

DR INŻ. WŁADYSŁAW RYŻYŃSKI
Biurow Usług Inżynierskich B.A. i Wł. Ryżyński, Białystok

MGR INŻ. BENEDYKT KARCZEWSKI
Astra Poland, Straszyn k. Gdyni

Wyznaczanie parametrów obliczeniowych

podłoża warstwowego pod posadzką przemysłową

W niniejszym artykule przedstawiono zagadnienie wyznaczania parametrów obliczeniowych podłoża warstwowego oraz przykład obliczeniowy dla płyty posadzki betonowej z typowym rozstawem skurczowych szczelin dylatacyjnych i zbrojeniem rozproszonym. Posadzki bezspoinowe, posadzki na słabych podłożach wzmocnianych poprzez kolumny cementowe i inne techniki (np. geosyntetyki) oraz analiza wpływu skurczu i obciążeń termicznych wraz z przykładami obliczeniowymi będą przedmiotem następnych artykułów. Celem tej serii artykułów jest stworzenie bazy przykładów obliczeniowych, pomocnych w projektowaniu betonowych posadzek przemysłowych w różnych uwarunkowaniach związanych z podłożem, sposobem użytkowania i rozwiązaniami konstrukcyjnymi.

Posadzka jest integralnym, ważnym elementem budynku halowego, mającym wpływ na komfort i bezpieczeństwo użytkownika i stanowiącym w dużej części o odbiorze estetycznym obiektu. Uszkodzenia posadzki wynikające z wad projektowych lub wykonawczych, ale i często będące efektem niewłaściwej eksploatacji, prowadzą do strat transportowanych towarów, a czasem uniemożliwiają jej eksploatację. Posadzki posadzone na podłożu o słabych lub złożonych warunkach geotechnicznych, błędne rozpoznanie warunków gruntowo-wodnych lub błędy

projektowe wynikające z przyjęcia niewłaściwych parametrów obliczeniowych podłoża mogą prowadzić do sytuacji stanowiących zagrożenie bezpieczeństwa użytkownika obiektu. Mogą wystąpić znaczne i zróżnicowane przemieszczenia (osiadania) posadzki, uniemożliwiające eksploatację wózków widłowych (np. wysokiego podnoszenia) lub użytkowanie regałów wysokiego składowania wskutek przekroczenia dopuszczalnych wychyleń regału w pionie. Ponadto zarysowania i pęknięcia w posadzce wpływają negatywnie na komfort jazdy wózków widłowych i palet, co często przekłada

się na straty transportowanego materiału w przypadku gdy jest to materiał lub towar wrażliwy na wstrząsy. Rysy i szczeliny są również miejscami przyspieszonej degradacji posadzki (uszkodzenia krawędzi, korozja zbrojenia itp.), a w przypadku przemieszczeń pionowych krawędzi szczeliny stanowią bezpośrednie zagrożenie dla ruchu pieszego. Problem uszkodzeń betonowych posadzek przemysłowych jest przedmiotem wielu artykułów i książek, np. [1, 2], i stanowi częste źródło i przedmiot sporów w trójkącie: projektant, wykonawca i użytkownik.

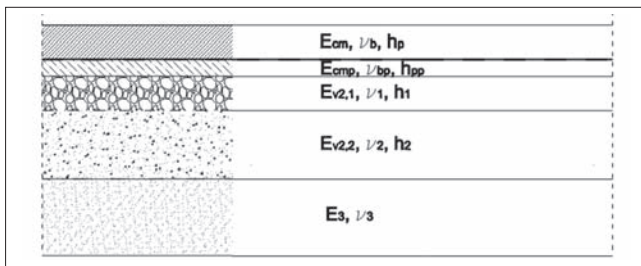
Naprawa uszkodzeń posadzki w przypadku błędów wykonawczych jest kosztowna przez to, że stosowane technologie naprawcze są stosunkowo drogie (żywice, iniekcje) i naprawa wymaga wyłączenia z użytkowania części posadzki. Wynika to z konieczności odsłonięcia znacznej części naprawianej posadzki (często jest to demontaż regałów), przygotowania podłoża, np. poprzez frezowanie, szczelinowanie z ukosowaniem rys i szczelin, a także późniejszego, kończącego naprawę powierzchniowego malowania lub układania powłoki żywicznej [1]. W przypadku błędów projektowych związanych z niewłaściwym rozpoznaniem podłoża lub błędami obliczeniowymi płyty posadzki z tego wynikającymi naprawa jest bardzo kosztowna (wzmacnianie podłoża przez iniekcje lub palowanie [3, 4]) i często przekracza wartość wykonanej płyty posadzki. W przypadku posadzki silnie obciążonej i niewłaściwie zaprojektowanej na słabym bądź zróżnicowanym podłożu gruntowym uzasadnionym postępowaniem jest nawet rozbiórka posadzki i jej ponowne, poprawne wykonanie na wzmocnionym podłożu.

