



Koncepcja wykorzystania ugięciomierza dynamicznego HWD (FWD) do analizy nośności płyt i podłoża w nawierzchniach lotniskowych z betonu cementowego

JAN MARSZAŁEK, WOJCIECH OKOŃ¹

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2, jmarszalek@wat.edu.pl

¹DRO-KONSULT Sp. z o.o.,

03-310 Warszawa, ul. Odrowąża 15, wokon@bpil.eu

Streszczenie. W artykule przedstawiono koncepcję analizy naprężeń w płycie lotniskowej nawierzchni betonowej badanej ugięciomierzem HWD (FWD). Przedstawiona koncepcja daje możliwość obliczania naprężeń w płycie bez znajomości parametrów podłoża i podbudowy. Wykorzystując wzór Westergaarda na obliczenie ugięć uzyskanych z pomiarów urządzeń HWD, wyznaczono rzeczywisty zastępczy współczynnik Winklera (k_z). Dla wyznaczonego k_z opracowano monogramy do obliczenia naprężeń.

Słowa kluczowe: betonowe nawierzchnie lotniskowe, HWD, FWD, współczynnik Winklera

1. Wprowadzenie

W niniejszym artykule skupiono się na analizie naprężeń lotniskowej nawierzchni z betonu cementowego w oparciu o wyniki ugięć z badań połowych HWD (FWD). Do tego celu wykorzystano metodę Westergaarda, która jest metodą naprężeń dopuszczalnych, wykorzystującą liniową teorię sprężystości płyt leżących na podłożu gruntowym o modelu Winklera. Odpowiednie przekształcenia pozwalają na wykorzystanie metod obliczeniowych nośności płyty nawierzchni lotniskowej do analiz w ujęciu diagnostycznym. Podstawą analiz jest wykorzystanie wyników pomiaru ugięć nawierzchni metodą HWD (FWD). Pozwala to w pierwszej kolejności na określenie reakcji podłoża (podbudowy i podłoża gruntowego), a następnie wykonanie analiz naprężeń nawierzchni od obciążenia zewnętrznego.

1.1. Ogólny opis koncepcji

Ugięciomierz dynamiczny HWD (*Heavy Weight Deflectometer*) bądź FWD (*Falling Weight Deflectometer*) wykorzystuje się do analizy nośności nawierzchni lotniskowych. Zastosowanie powyższej aparatury badawczej pozwala na określenie liczby PCN nawierzchni.

Istota badania polega na pomiarze i rejestracji ugięć nawierzchni powstałych w wyniku działania impulsowego obciążenia dynamicznego o zadanej wielkości. Do analizy wyników pomiarów służy program komputerowy, który na podstawie danych o czasie ugięcia oraz znajomości materiału i grubości warstw konstrukcji precyzyjnie wylicza moduły poszczególnych warstw. Wykorzystując otrzymane wartości modułów można obliczyć stan naprężeń i odkształceń w konstrukcji i na tej podstawie dopuszczalną liczbę obciążeń nawierzchni, a w konsekwencji szukaną wartość PCN.

Jednocześnie do analiz stanu naprężeń nawierzchni z betonu cementowego można wykorzystać znane metody obliczeniowe, wykorzystywane w praktyce projektowania nawierzchni sztywnych. Jedną z nich jest metoda obliczeniowa Westergaarda czy metoda OSZD oparta na liniowej teorii sprężystości płyt wykorzystująca model obliczeniowy Winklera. W tym przypadku konieczna jest znajomość zastępczego współczynnika Winklera (k_z) podbudowy i podłoża znajdujących się bezpośrednio pod płytą.

Podstawowym problemem przy obu metodach jest przyjęcie modelu obliczeniowego konstrukcji, opisującego właściwości mechaniczne poszczególnych warstw. Określenie charakterystyki modelu konstrukcji jest tym trudniejsze, im większa jest złożoność poszczególnych warstw, wykonanych przy tym z różnych materiałów. Do określenia grubości i cech materiałowych konieczne jest wykonanie odkrywek i pobranie próbek do badań laboratoryjnych. Dodatkowo określenie samego współczynnika k_z wszystkich warstw podbudowy łącznie jest utrudnione z uwagi na brak jednoznacznych wzorów na obliczenie tego parametru. Wzory te zaprezentowano w punkcie 1.2.

W związku z tym zaproponowano zastosowanie wzoru Westergaarda na ugięcie płyty do wyznaczenia zastępczego współczynnika Winklera. Wyprowadzony algorytm na ugięcie pozwala na wykorzystanie zmierzonego ugięcia z aparatu HWD (FWD) do obliczenia współczynnika k_z pod nawierzchnią. Dużą zaletą tej koncepcji jest fakt, że nie trzeba znać w szczegółach rozkładu warstw podbudowy pod badaną nawierzchnią. Po wyznaczeniu k_z dla badanej nawierzchni można wyznaczyć stan naprężeń w wybranych rejonach płyty, wykorzystując znane wzory Westergaarda.

