

Maria WŁODARCZYK, Przemysław CZUMAJ

## WPŁYW ZBROJENIA POPRZECZNEGO NA ROZWÓJ RYS UKOŚNYCH W ZGINANYCH BELKACH ŻELBETOWYCH – WYNIKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych zginanych belek żelbetowych. Przeprowadzone doświadczenia zorientowane są na śledzenie rozwoju rys ukośnych w strefach przypodporowych w zależności od sposobu zbrojenia belki. Szczegółowa analiza wyników dotyczyła czterech serii belek: bez zbrojenia na ścinanie, ze zbrojeniem poniżej i minimalnym stopniem zbrojenia oraz o zagęszczonym rozstawie zbrojenia poprzecznego. Wyniki pomiarów uzyskano dwoma metodami, tj. za pomocą tensometru mechanicznego oraz z zastosowaniem systemu Aramis do optycznej korelacji obrazu.

### WSTĘP

Zagadnienie ścinania w belkach oraz innych elementach żelbetowych wciąż pozostaje otwarte i prowadzone są w tym zakresie liczne badania doświadczalne i teoretyczne, ponieważ wymiarowanie belek na ścinanie jest znacznie bardziej złożone niż ich wymiarowanie na zginanie. W zagadnieniu tym występuje istotna interakcja pomiędzy betonem, zbrojeniem podłużnym na zginanie i zbrojeniem poprzecznym na ścinanie, powodującym dużą anizotropię i niejednorodność w obrębie elementu konstrukcyjnego. Powstawanie i następnie propagacja rys w belce, nawet w materiale izotropowym, jest związane z dużą lokalną redystrybucją sił wewnętrznych, i w efekcie indukowaniem silnej anizotropii w wyniku zarysowania.

W belkach poddanych głównie zginaniu, ścinanie może wystąpić przede wszystkim w strefach przypodporowych, gdzie siły poprzeczne są największe. Prognozowane kierunki rys ukośnych będą zbliżone do kierunków trajektorii największych naprężeń ściskających [1]. Stan wyężenia [1, 2] w betonie, dla płaskiego stanu naprężenia, dość dobrze opisuje hipoteza Coulomba-Mohra [3]. W przypadku belek zginanych jedno z naprężeń głównych jest naprężeniem ściskającym, a drugie rozciągającym. W elementach żelbetowych na układ rys ukośnych ma także wpływ zbrojenie podłużne i poprzeczne. Kierunki rys będą więc nieco odchylone od kierunków głównych naprężeń. Odchylenie to zwykle wynosi od 0° do 6°.

Na podstawie analizy przebiegu trajektorii naprężeń głównych, pozwalającej przewidzieć sposób zarysowania elementu, zaplanowano badania czterech serii belek żelbetowych różniących się między sobą sposobem zbrojenia stref przypodporowych.

### 1. OPIS BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

Podstawowym celem eksperymentów było badanie wpływu zbrojenia poprzecznego na rozwój rys ukośnych i mechanizm zniszczenia w strefach przypodporowych zginanych belek żelbetowych. Badania doświadczalne obejmowały cztery serie belek różniące się między sobą zastosowanym stopniem zbrojenia na ścinanie, który wynosił od 0% do 1,4%. Odnośne badania zostały wykonane w ramach przygotowania pracy dyplomowej magisterskiej przez Przemysława Czumaję [4].

Do badań przyjęto schemat statyczny belki jednoprzęsłowej, swobodnie podpartej, o przekroju prostokątnym 80×140 mm i długości przęsła pomiędzy podporami 1000 mm. Obciążenie realizowano dwiema siłami skupionymi  $P$  przyłożonymi w odległości  $a$  od każdej podpory.

W celu określenia miejsca przyłożenia obciążenia na belce założono jej takie proporcje, aby zniszczenie belki zachodziło poprzez ściskanie przy ścinaniu. W związku z tym przy pominięciu ciężaru własnego belki obliczono wskaźnik ścinania [5], który dla belki swobodnie podpartej obciążonej dwiema siłami skupionymi wynosi:

$$D = \frac{M}{Vd}, \quad (1)$$

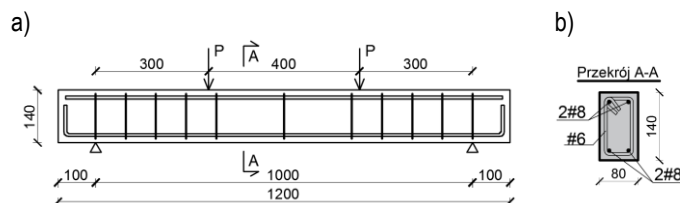
gdzie:  $M$  – moment zginający,  $V$  – siła poprzeczna,  $d$  – wysokość użyteczna przekroju.