Dlatego wykonywanie posadzek na słabych podłożach wymaga dużej staranności na etapie rozpoznania warunków gruntowych, jak i właściwego projektowania. Szczególnie dotyczy to posadzek na podłożach, które stanowią zróżnicowane warstwy podłoża rodzimego lub część warstw stanowią warstwy wzmocnionego podłoża.

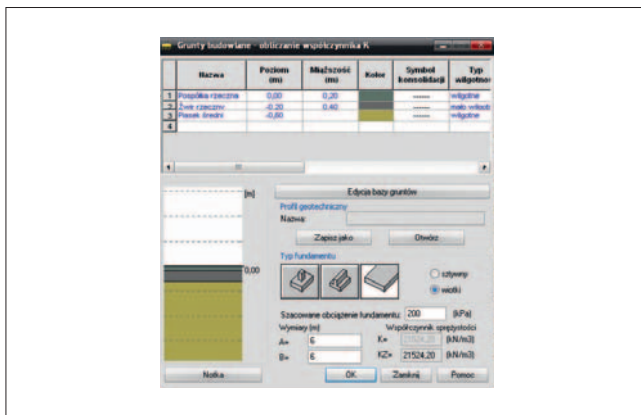
Metody wzmacniania podłoża w przypadku gruntów samonośnych zostały opisane w poprzednich artykułach [3, 4], ale bez wskazania metod i algorytmów wyznaczania parametrów obliczeniowych oraz projektowania płyty betonowej posadzki. Dostępna literatura fachowa przedmiotu [5-7] oraz liczne artykuły w prasie specjalistycznej nie zawsze w sposób jednoznaczny i przydatny dla projektanta konstrukcji opisują to zagadnienie. Wieloletnie doświadczenie w projektowaniu i weryfikacji projektów posadzek przemysłowych oraz przeprowadzone ekspertyzy i opinie wskazują, że często popełniane błędy to: niewłaściwie przyjęte parametry obliczeniowe podłoża gruntowego, nieuwzględnianie warstwowego charakteru posadzki i podłoża oraz pomijanie lub ujmowanie w sposób przybliżony istotnych naprężeń skurczowych i termicznych.

Podłoże warstwowe

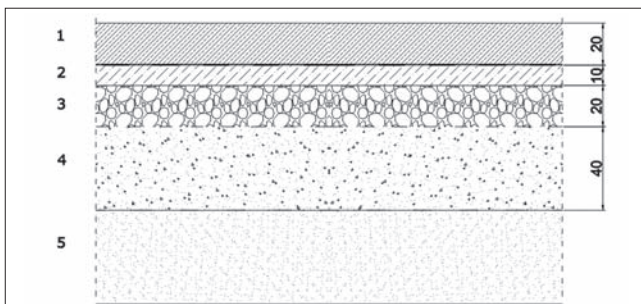
Najczęściej przyjmowanym modelem płyty posadzki jest płyta na sprężystym podłożu Winklera. Metoda Westergaarda projektowania nawierzchni zakłada, że podłoże gruntowe opisane jest teorią sprężystości, zaś warstwy sprężyste betonowej płyty posadzki i podkładu pod posadzkę (w postaci warstwy betonu podkładowego) ułożone są na półprzestrzeni sprężystej kolejnych warstw podłoża gruntowego. Model Winklera, przy swej prostocie opisu podłoża jednym parametrem sprężystości k w przypadku typowych posadzek betonowych o wielkości pól skurczowych nacięć dylatacyjnych rzędu 5-7 m i grubości płyty posadzki 15-25 cm, pozwala na uzyskiwanie wyników o zadowalającej dokładności (z praktycznego punktu widzenia) przy prostocie obliczeń. Modele dwuparametrowe podłoża gruntowego (np. Własowa, Pasternaka, Gorbunowa-Posadowa i inne) mają zastosowanie w szczególnych przy- ▶



