

# Ocena nośności nawierzchni lotniskowych na podstawie impulsowych testów dynamicznych

Antoni Szydło, Bartłomiej Krawczyk

Problemem w ocenie nośności nawierzchni przy użyciu ugięciomierza FWD jest pewna niespójność, polegająca na tym, że przemieszczenia (ugięcia) uzyskane pod obciążeniem **dynamicznym** wykorzystywane są do identyfikacji parametrów w obowiązujących **statycznych** modelach nawierzchni. W artykule autorzy przybliżają zagadnienia związane z prawidłową oceną nośności nawierzchni lotniskowych na podstawie impulsowych testów dynamicznych oraz oceną wpływu dynamicznego charakteru badania FWD na identyfikowane parametry (moduły) warstw konstrukcji nawierzchni.



prof. dr hab. inż.  
Antoni Szydło  
Instytut Inżynierii Lądowej  
Politechniki Wrocławskiej,  
Katedra Dróg i Lotnisk  
antoni.szydlo@pwr.wroc.pl



dr inż.  
Bartłomiej Krawczyk  
Instytut Inżynierii Lądowej  
Politechniki Wrocławskiej,  
Katedra Dróg i Lotnisk  
b.krawczyk@pwr.wroc.pl

Nośność wyznaczana jest na podstawie pomierzonych pod znanym obciążeniem przemieszczeń pionowych (ugięć) konstrukcji nawierzchni, za pomocą tzw. ugięciomierzy dynamicznych FWD/HWD.

## Ugięciomierz dynamiczny FWD

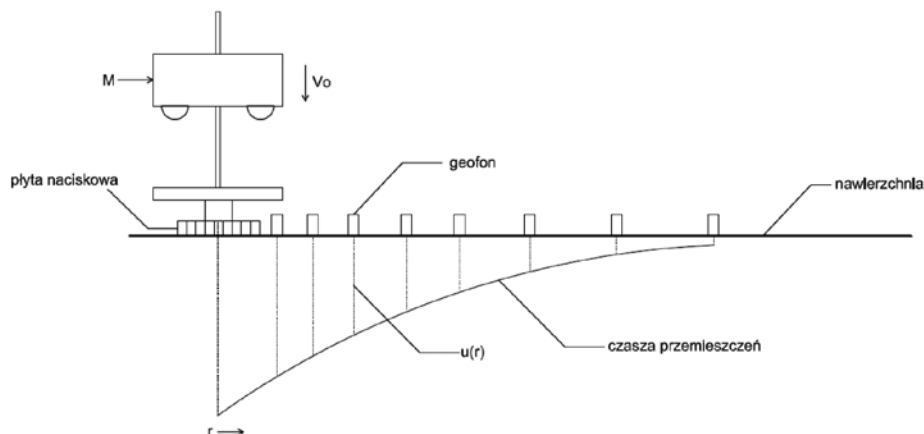
Ugięciomierz FWD (Falling Weight Deflectometer) (rys.1) jest urządzeniem służącym do pomiarów przemieszczeń pionowych konstrukcji nawierzchni pod obciążeniem

## Nośność nawierzchni

Konstrukcję nawierzchni lotniskowej tworzy zespół warstw, których zadaniem jest przeniesienie na podłoże gruntowe obciążeń od kół samolotów, przy zapewnieniu odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa. Stan nawierzchni lotniskowej określany jest na podstawie parametrów odpowiadających poszczególnym cechom eksploatacyjnym, do których należą: nośność, równość podłużna, głębokość kolein (równość poprzeczna), stan powierzchni (spękania, wylatania) i właściwości przeciwpoślizgowe (szorstkość powierzchni). Pod wpływem obciążeń transportowych oraz czynników klimatycznych konstrukcja nawierzchni ulega systematycznej degradacji, a cechy eksploatacyjne – pogorszeniu. Najistotniejszą cechą eksploatacyjną jest nośność nawierzchni, czyli jej zdolność do przejmowania obciążeń powtarzalnych, wywołanych ruchem samolotów i innych oddziaływań, w sposób zapewniający ustaloną trwałość. Utrata nośności pociąga za sobą pogorszenie wszystkich pozostałych cech eksploatacyjnych. W budownictwie lotniskowym nośność nawierzchni przedstawia liczba klasyfikacyjna PCN. Jest to liczba, która wyraża nośność dla określonej liczby przejazdów samolotów. Jest ona równoważna 1/500 dopuszczalnego obciążenia (w kg masy) przyłożonego do nawierzchni za pośrednictwem standardowego pojedynczego koła, oddziałującego z intensywnością 1,25 MPa [5].



