

UDK 693.22.004.18

Ordon B.

PROBLEM POZORNEGO NIEZRÓWNOWAŻENIA OBCIĄŻENIA ZEWNĘTRZNEGO I REAKCJI PODPOROWYCH W BADANIACH PŁYT ŻELBETOWYCH

Przedstawiono problem nie zrównoważenia zmierzonych reakcji podporowych i obciążenia w badaniach płyt podpartych na dwóch przeciwległych krawędziach. Objasnione zostały przyczyny tego zjawiska. Zaproponowano metodę rozrzucenia poprawek według kryterium najmniejszej sumy kwadratów błędów względnych. W części końcowej przedstawiony został przykładowy histogram rozkładu poprawek w wartościach bezwzględnych i porównany ze średnim błędem granicznym wszystkich czujników wyznaczonym podczas wzorcowania.

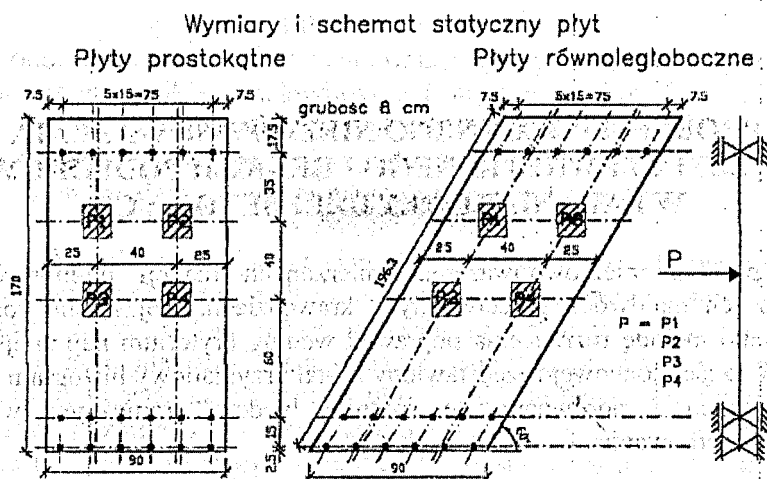
1. WPROWADZENIE

Coraz powszechniej przeprowadza się badania elementów żelbetowych, w których program badań obejmuje pomiar reakcji podporowych. Pomiar reakcji – jak każdy pomiar – nie jest dokładny. Obarczony jest błędami pomiarowymi, które powodują pozorny stan nie zrównoważenia obciążenia i odpowiedzi całego układu badawczego wyrażonej wartościami reakcji w podparciu płyty. Taki właśnie stan wystąpił w wykonanych przeze mnie badaniach płyt żelbetowych. Badane były 4 płyty prostokątne i 4 równoległoboczne, podparte na dwóch przeciwległych, krótszych krawędziach. Obciążone były jedną siłą skupioną w czterech położeniach. Na jednej krawędzi płyty były podparte przegubowo przesuwnie, na drugiej były utwierdzone częściowo. Utwierdzenie częściowe, a nie pełne było spowodowane odkształcalnością stanowiska w obszarze podparcia. Podparcie zostało wykonane z 36 elektrooporowych czujników siły. Na podporę przegubową składało się 12 czujników umieszczonych w jednym rzędzie, a na podporę utwierdzoną 24 czujniki umieszczone w dwóch rzędach po 12 sztuk w każdej. Czujniki należące do danego rzędu były umieszczone po obu stronach płyty w ilości po 6 sztuk, tworząc 6 par czujników usytuowanych współosiowo. Odległości pomiędzy czujnikami umieszczonymi w jednym rzędzie oraz pomiędzy rzędami czujników w podparciu z utwierdzeniem wynosiły 15 cm. Schemat statyczny płyt pokazane jest na rys. 1. Wielkością bezpośrednio mierzoną była zmiana napięcia prądu płynącego w tensometrycznym układzie pomiarowym naklejonym na elemencie podporowym. Wartość reakcji była wyznaczana na podstawie zależności napięcie – obciążenie czujnika zbadanej dla każdego czujnika.