Rys. 1. Układ warstw podłoża gruntowego i posadzki betonowej



Rys. 2. Kalkulator współczynnika sprężystości podłoża k w programie ROBOT Structural Analysis



Rys. 3. Układ warstw posadzki. Przykład obliczeniowy

► padkach obliczeniowych płyt posadzki o dużych wymiarach w planie i na bardzo słabych podłożach. Są to jednak sytuacje, których większość projektantów unika, a których rozwiązanie często wymaga wiedzy specjalistycznej i stosownego oprogramowania. Dlatego modele dwuparametrowe stosują jedynie instytucje naukowe i firmy specjalistyczne na etapie prac studialnych lub ekspertyz, rzadziej projektowania. Analizuje się układ warstwowy złożony z warstw sprężystych posadzki i podkładu betonowego oraz podłoża gruntowego do poziomu, na którym zanika wpływ naprężeń wywołanych obciążeniem płyty posadzki, zwykle są to 3-4 m poniżej poziomu posadzki. W strefie tej zalegają: płyta posadzki, warstwa betonowej podbudowy wyrównawczej, warstwy podbudowy z gruntu rodzimego lub wzmocnianego (jedna lub dwie, rzadko więcej) oraz grunt rodzimy w strefie zaniku naprężeń, mający zdolność ich przeniesienia. Poszczególne warstwy opisane są przez: moduł sprężystości E , wskaźnik zagęszczenia I_D lub współczynnik zagęszczenia I_s dla gruntów niespoistych

i wskaźnik I_L dla gruntów spoistych, współczynnik Poissona ν oraz grubość warstwy h , co pokazano na rys. 1.

W przypadku warstw betonowych jest to moduł sprężystości Younga E_{cm} zależny od klasy betonu. W przypadku warstw podłoża jest to moduł odkształcenia podłoża pierwotny E_{v1} lub wtórny E_{v2} oraz wskaźnik odkształcenia $I_o = E_{v2}/E_{v1}$. Parametry te wyznaczane są standardowo według procedury normowej dla odsłoniętej warstwy podłoża, a w przypadku badań geotechnicznych parametrem opisującym sprężystość warstwy jest moduł ściśliwości E_o , wyznaczany obok pozostałych parametrów dla poszczególnych warstw podłoża gruntowego. Przystępując do obliczeń betonowej płyty posadzki, projektant powinien dysponować kompletem wiarygodnych danych dotyczących podłoża (przekroje geotechniczne i parametry geotechniczne poszczególnych warstw) oraz uzgodnieniami dotyczącymi obciążeń i wymagań użytkowych płyty posadzki (dopuszczalne przemieszczenia i nierówności wynikające z możliwych osiadań posadzki).

Model obliczeniowy płyty posadzki na sprężystym podłożu stosowany w wymiarowaniu posadzek przemysłowych wymaga znajomości jednego parametru charakteryzującego podłoże jako całość. Jest to moduł reakcji podłoża k , nazywany często stałą Winklera. Jest to parametr niezbędny do wyznaczenia promienia sztywności l płyty betonowej [5, 6, 8] według wzoru:

$$l = 4 \sqrt{\frac{E_{cm} \cdot h_p^3}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot k}} \quad (1)$$

gdzie:

- E_{cm} – moduł sprężystości betonu płyty posadzki,
- h_p – grubość płyty posadzki,
- ν – współczynnik Poissona betonu płyty,
- k – moduł reakcji podłoża gruntowego.

