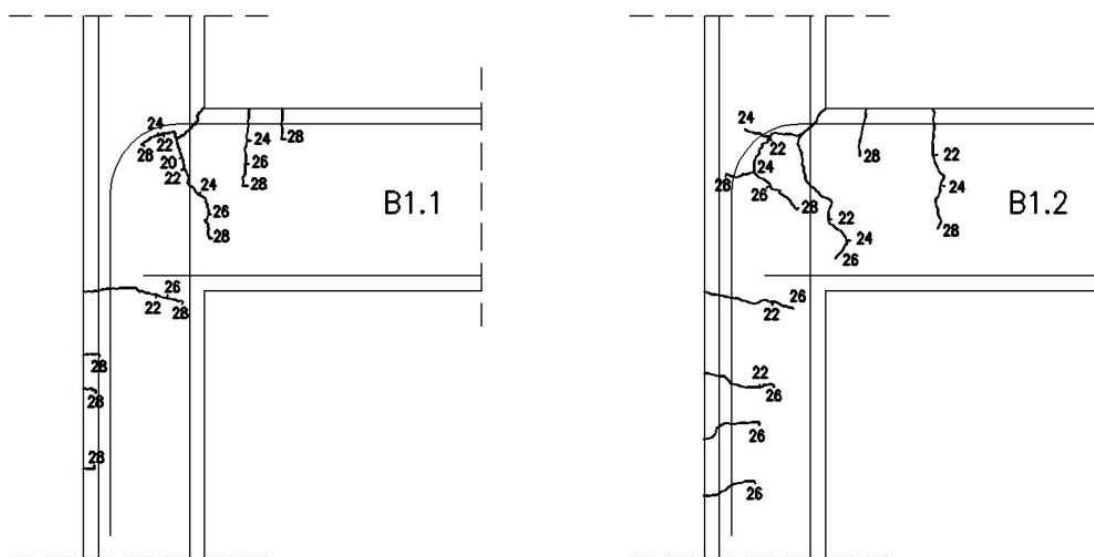
Rys. 5. Naprężenia w prętach zbrojenia mierzone w przekroju przywęzłowym słupa



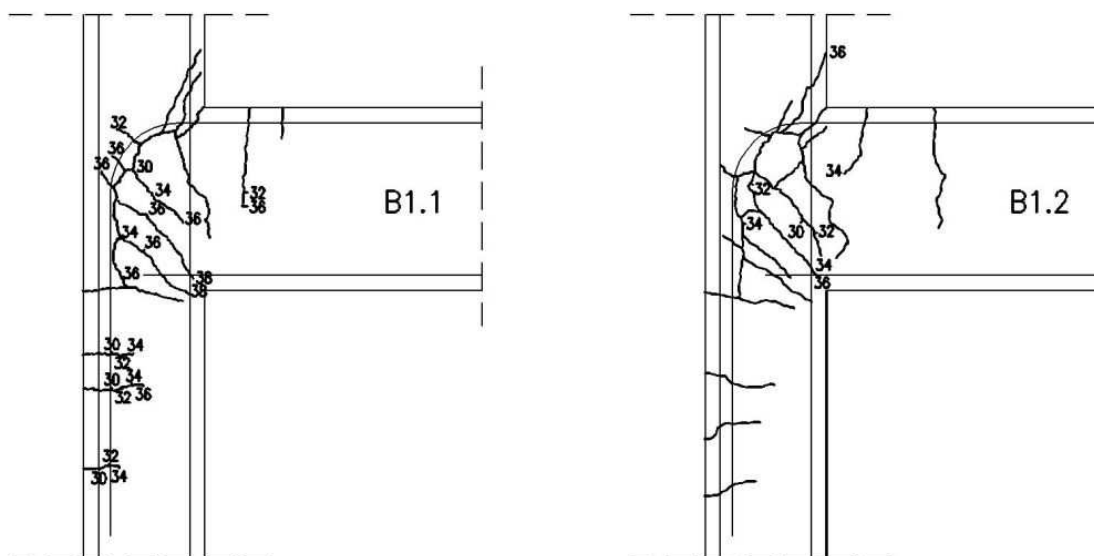
Rys. 6. Naprężenia w prętach zbrojenia mierzone wewnątrz węzła



