

## MODELOWANIE PODPARCIA I POMIAR REAKCJI PODPOROWYCH W BADANIACH PŁYT ŻELBETOWYCH

W pracy przedstawione zostały niektóre metody modelowania podparcia płyt stosowane w badaniach doświadczalnych. Zaprezentowana została koncepcja „punktowego” modelowania podparcia polegająca na wykonywaniu podparcia ciągłego za pomocą podpór punktowych. Koncepcja została zweryfikowana w badaniach doświadczalnych. Do modelowania została użyta specjalnie zaprojektowana aparatura: element podporowy mierzący wartość reakcji pracujący jako czujnik elektrooporowy oraz wielokanałowy zestaw pomiarowy. Przedstawiona koncepcja modelowania podparcia może być stosowana w badaniach płyt o ciągłym podparciu lub lokalnym.

### 1. WPROWADZENIE

W badaniach doświadczalnych płyt i innych elementów konstrukcyjnych stosuje się różne podparcia konstruując je tak, by imitowały w sposób jak najdoskonalszy rzeczywiste podparcie konstrukcji inżynierskiej. Istotne są tu takie cechy podparcia jak: charakter lokalny lub ciągły, sposób zamocowania w nim elementu oraz podatność na odkształcenia.

J. Szczygieł i Z. Kozaków [1] opisują badania modelowe płyty ciągłej wiaduktu, w których podpory słupowe zamodelowano w postaci wahaczy. W płytach prostokątnych badanych przez M. Kwiecińskiego [2] zastosowano podparcie narożne na klockach o niewielkich wymiarach. Podporę przegubową ciągłą modeluje się najczęściej przy użyciu pręta stalowego ułożonego w linii podparcia [3,4]. Pozostawienie swobody przemieszczenia pręta (przesuwu na skutek obrotu) pod wpływem odkształcenia płyty pozwala traktować ją jako przesuwną. W badaniach opisywanych przez E. Absi i A.M. Brandta [5] ciągłość podpory traktowanej jako przegubowa przesuwna uzyskano za pomocą podparcia na przewodach plastikowych wypełnionych zaprawą twardniejącą dopiero po ułożeniu płyty. By uzyskać przesuw na podporze, J. Mucha [6] zastosował układ łożysk. W badaniach R. Lenschowa i M.A. Sozena [7] obrót w podporze i swobodę przesuwu uzyskano za pomocą układu wahaczy przymocowanych przegubowo do ceowników przylegających środkiem do płyty na długości podparcia. Podobne rozwiązania były zastosowane w badaniach Silverja cytowanych w [7].

Podparcie z utwierdzeniem można uzyskać wykonując płytę z belkami brzegowymi. J. Mucha [6] zamodelował podparcie z utwierdzeniem na całym obwodzie umieszczając po obu stronach płyty wzdłuż jej brzegów sztywne ramy stalowe o profilu zamkniętym, spięte śrubami. Inne rozwiązanie przedstawili J. Szkwarek i W. Ścibak [8] stosując w paśmie brzegowym płyty poza linią podparcia przegubowego kombinację obciążenia liniowego i równomiernie rozłożonego. Zadaniem tego obciążenia było wywołanie efektu jak przy utwierdzeniu przez utrzymywanie wzdłuż brzegów podpartych zerowego kąta nachylenia płaszczyzny stycznej do powierzchni odkształconej.

Modelując podporę utwierdzoną trzeba mieć na uwadze, że pełne utwierdzenie praktycznie nie jest możliwe. Tak samo jest zresztą w warunkach konstrukcji rzeczywistej. Istotne jest, by stopień utwierdzenia w modelu podpory był zbliżony do stopnia utwierdzenia w podporze rzeczywistej. Także w przypadku innych podpór należy zwrócić uwagę na ich odkształcalność ponieważ jak wiadomo, odkształcalność podparcia wpływa na rozkład sił wewnętrznych przynajmniej w najbliższym jego otoczeniu.

