

**Badania zachowania się narożnego fragmentu
monolitycznego ustroju płytowo-słupowego
zbrojonego stalą EPSTAL o wysokiej ciągliwości
w sytuacji awaryjnej wywołanej usunięciem podpory**

Autorzy:
Mirosław WIECZOREK
Włodzimierz STAROSOLSKI

Opracowanie:
Centrum Promocji Jakości Stali

**Badania zachowania się narożnego fragmentu
monolitycznego ustroju płytowo-słupowego
zbrojonego stalą EPSTAL o wysokiej ciągliwości
w sytuacji awaryjnej wywołanej usunięciem podpory**

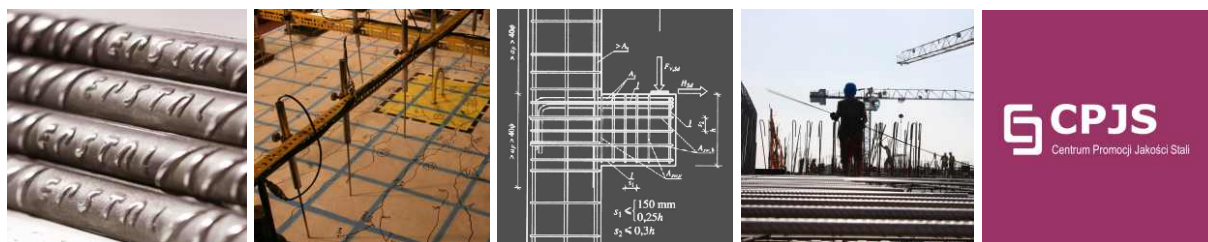
Autorzy:

**Mirosław WIECZOREK
Włodzimierz STAROSOLSKI**

Opracowanie:

Centrum Promocji Jakości Stali

Witamy w CPJS



Centrum Promocji Jakości Stali - CPJS - jest organizacją, której celem jest zapewnienie wysokiej jakości wyrobów stalowych oferowanych przez krajowych producentów oraz promocja nowych rozwiązań technicznych i materiałowych.

Działalność CPJS to:

➤ **Certyfikacja** wyrobów stalowych oraz nadzór techniczny nad produkcją i właściwościami certyfikowanych produktów. ➤ **Inicjowanie** i współrealizowanie projektów badawczych ukierunkowanych na poprawę jakości wyrobów stalowych oraz bezpieczeństwo konstrukcji inżynierskich. ➤ **Wspieranie** współpracy grup badawczych z przemysłem. ➤ **Przekazywanie** informacji na temat wyrobów stalowych wysokiej jakości. ➤ **Organizowanie** oraz współorganizowanie spotkań szkoleniowych, seminariów, warsztatów. ➤ **Tworzenie** pomostu pomiędzy użytkownikami wyrobów stalowych i ich producentami. ➤ **Monitorowanie** i czynny udział w działaniach normalizacyjnych i certyfikacyjnych na poziomie instytucji krajowych i europejskich.

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

Stal zbrojeniowa ze znakiem jakości EPSTAL



EPSTAL jest znakiem jakości nadawanym przez CPJS na wyroby ze stali gorącowalcowanej o podwyższonej ciągliwości, przeznaczone do zbrojenia betonu (gatunek B500SP).

Najważniejsze zalety stali EPSTAL to:

- **Wysoka ciągliwość.** Stal EPSTAL spełnia wymagania klasy C wg Eurokodu 2 – najwyższej klasy ciągliwości. Stosowanie stali o wysokiej ciągliwości zwiększa bezpieczeństwo konstrukcji betonowych – w sytuacji wystąpienia zbyt wysokich naprężeń nie ulega ona kruchemu zniszczeniu.
- **Odporność na obciążenia dynamiczne** zmęczeniowe [zmiennie naprężenia rozciągające], cykliczne [naprzemienne ściskanie i rozciąganie] oraz wielokrotnie zmiennie.
- **Łatwa identyfikowalność** poprzez napis EPSTAL nawalcowany na każdym pręcie oraz indywidualny układ żeber.
- **Pełna spawalność** – spawalność i zgrzewalność – potwierdzona w badaniach laboratoryjnych wykonanych w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach.
- **Dodatkowa kontrola procesu produkcji.** CPJS wykonuje kwartalną analizę statystyczną wyników zakładowej kontroli produkcji.
- **Program badawczy.** Wykonanych zostało wiele innowacyjnych badań naukowych, mających na celu rozpoznanie zachowania się elementów konstrukcji zbrojonych stalą EPSTAL w porównaniu do zachowania się takich samych elementów zbrojonych stalą kruchą.
- **Dodatkowa polisa ubezpieczeniowa.**

Spis treści

Wstęp.....	7
Model i stanowisko badawcze.....	10
Opis stanowiska badawczego.....	10
Dobór zbrojenia.....	14
System obciążania.....	17
Materiały.....	19
Stal.....	19
Beton.....	20
Teoretyczna nośność modelu.....	22
Określenie teoretycznej nośności elementu w sytuacji normalnego	
użytkowania.....	22
Określenie teoretycznej nośności elementu w sytuacji awaryjnej.....	22
Przebieg badań.....	24
Prowadzone pomiary.....	24
Cykle badawcze.....	27
Wyniki.....	33
Wyniki badań - odkształcenie modelu.....	33
Wyniki badań - sposób zniszczenia.....	39
Kolejność powstawania zniszczeń.....	41
Podsumowanie i wnioski.....	43
Piśmiennictwo.....	44
Parametry stali EPSTAL.....	45

Wstęp

Pojawienie się w ustroju konstrukcyjnym obciążeń wyjątkowych, takich jak uderzenia pojazdów, wybuchy wewnętrzne gazu, błędy ludzkie, a także zamachy terrorystyczne, może wywołać zjawisko katastrofy postępującej. Według kryteriów normowych i zaleceń projektowych jest ono inicjowane przez lokalne zniszczenie jednego elementu nośnego konstrukcji (słupa, fragmentu ściany), które rozprzestrzenia się na inne elementy nośne połączone z początkowo uszkodzonym elementem. W efekcie końcowym dochodzi albo do całkowitego zawalenia, albo do zawalenia nieproporcjonalnie dużej części konstrukcji, czego przykładem mogą być katastrofy budowlane budynków wykonanych zarówno w technologii płytowo-słupowej, jak i płytowo-ścianowej - rys. 1 a i 1 b.

Przedstawione na rys. 1 a i 1 b przykłady ukazują ogrom zniszczeń, strat finansowych oraz ofiar jakie giną w przypadku katastrof wywołanych zniszczeniem jednego elementu w ustroju konstrukcyjnym.

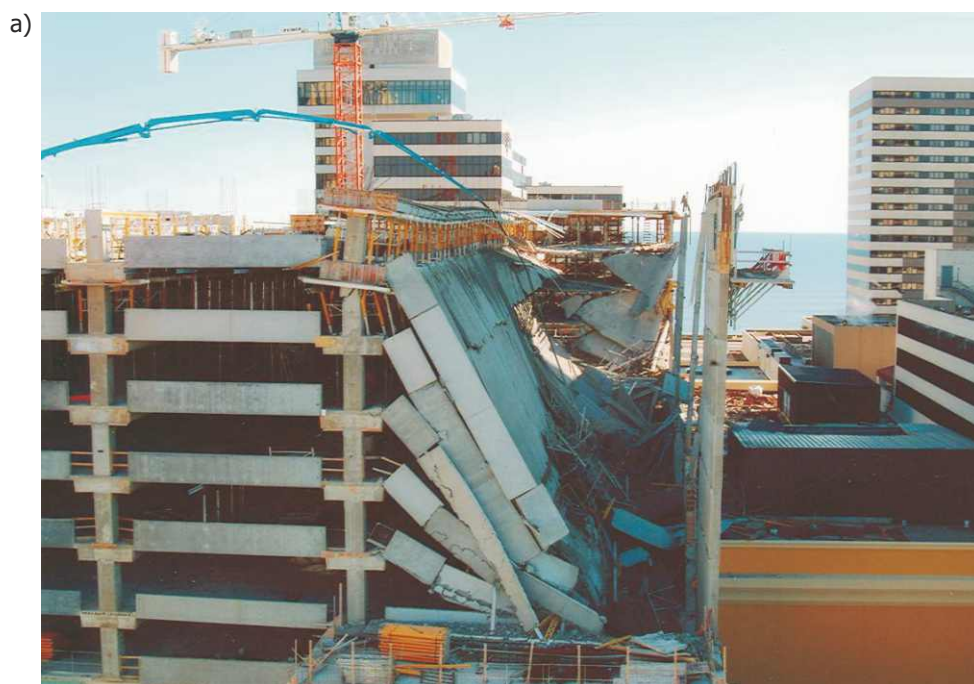
Przedstawione przykłady ogromnych katastrof budowlanych, które były wynikiem zarówno działalności umyślnej, jak i niezamierzonej są podstawą prowadzonych na całym świecie badań i analiz nad zachowaniem się konstrukcji w stanie awaryjnym - katastrofalnym. Wyniki tych działań w znacznym stopniu oparte są na symulacjach numerycznych obiektów, które uległy poważnemu zniszczeniu lub całkowitemu zawaleniu. Brak jest informacji o rzeczywistym zachowaniu się konstrukcji w trakcie rozwoju katastrofy, co może służyć wypracowaniu bardziej zgodnych z rzeczywistością metod konstruowania obiektów. Dlatego też przy finansowym wsparciu firmy CPJS (Centrum Promocji Jakości Stali) przeprowadzono "Badania zachowania się narożnego fragmentu monolitycznego ustroju płytowo-słupowego zbrojonego stalą EPSTAL o wysokiej ciągliwości w sytuacji awaryjnej wywołanej usunięciem podpory".



Rys. 1a.

Skutki katastrof postępujących:

- a) kompleks użyteczności publicznej Skyline Plaza w Stanach Zjednoczonych [W2],
- b) budynek mieszkalny Ronan Point w Wielkiej Brytanii [W3],
- c) Commonwealth Ave. Tower w Bostonie [W4], d) budynek L'Ambiance Plaza w Bridgeport [W5].



Rys. 1 b.

Skutki katastrof postępujących w:

- a) Tropicana Casino Parking Garage [W6],
- b) Budynek federalny im. Alfreda P. Murraha w Oklahoma City wg [W1].

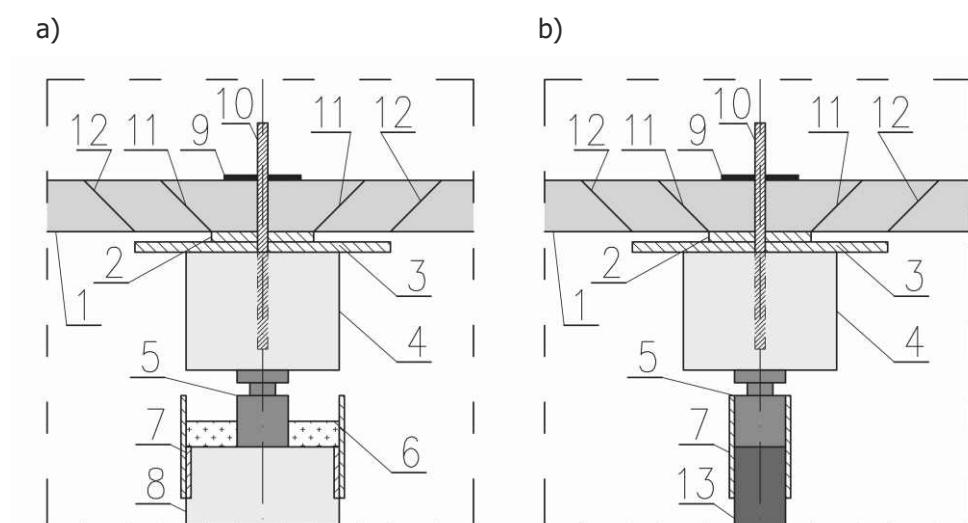
Model i stanowisko badawcze

Opis stanowiska badawczego

Model badawczy zaprojektowano tak, aby podczas badań jak najlepiej odzwierciedlał pracę fragmentu narożnego rzeczywistego, dziewięciopolewego ustroju płytowo-słupowego wykonanego w skali 1/2. Przyjęto model badawczy o osiowym rozstawie podpór 3000 × 3000 mm. Jednakże, dla umożliwienia symulacji ustroju ciągłego, konieczne było wykonanie modelu większego - do przeprowadzenia badań wykonano płaską płytę żelbetową o wymiarach 4000 × 4000 × 100 mm (1 - wg rys. 3). Uwzględnienie wpływu pozostałej części ustroju nastąpiło poprzez założenie pięciu stalowych cięgien o średnicy 28 mm umieszczonych w sposób przedstawiony na rysunku (6 - wg rys. 3).

W wyniku obliczeń nośności stref podporowych ze względu na przebieg, model podparto czterema prefabrykowanymi elementami dwufazowego działania (rys. 2). W pierwszej fazie - do przebiegu - obliczeniowy obwód kontrolny oraz obliczona na jego podstawie nośność były określane do projektowanych wymiarów podpory 200 × 200 mm (wymiar elementu stalowego 2 wg rys. 2). W fazie drugiej - po przebiegu - w wyniku niewielkiego przemieszczenia pionowego (~5 mm) opadająca część modelu miała w zamiśle zatrzymać się na elemencie stalowym 3 wg rys. 2, powiększając obwód kontrolny do wymiarów 500 × 500 mm. Powstające w modelu reakcje przez znajdujące się pod podporami pośrednimi siłomierze były przekazywane na nieruchome podpory słupowe o wysokości 2400 mm (2 - wg rys. 3).

