

Wpływ zbrojenia wieńcowego na rozwój katastrofy spowodowanej awarią słupa krawędziowego w ustroju płytowo-słupowym

LIDIA BUDA-OŻÓG, JOANNA ZIĘBA*, DAMIAN NYKIEL, KATARZYNA SIENKOWSKA
Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa Inżynierii Środowiska i Architektury,
Politechnika Rzeszowska

Streszczenie: W pracy podjęto zagadnienie wpływu zbrojenia wieńcowego na nośność poawaryjną ustroju płytowo-słupowego. Wyniki uzyskano z niszczących badań doświadczalnych stropu żelbetowego wykonanego w skali 1:3. Katastrofa w analizowanym modelu symulowana była poprzez usunięcie trzech słupów krawędziowych i dodatkowe dociążenie siłownikiem hydraulicznym. W miejscu usuwanych słupów, zastosowano zróżnicowane zbrojenie wieńcowe.

Słowa kluczowe: zbrojenie, zbrojenie wieńcowe, zniszczenie postępujące, słup krawędziowy, strop płytowo-słupowy, nośność, odkształcenie

1. Wprowadzenie

Płyty żelbetowe płaskie to jedno z najpopularniejszych i najefektywniejszych metod kształtowania stropów w budynkach. Pozwalają na możliwość elastycznego kształtowania przestrzeni w budynku i są łatwiejsze w wykonaniu od stropów uźebrowanych. Płaskie konstrukcje płytowe są jednak bardziej podatne na rozwój katastrofy postępującej, ponieważ nie ma belek, które mogłyby pomóc w redystrybucji obciążeń w sytuacji awaryjnej [1]. Pomimo, że awarie całych konstrukcji są relatywnie rzadkie, nie można ich wykluczyć z cyklu użytkowania obiektu. Na podstawie wielu badań zauważono, że konstrukcje żelbetowe, które charakteryzuje znaczna nieliniowość właściwości materiałowych, jak i geometryczne – będące następstwem zarysowania, po uszkodzeniu osiągają zdecydowanie większą nośność graniczną niż wynikająca z obliczeń projektowych. Z tego powodu od wielu lat prowadzone są różne prace badawcze doświadczalne i numeryczne stropów płaskich, których celem jest poznanie zjawisk zachodzących w sytuacji awarii słupa.

Jednymi z pierwszych podejmujących temat awarii stropów płaskich były prace Mitchell [2] and Mitchell and Cook [3], które koncentrowały się na eksperymentalnych badaniach takich elementów poddanych ekstremalnym obciążeniom. To właśnie Mitchell and Cook dostrzegli potrzebę projektowania płyt tak, aby mogły powstać drugorzędne mechanizmy przenoszące obciążenia po wystąpieniu awarii. Obszerne badania doświadczalne dotyczące zachowania się krawędzi połączeń płyta-słup oraz wpływu dodatkowego zbrojenia wieńcowego w stropach płaskich przeprowadził między innymi zespół Starosolski i inni [4, 5], Ma

*Autor do korespondencji: j.zieba@prz.edu.pl

[6, 7] czy Qian i Li [8, 9]. Wpływ sprężeń zbrojenia wieńcowego na rozwój katastrofy i obraz zniszczenia stropu płaskiego w sytuacji awarii słupa był przedmiotem badań doświadczalnych prowadzonych przez Yang i inni [10]. Natomiast ocena wpływu rodzaju i ilości głównego zbrojenia stropu na jego zachowanie się w przypadku awarii słupa, była przedmiotem badań między innymi Ren [11] i Lu [12].

2. Wieży łączące w stropach płaskich

Metodologie zapobiegania przypadkowym lub mało prawdopodobnym awariom konstrukcji dzieli się na dwa podejścia: bezpośrednie i pośrednie. Podejście bezpośrednie uwzględnia potencjalne zagrożenia i zapewnia, że konstrukcja jest odpowiednio zabezpieczona przed ich skutkami. Podejście drugie – pośrednie to projektowanie uproszczone, całkowicie ignorujące zdarzenie inicjujące awarię, uwzględniające jedynie jego potencjalny efekt, jakim jest np. utrata elementu nośnego.

W celu ograniczenia skutków ewentualnej awarii konstrukcji stosowane mogą być dwie metody projektowania, są to: metoda elementu kluczowego lub metoda alternatywnych ścieżek obciążeń (Alternative Load Path – ALP). Metoda alternatywnych ścieżek obciążeń dopuszcza zniszczenie konkretnego elementu, jednak wykorzystując dodatkową wytrzymałość i ciągłość zastosowanych materiałów ma na celu zapewnienie pewnego minimalnego poziomu odporności konstrukcji na katastrofę postępującą. Skuteczność tej metody w dużej mierze zależy od prawidłowo ukształtowanych więzi łączących elementy konstrukcji [13]. Podejście to zalecane jest w różnych wytycznych projektowych, jako sposób na zwiększenie odporności konstrukcji na katastrofę postępującą np. Eurokod EN 1991-1-7 (2006) [14], UFC 4-023-03 (DoD, 2016), ASCE/SEI 7-16 (ASCE, 2017a) i IBC 2009 (ICC, 2018). W zależności od poziomu ryzyka wymagania dotyczące więzi łączących określone w odniesieniu do elementów poziomych lub poziomych i pionowych. W normie EN 1991-1-7 [14] więzi poziome wymagane są w przypadku klasy konsekwencji zniszczenia CC2a tj. przeciętnego zagrożenia życia ludzkiego i znacznych konsekwencji społecznych i ekonomicznych. Zgodnie z zaleceniami normy EN 1991-1-7 [14] i EN 1992-1-1 [15] wieńce poziome należy stosować na każdej kondygnacji na poziomie stropu w dwóch prostopadłych kierunkach zapewniających bezpieczne powiązanie słupów i ścian. Wieńce te powinny przenosić pewne minimalne wartości siły rozciągającej zgodnie z zależnością:

$$F = 0,8(g + p)l \text{ lub } 75 \text{ kN} \quad (1)$$

gdzie: $g + p$ – całkowite obciążenie przekazywane w stanie awaryjnym na cięgno,
 l – rozpiętość w świetle pomiędzy podporami po awarii.