Moment zginający dla przyjętego schematu statycznego belki wynosi  $M = Pa$  a siła poprzeczna  $V = P$ , czyli po podstawieniu do (1) otrzymamy:

$$D = \frac{Pa}{Pd} = \frac{a}{d}, \quad \text{czyli } a = Dd \quad (2)$$

Zakłada się, że przy wskaźniku ścinania  $1 < D < 3$  zniszczenie belki determinuje dominujący wpływ siły poprzecznej w stosunku do momentu zginającego - następuje wtedy zmiażdżenie krzywulca betonowego. Dla wstępnie przyjętej wysokości użytecznej przekroju  $d = 120$  mm otrzymamy:  $1 \cdot 120 = 120$  mm a  $3 \cdot 120 = 360$  mm. Na tej podstawie przyjęto miejsce przyłożenia siły od podpory w odległości  $a = 300$  mm.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat statyczny i przekrój poprzeczny belki żelbetowej.



Rys. 1. a) Schemat statyczny badanej belki, wraz ze zbrojeniem, b) przekrój A-A przez belkę

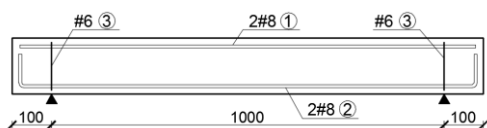
Liczba zastosowanych strzemion (rys.1) była uzależniona od serii badanych belek.

#### 1.1. Elementy żelbetowe

Badania przeprowadzono dla czterech serii belek żelbetowych, gdzie na serię składało się dwie belki. Dla wszystkich badanych belek zastosowano beton tej samej klasy i stal zbrojeniową tego

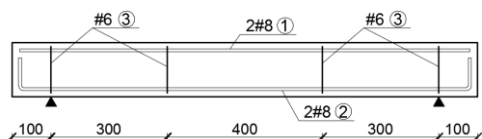
samego gatunku. Zarówno do wykonania prętów zbrojenia podłużnego, jak i strzemion, użyto tej samej stali BSt500. We wszystkich badanych belkach, jako zbrojenie podłużne w strefie rozciąganej i ściskanej, zastosowano pręty  $\phi 8$ . Poszczególne serie badanych belek różniły się między sobą liczbą i rozstawem strzemion, które były wykonane z prętów  $\phi 6$ .

Dla belek serii I zastosowano tylko dwa strzemiona nad podporami, których zadaniem było podtrzymanie prętów zbrojenia podłużnego (rys.2). Procent zbrojenia na ścinanie wyniósł  $\rho_w = 0\%$ .



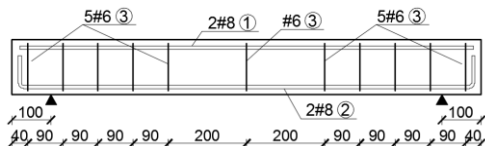
Rys. 2. Szkic zbrojenia dla belek serii I

Dla belek serii II zastosowano strzemiona nad podporami i w miejscu przyłożenia obciążenia (rys.3). W tym przypadku procent zbrojenia na ścinanie będzie  $\rho_w = 0,23\%$ .



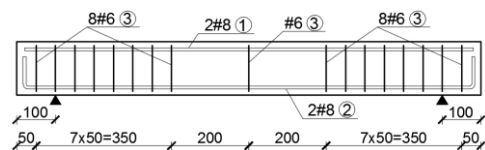
Rys. 3. Szkic zbrojenia dla belek serii II

W belkach serii III zastosowano minimalne zbrojenie na ścianie ( $\rho_w = 0,78\%$ ), zalecane przez PN-EN 1992-1-1 [6] o maksymalnym rozstawie  $s_{l,max} = 90$  mm (rys.4).



Rys. 4. Szkic zbrojenia dla belek serii III

Natomiast dla IV serii badanych belek zastosowano zagęszczone rozstaw strzemion w strefie przypodporowej ( $\rho_w = 1,4\%$ ), jak pokazano na rysunku 5.

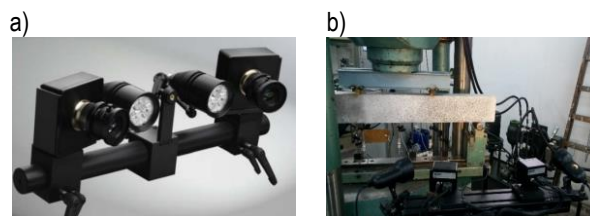


Rys. 5. Szkic zbrojenia dla belek serii IV

## 1.2. Metody pomiarowe

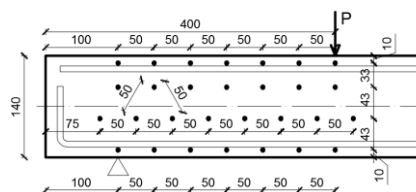
Do monitorowania deformacji w strefach przypodporowych belek zastosowano dwie metody pomiaru różnicy przemieszczeń punktów.

Pierwszą z nich rejestrowano przemieszczenia przy pomocy systemu optycznej korelacji obrazu „Aramis” GOM Software (rys.6). Ze względu na ograniczony zasięg strefy pomiarowej za pomocą systemu Aramis monitorowano tylko jedną ze stref przypodporowych belki.



