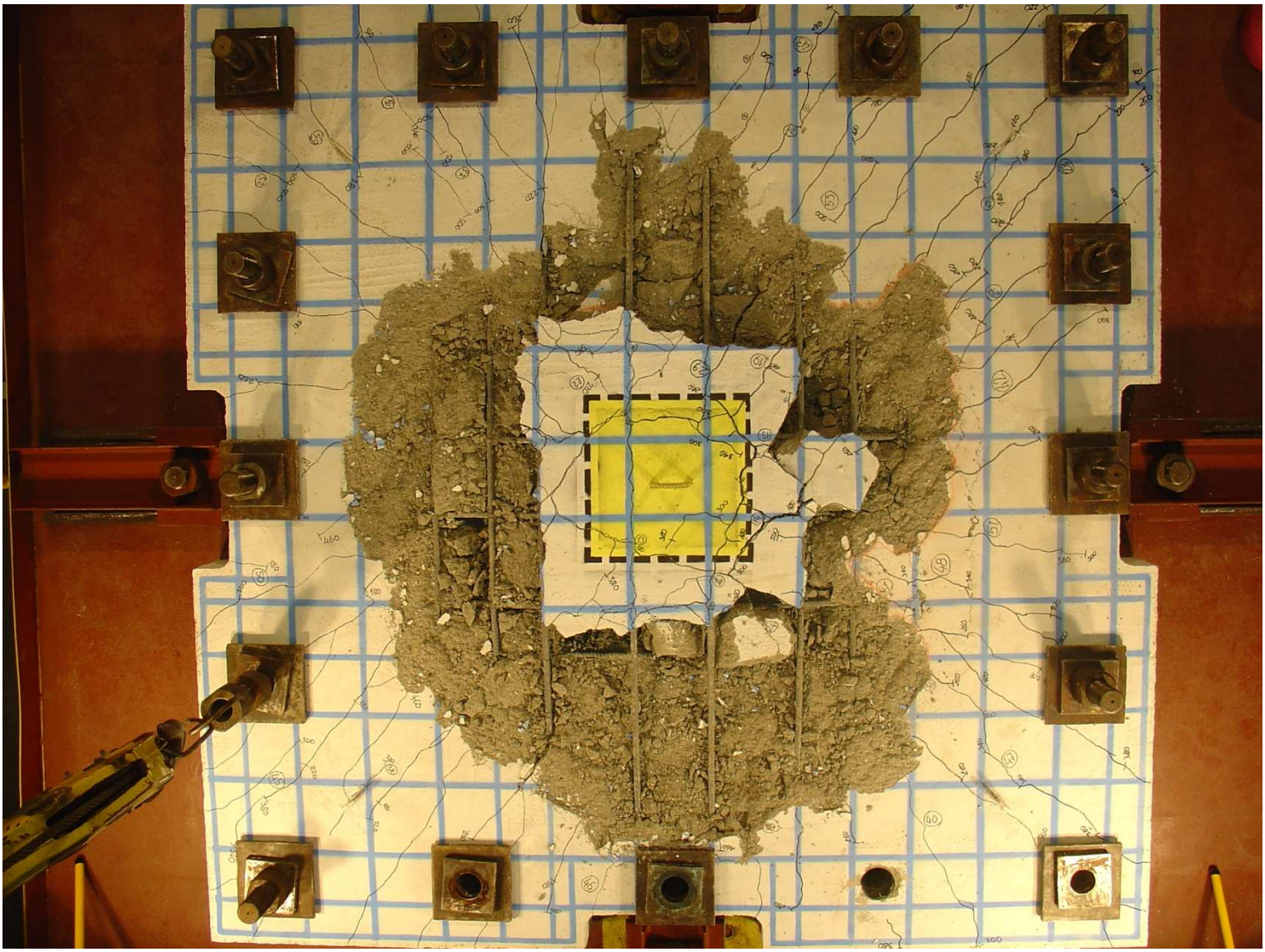


Badania ustrojów płytowo- słupowych zbrojonych stalą zróżnicowanej ciągliwości

Opracowanie:

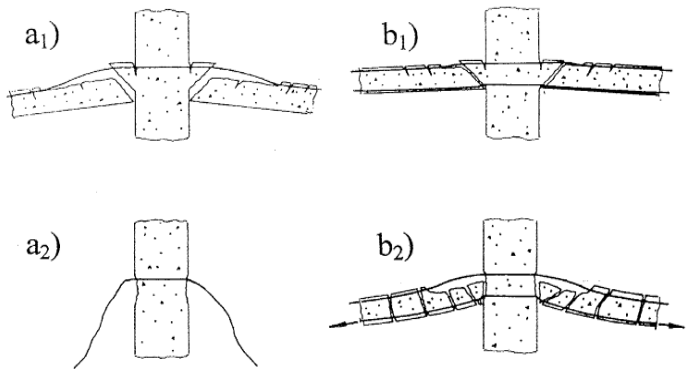
Centrum Promocji Jakości Stali

Spis treści

	Strona
1. Cel badania	3
2. Opis stanowiska oraz modeli do badań	4
2.1. Modele do badań	4
2.2. Stanowisko do badań	6
3. Materiały	7
4. Opis badania	8
5. Wyniki	8
5.1. Praca modelu w fazie I	8
5.1.1. Zarysowania	8
5.1.2. Przemieszczenia	9
5.2. Praca modelu w fazie II	10
5.2.1. Mechanizm zniszczenia	10
5.2.2. Przemieszczenia	12
6. Wnioski	13

1. Cel badania

W sytuacji zniszczenia połączenia płyta-słup spowodowanego błędem wykonawczym (zaniżona klasa lub przemrożony beton, zbyt szybkie rozdeskowanie konstrukcji), lub gwałtownym zniszczeniem fragmentu konstrukcji (np. w wyniku wybuchu) o możliwości przetrwania konstrukcji decyduje krzyżujące się nad słupem dolne zbrojenie płyty. Jego brak wyklucza możliwość przetrwania konstrukcji w stadium awaryjnym - rys. 1 a_1, a_2, jego obecność natomiast stwarza pewne szanse jej przetrwania pod warunkiem, że dolne zbrojenie w strefie przysłupowej będzie w stanie przejąć obciążenia spoczywające na stropie mimo zniszczenia strefy przysłupowej – rys. 1 b_1, b_2.



