



Inż. Łukasz LORKOWSKI

CPJS - Centrum Promocji Jakości Stali Sp. z o.o., Warszawa

BADANIE WPŁYWU CIĄGLIWOŚCI STALI ZBROJENIOWEJ NA ŚCINANIE ELEMENTÓW ŻELBETOWYCH

INFLUENCE OF REINFORCING STEEL DUCTILITY ON SHEAR OF REINFORCED STRUCTURES

Streszczenie Praca opisuje różnice w zachowaniu się konstrukcji żelbetowych zbrojonych stalami o różnej ciągliwości ze zwróceniem uwagi na nowy gatunek stali o podwyższonej ciągliwości B500SP-EPSTAL[®]. Referat zawiera charakterystykę użytych materiałów, opis faz zarysowania i zniszczenia badanych elementów poprzez ścinanie oraz analizę wykutych po badaniu strzemion

Abstract The paper describes the differences in behaviour of concrete beams reinforced with steel of varied ductility, giving special attention to the new grade of steel characterized by high ductility – B500SP - EPSTAL[®]. This work contains of characteristics of used materials, description of shear scratching, failure phases and analysis of stirrups forged out of the elements after the test.

1. Wstęp

W związku z wprowadzeniem do zbioru polskich norm normy *PN EN 1992-1-1:2005 (Eurokod 2)*¹ polscy producenci stali zbrojeniowej rozpoczęli produkcję nowego gatunku stali B500SP do zbrojenia betonu.

*Eurokod 2*¹ w rozdziale dotyczącym własności stali zbrojeniowej odwołuje się do normy *PN EN 10080:2005*², gdzie zawarte są generalne postanowienia dotyczące właściwości spawalnych stali zbrojeniowych.

Uzupełnieniem powyższej normy jest norma *PN-H-93220:2006*³ „Stal B500SP o podwyższonej ciągliwości do zbrojenia betonu. Pręty i walcówka żebrowana”. Opisuje ona szczegółowo własności nowego gatunku stali zbrojeniowej B500SP charakteryzującego się w odróżnieniu od produkowanych do tej pory gatunków (34GS, 18G2-b) połączeniem cech: wysokiej wytrzymałości $f_{yk} = 500\text{MPa}$ ($f_{yd} = 420\text{MPa}$) i podwyższonej ciągliwości $\epsilon_{uk} \geq 8\%$, $1,15 \leq (f_t / f_y)_k \leq 1,35$. Stal zgodnie z założeniami norm jest stałą w pełni spajalną (spawalną i zgrzewalną) we wszystkich swoich średnicach produkowanych od $\phi 8$ do $\phi 32$.

¹ PN-EN 1992-1-1:2005 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu -- Reguły ogólne i reguły dla budynków

² PN-EN 10080 Stal do zbrojenia betonu -- Spawalna stal zbrojeniowa -- Postanowienia ogólne

³ PN-H-93220:2006 Stal B500SP o podwyższonej ciągliwości do zbrojenia betonu -- Pręty i walcówka żebrowana

Stal zbrojeniowa w gatunku B500SP jako jedyna stal żebrowana produkowana w Polsce spełnia wymagania klasy C Eurokodu 2.

Tab.1 Klasyfikacja stali zbrojeniowej wg Eurokodu 2¹

Klasa	f_{yk} [MPa]	$k=(f_t/f_y)_k$	ϵ_{uk} [%]
A	400 ÷ 600	$\geq 1,05$	$\geq 2,5$
B		$\geq 1,08$	≥ 5
C		1,15 ÷ 1,35	$\geq 7,5$

2. Badania ścinania elementów żelbetowych

Opis badań opracowano w CPJS-CETRUM PROMOCJI JAKOŚCI STALI na podstawie sprawozdania z „Badań porównawczych belek żelbetowych na ścinanie” wykonanych w Katedrze Konstrukcji Budowlanych Politechniki Śląskiej przez zespół w składzie: dr Radosław Jasiński, mgr Radosław Kupczyk, mgr Mirosław Wieczorek pod kierownictwem prof. dr hab. inż. Włodzimierza Starosolskiego, zleconych przez CPJS- Centrum Promocji Jakości Stali Sp. z o.o.

2.1. Cel badań

Głównym celem przeprowadzonego badania było zaobserwowanie różnic w zachowaniu się żelbetowych jednoprzęsłowych belek zbrojonych poprzecznie strzemionami (prostopadłymi do osi podłużnej belek) ze stali o zróżnicowanej ciągliwości.

2.2. Modele badań

Badania dokonywano na zestawach badawczych, w ramach każdego zestawu belek założono zastosowanie zbrojenia poprzecznego z innego rodzaju stali zbrojeniowej dwóch średnic $\phi 8$ i $\phi 10$.

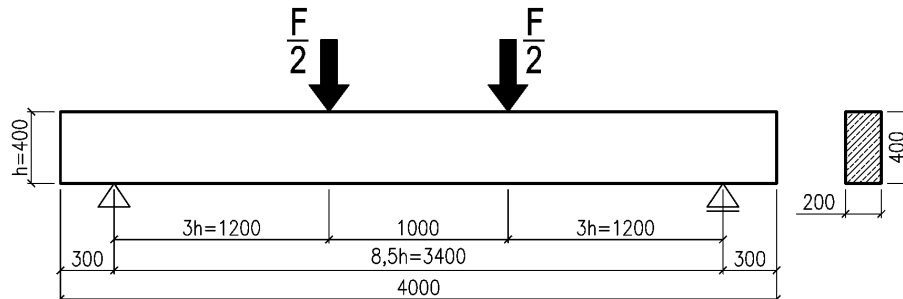
W skład każdego zestawu wchodziły dwie monolitycznie wykonane belki:

- BsI/8-1 – stal SI, strzemiona średnicy 8 mm,
- BsI/10-1 – stal SI, strzemiona średnicy 10 mm,
- BsII/8-1 – stal SII, strzemiona średnicy 8 mm,
- BsII/10-1 – stal SI, strzemiona średnicy 10 mm.

