

Wzmocnienie podłoża gruntowego pod posadowienie nawierzchni lotniskowej – przykłady praktycznych rozwiązań



dr hab. inż.
MIROSŁAW GRACZYK, PROF. IBDIM
 Instytut Badawczy Dróg i Mostów
ORCID: 0000-0002-0601-7554



dr inż.
CEZARY KRASZEWSKI
 Instytut Badawczy Dróg i Mostów
ORCID: 0000-0001-8998-4605



mgr inż.
CZESŁAW SZYMANKIEWICZ
 Instytut Badawczy Dróg i Mostów
ORCID: 0000-0003-2698-0599



mgr
ANNA ŁUKASIEWICZ
 Instytut Badawczy Dróg i Mostów
ORCID: 0000-0003-4498-661X

Niniejszy artykuł przedstawia przykłady rozwiązań konstrukcyjnych posadowienia nawierzchni lotniskowej w skomplikowanych warunkach gruntowo-wodnych. Omówiono przykłady wzmocnień podłoża gruntowego w postaci stabilizacji gruntów, podparcia konstrukcji na kolumnach betonowych, zastosowania georusztu oraz pianobetonu.

W trakcie projektowania konstrukcji nawierzchni lotniskowych i drogowych bardzo istotne jest właściwe oraz dokładne rozpoznanie podłoża gruntowego i posadowienie konstrukcji adekwatnie do istniejących warunków gruntowo-wodnych. Projektowanie tych pierwszych jest bardziej skomplikowane niż nawierzchni drogowych, gdzie przyjmuje się często rozwiązania standardowe z katalogów nawierzchni [1] i [2]. Nawierzchnie lotniskowe zawsze są projektowane jako rozwiązania indywidualne, ze względu na bardzo duże i zmienne obciążenia, znacznie większe niż obciążenia konstrukcji drogowych.

Obciążenie nawierzchni lotniskowych

Nawierzchnie lotniskowe mają swoją specyfikę, przez co proces ich projektowania jest znacznie bardziej skomplikowany w porównaniu z nawierzchniami drogowymi [3], [4], [5], [6], [7], [8]. Wynika to przede wszystkim z większych obciążeń, jakim poddawane są nawierzchnie lotniskowe. Zasadniczą kwestią przy projektowaniu konstrukcji nawierzchni jest dobór odpowiedniego układu warstw nośnych i podłoża gruntowego, zapewniającego bezpieczne przeniesienie obciążeń zewnętrznych przekazywanych przez koła gołeni samolotu. Uwzględnia się również obciążenia związane z oddziaływaniem czynników klimatycznych [9]. Na etapie projektowania ustala się wg metody ACN-PCN oddziaływanie samolotu na nawierzchnię (ACN) oraz poziom nośności konstrukcji (PCN), przy czym spełniona musi być zależność $PCN \geq ACN$.

Zgodnie z Aerodrome Design Manual [10] liczba klasyfikacyjna samolotu ACN (Aircraft Classification Number) wyraża względne oddziaływanie samolotu na nawierzchnię w warunkach standardowej nośności podłoża (tabela 1.) i podana jest w wartościach współczynnika reakcji podłoża – k [MN/m^3] a nawierzchni podatnych w wartościach CBR.

Liczba klasyfikacyjna nawierzchni PCN (Pavement Classification Number) wyraża nośność nawierzchni w przypadku „nieograniczonej” liczby kołowań samolotu. W procesie wyznaczania wartości liczby PCN (Pavement Classification Number) są uwzględniane wybrane charakterystyki samolotu i parametry układu nawierzchni – podłoże gruntowe. Z powyższego opisu wynika, że jakość podłoża stanowi bardzo ważny czynnik, brany pod uwagę przy wyznaczaniu liczb klasyfikacyjnych PCN i ACN. Po wykonaniu nawierzchni podlega ona sprawdzeniu faktycznej nośności z założeniami projektowymi określonymi liczbą PCN. Nośność nawierzchni lotniskowej jest określana na podstawie badań ugięć HWD oraz obliczenia liczby PCN.