Rys. 1. Możliwe sposoby zniszczenia ustroju płytowo-słupowego w przypadku:
a_1 i a_2 – braku zbrojenia dolnego krzyżującego się nad słupem,
b_1 i b_2 – występowania zbrojenia dolnego krzyżującego się nad słupem.

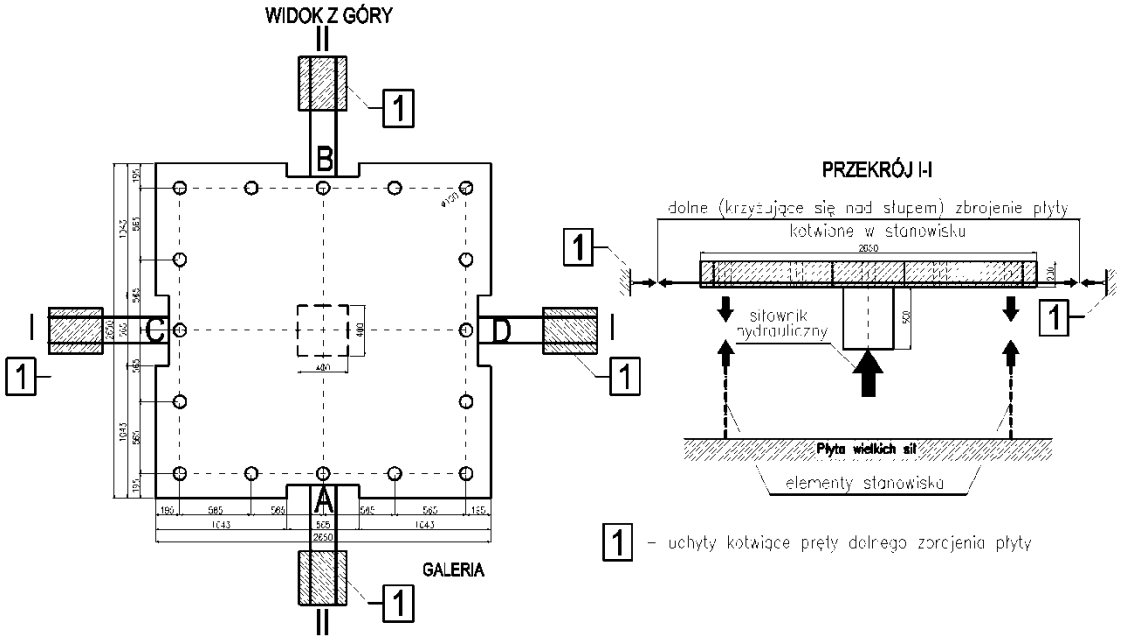
Przy znacznych przemieszczeniach konstrukcji znajdujących się w stadium awaryjnym pożądaną cechą zbrojenia dolnego są jego graniczne odkształcenia, które w normalnych warunkach pracy konstrukcji nie są wykorzystywane ze względu na ograniczenia odnośnie maksymalnych odkształceń oraz redystrybucji sił wewnętrznych.

Zasadniczym celem wykonanych na zlecenie Centrum Promocji Jakości Stali w Katedrze Konstrukcji Budowlanych Politechniki Śląskiej w Gliwicach badań strefy przypodporowej ustrojów płytowo-słupowych w sytuacji jej zniszczenia przez przebicie było wykazanie wpływu różnej ciągliwości stali na dalszy rozwój zniszczenia takich konbstrukcji. Dla uwypuklenia występujących zjawisk założono zastosowanie dwóch typów stali: klasy A wg EC 2 (stali zimnowalcowanej o niskiej ciągliwości) i C wg EC 2 (stali gorącowalcowanej o wysokiej ciągliwości – EPSTAL). Badania objęły 2 elementy stanowiące modele przysłupowej strefy monolitycznego ustroju płytowo-słupowego, w których dołem zastosowano krzyżujące się nad słupem pręty wykonane z gorącowalcowanej stali EPSTAL o dużej ciągliwości lub stali zimnowalcowanej o małej ciągliwości.

2. Opis stanowiska oraz modeli do badań

2.1. Modele do badań

Modele stanowiły fragment stropu, w postaci kwadratowej żelbetowej płyty o wymiarach 2,65 × 2,65 m, grubości 20 cm, z centralnie usytuowanym od dołu słupem. Słup miał wysokość 50 cm i kwadratowy przekrój poprzeczny o wymiarach 40 × 40 cm. Płytę modelu mocowano do stanowiska badawczego za pośrednictwem 16 śrub o średnicy ϕ 65 mm rozmieszczonych obwodowo w rozstawie 56,5 cm. Założono obciążenie modeli siłą skupioną przykładaną do podstawy słupa, ustawionego przegubowo na zestawie siłomierz-siłownik hydrauliczny. Schemat obciążenia układu przedstawiono na rys. 2.