Podstawowymi parametrami zmiennymi (różniącymi modele) przyjęto gatunek stali SI- stal gorącowałcowana EPSTAL i SII stal zimnowalcowana oraz średnicę zbrojenia poprzecznego.

2.3. Schemat obciążenia i konstrukcja belek

Przyjęto obciążenie przęsła belek dwoma siłami skupionymi według schematu przedstawionego na rys.2. Położenie sił skupionych dobrano tak, aby uzyskać w środku rozpiętości stałą wartość momentu zginającego (od obciążenia zewnętrznego) i możliwie jak najdłuższy odcinek ścinania.

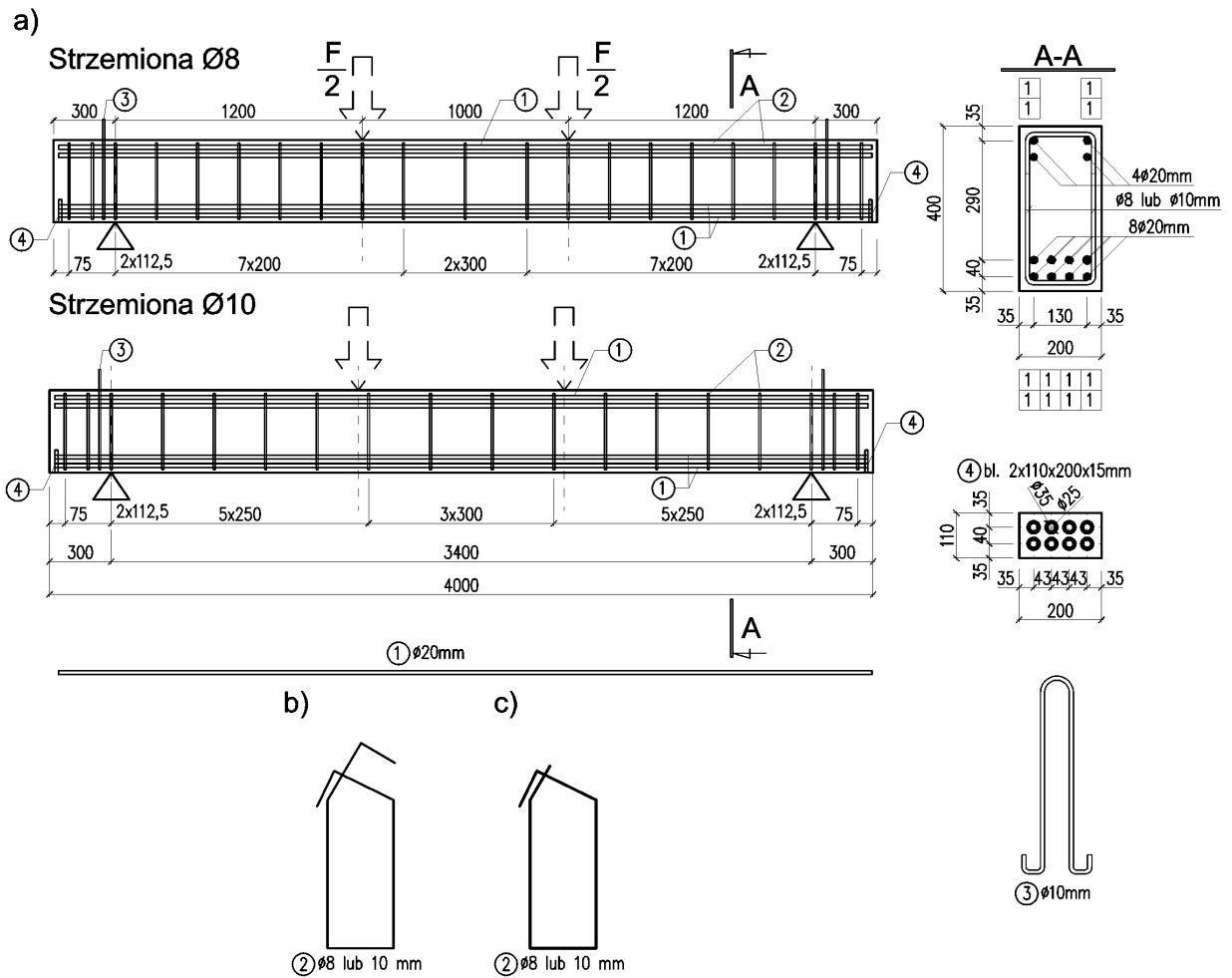


Rys. 1. Schemat obciążania modeli.

Pozostałe parametry tzn. stopień zbrojenia podłużnego, wytrzymałość betonu, sposób realizacji obciążenia założono jako jednakowe we wszystkich zestawach belek. Elementy badawcze przyjęto wykonać z betonu zwykłego na kruszywie otoczkowym o wytrzymałości na ściskanie odpowiadającej klasie B-25.

Wszystkie elementy miały taki sam prostokątny przekrój poprzeczny $0,4 \times 0,2$ m i długość całkowitą 4,0 m. Podparcie belek zrealizowano za pomocą dwóch podpór (przegubowo przesuwnej i przegubowo nieprzesuwnej) w rozstawie osiowym równym 3,4 m uzyskując w ten sposób ustrój swobodnie podparty jednoprzęsłowy z 0,3 metrowymi wspornikami z każdej strony podpory. Zbrojenie modeli składało się z podłużnych prostych prętów zbrojeniowych średnicy $\phi 20$ wykonanych ze stali SI i strzemion średnicy $\phi 8$ lub $\phi 10$ (ze stali typu SI i SII). Przy dolnej krawędzi belek, w strefie rozciąganej zastosowano $8\phi 20$ w dwóch rzędach, natomiast górą w strefie ściskanej $4\phi 20$ w dwóch rzędach (ze względu na konieczność wprowadzenia wibratora buławowego). Procent zbrojenia modeli wynosił odpowiednio: $\rho_1 = 3,62\%$ (strzemiona $\phi 8$) i $\rho_1 = 3,64\%$ (strzemiona $\phi 10$). Rozciągane dolne pręty podłużne kotwiono mechanicznie we wspornikach belek za pomocą poprzecznie przyspawanych blach $200 \times 110 \times 15$ mm. Ściskane pręty górne średnicy 20 mm kotwiono poza krawędziami podpór przyczepnościowo. Zbrojenie dolne dobrano w ten sposób, aby nie nastąpiła utrata nośności na zginanie w przekrojach maksymalnego momentu zginającego przy jednoczesnym zniszczeniu ze względu na ścinanie.