Należy mieć jednak świadomość, że zaproponowaną zależność wyprowadzono dla belkowego charakteru elementów wiążących, przyjmując założenie parabolicznego przebiegu cięgna z możliwością obrotu na podporze o kąt 32° . Takie założenie w przypadku ustrojów słupowo-płytowych wydaje się nie być możliwe do zrealizowania bez uprzedniego zmiażdżenia betonu w strefie ściskanej. Dlatego pomimo tak dużych ilości prac dotyczących problemu kształtowania zbrojenia ograniczającego wystąpienie katastrofy postępującej w stropach płaskich, lecz mając świadomość ciągle bardzo przybliżonej idealizacji zagadnienia, temat ten wydaje się być nadal aktualny i nie do końca poznany.

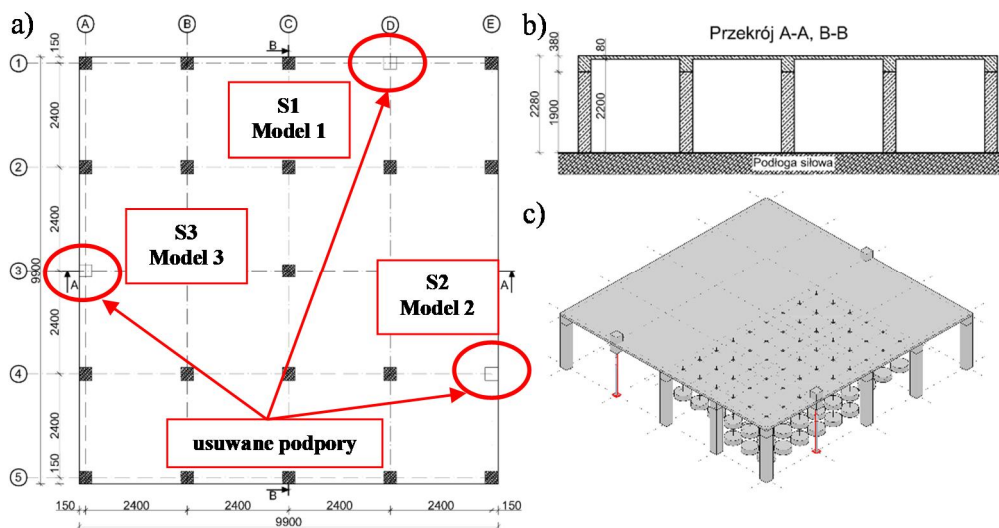
Przedstawione w niniejszym artykule badania są próbą dokładniejszego poznania zjawisk zachodzących w ustroju płytowo-słupowym oraz oceną wpływu zastosowanego dodatkowego zbrojenia wieńcowego na rzeczywistą nośność stropu płaskiego w sytuacji awarii jednej z podpór.

3. Opis badań doświadczalnych

3.1 Model badawczy

Przedmiotem badań doświadczalnych był model szesnastopolowego ustroju płytowo-słupowego – rys. 1. Celem badań była ocena skuteczności zabezpieczenia ustroju oraz obserwacja zmian w sposobie zniszczenia badanych fragmentów stropu, w zależności od stopnia i rozmieszczenia zbrojenia ze stali B600B. Zaprojektowany model badawczy odzwierciedlał pracę rzeczywistego układu, wykonanego w skali 1:3. W modelu badawczym osiowy rozstaw podpór wynosił 2400 mm, co w efekcie uwzględniając wymiary podpór dał całkowity wymiar płyty 9900 × 9900 mm. Model badawczy podparty był na 25 słupach kwadratowych, prefabrykowanych, o wymiarze 300 × 300 mm i wysokości 1900 mm, połączonych przegubowo z podłogą siłową. Grubość płyty dobrano zgodnie z warunkiem 1/30 rozpiętości stropu pomiędzy podporami i wynosiła 80 mm. Słupy żelbetowe wykonane zostały w zakładzie prefabrykacji, natomiast pozostała część modelu monolityczna, wykonywana została w hali laboratoryjnej WBIŚiA Politechniki Rzeszowskiej. W prowadzonych analizach założono, że model badawczy powinien jak najwierniej odzwierciedlać pracę stropu rzeczywistego w którym strop i słupy są połączone monolitycznie. Aby uzyskać ten efekt z prefabrykowanych słupów zostało wypuszczone zbrojenie, które wykorzystano do monolitycznego połączenia z płytą stropową.