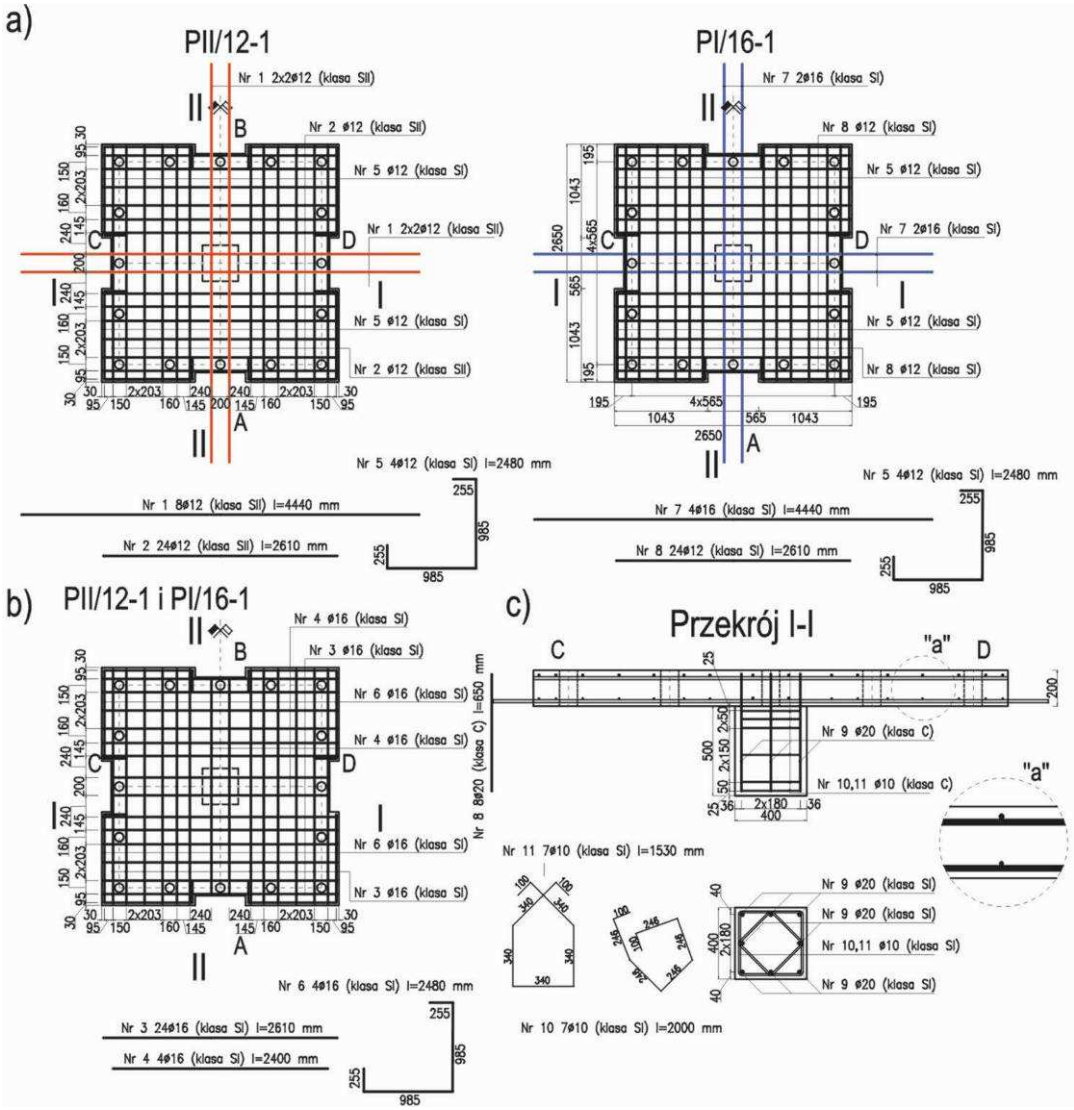
Rys. 2. Schemat obciążania modeli.

Podstawowym parametrem różniącym modele było zastosowane zbrojenie dolne krzyżujące się w płycie nad słupem. Składało się ono z:

- dwóch prętów ϕ 16 wykonanych ze stali EPSTAL o wysokiej ciągliwości (model PI/16-1)
- dwóch wiązek 2 ϕ 12 wykonanych ze stali zimnowalcowanej o niskiej ciągliwości (model PII/12-1)

Przyjęto, że zbrojenie to zostanie wypuszczone poza obrys modelu i zakotwione w specjalnym uchwycie przymocowanym do stanowiska badawczego. Modele zaprojektowano tak, aby w pierwszej kolejności nastąpiło ich przebicie, a płyta nie uległa zniszczeniu giętemu. Zbrojenie na zginanie wyznaczono jak dla rzeczywistej konstrukcji płytowo-słupowej o siatce słupów 6 × 6 m z dodatkowym obciążeniem eksploatacyjnym równym 5 kN/m^2. Zbrojenie dolne modeli składało się z podłużnych prostych prętów zbrojeniowych o średnicy 12 mm wykonanych, w zależności od modelu, ze stali EPSTAL luz stali zimnowalcowanej. W narożach dołem w obydwu modelach zastosowano wyprofilowane pręty o średnicy 12 mm ze stali EPSTAL. Rozstaw zbrojenia dolnego w płycie był w obydwu modelach taki sam i wynosił 95 ÷ 203 mm (średnio co 173 mm). Średni procent zbrojenia dolnego wynosił: ρ_{S2} = 0,47 % (model PII/12-1) i ρ_{S2} = 0,46 % (model PI/16-1). Pręty zbrojenia krzyżującego się nad słupem w obydwu modelach miały długość 4,40 m i wystawały poza obrys płyty. Osiowy rozstaw prętów i wiązek był taki sam i wynosił 200 mm. Równolegle do osi I-I pręty zbrojenia dolnego umieszczone były najbliżej dolnej powierzchni płyty, natomiast pręty wzdłuż osi II-II spoczywały na nich.