Zbrojenie poprzeczne stanowiły strzemiona prostopadłe do osi belki (wykonane z różnych typów stali) średnicy $\phi 8$ i $\phi 10$. Podłużny rozstaw strzemion obu średnic dobrano w ten sposób, aby uzyskać podobne nośności na ścinanie odcinków przypodporowych (z $\sim 25\%$ zapasem nośności na zginanie). Strzemiona średnicy 8 mm na odcinkach podporowych rozmieszczano co $s_1 = 0,2$ m, natomiast średnicy 10 mm co 25 cm. Na środkowym odcinku pomiędzy miejscami przyłożenia sił skupionych strzemiona rozmieszczono co 30 cm. Na wspornikach, ze względu na występowanie dużych sił docisku w strefie zakotwienia mechanicznego dolnych prętów podłużnych strzemiona rozmieszczono co 7,5 cm. Otulina wszystkich prętów zbrojenia podłużnego wynosiła $c_{nom} = 25$ mm, a zbrojenia poprzecznego $c_{nom} = 15$ mm i we wszystkich belkach była taka sama. Rysunek konstrukcyjny zbrojenia przedstawiono na rys. 2, a szczegóły na rys. 3.



Rys. 2. Rysunek konstrukcyjnych zbrojenia modeli badawczych: a) widok zbrojenia, b) kształt strzemion wydany w projekcie, c) strzemiona dostarczone przez Zamawiającego



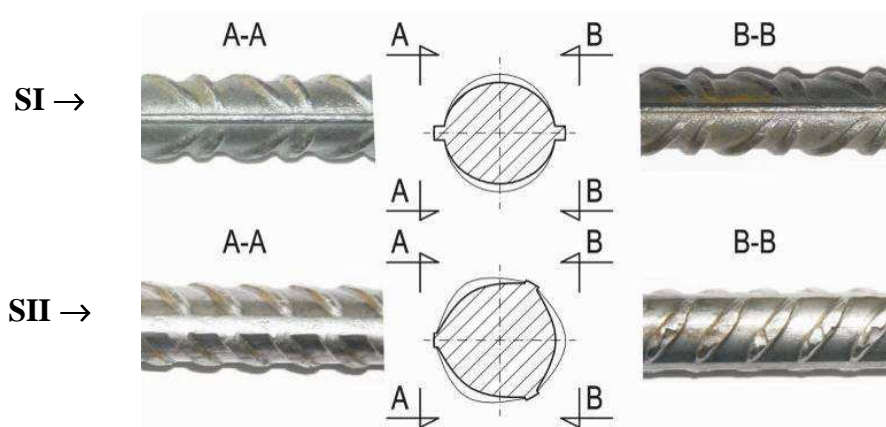
Rys. 3. Szczegóły zbrojenia belek.

3. Materiały - charakterystyka, wyniki badań

3.1. Stal zbrojeniowa

Jak wspomniano na wstępie, do badania użyto dwóch gatunków stali: stal o „dużej ciągliwości” - stal EPSTAL w gatunku B500SP, gorącowałcowana, wyprodukowana przez jednego z producentów krajowych oraz stal zimnowalcowana, również krajowej produkcji. Obie stале zaliczają się do klasy AIIIIN wg normy PN-B-03264:2002⁴ ponieważ charakterystyczna granica plastyczności (f_{yk}) obu stali wynosi 500 MPa. W przypadku stali EPSTAL własności mechaniczne uzyskuje się w procesie walcowania na gorąco z kontrolowanym chłodzeniem. Natomiast w stali zimnowalcowanej własności wytrzymałościowe uzyskuje się poprzez zgniot. Widok zewnętrzny oraz wzór uźebrowania stali zbrojeniowej pokazano na rys. 4.

Przyjęto nazywać stal każdego typu odpowiednio: SI i SII



Rys. 4. Typy stali zbrojeniowej użytej w badaniach

Badania stali wykonano zarówno na próbkach toczonych, zgodnie z wytycznymi normowymi PN-EN 10002-1:1998⁵ „Metale. Próba rozciągania. Metoda badania w temperaturze otoczenia”, jak i na próbkach nieobrobionych. Dokonano między innymi oznaczenia modułu sprężystości (E), granicy plastyczności (R_{eH} , lub $R_{p0,2}$) oraz całkowitego procentowego wydłużenia przy największej sile (A_{gt}). Wyniki badań dla próbek zestawiono w tablicy 2 i tablicy 3.

Tablica 2. Parametry wytrzymałościowe prętów zbrojeniowych nieobrobionych

Typ stali	Średnica próbki	Oznaczenie próbki	E	$R_{p0,2}$	R_{eH}	$R_{m,mean}$	$A_{gt,mean}$
			[MPa]	[MPa]	[MPa]		
			E_{mean}	$R_{p0,2,mean}$	$R_{eH,mean}$	[MPa]	[%]
SI	φ8	SI/8/N/1÷6	192309	-	524,026	615,962	8,920
	φ10	SI/10/N/1÷6	190457	-	536,124	624,676	8,585
	φ20	P/20/N/1÷6	181784	-	512,867	648,681	7,481
SII	φ8	SII/8/N/1÷6	193187	554,897	-	603,31	4,374
	φ10	SII/10/N/1÷6	189051	516,478	-	558,536	5,057

