



**Badanie wpływu plastyczności zbrojenia  
na zachowanie się dwuprzęsłowej  
belki żelbetowej**

**Opracowanie:  
Centrum Promocji Jakości Stali**

# Spis treści

	Strona
<b>1. Cel badania</b>	<b>3</b>
<b>2. Opis stanowiska oraz modeli do badań</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Modele do badań</b>	<b>3</b>
<b>2.2. Stanowisko do badań</b>	<b>4</b>
<b>3. Materiały</b>	<b>7</b>
<b>4. Opis badania</b>	<b>7</b>
<b>5. Wyniki</b>	<b>8</b>
<b>5.1. Ugięcia</b>	<b>8</b>
<b>5.2. Zarysowania</b>	<b>9</b>
<b>5.3. Zniszczenie</b>	<b>11</b>
<b>6. Wnioski</b>	<b>12</b>

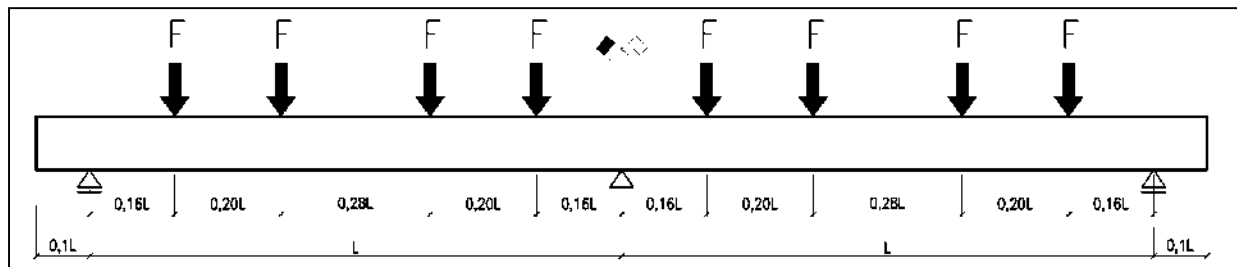
## 1. Cel badania

Celem badania jest określenie różnic w zachowaniu się dwuprzęsłowej belki żelbetowej zbrojonej w jednym przypadku stalą klasy A (o małej ciągliwości), natomiast w drugim przypadku stalą klasy C (o dużej ciągliwości).