Zaproponowana metoda poszerza zastosowanie ugięciomierza dynamicznego do analizy naprężeń w płycie betonowej nawierzchni lotniskowej. Ideę tej koncepcji podano w pracy [1].

W artykule tym zaprezentowano ustalone algorytmy oraz nomogramy, które pozwalają z uzyskanych ugięć w czasie pomiarów wyznaczyć współczynnik Winklera k_z oraz naprężenia dla płyty.

1.2. Metody analityczne wyznaczania k_z

Według hipotezy Winklera współczynnikiem podatności podłoża jest współczynnik proporcjonalności między obciążeniem jednostkowym i osiadaniami sprężystego podłoża:

$$p = k \cdot s, \quad (1.1)$$

gdzie według Wiłuna [2] osiadanie zapisano zależnością postaci:

$$s = \frac{q\omega B(1 - \nu_o^2)}{E_o}, \quad (1.2)$$

gdzie: q — obciążenie w poziomie powierzchni półprzestrzeni;
 ω — współczynnik wpływu zależny od kształtu obciążenia i jego sztywności oraz miejsca położenia danego punktu w stosunku do obciążonego obszaru;
 B — szerokość obciążonego obszaru;
 ν_o — współczynnik rozszerzalności bocznej;
 E_o — moduł odkształcenia gruntu.

Wstawiając zależność (1.1) do (1.2), otrzymujemy wzór na współczynnik podatności gruntu wyrażony jako nacisk jednostkowy, powodujący osiadanie obciążonego punktu podłoża o 1 cm [MPa/cm]:

$$k = \frac{E_o}{\omega B(1 - \nu_o^2)}. \quad (1.3)$$

W powyższym wzorze na wartość k istotny wpływ ma współczynnik ω , którego wartość zdefiniowano w zależności od kształtu powierzchni obciążającej i jej sztywności. Umożliwia on obliczenie osiadania powierzchni półprzestrzeni dla nieskończonej głębokiej, jednolitej warstwy.

W praktyce wartość k wyznacza się na podstawie próbnego obciążenia przy użyciu płyty stalowej o średnicy 0,762 m. Płytę obciąża się do momentu uzyskania przemieszczenia równego $1,27 \times 10^{-6}$ m i wylicza się k na podstawie przekształconej zależności (1.1):

$$k = \frac{p}{s}. \quad (1.4)$$

Jednocześnie według [3] można zastosować zależność pomiędzy wtórnym modułem odkształcenia EV_2 [MPa] a współczynnikiem reakcji podłoża k [MPa/m] zgodnie ze wzorem:

$$k = \frac{EV_2}{0,762(1 - \nu_o^2)}, \quad (1.5)$$

gdzie ν_o jak we wzorze (1.2). Tutaj wtórny moduł odkształcenia gruntu wyznacza się na podstawie badania aparaturą VSS.

Zależności (1.3)-(1.5) dotyczą charakterystyki jedynie pojedynczej, jednolitej warstwy gruntu. Obliczenia znacznie komplikują się w przypadku, gdy nawierzchnia nie spoczywa bezpośrednio na gruncie, tylko na warstwach podbudowy, a nierzadko na warstwach starej konstrukcji nawierzchni. Wówczas zachodzi potrzeba wyznaczenia modułu uogólnionego, tzw. równoważnego modułu podłoża gruntowego i warstw podbudowy E_r , charakteryzującego cały układ warstw. W tym celu do obliczeń modułów równoważnych wykorzystuje się nomogramy Kriwisskiego, a wyznaczone wartości podstawia się do zależności (1.3) lub (1.5) zamiast modułu odkształcenia samego gruntu.

Procedura wyznaczenia E_r komplikuje się w przypadku układów wielowarstwowych, zwłaszcza tam, gdzie w warstwach podbudowy zalega stara konstrukcja z układem warstw na przemian betonowych i asfaltowych.

2. Metoda badawcza wyznaczenia zastępczego współczynnika Winklera

W punkcie tym zostanie zaprezentowana metodyka postępowania do wyznaczenia współczynnika k_z oraz naprężeń dla przykładowej płyty z betonu cementowego. Efektem końcowym będzie zaprezentowanie nomogramów służących do bezpośredniego odczytu zastępczego współczynnika Winklera dla podłoża pod płytą oraz stanu naprężeń w płycie na podstawie ugięć z aparatury HWD (FWD).

2.1. Obliczenie współczynnika Winklera na podstawie danych z HWD (FWD)

Do obliczeń współczynnika Winklera wykorzystano zależność na obliczenie ugięcia w dowolnym punkcie płyty obciążonej golenią w środku [4], który ma postać:

$$w(x, y) = \frac{P_r}{4} \sqrt{\frac{3(1-\nu^2)}{Eh^3k}} - \frac{0,275(1-\nu^2)P_r}{Eh^3} \cdot \left[\frac{a_1^2 + b_1^2}{4} + x^2 + y^2 \right] \cdot \log \frac{Eh^3}{k \left(\frac{a_1 + b_1}{2} \right)^4} +$$

$$- \frac{0,239(1-\nu)P_r}{Eh^3} \cdot \left[\frac{a_1^2 + 4a_1b_1 + b_1^2}{8} + \frac{a_1 - b_1}{a_1 + b_1} (y^2 - x^2) \right], \quad (2.1)$$

gdzie: $w(x, y)$ — ugięcie w dowolnym punkcie płyty;
 a_1, b_1 — półosi elipsy styku gołeni z nawierzchnią;
 P_r — obciążenie równoważne na jedną goleń samolotu;
 E — moduł sprężystości materiału nawierzchni (betonu);
 h — grubość nawierzchni;
 ν — współczynnik Poissona materiału nawierzchni (betonu);
 k — współczynnik Winklera reakcji podłoża gruntu.