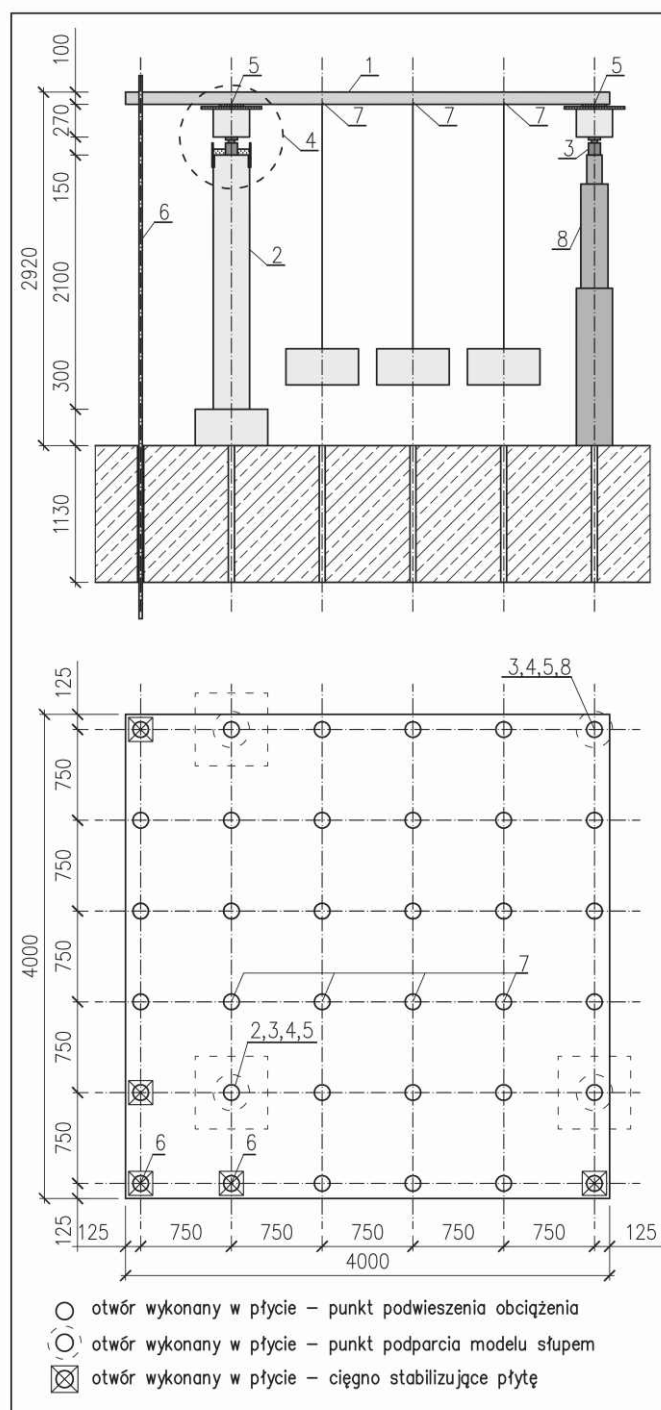
Widok modelu zamieszczono na rys. 4 i 5.



Rys. 2.

Szczegół podparcia modelu: a) na podporze stałej, b) na siłowniku długiego wysuwu.

1 – model badawczy, 2 – płyta stalowa 200 × 200 × 10 mm, 3 – płyta stalowa 500 × 500 × 20 mm, 4 – prefabrykowany bloczek betonowy 300 × 300 × 230 mm, 5 – siłomierz, 6 – drewniany element stabilizujący, 7 – stalowa obejma zabezpieczająca, 8 – podpora żelbetowa, 9 – podkładka stalowa, 10 – gwintowany pręt mocujący element nr 4 do modelu, 11 – teoretyczny zakres strefy zniszczenia przy przebiegu, 11 – zakładany zakres strefy zniszczenia po przebiegu, 13 – siłownik długiego wysuwu.



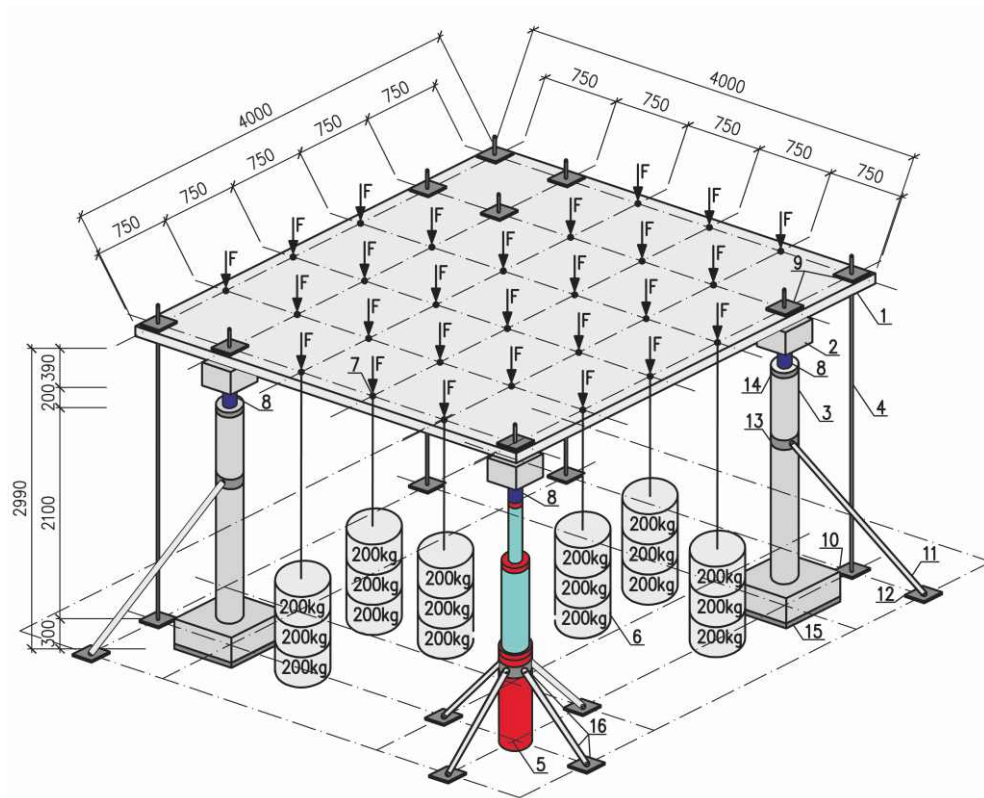
Rys. 3.

Schemat stanowiska badawczego:

1 - model badawczy, 2 - prefabrykowane podpory żelbetowe, 3 - siłomierze, 4 - podpory pośrednie - szczegół wg rys. 6, 5 - punkty podparcia modelu, 6 - cięgna stabilizujące, 7 - punkty zawieszenia obciążenia, 8 - siłownik długiego wysuwu.



Rys. 4.
Widoki stanowiska badawczego wraz z modelem.



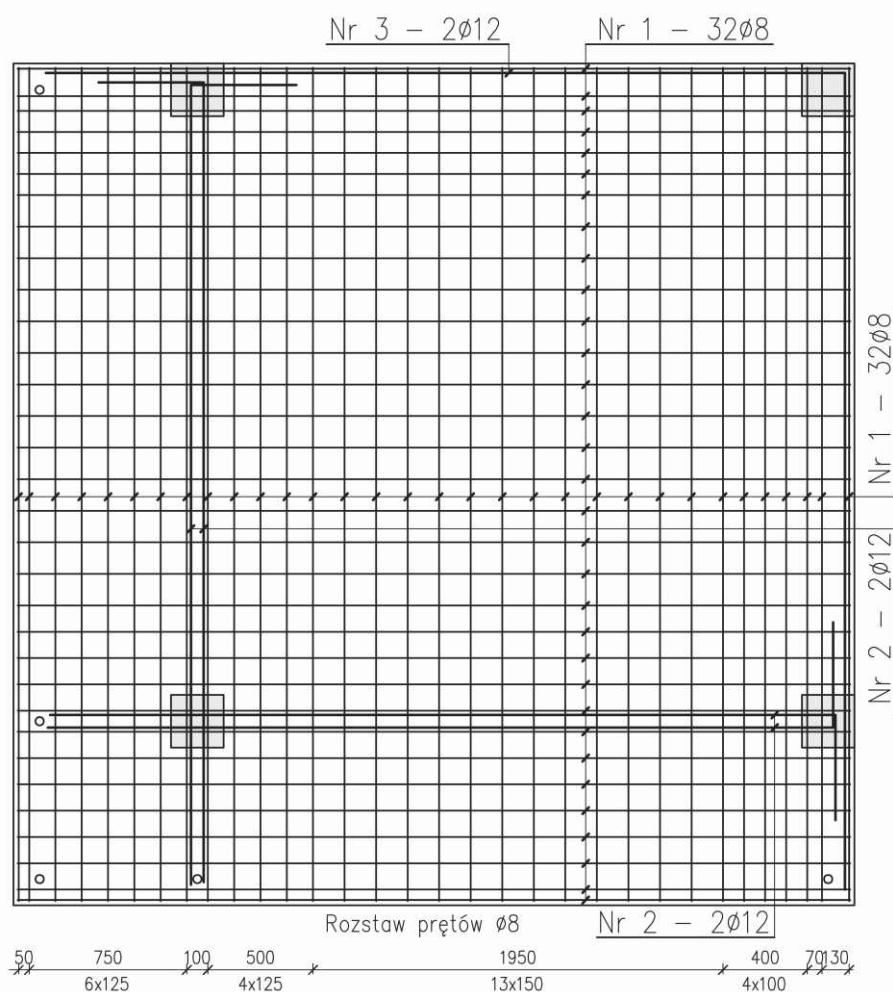
Rys. 5.

Rzut izometryczny stanowiska i modelu badawczego:

- 1- model badawczy (żelbetowa płyta o wymiarach 4000 × 4000 × 100 mm);
- 2- prefabrykowana podpora (szczegół według rys. 2);
- 3- prefabrykowana podpora żelbetowa o wysokości 2400 mm;
- 4- stalowe ciągnio średnicy 28 mm służące do stabilizacji modelu;
- 5- siłownik długiego wysuwu o nominalnym wysuwie 1200 mm przy sile 100 T;
- 6- obciążniki betonowe o wadze 200 kg;
- 7- punkt mocowania stalowej liny o średnicy 10 mm – punkty przyłożenia obciążenia;
- 8- siłomierze;
- 9- płyty stalowe służące do łączenia stalowych ciągnięć i prefabrykowanych kostek z modelem;
- 10- stalowe elementy służące do centrowania ciągnięć przy przejściu przez „płytę wielkich sił”;
- 11- stalowe zastrzały stabilizujące słupy;
- 12- elementy kotwiące zastrzały w „płycie wielkich sił”;
- 13- obejmy stalowe służące do połączenia zastrzałów ze słupami;
- 14- stalowe obejmy służące do stabilizacji siłomierzy;
- 15- warstwa wyrównawcza;
- 16- stalowy osprzęt do stabilizacji siłownika długiego wysuwu.

Dobór zbrojenia

Zbrojenie modelu zostało wyznaczone według zaleceń EC2 [1] przy uwzględnieniu obciążeń zawartych w EC1 [3, 4]. Do zestawienia obciążeń przyjęto wartości: ciężaru własnego $2,5 \text{ kN/m}^2$, obciążenia stałego $g_k = 200 \text{ kg}$ na jedno cięgno, obciążenia zmiennego $q_k = 400 \text{ kg}$ na 1 jedno cięgno oraz współczynniki obciążenia $\gamma_{g\max} = 1,35$, $\gamma_{g\min} = 1,0$, $\gamma_{q\max} = 1,5$. Uzyskane na drodze obliczeń statycznych wartości momentów zginających umożliwiły określenie liczby i średnicy zbrojenia, które następnie wykonano w postaci dwóch równoległych siatek. Na rys. 6 zamieszczono rzut zbrojenia dolnego, które wykonano z prętów o średnicy 8 mm w dwóch rozstawach. Zgodnie z zaleceniami normowymi w osiach słupów zastosowano dodatkowe zbrojenie dolne, którego celem miało być zapobieżenie rozwojowi uszkodzeń typowych dla katastrofy postępującej – pręty nr 2 i 3 według rys. 6.