## 2. Opis stanowiska oraz modeli do badań

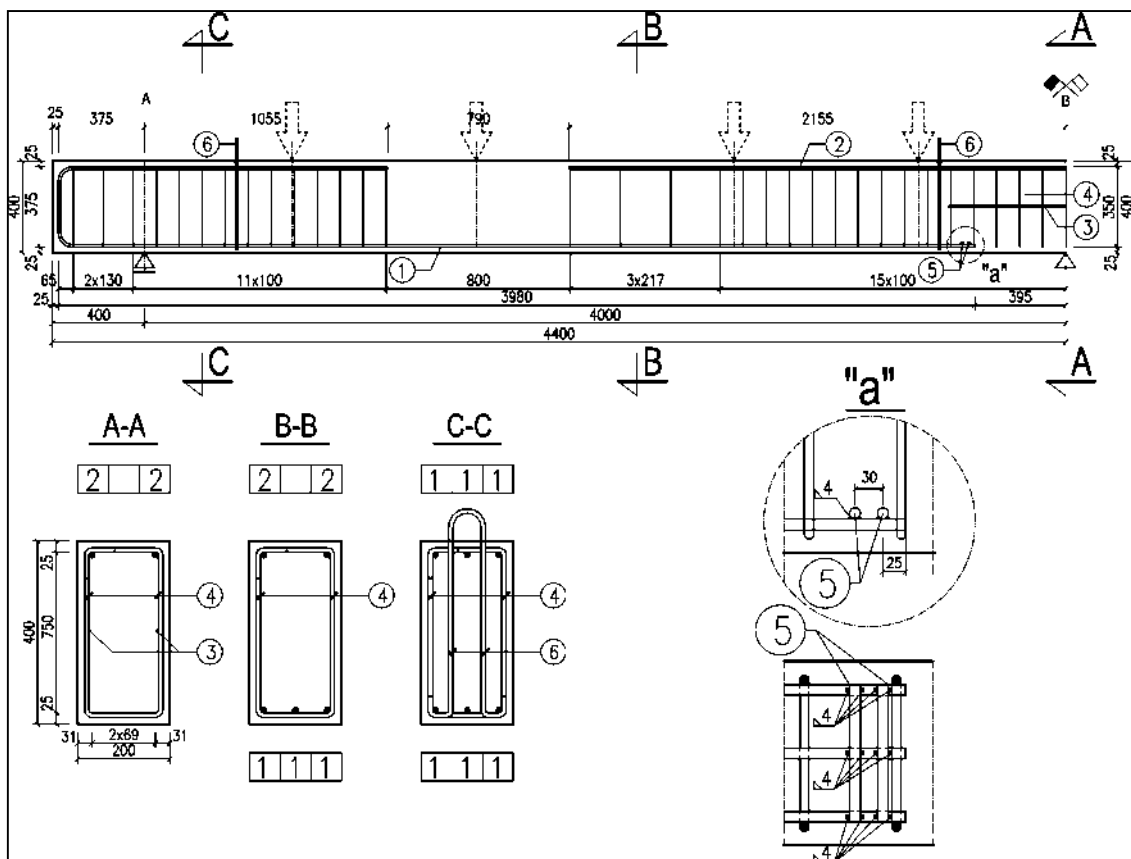
### 2.1. Modele do badań

Modele do badań stanowiły dwa zestawy dwuprzęsłowych belek żelbetowych, o wymiarach przekroju poprzecznego 0,4 m x 0,2 m oraz długości 8,8 m. Belki podparto na trzech podporach w rozstawie osiowym równym 4,0 m. Założono obciążenie belek ośmioma siłami skupionymi, dobranymi w taki sposób, aby jak najdokładniej odwzorować obciążenie równomiernie rozłożone. Schemat modelu belki obciążonego siłami skupionymi przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat obciążania modeli.