2. ŹRÓDŁA BŁĘDÓW POMIAROWYCH

Błędy pomiarowe klasyfikuje się według różnych kryteriów. Najczęściej stosowana klasyfikacja [1, 3] dzieli błędy na systematyczne i przypadkowe [1]. Źródła błędów systematycznych są znane. Błędem systematycznym określa się błąd, którego znak i wartość jest stała w stałych warunkach, lub zmienia się wraz ze zmianą warunków według znanych reguł. Błąd ten można częściowo wyeliminować przez poddanie układu pomiarowego procedurze wzorcowania możliwie krótko przed przystąpieniem do pomiarów i w warunkach środowiska jak najbardziej zbliżonych do warunków panujących w trakcie badań. Przyczyny powstawania błędów przypadkowych mogą być nieznane, podobnie jak prawdopodobieństwo jego wystąpienia oraz wielkość. Błąd przypadkowy powstaje niezależnie od warunków pomiaru, a jego wartość można wyznaczyć metodami statystycznymi na podstawie pomiarów masowych.

Na błędy, jakimi obciążone są wykonane pomiary składają się zarówno błędy systematyczne jak i przypadkowe, które powstają w każdych warunkach. Całkowity błąd systematyczny jest sumą algebraiczną kilku typów błędów. Jednym z nich jest błąd metody. Do tego typu błędów trzeba zaliczyć tak zwany błąd kwantowania powstały podczas zamiany sygnału analogowego na cyfrowy. Przetworzenie sygnału analogowego na cyfrowy oznacza przypisanie wszystkim wartościom pierwotnym z przedziału $\langle V; V_1 \rangle$ lub $\langle V_1; V \rangle$ jednej wartości cyfrowej V . Maksymalny błąd obciążający z tego powodu wyniki pomiarów równy jest szerokości przedziału, czyli rozdzielczości przetwornika. Przetwornik powinien być tak dobrany, by błąd względny powstający przy zapisie rzeczywistej wartości w kodzie cyfrowym był znacznie mniejszy niż błąd względny całego układu pomiarowego. Można wtedy przyjąć, że dokładność pomiarów nie zależy od przetwornika A/C. W przypadku wykonanych badań warunek taki był spełniony.



Drugą składową błędów metody jest błąd powstały podczas wyznaczania charakterystyk czujników napięcie – obciążenie ($U - P$). Charakterystyka każdego czujnika użytego w badaniach była budowana metodami statystycznymi na podstawie kilkukrotnych pomiarów wzorcowych, które – co oczywiste – nie były identyczne. Powodów różnic, a w konsekwencji także określonych błędów czujników należy upatrywać między innymi we właściwościach samych czujników oraz użytego wielokanałowego tensometrycznego zestawu pomiarowego. Powstały na tym etapie błąd pomiarowy jest także skutkiem przyjęcia określonego kształtu charakterystyki czujników. We wspomnianych badaniach możliwe było przyjęcie dla każdego czujnika liniowej charakterystyki $U - P$. Współczynniki charakterystyki były wyznaczane metodą najmniejszych kwadratów. Współczynnik korelacji R^2 przyjmował wartości mniejsze niż 0,999.

Innym typem błędów systematycznych jest błąd wzorcowania, który obciąża pomiary w przypadku, gdy warunki wzorcowania i warunki pracy aparatury pomiarowej podczas badań właściwych nie są jednakowe. Dlatego przestrzegana była zasada identycznego montażu wszystkich elementów układu pomiarowego zarówno podczas wzorcowania wszystkich czujników jak i podczas pomiarów docelowych. Wiadomo bowiem, że nawet zmiana oporności styku lub długości przewodu elektrycznego może wpłynąć na jakość pomiarów. Źródłem błędów wzorcowania mogłoby być niedokładność miary wzorca, w tym wypadku niedokładność pomiaru siły w maszynie wytrzymałościowej. Drugim źródłem mogłoby być nieosiowe przekazanie reakcji na czujnik na skutek obrotu płyty w podporze. Aby zminimalizować jego skutki zastosowane zostały odpowiednie rozwiązania konstrukcyjne.

Trzecim typem błędów systematycznych jest błąd dodatkowy powstający na skutek zmiany warunków otoczenia w stosunku do warunków panujących podczas wzorcowania przyrządów. Przyczynami błędów dodatkowych mogłoby być zmiany wilgotności i temperatury powietrza. Do budowy czujników użyte zostały tensometry foliowe, które są znacznie mniej wrażliwe na działanie wilgoci niż tensometry papierowe. Użyte do klejenia substancje i technika naklejania zostały tak dobrane, by zminimalizować szkodliwe oddziaływanie wilgoci. Ewentualny wpływ różnicy temperatury na wyniki pomiarów, został wyeliminowany przez zastosowanie na czujnikach układu pomiarowego z kompensacją temperatury.