Wykorzystując znajomość danych otrzymanych z badań HWD (FWD), powyższą zależność sprowadza się do postaci:

$$w_{HWD} = \frac{P_{HWD}}{4} \sqrt{\frac{3(1-\nu^2)}{E_{HWD}h^3k}} - \frac{0,275(1-\nu^2)P_{HWD}}{E_{HWD}h^3} \cdot \frac{r_{HWD}^2}{2} \cdot \log \frac{E_{HWD}h^3}{kr_{HWD}^4} +$$

$$- \frac{0,239(1-\nu)P_{HWD}}{E_{HWD}h^3} \cdot \frac{3r_{HWD}^2}{4}, \quad (2.2)$$

gdzie: w_{HWD} — pomierzone ugięcie w środku płyty podczas badania ugięciomierzem HWD (FWD);
 r_{HWD} — promień płyty naciskowej HWD (FWD);
 P_{HWD} — obciążenie płyty z HWD (FWD);
 E_{HWD} — moduł sprężystości materiału nawierzchni (betonu), obliczony na podstawie badań wytrzymałościowych lub z pomiarów HWD (FWD) programem ELMOD 5.

W zależności (2.2) zmienne x i y przyjmują zerowe wartości, bowiem pomierzone ugięcia pokrywają się z obciążeniem płyty naciskowej HWD (FWD) dla środka płyty nawierzchni i jej osiami głównymi przyjętymi zgodnie ze wzorem (2.1).

Analogiczny tok postępowania stosuje się dla wzoru na ugięcia płyty obciążonej gołenią na krawędzi.

Na bazie zależności (2.2) i znajomości ugięć od zadanego obciążenia z HWD (FWD) oraz modułu E , można obliczyć niewiadomą k_z . Współczynnik ten jest

współczynnikiem zastępczym, określającym reakcję warstw położonych bezpośrednio pod płytą nawierzchni. Tym samym otrzymujemy szukaną wartość dla całego układu warstw konstrukcji, bez konieczności określania cech charakterystycznych poszczególnych warstw i żmudnego wyliczania modułu równoważnego.

2.2. Nomogramy do analizy naprężeń w płycie

Poniżej, dla przykładowej nawierzchni z płyty betonowej, przedstawiono nomogramy do określenia zastępczego współczynnika Winklera warstw konstrukcji oraz stanu naprężeń płyty obciążonej w jej środku.

Nomogramy przygotowuje się pod dane urządzenie pomiarowe (ze względu na stopę naciskową urządzenia oraz generowane obciążenie) oraz pod konkretną, badaną płytę betonową (ze względu na określoną grubość oraz wyznaczony moduł sprężystości).

W przykładzie przyjęto płytę betonową grubości $h = 26$ cm, o module sprężystości $E_b = 33400$ MPa, spoczywającą na wielowarstwowym układzie „starej konstrukcji”. Przyjęto, że badania nawierzchni prowadzone będą aparatem HWD w zakresie obciążenia 100-250 kN i promieniu płyty naciskowej $r = 22,5$ cm.

Do wykreślenia nomogramów zastosowano zależności dla płyty obciążonej w jej środku, postaci:

$$\sigma_s = 0,275(1 + \nu) \frac{P_r}{h^2} \left[\log \frac{Eh^3}{kb^4} - 0,436 \right] \quad (2.3)$$

oraz

$$w_s = \frac{P_r}{4} \sqrt{\frac{3(1 - \nu^2)}{Eh^3 k_z}} - \frac{0,275(1 - \nu^2)P_r}{Eh^3} \cdot \frac{r^2}{2} \cdot \log \frac{Eh^3}{k_z r^4} - \frac{0,239(1 - \nu)P_r}{Eh^3} \cdot \frac{3r^2}{4}, \quad (2.4)$$

gdzie: σ_s — naprężenie rozciągające przy zginaniu dla dolnej powierzchni środkowej części płyty;

w_s — ugięcie w środku płyty;

P_r — obciążenie z aparatury HWD;

h — grubość płyty betonowej;

k_z — zastępczy współczynnik sprężystości podłoża (układu warstw);

E — moduł sprężystości płyty betonowej;