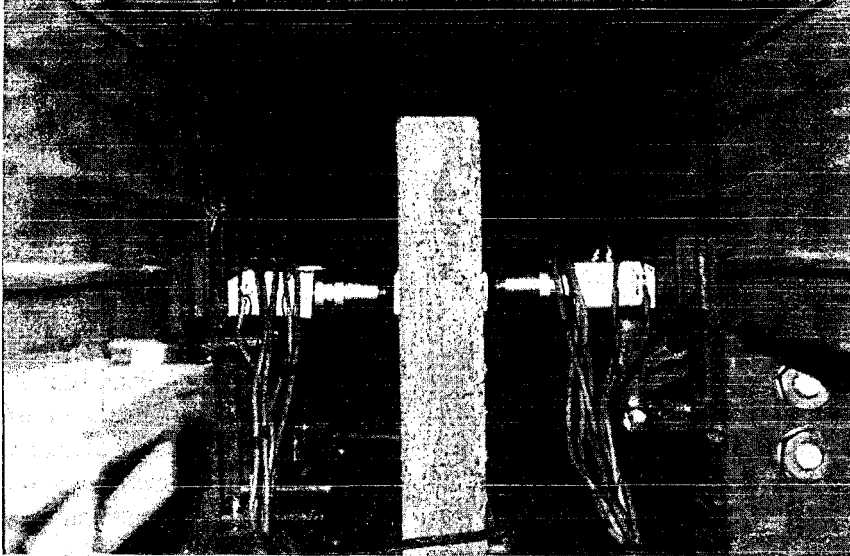
Stosunkowo rzadko prowadzi się bezpośrednie pomiary reakcji podporowych. Jednym z rozwiązań jest pomiar odkształceń podpory, z którego dopiero oblicza się wielkości reakcji. Tą metodę zastosowano w badaniach [1] płyt podpartych na wahaczach. Innym rozwiązaniem jest wykonanie podparcia z mierników siły, jak na przykład w badaniach belek wykonanych w Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach. Metoda może być z powodzeniem stosowana w badaniach płyt. W dalszej części zostanie przedstawiony sposób modelowania podparcia płyt umożliwiający pomiar reakcji. Sposób ten został zweryfikowany w badaniach.

### 2. MODELOWANIE PODPÓR

We wspomnianych badaniach zaplanowane było zbadanie kilku płyt prostokątnych i równoległobocznych podpartych na dwóch krótszych krawędziach: na jednej przegubowo przesuwnie, a na drugiej z utwierdzeniem bez przesuwu. Badane płyty pokazane są na rys. 1. Skonstruowanie podpór

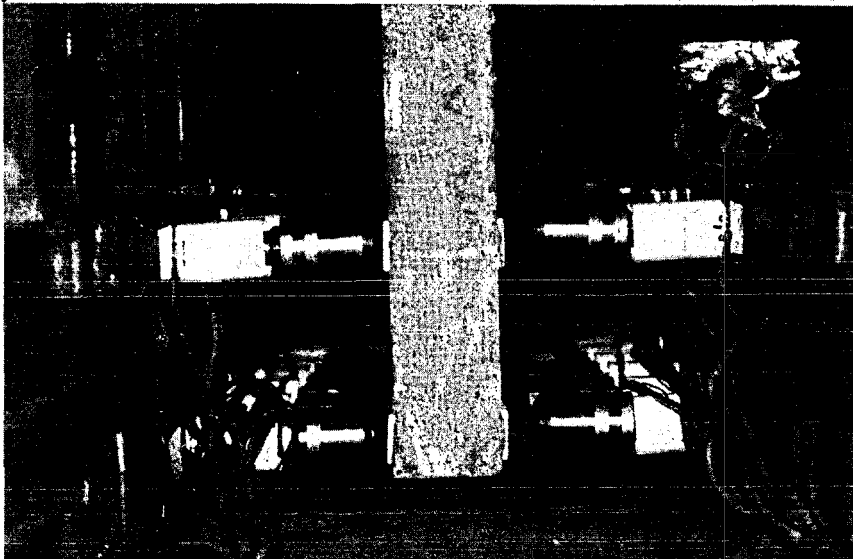
ciągłych, w których pomiar reakcji odbywałby się na całej ich długości jest z pewnością możliwe, choć skomplikowane technicznie i technologicznie. Ze względu na konieczność zgromadzenia dużej ilości urządzeń pomiarowych może być niewykonalnie finansowo, a na pewno drogie.