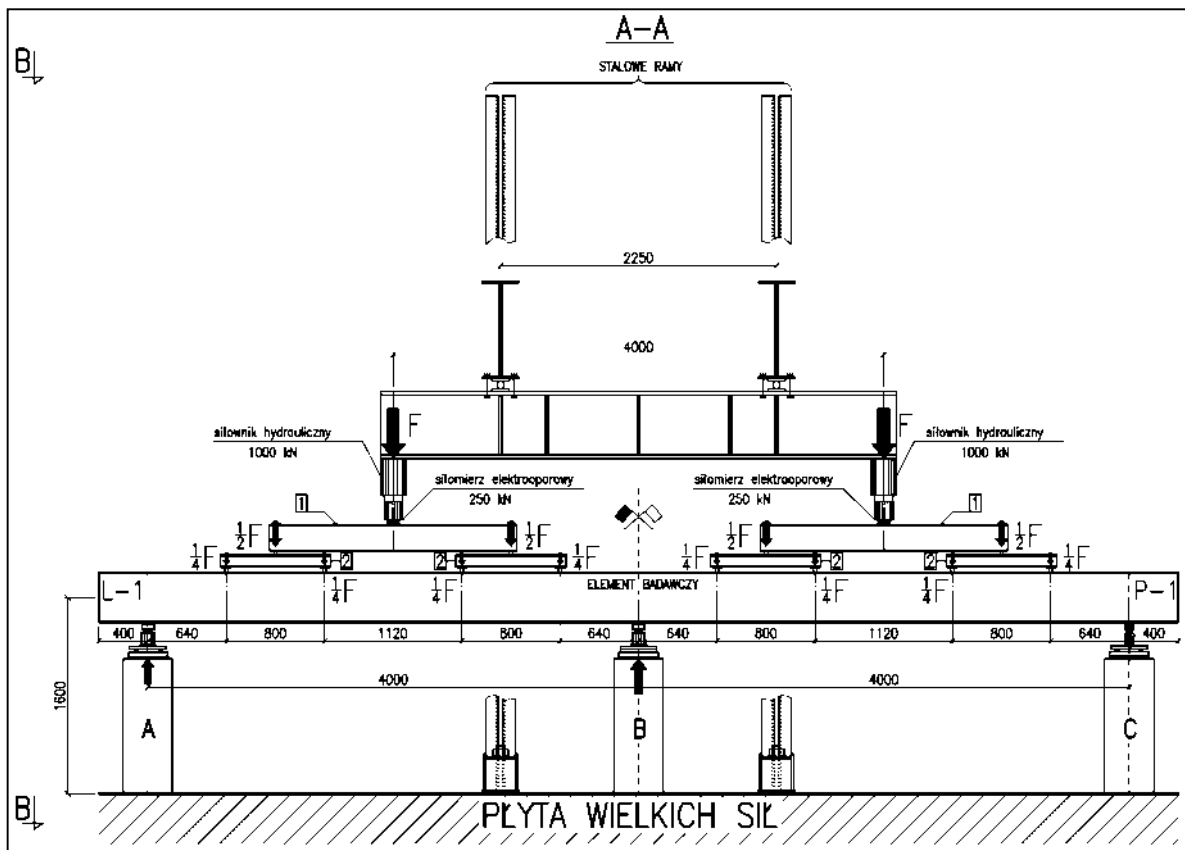
Zbrojenie modeli składało się z prostych, podłużnych prętów zbrojeniowych o średnicy  $\phi 12$  mm i strzemion o średnicy  $\phi 10$  mm. W każdym z modeli zastosowano jednakowe procenty zbrojenia podłużnego wynoszące  $\rho_1 = 0,46\%$  w przęsłach ( $3\phi 12$  mm) i  $\rho_2 = 0,31\%$  ( $2\phi 12$  mm) nad podporą wewnętrzną. Podłużny rozstaw strzemion dobrano tak, aby nie mogła nastąpić utrata nośności przekrojów przypodporowych ze względu na siły poprzeczne. Przy podporach skrajnych rozstaw był stały i wynosił  $s_1 = 0,1$  m. Przy podporze wewnętrznej rozstaw zmieniał się od  $s_1 = 0,1$  m do  $s_1 = 0,217$  m. W ściskanych strefach przekrojów przęsłowych belek, w których dokonywano pomiaru odkształceń stali rozciąganej, nie stosowano montażowego zbrojenia. 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.



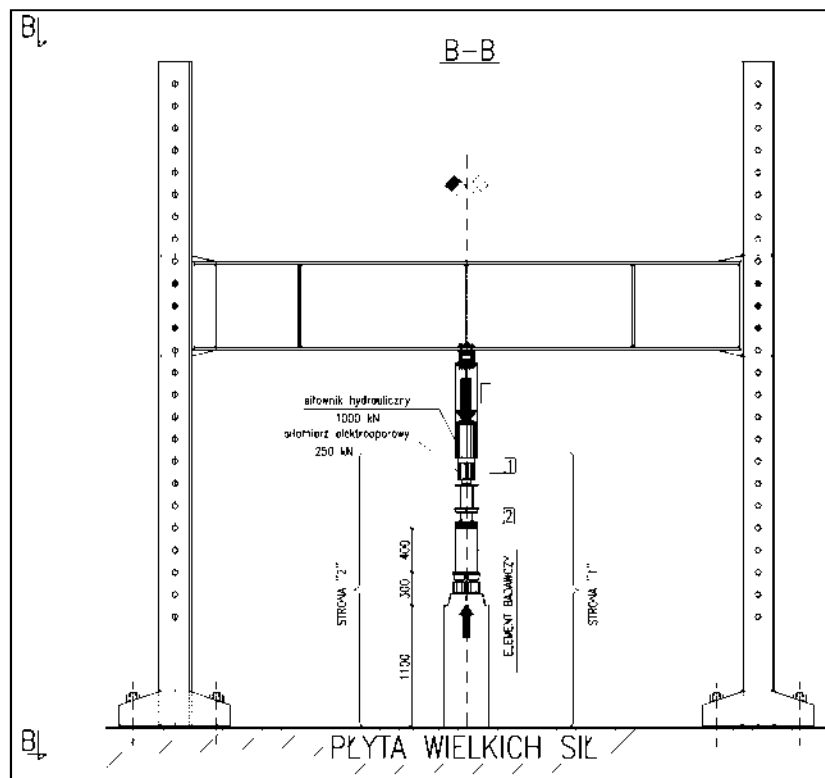
Rys. 2. Zbrojenie modeli badawczych.