Wyznaczenie modułu reakcji podłoża k dla podłoża jednowarstwowego nie jest trudne i może być dokonane na podstawie modułu odkształcenia podłoża: pierwotnego E_{v1} lub wtórnego E_{v2} ze wzorów (2) i (3) podanych w Raporcie Technicznym TR34 [7] dotyczącym betonowych posadzek przemysłowych.

$$k = \frac{E_{v1}}{550}; \quad k = \frac{E_{v2}}{550 \cdot I_o}; \quad [\text{MPa/mm}] \quad (2), (3)$$

Wyznaczony tak moduł reakcji podłoża k jest niezależny od parametrów płyty posadzki i charakteryzuje tylko jedną warstwę podłoża gruntowego. Alternatywnym, częściej stosowanym sposobem wyznaczenia modułu reakcji podłoża k z uwzględnieniem modułu sprężystości E_{cm} [MPa] i grubości płyty posadzki h_p [mm] jest wzór (4):

$$k = \frac{E_{v2}}{0,83 \cdot h_p \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{cm}}{E_{v2}}}} \quad (4)$$

Inżynierska, mechaniczna interpretacja modułu reakcji podłoża k jest stosunkowo prosta. Moduł ten wyraża siłę w MN, jaką należy przyłożyć na powierzchni 1 m² (kwadrat) w celu uzyskania przemieszczenia (osiadania) podłoża o 1 mm.

W przypadku modułu o wartości 0,150 MPa/mm jest to siła 150 kN (15 Mg) przyłożona na powierzchni 1 m². Taka interpretacja pozwala na ocenę jakościową nośności podłoża gruntowego na budowie np. na podstawie głębokości – śladu pozostawianego przez pojazd o dużym nacisku na oś. Przy nacisku na koło rzędu 50 kN opona powinna pozostawić w podłożu o wtórnym module odkształcenia E_{v2} rzędu 50 MPa ślad o głębokości mniejszej od 5 mm, zaś przy $E_{v2} > 80$ MPa – ślad o głębokości mniejszej od 2 mm. Ten sposób oceny podłoża jest oczywiście bardzo przybliżony i intuicyjny, ale pozwala na ocenę rzeczywistej nośności podłoża podczas prowadzenia robót związanych z wykonywaniem posadzki.

Podłoże warstwowe to najczęściej jedna lub dwie warstwy podbudowy o łącznej grubości od 20 cm do 60 cm, na których ułożona jest najczęściej warstwa podkładu betonowego (zwykle od 5 cm do 10 cm) z betonu niskiej klasy i płyta betonowa posadzki o grubości średnio od 15 cm do 25 cm. Wartość modułu reakcji podłoża k dla układu warstwowego

złożonego z 2 warstw można wyznaczyć ze wzoru (5) będącego rozbudowaną wersją wzoru (4):

$$k = \frac{E_{v2}}{0,83 \cdot \left(h_p \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{cm}}{E_{v2}}} + h_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_3}{E_{v2}}} \right)} \quad (5)$$

gdzie:

E_3 – moduł odkształcenia podłoża gruntowego.

W przypadku podłoża o 3 lub więcej warstwach podbudowy (rys. 1) można wartość modułu reakcji podłoża wyznaczyć ze wzoru (4), przyjmując zamiast modułu odkształcenia jednej warstwy podbudowy E_{v2} zastępczy moduł odkształcenia podłoża warstwowego wyznaczony alternatywnie ze wzoru opisującego szeregowy układ sprężysty (6) lub wzoru bazującego na zapisach Raportu Technicznego TR 34 [7].

$$E_z = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \cdot h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (6)$$

Korzystając z zapisów raportu TR34 [7], można wyznaczyć ze wzoru (7) dla podłoża warstwowego jak na rys. 2 zastępczy równoważny moduł odkształcenia podłoża E_{eq} z uwzględnieniem sztywności płyty posadzki I_{pb} . Wartość ta ma zastosowanie w prowadzeniu obliczeń komputerowych z wykorzystaniem oprogramowania modelującego przestrzennie podłoże gruntowe jako ośrodek o module sprężystości E_{eq} .

$$E_{eq} = E_{v2} \cdot \exp \left(0,34 \cdot h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{v2} - E_3}{E_{cm} \cdot I_{pb}}} \right) \quad (7)$$

Moduł reakcji podłoża warstwowego k może być wyznaczony przy zastosowaniu programu komputerowego ROBOT Structural Analysis, w którego pomocniczych opcjach obliczeniowych dla konstrukcji na podłożu sprężystym znajduje się kalkulator współczynnika sprężystości k_z podłoża warstwowego (rys. 3). W celu wyznaczenia modułu reakcji podłoża k należy przyjąć wymia- ▶

► ry fundamentu równe polu dylatacyjnemu (np. 6 m x 6 m) i wprowadzić parametry poszczególnych warstw podłoża (bez warstwy płyty posadzki).

