



## Wpływ osłabienia betonu rozciąganego na rozwój zarysowania i niszczenia belek betonowych i żelbetowych

MARTA SŁOWIK

Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury,  
ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, m.slowik@pollub.pl

**Streszczenie.** W pracy przedstawione zostały wyniki badań własnych dotyczących oceny rysoodporności i nośności belek zginanych wykonanych z betonu. W belkach różnicowany był stopień zbrojenia podłużnego: od zerowego — belki betonowe, poprzez niski 0,12% — belki słabo zbrojone, średni 0,9% — typowe belki żelbetowe, aż do wyższego 1,3% i 1,8%. Przeprowadzone badania pozwoliły na ocenę rysoodporności i nośności belek w zależności od stopnia zbrojenia podłużnego. Na podstawie obserwacji badań i wyników obliczeń numerycznych prześledzone zostały procesy związane z powstawaniem i rozwojem zarysowania w belkach betonowych niezbrojonych i zbrojonych o różnym stopniu zbrojenia oraz rola rozwoju aktywnej strefy mikrozarzysowania i osłabienia betonu rozciąganego w mechanizmach prowadzących do zniszczenia belek.

**Słowa kluczowe:** budownictwo, elementy betonowe i żelbetowe, rysoodporność i nośność

**DOI:** 10.5604/01.3001.0013.1481

### 1. Wstęp

Praca elementów konstrukcyjnych wykonanych z betonu i ich nośność jest uwarunkowana zarysowaniem betonu. W związku z tym, że wytrzymałość betonu na rozciąganie jest znacznie niższa niż wytrzymałość na ściskanie, konstrukcje z betonu są zazwyczaj zbrojone prętami stalowymi w strefach występowania naprężeń rozciągających. Zadaniem zbrojenia jest przeniesienie naprężeń rozciągających po zarysowaniu betonu i zabezpieczenie elementu przed kruchym zniszczeniem. Efektywność podłużnego zbrojenia rozciąganego zależy od stopnia zbrojenia.

Jedynie szeroka analiza przebiegu procesów związanych z powstawaniem i rozwojem rys może doprowadzić do poprawnej oceny wpływu zastosowanego zbrojenia na rysoodporność i nośność elementu zginanego. Jednym z mechanizmów mających wpływ na przebieg procesu zniszczenia w belkach zginanych jest zjawisko osłabienia betonu rozciąganego w aktywnej strefie mikrozarysowania.

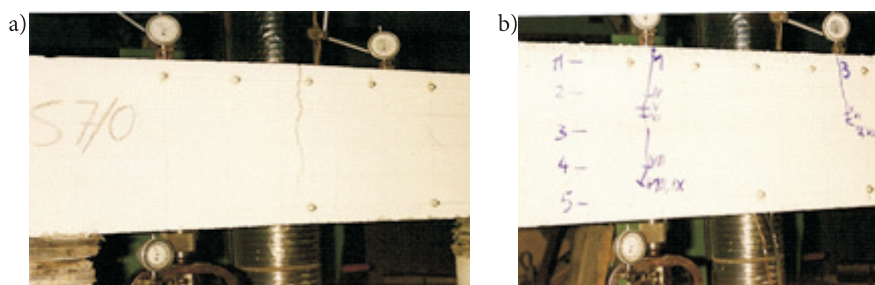
W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych i analiz numerycznych, na podstawie których dokonano oceny wpływu osłabienia betonu rozciąganego na rozwój zarysowania i niszczenia belek betonowych niezbrojonych i zbrojonych o różnym stopniu zbrojenia podłużnego. Badania i analizy zostały wykonane w dwóch etapach. Etap pierwszy obejmował belki betonowe niezbrojone i słabo zbrojone, a drugi belki żelbetowe o typowym i wyższym stopniu zbrojenia podłużnego.