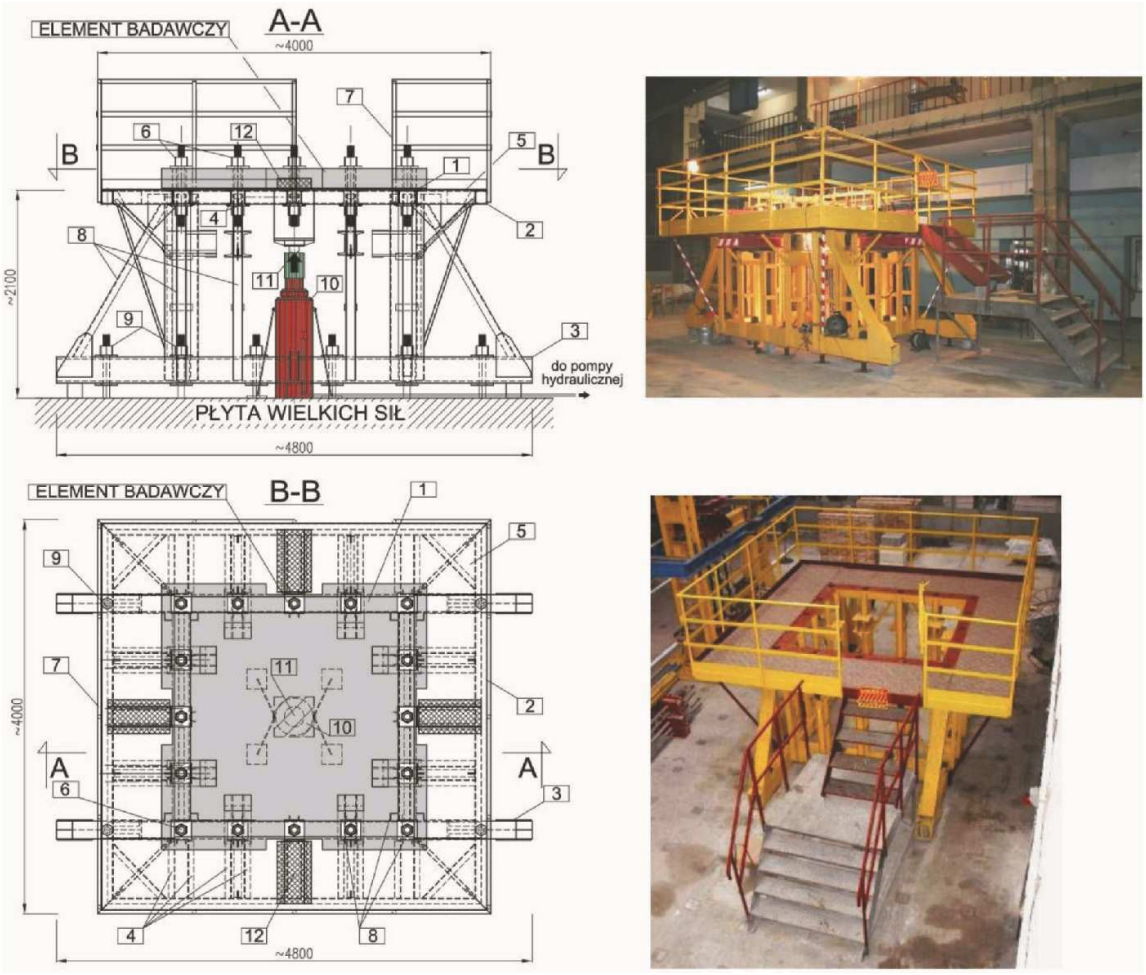
Zbrojenie górne obydwu modeli było identyczne i składało się z prostych, prostopadłych do siebie prętów o średnicy 16 mm wykonanych ze stali EPSTAL. Rozstaw prętów był analogiczny jak w przypadku zbrojenia górnego. Średni procent zbrojenia górnego wynosił ρ_{S1} = 0,76 %. W narożach, podobnie jak dołem, użyto prętów wyprofilowanych o średnicy 16 mm ze stali EPSTAL. Zbrojenie słupa stanowiło 8 prostych prętów o średnicy 20 mm, rozmieszczonych po obwodzie – 4 pręty w narożach i 4 pręty w połowie długości boków – co 180 mm. Zbrojenie poprzeczne stanowiły zamknięte strzemiona wykonane z prętów o średnicy 10 mm ze stali o niskiej ciągliwości. Rozstaw strzemion w środkowym odcinku słupa był stały i wynosił 150 mm. W miejscu połączenia słupa z płytą zastosowano 3 strzemiona, a u podstawy (w miejscu przyłożenia obciążenia skupionego z siłownika hydraulicznego) 2 strzemiona, w rozstawie co 50 mm. Otulina wszystkich prętów zbrojenia głównego płyty położonego najbliżej powierzchni (dolnej lub górnej) wynosiła c_{nom} = 20 mm. Otulina strzemion słupa wynosiła c_{nom} = 20 mm, a prętów zbrojenia głównego c_{nom} = 30 mm.



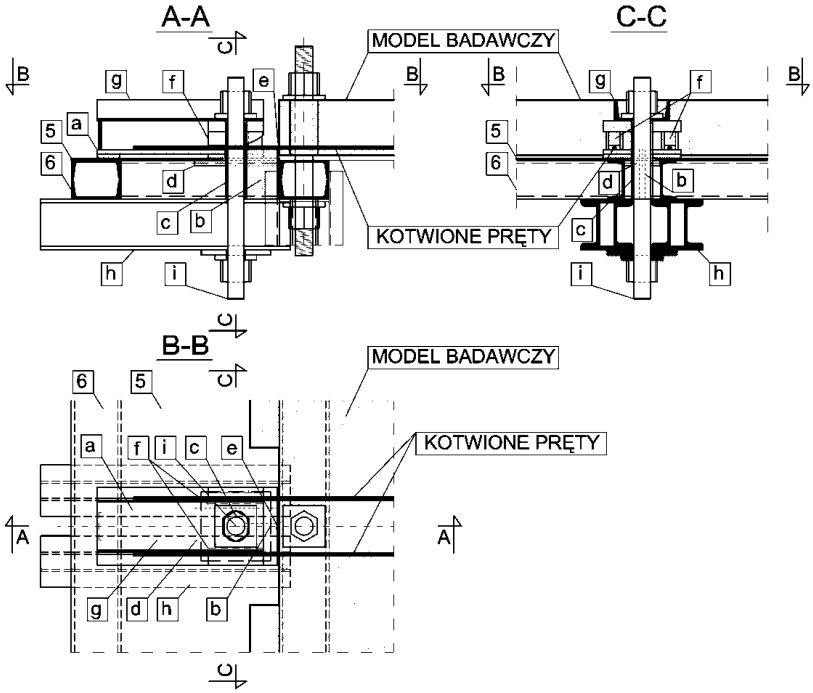
Rys. 3. Zbrojenie modeli badawczych.