Płytę żelbetową traktuje się w obliczeniach jako element płaski, a działające w niej naprężenia odnosi się do jej płaszczyzny środkowej w postaci wypadkowych. Każda tak zwana siła skupiona przyłożona do powierzchni płyty oddziałuje na powierzchnię środkową na znacznie większym obszarze niż obszar bezpośredniego docisku. W takim kontekście podparcie ciągle można modelować za pomocą podpór punktowych, dobierając odpowiednio ich rozstaw. Inaczej mówiąc, można dokonać dyskretyzacji podparcia.



Fot. 1

W podparciu przegubowym badanych płyt (fot. 1) zastosowano jeden rząd podpór punktowych, a w podparciu z utwierdzeniem (fot. 2) dwa rzędy. Podpory umieszczone były po obu stronach płyty z trzech powodów. Pierwszy to konieczność dokładnego ustawienia płyty w stanowisku. Drugi to zapobieganie zmianie schematu statycznego w wyniku odrywania się płyty od niektórych podpór, szczególnie przy dużym obciążeniu (na skutek odkształcalności podpór, stanowiska i płyty), a trzeci to niejednakowe zwroty reakcji na długości podparcia, w dodatku mogące się zmieniać na skutek redystrybucji sił wewnętrznych w płycie. Fot. 1 i 2 były wykonane na etapie montażu stanowiska badawczego, dlatego nie wszystkie podpory przylegają do płyty.

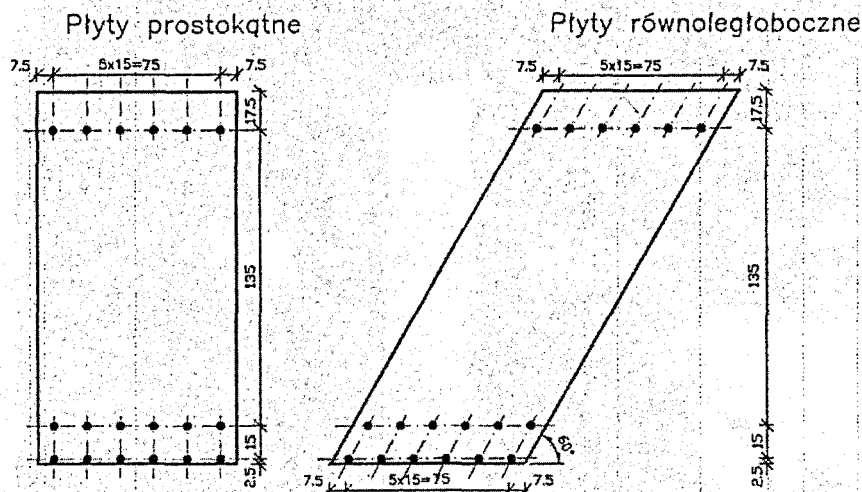


Fot. 2

Pionowe ustawienie płyty nie było konieczne do wykonania pomiaru reakcji. Wynikało z programu badań przewidującego wykonanie innych pomiarów: szerokości rozwarcia rys

i odkształceń powierzchniowych. Dało jednak w wypadku tych badań pewną korzyść, to jest zapewniło brak przesuwu w podporze dolnej przez oparcie płyty na sztywnych elementach stanowiska. Widoczne na zdjęciach płytki stalowe naklejone na powierzchni płyty w miejscach podparcia zapobiegały uszkodzeniu powierzchni podpór punktowych wykorzystywanych wielokrotnie i lokalnemu zmiażdżeniu betonu na skutek docisku. Przesuw w podporze górnej przegubowej został zrealizowany, choć ze względu na konieczność wstępnego wywołania siły w podporach (w celu ustabilizowania płyty), w ograniczonym stopniu. By zmniejszyć siły tarcia, powierzchnie styku zostały pokryte smarem. O przesuwanie się płyty w podparciu i jego kierunku świadczyły ślady pozostawione przez podpory punktowe na stalowych płytkach.