Przyjęte znaczne wymiary słupów w stosunku do grubości płyty, pozwoliły na wyeliminowanie zjawiska przebicia bez potrzeby zwiększania grubości płyt czy stosowania dodatkowego zbrojenia w uwagi na przebicie. Dodatkowo nad płytą w miejscu usuwanego słupa zasymulowano fragment słupa wyższej kondygnacji, przez który przekazywane było obciążenie z siłownika. Usuwane odpowiednio w modelach 1, 2 i 3 słupy, zasymulowano łatwymi do demontażu podporami stropowymi.



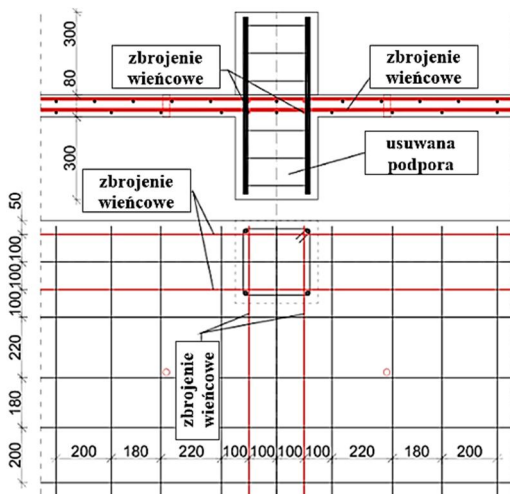
Rys. 1. Widok modelu badawczego.

3.2 Zbrojenie modelu

Zgodnie z normą EN-1992-1-1 [18] konstrukcje, które nie zostały obliczone i zaprojektowane ze względu na oddziaływania wyjątkowe, powinny mieć odpowiedni system wiązący,

który umożliwi alternatywny przepływ obciążeń po lokalnym uszkodzeniu i zapobiegnie katastrofie postępującej. W prowadzonych badaniach rozważano trzy modele o zróżnicowanym zbrojeniu wieńcowym (rys. 2), tj.:

- model 1 (M1) @ $2\phi 10 A_s = 157 \text{ mm}^2$,
- model 2 (M2) @ $2\phi 12 A_s = 226 \text{ mm}^2$,
- model 3 (M3) @ $3\phi 12 A_s = 339 \text{ mm}^2$.



Rys. 2. Schemat umiejscowienia zbrojenia wieńcowego w modelu płyty.

3.3 Właściwości materiałów

Do zbrojenia płyty użyto prętów zbrojeniowych o średnicy 10 mm natomiast do kształtowania połączeń płyta słup oraz zbrojenia wieńcowego odpowiednio pręty o średnicy 16 i 12 mm. Parametry materiałowe zastosowanej stali zbrojeniowej określono podczas przeprowadzonych badań i zestawiono w tabelicy 1.

Tabela 1. Średnie wartości i odchylenie standardowe parametrów materiałowych dla prętów zbrojeniowych uzyskane w testach rozciągania

Granica plastyczności		Wytrż. na rozciąganie		Moduł sprężystości		Odształcenia	
f_{ym} [MPa]	s [MPa]	f_{tm} [MPa]	s [MPa]	E [GPa]	s [GPa]	a_k [%]	s [%]
658,1	67,0	743,2	66,5	200,5	9,7	8,7	1,6

Płytę zaprojektowano z betonu klasy C30/37 o konsystencji mieszanki betonowej S4 i maksymalnym wymiarze kruszywa 8 mm.

W celu weryfikacji parametrów wytrzymałościowych dostarczonego betonu z założeniami projektowymi, w trakcie betonowania pobrano próbki do badań. Uzyskane w trakcie badań parametry mechaniczne betonu zestawiono w tabelicy 2.

Tabela 2. Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie, rozciąganie i moduł sprężystości

Wytrzymałość na ściskanie		Wytrzymałość na rozciąganie		Moduł sprężystości	
$f_{cm, cube}$ [MPa]	s [MPa]	f_{ctm} [MPa]	s [MPa]	E_{cm} [MPa]	s [MPa]
57,13	2,08	4,12	0,22	39,24	0,99

3.4 Obciążenia modelu i metody pomiarowe

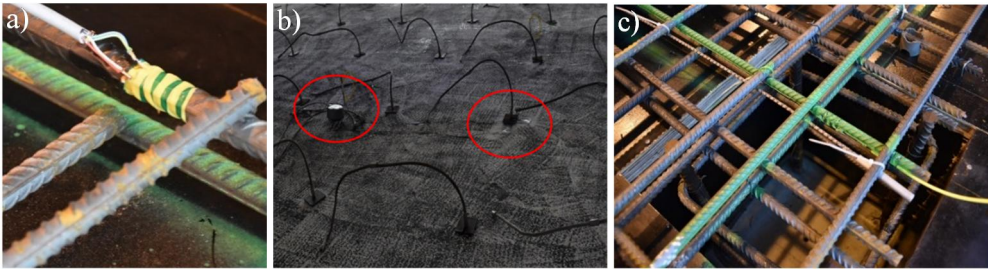
Obciążanie każdego wydzielonego modelu badawczego podzielono na dwa etapy. W pierwszym etapie stopniowo realizowano możliwe do wystąpienia w stropie obciążenia stałe i zmienne. Do symulacji tych obciążeń wykorzystano elementy betonowe o masie 200 oraz 100 kg rozmieszczone w taki sposób aby w płycie w obszarze usuwanego słupa powstały maksymalne wartości sił wewnętrznych – rys. 3a. Obciążniki w zależności od modelu podwieszane były w 54 lub 72 punktach na siatce 800 × 800 mm. Po podwieszeniu wszystkich założonych obciążeń grawitacyjnych, w kolejnym kroku symulowano katastrofę wywołaną usunięciem podpory krawędziowej. Pod pełnym obciążeniem grawitacyjnym, usuwano podporę w miejscu słupa, a możliwe do wystąpienia w obiekcie rzeczywistym siły w miejscu uszkodzonego słupa, symulowano za pomocą siłownika hydraulicznego – rys. 3b.