Niekiedy mogą istnieć trudności, szczególnie przy ocenie istniejących konstrukcji, określenia współczynnika reakcji podłoża *in situ* i w takim przypadku można skorzystać z następujących zależności [11], [12], [13]:

$$k = 28.6926 \cdot CBR^{0.7788}, \quad pci$$

$$k = \frac{E}{19.4}, \quad pci$$

$1 \text{ pci} = 0,271 \text{ MN/m}^3$, E – moduł sprężystości podłoża, psi.

W praktyce przyjmuje się, że wtórny moduł odkształcenia (E_2) jest w przybliżeniu równy modułowi sprężystości podłużnej Younga E .

Stabilizacja gruntów spoiwami hydraulicznymi

Grunt jest materiałem stosunkowo niedrogim i może być tworzywem konstrukcyjnym. Ze względów ekonomicznych coraz częściej sięga się do wykorzystania gruntów miejscowych o słabej lub średniej jakości, stabilizując je w celu uzyskania właściwości konstrukcyjnych [14], [15], [18]. Stabilizacja gruntów jest metodą powierzchniowego wzmocnienia w celu uzyskania odpowiedniej nośności bez ich kosztownej wymiany. Warunkiem zastosowania tej technologii jest to, aby podłoże nie było zbyt ściśliwe, a warstwa stabilizacji powinna zapewnić odpowiednią nośność podłoża.

Pierwszym z przedstawianych rozwiązań wzmocnienia podłoża jest platforma z gruntów stabilizowanych spoiwami hydraulicznymi. Na obszarze budowy nowej nawierzchni lotniskowej występowały w górnej warstwie 1–2 m małonośne mineralne grunty spoiste w stanie plastycznym ($I_L=0,3-0,35$) o wskaźniku nośności $CBR=3-5$ (niska nośność, kategoria C i D, wg tabeli 1., grupa nośności G3/G4 wg klasyfikacji drogowej [1] i [2]). Głębiej zalegały grunty spoiste twardoplastyczne z prze-warstwieniami piaszczystymi. Na podłożu o powyższej charakterystyce zaprojektowano wykonanie grubej, 50 cm platformy w technologii stabilizacji gruntów spoiwem z doziarnieniem z przekruszu betonowego 0/63 mm. Zastosowane doziarnienie z przekruszu betonowego pełniło dwojaką rolę. Po pierwsze rozłożenie przekruszu umożliwiło wjazd maszyn budowlanych na plastyczne i odkształcalne podłożę, po drugie po wymieszaniu przekruszu z gruntem i spoiwem doziarnienie stworzyło szkielet nośny stabilizowanej warstwy. Do zwymiarowania platformy posłużono się teorią Boussinesqa i przyjęto schemat obliczeniowy (rys. 1.). Grubość i wytrzymałość platformy dobrano metodą kolejnych przybliżeń przy użyciu metody mechanicznej opartej na analizie stanu naprężeń i odkształceń konstrukcji.

Przyjęte założenia:

- platforma po ulepszeniu powinna osiągnąć moduł $E_2 > 140$ MPa;
- grubość podłoża ulepszonego spoiwem hydraulicznym – 50 cm;
- stabilizacja klasy C0,8/1,0 – grunt rodzimy z 50% doziarnieniem z przekruszu betonowego, $E=250$ MPa, $\nu=0,3$;
- podłożę: $CBR=3\%$, $E_2=30$ MPa, $\nu=0,35$.

Gdzie: ν – współczynnik Poissona, E_2 – wtórny moduł odkształcenia (MPa), E – moduł sprężystości (MPa).

Wartość wtórnego modułu odkształcenia na wierzchu platformy przyjęto $E_2 > 140$ MPa w celu spełnienia wymagań projektowych, które były następujące:

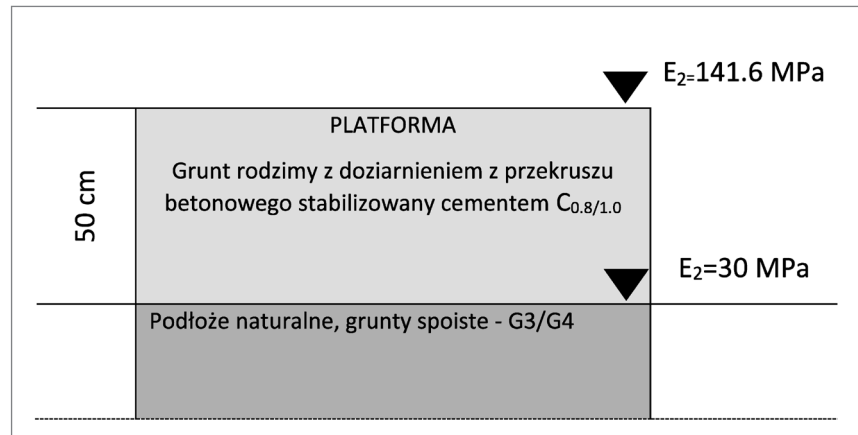
- $E_2 > 180$ MPa dla górnej warstwy podbudowy z kruszywa (warstwy podbudowy zasadniczej lub pomocniczej);
- $E_2 > 150$ MPa dla dolnej warstwy podbudowy z kruszywa (warstwy odsączającej lub mrozoochronnej).

Podparcie konstrukcji nawierzchni na przemieszczeniowych kolumnach betonowych

Podparcie na „szywno” konstrukcji nawierzchni jest stosowane w wyjątkowo trudnych warunkach geotechnicznych, gdy podłożę jest nienośne i zbyt ściśliwe, a wymagane jest wyeliminowanie osiadań nawierzchni, np. ze względu na otaczającą infrastrukturę. Podłożę gruntowe w opisywanym przy-

Tabela 1. Zakresy kategorii nośności podłoża gruntowego dla nawierzchni sztywnych (k) i podatnych (CBR) wg metody ACN-PCN

Kategoria nośności podłoża	Zakres nośności podłoża k [MN/m ²] / CBR	Standardowa nośność podłoża k [MN/m ²] / CBR
Wysoka nośność [A]	$k > 120$ / $CBR > 13$	$k = 150$ / $CBR = 15$
Średnia nośność [B]	$k = 60 - 120$ / $CBR = 8 - 13$	$k = 80$ / $CBR = 10$
Niska nośność [C]	$k = 25 - 60$ / $CBR = 4 - 8$	$k = 40$ / $CBR = 6$
Bardzo niska nośność [D]	$k < 25$ / $CBR < 4$	$k = 20$ / $CBR = 3$



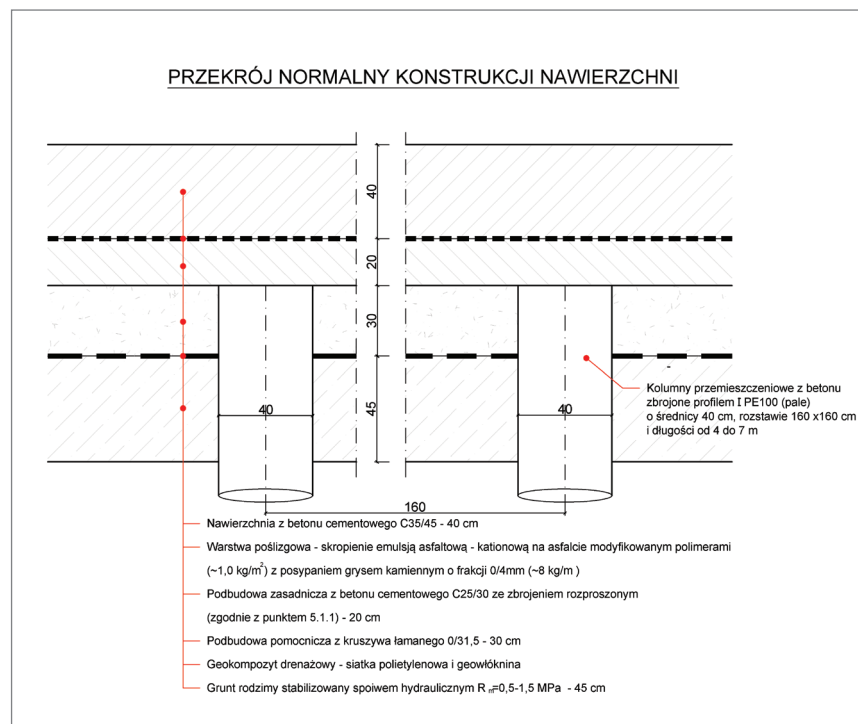
Rys. 1. Przyjęty schemat obliczeniowy

padku stanowiły ściśliwe grunty organiczne (gytie) i plastyczne grunty spoiste; gliny i pyły ($I_L=0,3-0,35$). Głębiej zalegały grunty spoiste w stanie twardoplastycznym. Miąższość gruntów nienośnych była zmienna i wynosiła 4–7 m. Projektowaną lotniskową nawierzchnię betonową podparto betonowymi kolumnami przemieszczeniowymi na poziomie podbudowy betonowej, co przedstawił na rys. 2.