1. Widok ugięciomierza dynamicznego FWD



2. Schemat działania ugięciomierza FWD

wywołanym swobodnie spadającą masą.

Ciężar, swobodnie spadający z ustalonej wysokości, uderza w układ tłumiący, który ulega deformacji i płynnie przekazuje impuls obciążający na płytę naciskową. Płyta z kolei wywołuje pionowe przemieszczenia (ugięcia) konstrukcji nawierzchni. Schemat działania FWD przedstawiono na rys. 2.

Wartości ugięć konstrukcji nawierzchni mierzone są przez czujniki (geofony) rozmieszczone w osi obciążenia (bezpośrednio pod płytą naciskową) oraz w dodatkowych punktach, w ustalonej odległości od płyty. Widok geofonów i płyty naciskowej urządzenia FWD 8002 przedstawiono na rys. 3.

Geofon jest czujnikiem zbliżonym swoją budową do sejsmometru, przystosowanym jednak do pracy w wyższych częstotliwościach drgań. Składa się on zasadniczo z masy sejsmicznej (cewki) przemieszczającej się względem obudowy w polu magnetycznym pod wpływem drgań. Schemat typowego geofonu przedstawiono na rys. 4.

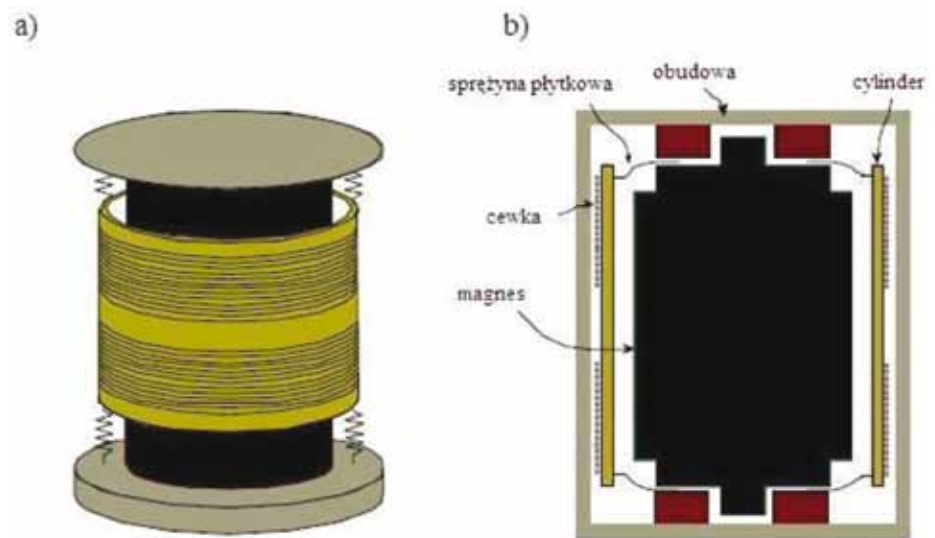
Ruch przewodnika z prądem w polu magnetycznym powoduje, zgodnie z prawem Faradaya, pojawienie się siły elektromotorycznej (wyściowego napięcia) równej szybkości zmian strumienia indukcji pola magnetycznego i proporcjonalnej do prędkości przemieszczenia masy sejsmicznej. Wyściowy sygnał napięcia (proporcjonalny do prędkości) jest następnie przetwarzany przez oprogramowanie ugięciomierza na względne przemieszczenie masy sejsmicznej (cewki). Względne przemieszczenie masy sejsmicznej odpowiada z kolei pionowemu przemieszczeniu (ugięciu) konstrukcji nawierzchni.