## 2. Analiza zarysowania w belkach betonowych niezbrojonych i słabo zbrojonych

W celu analizy zarysowania i niszczenia belek betonowych niezbrojonych i słabo zbrojonych wykorzystano wyniki badań doświadczalnych przeprowadzonych w ramach szerszego programu badawczego. Badane belki betonowe niezbrojone i słabo zbrojone miały długość 3 m i stały przekrój prostokątny o wymiarach  $150 \times 300$  mm. Badania belek zostały przeprowadzone w teście czteropunktowego zginania, a rozpiętość belek (odległość w osiach podpór) wynosiła 2,7 m. Zastosowano sposób obciążania przez wymuszanie przemieszczeń badanych elementów. Belki były obciążane od dołu za pomocą dwóch podnośników hydraulicznych, które były umiejscowione w  $1/3$  rozpiętości. Obciążenie z podnośników zadawano w ten sposób, by uzyskać stałe przyrosty przemieszczenia belki, a wykalibrowane siłomierze pozwalały na odczyt zadawanego obciążenia. Wykorzystanie odwróconego schematu obciążania i obciążanie poprzez wymuszanie przemieszczeń wpłynęło na spowolnienie procesu niszczenia belek, co umożliwiło dokładną obserwację rozwoju zarysowania w belkach. Opis badań i szczegółowe zestawienie otrzymanych wyników przedstawiono w [1]. W niniejszej pracy wykorzystano wyniki badań trzech belek betonowych i trzech belek słabo zbrojonych o stopniu zbrojenia podłużnego  $\rho_l = 0,12\%$ . Cechy wytrzymałościowe betonu zostały wyznaczone na podstawie standardowych badań na próbkach i wyniosły: wytrzymałość betonu na ściskanie —  $f_{cm} = 20,4$  MPa, wytrzymałość betonu na rozciąganie  $f_{ctm} = 1,48$  MPa, moduł sprężystości betonu —  $E_{cm} = 22$  GPa. Do wykonania betonu zastosowano kruszywo o uziarnieniu do 32 mm. Do zbrojenia belek słabo zbrojonych użyto prętów o średnicy 4,5 mm, poddanych procesowi wyżarzenia w celu uzyskania wyraźnej granicy plastyczności stali, która wyniosła  $f_y = 275$  MPa.

W belkach betonowych niezbrojonych powstanie pierwszej rysy prostopadłej prowadziło do nagłego kruchego zniszczenia. Rysa niszcząca pojawiła się w środkowym

odcinku belki. Charakter zniszczenia belek betonowych bez zbrojenia był gwałtowny, a moment rysujący decydował jednocześnie o nośności belek na zginanie. W belkach słabo zbrojonych o stopniu zbrojenia podłużnego 0,12% zaobserwowano dwie lub trzy rysy prostopadłe do osi zbrojenia podłużnego, które pojawiły się przy wyższym poziomie obciążenia niż w belkach niezbrojonych. Zniszczenie było wynikiem szybkiej propagacji jednej z rys prostopadłych i podobnie jak w belkach betonowych niezbrojonych zaobserwowano kruchy charakter zniszczenia. Przykładowe obrazy zarysowania uzyskane w belce betonowej i słabo zbrojonej pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Przebieg zarysowania: a) w belce betonowej, b) w belce słabo zbrojonej

Wymuszany podczas badań przyrost przemieszczeń w belce wynoszący 0,05 mm był relatywnie mały, co umożliwiło dokładne określenie momentu zarysowania. Wartość momentu rysującego była wyznaczana na podstawie sił odczytanych z siłomierzy umieszczonych przy podnośnikach hydraulicznych w chwili zarysowania i z uwzględnieniem ciężaru własnego belki. W belkach słabo zbrojonych możliwe było kontynuowanie badania po pojawieniu się pierwszej rysy, ale przyrostowi przemieszczeń nie towarzyszył przyrost sił. Taki stan rzeczy spowodował, że moment rysujący był jednocześnie maksymalnym momentem zginającym. Zatem moment rysujący w belkach słabo zbrojonych także decydował o nośności na zginanie, ale osiągał wyższe wartości od tego uzyskanego w belkach bez zbrojenia. W tabelicy 1 zestawiono średnie wartości momentu rysującego  $M_{cr}$  i niszczącego  $M_{ult}$  uzyskane podczas badań.

TABELA 1

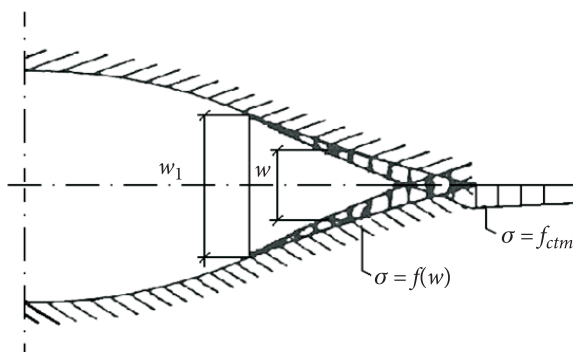
Rysoodporność i nośność belek betonowych i słabo zbrojonych