## 2.2. Stanowisko do badań

Badanie wykonywano w specjalnie wykonanym stanowisku badawczym. Składało się ono z dwóch stalowych ram ustawionych poprzecznie do osi belki w rozstawie 2,25 m. Do ram przymocowano stalowy rygiel o długości 4,2 m, służący jako podpora dwóch siłowników hydraulicznych. Obciążenie przekazywane było przez siłowniki hydrauliczne oraz rozdzielane na 8 równych sił skupionych za pomocą rozdzielników obciążenia na element badawczy. Zastosowano 3 podpory: dwie przegubowo przesuwne (podpory skrajne) oraz podporę przegubowo nieprzesuwłą. Składały się one z betonowego bloku o wymiarach  $0,4 \times 0,4 \times 1,10$  m, na którym na warstwie zaprawy cementowej umieszczono stalowe płyty stanowiące oparcie dla siłomierzy lub śrub rektyfikacyjnych. Schemat stanowiska oraz widok na stanowisko przedstawiono na rys. 3, 4 i 5.



Rys. 3. Schemat stanowiska. Widok A-A.



Rys. 4. Schemat stanowiska. Widok B-B.



Rys. 5 i 6. Widok stanowiska badawczego.

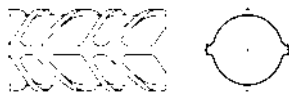
### 3. Materiały

Do wykonania modeli badawczych wykorzystano następujące materiały:

- Beton zwykły o klasie wytrzymałości C16/20
- Stal zbrojeniową o gatunku zależnym od zestawu belek:

#### Zestaw pierwszy (BI)

- ✓ Stal o dużej ciągliwości EPSTAL (SI)
- ✓ Klasa C wg EC2



$$\epsilon_{uk} > 7,5 \%$$
$$f_{tk}/f_{yk} > 1,15$$

#### Zestaw drugi (BII)

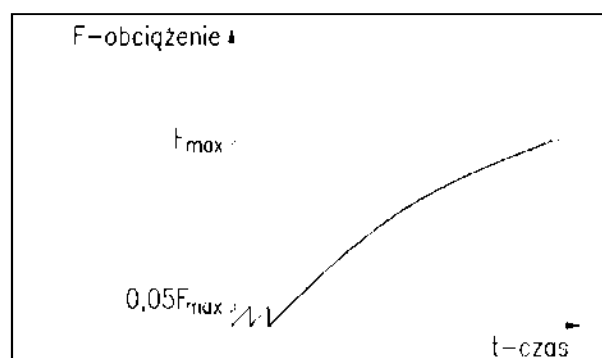
- ✓ Stal o małej ciągliwości (SII)
- ✓ Klasa A wg EC2