Rys. 6. a) Widok kamer systemu, b) widok belki żelbetowej na stanowisku pomiarowym

Druga metoda pomiarowa polegała na wykorzystaniu mechanicznego tensometru nasadowego o bazie pomiarowej 50 mm i podziale 0,001 mm. Repery bazy pomiarowej były rozmieszczone na siatce trójkąta równobocznego o długości boku zgodnej z bazą tensometru. Na rysunku 7 pokazano sposób rozmieszczenia tych baz pomiarowych. Otrzymano w ten sposób 53 odcinki pomiarowe, dla których wykonywano odczyty w kolejno ustalonych poziomach obciążenia. Odczyty zostały bezpośrednio zapisane do programu Excel, a następnie posłużyły do analizy wyników.



Rys. 7. Schemat rozmieszczenia baz pomiarowych w strefie przypodporowej

## 1.3. Przebieg badania

Badanie wykonywano w prasie obciążeniowej o maksymalnym obciążeniu 200 kN. Obciążenie na belkę przekazywane było poprzez trawers (rys.6b) w związku z tym siła  $P$  w punktach ich przyłożenia wynosiła maksymalnie 100 kN.

Dla badanych belek obciążenie realizowano, poczynając od 0 kN z przyrostem co 1 kN, aż do zniszczenia belki. Dla każdego poziomu obciążenia wykonywano zdjęcia za pomocą systemu Aramis. Odczyty tensometrem wykonano dla następujących poziomów obciążenia: kolejno przy obciążeniu: 0; 2,5; 5,0; 7,5; 10,0; 12,5; 15,0; 17,5; 20,0; 25,0 i dalej co 5kN aż do zniszczenia belki.

## 2. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

### 2.1. Badania materiałowe

Badania próbek betonowych, pod kątem wytrzymałości i modułu sprężystości, wykonano zgodnie z zaleceniami instrukcji ITB [7], a uzyskane wyniki zestawiono w tablicy 1.

Tab. 1. Wyniki badań próbek betonowych dla analizowanych belek

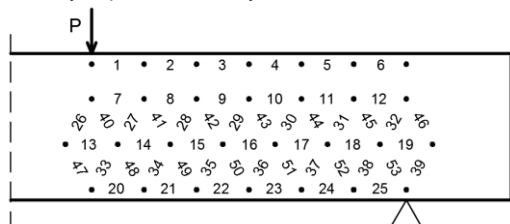
Seria belek	Nazwa belki	$f_{cm}$ [MPa]	$f_{ctm}$ [MPa]	$E_{cm}$ [GPa]
I	B1-1	32,58	3,06	31,35
	B1-2	35,44	3,24	32,16
II	B2-1	32,58	3,06	31,35
	B2-2	35,44	3,24	32,16
III	B3-1	32,58	3,06	31,35
	B3-2	35,44	3,24	32,16
IV	B4-1	32,58	3,06	31,35
	B4-2	35,44	3,24	32,16

W przypadku stali zbrojeniowej średnia granica plastyczności została oszacowana jako  $f_{yk} = 550$  MPa.

## 2.2. Wyniki badań belek

Przy pomocy systemu Aramis obserwowano powierzchnię boczną belki w jednej strefie przypodorowej dla kolejnych poziomów przykadanego obciążenia. Monitorowano rozwój rys od chwili ich powstania aż do momentu zniszczenia elementu. Skupiono się tutaj głównie na analizie wybranych rys i odkształceń w ich sąsiedztwie. Rezultaty badań w postaci map odkształceń wyliczonych przez oprogramowanie systemu Aramis pokazano dla poszczególnych belek.

W trakcie badań jednocześnie mierzono przemieszczenia reparów pomiarowych usytuowanych w drugiej strefie ścinania. Na wykresach pokazano odkształcenia wybranych odcinków pomiarowych dla kolejnych poziomów obciążenia. Sposób numeracji odcinków pomiarowych pokazano na rysunku 8.



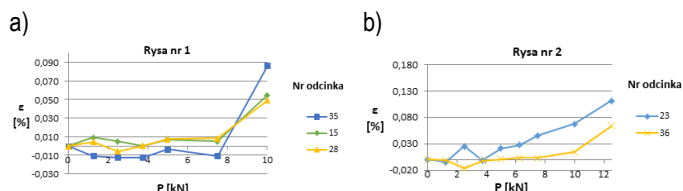
Rys. 8. Numeracja baz pomiarowych

Na poniżej pokazanych wykresach dla poszczególnych belek, zaznaczono odkształcenia na odcinkach, gdzie przewidywano powstanie rys ukośnych, czyli dla ciągu baz: 21-34-14-27, 22-35-15-28, 23-36-16-29 (rys.8). Wybrane odcinki ułożone są prostopadłe do kierunku prognozowanej propagacji rys. Dlatego też na przedstawionych wykresach można pośrednio zaobserwować zmieniającą się szerokość kolejnych rys, opisaną zmianą uśrednionego przyrostu odkształceń:

$$\varepsilon_i = \frac{l_i - l_{i-1}}{\Delta}, \quad (3)$$

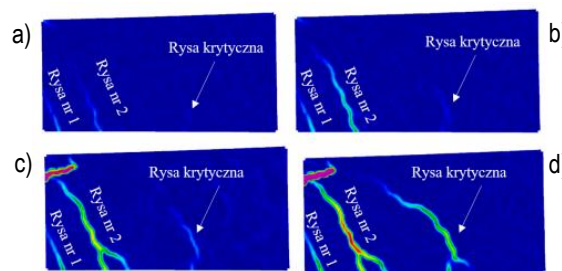
gdzie:  $l_i, l_{i-1}$  – odczyty odległości z tensometru, w kolejnych krokach,  $\Delta = 50$  mm – długość bazy pomiarowej.