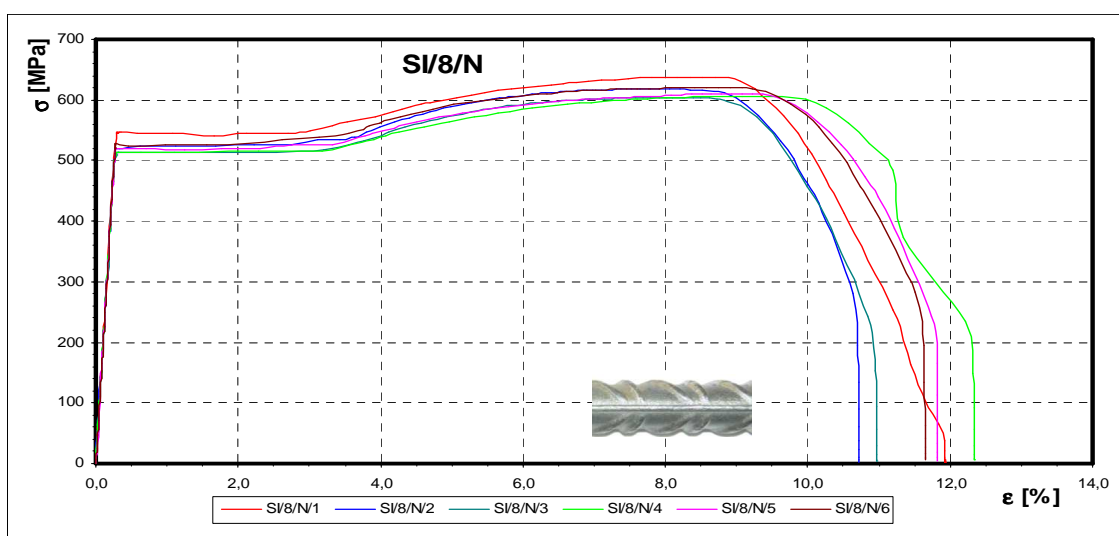
⁴ PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone -- Obliczenia statyczne i projektowanie

⁵ PN-EN 10002-1 Metale. Próba rozciągania. Metoda badania w temperaturze otoczenia

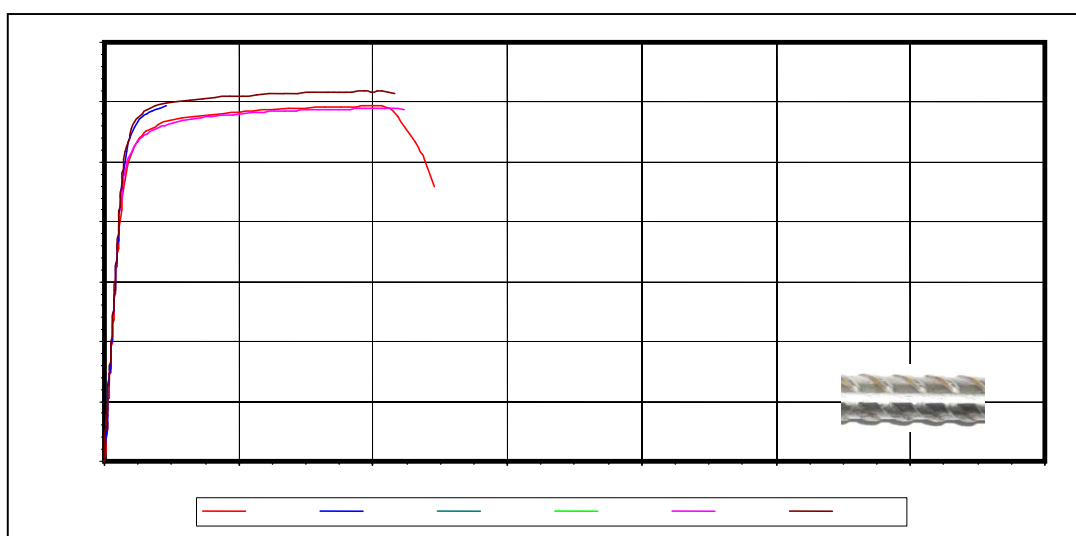
Tablica 3. Parametry wytrzymałościowe stali zbrojeniowych – pręty obrobione

Typ stali	Średnica próbki	Oznaczenie próbki	E [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	R _{eH} [MPa]
			E _{mean}	R _{p0,2,mean}	R _{eH,mean}
SI	φ8	SI/8/O/1÷6	196448	-	505,593
	φ10	SI/10/O/1÷6	204475	-	515,833
	φ20	P/20/O/1÷6	193839	-	504,436
SII	φ8	SII/8/O/1÷6	195195	643,333	-
	φ10	SII/10/O/1÷6	199091	547,667	-

Podczas badań rozciągania określono również krzywe zależności naprężeń od odkształceń dla obu gatunków stali, wyniki przedstawiono graficznie jako wykres zależność σ - ϵ rys. 5, rys 6.



Rys. 5. Porównanie zależności σ - ϵ . uzyskanych z badań nieobrobionych prętów średnicy 8mm. SI – stal EPSTAL



Rys. 6. Porównanie zależności σ - ϵ . uzyskanych z badań nieobrobionych prętów średnicy 8mm. SII – stal zimnowalcowana