$$2,5 \% < \epsilon_{uk} < 5 \%$$
$$f_{tk}/f_{yk} > 1,05$$

### 4. Opis badania

Przed przystąpieniem do badania właściwego zważono modele oraz rektyfikowano na podporach tak, aby uzyskać wartości reakcji bliskie wartościom wyznaczonym na drodze teoretycznej. Program badania wszystkich modeli obejmował 3 cykle obciążenia i odciążenia. W pierwszych dwóch cyklach zrealizowano obciążenie o wartości ok. 5 % przewidywanego obciążenia niszczącego, tj. ok. 8 kN, kontrolując tym samym wskazania aparatury pomiarowej oraz dopasowując ruchome elementy stanowiska do pozycji wyjściowych. W cyklu trzecim – niszczącym – modele obciążano każdorazowo monotonicznie do momentu gdy nie rejestrowano przyrostu siły na siłomierzach przy jednoczesnym przyroście ugięć przęseł belek. Obciążenie zwiększano skokowo co 4 kN (na każdym siłomierzu), dokonując za pośrednictwem automatycznego stanowiska pomiarowego (ASP) rejestracji ugięć linii środkowej belek, naprężeń w zbrojeniu podłużnym i reakcji podporowych. Oprócz tego od momentu powstania pierwszych widocznych rys dokonywano pomiaru szerokości ich rozwarcia za pomocą lupy Brinell'a o dokładności 0,05 mm. Schemat badania przedstawiono na rys. 6.



Rys.6. Cykle obciążania modeli.