W przypadku pomiarów wykonywanych elektronicznie źle dobrany czas próbkowania może spowodować powstanie błędów dynamicznych. Jest on różnicą pomiędzy wartością próbkowaną sygnału a jego rzeczywistą wartością [1]. Występuje przy sygnale niestabilizowanym, na przykład w przypadku pomiarów wykonywanych jednym miernikiem na kilku czujnikach przy zbyt krótkim czasie stabilizacji miernika. Błąd taki może osiągać znaczne wartości. W wykonanych badaniach czas próbkowania był dobrany właściwie.

Z braku odpowiednich możliwości nie były prowadzone badania mające na celu wyznaczenie wartości spodziewanych rodzajów błędów, co zresztą nie było konieczne. Błędy względne i bezwzględne wyznaczone dla każdego czujnika zawierają w sobie wszystkie składowe błędów systematycznych oraz błąd przypadkowy. Błąd ten można wyznaczyć tylko metodami statystycznymi na podstawie pomiarów masowych. Dlatego, by błąd sumaryczny zawierał prawidłową wartość błędów przypadkowych, każda zmiana napięcia rejestrowana podczas wzorcowania i pomiarów docelowych była automatycznie mierzona stukrotnie.

Znajomość błędów granicznych czujników wyznaczonych podczas ich wzorcowania nie wystarcza do wyznaczenia poprawnych wartości reakcji. Pozwala tylko określić szerokości przedziałów, w którym z

dużym prawdopodobieństwem zawierają się wartości prawidłowe. W przypadku przeprowadzonych badań pozwala również ocenić, czy stopień pozornego niezrównoważenia układu doświadczalnego może wynikać tylko z niedokładności urządzeń pomiarowych, czy zaistniały jakieś dodatkowe czynniki pogłębiające ten stan: na przykład uszkodzenie aparatury lub nieprzewidziane zakłócenia sygnału pierwotnego. Aby wykonać taką analizę, a przede wszystkim wyznaczyć prawidłowe wartości reakcji konieczne było zbudowanie algorytmu rozłożenia poprawek i ich obliczenie.

3. METODA OBLICZENIA POPRAWEK

Przedstawiona poniżej metoda obliczenia poprawek została dostosowana do obliczenia poprawek reakcji płyty prostokątnej i równoległobocznej podpartej w 18 punktach. Podobną metodę dla elementu jednowymiarowego – belki trójprzęsłowej przedstawił J. Ślusarczyk [2].

Konieczne poprawki uznane za błędy pomiarowe zostały obliczone w postaci błędów względnych. Jako kryterium przyjęłam minimalną wartość sumy ich kwadratów. Założyłam, że siła „P” obciążająca płytę została wyznaczona dokładnie. Założenie to jest uzasadnione, ponieważ dokładność pomiaru siły obciążającej płytę była kilkukrotnie większa niż dokładność pomiaru reakcji. W konsekwencji błąd popełniany przy pomiarze obciążenia jest wielokrotnie mniejszy niż całkowity błąd pomiaru reakcji.

Zagadnienie wymaga rozwiązania układu 18 równań liniowych. Trzy pierwsze to równania równowagi:

– równanie sumy sił:

$$\sum_{i=1}^{18} R_i \cdot (1 + \delta_i) - P = 0, \quad (1)$$

– równania sumy momentów względem dwóch prostych wzajemnie prostopadłych:

$$\sum_{i=1}^{18} R_i \cdot (1 + \delta_i) \cdot l_i^x - P \cdot l_p^x = 0, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{18} R_i \cdot (1 + \delta_i) \cdot l_i^y - P \cdot l_p^y = 0, \quad (3)$$

gdzie i – numer kolejny punktu podporowego,

R_i – zmierzona wartość reakcji,

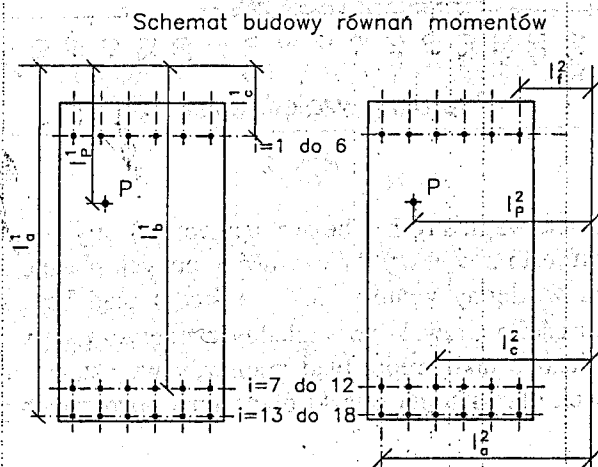
δ_i – poszukiwana wartość poprawki,

l_i^x, l_i^y – odległości punktu podparcia odpowiednio od prostej „x” i „y”,

l_p^x, l_p^y – odległości punktu przyłożenia obciążenia odpowiednio od prostej „x” i „y”.