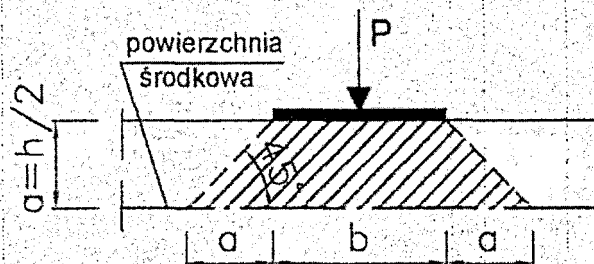
Rozmieszczenie punktów podporowych



Rys. 1

Punkty podporowe będące jednocześnie punktami pomiaru reakcji można rozmieszczać prawie dowolnie, ponieważ jedynymi ograniczeniami są wymiary poprzeczne elementu podporowego i jego nośność. Na rys. 1 pokazane jest rozmieszczenie podpór punktowych wzdłuż brzegów płyty w zrealizowanych badaniach doświadczalnych płyt. Płyty miały grubość 8 cm. Zmniejszając odległość między punktami podparcia zbliża się teoretyczne warunki podparcia do rzeczywistych i zwiększa się dokładność badania rozkładu reakcji.

Strefę oddziaływania siły skupionej na powierzchnię środkową można wyznaczyć według schematu jak na rys. 2. Przy założeniu, że punkty podporowe będą rozmieszczone równomiernie, odległość pomiędzy nimi zależy od grubości płyty ( $h = 2a$ ) i od szerokości stalowej przekładki ( $b$ ). Minimalna odległość między punktami podparcia dająca na powierzchni środkowej ciągły rozkład naprężeń jest równa sumie połowy grubości płyty i szerokości przekładki.



Rys. 2

Należy mieć na uwadze, że grubość przekładki przyklejonej do powierzchni płyty w miejscach podparcia powinna być dostatecznie gruba, by można było pominąć jej odkształcalność.

### 3. PODPORY PUNKTOWE

Podpory punktowe widoczne na obu fotografiach zostały wykonane ze stali o wysokiej wytrzymałości. Konstrukcja czujników pozwala na regulowanie ich długości. Jest to istotne w przypadku badania płyt o różnych grubościach lub o grubości zmiennej wzdłuż obwodu. Eliminuje też konieczność niwelowania różnic pomiędzy planowaną a rzeczywistą grubością, na przykład nadlewając

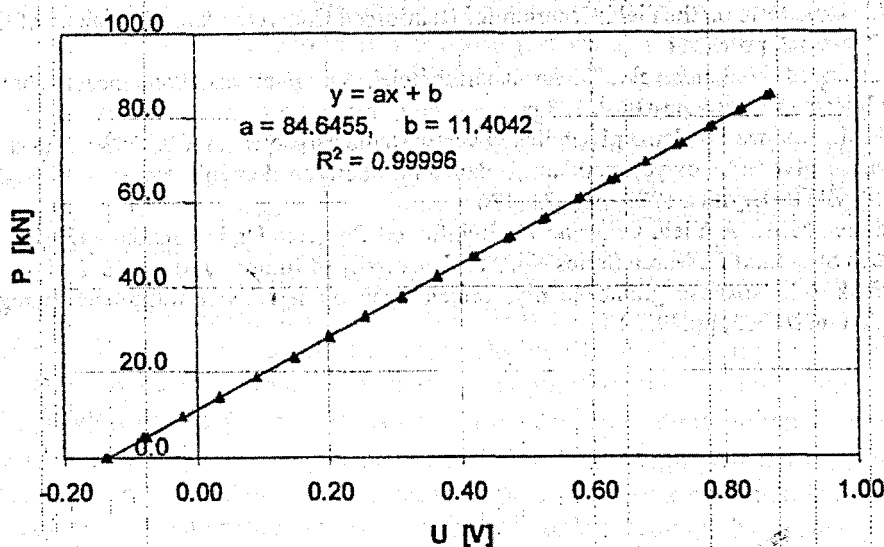
warstwę zaprawy. Innym powodem zastosowania takiej konstrukcji czujnika była możliwość wprowadzenia przez jego wydłużenie niewielkich sił wstępnych (o kontrolowanych wartościach) w celu ustabilizowania płyty w stanowisku badawczym.