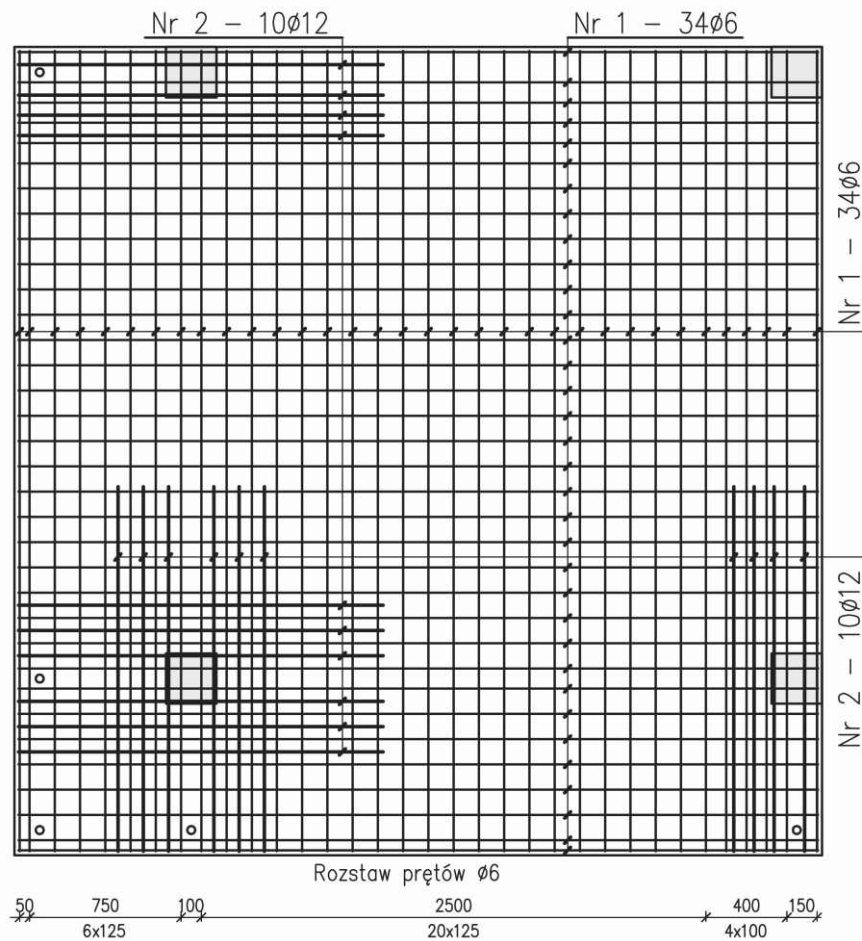


Rys. 6.

Siatka zbrojenia dolnego:

1 – zbrojenie o średnicy 8 mm – podstawowe,

2 i 3 – zbrojenie o średnicy 12 mm – przeciwko skutkom katastrofy postępującej.



Rys. 7.

Siatka zbrojenia górnego:

- 1 – zbrojenie o średnicy 6 mm – podstawowe,
- 2 – zbrojenie o średnicy 12 mm – wzmocnienie strefy podporowej.

Zbrojenie górne stanowiła siatka z prętów o średnicy 6 mm w rozstawach 100 mm nad podporą i 150 mm w przęśle, którą zgodnie z wynikami typowych obliczeń strefy podporowej wzmocniono dodatkowymi prętami o średnicy 12 mm – rys. 7. Widok poszczególnych siatek oraz ich montaż zamieszczono na rys. 8.

Długość prętów zbrojenia górnego dobrano na podstawie wskazań zawartych w amerykańskiej normie ACI [5]. Jak zaleca ta norma w paśmie podporowym zbrojenie było przedłużone poza obrys słupa na odległość równą $1/3$ rozpiętości przęsła, natomiast zbrojenie górne w paśmie przęsłowym zostało przedłużone poza obrys podpory na odległość $0,22 l_n$. Zgodnie z [6] wokół obwodu płyty na krawędziach swobodnych zastosowano strzemię ukształtowane w kształt litery U, których długość ramion była większa od $2d + 30\phi$. Rozstaw tych strzemion przyjęto równy rozkładowi prętów zbrojenia dolnego.

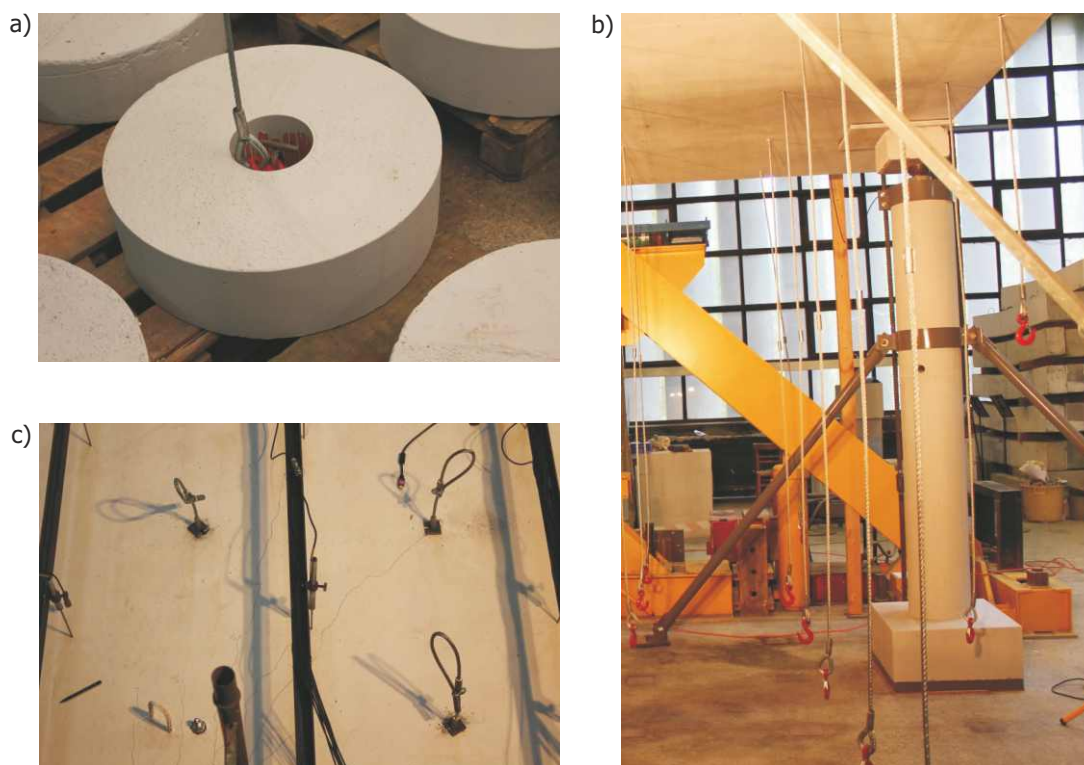


Rys. 8.

Widok zbrojenia: a) siatka górna, b) siatka dolna, c) szczegół zbrojenia strefy narożnej wraz ze strzemionami obwodowymi, d) montaż dystansów pomiędzy siatkami, e) transport zbrojenia.

System obciążania

Ze względu na przewidywane duże deformacje modelu – głównie przemieszczenia pionowe o przewidywanym zakresie do 1000 mm, konieczne było wykonanie systemu obciążania, który umożliwiłby płynną regulację położenia obciążenia względem modelu oraz przeniesienie ciężaru o masie do 1500 kg w każdym punkcie przyłożenia. Na podstawie tych założeń obciążenie modelu zrealizowane zostało za pomocą systemu podwieszonych na stalowych linach betonowych i stalowych obciążników o różnej masie jednostkowej: 25 kg, 100 kg, 200 kg – rozmieszczenie punktów przyłożenia siły zamieszczono na rys. 3. Szczegóły mocowania przedstawiono na rys. 9. Natomiast na rys. 10 pokazano widok pierwszej serii obciążników przystosowanych do zaczepienia linek.



Rys. 9.

Widok szczegółów systemu obciążania:

- a) pierwszy obciążnik o masie 100 kg ze specjalnie wyprofilowany otworem i uchem umożliwiającym zaczepienie linki,
- b) linka stalowa średnicy 10 mm z aluminiowymi zaciskami umożliwiającymi utworzenie pętli transportowej i stopniowanie wysokości podwieszenia obciążenia,
- c) podkładki stalowe umożliwiające stabilizację aluminiowego zaczepu w poziomie górnej powierzchni płyty.

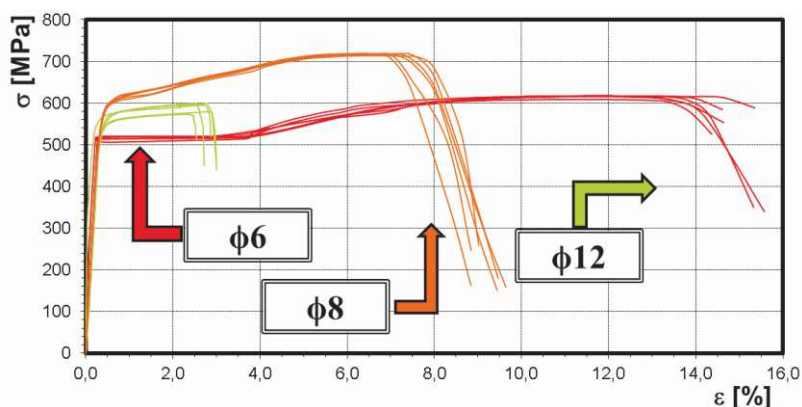


Rys. 10.
Widok pierwszej warstwy obciążników tuż przed podwieszeniem.

Materiały

Stal

Do zbrojenia modeli użyto bardzo zróżnicowanego asortymentu stali, zarówno jeżeli chodzi o średnicę, jak i gatunek. Badania stali wykonano na próbkach nieobrobionych, sporządzając dla każdego rodzaju pręta zbrojeniowego wykresy $\sigma - \epsilon$ (rys. 11).



Rys. 11.

Zależności $\sigma - \epsilon$ nieobrobionych prętów.

W wypadku prętów $\phi 8$ stosunek $R_m/R_{p0,2}$ wynosił 1,21, a wartość $A_{gt} = 6,6\%$. Zgodnie z wymaganiami [2], zbrojenie $\phi 8$ spełnia wymagania klasy B. Natomiast pręty $\phi 6$ można zaliczyć do klasy A, ponieważ $R_m/R_{p0,2}$ wynosił 1,11, a wartość $A_{gt} = 3,13\%$. Zastosowane nad podporami zbrojenie $\phi 12$ mm wykonane ze stali EPSTAL charakteryzowało się stosunkiem $R_m/R_{eh} = 1,20$ i wartością odkształcenia przy maksymalnej sile rozciągającej A_{gt} na poziomie 11,8%, co pozwoliło na zakwalifikowanie go do klasy C. Wyniki badań stali zestawiono w tabelicy 1.

Tab. 1.

Średnie wartości parametrów mechanicznych prętów nieobrobionych badanych wg PN-EN 10002-1:1998.

Średnica próbki	E	$R_{p0,2}$	R_{eh}	Odch. standard.	R_m	Odch. standard.	A_{gt}	Odch. standard.
	[MPa]	[MPa]	[MPa]		[MPa]		[%]	
Ø8	200136	591,5	-	2,88	716,6	1,98	6,62	0,10
Ø6	199745	544,2	-	3,32	598,6	1,98	3,13	0,11
Ø12	194032	-	514,5	3,32	616,2	1,98	11,78	0,11

gdzie:

E – moduł sprężystości stali,
 $R_{p0,2}$ – naprężenie graniczne przy przyroście nieproporcjonalnym 0,2 %,
 R_{eH} – górna granica plastyczności,
 R_m – wytrzymałość na rozciąganie,
 A_{gt} – całkowite procentowe wydłużenie przy największej sile.

Beton

Do wykonania modeli zastosowano beton towarowy wykonywany na cemencie portlandzkim wieloskładnikowym CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R i kruszywie o maksymalnej średnicy ziaren do 8 mm.

W dniu badania modeli, tj. po 90 dniach dojrzewania betonu, średnie wartości parametrów mechanicznych określono na: 6 próbkach kostkowych $150 \times 150 \times 150$ mm, 3 walcach 150×300 mm w próbie brazylijskiej na rozłupywanie, 3 walcach 150×300 mm do określenia modułu sprężystości (wg PN-EN 12390:2002 i Instrukcji ITB nr 194). Parametry materiałowe zestawiono w tabelicy 2.

Tab. 2.

Cechy mechaniczne betonu użytego w badaniach.

Kostki $150 \times 150 \times 150$ mm $f_{c,cube,m}$	Walce $\phi 150 \times 300$ mm $f_{ct,m}$	Walce $\phi 150 \times 300$ mm $E_{c,m}$
42,2 MPa ($\nu = 4,8$ %)	33,1 MPa ($\nu = 3,8$ %)	34,8 GPa ($\nu = 5,2$ %)



Rys. 12.

Badania laboratoryjne: a) badanie modułu sprężystości, b) badanie wytrzymałości na ściskanie, c) badanie wytrzymałości na rozciąganie przez rozłupanie.

Teoretyczna nośność modelu

Określenie teoretycznej nośności elementu w sytuacji normalnego użytkowania

Dla przyjętego rozstawu i ilości zbrojenia (w obliczeniach uwzględniono dodatkowe zbrojenie przeciwko katastrofie postępującej oraz zbrojenie, które dodano ze względów konstrukcyjnych) wykonano ponowne obliczenia nośności elementu podpartego na czterech podporach. Rozważono dwa schematy zakładając w obliczeniach, że wartość wytrzymałości stali równa jest wytrzymałości na zerwanie R_m oraz obliczeniowej granicy plastyczności f_{yd} . Dodatkowo obliczenia uwzględniają pomierzone parametry mechaniczne betonu. W rezultacie otrzymano dwie wartości sił $F_{cal,o}$ oraz $F_{cal,Rm}$, które zestawiono w Tabelicy 3. Są to wartości sił skupionych w miejscach zaczepienia linek obciążających. Ponadto, na podstawie przeprowadzonych obliczeń, stwierdzono, że przy przyjętym układzie zbrojenia o zniszczeniu modelu decyduje zbrojenie dolne.

Tab. 3.

Wartości obciążeń niszczących model podparty na czterech podporach.