Belki	$\rho_l$ [%]	$M_{cr}$ [kNm]	$M_{ult}$ [kNm]
Betonowe	0,00	5,08	5,08
Słabo zbrojone	0,12	5,39	5,39

Według zaleceń normy Eurokod 2 [2] moment rysujący można wyznaczyć na podstawie sprężystej pracy elementu zginanego w fazie I ze wzoru (1).

$$M_{cr}^T = f_{ctm} W_c \quad (1)$$

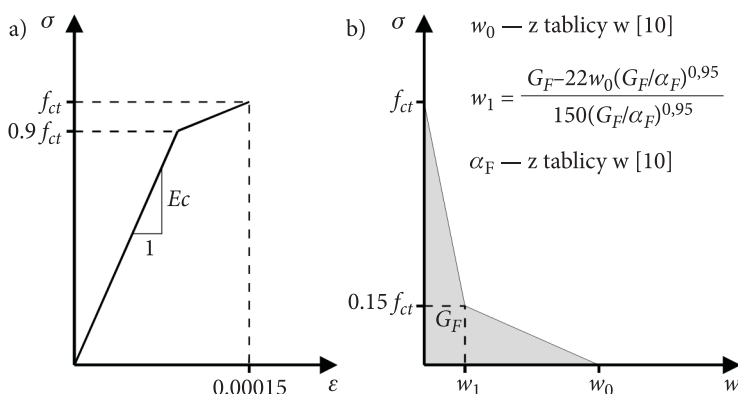
W badaniach uzyskano wyższą rysoodporność belek od rysoodporności wynikającej z teoretycznego momentu rysującego wyznaczonego ze wzoru (1)  $M_{cr}^T = 3,33 \text{ kNm}$ . W celu wyjaśnienia zwiększonej rysoodporności belek wykonano obliczenia komputerowe przy zastosowaniu metody elementów skończonych, które pozwoliły na przeanalizowanie mechanizmów prowadzących do powstania rys w belkach. W obliczeniach numerycznych do opisu betonu rozciąganego wykorzystano założenia nieliniowej mechaniki pęknięcia i model pasma mikrorys. Model pasma mikrorys opiera się na założeniach modelu rysy fikcyjnej, który został zaproponowany przez Hillerborga, Modeera i Peterssona [3]. W modelu tym przyjęto, że rysa zaczyna się tworzyć, gdy naprężenie w wierzchołku rysy osiąga wytrzymałość betonu na rozciąganie  $f_{ct}$ . Naprężenie w betonie nie spada wtedy od razu do zera, ale maleje wraz ze zwiększaniem się szerokości rozwarcia rysy  $w$  i osiąga wartość zerową dopiero przy szerokości rysy  $w = w_1$ . W strefie aktywnego mikrozarzysowania, gdzie  $w < w_1$ , istnieją więzy pozwalające na przenoszenie naprężeń (rys. 2).



Rys. 2. Model rysy fikcyjnej

Zastosowanie modelu pasma mikrorys w obliczeniach numerycznych wymaga określenia parametrów betonu rozciąganego zdefiniowanych w ramach nieliniowej mechaniki pęknięcia. Parametrami tymi są: energia pęknięcia ( $G_F$ ), szerokość pasma mikrorys ( $w_c$ ) oraz kształt zależności naprężenie–odkształcenie ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) i naprężenie–szerokość rozwarcia rysy ( $\sigma$ - $w$ ) dla betonu rozciąganego. Badania nad zastosowaniem mechaniki pęknięcia do opisu zachowania betonu i nad określeniem parametrów betonu zostały na szeroką skalę zapoczątkowane w drugiej połowie XX wieku [4÷7] i są kontynuowane [8, 9]. Wynikiem tych badań było przyjęcie znormalizowanych procedur wyznaczania parametrów betonu, które zamieszczono w zaleceniach CEB-FIP Model Code [10] i RILEM [11]. Na rysunku 3 przedstawiono zależności  $\sigma$ - $\epsilon$  i  $\sigma$ - $w$  opisujące beton rozciągany zaproponowane w Model Code [10], które zastosowano w obliczeniach komputerowych i które przeszły pozytywną weryfikację w odniesieniu do zginanych belek betonowych [12].