ν — współczynnik Poissona;

b — promień równoważny, uwzględniający rozkład obciążeń na grubości płyty:

$$\text{dla } r < 1,724 h \quad b = \sqrt{1,6a^2 + h^2} - 0,675 h,$$

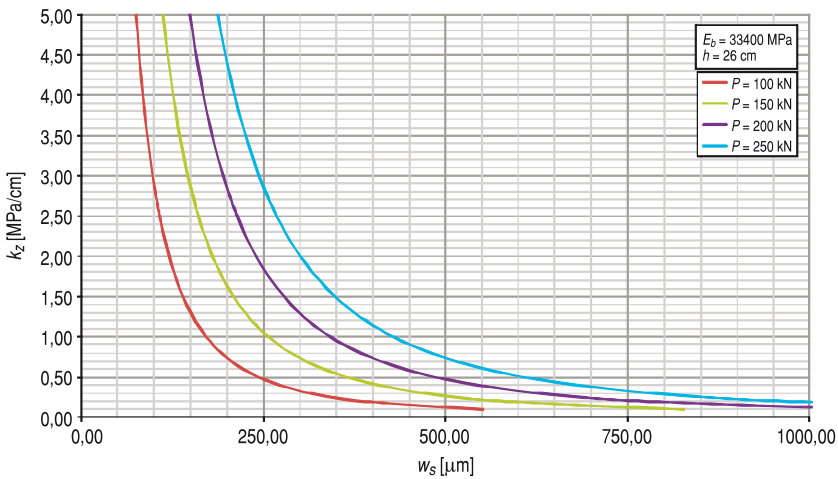
$$\text{dla } r > 1,724 h \quad b = r;$$

r — promień powierzchni obciążenia (płyty naciskowej HWD);

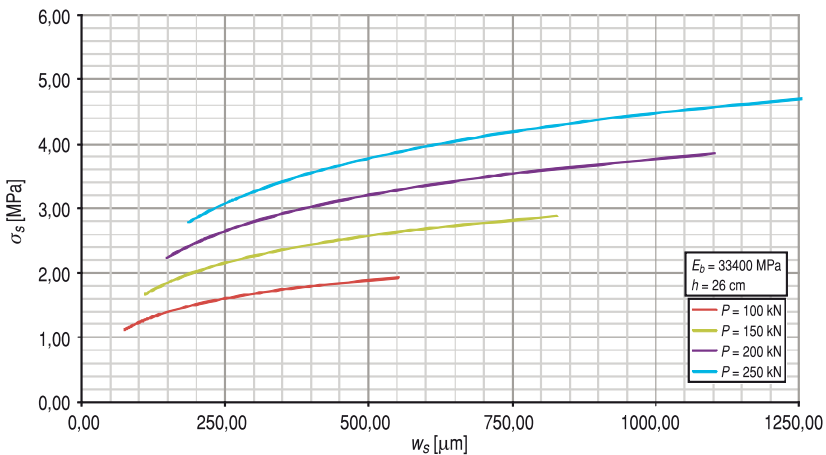
l — promień względnej sztywności płyty, gdzie:

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k}} \quad (2.5)$$

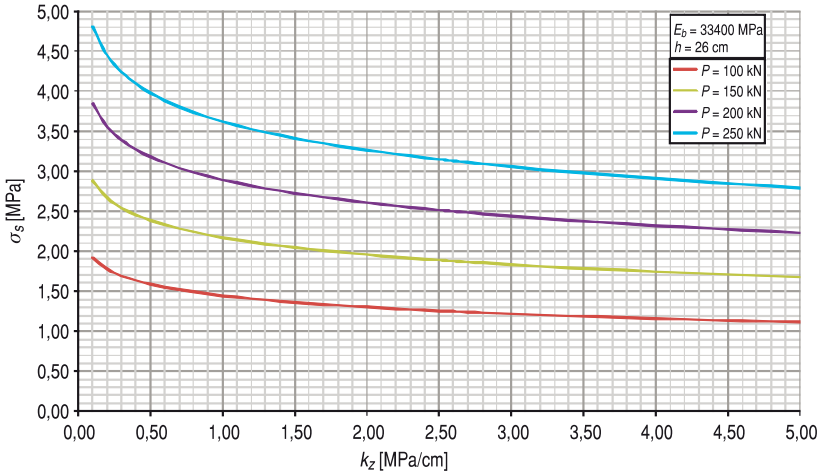
Poniższe nomogramy służą do bezpośredniego odczytu współczynnika Winklera lub naprężeń w płycie (z uwzględnieniem k_z) określonych na podstawie uzyskanych ugięć z HWD pod geofonem centralnym. Całość ilustrują rysunki 2.1-2.3.