Wartości obciążeń [kg] w miejscu zaczepienia linek obciążających		
Oznaczenie	$F_{cal,o}$	$F_{cal,Rm}$
Wartości	611	1518

gdzie:

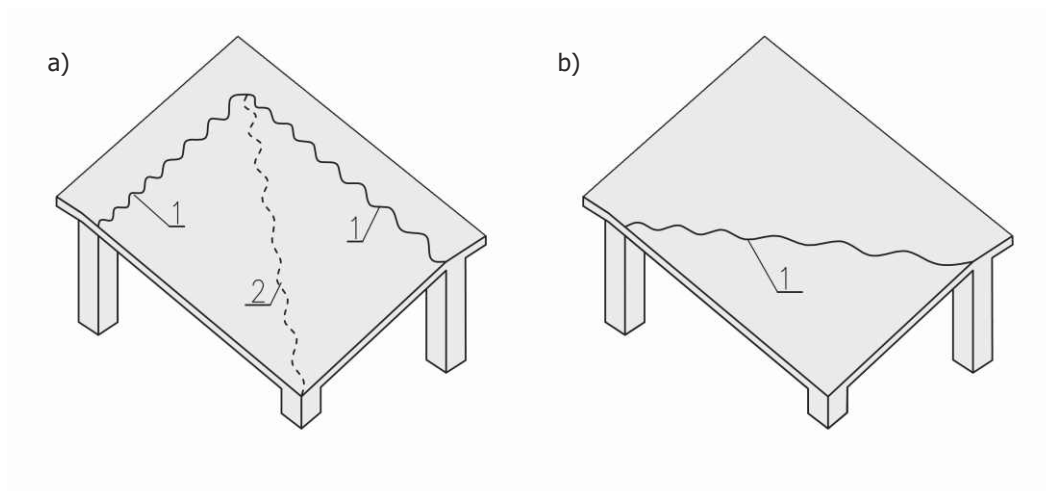
$F_{cal,o}$ – obliczeniowe obciążenie niszczące model podparty na czterech podporach (z uwagi na zerwanie wkładek zbrojenia dolnego),

$F_{cal,Rm}$ – charakterystyczne obciążenie niszczące model podparty na czterech podporach (z uwagi na zerwanie wkładek zbrojenia dolnego).

Określenie teoretycznej nośności elementu w sytuacji awaryjnej

Przy założonym zbrojeniu obliczono również teoretyczne wartości obciążeń niszczących model z uwagi na pracę wspornikową lub kopertową części narożnej (rys. 25), które mogły zaistnieć w wyniku usunięcia podpory. Na podstawie rys. 13 w obliczeniach przeprowadzonych według procedury obliczeniowej zamieszczonej w [6] uwzględniono dwa schematy statyczne:

- Schemat kopertowy (rys. 13a) – ciężar własny (obciążenie równomiernie rozłożone), obciążenie stałe i zmienne przyjęte jako punktowe o równej wartości w każdym punkcie – $F_{cal,kop,Rm}$.
- Schemat wspornikowy (rys. 13b) – ciężar własny (obciążenie równomiernie rozłożone), obciążenie stałe i zmienne przyjęte jako punktowe o równej wartości w każdym punkcie – $F_{cal,wsp,Rm}$.



Rys. 13.

Rozważane schematy zniszczenia: a) schemat „kopertowy”, b) schemat wspornikowy (1 – linie przegubów plastycznych powstałe na górnej powierzchni modelu, 2 – linie przegubów plastycznych powstałe na dolnej powierzchni modelu).

Dla każdego wymienionego powyżej schematu policzono odpowiednią wartość obciążenia niszczonego przy założeniu, że wartość wytrzymałości stali równa jest wytrzymałości na zerwanie R_m . Obliczone wartości zestawiono w Tabelicy 4.

Tab. 4.

Wartości obciążeń niszczonego model podparty na trzech podporach.

Wartości obciążeń [kg]		
Oznaczenie	$F_{cal,kop,Rm}$	$F_{cal,wsp,Rm}$
Symbol wg rys. 20	A	B
Wartości	961	859

gdzie:

$F_{cal,kop,Rm}$ – charakterystyczne obciążenie przyłożone w miejscu zaczepienia obciążenia, niszczące model podparty na trzech podporach według schematu kopertowego.

$F_{cal,wsp,Rm}$ – charakterystyczne obciążenie przyłożone w miejscu zaczepienia obciążenia, niszczące model podparty na trzech podporach według schematu wspornikowego.

Przebieg badań

Jak już wspomniano badana płyta żelbetowa o wymiarach $4000 \times 4000 \times 100$ mm podparta została w czterech punktach rozmieszczonych w rozstawie 3000 mm. W czasie układania modelu na stanowisku dokonano pomiaru ciężaru płyty (ciężar modelu: 39,02 kN → masa modelu: 3978 kg → masa na jednostkę objętości: 2486 kg/m^3). W kolejnym kroku, na podstawie odczytu reakcji podporowych na siłomierzach, dokonano rektyfikacji modelu na podporach porównując otrzymane wskazania z wielkościami sił uzyskanymi na podstawie obliczeń statycznych. Po zakończeniu rektyfikacji model usztywniono pięcioma stalowymi ściągamami, w których siłę naciągu dobrano tak, aby niezmieniony pozostał rozkład reakcji podporowych.

Prowadzone pomiary

Nad modelem umieszczono stalową konstrukcję wsporczą, do której zamocowano 24 indukcyjne czujniki przemieszczeń (rys. 14), a które wraz z równoczesnym pomiarem reakcji podporowych pozwalały na określenie zależności:

- ➔ obciążenie – wartość reakcji podporowych,
- ➔ obciążenie – odkształcenie modelu,

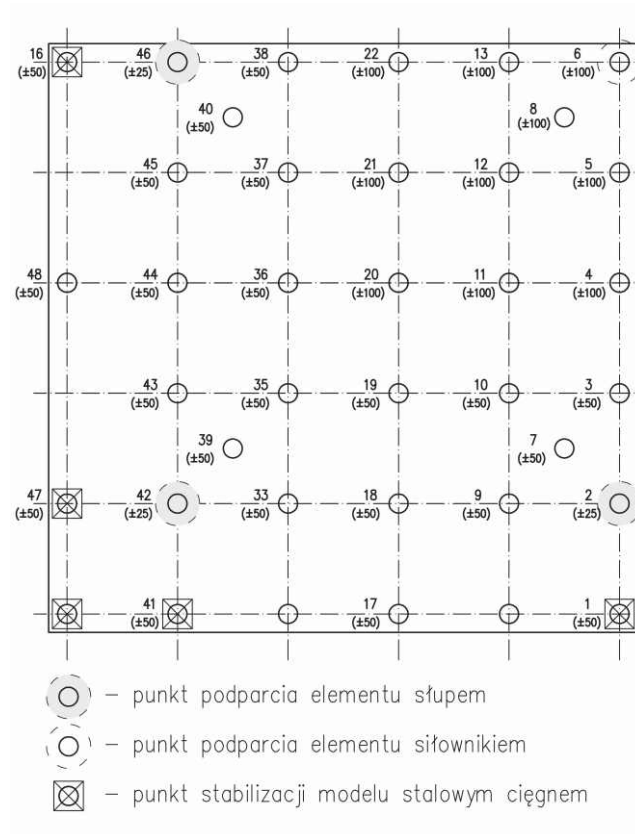
które następnie można było porównać z modelem numerycznym.

Na rys. 15 podano rozstaw czujników indukcyjnych wraz z ich nominalnym zakresem pomiarowym, natomiast na rys. 16 zamieszczono widok ASP – Automatycznego Stanowiska Pomiarowego. Dodatkowo, celem kontroli prowadzonych pomiarów, prowadzono geodezyjny pomiar przemieszczeń (rys. 17).



Rys. 14.

Widok modelu z aparaturą do pomiaru przemieszczeń.



Rys. 15.
Rozmieszczenie czujników indukcyjnych.



Rys. 16.
Widok ASP – Automatyycznego Stanowiska Pomiarowego.



Rys. 17.
Mocowanie taśm umożliwiających pomiar geodezyjny.

Cykle badawcze

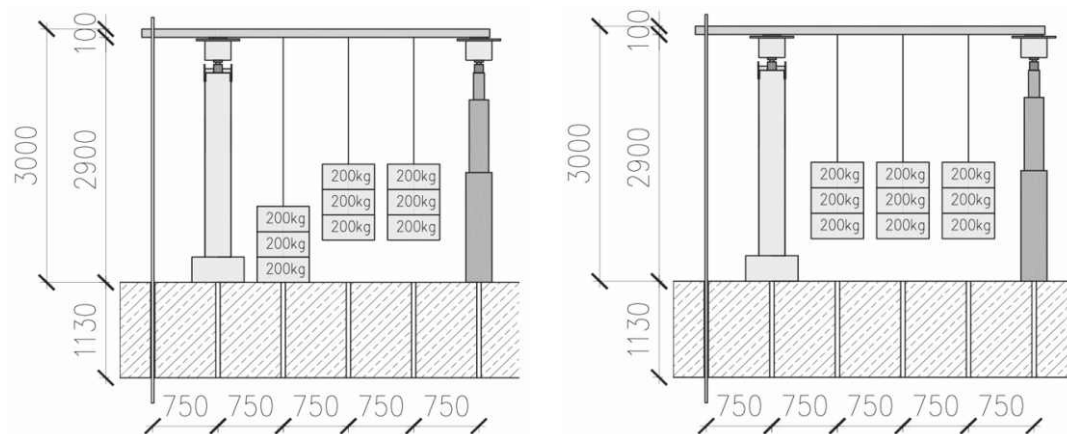
Po wykonaniu prac wstępnych przystąpiono do właściwej części badań, które składały się z powtarzających się etapów:

- ① Zerowanie siłomierzy i czujników indukcyjnych wykonywano w każdym nowym dniu Badawczym.



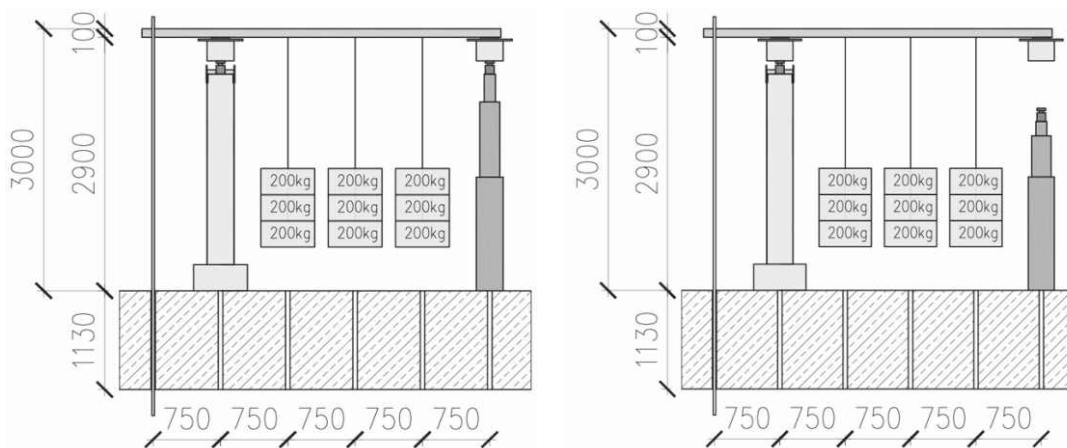
Rys. 18.
Zerowanie siłomierzy.

1 Obciążanie modelu.



Rys. 19.
Obciążanie modelu.

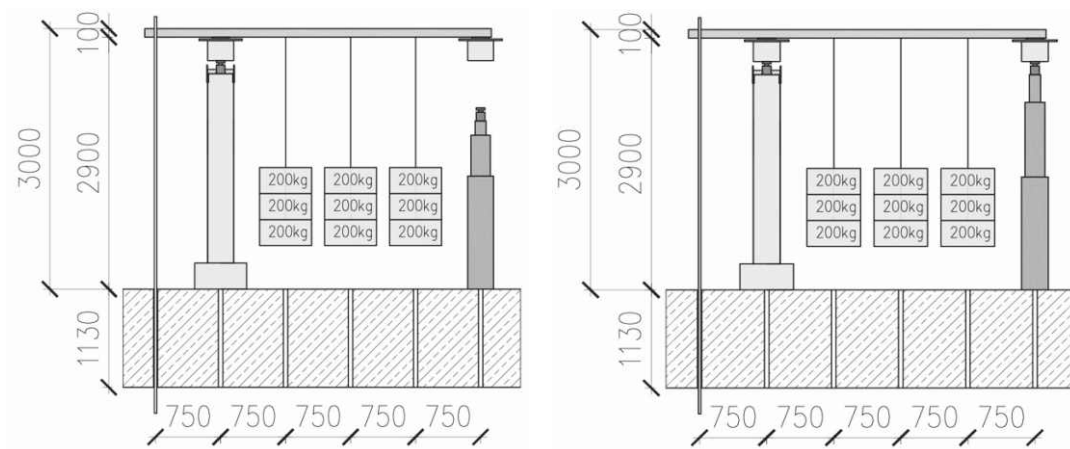
2 Opuszczanie narożnika.



Rys. 20.
Opuszczanie obciążonego naroża.