Rys. 3. Obciążanie stropu: a) widok obciążników b) obciążenie po usunięciu podpory.

W prowadzonych badaniach do pomiaru przemieszczeń wykorzystano indukcyjnościowe czujniki różnicowe (czujniki linkowe) oraz wiroprowadowe czujniki indukcyjne. Czujniki zamocowano na specjalnie do tego celu zaprojektowanej konstrukcji wsporczej umieszczonej w obszarze usuwanej podpory. Do pomiaru przemieszczeń płyty zastosowano również systemu optycznej korelacji obrazu ARAMIS [16–18], opracowany przez niemiecką firmę GOM. Wykorzystany w badaniach system był układem dwóch kamer, o ogniskowej 17 mm i szybkości wykonywania zdjęć 12 Hz o rozdzielczości 1600 × 1200 pikseli tj. 1,92 Mpix. Wymiar przestrzeni pomiarowej wynosił 3840 × 3065 mm.

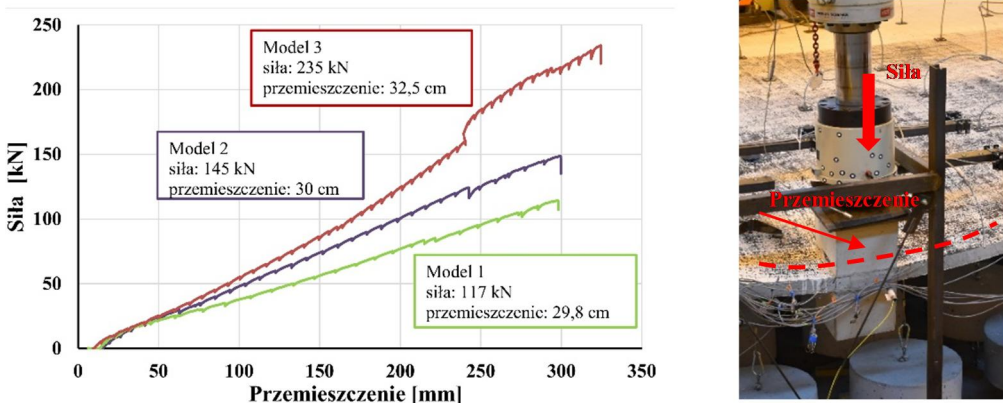
Podczas prowadzonych badań do pomiaru odkształceń betonu i stali wykorzystano tensometry elektrooporowe przedstawione na rys. 4a i 4b oraz światłowodowe czujniki odkształceń umożliwiające wykonywanie pomiarów quasi-ciągłych na długości pojedynczego światłowodu. Czujniki światłowodowe rozmieszczono wzdłuż prętów dolnego zbrojenia wieńcowego oraz zbrojenia przecinającego we wszystkich trzech modelach – rys. 4c.



Rys. 4. Zastosowane metody pomiaru odkształceń: a) tensometry na stali zbrojeniowej, b) tensometry na betonie, c) światłowody na stali zbrojeniowej.

4. Wyniki badań

W trakcie prowadzonych badań w zależności od typu zbrojenia wieńcowego (modelu zbrojenia) osiągnięto różne wartości maksymalnego obciążenia, które zdefiniowano jako obciążenie niszczące. Kluczowym miejscem analizy powierzchni płyty było miejsce usunięcia podpory, zatem w pierwszej kolejności sporządzono wykresy wartości pionowych przemieszczeń płyty w miejscu utraty podpory w funkcji realizowanych obciążeń z zaznaczeniem obciążenia niszczącego – rys. 5.