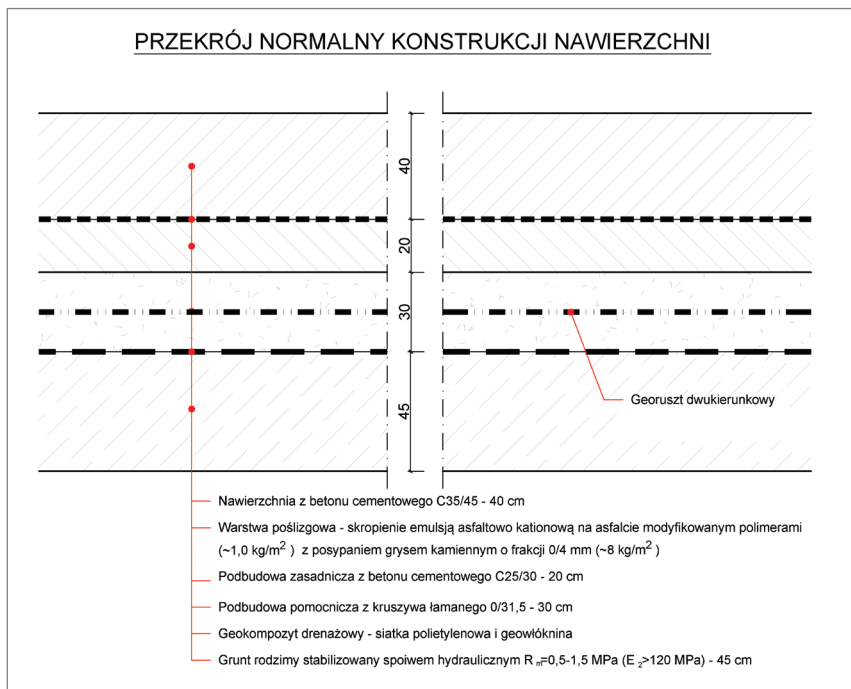
Rozwiązanie to polegało na tym, że betonowa konstrukcja nawierzchni wraz z podbu-

dową oparta jest bezpośrednio na głowicach kolumn. Daje ono podparcie o wiele sztywniejsze niż inne rozwiązania. Szczególnie istotne może to być na styku już istniejących i użytkowanych konstrukcji, co miało miejsce w tym przypadku. W opisywanym przykładzie kolumny były wykonane w regularnych rozstawach 1,6 x 1,6 m, podpierając segmenty płyty nawierzchni o wymiarach 5 x 5 m.

Najpierw wykonano stabilizację gruntu spoiwem hydraulicznym i ułożono geokompozyt drenażowy, który nacięto krzyżowo



Rys. 2. Podparcie płyty lotniskowej betonowymi kolumnami przemieszczeniowymi



Rys. 3. Georuszt

w miejscach przyszłych kolumn. Następnie wykonano warstwę podbudowy pomocniczej z kruszywa łamanego zbrojoną georusztem, która po zagęszczeniu stanowiła platformę dla palownicy wykonującej kolumny przemieszczeniowe. Przeprowadzone próbne obciążenia kolumn wykazały, że maksymalne osiadanie wyniosło 3,0 mm przy obciążeniu 400 kN. Po wykonaniu kolumn i skuciu ich głowic do rzędnej projektowej wykonano podbudowę betonową i nawierzchnię.

Z uwagi na technologię układania betonu nawierzchni lotniska z zastosowaniem ciężkich maszyn, powodujących duże obciążenia miejscowe, wywołujące w słabym podło-

żu parcie boczne na kolumny, zabezpieczono je na całej długości przed skutkami zginania poprzez zastosowanie zbrojenia w postaci kształtownika IPE 100.