Rys. 2.1. Wykres zastępczego współczynnika sprężystości podłoża w funkcji ugięć płyty dla obciążenia w jej środku

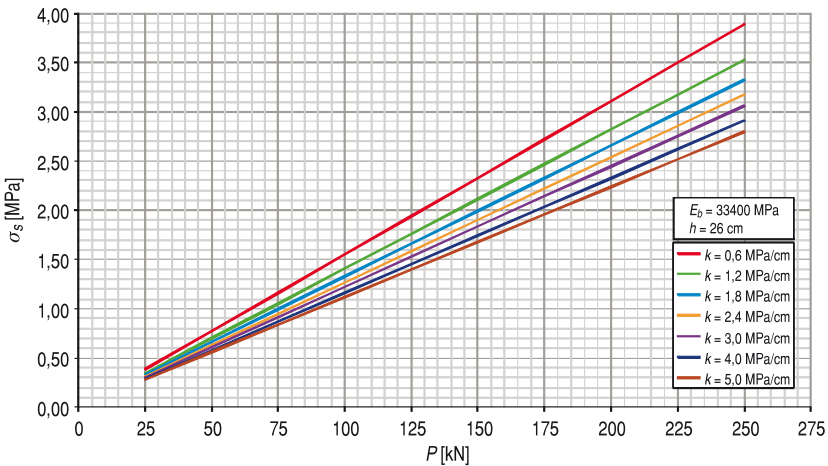


Rys. 2.2. Wykres naprężeń w środku płyty w funkcji ugięcia

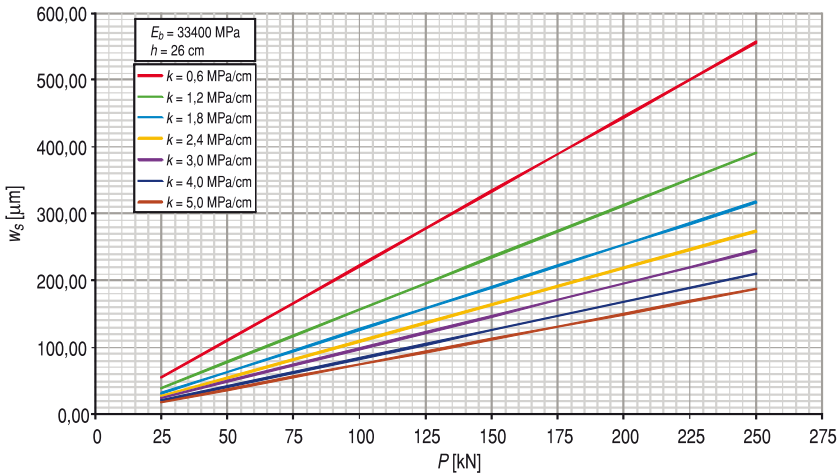


Rys. 2.3. Wykres naprężeń w środku płyty w funkcji zastępczego współczynnika sprężystości podłoża

Ponadto na wykresach 2.4-2.5 przedstawiono zmienność naprężeń i ugięć płyty w zależności od obciążenia i przyjętego zastępczego współczynnika Winklera.



Rys. 2.4. Wykres naprężeń dla środka płyty dla zmiennego obciążenia i przyjętego zastępczego współczynnika sprężystości podłoża



Rys. 2.5. Wykres ugięć dla środka płyty dla zmiennego obciążenia i przyjętego zastępczego współczynnika sprężystości podłoża

3. Praktyczna weryfikacja przedstawionej metody

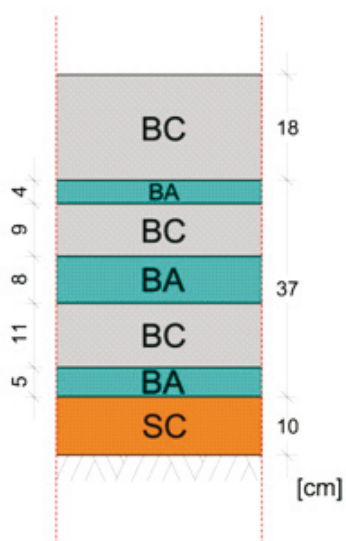
Poniżej przedstawiono praktyczne zastosowanie metody do wyznaczenia stanu naprężeń w lotniskowej nawierzchni betonowej. Do obliczeń wykorzystano dane pomiarowe przeprowadzone w roku 2007 na drodze startowej w MPL Airport Katowice. Uzyskane dane porównano z wynikami teoretycznymi obliczonymi metodą elementów skończonych w programie RSA.

3.1. Dane wejściowe do obliczeń

Pomiar ugięć wykonano aparatem FWD w czterech liniach pomiarowych od L1 do L4 po obu stronach osi drogi startowej (DS) wzdłuż pierwszego oraz trzeciego pasma płyt (licząc od osi DS w lewo oraz prawo). Badanie wykonywano co ok. 100 m, przy czym każde stanowisko obejmowało pomiar na krawędzi oraz w środku płyty. Zapisane obciążenie generowane w trakcie badania wynosiło około 112 kN.

Ze względu na złożony charakter konstrukcji DS oraz duży zakres wyników badań, do niniejszych analiz przyjęto odcinek DS w kilometrze 1+260-1+760. Ograniczono się do wyników ugięć dla środka płyty z jednej linii pomiarowej (L1 — w pierwszym paśmie płyt), wykorzystując wynik pod geofonem centralnym (pod płytą naciskową). Promień płyty naciskowej $r = 0,15$ cm. Wartości ugięć podano w tabeli 3.1. Do dalszej analizy uzyskane ugięcia przeliczono na wartość od obciążenia równego 100 kN.

Na podstawie danych archiwalnych i odwiertów ustalono konstrukcję nawierzchni zgodnie z rysunkiem 3.1.