W przypadku belki B1-1 w strefie badania tensometrem zaobserwowano rozwój dwóch rys ukośnych (rys.9). Pierwsza z nich, znajdująca się bliżej podpory powstała przy obciążeniu siłą  $P = 4$  kN i zwiększała swoją szerokość do wartości siły ok. 7,5 kN. Druga pojawiła się przy  $P = 7,5$  kN i do końca obserwacji nie zaobserwowano zatrzymania jej propagacji.



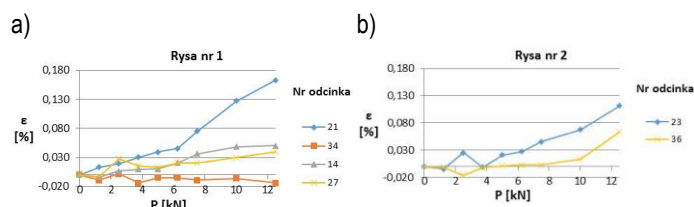
Rys. 9. Wykresy odkształceń w belce B1-1: a) w miejscu rysy nr 1, b) w miejscu rysy nr 2

W obszarze badania Aramisem zaobserwowano trzy rysy (por. rys.10). Pierwsze dwie powstały przy sile o wartości  $P = 4$  kN, jednak dopiero trzecia z nich, znajdująca się najbliżej podpory (prawej strony rysunku) okazała się rysą krytyczną. Powstała ona przy sile o wartości  $P = 8,5$  kN. Na ostatnim zdjęciu (rys.10d), przy  $P = 12,5$  kN można zaobserwować moment tuż przed powstaniem drugiej gałęzi rysy krytycznej.



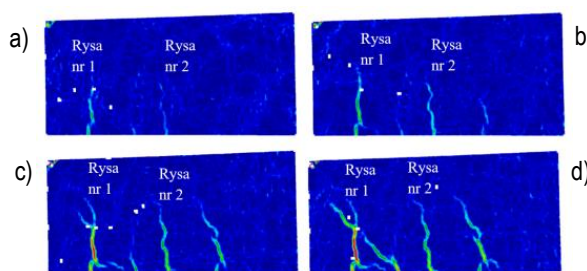
Rys. 10. Proces powstawania rys ukośnych w belce B1-1 w zależności od wartości siły: a)  $P = 6$  kN, b)  $P = 7$  kN, c)  $P = 10$  kN, d)  $P = 12,5$  kN

W belce B1-2, w wyniku pomiarów odkształceń w strefie ścinania udało się zaobserwować powstanie dwóch rys (rys.11). Obie były już zauważalne przy niższym poziomie obciążenia, jednak wyraźny wzrost ich szerokości nastąpił przy sile  $P = 6$  kN. Pierwszy wykres przedstawia odkształcenia w strefie rysy nr 1, która jest usytuowana bliżej środka belki (rys.11a), natomiast drugi (rys.11b) – obrazuje rysę nr 2, bliżej podpory.



Rys. 11. Wykresy odkształceń w belce B1-2: a) w miejscu rysy nr 1, b) w miejscu rysy nr 2

Przy pomocy systemu Aramis zaobserwowano rozwój czterech rys (rys.12). Jednak żadna z tych rys nie była przyczyną zniszczenia belki, gdyż zniszczenie nastąpiło w drugiej strefie nieobjętej badaniem tym systemem. Już przy niewielkim obciążeniu  $P = 5$  kN, pojawiły się trzy rysy prostopadłe do osi elementu. Dopiero czwarta rysa, która zaczęła wyraźnie zwiększać zasięg przy  $P = 8$  kN, rozwijała się ukośnie w kierunku miejsca przyłożenia obciążenia. Zniszczenie tej belki nastąpiło przy sile 15 kN.