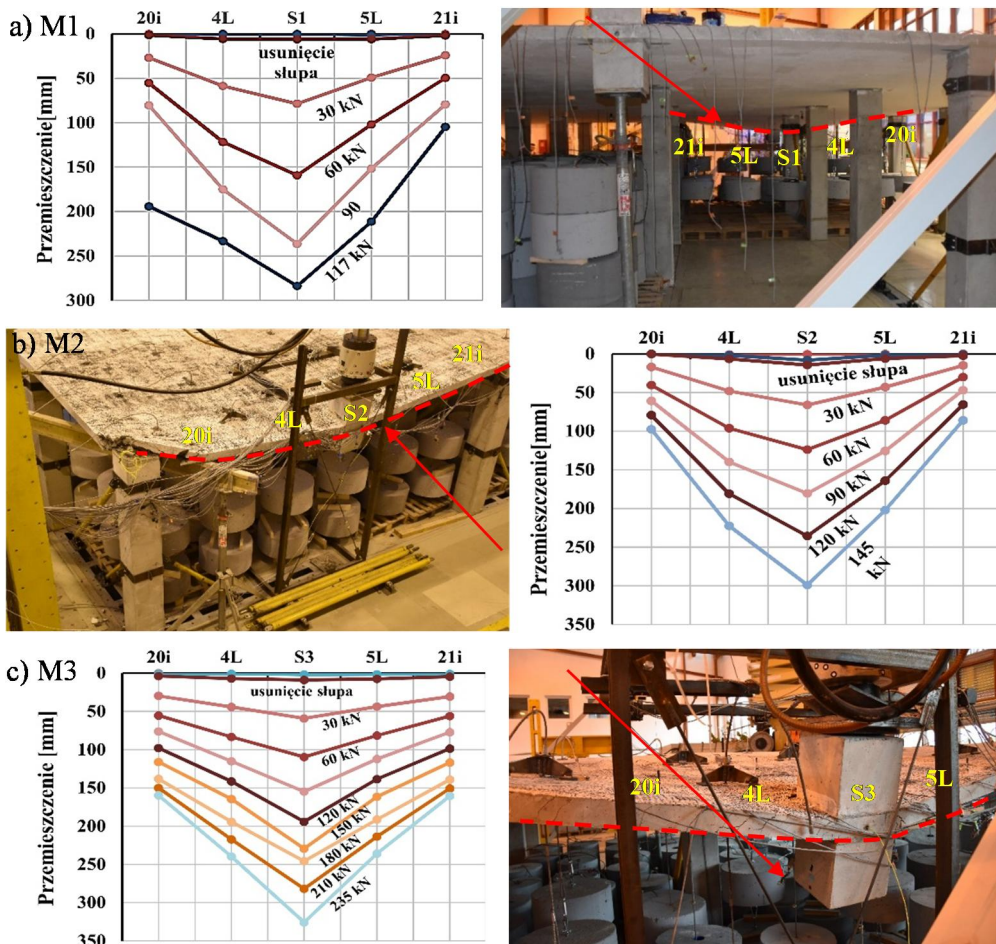
Rys. 5. Wykres pionowych przemieszczeń badanych modeli w miejscu usuniętej podpory w funkcji obciążenia.

Zastosowane w badaniach doświadczalnych czujniki pomiaru przemieszczeń wyznaczyły linie wzdłuż których przedstawiono pionowe przemieszczenia górnej powierzchni płyty poszczególnych modeli. Dla przykładu przedstawiono na rys. 6 wykresy pionowych przemieszczeń wzdłuż krawędzi wyznaczonej przez czujniki nazwane jako 20i, 4L, 5L i 21i czyli krawędzi skrajnej.

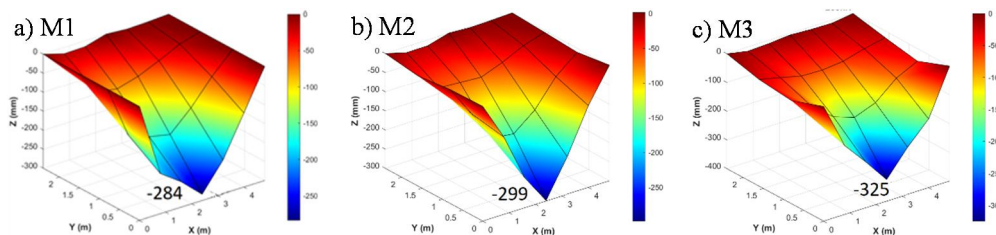
Na podstawie pomiarów przemieszczeń opisanych w pkt. 3, sporządzono wykresy obrazujące deformację górnej powierzchni badanej płyty w funkcji realizowanych obciążeń – rys. 7.

Jak przedstawiono na rys. 5 – rys. 7 największe przemieszczenie jednocześnie przy największej sile niszczącej uzyskano dla modelu nr 3 – tj. modelu, dla którego zaprojektowano zbrojenie wieńcowe w postaci 3f 12 mm. W modelu tym usuwana podpora znajdowała się w środku krawędzi płyty, co skutkowało innym mechanizmem zniszczenia niż modele M1 i M2 ze względu na ograniczenia wywierane przez słupy przyskrajne. Analogicznie do

powierzchni zbrojenia mniejszą siłę uzyskano w modelu ze zbrojeniem wieńcowym w postaci 2f 12 mm. Najmniejszą siłę niszczącą wykazał model nr 1, w którym przyjęto pręty zbrojenia wieńcowego w postaci 2f 10 mm.