2.2. Stanowisko do badań

Zasadniczymi elementami stanowiska były pierścieniowe stalowe rygle górne (rys. 4 – 1, 2) oraz dolne (3) wykonane z zespawanych pasami ceowników. Rygle (1, 2) połączono ze sobą za pośrednictwem słupków (4) wykonanych z ceowników, a na górnej powierzchni przyspawano stalową blachę pomostową (5), kształtując tym samym pomost roboczy. Do jednego z rygli górnych (1) mocowano za pomocą 16 śrub o średnicy 65 mm układany na podkładkach z płyty pilśniowej model badawczy (6). Pomost robocz,, zabezpieczony balustradą (7), połączono z ryglem dolnym (3) za pomocą pionowych słupków i krzyżulców (8). Stanowisko badawcze przymocowano do płyty wielkich sił za pomocą 16 rozmieszczonych po obwodzie rygla (3) śrub o średnicy 80 mm. Obciążenie modelu wywierano za pomocą dwuteleskopowego siłownika hydraulicznego (10) o zakresie 1200 kN, ustabilizowanego za pomocą 4 odciągów ciągowych. Pomiaru siły wymuszającej dokonywano za pomocą siłomierza elektrooporowego (11) o zakresie wskazań 2000 kN, ustawionego na siłowniku hydraulicznym. Wystające poza obrys modelu pręty zbrojeniowe kotwiono w specjalnie do tego celu wykonanym uchwycie (12), który składał się z poziomej blachy stalowej, do której dospawano kotwione pręty (rys. 5).



Rys. 4. Stanowisko badawcze.



Rys.5. System kotwienia prętów.

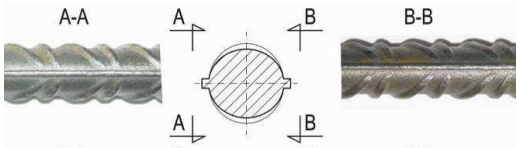
3. Materiały

Do wykonania modeli badawczych wykorzystano następujące materiały:

- Beton zwykły o klasie wytrzymałości C16/20,
- Stal zbrojeniową o gatunku zależnym od modelu:

Model PI/16-1

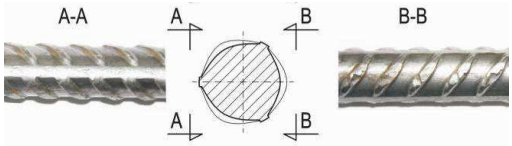
- ✓ Stal o dużej ciągliwości EPSTAL (SI)
- ✓ Klasa C wg EC2



ε_{uk} > 7,5 %
f_{tk}/f_{yk} > 1,15

Model PII/12-1

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



ε_{uk} > 2,5 %
f_{tk}/f_{yk} > 1,05

4. Opis badania

Program badania obejmował 2 cykle obciążenia i odciążenia obydwu modeli. W pierwszym cyklu elementy obciążano do wartości około 40 kN, kontrolując jednocześnie wskazania aparatury pomiarowej oraz dopasowując ruchome elementy stanowiska do pozycji wyjściowych. W drugim cyklu obciążenie zwiększano skokowo co 20 kN do chwili przebicia (faza I) i dalej, kontrolując geodezyjnie przyrost przemieszczeń (faza II), aż do chwili uzyskania maksymalnej nośności zbrojenia krzyżującego się nad slupem- $F_{max,s}$.

W elemencie PII/12-1 zbrojonym stalą o niskiej ciągliwości, w fazie II, po osiągnięciu wartości $F_{max,s}$, zluzowano śruby mocujące model do stanowiska. Przy dalszym obciążaniu model połączony był ze stanowiskiem za pośrednictwem dolnych prętów wystających poza model i zakotwionych poprzez przyspawanie ich do stanowiska. Dalsze obciążenie prowadzone było aż do osiągnięcia maksymalnej siły równej F_{max} określającej nośność ustroju cięgnowego.

W elemencie PI/16-1 zbrojonym stalą EPSTAL, w fazie II, po uzyskaniu nośności zbrojenia krzyżującego się nad słupem $F_{max,s}$, zluzowanie śrub i badanie w schemacie cięgnowym modelu okazało się niemożliwe ze względu na znaczne wychylenie słupa z pionu. Przy każdym poziomie obciążenia dokonywano pomiaru siły F na siłomierzu i rejestracji odczytów tensometrów naklejonych na prętach dolnych krzyżujących się nad słupem. Odbywało się to za pośrednictwem automatycznego stanowiska pomiarowego (ASP) rejestracji ugięć linii środkowej płyt wzdłuż teoretycznych osi I-I i II-II do chwili przebicia. Dodatkowo przez cały czas trwania badań wykonywano pomiar geodezyjnych przemieszczeń słupa oraz dolnych powierzchni płyty. Od chwili powstania pierwszych widocznych rys prowadzono pomiar szerokości ich rozwarcia za pomocą lupy Brinella o dokładności 0,05 mm.

5. Wyniki

5.1. Praca modelu w fazie I

5.1.1. Zarysowania

Mechanizm zarysowania w fazie I w obydwu elementach przebiegał w podobny sposób, który jest typowy dla tak skonstruowanych i obciążonych elementów. Największe rozwartości rys w chwili poprzedzającej przebicie były zbliżone w obydwu modelach i wynosiły odpowiednio: 1,7 mm w modelu PII/12-1 (stal o niskiej ciągliwości) oraz 1,2 mm w modelu PI/16-1 (stal EPSTAL). Maksymalne sumy szerokości rozwarcia rys na górnej powierzchni płyty w obydwu przypadkach wynosiły ok. 3,0 mm. Różnice zaobserwowano w wartościach sił rysujących. W modelu PII/12-1 wartość siły rysującej była o 50 % niższa od uzyskanej w modelu PI/16-1. Zestawienie sił rysujących zestawiono w tab.1.