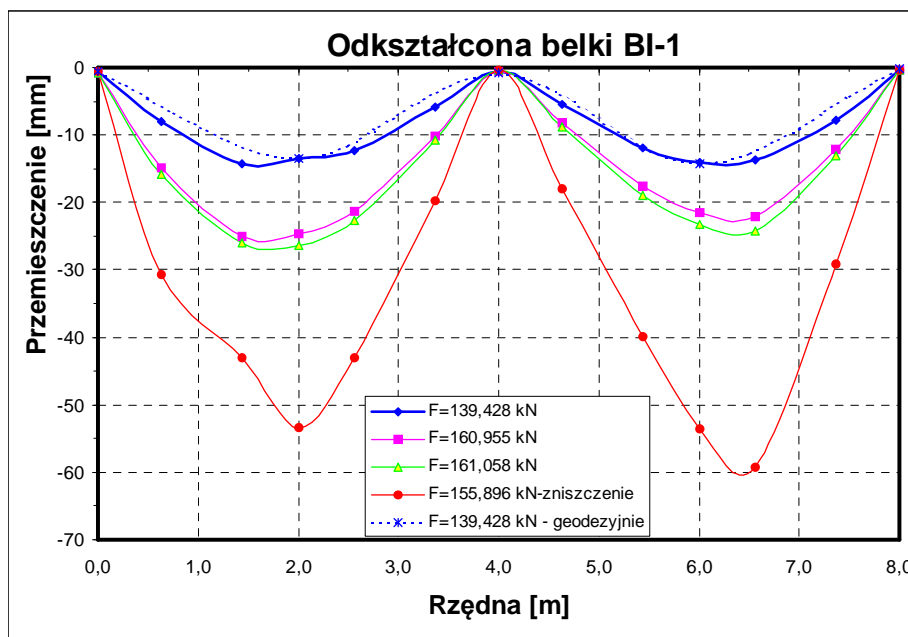
## 5. Wyniki

### 5.1. Ugięcia

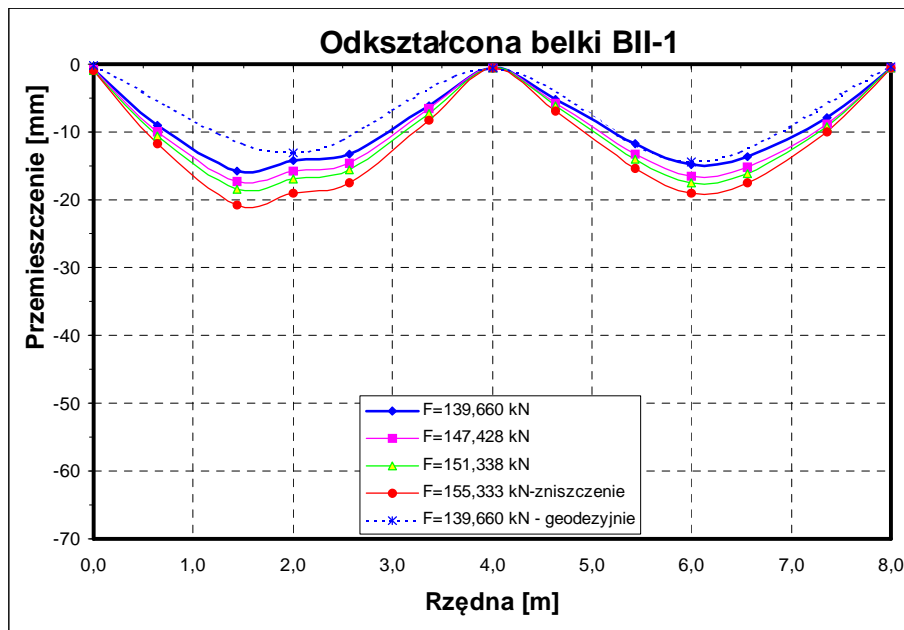
Ugięcia belek do momentu uplastycznienia się zbrojenia podporowego były zbliżone i wynosiły ok. 15 mm. Dalszy wzrost obciążenia przęsłowego spowodował zniszczenie belek zbrojonych stalą klasy A (seria BII). Maksymalne ugięcie przęsła wynosiło ok. 20 mm. W belkach zbrojonych stalą EPSTAL (seria BI) z chwilą uplastycznienia się zbrojenia podporowego, a następnie przęsłowego, następował znaczny przyrost ugięć przy stałej wartości sił obciążających. W momencie zniszczenia ugięcie środka przęsła wahało się w przedziale 42 ÷ 55 mm. Poniżej przedstawiono wykresy ugięć dla belek typu BI oraz BII oraz zestawienie średnich przemieszczeń środka przęsła.

Belka	Obciążenie F [kN]	Średnie przemieszczenie środka przęsła [mm]
BI-1	156,896	53,413
BI-2	151,342	41,781
BII-1	155,333	19,009
BII-2	158,714	19,193

Tab. 1. Zestawienie średnich przemieszczeń środka przęsła.



Rys. 7. Ugięcie belki typu BI (stal EPSTAL).



Rys. 8. Ugięcie belki typu BII (stal klasy A).

## 5.2. Zarysowania

Szerokość rozwarcia rys oraz siła przy jakiej nastąpiło ich pojawienie się również znacząco różniło się w przypadku belek zbrojonych stalą EPSTAL (SI) oraz belek zbrojonych stalą klasy A (SII). W przypadku belki serii BI rysy pojawiły się już przy obciążeniu 20 kN, natomiast w przypadku belek serii BII pierwsze rysy pojawiły się przy obciążeniu 24 kN. Maksymalna szerokość rozwarcia rys w belkach zbrojonych stalą SI wyniosła nawet 8,5 mm na podporze, przy obciążeniu równym 164 kN, podczas gdy w przypadku belek zbrojonych stalą SII szerokość rozwarcia rys wyniosła maksymalnie 3 mm na podporze przy obciążeniu równym 140 kN. Poniżej zestawiono wyniki rozwarcia rys w poszczególnych belkach.

Symbol punktu pomiarowego	Belka B 1-1							
	Poziom obciążenia [kN]							
	20	44	68	92	116	128	140	152
1-1 (przęsto)	-	0,05	0,05	0,05	0,15	-	0,20	-
2-2 (przęsto)	-	0,05	0,05	0,10	0,20	-	0,3	-
3-3 (podpora)	0,05	0,3	0,5	0,7	2,2	3,5	4,4	5,4

Tab.2. Wyniki pomiaru szerokości najbardziej rozwartych rys.