Georuszt

Warstwę wierzchnią podłoża małonośnego gr. 0,5–2,0 m stanowiły gliny pylaste i pyły (G_{π} , π) w stanie plastycznym ($I_L=0,3-0,35$ i lokalnie $I_L>0,35$). Dla podłoża z gruntów małonośnych zaprojektowano warstwę ulepszoną podłoża spoiwem hydraulicznym oraz georuszt o wytrzymałości dwukierunkowej długoterminowej 60/60 kN, przy odkształcalności 2%. Georuszt to warstwa kruszywa zbrojona geosyntetykiem, najczęściej

geosiatką o małej odkształcalności. Zbrojenie służy do stabilizacji kruszyw niezwiązaných, zminimalizowania odkształceń, minimalizacji nierówności osiadań konstrukcji, zwiększenia nośności warstwy kruszywa. Georuszt współpracuje dzięki zazębieniu się z ziarnami kruszywa i już przy niewielkich naprężeniach rozciągających zaczyna pracować jako stabilizator. Przy małej odkształcalności georusztu wzmocnienie następuje natychmiast po przyłożeniu obciążenia. Konstrukcję nawierzchni ze wzmocnieniem w postaci georusztu przedstawiono na rys. 3. Dla zapewnienia wartości współczynnika reakcji podłoża $k=100 \text{ kN/m}^3$ (wymaganie projektowe) na poziomie wierzchu georusztu konieczne było uzyskanie wtórnego modułu odkształcenia $E_2 > 180 \text{ MPa}$.

Pianobeton

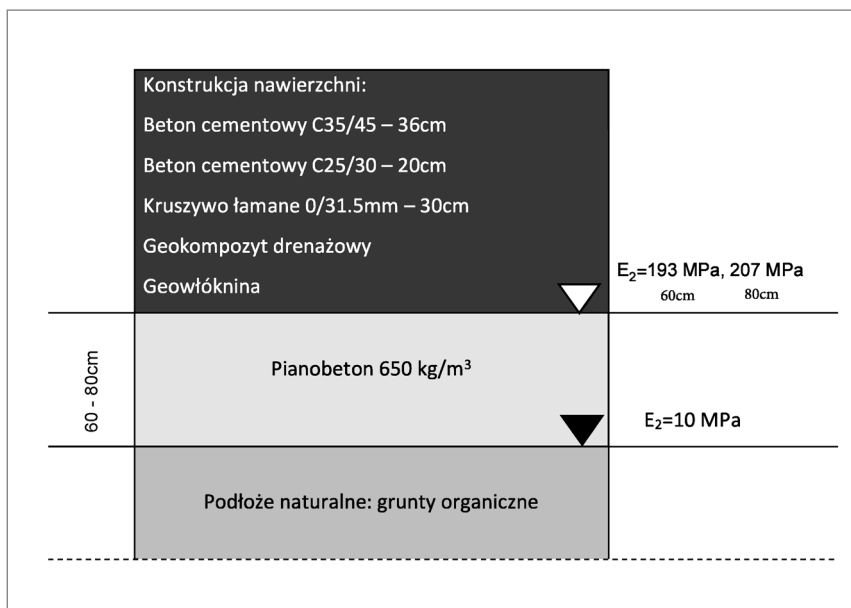
Kolejnym sposobem wzmocnienia podłoża jest wykonanie sztywnej płyty nośnej o niskim ciężarze objętościowym. Metoda ta jest stosowana w inżynierii komunikacyjnej do wzmocniania słabonośnego i ściśliwego podłoża gruntowego. Szczególnie zalecane jest stosowanie pianobetonu jako warstw odciążających (z uwagi na niską gęstość), rozkładających obciążenia na słabe i ściśliwe podłoże [16] i [17]. W poniższym przykładzie grunty podłoża tworzyły grunty organiczne (namuły) o miąższości do 6,0 m.

Zaprojektowano innowacyjną technologię odciążenia i wzmocnienia podłoża gruntowego z użyciem pianobetonu (rys. 4). Stosowanie go ma kilka korzystnych cech w porównaniu z innymi metodami:

- wzmocnienie podłoża z jednoczesnym jego odciążeniem,
- zmniejszenie osiadań lub ich prawie całkowite wyeliminowanie,
- lepsza mrozoodporność,
- krótki okres budowy,
- brak wibracji – pianobeton jest samozagęszczalny.