Obliczenia numeryczne przeprowadzono za pomocą programu ALGOR bazującego na metodzie elementów skończonych. Do rozwiązania układu równań nieliniowych wykorzystano zmodyfikowaną metodę Newtona-Raphsona. W obliczeniach przyjęto parametry wytrzymałościowe betonu i stali zbrojeniowej takie jak w badaniach doświadczalnych oraz wyznaczono pozostałe parametry niezbędne do opisu betonu rozciąganego w zakresie podkrytycznym według zasad podanych w [10]:  $G_F = 83 \text{ Nm/m}^2$ ,  $\alpha_F = 10$ ,  $w_0 = 0,25 \text{ mm}$ ,  $w_1 = 0,035 \text{ mm}$ ,  $w_c = 10 \text{ mm}$ . Szerzy opis przeprowadzonych obliczeń komputerowych zamieszczony jest w [13]. W wyniku obliczeń komputerowych zostały wyznaczone przemieszczenia węzłów siatki elementów skończonych i składowe naprężenia wzdłuż osi globalnego układu współrzędnych. Na tej podstawie sporządzono wykresy naprężeń normalnych na wysokości belki w przekroju, w którym doszło do powstania rysy.

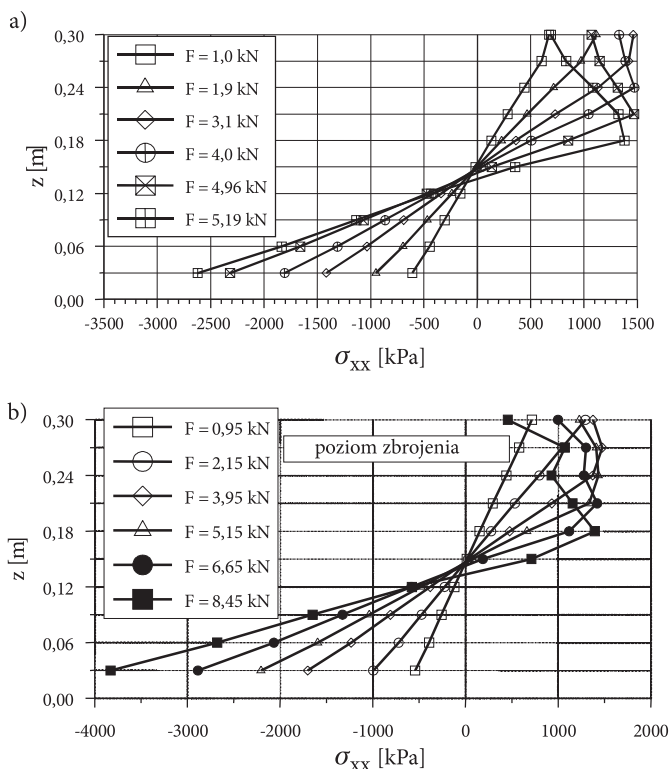


Rys. 3. Zależność  $\sigma$ - $\epsilon$  i  $\sigma$ - $w$  dla betonu rozciąganego wg [10]

Zjawisko stopniowego rozwoju mikrozarzysowania i przenoszenia naprężeń w przekroju zginanym belki betonowej przedstawiono na rysunku 4a. Analizując rozkład naprężeń w betonie w strefie rozciąganej (strefa górna na rys. 4a ze względu na odwrócony schemat obciążania), można prześledzić zjawisko osłabienia betonu. W początkowych etapach obciążenia (przy sile  $F = 1,0 \text{ kN}$ ,  $F = 1,9 \text{ kN}$ ) obserwowany jest liniowy rozkład naprężeń normalnych. W etapie obciążenia przy sile  $F = 3,1 \text{ kN}$  nastąpił wzrost naprężeń w skrajnych włóknach przekroju do wartości  $\sigma_{xx} = 1,5 \text{ MPa}$ , co stanowi osiągnięcie wytrzymałości betonu na rozciąganie  $f_{ctm}$ . Przy dalszym obciążaniu widoczny jest spadek wartości naprężeń normalnych we włóknach skrajnych, a wytrzymałość betonu na rozciąganie jest osiągana we włóknach coraz bardziej oddalonych od brzegu przekroju.