**Wpływ dynamicznego charakteru obciążenia na rejestrowane przemieszczenia**

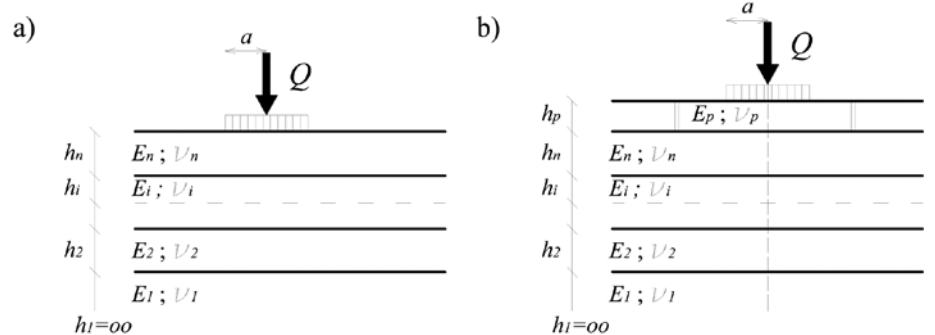
Dotychczasowa praktyka badań nawierzchni lotniskowych z wykorzystaniem ugięciomierza dynamicznego FWD polega na rejestrowaniu wyników pomiarów czasz przemieszczeń, które w dalszej kolejności wykorzystywane są w modelach nawierzchni do identyfikacji parametrów tych modeli na bazie tzw. obliczeń odwrotnych. We współczesnej praktyce projektowej nie jest jednak zwykle brany pod uwagę dynamiczny charakter obciążenia w badaniu FWD i jego wpływ na identyfikowane parametry modelu nawierzchni. Obciążenia wywierane przez ugięciomierz FWD mają krótkotrwały charakter dynamiczny (udarowy), a rejestrowane przemieszczenia nawierzchni są wynikiem działań tych obciążeń. Problem polega na tym, że w praktyce projektowej stosuje się najczęściej statyczne modele na-



3. Widok geofonów i płyty naciskowej



4. Schemat budowy geofonu [1]: a) w widoku, b) w przekroju



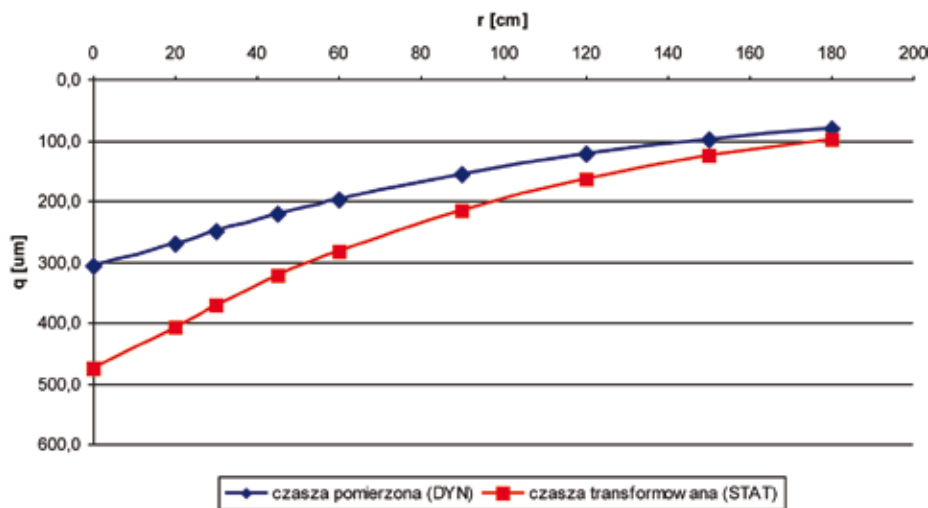
5. Modele nawierzchni:

a) model sprężystej półprzestrzeni warstwowej w odniesieniu do nawierzchni podatnych i półsztywnych, b) model płyty opartej na sprężystej półprzestrzeni warstwowej w odniesieniu do nawierzchni sztywnych z betonu cementowego