Rys. 7. Zarysowanie węzłów w zakresie obciążeń od 10 kN do 20 kN



Rys. 8. Zarysowanie węzłów w zakresie obciążeń od 22 kN do 28 kN



Rys. 9. Zarysowanie węzłów w zakresie obciążeń od 30 kN do zniszczenia

W elemencie B1.2 w przekrojach poprzecznych słupa i rygla pęknięcia sięgały głębiej na równoważnych poziomach obciążenia. Jednocześnie wystąpiło więcej pęknięć układających się wzdłuż promieni wygiętych prętów. W końcowym etapie badań silniejsze zarysowanie węzła B1.2 było przyczyną mniejszej nośności całej konstrukcji (rys. 9).

4 Wnioski

Przeprowadzone badania dostarczają informacji o pracy statycznej węzłów ram w różnych etapach obciążenia. W fazie pracy statycznej zróżnicowanie parametrów materiałowych wpływa w niewielkim stopniu na reakcje konstrukcji. Zarówno ugięcia jak i pomiary naprężeń w przekrojach prętów zbrojenia wykazują porównywalne wielkości w obu elementach badanych do momentu wystąpienia pierwszych rys.

Różnice w poziomie obciążenia, dla którego pojawiło się zarysowanie w obu konstrukcjach były stosunkowo niewielkie. Znacznie większe różnice ujawniły się w postępie rozwijania się rys; zmienność ta nie jest liniowa. W elemencie z wbudowanym słabszym betonem obserwowano pęknięcia, których propagacja wgłąb przekrojów była większa niż w porównywalnym elemencie o lepszych parametrach betonu. W strefie samego węzła zaobserwowano więcej rys, co może świadczyć o złożonym stanie naprężeń ze szczególnie niebezpiecznym dla betonu silnym rozciąganiem.

Największe zróżnicowanie rezultatów zaobserwowano w stanie granicznym nośności. Ustalona teoretycznie nośność na zginanie przekrojów przywęzłowych nie odzwierciedla nośności samego węzła, która może decydować o zachowaniu całej konstrukcji. Zarówno w elemencie B1.1 jak i B1.2 nie uzyskano projektowanego obciążenia, przy czym zdecydowanie bardziej niekorzystne różnice powstały w konstrukcji o słabszych cechach betonu. Uzyskane różnice granicznego obciążenia teoretycznego i osiągniętego podczas badań wyniosły odpowiednio: 16% i 36%.

Literatura

- Kordina K. (1997). Über das Verformungsverhalten von Stahlbeton-Rahmenecken und-knoten. *Beton und Stahlbetonbau*, 92. Heft 8.
- Czkwianianc A. (1999). Wpływ ukształtowania zbrojenia w monolitycznym węźle ramy na jego zarysowanie i nośność. W: mat. XLV Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1999.
- Johansson M. (2001). Reinforcement detailing in concrete frame corners. *ACI Structural Journal*, Vol.98. No.1, 105-115.
- Bodzak P., Czkwianianc A. (2001): Doświadczalne badania monolitycznych ram żelbetowych – strefa skrajnego węzła. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej*, z. 11, 1-80.
- Malesza J. (2004). Experimental investigation and numerical modelling for tracing the development of RC frame joint failure. W: proc. of the 5th International PhD Symposium in Civil Engineering, Delft.
- Moczko A. (2004). Badania odwiertów rdzeniowych w świetle aktualnych unormowań prawnych. Część 1 – pobieranie odwiertów z konstrukcji oraz badania makroskopowe. *Budownictwo Technologie Architektura*, 2/2004, 32-35.

INFLUENCE OF MATERIAL PARAMETERS ON STATIC WORK OF REINFORCED CONCRETE FRAME JOINT

Abstract: Influence of concrete strength characteristics on stress distribution in the external corner of the reinforced concrete monolithic frame is presented in the paper. Results obtained in investigations displayed unprofitable influence of deviations from designed assumptions on static response of structure, specifically on decreasing of the structure load bearing capacity.

Artykuł powstał w ramach pracy badawczej statutowej S/WBiŚ/3/08 realizowanej w Politechnice Białostockiej