Analizując naprężenia w belce słabo zbrojonej o stopniu zbrojenia podłużnego 0,12% (rys. 4b), można zauważyć, że do etapu obciążenia  $F = 3,1 \text{ kN}$  wykresy naprężeń normalnych w przekroju przebiegają tak samo jak w belce niezbrojonej. Różnice

uwidaczniają się w etapach następujących po osiągnięciu wytrzymałości betonu na rozciąganie we włóknach skrajnych. Przy wzroście obciążenia spadek naprężeń w betonie w poziomie zbrojenia jest znacząco mniejszy niż we włóknach sąsiednich. Wyniki symulacji numerycznej wskazały, że obecność zbrojenia połączonego z betonem siłami przyczepności wpływa na spowolnienie procesu rozwoju mikrorys i łączenia się ich w rysę właściwą. To z kolei powoduje, że do zarysowania w belce słabo zbrojonej dochodzi przy większym obciążeniu niż w belce betonowej niezbrojonej.



Rys. 4. Wykres naprężeń normalnych w strefie mikrozarysowania: a) belka betonowa; b) belka zbrojona  $\rho_l = 0,12\%$

Na podstawie przeprowadzonych analiz numerycznych stwierdzono, że przy czynie zwiększonej rysoodporności belek słabo zbrojonych w porównaniu z rysoodpornością belek betonowych bez zbrojenia należy szukać w zmianie przebiegu powstawania rysy na skutek obecności zbrojenia podłużnego.

We wcześniej obowiązujących przepisach normowych dotyczących projektowania konstrukcji z betonu [14] wprowadzono uproszczony sposób uwzględnienia w obliczeniach zwiększonej rysoodporności elementów zginanych, wprowadzając tak zwany plastyczny wskaźnik wytrzymałości przekroju  $W_f$ . Dla przekroju prostokątnego

teoretyczny moment rysujący uwzględniający uplastycznienie betonu rozciąganego przybiera formę wzoru (2). W przypadku badanych belek zastosowanie wzoru (2) prowadzi do momentu rysującego  $M_{cr,pl}^T = 5,83$  kNm, co daje wartość większą niż uzyskane momenty rysujące podczas badań zarówno w elementach betonowych niezbrojonych, jak i słabo zbrojonych.

$$M_{cr,pl}^T = f_{ctm} W_f = 0,292 f_{ctm} b h^2 \quad (2)$$

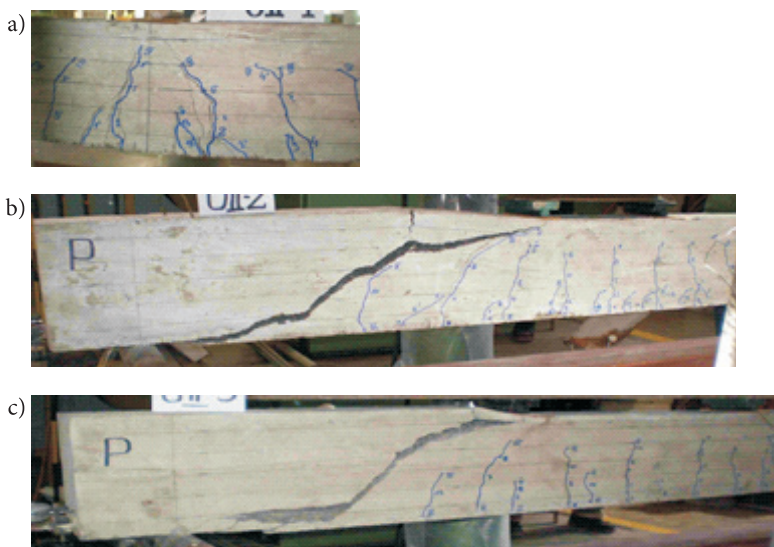
Zastosowanie nieliniowej mechaniki pęknięcia do analizy procesów powstawania rys w elementach betonowych bez zbrojenia i ze zbrojeniem pomogło w wyjaśnieniu zwiększonej rysoodporności elementów zginanych, niż wynikałoby to z zastosowania teorii sprężystości. Jednocześnie przeprowadzone obliczenia pokazały, że przyjęcie prostokątnego wykresu naprężeń rozciągających na całej wysokości strefy rozciąganej, które było podstawą wyprowadzenia wzoru (2), może prowadzić do niebezpiecznie zawyżonych wartości momentu rysującego w porównaniu do wyników badań doświadczalnych.