Rys. 3.1. Konstrukcja nawierzchni DS dla analizowanego odcinka, gdzie: BC — beton cementowy, BA — beton asfaltowy, SC — grunt stabilizowany cementem

Grubość płyty betonowej nawierzchni ustalono na $h = 18$ cm, o module sprężystości $E_b = 29250$ MPa i współczynniku Poissona $\nu = 0,17$.

Moduł sprężystości dla nawierzchni obliczono na podstawie zależności (3.1) wg [5], wykorzystując do tego wyniki badań laboratoryjnych wytrzymałości na ściskanie próbki pobranej z DS:

$$E_b = 3,32 \cdot (f_c)^{0,5} + 6,9, \quad (3.1)$$

gdzie: E_b — moduł sprężystości betonu [GPa];

f_c — wytrzymałość na ściskanie mierzona na próbce walcowej [MPa].

TABELA 3.1

Wyniki ugięć płyty betonowej uzyskanych w badaniu FWD z przeliczeniem na wartość obciążenia 100 kN

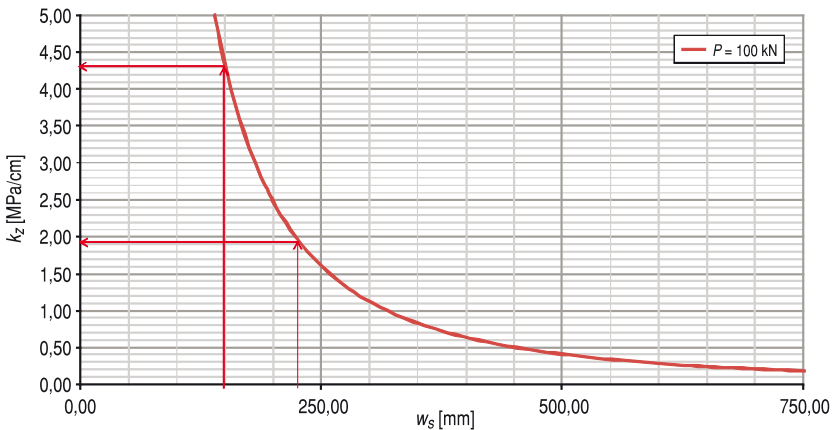
Lp.	Linia pomiarowa	Pikietaż [km]	Siła [kN]	Ugięcie w środku płyty z FWD [μm]	Ugięcia przeliczone na obciążenie 100 kN [μm]
1	2	3	4	5	6
1	L1	1,302	112,46	172,40	153,30
2	L1	1,402	112,25	168,70	150,29
3	L1	1,508	113,45	251,10	221,33

cd. tabeli 3.1

4	L1	1,603	112,25	255,90	227,98
5	L1	1,704	112,25	202,10	180,05

3.2. Wyznaczenie zastępczego współczynnika Winklera

Na podstawie danych z punktu 3.1 oraz wykorzystując zależność (2.2), wykonano wykres do odczytu zastępczego współczynnika konstrukcji pod nawierzchnią płyty (rys. 3.2). Dla podanych ugięć w kolumnie 6 z tabeli 3.1, na wykresie odczytujemy przedział zastępczego współczynnika Winklera dla warstw leżących pod płytą w zakresie $k_z = \langle 1,92; 4,31 \rangle$ MPa/cm. Średnia wartość ugięcia wyniosła $w = 186,59 \mu\text{m}$, co daje współczynnik $k_z = 3,09$ MPa/cm. Taka wartość została przyjęta do dalszych obliczeń.



Rys. 3.2. Wykres k_z w funkcji ugięć płyty dla obciążenia w jej środku

3.3. Wyznaczenie naprężeń w środku płyty

Wykorzystując dane z punktu 3.1 oraz wzór (2.3), stworzono wykres dla odczytu naprężeń w środku płyty na podstawie otrzymanych ugięć w badaniach połowych (rys. 3.3).

W tabeli 3.2 zestawiono przyjęte i obliczone wartości określające stan naprężeń w płycie betonowej dla analizowanego odcinka DS.

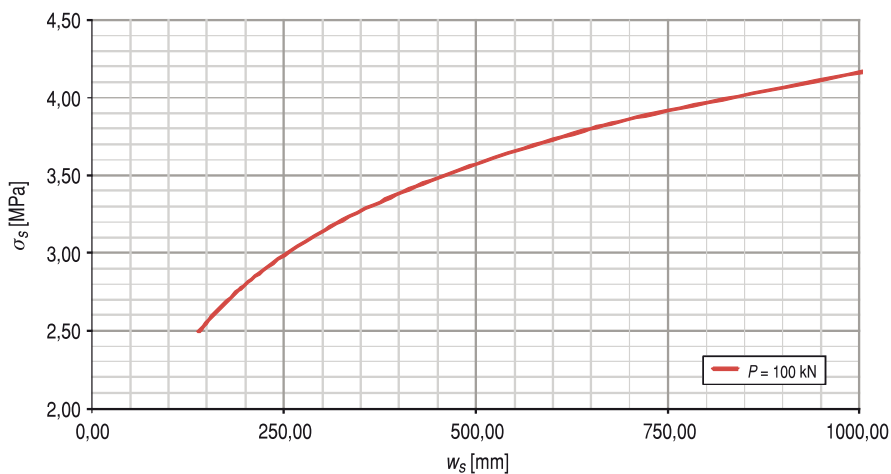
Rys. 3.3. Wykres σ_s w funkcji ugięć płyty dla obciążenia w jej środku