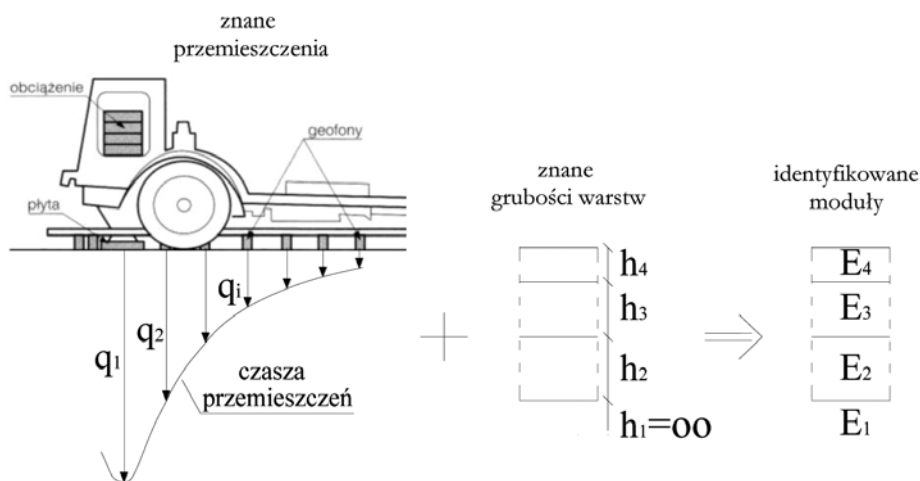
wierzchni w postaci warstwowych półprzestrzeni sprężystych (rys. 5). Identyfikacji podlegają więc parametry modelu statycznego (najczęściej moduły) na podstawie czaszy przemieszczeń uzyskanej pod obciążeniem dynamicznym (w postaci impulsu siłowego), co powoduje niewątpliwie konflikt metodyczny.

Empirycznie i analitycznie udowodniono [2], że w zależności od sposobu obciążania (statycznie/dynamicznie) występują znacz-

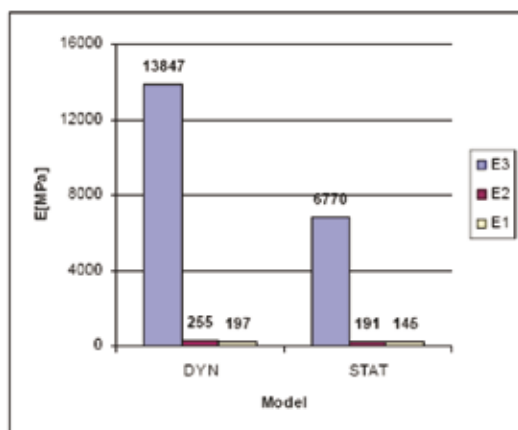
ne różnice w uzyskanych przemieszczeniach pionowych (ugięciach) konstrukcji, w związku z czym przemieszczenia pionowe nawierzchni uzyskane za pomocą ugięciomierza dynamicznego FWD, w którym obciążenie realizowane jest w postaci impulsu siłowego, mogą być wykorzystywane do identyfikacji parametrów statycznych modeli nawierzchni lotniskowych dopiero po wprowadzeniu odpowiednich współczynników korygujących. Współczynniki te zde-



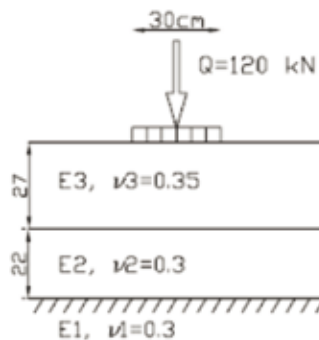
6. Czasza bezpośrednio pomierzona w badaniu FWD (DYN) i czasza transformowana z wykorzystaniem wyznaczonych współczynników korekcyjnych (STAT)