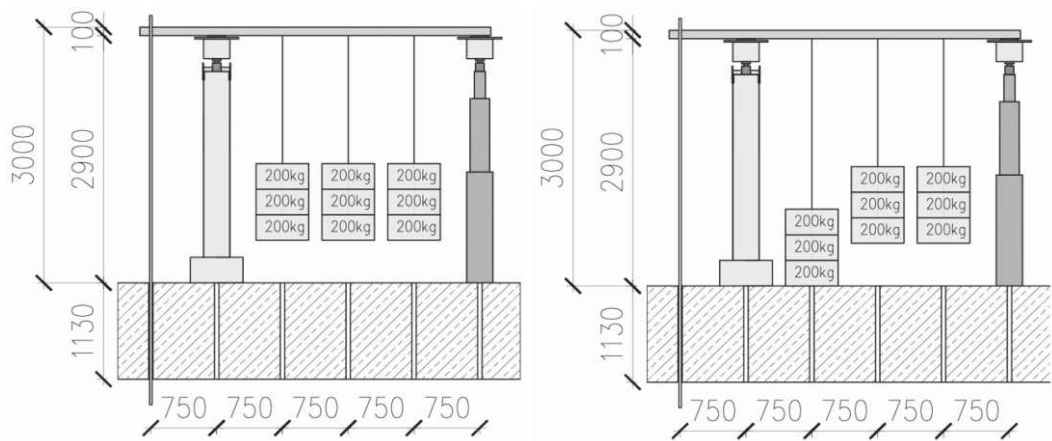
- 3 Kontrolny odczyt przemieszczeń wykonywany za pomocą niwelatora.
- 4 Podparcie zabezpieczające model i pracowników w czasie prac na górnej powierzchni modelu.
- 5 Odwzorowanie zarysowań na górnej powierzchni modelu.

6 Podnoszenie narożnika.



Rys. 21.
Podnoszenie obciążonego naroża.

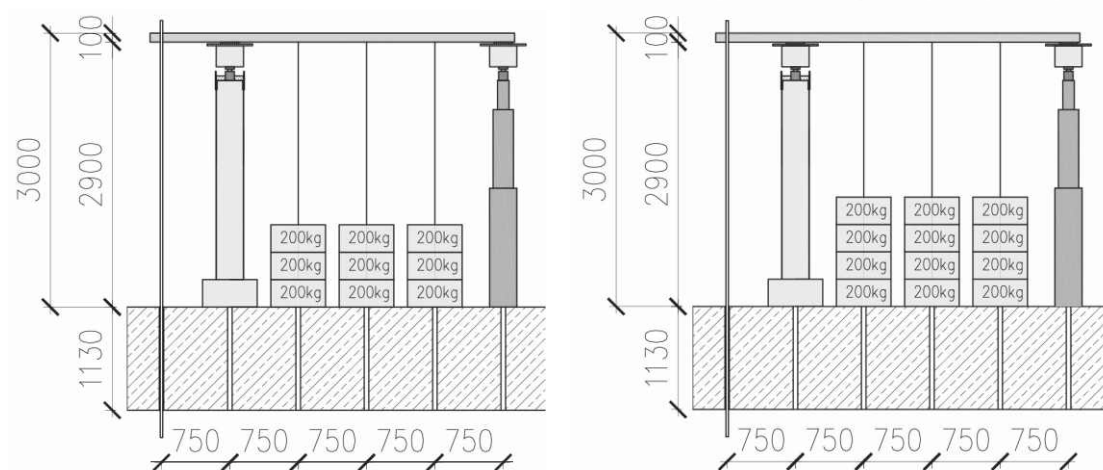
7 Odciążanie modelu.



Rys. 22.
Odciążanie.

8 Odwzorowanie zarysowań na dolnej powierzchni płyty.

9 Zmiana wartości obciążenia.



Rys. 23.

Zmiana wartości obciążenia.

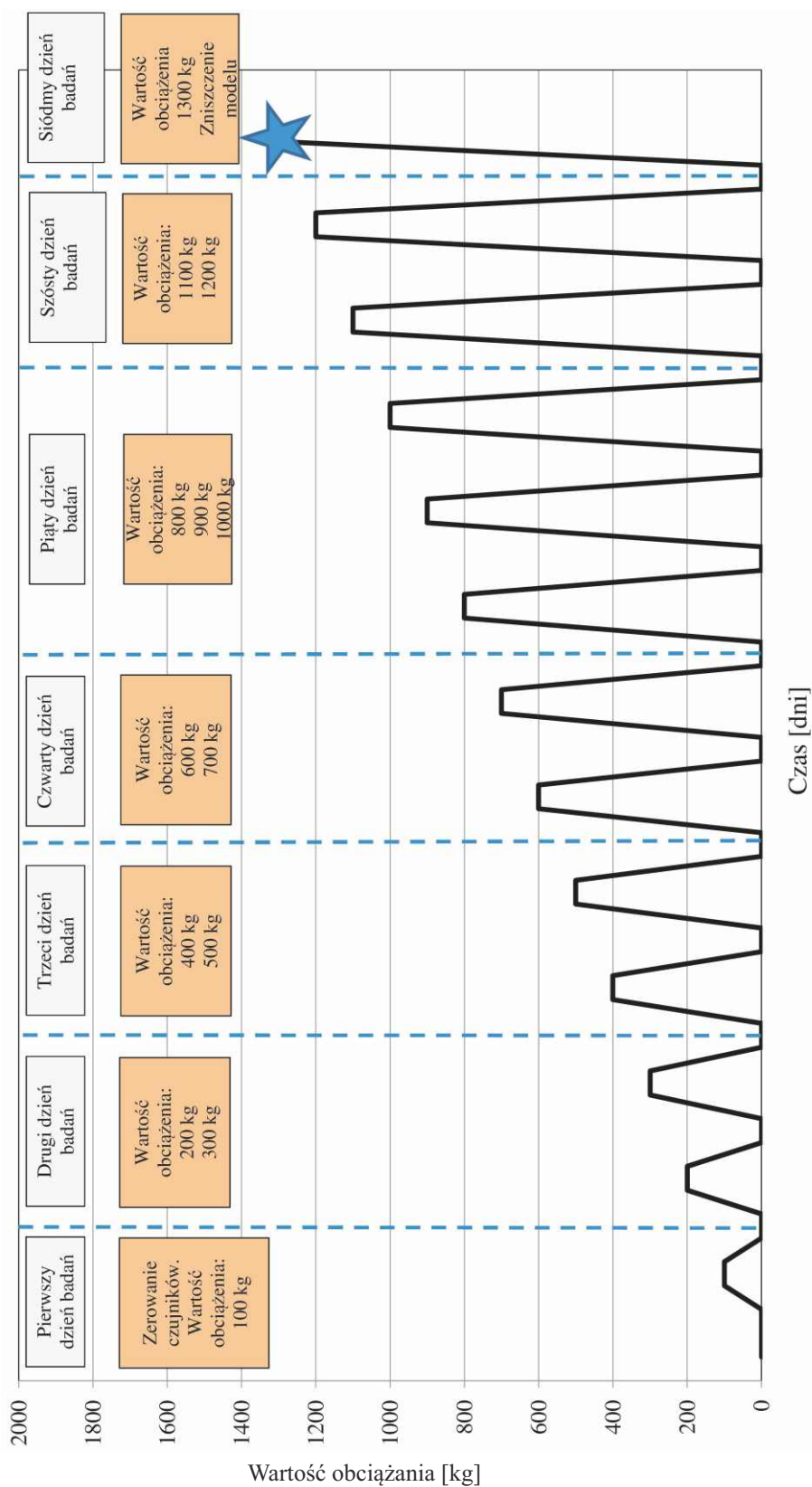
Po zakończeniu tej czynności cykl badawczy był powtarzany ponownie według podanej powyżej kolejności. Pełny schemat obciążania-odciążania zamieszczono na rys. 25. Na rys. 24 natomiast przedstawiono widoki modelu przy wybranych wartościach obciążenia.



Rys. 24.

Widoki obciążonego modelu:

- a) podwieszanie pierwszej warstwy obciążników,
- b) obciążenie modelu obciążeniem 100 kg na jednej linie,
- c) zmiana obciążenia ze 100 na 200 kg,
- d) obciążenie modelu masą 300 kg na każdej linie,
- e) model obciążony masą 1000 kg na każdej linie,
- f) model obciążony obciążeniem niszczącym – 1300 kg.



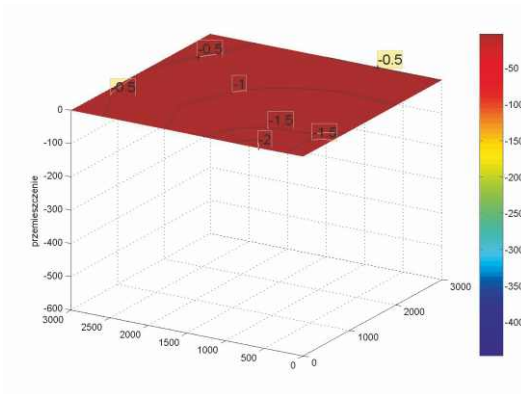
Rys. 25.
Cykl badawczy.

Wyniki badań

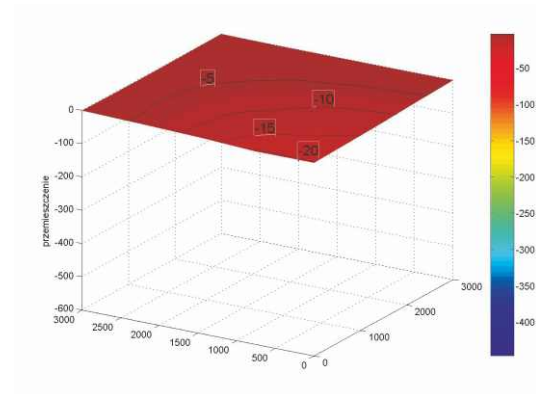
Odształcenie modelu

Badania elementu we wszystkich cyklach przebiegały w analogiczny sposób, według schematu podanego w poprzednim rozdziale. Otrzymane w czasie badań pomiary przemieszczeń pionowych oraz reakcji podporowych, a także powstający obraz zarysowania, wskazują na symetryczną pracę modelu w czasie całego badania. Poniżej na rys. 26 zamieszczono wyniki przemieszczeń górnej powierzchni płyty uzyskane na podstawie pomiarów czujnikami indukcyjnymi.