Symbol punktu pomiarowego	Belka B 1-2									
	Poziom obciążenia [kN]									
	20	40	64	88	112	124	136	148	160	164
1-1 (przęsło)	-	0,1	0,2	0,2	0,2	-	0,3	-	3,0	3,7
2-2 (przęsło)	-	0,1	0,1	0,2	0,2	-	0,3	-	1,2	5,0
3-3 (podpora)	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	2,0	4,2	6,0	8,5

Tab.3. Wyniki pomiaru szerokości najbardziej rozwartych rys.

Symbol punktu pomiarowego	Belka BI 1-1							
	Poziom obciążenia [kN]							
	24	44	68	92	116	140	152	
1-1 (przęsło)	-	0,05	0,2	0,25	0,3	0,4	-	
2-2 (przęsło)	0,05	0,05	0,1	0,2	0,3	0,8	-	
3-3 (podpora)	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	2,5	4	

Tab.4. Wyniki pomiaru szerokości najbardziej rozwartych rys.

Symbol punktu pomiarowego	Belka BI 1-2					
	Poziom obciążenia [kN]					
	24	44	68	92	116	140
1-1 (przęsło)	-	0,05	0,1	0,1	0,1	0,2
2-2 (przęsło)	-	0,1	0,2	0,3	0,5	0,5
3-3 (podpora)	0,1	0,2	0,5	0,6	0,8	3,0

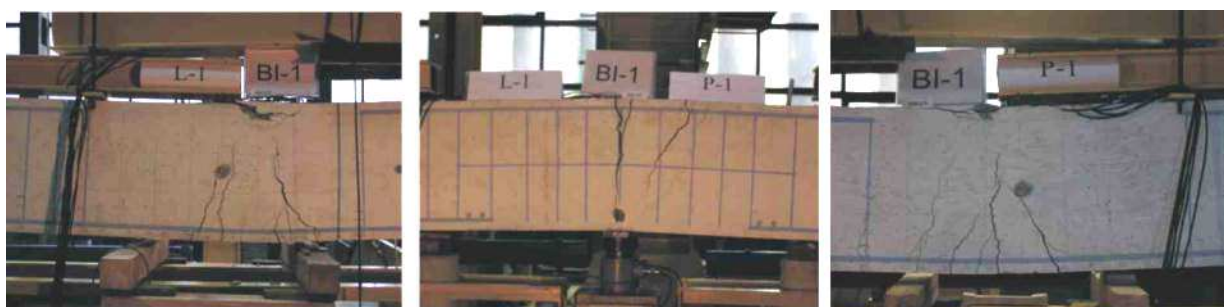
Tab.5. Wyniki pomiaru szerokości najbardziej rozwartych rys.

### 5.3. Zniszczenie

W zależności od zastosowanej stali zbrojeniowej zaobserwowano znaczne różnice w sposobie utraty nośności poszczególnych elementów badawczych. W przypadku belek BI (stal EPSTAL) zaobserwowano powstanie trzech przegubów, w pierwszej kolejności nad podporą wewnętrzną, a następnie w przęsłach. Proces niszczenia przebiegał w sposób łagodny, obserwowano znaczne przyrosty ugięć przęseł belek przy stałym obciążeniu. W przypadku belek BII (stal klasy A) nie wystąpił przegub plastyczny nad podporą wewnętrzną. Zniszczenie modelu przebiegło w sposób gwałtowny, wydając przy tym charakterystyczny trzask. Poniżej zestawiono wartości sił niszczących oraz zdjęcia zniszczonych belek.