### 3. Analiza zarysowania w belkach żelbetowych

Analizę charakteru zniszczenia elementów żelbetowych przeprowadzono na podstawie badań własnych, które szeroko opisano w [15]. Przebadano belki o wymiarach: całkowita długość 2,05 m, rozpiętość podczas badań 1,8 m, wymiary przekroju  $120 \times 250$  mm. W belkach różnicowany był stopień zbrojenia podłużnego, który wynosił  $\rho_l = 0,9\%$ ,  $\rho_l = 1,3\%$  i  $\rho_l = 1,8\%$ . W elementach badawczych nie stosowano zbrojenia poprzecznego. Belki były obciążane aż do zniszczenia jedną siłą skupioną przykładaną za pomocą maszyny wytrzymałościowej w środku rozpiętości elementu badawczego. Cechy wytrzymałościowe betonu zostały wyznaczone na podstawie standardowych badań na próbkach. Uzyskano: wytrzymałość betonu na ściskanie —  $f_{cm} = 35$  MPa, wytrzymałość betonu na rozciąganie —  $f_{ctm} = 3,5$  MPa, moduł sprężystości betonu —  $E_{cm} = 41,4$  GPa. Do wykonania betonu użyto kruszywa o uziarnieniu do 16 mm. Do zbrojenia belek słabo zbrojonych użyto prętów żebrowanych o średnicy 12 mm i 18 mm o charakterystycznej granicy plastyczności stali wynoszącej  $f_{yk} = 500$  MPa. Podczas badań prowadzono obserwację powstawania i rozwoju rys w kolejnych etapach obciążenia.

We wszystkich belkach jako pierwsze powstały rysy prostopadłe w środkowym obszarze przeszła przy podobnym poziomie obciążenia. Ze względu na zastosowany stopień zbrojenia podłużnego w badanych belkach, pręty zbrojeniowe efektywnie przeniosły naprężenia rozciągające po zarysowaniu i możliwe było kontynuowanie obciążenia. Przy wzroście obciążenia powstawały kolejne rysy prostopadłe. W belce o typowym stopniu zbrojenia  $\rho_l = 0,9\%$  doszło do zniszczenia ze względu

na zginanie. Zaobserwowano stabilny rozwój rys prostopadłych i brak rys ukośnych w strefie przypodporowej, a nośność elementu na zginanie była zdeterminowana osiągnięciem granicy plastyczności stali i granicznych odkształceń betonu ściskanego. Zjawisko osłabienia betonu nie odgrywa znaczącej roli przy ocenie nośności tego typu elementu. Inaczej przebiegał proces zniszczenia elementów żelbetowych o wyższym stopniu zbrojenia podłużnego  $\rho_l = 1,3\%$  i  $\rho_l = 1,8\%$ . Zastosowane zbrojenie podłużne efektywnie zapobiegało wzrostowi rozwarcia rys prostopadłych, co umożliwiło dalszy rozwój zarysowania w strefie przypodporowej, w której na stan naprężenia ma wpływ oprócz momentu zginającego również siła poprzeczna. Przy wyższym poziomie obciążenia dochodziło w tych belkach do powstania rys ukośnych. Niszcząca rysa ukośna w badanych belkach powstała tylko z jednej strony w strefie przypodporowej. Rysa zaczęła się tworzyć w środku wysokości przekroju, a następnie propagowała w kierunku przyłożonego obciążenia i zbrojenia podłużnego. Rozwój rysy ukośnej prowadził do kruchego zniszczenia belki. Obraz zarysowania belek żelbetowych pokazano na rysunku 5, a w tabelicy 2 zestawiono otrzymane siły poprzeczne przy zarysowaniu ukośnym  $V_{cr}$  i siły niszczące  $V_{ult}$ .



Rys. 5. Obraz rys w belkach żelbetowych: a) o  $\rho_l = 0,9\%$ , b) o  $\rho_l = 1,3\%$ , c) o  $\rho_l = 1,8\%$

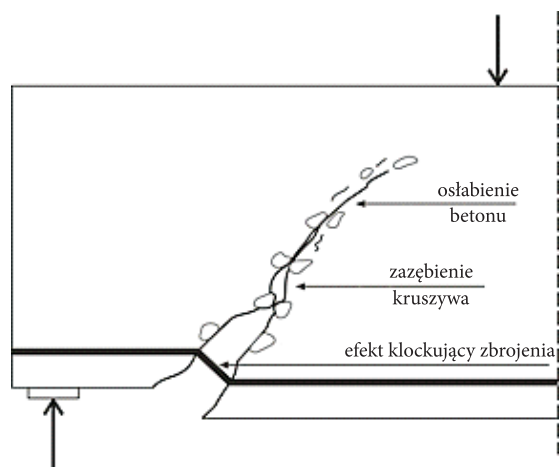
TABELA 2

Rysoodporność i nośność belek żelbetowych

Belki żelbetowe	$\rho_l$ [%]	$V_{cr}$ [kN]	$V_{ult}$ [kN]	$M_{ult} / M_{fl}$
Typowe	0,9	–	33,0	1,17
O wyższym stopniu zbrojenia	1,3	30,0	37,0	0,92
	1,8	37,5	43,5	0,89