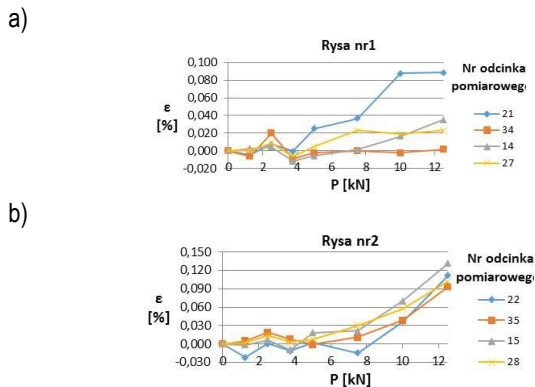


Rys. 12. Proces powstawania rys ukośnych w belce B1-2 w zależności od wielkości zadanej siły: a)  $P = 5$  kN, b)  $P = 8$  kN, c)  $P = 12,5$  kN, d)  $P = 14,5$  kN

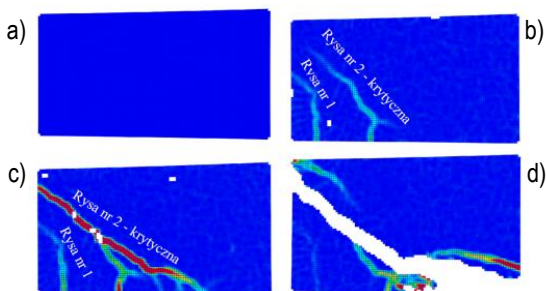
W trakcie badania belki B2-1 również zaobserwowano powstanie dwóch rys (rys.13). Pierwsza powstała bliżej środka belki przy sile  $P = 4$  kN, natomiast druga przy obciążeniu  $P = 5$  kN. Najprawdopodobniej to ta druga rysa mogła być rysą krytyczną. Sugestię tę można uzasadnić na podstawie teorii dwuetapowego rozwoju rys wg P.D. Zararisa [8]. Szerokość tej rysy przy obciążeniu  $P = 12,5$  kN miała ciągle tendencję wzrostową.

Badanie Aramisem daje podobne rezultaty co tensometrem. Na mapach odkształceń uzyskanych z programu również widać dwie rysy (rys.14), powstające odpowiednio przy  $P = 7$  kN i  $P = 10$  kN.

Druga z zaobserwowanych rys okazała się rysą krytyczną, która doprowadziła do zniszczenia belki, przy sile  $P = 12,5$  kN (rys.14).

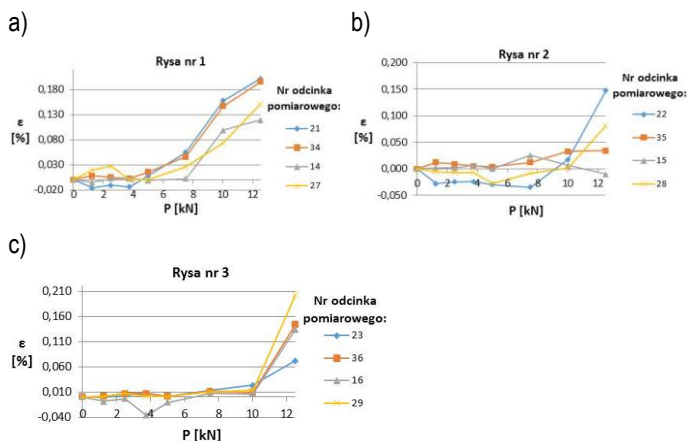


**Rys. 13.** Wykresy odkształceń w belce B2-1: a) w miejscu rysy nr 1, b) w miejscu rysy nr 2



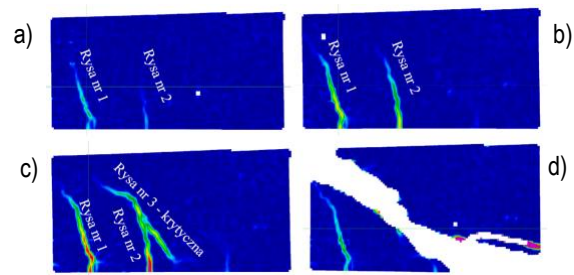
**Rys. 14.** Proces powstawania rys ukośnych dla belki B2-1 w zależności od wielkości siły: a)  $P = 7,5$  kN, b)  $P = 10$  kN, c)  $P = 12,5$  kN, d)  $P = 15$  kN

W belce B2-2 zaobserwowano powstanie trzech rys (rys.15). Pierwsza, najbliższej środka belki, powstała przy  $P = 5$  kN, środkowa zaczęła się tworzyć przy  $P = 7,5$  kN, natomiast trzecia przy  $P = 10$  kN. Rozwój trzeciej rysy w końcowej fazie badania był bardzo intensywny (krytyczny).



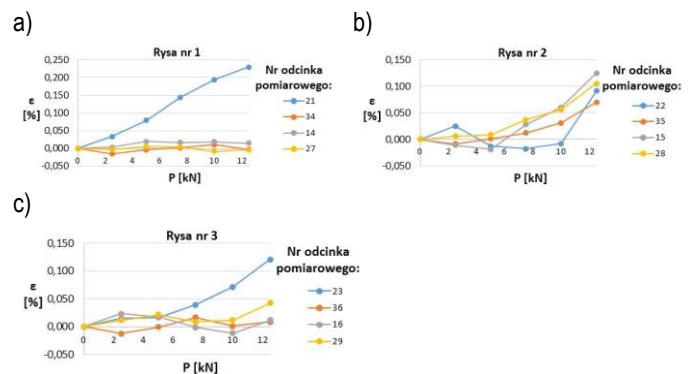
**Rys. 15.** Wykresy odkształceń w belce B2-2: a) w miejscu rysy nr 1, b) w miejscu rysy nr 2, c) w miejscu rysy nr 3

Na mapach odkształceń z Aramisa można zaobserwować podobny schemat powstawania rys (rys.16): dwie rysy bliżej środka belki, powstające odpowiednio przy  $P = 8$  kN i  $P = 13$  kN, oraz rysa krytyczna, najbliższej podpory, przy  $P = 13$  kN. Zniszczenie belki nastąpiło przy sile  $P = 14,5$  kN.