Przykład obliczeniowy

Rozpatruje się sytuację projektową płyty posadzki posadowionej na warstwie chudego betonu i podłożu warstwowym jak na rys. 3.

Kolejne warstwy układu to (licząc od góry):

1. płyta posadzki o grubości $h_p = 20$ cm z betonu C25/30, moduł sprężystości $E_{cm} = 31 \times 10^3$ MPa, $\nu = 0,17$,
2. podkład wyrównawczy o grubości $h_o = 10$ cm z betonu C12,5/16, moduł sprężystości $E_{cm} = 27 \times 10^3$ MPa, $\nu = 0,17$,
3. warstwa górna podbudowy z tłuczniem ze żwiru o grubości $h_1 = 20$ cm o stopniu zagęszczenia $I_s = 1,00$, moduł odkształcenia podłoża: pierwotny $E_{v1} = 55$ MPa i wtórny $E_{v2} = 110$ MPa, wskaźnik odkształcenia $I_o = 2,0$, $\nu = 0,20$,
4. warstwa dolna podbudowy z pospółki o grubości $h_2 = 40$ cm o stopniu zagęszczenia $I_s = 0,98$, moduł odkształcenia podłoża: pierwotny $E_{v1} = 38$ MPa i wtórny $E_{v2} = 80$ MPa, wskaźnik odkształcenia $I_o = 2,10$, $\nu = 0,20$,
5. podłoże gruntowe naturalne: piaski drobne o module odkształcenia $E_s = 46$ MPa, stopień zagęszczenia $I_s = 0,50$, $\nu = 0,20$.

Zastępczy moduł sztywności betonowej płyty posadzki wraz z podkładem wyrównawczym z betonu podkładowego $E_{cm,z}$ wyznaczany jest ze wzoru (6) i wynosi:

$$E_{cm,z} = \frac{31 \cdot 10^3 \cdot 0,20 + 27 \cdot 10^3 \cdot 0,10}{0,20 + 0,10} = 29,67 \cdot 10^3 \text{ MPa}.$$

Grubość warstwy zastępczej płyty posadzki to $h_{pz} = 30$ cm. Zastępczy moduł sztywności podbudowy $E_{v2,z}$ wyznacza się w analogiczny sposób i wynosi:

$$E_{v2,z} = \frac{110 \cdot 0,20 + 80 \cdot 0,40}{0,20 + 0,40} = 90 \text{ MPa/mm}.$$

Grubość warstwy zastępczej płyty podbudowy wynosi $h_{1,z} = 60$ cm. Wartość modułu reakcji podłoża k dla układu warstwowego wyznacza się ze wzoru (5):

$$k = \frac{90,0}{0,83 \cdot \left(300 \cdot \sqrt[3]{\frac{29,67 \cdot 10^3}{90,0}} + 600 \cdot \sqrt[3]{\frac{46}{90,0}} \right)} = 0,042 \text{ MPa}.$$

Zastępczy równoważny moduł odkształcenia podbudowy wraz z podłożem gruntowym E_{eq} wyznaczony według wzoru (7) wynosi:

$$E_{eq} = 80 \cdot \exp \left(0,34 \cdot 600 \cdot \sqrt[3]{\frac{90,0 - 46,0}{29,67 \cdot 10^3 \cdot 1,0 \cdot 300^3 \cdot 1/12}} \right) = 54,94 \text{ MPa}.$$