7. Schemat identyfikacji modułów sprężystości warstw konstrukcji nawierzchni w obliczeniach odwrotnych



8. Identyfikowane parametry i model obliczeniowy konstrukcji nawierzchni



finiowano jako liczby przez które przemnożyć należy wartości przemieszczeń (ugięć) uzyskanych w teście dynamicznym  $q_{max}$  aby otrzymać hipotetyczne przemieszczenia w teście statycznym  $q_{stat}$  pod obciążeniem

równym co do wartości obciążeniu dynamicznemu. Wykorzystując zależność statycznej podatności układu  $\delta_i$  od przemieszczenia i obciążenia dynamicznego:

$$\delta_i = \frac{\int q(t) dt}{\int Q(t) dt} \quad (1)$$

wyprowadzono zależność

$$f_i = \frac{q'_{i stat}}{q_{i max}} = \frac{\delta_i \cdot Q_{max}}{q_{i max}} = \frac{\int q_i(t) dt \cdot Q_{max}}{\int Q(t) dt \cdot q_{i max}} \quad (2)$$

z której wynika, że do wyznaczenia wartości współczynnika korekcyjnego  $f$  konieczna i dostateczna zarazem jest znajomość przebiegu impulsu obciążającego  $Q(t)$  i odpowiedzi układu (przemieszczenia)  $q(t)$  w czasie: maksymalna zarejestrowana wartość impulsu  $Q_{max}$  i przemieszczenia  $q_{max}$  oraz oszacowana cała z przebiegu impulsu i przemieszczenia w czasie.

Wielkości te rejestrowane są w trakcie badania FWD z dużą dokładnością, w bardzo szerokim zakresie. Wyznaczone w ten sposób współczynniki wykorzystywane są do skorygowania przemieszczeń uzyskanych w badaniu FWD. Tworzące „dynamiczną” czaszę przemieszczeń, zarejestrowane w badaniu FWD, przemieszczenia  $q_{i max}$  mnożone są przez odpowiadające im współczynniki  $f_i$ . Przykładową transformację „dynamicznej” czaszy przemieszczeń przedstawiono na rys. 6.

## Identyfikacja parametrów i ocena nośności nawierzchni

Dopiero quasi-statyczne czasze przemieszczeń, transformowane z, bezpośrednio pomierzonych w badaniu FWD, czas dynamicznych mogą być podstawą poprawnej identyfikacji parametrów (modułów) warstw w tzw. obliczeniach odwrotnych (back calculation). Jest to powszechnie stosowany algorytm, polegający na porównaniu pomierzonych przemieszczeń z przemieszczeniami obliczonymi w założonym modelu nawierzchni. Operacja powtarzana jest iteracyjnie do momentu, gdy dobierając moduły warstw w modelu, różnica między przemieszczeniami obliczonymi, a pomierzonymi będzie najmniejsza (minimalizacja funkcji celu). Schemat identyfikacji przedstawiono na rys. 7.

Poniżej, na rys. 8, przedstawiono przykładowy model nawierzchni lotniskowej, wraz ze zidentyfikowanymi (w obliczeniach odwrotnych) parametrami tego modelu, na podstawie przedstawionych na rys.6 czas przemieszczeń.

Widać wyraźnie, że moduły sprężystości warstw, identyfikowane na podstawie przemieszczeń (ugięć) bezpośrednio pomierzonych (DYN) i transformowanych (STAT), różnią się od siebie w sposób znaczący, co z kolei przekłada się na szacowaną trwa-