Do prawidłowego i bezpiecznego przeprowadzenia badań konieczne jest stabilne zamocowanie podpór do stanowiska. Mocowanie w prowadnicach jak na fotografiach sprawdziło się. Ponadto pozwala ono na dowolne i łatwe regulowanie ich zagęszczenia oraz szybki montaż i demontaż podpór, co sprzyja ich trwałości.

Podpory zostały zaprojektowane i wykonane specjalnie do wspomnianych badań, we współpracy pomiędzy Wydziałami Budownictwa Politechniki Częstochowskiej i Politechniki Świętokrzyskiej. Projekt techniczny podpór został wykonany na podstawie obliczeń numerycznych przewidywanych wielkości reakcji, przy założeniu, że zakres pomiarowy musi być wyższy od maksymalnej przewidywanej siły o 35%. Są one czujnikami pomiaru reakcji. Pracują na zasadzie tensometrii oporowej z kompensacją temperatury. Kompensacja jest w takich badaniach konieczna, ponieważ w typowych pomieszczeniach do badań elementów konstrukcji nie jest utrzymywana stała temperatura pomiaru. Ulega ona zmianom na przykład na skutek zmiany nasłonecznienia albo umieszczenia oświetlenia zbyt blisko czujników. Wszystkie czujniki zostały wykonane identycznie, i z tych samych materiałów. Zgodnie z zasadami budowy czujników użyto przewodów ekranowanych, by uniknąć błędów przypadkowych pomiaru z powodu wzajemnego oddziaływania na sąsiednie przewody pola elektromagnetycznego powstającego wokół nieekranowanego przewodu. Fragment korpusów, na którym naklejone były tensometry elektrooporowe został zabezpieczony przed przypadkowym uszkodzeniem.

Każdy z czujników został poddany procedurze testowania, której celem było sprawdzenie prawidłowości wykonania, powtarzalności pomiaru i opracowanie indywidualnej charakterystyki czujnika. Wzorcowanie zostało przeprowadzone przy użyciu maszyny wytrzymałościowej typu INSTRON sterowanej elektronicznie. Zmiany napięcia prądu płynącego w czujnikach rejestrowała aparatura wykorzystana później w badaniach. Podczas badań i wzorcowania, cały układ pomiarowy był połączony identycznie. W ten sposób błędy pomiarowe przyrządów nie zostały w trakcie badań powiększone o błędy dodatkowe wynikające z różnic pomiędzy charakterystykami poszczególnych kanałów pomiarowych. Charakterystyki napięcie – siła ( $U - P$ ) zostały wyznaczone na podstawie pomiarów z trzykrotnego obciążenia i odciążenia danego czujnika, a wyniki zostały przeanalizowane metodami statystycznymi. Kształt i współczynniki krzywych zależności  $U - P$  dla pomiarów składowych oraz krzywej ostatecznej były dobierane metodą najmniejszych kwadratów. Zbiory pomiarów składowych jak i zbiór łączny wykazywały dużą zgodność i liniowość, dlatego możliwe było przyjęcie ostatecznej krzywej zależności  $U - P$  w postaci funkcji liniowej, wspólnej dla obciążenia i odciążenia. Współczynniki korelacji  $R^2$  były dla każdego czujnika bliskie jedności. Na rys. 3 pokazana jest charakterystyka jednego z kilkudziesięciu czujników użytych w badaniach.

Zależność  $U - P$  dla czujnika nr 11



Rys. 3

#### 4. POMIAR REAKCJI

Pomiar reakcji oraz pomiary do celów wzorcowania były prowadzone za pomocą wielokanałowego zestawu pomiarowego z przetwornikiem analogowo – cyfrowym o dużej rozdzielczości i komputera. Zestaw jest dostosowany do pomiaru zmiany napięcia maksymalnie w 256 czujnikach, czyli w 128 punktach podporowych. Każdy czujnik był podczas badań podłączany do osobnego kanału. Pomiary wykonywane były kolejno we wszystkich kanałach pomiarowych w odstępie czasu na tyle małym, że pomiar można było uznać za jednoczesny.