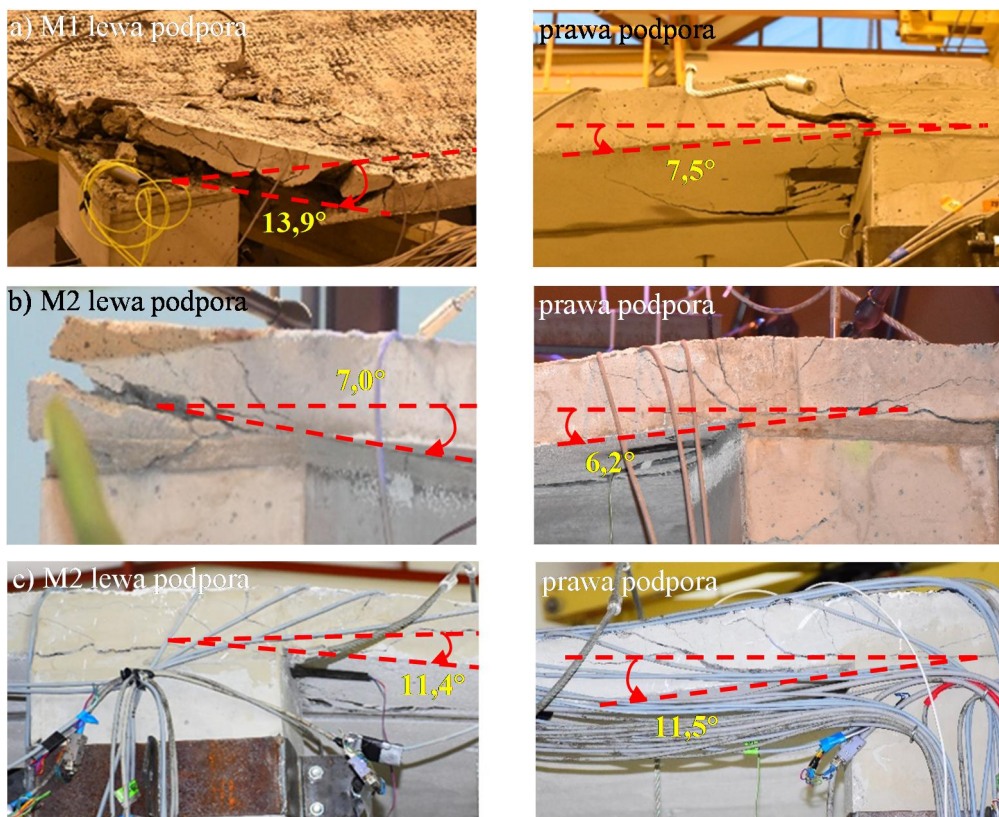


Rys. 6. Wykresy pionowych przemieszczeń wzdłuż skrajnej krawędzi płyty wraz z przykładowymi zdjęciami z badań doświadczalnych: a) M1, b) M2, c) M3.



Rys. 7. Mapy deformacji powierzchni górnej płyty modeli M1, M2 i M3 dla maksymalnego osiągniętego obciążenia.

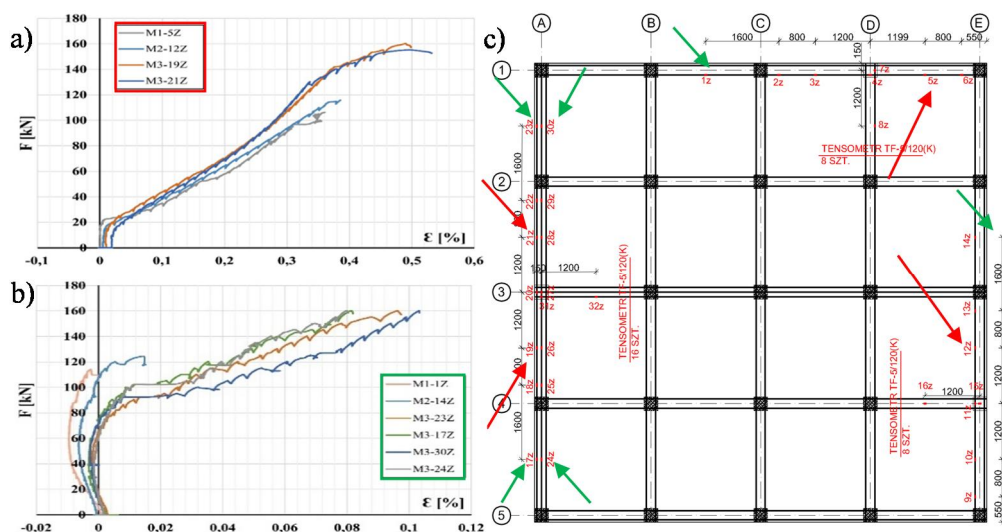
Na rysunku 8 przedstawiono mechanizm zniszczenia sąsiadujących z usuwanym słupem podpór. Na prezentowanych rysunkach zaznaczono również przybliżony kąt obrotu na obu sąsiadujących z usuwanym słupem podporach.



Rys. 8. Obrazy zniszczenia odpowiednio na dwóch sąsiednich podporach od usuniętego słupa wraz z oznaczeniem przybliżonego kąta obrotu powierzchni płyty w chwili zniszczenia.

Kąty obrotu oszacowano na podstawie wartości przemieszczeń powierzchni płyty uzyskanych z indukcyjnościowych czujników różnicowych oraz map przemieszczeń uzyskanych z systemu Aramis. Przedstawione na rys. 8 wartości kątów obrotu płyty na podporach są stosunkowo niewielkie i znacząco odbiegają od założenia parabolicznego przebiegu cięgną po awarii słupa i przyjmowanego kąta obrotu na podporze około 32° .

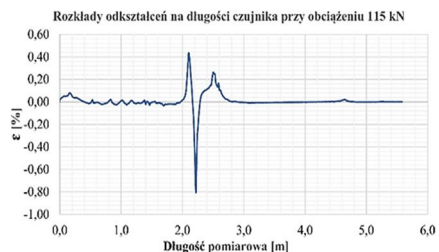
W trakcie prowadzonych odkształcenia stali zbrojeniowej oraz powierzchni betonu mierzono za pomocą tensometrów – elektrooporowych i światłowodowych. Otrzymane wyniki potwierdziły dużą wrażliwość tensometrów elektrooporowych na pracę w złożonym stanie naprężeń. Wiele wyników pomiarów zostało odrzucone jako błędne i niewiarygodne. Zauważono również, że większość tensometrów elektrooporowych ulegała zniszczeniu z chwilą osiągnięcia przez stal zbrojeniową granicy plastyczności. Na rysunku 9 porównano przykładowe pomierzone odkształcenia wieńcowego zbrojenia dolnego, otrzymane z tensometrów naklepanych w środku rozpiętości pomiędzy słupem usuwanym a sąsiednim.