łość konstrukcji nawierzchni. Poniżej przedstawiono, jak zmienia się liczba klasyfikacyjna PCN analizowanej nawierzchni, wyznaczona dla założonej ograniczonej liczby obciążeń – 600 000, na podstawie modułów zidentyfikowanych w pomiarach bezpośrednich (DYN) i skorygowanych-transformowanych (STAT). Jako model obliczeniowy przyjęto układ warstwowy, jak na rys. 8, obciążony powierzchnią kołową o intensywności obciążenia 1,25 MPa i zmiennym promieniu obciążenia  $a$ . Trwałość nawierzchni, rozumianą jako trwałość zmęczeniową warstw asfaltowych, wyznaczono na podstawie kryterium Instytutu Asfaltowego, uzyskując maksymalne dopuszczalne odkształcenia rozciągające na spodzie warstw asfaltowych. Przy ustalonej intensywności obciążenia 1,25 MPa odkształceniom tym przyporządkować można odpowiednio promienie obciążeń  $a = 0,275\text{m}$  i  $0,195\text{m}$ , które z kolei odpowiadają liczbom klasyfikacyjnym PCN o wartości 61 (dla czaszy dynamicznej – bezpośrednio pomierzonej) i 31 (dla czaszy transformowanej do modelu statycznego).

#### Wnioski

Powyższy przykład ilustruje jak duży wpływ na ocenę nośności nawierzchni lotniskowych ma właściwa interpretacja danych pomiarowych w badaniu FWD. Autorzy wykazali, że przemieszczenia (ugięcia) uzyskane w bezpośrednich badaniach dynamicznych nie mogą być wykorzystywane wprost do identyfikacji parametrów i oceny trwałości konstrukcji nawierzchni. Kluczowe znaczenie ma transformacja, pozwalająca na wykorzystanie wyników pomiarów dynamicznych w obowiązujących (statycznych) modelach nawierzchni. Zauważyć należy, że omawiane zagadnienia są bardzo złożone (w niniejszym artykule przedstawiono niewielki fragment wykonanych przez autorów analiz), stosunkowo nowe i wciąż aktualne na arenie międzynarodowej. Poza Instytutem Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej badania nad oceną wpływu dynamicznego charakteru obciążenia w badaniu FWD na identyfikowane parametry modelu nawierzchni prowadzone są w ostatnich latach także w Korei Południowej [4] i Francji [3]. ◀

#### Materiały źródłowe

- [1] Barzilai A., VanZandt T., Pike T., Manion S., Kenny T.: "Improved Low Frequency Performance of a Geophone", Stanford University 1998.
- [2] Krawczyk B.: „Identyfikacja parametrów modeli nawierzchni drogowych na podstawie impulsowych testów dynamicznych”. Praca Doktorska Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, 2012.
- [3] Picoux B., Ayadi A. El., Petit C.: "Dynamic response of a flexible pavement submitted by impulsive loading", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 29, 2009, 845-854.
- [4] Seo J., Kim S., Choi J., Park D.: "Evaluation of layer properties of flexible pavement using a pseudo-static analysis procedure of Falling Weight Deflectometer", Construction and Building Materials 23, 2009, 3206-3213.
- [5] Szydło A.: "Statyczna identyfikacja parametrów modeli nawierzchni lotniskowych", Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1995.

# Call for Papers

## Zaproszenie do publikacji: Plany Transportowe

Redakcja „Przeglądu Komunikacyjnego” planuje wydać w połowie roku 2013 numer tematyczny dotyczący zagadnień związanych z opracowywaniem „Planów zrównoważonego rozwoju publicznego transportu zbiorowego” zgodnie z zakresem definiowanym w „Ustawie o publicznym transporcie zbiorowym”.

Prosimy o nadsyłanie materiałów dotyczących prowadzonych prac oraz opisów wdrożonych lub planowanych rozwiązań.

**UWAGA: nowy termin nadsyłania artykułów: 30.09.2013 r.**  
**O zakwalifikowaniu do druku decyduje także kolejność zgłoszeń.**

Artykuły przygotowane zgodnie z wytycznymi Przeglądu Komunikacyjnego należy nadsyłać na adres:  
**artykuly@przeglad.komunikacyjny.pwr.wroc.pl**

Informacje dotyczące sugerowanych obszarów tematycznych publikacji dostępne są na stronie <http://przeglad.komunikacyjny.pwr.wroc.pl/> w zakładce „Call for Papers”.