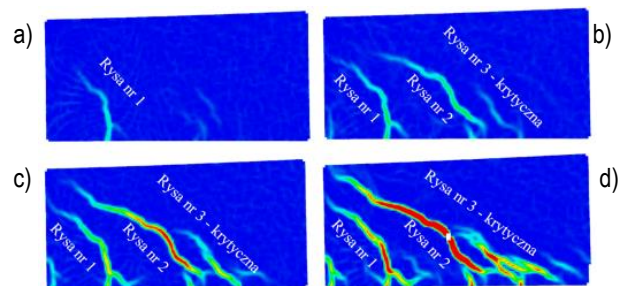
**Rys. 16.** Proces powstawania rys ukośnych w belce B2-2 w zależności od wielkości siły: a)  $P = 8,5$  kN, b)  $P = 12$  kN, c)  $P = 12,5$  kN, d)  $P = 14,5$  kN

W belce B3-1 o minimalnym stopniu zbrojenia wyniki odkształceń pokazano na tych samych odcinkach pomiarowych jak w poprzednich belkach (rys.17) - różnią się one od wcześniejszych. Przede wszystkim, rysa nr 1 znajdująca się najdalej od podpory, mimo wyraźnej szerokości ma niewielką długość. Jedynie na odcinku znajdującym się najbliższej dolnej krawędzi belki widać jej rozwój. Rysa nr 2 powstała przy ok. 5 kN na odcinkach znajdujących się dalej od dolnej krawędzi (15, 28 i 35, bazy pomiarowe (rys.8)). Najniższy fragment rysy otworzył się gwałtownie dopiero przy  $P = 8,5$  kN. Trudno jednoznacznie określić siłę, przy której powstała rysa nr 3.



**Rys. 17.** Wykresy odkształceń w belce B3-1: a) w miejscu rysy nr 1, b) w miejscu rysy nr 2, c) w miejscu rysy nr 3

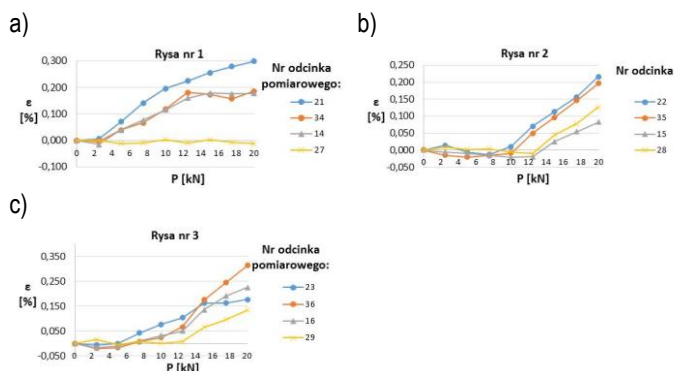
Na zdjęciach z Aramisa (rys.18) wyraźnie widać, która z powstałych rys jest rysą ukośną. Powstała ona przy sile  $P = 9$  kN. W tym wypadku, mimo znacznego rozwarcia rysy ukośnej, która najprawdopodobniej wkrótce doprowadziłaby do zniszczenia, wyczerpanie nośności nastąpiło w środkowej strefie belki, na skutek wyczerpania nośności na zginanie. Na ostatnim zdjęciu rys. 18, siła  $P$  wynosiła ok. 21,5 kN. Istotną obserwacją jest kierunek propagacji rysy najbardziej zagrażającej nośności belki, jest ona nachylona do osi pionowej pod kątem znacznie mniejszym od  $45^\circ$ .



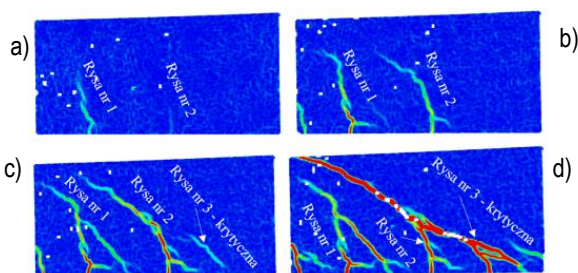
**Rys. 18.** Proces powstawania rys ukośnych dla belki B3-1 w zależności od wielkości siły: a)  $P = 7,5$  kN, b)  $P = 9$  kN, c)  $P = 13,5$  kN, d)  $P = 21,5$  kN

W belce B3-2 rozwój rys widoczny na wykresach odkształceń (rys.19), jest bardzo zbliżony do otrzymanego w belce B3-1 (rys.17). Również powstały trzy rysy: dwie tworzące się kolejno przy sile  $P = 2$  kN (z niewielkim zasięgiem),  $P = 10$  kN oraz trzecia bez jednoznaczного momentu powstania, jednak ze znacznym przyrostem szerokości od obciążenia  $P = 12$  kN.