Pomiary reakcji odbywały się podczas badań przez cały proces obciążania i odciążania płyty. Były wykonywane skokowo przy założeniu małych przyrostów obciążenia w stosunku do maksymalnego obciążenia założonego w danym cyklu. Pomiar odbywał się po upływie 1 minuty od chwili uzyskaniażądanego obciążenia, by nastąpiła stabilizacja rozkładu naprężeń w płycie oraz reakcji czujników. Na podstawie kontroli wartości obciążenia płyty oraz sumy i rozkładu reakcji podporowych, stwierdzono przy każdym obciążeniu stan pozornego niezrównoważenia układu: reakcje podporowe nie równoważyły obciążenia. Kwestia ta jest tematem innego referatu. Na podstawie analizy statystycznej stwierdzono, że stopień tego niezrównoważenia odpowiada dokładności aparatury pomiarowej. Można zatem uznać, że podczas badań nie ujawniły się żadne istotne wady metody i aparatury pomiarowej.

#### 5. PODSUMOWANIE

Przedstawiona koncepcja modelowania podparcia pozwala w prosty sposób modelować dowolne warianty podparcia ciągłego płyt. Może być również zastosowana do modelowania podparcia na słupie przy użyciu jednej pary podpór punktowych lub kilku par rozlokowanych na żądanej powierzchni podparcia. Ważną z ekonomicznego punktu widzenia zaletą przedstawionej metody jest możliwość wielokrotnego wykorzystywania elementów podporowych, z ograniczeniem wykorzystania danego elementu wynikającym tylko z jego nośności. Dokładność pomiaru reakcji zależy od dokładności czujnika. Im mniejszy jest jego przekrój, tym przy tym samym obciążeniu dokładność pomiaru jest większa. Dokładność wykonania badań można zwiększyć posługując się czujnikami o różnych zakresach pomiarowych odpowiednio dobranych do przewidywanych wartości reakcji z uwzględnieniem zmiany ich rozkładu na skutek redystrybucji. Aparatura zaprojektowana do wykonania pomiarów pracowała sprawnie zarówno w warunkach testowania i wzorcowania czujników jak i podczas prowadzenia badań właściwych. Nie ujawniły się żadne istotne wady metody i aparatury pomiarowej, które wpłynęłyby na dokładność badań.

#### BIBLIOGRAFIA

1. Szczygieł J., Kozakow Z.: Badania modelowe płyt i projektowanie na ich podstawie przeseł mostów płytowych, AIL, 1960, tVI/1, pp. 49–91
2. Kwieciński M.: Weryfikacja doświadczalna teorii nośności granicznej ustrojów płytowo-żebrowych, Rozpr. Inż., tom IX, zes. 1, rok 1961, pp. 125–150
3. Kwieciński M.W.: Some tests on the Yield Criterion for Reinforced Concrete Slab, Magazine of Concrete Research (London), Vol. 17, No. 52, pp.135–1
4. Lenkei P.: Tudományos közlemények. Törési határfeltételek vizsgálatavasbetonlemezek töresvonalai mentén. Építéstudományi Intézet, 55, Budapest 1966, 188 pp.
5. Absi E., Brandt A.M.: Analiza i badania płyt żelbetowych w stanie zarysowania, PWN, Warszawa 1974, pp.126
6. Mucha J.: Sztywność płyt żelbetowych poddanych działaniu obciążeń doraźnie zmiennych, XXXIII Konf. Nauk. KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1987, pp. 121–126
7. Lenschow R.J., Sozen M.A.: A Yield Criterion for Reinforced Concrete Under Biaxial Criterion and Forces, Civil Engineering Studies Structural Research Series No. 311, University of Illinois, July 1966, 527 pp.
8. Szkwerek J., Ścibak W.: Nośność graniczna płyt żelbetowych o mieszanych warunkach brzegowych w świetle wyników badań, AIL nr2/1975, pp.295313.