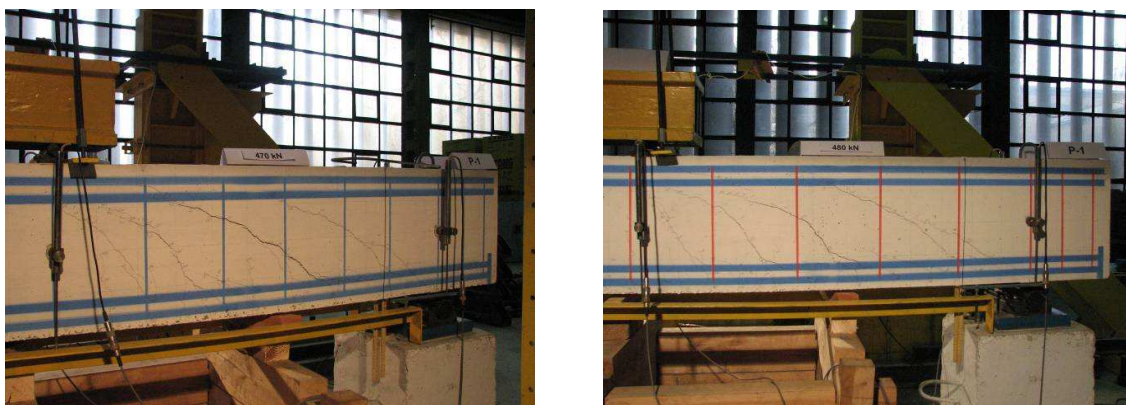
3.2. Beton

Kontrolę wzrostu wytrzymałości betonu prowadzono w okresie dojrzewania betonu, na próbkach kostkowych $150 \times 150 \times 150$ mm. Kolejne badania przeprowadzono po 3, 9 i 15 dniach na 3 kostkach, wynikiem była średnia arytmetyczna wytrzymałość z trzech próbek. Konsekwencją szybszego niż przewidywano wzrostu wytrzymałości (po 15 dniach dojrzewania uzyskano średnią wytrzymałość kostkową $f_{c,cube,m}=25$ MPa), było przyspieszenie terminu badań zasadniczych o 7 dni. Po 22 dniach dojrzewania betonu, w połowie okresu badań wytrzymałość betonu na ściskanie wynosiła $f_{c,cube,m}=32,2$ MPa, a po 28 dniach (w pierwotnym terminie badań) $f_{c,cube,m}=36,5$ MPa

4. Wyniki badań belek - analiza wyników

4.1. Zarysowanie i zniszczenie

Powstawanie rys w początkowym stadium obciążania modeli badawczych przebiegało w przypadku obu par belek podobnie. Pierwsze widoczne gołym okiem rysy rozwartości $0,05$ mm powstawały w środku rozpiętości przęseł następnie wzrost obciążenia prowadził do rozwoju i powstawania nowych rys prostopadłych od osi podłużnej belek oraz rys ukośnych w strefach przypodporowych. rys. 7.



Rys.7. Rozwój zarysowania w badanych elementach

Każdorazowy wzrost obciążenia powodował rozwieranie się rys ukośnych i wzrost przemieszczeń rejestrowany przez czujniki. W belkach zbrojonych strzemionami średnicy 10mm (stal SI i SII) oraz w belce Bsl/8-1 ze strzemionami $\phi 8$ ze stali SI nastąpiło zarysowanie poprzeczne (nad strzemionami) i podłużne (nad prętami podłużnymi $\phi 20$) górnej powierzchni belek. rys. 8.



Rys. 8. Zarysowanie górnej powierzchni belki

W chwili kiedy zasięg rys ukośnych osiągnął poziom zbrojenia górnego i miejsca przyłożenia obciążenia skupionego nastąpiło dość gwałtowne zniszczenie. W belkach w których wystąpiły zarysowania poprzeczne i podłużne górnej powierzchni dochodziło do prostowania się haków strzemion i odpadnięcia bocznej i górnej otuliny zbrojenia. Rys. 9.



Rys. 9. Zniszczenie elementu ze stalą SI

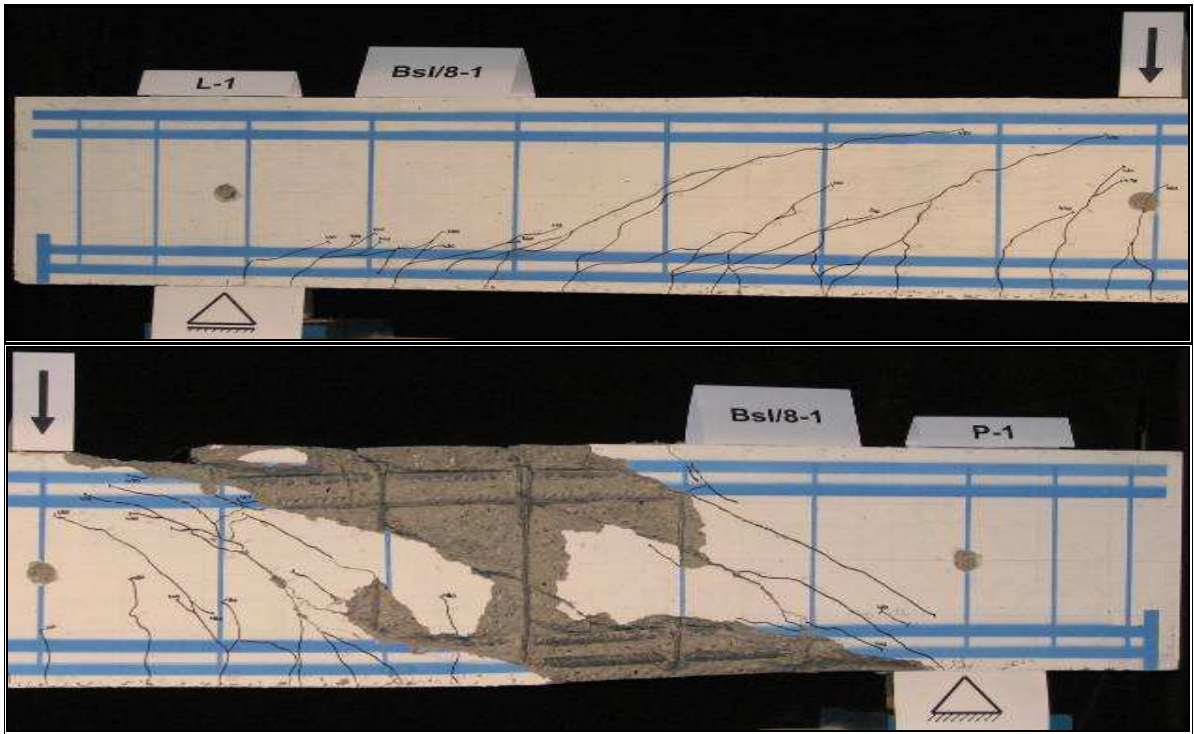
W belce BsII/8-1 obserwowano inny mechanizm zniszczenia. Kiedy rysy ukośne osiągnęły punkt przyłożenia obciążenia skupionego nastąpiło gwałtowne zerwanie obu ramion jednego ze strzemion i upadek belki na drewniane podpory tymczasowe – rys.10. W trakcie oględzin belki nie stwierdzono zarysowań górnej powierzchni ani rozgięcia haków strzemion, podobnie jak w przypadku pozostałych belek odpadła otulina zbrojenia z bocznych powierzchni belek.