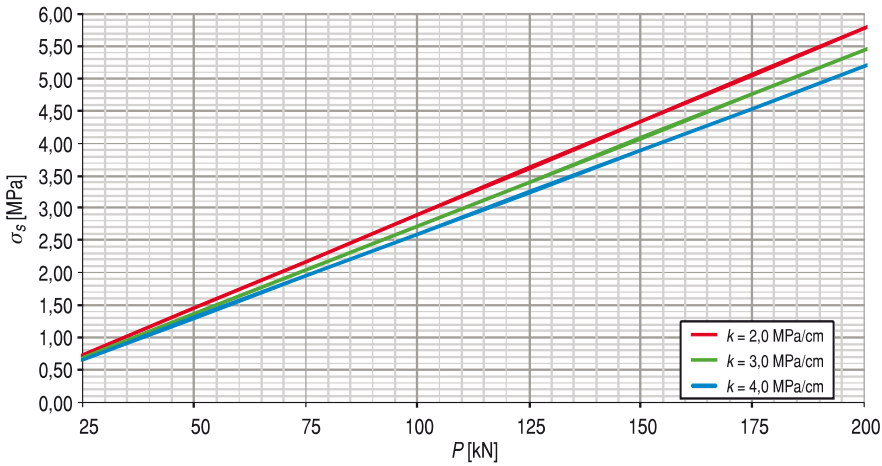
TABELA 3.2

Zestawienie wyników obliczeń dla analizowanego odcinka DS

Lp.	Linia pomiarowa	Pikietaż [km]	Siła [kN]	Ugięcie w środku płyty z FWD [μm]	Ugięcia przeliczone na obciążenie 100 kN [μm]	Współczynnik k_z [MPa/cm]	Naprężenia w środku płyty [MPa]
1	2	3	4	5	6	7	8
1	L1	1,302	112,46	172,40	153,30	4,1490	2,575
2	L1	1,402	112,25	168,70	150,29	4,3110	2,558
3	L1	1,508	113,45	251,10	221,33	2,0360	2,882
4	L1	1,603	112,25	255,90	227,98	1,9220	2,906
5	L1	1,704	112,25	202,10	180,05	3,0400	2,709

Z analizy wynika, że średnie naprężenie w środku płyty na analizowanym odcinku DS wynosi około $\sigma_s = 2,70$ MPa, przy średniej wartości współczynnika sprężystości warstw konstrukcyjnych $k_z = 3,09$ MPa/cm.

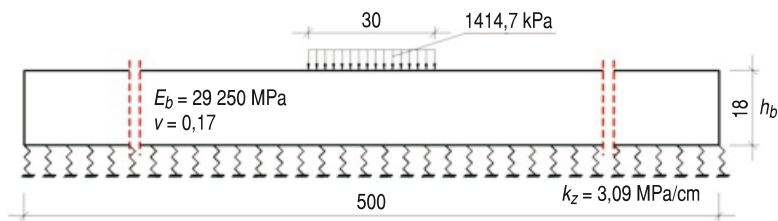
Jednocześnie przedstawiono monogram do odczytu naprężeń w płycie w zależności od obciążenia oraz przyjętego przedziału współczynnika k_z (rys. 3.4).

Rys. 3.4. Wykres σ_s w funkcji obciążenia i współczynnika k_z

3.4. Obliczenie ugięć i naprężeń metodą elementów skończonych w programie RSA

Dla kontroli uzyskanych wyników ugięć i naprężeń w płycie przeprowadzono dodatkowe obliczenia metodą elementów skończonych, wykorzystując program Robot Structural Analysis Professional 2011.

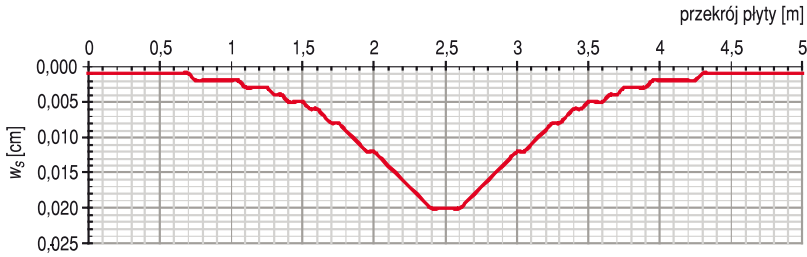
Charakterystykę płyty przyjęto zgodnie z punktem 3.1, wymiary płyty $L \times B$ ustalono w wielkości $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$. Na rysunku 3.5 przedstawiono schemat obliczeniowy.