Nazwa modelu	Wartość siły niszczącej		
	Przęsło „lewe”	Podpora środkowa	Przęsło „prawe”
BI-1	164 kN	160 kN	168 kN
BI-2	160 kN	160 kN	164 kN
BII-1	-	160 kN	-
BII-2	-	163 kN	-

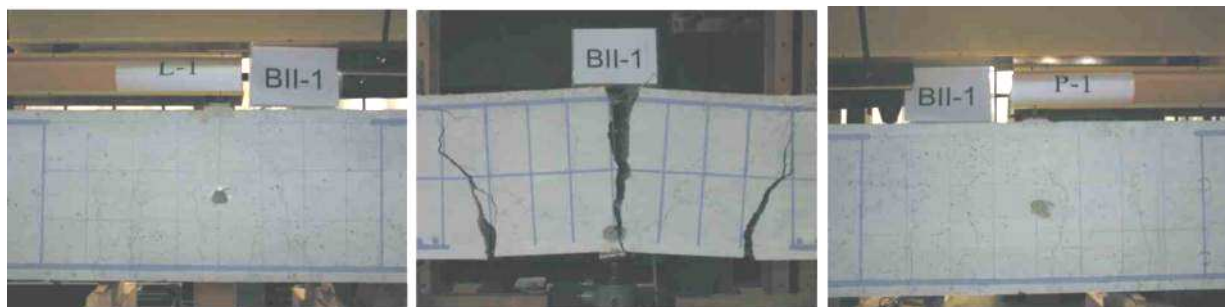
Tab.6. Wartości pomierzonych sił niszczących.



Rys. 9. Obraz zniszczenia belki BI-1 w przekrojach charakterystycznych.



Rys. 10. Obraz zniszczenia belki BI-2 w przekrojach charakterystycznych.



Rys. 11. Obraz zniszczenia belki BII-1 w przekrojach charakterystycznych.



Rys. 12. Obraz zniszczenia belki BII-2 w przekrojach charakterystycznych.

## 6. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonego badania zaobserwowano znaczną różnicę w zachowaniu się zginanych belek żelbetowych zbrojonych dwoma różnymi gatunkami stali: stalą EPSTAL o podwyższonej ciągliwości oraz stalą klasy A o małej ciągliwości. Do momentu osiągnięcia granicy plastyczności oba typy belek zachowywały się podobnie, tzn. osiągały podobne wartości ugięć oraz zarysowań. Natomiast po przekroczeniu granicy plastyczności, belki zbrojone stalą EPSTAL ulegały znacznym odkształceniom bez wyraźnego zwiększania obciążenia. Tymczasem belki zbrojone stalą klasy A uzyskały niewielkie wartości ugięć i zarysowań, po czym w nagły sposób uległy zniszczeniu.

Sposób zachowania się elementu po przekroczeniu granicy plastyczności ma ogromne znaczenie dla bezpieczeństwa konstrukcji. Element który w strefie plastycznej osiąga znaczne odkształcenia, pozwala przewidzieć zbliżające się zniszczenie konstrukcji. Natomiast konstrukcje, których elementy ulegają bardzo niewielkim odkształceniom w strefie plastycznej stanowią ogromne zagrożenie dla ich użytkowników, gdyż nie wskazują na zbliżające się zniszczenie konstrukcji.

Opracowanie przygotowano na podstawie pracy pt.:

„Badanie wpływu plastyczności zbrojenia na zachowanie się dwuprzęsłowej belki żelbetowej”

autorstwa:

**Prof. dr hab. inż. Włodzimierza STAROSOLSKIEGO\***

**Dr inż. Radosława JASIŃSKIEGO\***

**Dr inż. Adama PIEKARCZYKA\***

\* Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa Politechniki Śląskiej

**[www.cpjs.pl](http://www.cpjs.pl)**

**Centrum Promocji Jakości Stali**

**Ul. Koszykowa 54**

**00-675 Warszawa**

**Tel.: +48 22 630 83 76**

**Tel. | Fax: +48 22 630 83 75**

**e-mail: [biuro@cpjs.pl](mailto:biuro@cpjs.pl)**