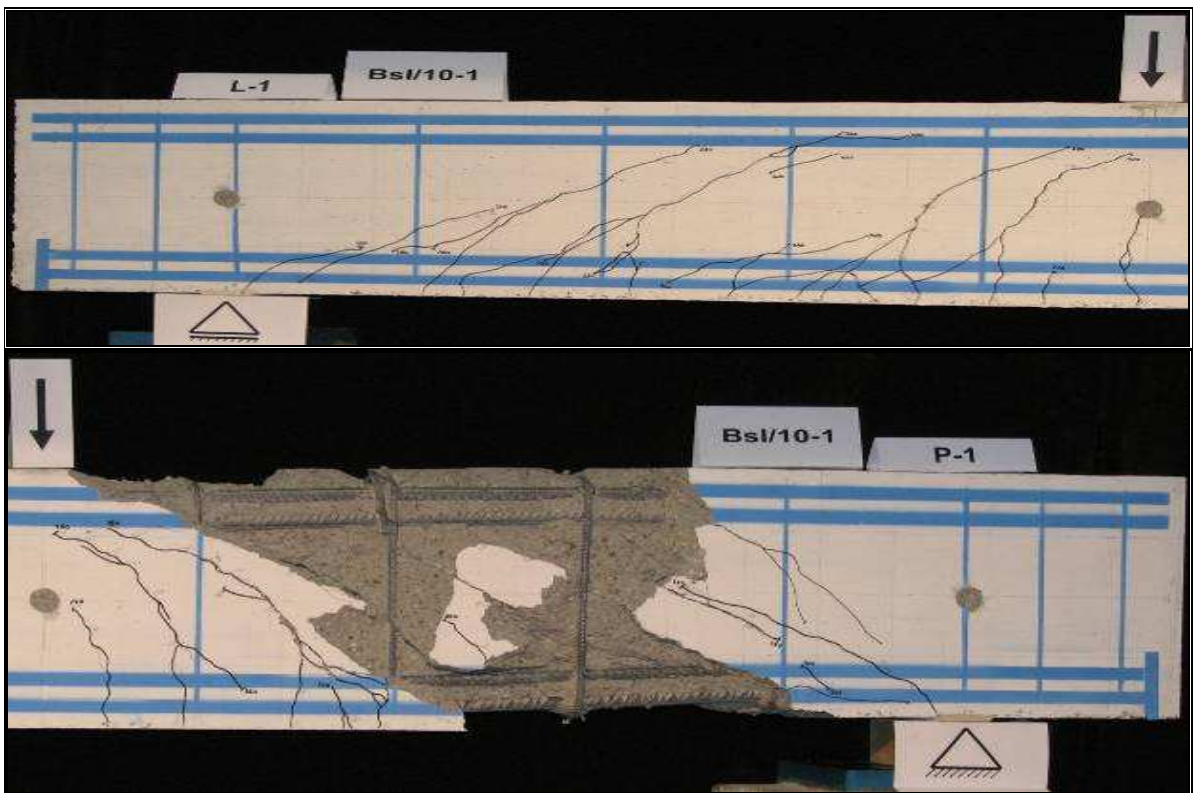
Rys.10. Zerwanie ramion strzemienia stal zimnowalcowana SII

W belkach zbrojonych strzemionami średnicy $\phi 8$ (BsI/8-1 i BsII/8-1) kierunek niemalże wszystkich rys wyznaczał punkt przyłożenia obciążenia, a zarysowania ukośne w bezpośrednim sąsiedztwie podpory w chwili zniszczenia osiągnęły około 1/3 wysokości przekroju. W przypadku belek zbrojonych strzemionami $\phi 10$ (BsI/10-1 i BsII/10-1) na odcinku ścinania powstało kilka równoległych do siebie rys ukośnych o podobnym jak w belkach ze strzemionami $\phi 8$ pochyleniu rys.11÷ rys. 14 (strona L-1). Zniszczenie wszystkich belek wystąpiło w obszarze bliskim miejscu przyłożenia obciążenia skupionego, a rysa niszcząca przecinała 2 lub 3 strzemiona – rys. 11 – rys. 14 (strona P-1).

