

Lidia FEDOROWICZ

Wydział Budownictwa, Architektury i Sztuk Stosowanych, Wyższa Szkoła Techniczna w Katowicach
ul. Rolna 43, Katowice; *e-mail: lidia.fedorowicz@wst.com.pl*

Marta KADELA

Instytut Techniki Budowlanej, Katowice ; *e-mail: m.kadela@itb.pl*

Łukasz BEDNARSKI

AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków; *e-mail: lukaszbed@agh.edu.pl*

MODELOWANIE ZACHOWANIA PIANOBETONU W KONSTRUKCJACH WARSTWOWYCH WSPÓŁPRACUJĄCYCH Z PODŁOŻEM GRUNTOWYM

STRESZCZENIE

Wdrażanie nowych propozycji materiałowych w budownictwie sprzęgnięte jest nie tylko z badaniami laboratoryjnymi oraz badaniami in situ, ale także z postępowaniem obliczeniowym, uściślającym w wielu przypadkach podejścia już stosowane. W artykule przedstawiono: problemy oraz konsekwencje stosowania różnych podejść do tworzenia numerycznych modeli obliczeniowych konstrukcji warstwowych, współpracujących z podłożem gruntowym, przy równoczesnym wprowadzeniu do układu warstwy pianobetonu o parametrach określanych laboratoryjnie. O wzroście zainteresowania pianobetonem, jako materiałem o wielu interesujących cechach (wytrzymałościowych, termicznych i akustycznych) świadczyć mogą najnowsze badania, do których m.in. odwołujemy się w artykule. W pracy przedstawiono przykładowe wyniki analiz pokazujących walory termiczne układów zawierających warstwy pianobetonu, a także wyniki numerycznej oceny roli podbudowy z pianobetonu w ograniczaniu deformacji konstrukcji drogowej na podłożu o warstwach słabonośnych.

SŁOWA KLUCZOWE

konstrukcje warstwowe, podłoże gruntowe, pianobeton, modelowanie numeryczne

WPROWADZENIE

Pianobeton, materiał o niewielkiej gęstości objętościowej, ogólnie kilkakrotnie mniejszej od gęstości objętościowej gruntu, wykazuje wiele istotnych cech (znaczną wytrzymałość, dobre własności cieplne, zdolność tłumienia drgań) skłaniających do nowych zastosowań w budownictwie kubaturowym. Przykłady w literaturze (np. [1, 8, 9, 12]) pokazują też możliwości skutecznego i ekonomicznego zastosowania pianobetonu w infrastrukturze drogowej. Wprowadzenie tak lekkiego materiału w strefie odpowiedzialnej za współdziałanie konstrukcji budowlanej z podłożem gruntowym może stwarzać określone problemy obliczeniowe związane m.in. z oceną stanu granicznego podłoża, wymagające oddzielnego potraktowania w procesie projektowym.

Celem pracy jest przedstawienie możliwości skutecznego (bezpiecznego i bezawaryjnego) zastosowania pianobetonu w układach konstrukcja budowlana-podłoże gruntowe na podstawie obserwacji rzeczywistych stanów in-situ, badań laboratoryjnych oraz przeprowadzonych analiz numerycznych [2, 3, 4, 10], które wskazują na:

1) korzystne efekty wytrzymałościowe wprowadzenia pianobetonu w postaci wylewanych bezpośrednio na budowie podbudów płyt fundamentowych w niewielkich kubaturowo budynkach mieszkalnych [10],

2) oczekiwane zachowania deformacyjne konstrukcji dróg dojazdowych i parkingów, na które wskazują próbne oceny zachowania pianobetonu pod obciążeniem długotrwałym (górną część rys. 1 – Trencin 2011,[4]) oraz wyniki omówionych dalej analiz numerycznych (rys. 7, 8, 9),

3) obiecujące efekty termiczne przy wprowadzeniu pianobetonu jako podbudowy oraz warstw odpowiednio wbudowanych w konstrukcję i otoczenie obiektu budowlanego (rys. 2 i 3).