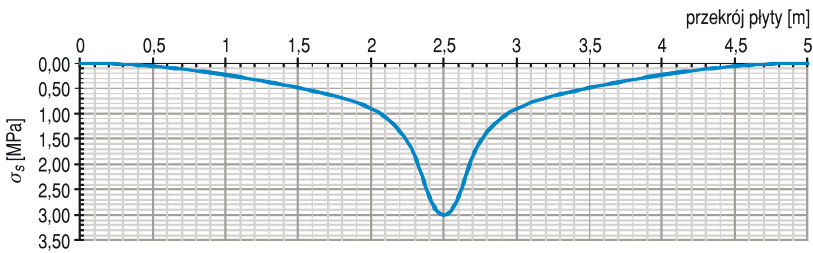
Rys. 3.5. Schemat obliczeniowy płyty do programu RSA

Do obliczeń przyjęto siatkowanie płyty z krokiem 0,05 m. Uzyskane wyniki ugięć i naprężeń przedstawiono w formie wykresów odpowiednio na rysunku 3.6 oraz 3.7.

Obliczone maksymalne wartości ugięć w środku płyty wyniosły $w_s = 0,02 \text{ cm}$ ($200 \mu\text{m}$), przy naprężeniach w płycie sięgających $\sigma_s = 3,0 \text{ MPa}$.



Rys. 3.6. Wykres uzyskanych ugięć dla obciążenia płyty w jej środku



Rys. 3.7. Wykres uzyskanych naprężeń dla obciążenia płyty w jej środku

3.5. Porównanie wyników metody badawczej z MES

Poniżej w tabeli 3.3 zestawiono wyniki ugięć i naprężeń obliczonych metodą Westergaarda oraz MES dla podanej charakterystyki płyty oraz dla wyznaczonej średniej wartości współczynnika sprężystości warstw konstrukcyjnych $k_z = 3,09$ MPa/cm.

TABELA 3.3

Zestawienie uzyskanych wyników dla zastosowanych metod obliczeniowych

Metoda obliczeniowa	Ugięcia [μm]	Naprężenia [MPa]
m. Westergaarda	178,50	2,70
MES	200,00	3,00

Różnice wyników uzyskane z obliczeń dwiema metodami oscylują w granicach 10%, przy czym zwiększone wartości uzyskano dla wyników MES. Należy uznać, że uzyskane wartości obliczone metodą Westergaarda, na podstawie wyników ugięć z badań polowych FWD, są zadowalające i porównywalne z wartościami teoretycznymi.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono odmienny sposób na analizę i ocenę nośności betonowych nawierzchni lotniskowych. Mimo przyjętej przez ICAO metody ACN/PCN oceny nośności nawierzchni, w metodzie skupiono się na analizach opartych na metodzie Westergaarda, wykorzystując dane z badań polowych przy zastosowaniu aparatury HWD (FWD). Opisana metoda w ujęciu diagnostycznym daje możliwość wstępnego i szybkiego określenia charakterystyki pracy i stanu nawierzchni. Istotą metody jest wyeliminowanie konieczności szerokiego rozpoznania cech materiałowych poszczególnych elementów konstrukcji i podłoża do pełnego określenia jej pracy. Skupiono się jedynie na rozpoznaniu charakterystyki płyty wierzchniej, a wykorzystanie wyników pomiaru ugięć nawierzchni i odpowiednie przekształcenia algorytmów obliczeniowych pozwalają na określenie parametrów i charakterystyk pracy modelu obliczeniowego konstrukcji (podłoża) pod płytą. Takie dane dają możliwość określenia nośności nawierzchni, a zasadność metody potwierdzono obliczeniami teoretycznymi.

Artykuł wpłynął do redakcji 22.06.2011 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w październiku 2011 r.

LITERATURA

- [1] W. OKOŃ, *Analiza nośności i naprężeń lotniskowej nawierzchni z betonu cementowego*, praca dyplomowa, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2011.
- [2] Z. WIĘUN, *Zarys geotechniki*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2008.
- [3] A. SZYDŁO, *Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego. Teoria, wymiarowanie, realizacja*, Polski Cement, Kraków, 2004.
- [4] J. MARSZAŁEK, *Budowa lotnisk, część II. Obliczanie nawierzchni*, podręcznik, WAT, Warszawa, 1984.
- [5] A.M. NEVILLE, *Właściwości betonu*, wydanie czwarte, Polski Cement, Kraków, 2000.

J. MARSZAŁEK, W. OKOŃ

A concept of using deflectometer HWD (FWD) to analyze a load plate and substrate surfaces with airport concrete pavement

Abstract. The article presents the concept of stress analysis in a plate of airport concrete pavement, measured by deflectometer (Heavy Weight Deflectometer, Falling Weight Deflectometer). That concept makes it possible to calculate the stresses in the plate without the knowledge of the substrate and substructure. Using the Westergaard's formula to calculate the deflections obtained from measurements of devices HWD, actual replacement Winkler's coefficient (k_z) was determined. For the designated k_z , monograms have been developed to calculate the stress in a plate of airport.

Keywords: Airport concrete pavement, HWD, FWD, Winkler's coefficient