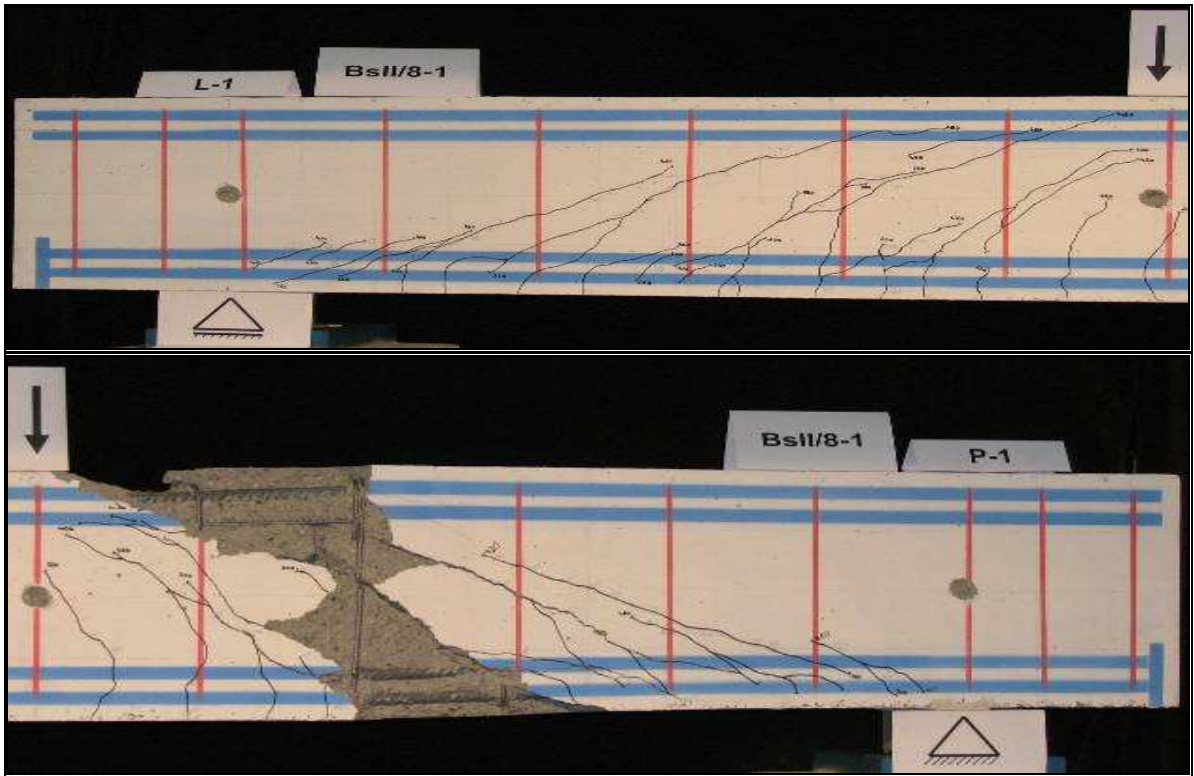
Po zakończeniu badań, strefy belek w których nastąpiło zniszczenie rozkuto, a strzemiona ostrożnie wydobyto, celem przeprowadzenia oględzin.



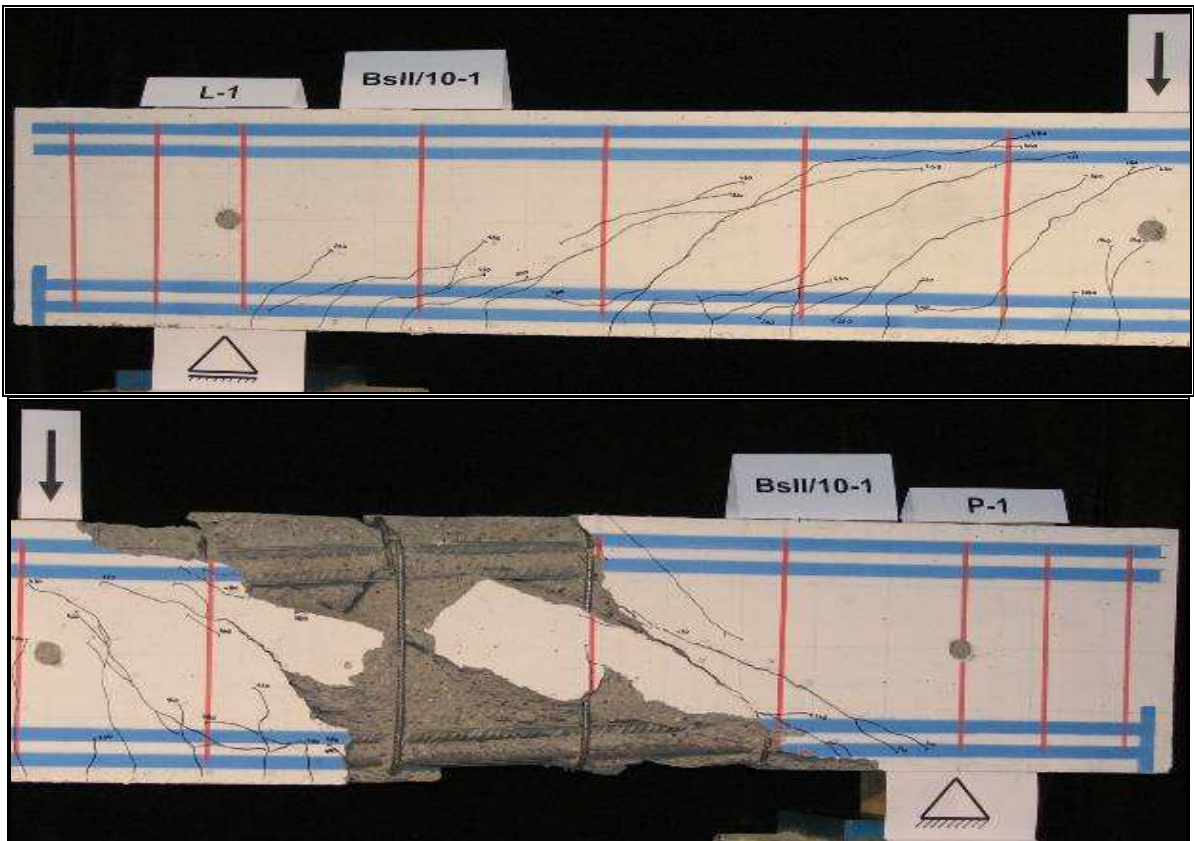
Rys.11. Obrazy zarysowania i zniszczenia odcinków podporowych belki Bsl/8-1