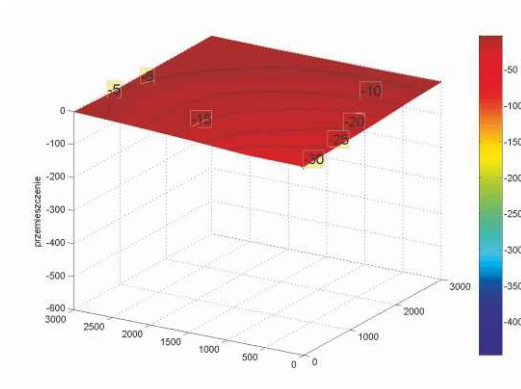
Obciążenie ciężarem własnym



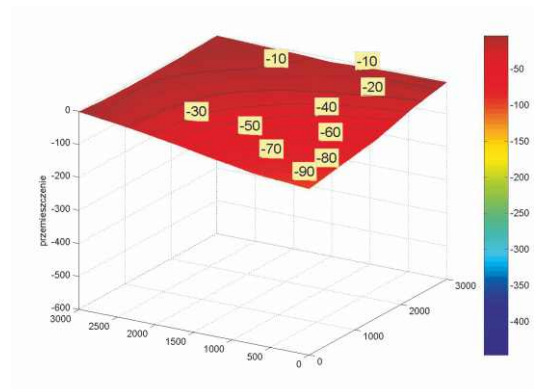
Obciążenie 100 kg na lince



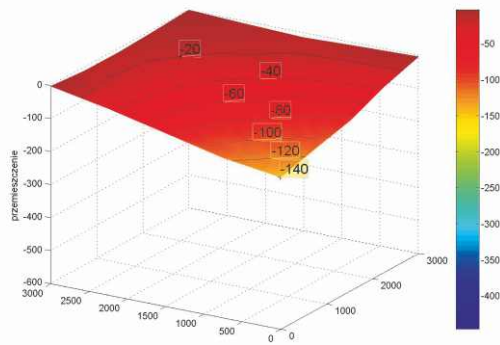
Obciążenie 200 kg na lince



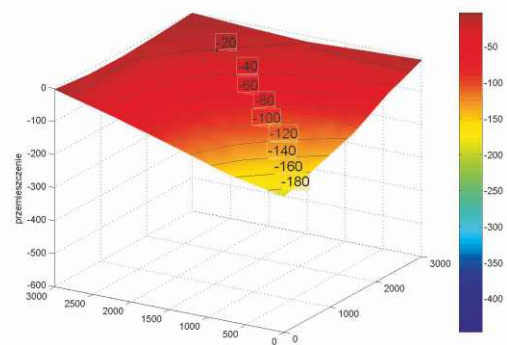
Obciążenie 300 kg na lince



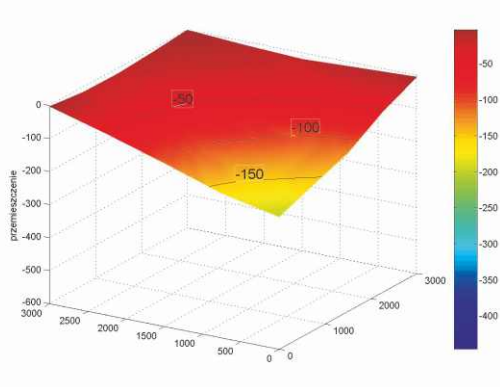
Obciążenie 400 kg na lince



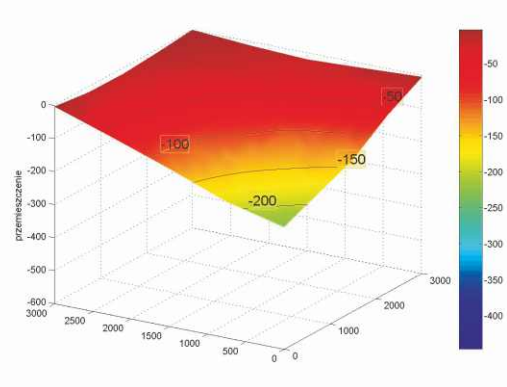
Obciążenie 500 kg na lince



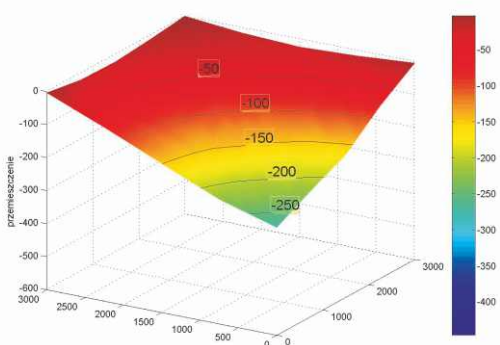
Obciążenie 600 kg na lince



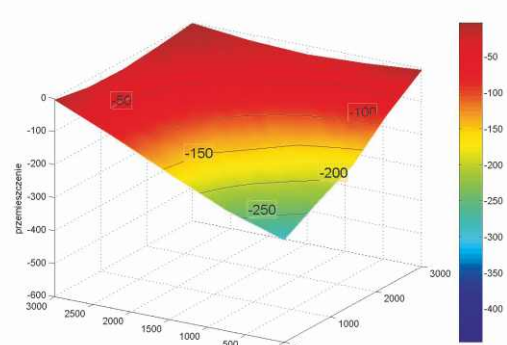
Obciążenie 700 kg na lince



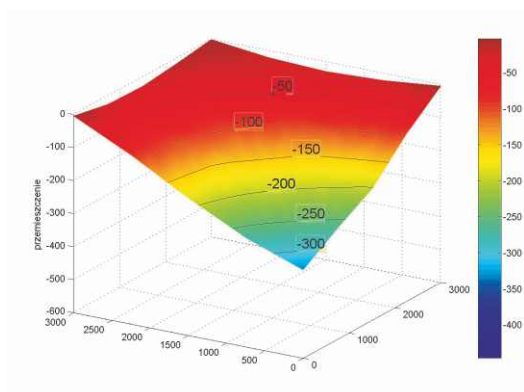
Obciążenie 800 kg na lince



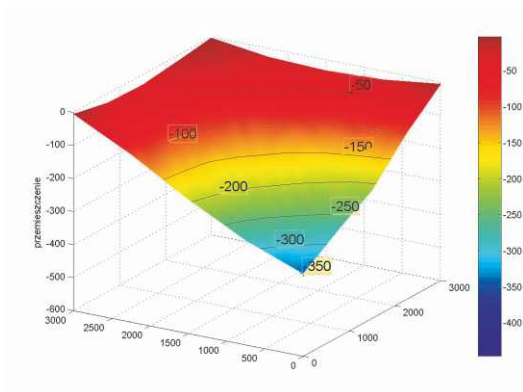
Obciążenie 900 kg na lince



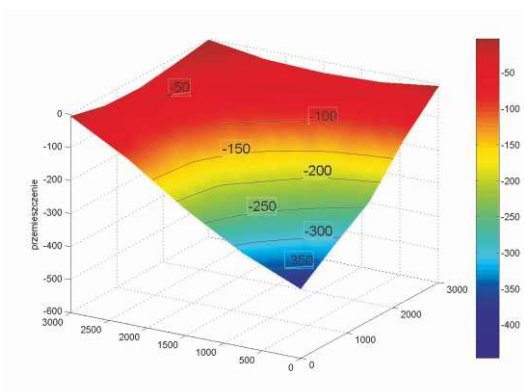
Obciążenie 1000 kg na lince



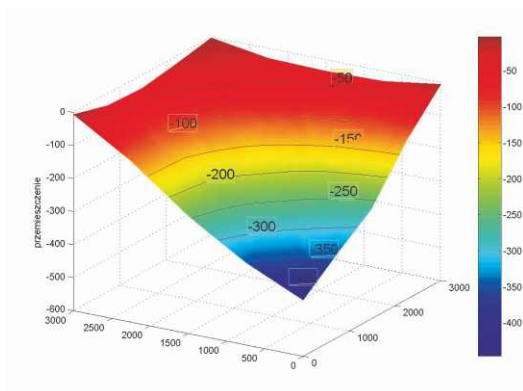
Obciążenie 1100 kg na lince



Obciążenie 1200 kg na lince



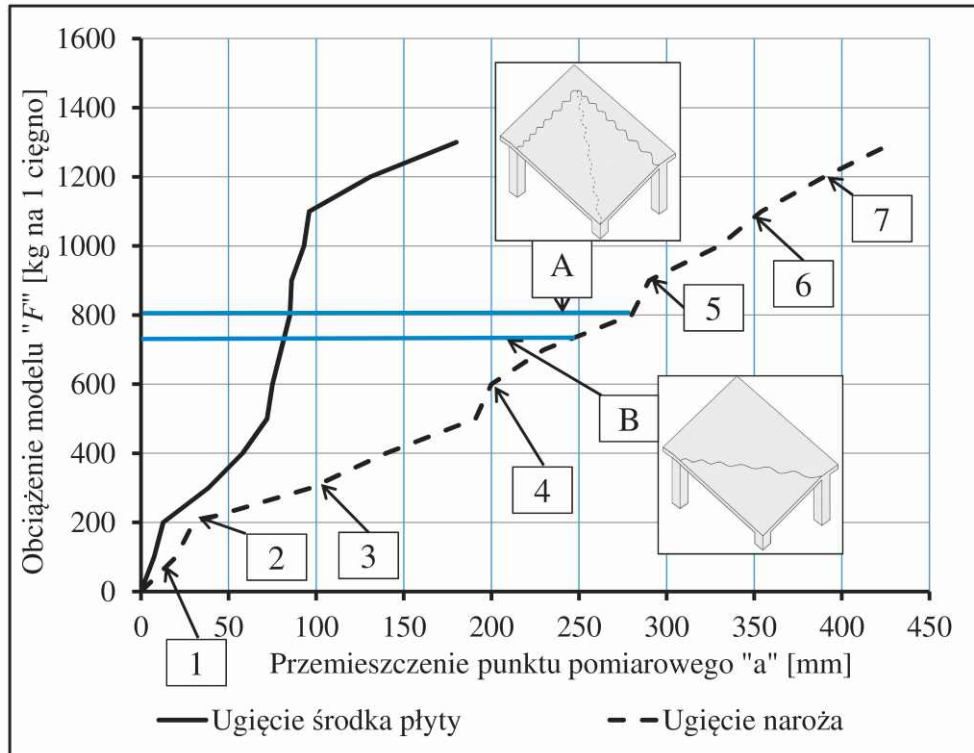
Obciążenie 1300 kg na lince



Rys. 26.

Wykresy odkształceń górnej powierzchni modelu w funkcji obciążenia.

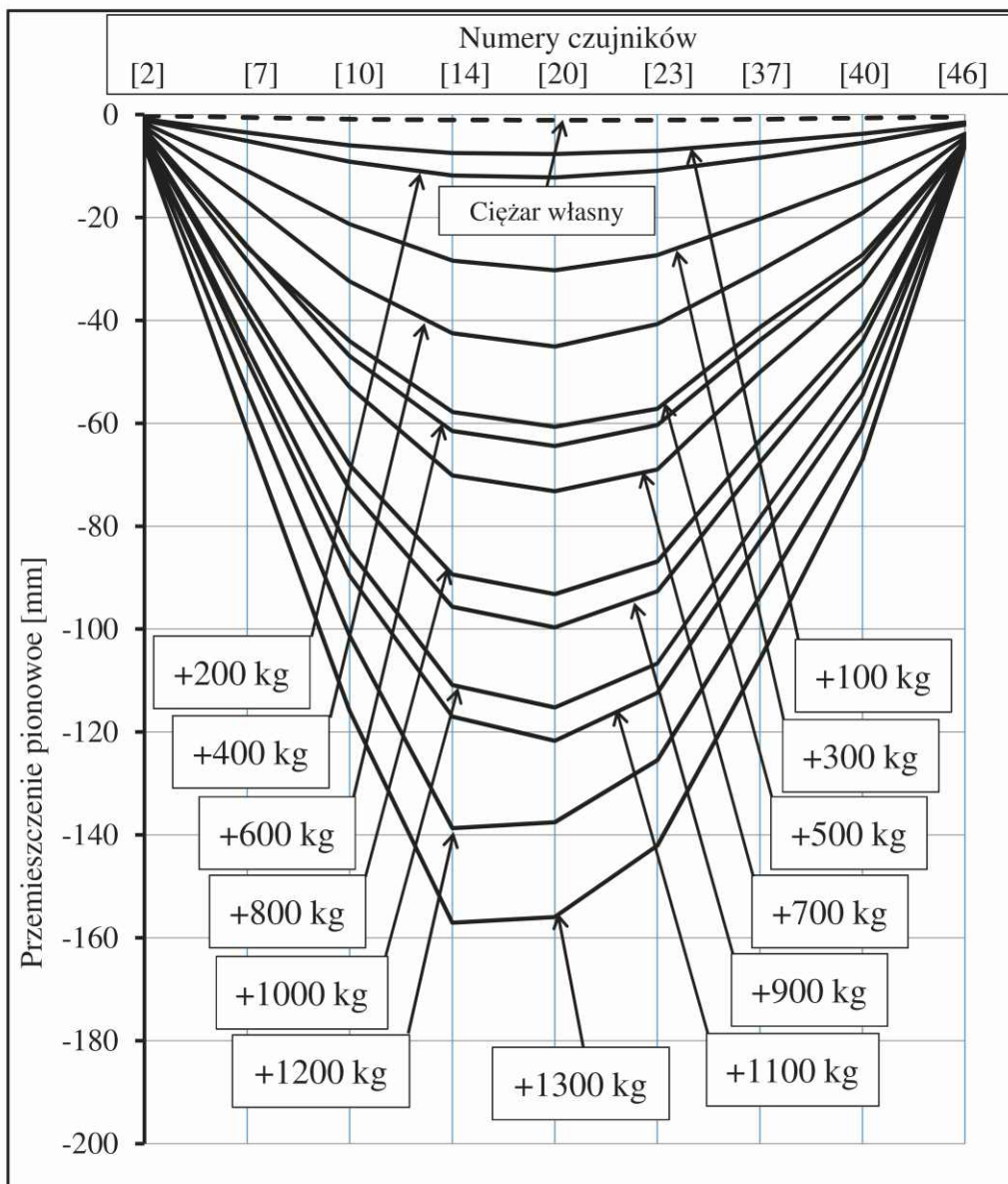
Jako syntezę pokazanych na rys. 26 odkształceń górnej powierzchni płyty w funkcji wzrastającego obciążenia na rys. 27 przedstawiono wykres pionowych przemieszczeń modelu w środku rozpiętości pola oraz przemieszczeń narożnika w funkcji przykładanego obciążenia. Numerami 1 ÷ 7 zaznaczono momenty, w których nastąpiło przerwanie płynności wykresu. Autorzy uważają, że powstałe odchylenia są spowodowane powstałymi odkształceniami trwałymi, luzowaniem cięgien stabilizujących płytę, przekłamaniami, jakie mogły powstać w chwili ponownego podłączenia aparatury pomiarowej. Można zauważyć, że im dłuższa przerwa w badaniu, tym powstałe odchylenie było większe. Na wykresie zaznaczono również wartości sił, które uzyskano na podstawie obliczeń nośności elementu w stanie awaryjnym po usunięciu podpory. Analiza przemieszczeń naroża modelu pozwala stwierdzić, że w całym zakresie prowadzonych badań zależność przemieszczenie-siła mierzona dla narożnika jest w przybliżeniu funkcją liniową. Podobny charakter – kształt ma zależność opisująca przemieszczenie środka płyty pod wpływem obciążenia. W rezultacie autorzy przypuszczają, że otrzymana w czasie badań powierzchnia ma charakter zbliżony do prostokreślnego. Widok odkształconego modelu tuż przed zniszczeniem zamieszczono na rys. 29.



Rys. 27.