W belce o stopniu zbrojenia  $\rho_l = 0,9\%$ , która zniszczyła się wskutek zginania, została osiągnięta pełna nośność na zginanie wynikająca z zastosowanego zbrojenia podłużnego  $M_{fl}$ . Natomiast w belkach o wyższym stopniu zbrojenia,  $\rho_l = 1,3\%$  i  $\rho_l = 1,8\%$ , doszło do zniszczenia na skutek jednoczesnego działania siły poprzecznej i momentu zginającego w strefie przypodporowej bez osiągnięcia pełnej nośności na zginanie  $M_{ult} / M_{fl} < 1$ . Ze względu na brak zbrojenia poprzecznego w belkach doszło do szybkiej propagacji rysy ukośnej. Na uwagę zasługuje jednak fakt, że mimo kruchego zniszczenia belek na skutek rozwoju rysy ukośnej, przebieg rozwoju rysy niszczącej był inny niż niszczącej rysy prostopadłej w belkach słabo zbrojonych. Do zniszczenia w tych belkach doszło przy wyższym obciążeniu niż obciążenie rysujące. Wynika to z faktu, że proces rozwoju rysy ukośnej przebiega w inny sposób niż rysy prostopadłej. Oprócz zjawiska osłabienia betonu, które ma miejsce w strefie efektywnego mikrozarzysowania przy wierzchołku rysy właściwej, istotnymi mechanizmami przenoszenia naprężeń w rysie ukośnej są zazębienie kruszywa i efekt klockujący zbrojenia. Na rysunku 6 pokazano mechanizmy towarzyszące powstawaniu i rozwojowi rysy ukośnej w belce żelbetowej.



Rys. 6. Mechanizm powstawania i rozwoju rysy ukośnej

#### 4. Wnioski

W belkach betonowych proces niszczenia zmienia się w zależności od zastosowanego stopnia zbrojenia podłużnego.

- Kruche zniszczenie związane z powstaniem rys prostopadłych ma miejsce w zginanych elementach betonowych i słabo zbrojonych. Przy analizie przebiegu propagacji rysy podstawowego znaczenia nabiera zjawisko osłabienia betonu rozciąganego, które odpowiada za zwiększoną

rysoodporność i tym samym nośność elementów słabo zbrojonych w porównaniu do elementów betonowych bez zbrojenia podłużnego.

- Stabilny rozwój rys prostopadłych i brak rys ukośnych jest obserwowany w belkach o typowym stopniu zbrojenia podłużnego.

Możliwe jest wtedy osiągnięcie pełnej nośności na zginanie związanej z uplastycznieniem stali zbrojeniowej lub miażdżeniem betonu ściskanego.

- W belkach o silnym stopniu zbrojenia podłużnego oprócz rys prostopadłych powstają rysy ukośne w strefach przypodporowych na skutek jednoczesnego działania momentu zginającego i siły poprzecznej. W przypadku belek, w których nie zastosowano zbrojenia poprzecznego, ma miejsce tzw. „zniszczenie na ścinanie”, które może przybrać kruchy charakter.

Przy wierzchołku rysy ukośnej powstaje strefa aktywnego mikrozarzysowania i zjawisko osłabienia betonu ma wpływ na poziom obciążenia rysującego. Do zniszczenia nie dochodzi jednak bezpośrednio po powstaniu rysy ukośnej, gdyż decydującymi mechanizmami przenoszenia naprężeń ścinających są ząbienie kruszywa w rysie ukośnej i efekt klockujący zbrojenia podłużnego. Te mechanizmy w większym stopniu niż zjawisko osłabienia betonu wpływają na sposób propagacji rysy ukośnej. O nośności decyduje siła poprzeczna, która jest zazwyczaj wyższa od siły poprzecznej powodującej powstanie rysy ukośnej.

Przeprowadzone badania dotyczyły belek wykonanych ze zwykłych betonów konstrukcyjnych. Ocena procesów zniszczenia w belkach z betonu o wysokiej wytrzymałości wymaga osobnej analizy.