Rys. 12. Obrazy zarysowania i zniszczenia odcinków podporowych belki Bsl/10-1



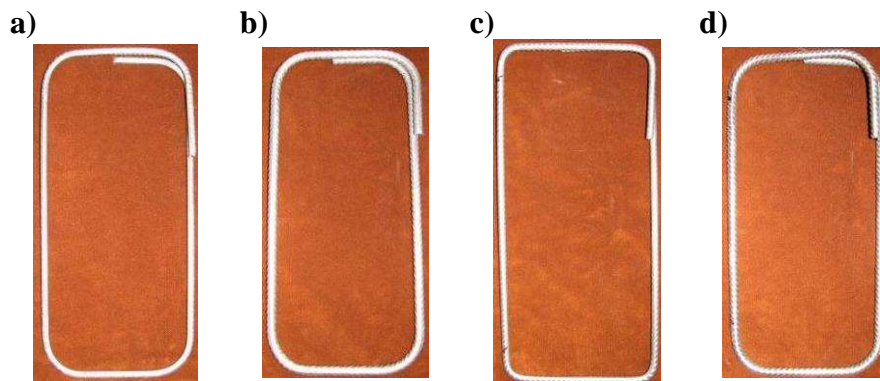
Rys. 13. Obrazy zarysowania i zniszczenia odcinków podporowych belki BsII/8-1



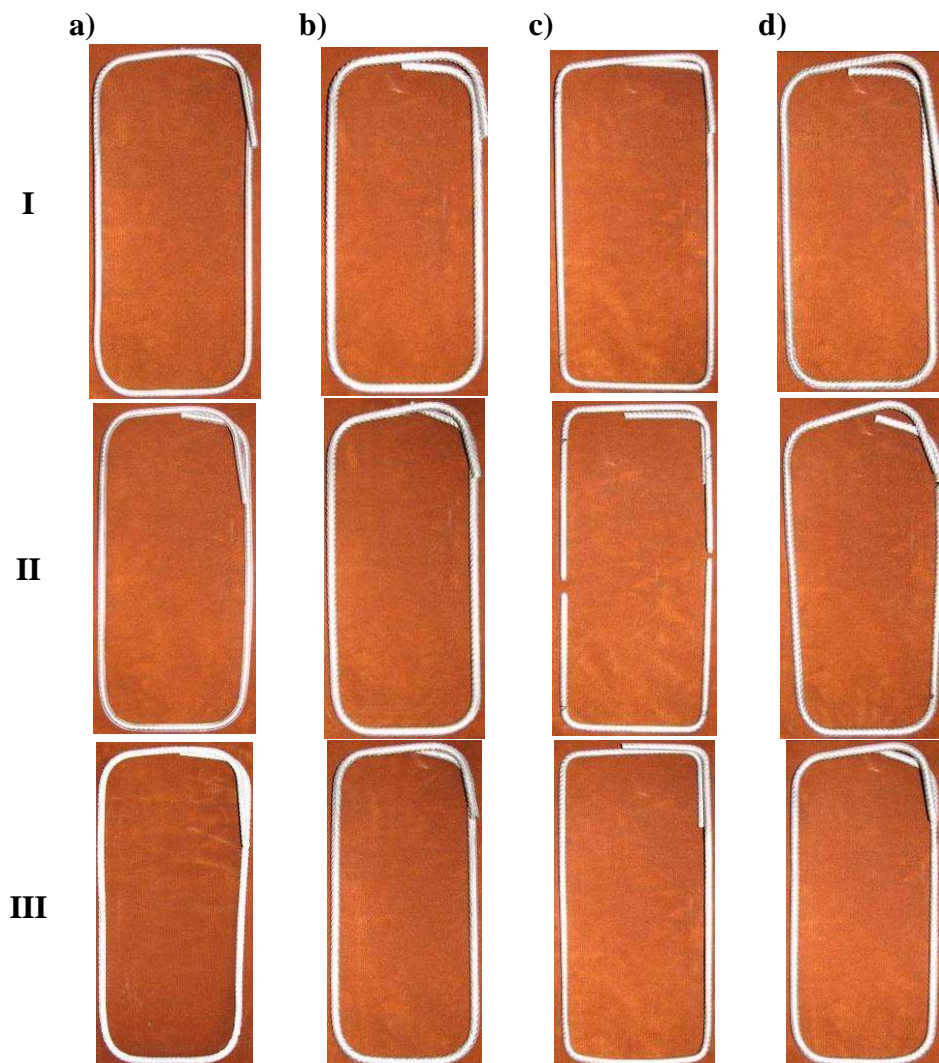
Rys. 14. Obrazy zarysowania i zniszczenia odcinków podporowych belki BsII/10-1

Na rys. 15 zamieszczono widok strzemion po usunięciu betonu z miejsca zniszczenia modeli.

W wszystkich strzemionach znajdujących się w obszarze zniszczenia zaobserwowano rozgięcie górnych ramion jak i haków prostych. Najmniejsze deformacje widoczne są w strzemionach średnicy 8 mm ze stali SI jak i zerwanych wykonanych ze stali SII. Zdecydowanie większe deformacje zaobserwowano w strzemionach $\phi 10$, w których wyraźniejsze są zarówno odchylenia ramion jak i haków prostych.



Rys. 15 a) strzemiona „świadki”



Rys. 15 b. Widok strzemion wykutych z belek: a) BsI/8-1, b) BsI/10-1, c) BsII/8-1, d) BsII/10-1.

5. Posumowanie

Przeprowadzone na Politechnice Śląskiej badania ukazały interesujące wyniki w postaci sposobu zniszczenia elementów. Utrata nośności w belkach ze względu na ścinanie związana była z zarysowaniem strefy ściskanej przekroju betonu oraz rozgięciem się haków prostych strzemion, a w jednym przypadku niebezpiecznym, gwałtownym zerwaniem obu ramion strzemiona.

Cytując autorów badań „(...) sensowne wydaje się podjęcie na szerszą skalę badań, których celem byłoby opracowanie zasad stosowania w belkach strzemion wykonanych ze stali klasy 500 (...) w sytuacji, gdy mogą one ulec zniszczeniu przez ścięcie.”

Stal EPSTAL dostępna jest w ofercie krajowych producentów, oprócz znaku jakości EPSTAL, posiada wszelkie niezbędne dopuszczenia i certyfikaty zarówno polskie jak i zagraniczne.