Schemat budowy równań na przykładzie płyty równoległobocznej przedstawiony jest na rysunku 2.

Z równań (1)–(3) wyznaczyć można 3 dowolne błędy względne δ_i ($i = a, b, c$) jako funkcje 15 pozostałych błędów. Z oczywistych powodów wybrane zostały błędy reakcji w punktach podporowych nie leżących na jednej linii.



Rys. 2

Pozostałych 15 równań wyznacza się z warunku minimum sumy kwadratów poprawek. Warunek taki uwzględnia możliwość wystąpienia poprawek przeciwnych znaków i ma postać:

$$\Delta^2 = \sum_{i=1}^{18} \delta_i^2 \quad (4)$$

Brakujące równania są pochodnymi równania (4); każde względem jednej spośród występujących w nim piętnastu poprawek:

$$\frac{\partial \Delta^2}{\partial \delta} = 2 \cdot \delta_i + 2 \cdot \delta_a \cdot \frac{\partial \delta_a}{\partial \delta_i} + 2 \cdot \delta_b \cdot \frac{\partial \delta_b}{\partial \delta_i} + 2 \cdot \delta_c \cdot \frac{\partial \delta_c}{\partial \delta_i} = 0 \quad (5)$$

gdzie $i \neq a, b, c$.

Wprowadzając do równań (5) związki wyrażające wielkości δ_a , δ_b i δ_c z równań (1)-(3) uzyskuje się poszukiwany układ brakujących równań liniowych z piętnastoma niewiadomymi w każdym równaniu. Po jego rozwiązaniu, błędy względne „ δ_a ”, „ δ_b ” i „ δ_c ” oblicza się z równań sumy sił i momentów (1)-(3).

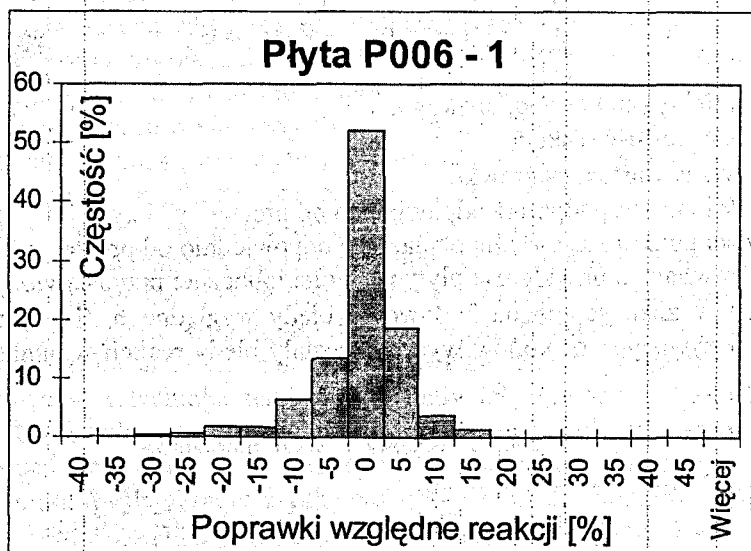
Po wyznaczeniu wszystkich błędów względnych pomiaru reakcji, reakcje „poprawione” „ R'_i ” oblicza się następująco:

$$R'_i = R_i \cdot (1 + \delta_i) \quad (7.9)$$

Poprawność rozwiązania układu równań była weryfikowana przez rozwiązanie płyty obciążonej siłą „P” i piętnastoma „poprawionymi” reakcjami. Pozostałe 3 „poprawione” reakcje (niekoniecznie „ R_a ”, „ R_b ” i „ R_c ”) nie leżące na jednej linii zostały obliczone jako reakcje podporowe tak obciążonej płyty. Wielkości tych reakcji były zgodne z obliczonymi dla wybranych podpór wielkościami „ R' ”.