Nazwa modelu	Siła rysująca F_{cr} [kN]	M_{cr} [kNm/m]	$M_{cr,cal84}$ [kNm/m]	$M_{cr,cal02}$ [kNm/m]	$M_{cr}/M_{cr,cal84}$	$M_{cr}/M_{cr,cal02}$
PII/12-1	106,98	18,38	25,35	14,47	0,73	1,27
PI/16-1	161,39	27,73			1,09	1,92

Tab.1. Wartości sił i momentów rysujących.

gdzie:

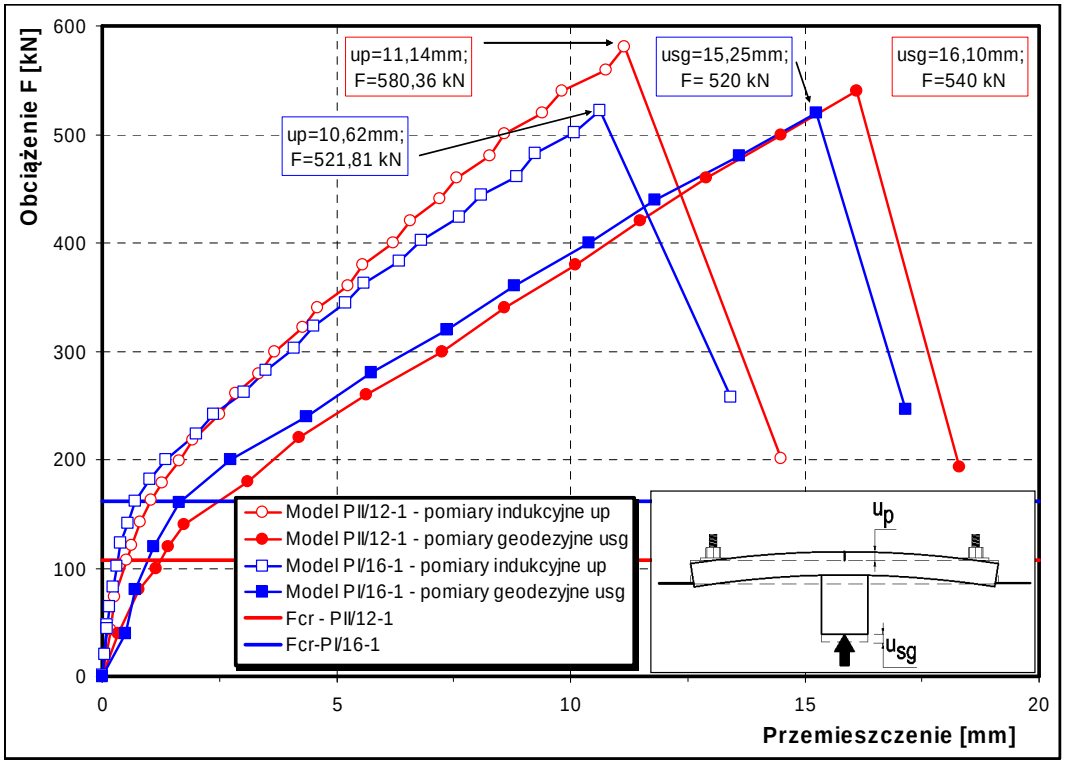
M_{cr} - pomierzony moment rysujący

$M_{cr,cal84}$ - moment rysujący obliczony wg PN-84/B-03264,

$M_{cr,cal02}$ - moment rysujący obliczony wg PN-B-03264:2002.

5.1.2. Przemieszczenia

W fazie I wartości przemieszczeń górnej powierzchni płyty w obydwu modelach były zbliżone. Powyżej wartości siły obciążającej F = 160 kN zaobserwowano nieznacznie większe przemieszczenia w przypadku płyty PI/16-1 (rys. 6). Podobna tendencja wystąpiła w przypadku przemieszczeń słupa. Przemieszczenia słupa modelu zbrojonego stalą o niskiej ciągliwości. były większe od przemieszczeń tego elementu w modelu PII/12-1. Wyraźny wzrost przemieszczeń w obydwu modelach zaobserwowano po zarysowaniu.



Rys.6. Porównanie przemieszczeń środkowego punktu przęseł.

5.2. Praca modelu w fazie II

5.2.1. Mechanizm zniszczenia

Zwiększanie siły obciążającej model spowodowało gwałtowne przebicie, które poprzedzone było intensywnym zarysowaniem górnej powierzchni płyt. Wysuwanie się słupa ponad płytę spowodowało unoszenie się prętów zbrojenia dolnego i górnego oraz kruszenie betonu (rys. 7). Wartości sił przebijających zestawiono w tab.2.

Rys. 7. Przemieszczanie się prętów zbrojenia i kruszenie betonu.

Nazwa modelu	Siła przebijająca F_p [kN]	Siła przebijająca $F_{p,cal}$ [kN]	$F_p/F_{p,cal}$
PI/12-1	580	736,3	0,79
PII/16-1	538		0,73

Tab.2. Wartości sił przebijających.

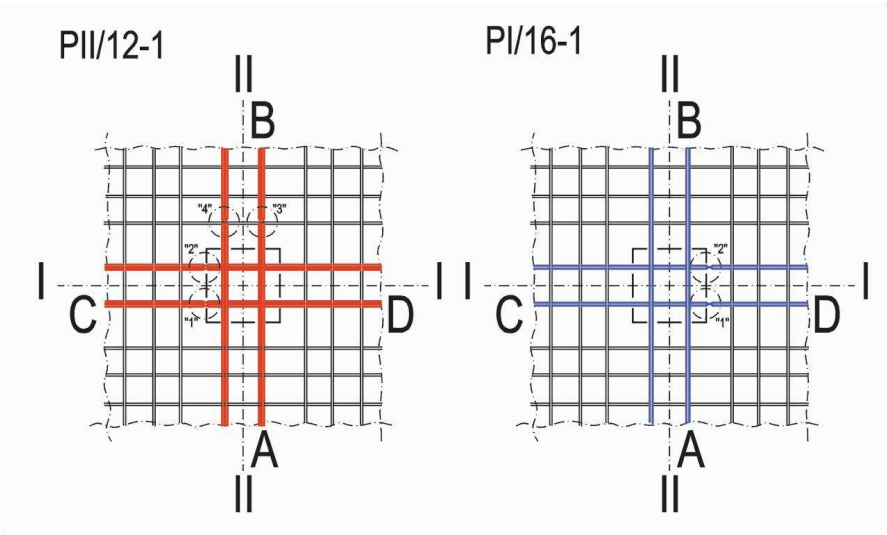
gdzie:

$$F_{p,cal} = f_{ct,0,05} u_p d$$

W modelu PII/12-1 (stal zimnowalcowana) maksymalna wymuszona siła odnotowana po przebiciu wynosiła $F_{max,s}$ = 386 kN. Przy dalszym zwiększaniu przemieszczeń słupa, przy obciążeniu F = 350 kN, słyszalny był głośny trzask, a następnie, przy obciążeniu F = 304 kN, wystąpiły jeszcze dwa trzaski następujące w krótkim odstępie czasu. W dalszej kolejności okręcone zostały śruby mocujące model do stanowiska. Dalsze zwiększanie przemieszczeń słupa powodowało, poza wysuwaniem się słupa ponad płytę, również podnoszenie się modelu nad stanowisko i wyrywanie z betonu prętów zakotwionych w pomoście stanowiska. Przy obciążeniu równym F_{max} = 88 kN słyszalny był ostatni, czwarty trzask. Późniejsze oględziny rozkutej strefy przysłupowej wykazały zerwanie obydwu wiązek prętów od strony B oraz C (rys. 8).

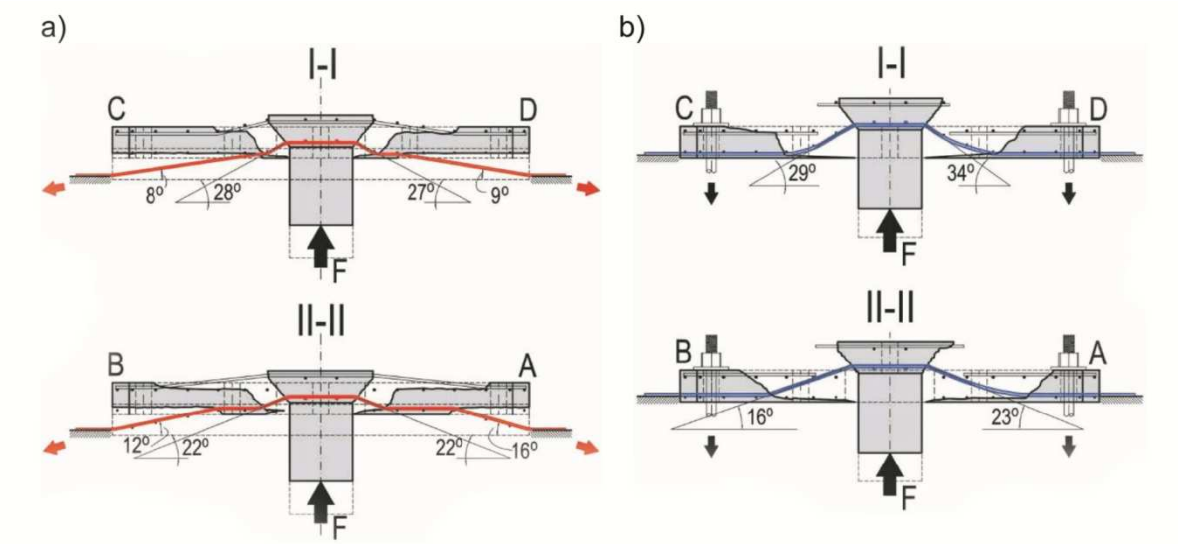
W modelu PI/16-1 (stal EPSTAL) zwiększając przemieszczenia słupa uzyskano maksymalną siłę wynoszącą $F_{max,s}$ = 445 kN. Duże przemieszczenia i wychylenia słupa wymagały jego rektyfikacji i odcinania zbrojenia górnego płyty. Po odcięciu kilku prętów zbrojenia górnego, przy sile F = 406 kN, zaobserwowano zerwanie pręta zbrojenia dolnego od strony D (rys. 8), a przy sile 426 kN zerwaniu uległ drugi dolny pręt od strony D (rys. 8). Po tym zdarzeniu, przy sile F_{max} = 423 kN odcięto pozostałe pręty zbrojenia górnego płyty i odnotowano spadek siły

do wartości 267 kN. Dalsze wymuszanie przemieszczenia pozwoliło osiągnąć siłę $F_{max,s}$ = 322 kN, jednak ze względu na przechylenie słupa badanie przerwano.



Rys. 8. Widok siatek zbrojenia dolnego modeli po zniszczeniu.