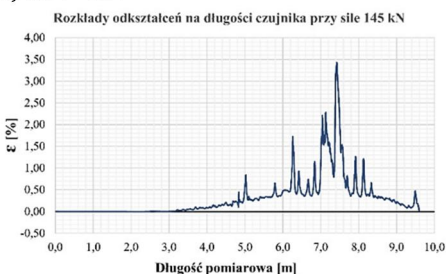
Rys. 9. Odształcenia stali zbrojeniowej: a), b) wykresy zmiany odkształceń wybranych punktów na prętach zbrojenia dolnego w obszarze usuwanego słupa, c) schemat lokalizacji tensometrów na zbrojeniu dolnym.

Najwięcej informacji o zachowaniu się prętów wieńcowych w trakcie prowadzonych badań dostarczyły pomiary wykonane czujnikami światłowodowymi. Na rysunku 10 przedstawiono maksymalne odkształcenia zbrojenia dolnego dodanego z uwagi na katastrofę postępującą, uzyskane z czujników światłowodowych dla modelu 1 i modelu 2.

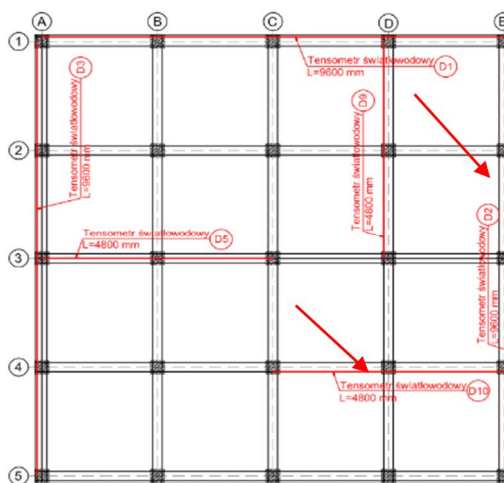
a) M1 – D9



b) M2 – D2

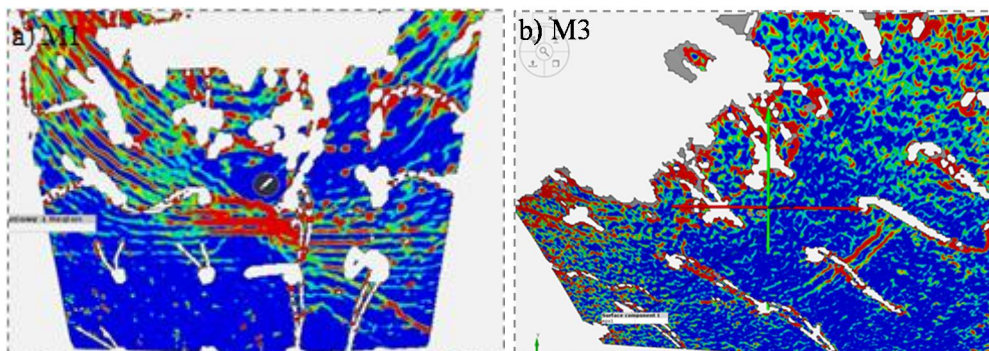


c)



Rys. 10. Rozkład odkształceń na prętach zbrojenia dolnego a) wykres dla D9, b) wykres dla D2, c) schemat lokalizacji czujników.

Analizę zarysowania przeprowadzono na podstawie pomiarów wykonanych systemem ARAMIS. Na rys. 11 przedstawiono obraz zniszczenia przy maksymalnym obciążeniu uzyskany z badań doświadczalnych dla modelu M1 oraz modelu M3.



Rys. 11. Mapa głównych odkształceń płyty z zaawansowanymi zarysowaniami (czerwone obszary) uzyskana systemem ARAMIS dla obciążenia niszczącego: a) M1, b) M3.

5. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizie uzyskanych wyników zauważono:

- w żadnym z badanych modeli zniszczenie nie było spowodowane zerwaniem stali zbrojeniowej. Zniszczenie w badanych modelach było następstwem zmiążdżenia betonu w strefie słupa narożnego (modele M1 i M2) lub miejsca realizacji obciążenia (model M3),
- uzyskana z badań siła niszcząca dla modelu M1, jest trzykrotnie większa od maksymalnej obliczeniowej wartości siły osiowej w usuniętym słupie, wynoszącej około 40 kN. Przyjmując maksymalny pomierzony kąt obrotu płyty nad podporą, wynoszący $13,9^\circ$, otrzymujemy w ukształtowanym po awarii słupa ciągnie, siłę około 500 kN. Uzyskane wyniki są potwierdzeniem osiągnięcia przez konstrukcję zdecydowanie większej nośności granicznej niż wynikająca z obliczeń projektowych,
- porównując model M1 i M2 można zauważyć kluczową rolę płyty stropowej w sposobie zachowania się i odporności konstrukcji spowodowanej uszkodzeniem podpory. Jak wykazały badania zwiększenie powierzchni zbrojenia wieńcowego o 43% skutkowało wzrostem obciążenia niszczącego o zaledwie 23%. Uwzględniając po awarii słupa korzystny wpływ płyty stropowej tj. powierzchnię zbrojenia płyty w obszarze wydzielonym przez linie załomu, można przyjąć, że sumaryczna zmiana powierzchni zbrojenia w modelu M2 w stosunku do modelu M1 jest zdecydowanie mniejsza i wynosi około 11%,
- jak pokazały prowadzone badania duże znaczenie w ocenie odporności konstrukcji ma również lokalizacja usuniętej podpory. W przypadku modelu M3, zaobserwowano 62% wzrost obciążenia w stosunku do modelu M2, przy zwiększeniu powierzchni zbrojenia wieńcowego o 50%,