Artykuł został opracowany na podstawie referatu wygłoszonego na XVI Krajowej Konferencji Mechaniki Pękania. Warszawa–Pułtusk, 12-15 września 2017 r.

Źródło finansowania pracy — działalność statutowa Politechniki Lubelskiej.

Artykuł wpłynął do redakcji 13.06.2018 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 4.09.2018 r.

Marta Słowik <http://orcid.org/0000-0001-9627-3625>

#### LITERATURA

- [1] SŁOWIK M., *Analiza nośności i zarzysowania zginanych elementów betonowych słabo zbrojonych*, Budownictwo i Architektura, 2, 2008, 65-78.
- [2] PN-EN 1992-1-1 Eurokod 2, *Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1.1: Reguły ogólne i reguły dla budynków*, PKN, Warszawa 2008.
- [3] HILLERBORG A., MODEER M., PETERSSON P.E., *Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements*, Cement and Concrete Research, 6, 1976, 773-782.
- [4] BAŽANT Z.P., PFEIFFER P.A., *Determination of Fracture Energy from Size Effect and Brittleness Number*, ACI Materials Journal, November-December, 1987, 463-480.

- [5] HU X.Z., WITTMANN F.H., *Fracture energy and fracture process zone*, Materials and Structures, 25, 1992, 319-326.
- [6] TANG T., YANG S., ZOLLINGER D.G., *Determination of Fracture Energy and Process Zone Length Using Variable-Notch One-Size Specimens*, ACI Materials Journal, 96, 1, 1999, 3-10.
- [7] OTSUKA K., DATE H., *Fracture process zone in concrete tension specimen*, Engineering Fracture Mechanics, 65, 2000, 111-131.
- [8] ROSSELLO C., ELICES M., GUINEA G.V., *Fracture model of concrete: 2. Fracture energy and characteristic length*, Cement and Concrete Research, 36, 7, 2006, 1345-1353.
- [9] KWON S.H., SHAH S.P., *Effect of specimen size on fracture energy and softening curve of concrete: Part I. Experiments and fracture energy. Part II. Inverse analysis and softening curve*, Cement and Concrete Research, 38, 8-9, 2018, 1049-1069.
- [10] CEB-FIP Model Code 1990 *Bulletin d'information* No. 196.
- [11] RILEM Draft Recommendation: *Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bent tests on notched beams*, Matériaux et Constructions, 18, 106, 1985, 258-290.
- [12] SŁOWIK M., BŁAZIK-BOROWA E., *Weryfikacja doświadczalna wybranych modeli betonu rozciąganego*, [w:] *Problemy naukowo-badawcze budownictwa*, t. 4, XLV Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 1999, 59-66.
- [13] SŁOWIK M., *The analysis of crack formation in concrete and slightly reinforced concrete member in bending*, [w:] *Brittle Matrix Composites 8*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2009, 351-360.
- [14] PN-84/B-03264: *Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie*, PKN, Warszawa 1984.
- [15] SŁOWIK M., *Nośność na ścinanie zginanych elementów żelbetowych bez zbrojenia poprzecznego*, Politechnika Lubelska, Lublin, 2016, 222.
- [16] SŁOWIK M., *Rola osłabienia betonu rozciąganego w rozwoju zarysowania i niszczenia belek betonowych i żelbetowych*, XVI Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania, Warszawa–Pułtusk, 12-15 września 2017 roku; Książka abstraktów. Wojskowa Akademia Techniczna, 2017, 63-65.

M. SŁOWIK

### **Influence of tensile softening of concrete on crack development and failure in concrete and reinforced concrete beams**

**Abstract.** In the paper, the own test results were presented. The experimental investigation was focused at determining the cracking and load capacity of beams made of concrete. The beams were characterized by different longitudinal reinforcement ratio from zero — plain concrete beams, through low ratio 0.12% — slightly reinforced concrete beams, middle ratio 0.9% — typical reinforced concrete beams, up to the ratios 1.3% and 1.8% — higher reinforced concrete beams. On the basis of the performed experiments and the results of numerical calculations, the process of crack's formation and crack's development in plain concrete, slightly reinforced concrete and reinforced concrete beams with different reinforcement ratio was described. When discussing cracking process in the beams, the contribution of strain softening of tensile concrete in the microcracked zone on the character of beams' failure was analysed as well.

**Keywords:** civil engineering, concrete and reinforced concrete members, cracking and load capacity

**DOI:** 10.5604/01.3001.0013.1481