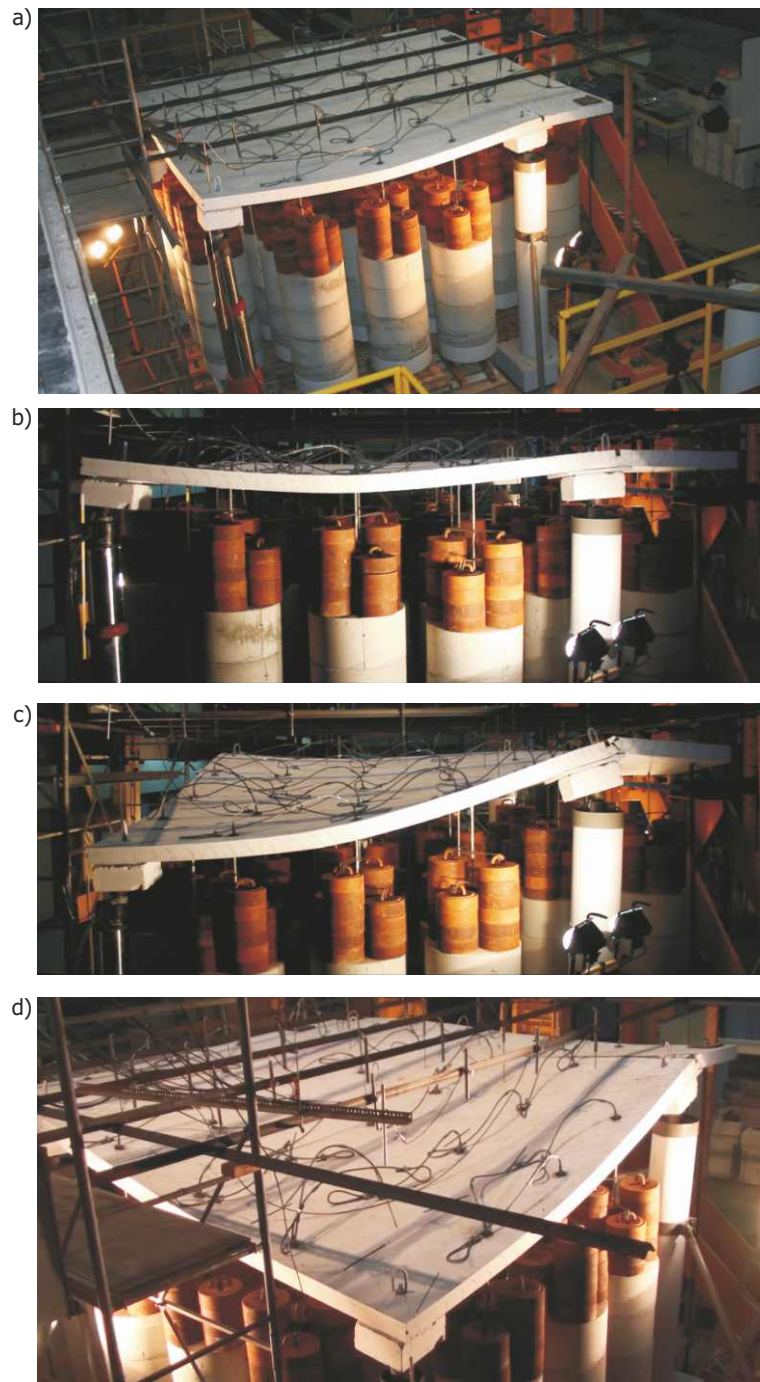
Wykres przemieszczeń naroża oraz środka płyty w funkcji obciążenia, 1 ÷ 7 – punkty załamania wykresu wynikające z przerw w badaniach, A i B – wartości obciążeń niszcących model w stanie awaryjnym (opis w tekście – Tablica 4).

W kolejnym kroku analizy odkształceń górnej powierzchni płyty na rys. 28 przedstawiono zestawienie przemieszczeń punktów pomiarowych 2, 7, 10, 14, 20, 23, 37, 40 i 46 według rys. 9, umiejscowionych wzdłuż przekątnej modelu łączącej miejsca jego podparcia. W efekcie uzyskano krzywiznę przekątnej w funkcji obciążenia. Analiza tego wykresu pozwala stwierdzić, że mniej więcej do poziomu obciążenia +500 kg na każdej linie odkształcenia modelu są symetryczne względem drugiej przekątnej. Wraz ze wzrostem wartości obciążenia uwidacznia się brak symetrii, który według autorów może być spowodowany wstępnym wygięciem elementu wywołanym krokowym systemem obciążania lub położeniem warstw zbrojenia dolnego względem powierzchni dolnej.



Rys. 28.

Wykres odkształceń górnej powierzchni płyty pomiędzy podporami wzdłuż przekątnej w funkcji obciążenia.



Rys. 29.

Widok odkształceń modelu w ostatniej fazie obciążania – obciążenie 1300 kg na jednej linie:

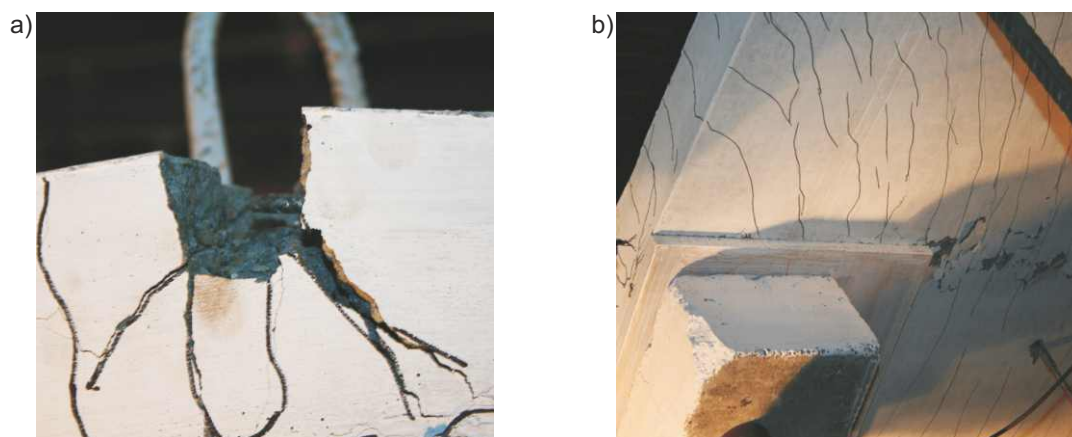
- a) model podparty na czterech słupach,
- b) widok z boku – ugięcie środka krawędzi 110 mm,
- c) ugięcie naroża równe 430 mm tuż przed zniszczeniem – widok z boku,
- d) ugięcie naroża równe 430 mm tuż przed zniszczeniem – widok izometryczny.

Sposób zniszczenia

Jak pokazano na rys. 27 praca modelu w całym zakresie, przy pominięciu wspomnianych odchyień, aż do zniszczenia, była w przybliżeniu liniowa. Pierwsze zauważalne oznaki zniszczenia zaobserwowano w szóstym dniu badań przy obciążeniu równym 1100 kg. W czasie opuszczania naroża nastąpiły dwa ciche trzaski i znaczne wykruszenie betonu w strefie podporowej (rys. 30a). Po usunięciu okruchów otuliny stwierdzono zerwanie wkładek zbrojeniowych o średnicy 6 mm wykonanych ze stali klasy A, przy jednoczesnym braku widocznego uszkodzenia wkładek wykonanych ze stali klasy C. W tym samym dniu, przy powtórnym opuszczaniu narożnika (obciążenie o wartości 1200 kg), nastąpiły ponownie dwa ciche trzaski oznaczające zerwanie kolejnych prętów o średnicy 6 mm.

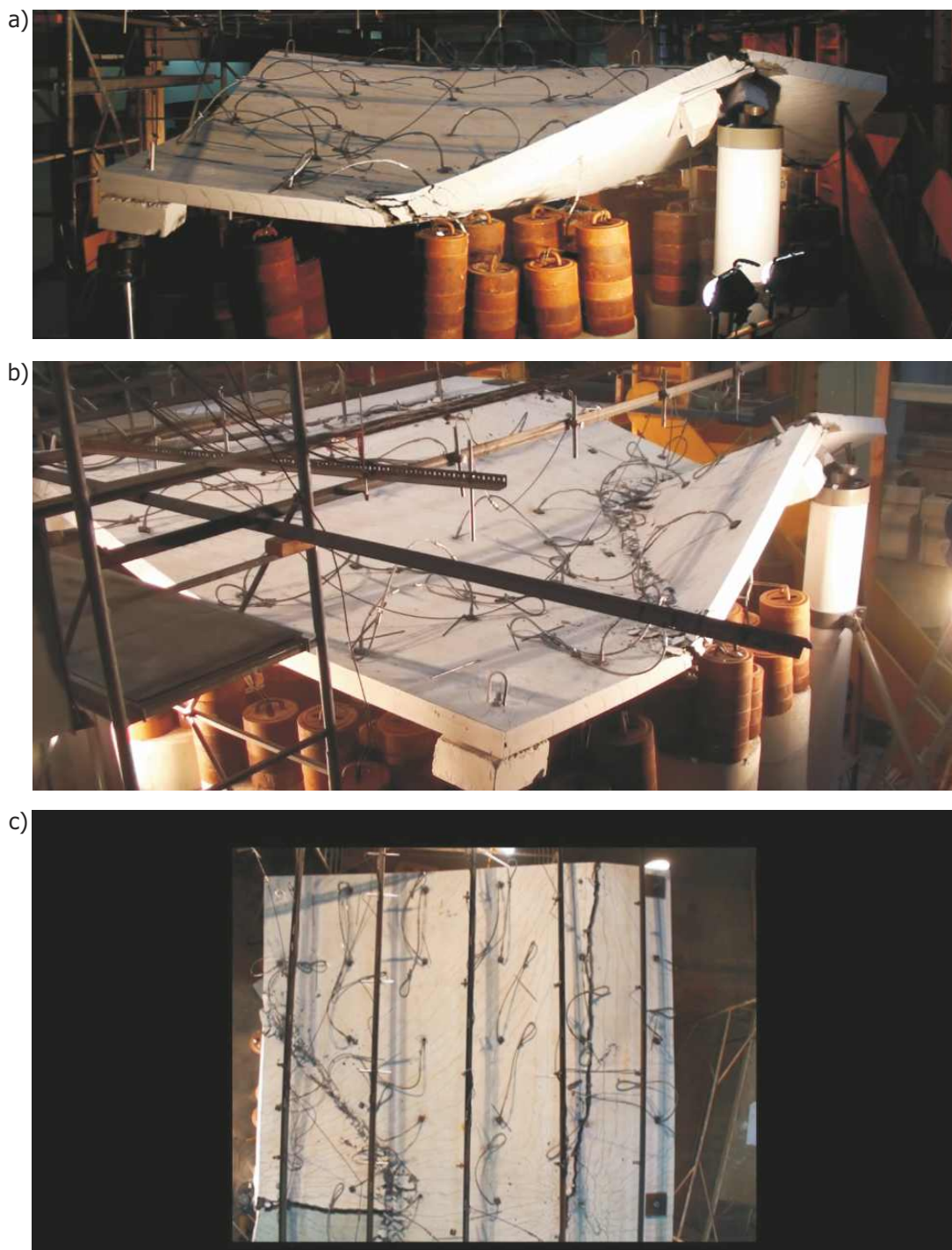
W ostatnim dniu badania, przy obciążeniu modelu ciężarem 1300 kg, w chwili osiągnięcia przemieszczeń narożnika równych ~ 430 mm, na obydwóch podporach skrajnych nastąpiło jednoczesne miażdżenie betonu w strefie ściskanej (rys 30 b).

Dalsze obniżanie podpory narożnej spowodowało zerwanie wkładek podporowych o średnicy 12 mm (dwa głośne trzaski), po których nastąpiły kolejne 2 głośne trzaski i rozpoczął się proces niszczenia modelu, który charakteryzował się następującymi po sobie cichymi trzaskami (sygnalizującymi zrywanie wkładek ze stali kruchej) i przyrastającą wartością reakcji podporowej na podporze pod opuszczanym narożem. Widoki zniszczonego modelu zamieszczono na rys. 31.



Rys. 30.

Szczegóły zniszczeń (opis w tekście).



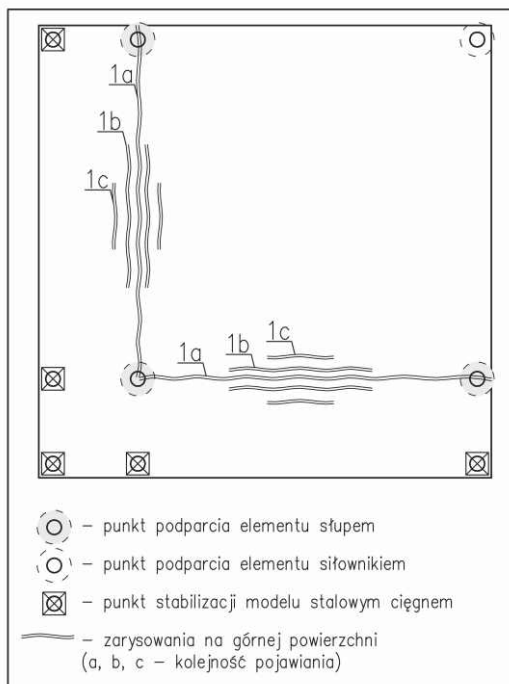
Rys. 31.
 Widok zniszczonego modelu – obciążenie 1300 kg na jednej linie:
 a) widok z boku b) widok izometryczny c) widok z góry.

Kolejność powstawania zniszczeń

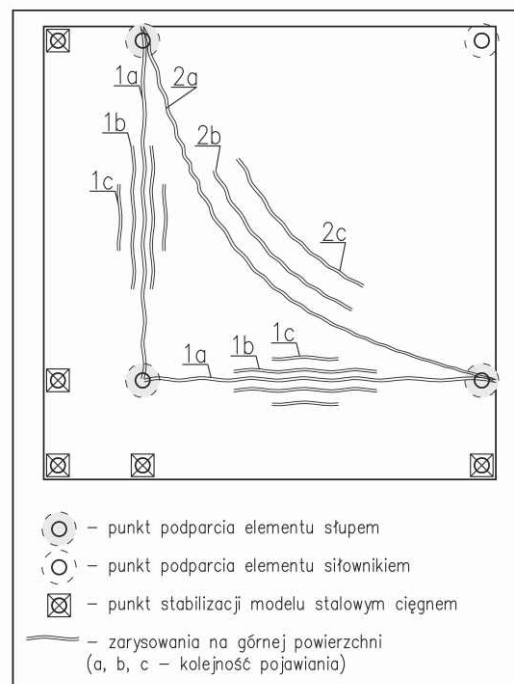
Pierwsze zarysowania, które ujawniły się przy usunięciu podpory, wystąpiły w osiach podparcia elementu i wraz ze wzrostem wartości obciążenia zmieniała się ich liczba i położenie – rys. 32a (rysy 1a-c). Przy wzroście wartości obciążenia uwidoczniły się zarysowania wzdłuż przekątnej modelu łączącej obciążone podpory (rys. 32b). Dalsze zwiększanie obciążenia doprowadziło do niewielkich zarysowań na drugiej przekątnej modelu (3 wg rys. 32c) oraz do zagęszczenia zarysowań stref podporowych (4 wg rys. 32c). W tym samym okresie pojawiły się pierwsze poważniejsze zarysowania podpory centralnej (5 wg rys. 32c). Przy kolejnym wzroście obciążenia zauważono tendencję do rozwierania istniejących rys i pojawianie się nowych zarysowań głównie w strefie podporowej (7 wg rys. 32d). Tuż przed zniszczeniem modelu przy obciążeniu równym 1200 kg nastąpiło znaczne rozwarczenie rys nad podporami i zerwanie dwóch wkładek o średnicy 6 mm (9 wg rys. 32e). Przy obciążeniu równym 1300 kg, w chwili opuszczania narożnika, nastąpiło miażdżenie betonu w strefie podporowej (8 wg rys. 32e). Następnie w sposób gwałtowny nastąpiło zniszczenie modelu, którego widok zamieszczono na rys. 32f.