Porównuje się powyższe parametry obliczeniowe z przypadkiem obliczenia modułu reakcji podłoża przy uwzględnieniu tylko warstwy górnej podbudowy, z pominięciem betonu podkładowego, innych warstw wzmocnienia podłoża i gruntu rodzimego. Moduł reakcji podłoża k_2 jak dla uproszczonego układu jednowarstwowego (płyta betonowa posadzki o grubości 20 cm na warstwie górnej podbudowy o module sztywności $E_{v2} = 110$ MPa) wyznaczony ze wzoru (4) wynosi:

$$k_2 = \frac{110,0}{0,83 \cdot 200 \cdot \sqrt[3]{\frac{31,0 \cdot 10^3}{110,0}}} = 0,10 \text{ MPa/mm}.$$

Pominięcie w analizie obliczeniowej warstwowość budowy podłoża prowadzi do wyznaczenia modułu reakcji podłoża na znacznie wyższym poziomie niż z uwzględnieniem warstwowości. Promień sztywności płyty posadzki wynosi wówczas odpowiednio: z uwzględnieniem warstwowości podłoża $l = 1128$ mm i bez uwzględnienia $l_2 = 662$ mm. Przekłada się to w przypadku posadzki posadowionej na gruntach słabonośnych z warstwami wzmocnienia podłoża na znaczący wzrost naprężeń (rzędu 0,3-0,4 MPa) w płycie betonowej.

Moduł reakcji podłoża wyznacza się również przy wykorzystaniu programu ROBOT. Moduł reakcji podłoża, nazywany w programie współczynnikiem sprężystości, wyznaczany jak dla płyty o wymiarach 6 m x 6 m i obciążonej w sposób równomierny na całej powierzchni, wynosi dla analizowanego przypadku podłoża warstwowego $k_z = 0,024$ MPa/mm. Współczynnik k_z został wyznaczony przy wykorzystaniu bazy gruntów zawartej w programie, ale bez uwzględnienia sprężystości be-

tonowej płyty posadzki i warstwy betonu podkładowego, i jest dobrą podstawą do prowadzenia obliczeń posadzki jako płyty na sprężystym podłożu warstwowym, ale tylko w programie ROBOT.

Podsumowanie

Wyznaczenie modułu reakcji podłoża warstwowego bez uwzględnienia warstwy sprężystej płyty posadzki betonowej i podłoża gruntowego skutkuje znacznym zawyżeniem wartości modułu reakcji podłoża i może prowadzić do przyjęcia zbyt małej grubości płyty posadzki lub za małej ilości zbrojenia. Może to skutkować zarysowaniami posadzki i jej osiadaniem. W obliczeniach modułu reakcji podłoża proponuje się rozdział na dwie podstawowe warstwy; betonową płytę posadzki wraz z podkładem betonowym i podbudowę złożoną z warstw wzmocnionego podłoża i podłoża rodzimego o parametrach zastępczych, wyznaczonych według powyżej podanych wzorów.

Kalkulator obliczeniowy modułu reakcji podłoża dla posadzek betonowych posadowionych na podłożu warstwowym (arkusz kalkulacyjny Excel) dostępny jest na stronie internetowej firmy *ASTRA Technologie betonu* www.astra-polska.com wraz z innymi użytecznymi kalkulatorami obliczeniowymi do betonów i posadzek betonowych. □

Piśmiennictwo

1. Chmielewska B., Adamczewski G.: *Wady i naprawy posadzek przemysłowych*, Materiały XXVI Konferencji Naukowo-Technicznej Awaryjne Budowlane, Świnoujście 2013, s. 777-786.
2. Czarnecki L.: *Uszkodzenia i naprawa posadzek przemysłowych*, „Materiały budowlane”, nr 9/2008, s. 20-24.
3. Ryżyński Wł.: *Posadzki na gruntach słabonośnych – cz. I*, „Nowoczesne Hale”, nr 2/2014, s. 40-42.
4. Ryżyński Wł., Karczewski B.: *Posadzki na gruntach słabonośnych – cz. II*, „Nowoczesne Hale”, nr 3/2014, s. 46-49.
5. Hajduk P.: *Projektowanie podłóg przemysłowych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.
6. Tejchman J., Małasiewicz A., *Posadzki przemysłowe*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2006.
7. Raport Techniczny TR34, *Concrete industrial ground floors – a guide to their design and construction*, The Concrete Society.
8. Szydło A.: *Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego*, Wydawnictwo Polski Cement, Kraków 2004.