Mapy otrzymane z Aramisa (rys.20) wyglądają bardzo podobnie do map dla belki B3-1. Podobnie jak w poprzedniej belce, kąt nachylenia rysy krytycznej jest znacznie mniejszy od  $45^\circ$ .

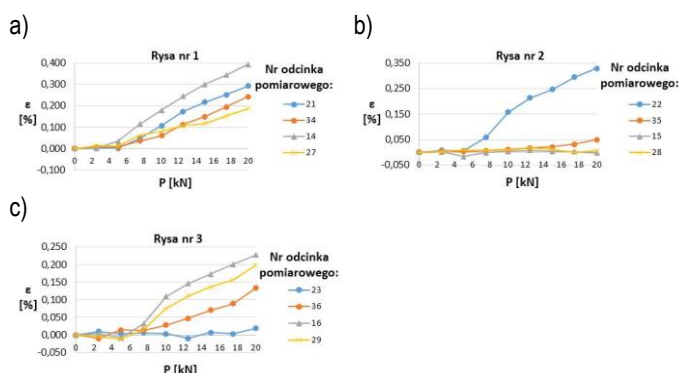


Rys. 19. Wykresy odkształceń w belce B3-2: a) w miejscu rysy nr 1, b) w miejscu rysy nr 2, c) w miejscu rysy nr 3



Rys. 20. Proces powstawania rys ukośnych dla belki B3-2 w zależności od wielkości siły: a)  $P = 5,5$  kN, b)  $P = 8,5$  kN, c)  $P = 13$  kN, d)  $P = 19,5$  kN

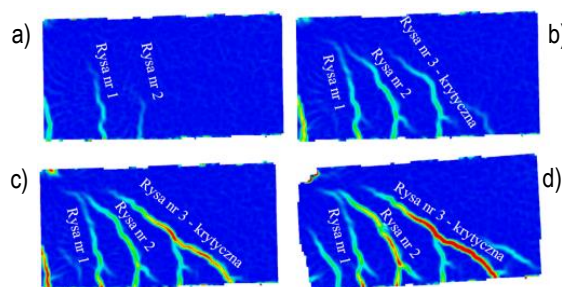
W belce B4-1, która była najsilniej zbrojona, zaobserwowano powstanie trzech rys (rys.21), dwóch przy sile 5 kN i trzeciej przy  $P = 7,5$  kN. Z wykresów odkształceń wynika, że środkowa z rys ma niewielki zasięg, mimo dużej szerokości w pobliżu dolnej krawędzi belki.



Rys. 21. Wykresy odkształceń w belce B4-1: a) w miejscu rysy nr 1, b) w miejscu rysy nr 2, c) w miejscu rysy nr 3

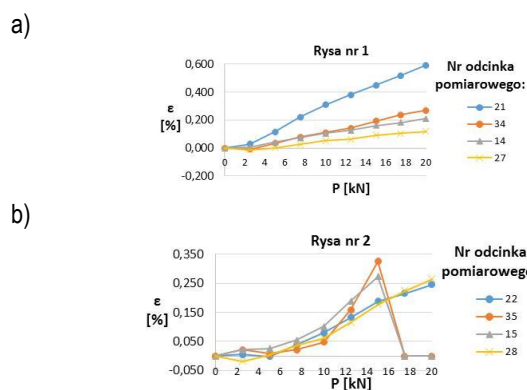
Na mapach z Aramisa widać znacznie więcej rys (rys.22), nie- możliwych do zaobserwowania w badaniach tensometrem. Zaobserwowano pięć rys, z czego trzy można zakwalifikować, jako rysy ukośne. Do momentu zniszczenia nie powstała druga gałąź rysy

krytycznej. Pierwsza gałąź była nachylona do osi poziomej pod wyraźnie większym kątem niż w belkach z trzeciej serii, z mniejszym stopniem zbrojenia na ścinanie. Zniszczenie nastąpiło przy sile  $P = 22$  kN w strefie czystego zginania, nieobjętej badaniem.



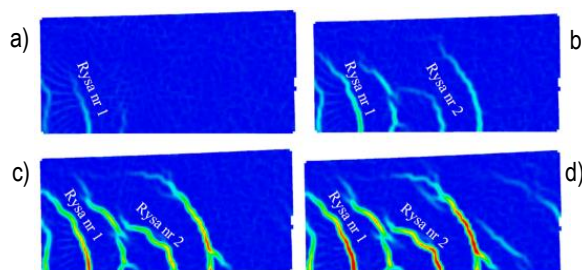
Rys. 22. Proces powstawania rys ukośnych dla belki B4-1 w zależności od wielkości siły: a)  $P = 6$  kN, b)  $P = 14,5$  kN, c)  $P = 15,5$  kN, d)  $P = 19,5$  kN

W belce B4-2 proces rozwoju zarysowania zaobserwowano jedynie na dwóch odcinkach pomiarowych (rys.23). Pierwsza rysa powstała przy sile  $P = 2$  kN i aż do zniszczenia belki rozwijała się prawie liniowo, a druga przy  $P = 5$  kN.