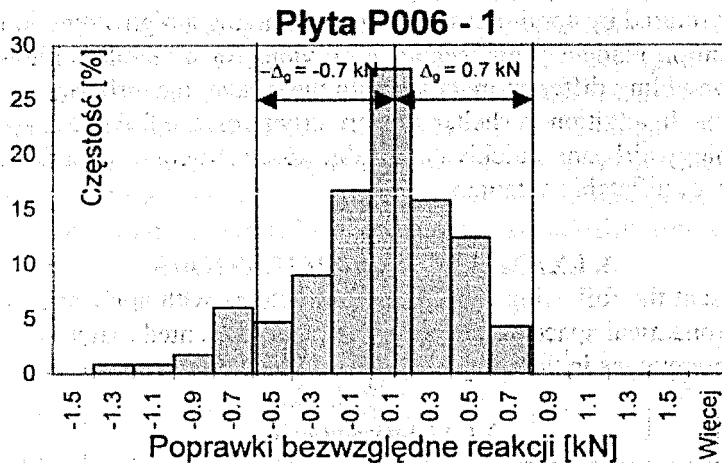
4. WYNIKI OBLICZEŃ POPRAWEK

Rys. 3 przedstawia histogram rozkładu statystycznego wartości względnych poprawek dla ostatniej ścieżki obciążenia jednej z płyt prostokątnych, a rys. 4 histogram rozkładu tych samych poprawek w wartościach bezwzględnych.



Rys. 3

Skrajne wartości poprawek względnych i bezwzględnych zostały obliczone dla niskich poziomów obciążenia, kiedy błąd pomiaru jest największy. Większość poprawek plasuje się w przedziałach w pobliżu wartości zerowej. Średni błąd względny wynosi $-3,2\%$ a średni błąd bezwzględny poprawek wynosi $-0,06$ kN. Prawie wszystkie wartości poprawek bezwzględnych mieszczą się w przedziale $(-0,7$ kN ; $0,7$ kN), którego granice zostały wyznaczone jako średni błąd graniczny wszystkich użytych czujników. Podobnie kształtują się rozkłady poprawek dla ostatniej ścieżki obciążenia pozostałych płyt oraz dla wcześniejszych ścieżek.



Rys. 4

5. PODSUMOWANIE

Zaobserwowany stan pozornego niezrównoważenia obciążenia i reakcji podporowych płyt jest spowodowany zasadniczo dokładnością pomiaru. Uniknięcie błędów pomiarowych jest niemożliwe, zatem należy dążyć do ograniczenia ich wartości stosując czujniki o odpowiednio dobranej wysokiej czułości. Wysokie wartości poprawek obliczone dla niektórych punktów podporowych wynikają częściowo z samego rozkładu reakcji. Przy obciążeniu według schematów jak na rys. 1 na pewnych odcinkach linii podporowych reakcje są nawet wielokrotnie mniejsze niż na pozostałych. To powoduje, że błędy pomiaru tych reakcji są kilkakrotnie większe niż błędy pomiaru reakcji o dużych wartościach. Pewien wpływ na dokładność pomiaru mogło mieć ewentualne nieosiowe obciążenie czujników na skutek obrotu płyty w podporze i inne niezidentyfikowane czynniki. Porównanie szerokości przedziału wyznaczonego wartością średnią bezwzględnego błędu granicznego sugeruje, że wpływ ten nie mógł być duży.

Zaprezentowana metoda rozrzucenia poprawek reakcji podporowych płyt może być zastosowana do płyt o dowolnym kształcie i dowolnej liczbie punktów podporowych.

BIBLIOGRAFIA

1. Chwaleba A., Poniński M., Siedlecki A.: Metrologia elektryczna. Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa 1998
2. Ślusarczyk J.: Measurement Reactions of the Three Bay Reinforced Beam Considering the Error Calculus, Concrete Constructions, Theory and Experimental Studies, Polish Academy of Science in Wrocław, Board of Building Engineering and Mechanics, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999, pp. 251-258
3. Janiczek R.: Teoria pomiaru. Skrypty Politechniki Częstochowskiej nr 29. Częstochowa Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej 1998.

Pokorska Iwona

AIRBEAMS IN THE DESIGN OF LIGHT STRUCTURES-EXAMPLES OF APPLICATION

1. INTRODUCTION

The purpose of this paper is to present the different examples of structures with application of airbeams. The presented examples are taken from leaflets of leading companies dealing with airbeams structures[1],[2]. Textile manufacturing technologies are investigated to replace the aluminum structures currently used for tent frames. Existing technology involves adhesively bonding or welding together patterned, coated, flat fabric goods to form an arch shape. The use of durable and reliable pressurized airbeams reduces the weight of the structure and increases the ease of erection/strike.