Ze względu na bezpieczeństwo w czasie prowadzonych badań nie wykonywano odwzorowania zarysowań na dolnej powierzchni modelu.

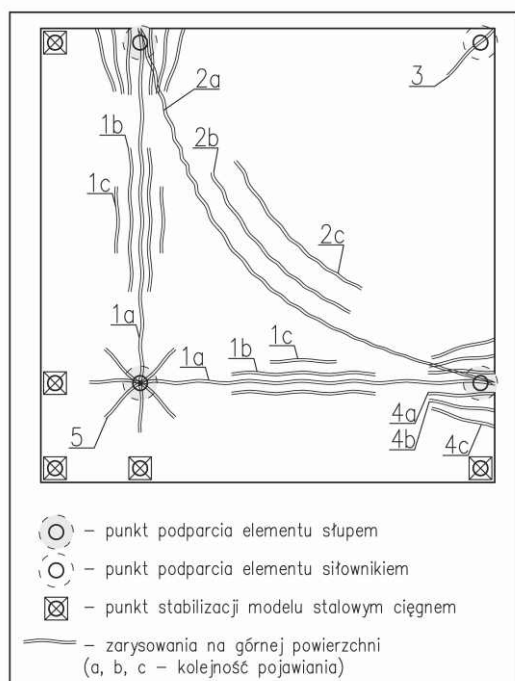
a) poziom obciążenia 400 kg



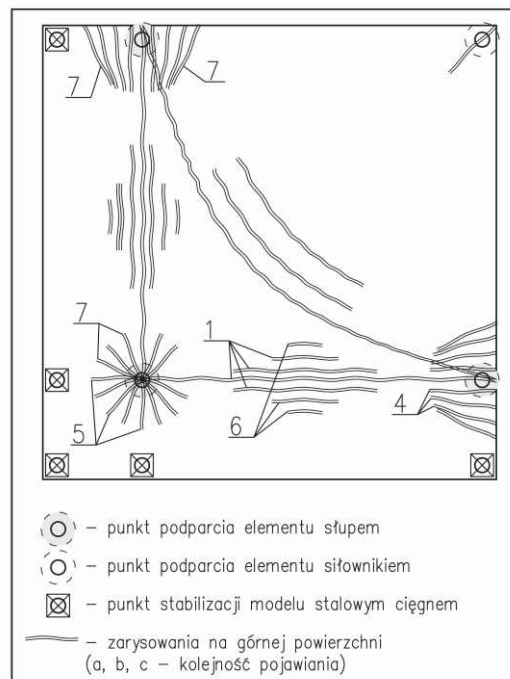
b) poziom obciążenia 600 kg



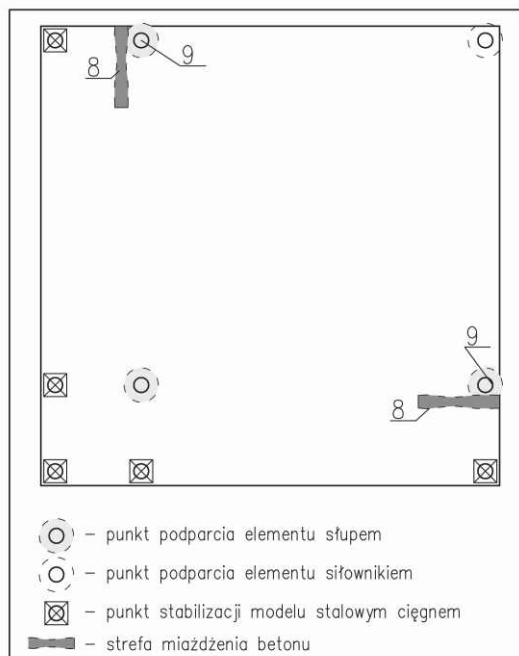
c) poziom obciążenia 800 kg



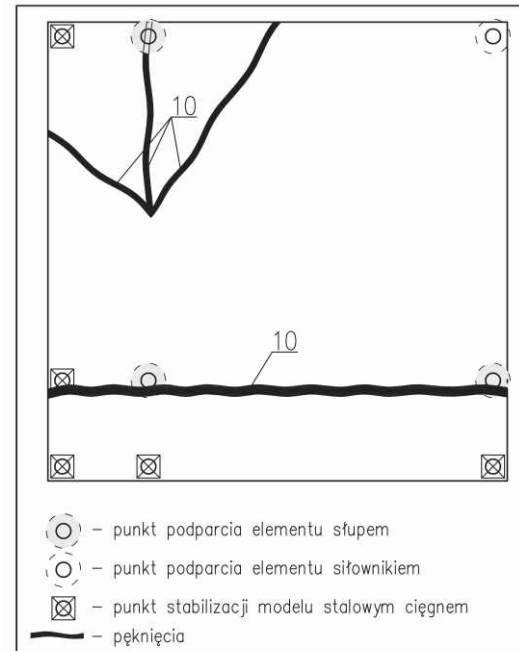
d) poziom obciążenia 1000 kg



e) poziom obciążenia 1200 kg (zerwanie wkładek)



f) poziom obciążenia 1300 kg (miażdżenie betonu)



Rys. 32.

Kolejność powstawania zarysowań i zniszczeń (opis w tekście).

Podsumowanie i wnioski

Celem prowadzonych badań była próba określenia zachowania się narożnego fragmentu ustroju płytowo-słupowego w stanie awaryjnym, który wywołany został usunięciem narożnej podpory. Chodziło o uzyskanie fizycznego obrazu rozwoju uszkodzenia jako podstawy pod przyszłe modele obliczeniowe. W czasie prowadzonych badań okazało się, że żaden z stosowanych dotychczas w analizach mechanizmów zniszczenia modelu – model wspornikowy lub model kopertowy, nie sprawdził się. Okazało się, że przyjęcie zeszywnienia płatów, stosowane w dotychczasowych analizach, jest zbyt odległe od powstałej sytuacji, bowiem w wyniku utraty podpory narożnej przekątna płyty przybiera kształt odwróconej powłoki o niewielkiej wyniosłości. Strzałka ugięcia tej powłoki w chwili zniszczenia wyniosła ~160 mm przy grubości modelu wynoszącej 100 mm. Zmiana kształtu elementu w przekroju przekątniowym zwiększyła znacznie ramię sił wewnętrznych, co m.in. spowodowało uzyskanie znacznie większej nośności badanego modelu.

Uzyskano rzeczywiste obciążenie niszczące model o wartości:

1300 kg na linkę

w stosunku do przewidywanych obciążeń granicznych określonych dla typowych modeli zniszczenia o wartościach odpowiednio:

859 i 961 kg na linkę

W czasie badań stwierdzono wczesne wyczerpanie nośności części zbrojenia wykonanego ze stali o małej ciągliwości (wszystkie wkładki zbrojenia klasy A w strefie powstałych pęknięć uległy zerwaniu) oraz pracę w pełnym zakresie obciążeń zbrojenia o dużej ciągliwości – nigdzie nie nastąpiło zerwanie wkładek zbrojeniowych wykonanych ze stali klasy C. W strefie zbrojenia stalą typu C zniszczenie następowało jedynie przez zmiżdżenie betonu. Potwierdziło to istotny wpływ ciągliwości stali zbrojeniowej na wartość rezerwy ograniczającej rozwój katastrofy postępującej.

Piśmiennictwo

- [1] PN-EN 1992-1-1:2008 – Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [2] PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie. Grudzień 2002.
- [3] PN-EN 1991-1-1:2004 – Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-1: Oddziaływania ogólne. Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach.
- [4] PN-EN 1991-1-1:2008 – Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje, Część 1-7: Oddziaływania ogólne Oddziaływania wyjątkowe.
- [5] ACI Committe 318-02: Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-02, and Commentary (ACI 318R-02), American Concrete Institute, Detroit 2002.
- [6] Starosolski W.: Konstrukcje żelbetowe według PN-B-03264:2002 i Eurokodu 2, tom. 2, wyd. 12. Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa 2009..:

Strony internetowe:

- [W1] <http://911research.wtc7.net/non911/oklahoma/index.html>
- [W2] <http://failures.wikispaces.com/Progressive+Collapse+Overview>
- [W3] <http://failures.wikispaces.com/Ronan+Point>
- [W4] <http://www.motherboard.tv/2011/9/7/total-progressive-collapse-why-buildings-sometimes-crumble>
- [W5] <http://failures.wikispaces.com/L%27Ambiance+Plaza>
- [W6] <http://failures.wikispaces.com/Tropacana+Casino+Parking+Garage>

Stal EPSTAL – właściwości i dane do projektowania

Gatunek stali	Średnica nominalna	Nominalna powierzchnia przekroju poprzecznego	Masa nominalna 1 m*
	[mm]	[mm ²]	[kg/m]
B500SP	8	50,30	0,40
	10	78,50	0,62
	12	113,00	0,89
	14	153,94	1,21
	16	201,00	1,58
	20	314,00	2,47
	25	491,00	3,85
	28	615,75	4,83
	32	804,00	6,31
	40	1256,64	9,86

Parametry wytrzymałościowe		
Parametr	Opis	Wartość
f _{yk}	Charakterystyczna granica plastyczności	≥ 500 [MPa]
f _{yd}	Obliczeniowa granica plastyczności	≥ 420 [MPa]
f _{tk}	Charakterystyczna wytrzymałość na rozciąganie	≥ 575 [MPa]
f _{tk} /f _{yk}	Stosunek wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności	1,15 ÷ 1,35 [-]
ε _{uk}	Wydłużenie próbki pod maksymalnym obciążeniem	≥ 8 [%]

* Masa obliczona na podstawie ciężaru objętościowego stali 7850 kg/m³

Skład chemiczny								
Analiza	C	Mn	Si	P	S	Cu	N ^a	C _{eq} max [%]
	Maksymalna zawartość w %							
Wytopowa	0,22	1,60	0,55	0,05	0,05	0,80	0,01	0,50
Wyrobu	0,24	1,65	0,60	0,06	0,06	0,85	0,01	0,52

^a Dopuszcza się przekroczenie podanych wartości liczbowych, jeśli na każde zwiększenie o 0,001% N zawartość maksymalna P zostanie zmniejszona o 0,005%; jednakże zawartość N według analizy wytopowej nie powinna przekraczać 0,015%.

Równoważnik węgla oblicza się ze wzoru: C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr+V+Mo)/5 + (Cu+Ni)/15

Średnica [mm]	Pole przekroju [cm ²]	Przekrój zbrojenia w cm ² /m w zależności od rozstawu prętów				
		10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm
8	0,503	5,03	3,35	2,51	2,01	1,68
10	0,785	7,85	5,24	3,93	3,14	2,62
12	1,13	11,13	7,54	5,65	4,52	3,77
14	1,54	15,40	10,27	7,70	6,16	5,13
16	2,01	20,11	13,4	10,05	8,04	6,7
20	3,14	31,42	20,94	15,71	12,57	10,47
25	4,91	49,09	32,72	24,54	19,63	16,36
28	6,16	61,60	41,07	30,80	24,64	20,53
32	8,04	80,42	53,62	40,21	32,17	26,81
40	12,57	125,7	83,8	62,85	50,28	41,9

Średnica [mm]	Przekrój zbrojenia w cm ² w zależności od ilości prętów									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	0,5	1,01	1,51	2,01	2,51	3,02	3,52	4,02	4,52	5,03
10	0,79	1,57	2,36	3,14	3,93	4,71	5,5	6,28	7,07	7,85
12	1,13	2,26	3,39	4,52	5,65	6,79	7,92	9,05	10,18	11,31
14	1,54	3,08	4,62	6,16	7,70	9,24	10,78	12,32	13,85	15,39
16	2,01	4,02	6,03	8,04	10,05	12,06	14,07	16,08	18,1	20,11
20	3,14	6,28	9,42	12,57	15,71	18,85	21,99	25,13	28,27	31,42
25	4,91	9,82	14,73	19,63	24,54	29,45	34,36	39,27	44,18	49,09
28	6,16	12,32	18,47	24,63	30,79	36,95	43,10	49,26	55,42	61,58
32	8,04	16,08	24,13	32,17	40,21	48,25	56,3	64,34	72,38	80,42
40	12,57	25,13	37,70	50,27	62,83	75,40	87,96	100,53	113,10	125,66

Notatki