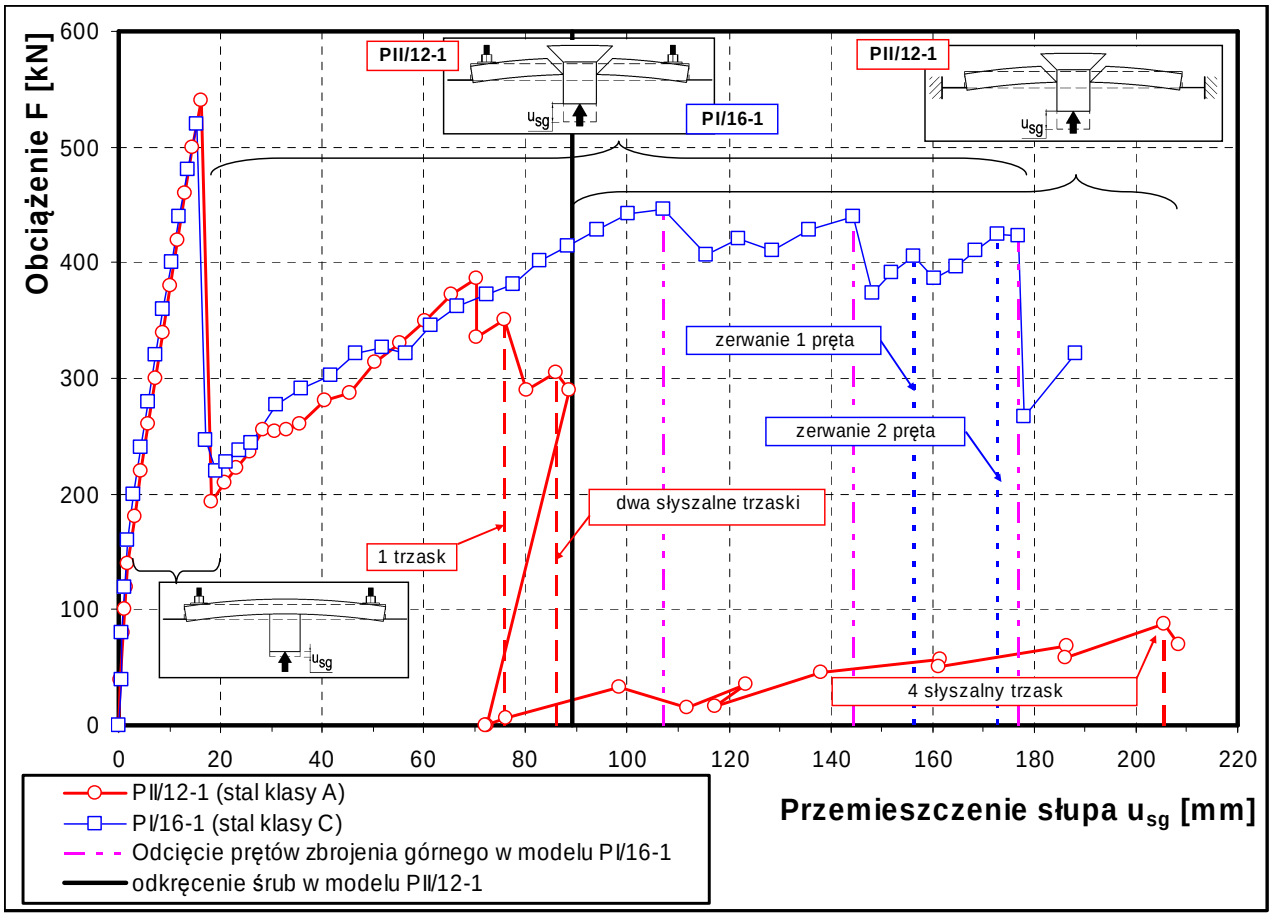
Zaobserwowano również znaczną różnicę w wartościach kąta nachylenia prętów zbrojenia dolnego w chwili zniszczenia. W modelu PI/16-1, w którym krzyżujące się nad słupem zbrojenie dolne wykonano ze stali EPSTAL, nastąpiło znaczne wygięcie prętów, co spowodowało osiągnięcie wyższych kątów pochylenia prętów niż w przypadku modelu PII/12-1, ze zbrojeniem dolnym wykonanym ze stali o niskiej ciągliwości (rys. 9).



Rys. 9. Szkic zniszczenia modeli:
a) PII/12-1 (stal o niskiej ciągliwości),
b) PI/16-1 (EPSTAL).

5.2.2. Przemieszczenia

Po przebiciu, do chwili poprzedzającej słyszalny w modelu PII/12-1 trzask, przemieszczenia obydwu słupów były zbliżone i wynosiły ok. 70 mm. Po zerwaniu się prętów zbrojenia górnego płyty PII/12-1 schemat statyczny tego modelu uległ zmianie, co uniemożliwiło dalsze porównywanie przemieszczeń modeli. Mimo tego końcowe przemieszczenia modeli były zbliżone i wynosiły: 190 mm (PI/16-1) oraz 210 mm (PII/12-1). Przebieg przemieszczeń słupów przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Przemieszczenie słupa modeli badawczych.

6. Wnioski

Przeprowadzone badania porównawcze dwóch modeli pozwoliły rozeznać zachowanie się połączenia płyta-słup w sytuacji poawaryjnej, kiedy przed postępującą katastrofą konstrukcję zabezpieczać powinno dolne zbrojenie krzyżujące się nad słupem, prawidłowo zakotwione w przęsłach stropu. Różnice w zachowaniu się modeli wystąpiły dopiero w fazie po przebiciu, do tego momentu obserwowano analogię w zakresie przemieszczeń i zarysowań.

Najistotniejszymi wnioskami, mającymi charakter praktyczny, wynikającymi z przeprowadzonych badań są:

- Zbrojenie dolne ma za zadanie powstrzymanie rozwoju katastrofy w przypadku zniszczenia strefy podporowej przez przebicie, w szczególności wtedy, gdy nośność tej strefy okaże się niższa niż działające na nią obciążenie. Po zniszczeniu przez przebicie strefa przypodporowa była zdolna do przeniesienia siły:

  $F_{max,s}$ = 386,01 kN w przypadku zastosowania stali zimnowalcowanej małej ciągliwości klasy A,
  $F_{max,s}$ = 444,58 kN w przypadku zastosowania stali EPSTAL dużej ciągliwości klasy C.

- Odnosząc te siły do dodatkowego obciążenia stropu o siatce 6 $\times$ 6 m strefa podporowa była po przebiciu zdolna do przeniesienia obciążenia:

  q = 5,7 kN/m^2 w przypadku zastosowania stali małej ciągliwości klasy A,
  q = 7,3 kN/m^2 w przypadku zastosowania stali dużej ciągliwości klasy C.

Uzyskane wyniki wyraźnie wskazują, że zastosowanie ciągłego zbrojenia dolnego płyty, krzyżującego się nad słupem, wykonanego ze stali o wysokiej ciągliwości, daje możliwość przetrwania konstrukcji po przekroczeniu nośności. Zbrojenie to jest w stanie przenieść obciążenie, pozwalając tym samym uniknąć gwałtownego zawalenia się budowli, zwiększając w ten sposób w dużym stopniu bezpieczeństwo użytkowników takich konstrukcji.

Opracowanie przygotowano na podstawie pracy pt.:
„Badanie ustrojów płytowo-słupowych zbrojonych stalą zróżnicowanej ciągliwości”
autorstwa:
Prof. dr hab. inż. Włodzimierza STAROSOLSKIEGO*
Dr inż. Radosława JASIŃSKIEGO*
Mgr inż. Radosława KUPCZYKA*
Mgr inż. Mirosława WIECZORKA*

** Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa Politechniki Śląski*

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