Pianobeton jest betonem komórkowym wytwarzanym na miejscu budowy o gęstości objętościowej bezpośrednio po wytworzeniu od 450 do 850 kg/m^3 . Po związaniu (28 dni) pianobeton tworzy trwałą strukturę, uzyskując wytrzymałość na ściskanie ($R_c=0,5-3,0 \text{ MPa}$) i zginanie ($R_t=0,1-1,0 \text{ MPa}$), uzależnioną od składu mieszanki [17]. W zależności od zastosowania do pianobetonu można dodać włókna z tworzyw sztucznych polepszające jego cechy wytrzymałościowe.

W niniejszym przykładzie zaprezentowano platformę gr. 60 i 80 cm z pianobetonu klasy 650 kg/m^3 . Z bilansu ciężarów materiałów (grunt rodzimy, pianobeton) uzyskano zmniejszenie naprężeń od ciężaru własnego na grunt odpowiednio o 8,1 i o 10,8 kPa, w zależności od grubości pianobetonu. Oprócz zmniejszenia naprężeń na grunt używa się również sztywną platformę o wy-



Rys. 4. Podłoże wzmocnione pianobetonem

sokiej nośności. Przyjmując następujące założenia:

- grubość warstwy pianobetonu: 60 i 80 cm,
- moduł podłoża rodzimego: $E_2=10$ MPa,
- pianobeton odmiany 650 kg/m³, $E=1000$ MPa, $\nu=0,2$,

obliczono moduły odkształceń na powierzchni pianobetonu $E_2=193$ (gr. 60 cm) i 207 MPa (gr. 80 cm pianobeton) – rys. 4. Gruba warstwa pianobetonu zwiększyła nośność podłoża z 10 do 200 MPa przy jednoczesnej redukcji obciążeń na podłożu.

Podsumowanie

Przedstawione rozwiązania wzmocnienia podłoża gruntowego pod nawierzchniami lotniskowymi mogą być zastosowane w zależności od następujących uwarunkowań:

- rodzaju i stanu gruntu, określanego parametrami: k , CBR, E_2 , E , oraz odkształcalności podłoża;
- położenia zwierciadła wody gruntowej;
- obciążeń eksploatacyjnych wynikających z typów samolotów użytkowanych na danych elementach funkcjonalnych lotniska;
- rodzaju konstrukcji nawierzchni lotniskowej.

Rozwiązania przedstawione w artykule są jednymi z wielu dotyczących konstrukcji nawierzchni lotniskowych projektowanych na słabym podłożu gruntowym. Podstawą wyboru metody wzmocnienia jest wyczerpujące rozpoznanie podłoża gruntowego, w tym ustalenie zakresu i głębokości słabych gruntów, a także wyznaczenie parametrów geotechnicznych. Oprócz nośności ważną jest także oczekiwana odkształcalność konstrukcji na wzmocnionym podłożu, szczególnie przy istniejącej infrastrukturze. Przedstawione przykłady dotyczyły przebudowy i modernizacji istniejącego lotniska, a więc kwestia osiadań była kluczowa.

Literatura:

- [1] Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych; Załącznik do zarządzenia Nr 31 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r.
- [2] Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych; Załącznik do zarządzenia Nr 30 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r.