Rys. 23. Wykresy odkształceń w belce B4-2: a) w miejscu rysy nr 1, b) w miejscu rysy nr 2

Na zdjęciach z Aramisa (rys. 24) można zaobserwować siedem rys, przy czym sześć z nich wyraźnie odgina się od kierunku pionowego. Rysą krytyczną mogła okazać się dowolna z rys w środku obserwowanego obszaru badawczego. Kąt nachylenia rys ukośnych, podobnie jak w belce B4-1, jest większy niż w przypadku belek słabiej zbrojonych na ścinanie.



Rys. 24. Proces powstawania rys ukośnych dla belki B4-2 w zależności od wielkości siły: a)  $P = 5$  kN, b)  $P = 8$  kN, c)  $P = 14$  kN, d)  $P = 19,5$  kN

## PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania pozwoliły zaobserwować schematy rozwoju rys w strefie ścinania belek swobodnie podpartych ze zróżnicowanym stopniem zbrojenia na ścinanie. Zgodnie z przewidywa-

niami wraz ze wzrostem stopnia zbrojenia, zwiększała się nośność belek i zmienił się schemat zarysowania. W belkach niezbrojonych na ścinanie (I i II seria), w początkowej fazie obciążania powstawało od 2 do 4 rys w strefie ścinania. Gdy obciążenie zbliżało się do granicznego, co najmniej jedna z rys wyraźnie odginała się w stronę przykładanego skupionego obciążenia i gwałtownie zwiększała swój zasięg oraz rozwarcie. Kąt nachylenia tej rysy był zbliżony do 45°. Nośność wszystkich czterech belek z pierwszych dwóch serii została wyczerpana przy sile rzędu  $P = 12,5 \text{ kN} \div P = 15 \text{ kN}$ .

Zastosowanie minimalnego zbrojenia na ścinanie (III seria) spowodowało zmianę w liczbie i charakterze powstających rys. Ich powstawanie i otwarcie następowało przy niewielkiej sile, podobnej jak w pierwszych dwóch seriach. Jednak tym razem można było zaobserwować od 6 do 10 rys, z czego większość była nachylona pod kątem mniejszym niż 45° od osi poziomej belki.

Dalsze zwiększenie stopnia zbrojenia nie wpłynęło na liczbę rys, jednak zmniejszyło ich kąt nachylenia. Nośność belek z III i IV serii została wyczerpana przy sile  $P$  rzędu 22,5 kN w strefie nieobjętej badaniem.

### BIBLIOGRAFIA

1. Godycki-Ćwirko T., *Ścinanie w żelbecie*. Arkady, Warszawa 1968.
2. Godycki-Ćwirko T., *Mechanika betonu*. Arkady, Warszawa 1982
3. Nielsen M. P., Hoang L. C., *Limit Analysis and Concrete Plasticity*, CRC Press Taylor&Francis Group, Boca Raton 2011.
4. Czumaj P., *Porównanie i weryfikacja modeli ścinania stosowanych w wymiarowaniu belek żelbetowych*, praca dyplomowa magisterska, Politechnika Warszawska, WIL, Warszawa 2016.
5. Dąbrowski K., Stachurski W., Zieliński J.L., *Konstrukcje betonowe*, Arkady, Warszawa 1976.
6. PN-EN 1992-1-1 (EC2), *Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1. Reguły ogólne i reguły dla budynków*.
7. Instrukcja 194/98, *Badania cech mechanicznych betonu na próbkach wykonanych w formach*, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 1998.
8. Zararis P.D., Papadakis G.Ch., *Shear Strength and Minimum Shear Reinforcement of Reinforced Concrete Slender Beams*, Journal of Structural Engineering, 2003.

## INFLUENCE OF SHEAR REINFORCEMENT ON DEVELOPMENT OF SHEAR CRACKS IN RC BEAMS – RESULTS OF EXPERIMENTAL TESTS

### Abstract

*Experimental results for cracks development in RC beams are presented in this paper. Experiments have been designed to observe initiation and development of cracking in the shear zones under variable shear reinforcement. Four types of the shear reinforcement has been used: no reinforcement, less than the minimum, the minimum and above the minimum. Two measuring techniques including Aramis system were used in observation of crack patterns and failure modes progress.*

Autorzy:

dr inż. **Maria Włodarczyk** – Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Łądowej, Instytut Inżynierii Budowlanej, al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa, e-mail: maria.wlodarczyk@il.pw.edu.pl  
mgr inż. **Przemysław Czumaj** – Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Łądowej, Instytut Inżynierii Budowlanej, al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa, e-mail: p.czumaj@il.pw.edu.pl