Przeprowadzone badania potwierdziły spostrzeżenia innych autorów prac badawczych o podobnym charakterze [6], dotyczące istotnej roli oraz potrzeby odpowiedniego kształtowania i kotwienia zbrojenia wieńcowego. Jak przedstawiono na fotografiach zniszczenia stropu – rys. 8a i 8b, w przypadku awarii słupów przedskrajnych, zbrojenie wieńcowe powinno być raczej uciążlone ze zbrojeniem słupa narożnego. Należy mieć jednak świadomość, że w rzeczywistych obiektach występuje kontynuacja słupa narożnego, dlatego schemat zniszczenia nad podporą skrajną może być inny. Przeprowadzone badania wykazały, że w przypadku

monolitycznego połączenia płyty i słupa, przyjęte w nomie założenia do wyznaczenia minimalnej wartości siły rozciągającej odbiegają od uzyskanych wyników. Otrzymane na podstawie badań siły rozciągające są zdecydowanie większe od wyznaczonych z normowych wzorów analitycznych. Powodem tego stanu może być zarówno odmienna od przyjętej w normie deformacja układu oraz wyraźny wpływ płyty stropowej. Głębsze poznanie tego problemu wymaga jednak prowadzenia dalszych badań na podobnych modelach rzeczywistych lecz z uwzględnieniem słupów powyżej analizowanego stropu.

Literatura

1. Foraboschi P.: Structural layout that takes full advantage of the capabilities and opportunities afforded by two-way RC floors, coupled with the selection of the best technique, to avoid serviceability failures. *Engineering Failure Anal.* 70 (2016) 387–418.
2. Hawkins N. M. and Mitchell D.: Progressive Collapse of Flat-Plate Structures. *Journal of the American Concrete Institute*, 76(7):775–808, 1979.
3. Mitchell D, and Cook W. D.: Preventing Progressive Collapse of Slab Structures. *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 110(7):1513–1532, 1984.
4. Starosolski W., Wieczorek B., Wieczorek M.: Konstrukcje płytowo-słupowe. Zabezpieczenia przeciwko katastrofie postępującej, *Biuletyn techniczny nr 6*, Centrum Promocji Jakości Stali, Warszawa, 2015.
5. Wieczorek B., Wieczorek M., Starosolski W.: Badania zachowania się krawędziowych połączeń płyta-słup zbrojonych stalą EPSTAL o wysokiej ciągliwości w stadium awaryjnym wywołanym przebicciem, *Biuletyn techniczny nr 8*, Centrum Promocji Jakości Stali, Warszawa, 2017.
6. Ma F, Gilbert BP, Guan H, Xue H, Lu X, Li Y.: Experimental study on the progressive collapse behaviour of RC flat plate substructures subjected to corner column removal scenarios. *Eng Struct* 2019;180:728–41.
7. Ma F, Gilbert BP, Guan H, Lu X, Li Y.: Experimental study on the progressive collapse behaviour of RC flat plate substructures subjected to edge-column and edge-interior-column removal scenarios. *Eng Struct* 2020;209. 110299.
8. Qian K, Li B.: Experimental study of drop-panel effects on response of reinforced concrete flat slabs after loss of corner column. *ACI Struct. J.* 110 (2) (2013) 319–329.
9. Qian K, Li B.: Resilience of flat slab structures in different phases of progressive collapse. *ACI Struct. J.* 113 (3) (2015) 537–48.
10. Yang T, Liu Z, Lian J.: Progressive collapse of RC flat slab substructures with unbonded posttensioning strands after the loss of an exterior column. *Eng Struct* 2021;234: 1–12.
11. Ren PQ, Li Y, Lu XZ, Guan H, Zhou YL.: Experimental investigation of progressive collapse resistance of one-way reinforced concrete beam-slab substructures under a middle-column-removal scenario. *Eng Struct* 2016;118:28–40.
12. Lu XZ, Lin KQ, Li Y, Guan H, Ren PQ, Zhou YL.: Experimental investigation of RC beam-slab substructures against progressive collapse subject to an edge-column removal scenario. *Eng Struct* 2017;149:91–103.
13. Starossek U.: *Progressive Collapse of Structures*, Second edition, Thomas Telford Publishing, 2017.
14. PN-EN-1991-1-7:2008, *Oddziaływania na konstrukcje, Oddziaływania wyjątkowe*.
15. PN-EN-1992-1-1:2008. *Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków*.
16. Urbańska K.: Zastosowanie systemu ARAMIS do pomiarów odkształceń konstrukcji murowych. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Zielonogórskiego*, nr 166, 2017.
17. Ajdukiewicz C., Gajewski M., Mossakowski P.: Zastosowanie systemu optycznej korelacji obrazu „ARAMIS” do identyfikacji rys w elementach betonowych, *Logistyka* (6): 27–34, 2010.
18. Malesa M., Malowany K., Tomczak U., Siwek B., Kujawińska M., Siemińska-Lewandowska A.: Application of 3D digital image correlation in maintenance and process control in industry. *Computers in Industry* 64 (9): 1301–1315. 2013.

Influence of the tie system on the development of a progressive collapse caused by the failure of an edge column in the RC flat slab

Key words: tie system, progressive collapse, column, RC flat slab, load capacity, strain