- [3] Kozieł S., Lotniskowe nawierzchnie betonowe. WKiŁ, Warszawa 1972.
- [4] Łopatek Z., Projektowanie konstrukcji nawierzchni lotniskowych. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1967.
- [5] Marszałek J., Budowa Lotnisk. Część I, II, III, IV, Skrypt WAT, 1985.
- [6] Nita P., Budowa i utrzymanie nawierzchni lotniskowych. WKT, Warszawa 2008.
- [7] Nita P., Betonowe nawierzchnie lotniskowe: teoria i wymiarowanie konstrukcyjne. Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa 2005.
- [8] Graczyk M., Zbiciak A., Józefiak K., Projektowanie konstrukcji nawierzchni lotniskowych z wykorzystaniem metod analitycznych i MES. Roads and Bridges (Design of airport pavements with use of analytical methods and FEM), "Roads and Bridges" 2/2015 (14) s. 101–115.
- [9] Graczyk M., Nośność konstrukcji nawierzchni wielowarstwowych w krajowych warunkach klimatycznych, „Studia i materiały”, zeszyt 63, IBDIM, Warszawa 2010.
- [10] Aerodrome Design Manual. Part 3 Pavements, ICAO, 1983.
- [11] Szydło A., Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego, Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 2004.
- [12] Huang Y.H., Pavement Analysis and Design, Prentice Hall; 2 edition, 2003.
- [13] Advisory Circular 150/5320-6E U.S. Department of Transportation FAA, Airport Pavement Design and Evaluation 9/30/2009.
- [14] PN-EN 14227-15:2015-12 – Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym – Specyfikacje – Część 15: Grunty stabilizowane hydraulicznie.
- [15] Kraszewski C., Kruszywa i grunty związane hydraulicznie w konstrukcjach drogowych, „Drogownictwo” nr 3/2009, str. 98–103.
- [16] Deckýa M., Drusaa M., Zgútová K., Blaško M., Háječka M., Scherfelb W., Foam Concrete as New Material in Road Constructions Procedia Engineering Volume 161, Pages 428–433 <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.585>, 2016.
- [17] Beton komórkowy „Softbeton”, Rekomendacja techniczna IB-DIM nr RT/2016-02-0182.
- [18] Kraszewski C. Charakterystyka wytrzymałościowa mieszanek kruszyw związanych hydraulicznie do stosowania w podbudowach drogowych „Roads and Bridges – Drogi i Mosty” [S.I.], v. 8, n. 3, p. 31–54, lut. 2016. ISSN 2449–769X.

DOI: 10.5604/01.3001.0014.2088

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Graczyk Mirosław, Kraszewski Cezary, Szymankiewicz Czesław, Łukasiewicz Anna, 2020, Wzmocnienie podłoża gruntowego pod posadowienie nawierzchni lotniskowej – przykłady praktycznych rozwiązań, „Builder” 07 (276). DOI: 10.5604/01.3001.0014.2088

Streszczenie: Nawierzchnie lotniskowe mają swoją specyfikę, przez co proces ich projektowania i oceny stanu technicznego jest znacznie bardziej skomplikowany w porównaniu z nawierzchniami drogowymi. W przypadku projektowania dróg przeważnie są stosowane typowe rozwiązania katalogowe, podczas gdy nawierzchnie lotniskowe są zawsze projektowane jako rozwiązania indywidualne. Na stan konstrukcji nawierzchni lotniskowej bar-

dzo istotny wpływ ma nośność podłoża gruntowego. Nie zawsze jest ona wystarczająca i wymagane jest wtedy wzmocnienie podłoża. W niniejszym artykule przedstawiono przykłady konstrukcji nawierzchni lotniskowych (płyty postojowe PPS) posadowionych na wzmocnionym podłożu z zastosowaniem różnych technik: stabilizacja gruntów spoiwami hydraulicznymi, konstrukcja podparta betonowymi kolumnami przemieszczeniowymi, konstrukcja na warstwie pianobetonu. W wyniku badań wykonanych konstrukcji i obliczeń uzyskano wartości liczby PCN, które potwierdziły spełnienie wymagań projektowych.

Słowa kluczowe: podłoża gruntowe, stabilizacja gruntów, betonowa kolumna przemieszczeniowa, georuszt, wzmocnienie podłoża, pianobeton

Abstract: SOIL IMPROVEMENT FOR THE FOUNDATION OF AIRPORT PAVEMENT - EXAMPLES OF PRACTICAL SOLUTIONS.

Airport pavements have their own specifics, which makes the process of their design and assessment of the technical condition much more complicated compared to road pavements. In case of road design, typical catalog solutions are used in many situations, while airport pavements are always designed as individual solutions. The condition of the subsoil has a very significant impact on the condition of the airport pavement structure. Bearing capacity of the subsoil is not always sufficient and its improvement is required. This article presents examples of the structure of an airport pavement founded on a reinforced ground using various techniques: soil stabilization with hydraulic binders, pavement supported on concrete displacement columns, geosynthetic geogrid, structure on a foam concrete layer. As a result of tests of the constructions carried out and calculations, the values of the number of PCN were obtained, which confirmed the fulfillment of design requirements.

Keywords: subgrade, soil stabilization, displacement concrete columns, geogrid, soil improvement, foam concrete