Podkreślić należy, że powyższe przypadki wiążą się z poszukiwaniem tańszych rozwiązań konstrukcyjnych przy podłożach uznanych za słabonośne lub wręcz „niestabilne”. Wykorzystanie pianobetonu (materiału stosunkowo taniego o znakomitych właściwościach izolacyjnych) pasuje, zatem do koncepcji wprowadzenia materiału odpornego i lekkiego jako podbudowy pod płyty fundamentowe czy posadzki. Pianobeton może tworzyć dolną warstwę złożonej konstrukcji warstwowej, wchodzącą w interakcję z podłożem gruntowym. Przy odpowiednich parametrach wytrzymałościowych (związanych z gęstością materiału oraz zawartością poszczególnych składników może stanowić pojedynczą, samodzielną warstwę konstrukcyjną, co jest przedmiotem projektu badawczego nr 537/L-4/2012 pt. „Wzmacnianie słabego podłoża poprzez zastosowanie warstwy pianobetonu w kontakcie z podłożem gruntowym”, realizowanego w ITB w ramach programu LIDER IV finansowanego przez NCBR.



Rys. 1. Przykłady zastosowania pianobetonu: a) i b) obciążenie długotrwałe parkingu [4], c) konstrukcja bieżni [9], d) przebudowa Central Road [9]

Fig. 1. Examples of the use of the foamed concrete: a) and b) long-term load of parking [4], c) track construction, d) reconstruction of Central Road [9]

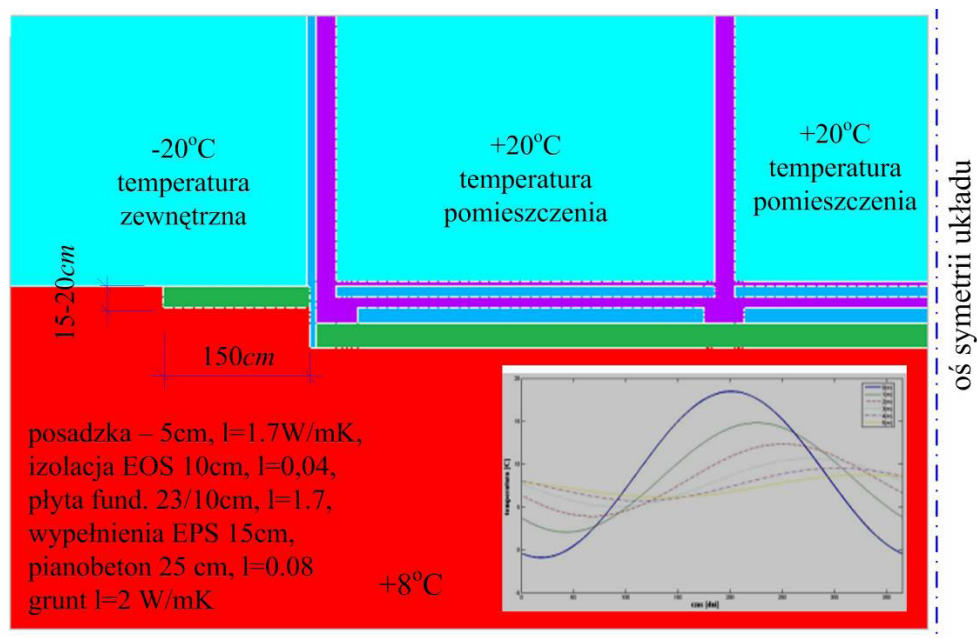
1. Wykorzystanie właściwości cieplnych pianobetonu

Wyjściowa idea układu, w którego skład wchodziłyby warstwy pianobetonu wiąże się z budownictwem niskoenergetycznym. Zagadnienia zwiększenia izolacyjności termicznej przegród budowlanych łączą się z problemami zabezpieczania posadzek wykonywanych bezpośrednio na gruncie. Powyższe zadania pojawiają się zarówno w budownictwie mieszkaniowym jak i budownictwie wielokubaturowym typu hale magazynowe. Pianobeton, materiał z grupy betonów lekkich, otrzymywany poprzez wprowadzenie do cementowej mieszanki

piany technicznej powodującej wytworzenie zamkniętych porów powietrznych wkomponuje się we współczesny nurt budownictwa zrównoważonego rozwoju.

Należy zwrócić uwagę, że w większości zagadnień inżynierskich powinno się zamiast nazwy pianobeton stosować określenie kompozyt, jako że będziemy mieli do czynienia z pianobetonem wzmocnianym, najczęściej włóknami syntetycznymi.

W przypadku zastosowania w konstrukcji budowlanej nowego materiału (lub przypisania materiałowi znanemu nowej roli) wsparcie numeryczne na etapie badawczym oraz przy poszukiwaniu optymalnego rozwiązania projektowego jest podejściem ze wszech miar korzystnym. Wszelkie modyfikacje konstrukcji wymagają jednak adekwatnego opisu cech fizycznych i mechanicznych nowego materiału.

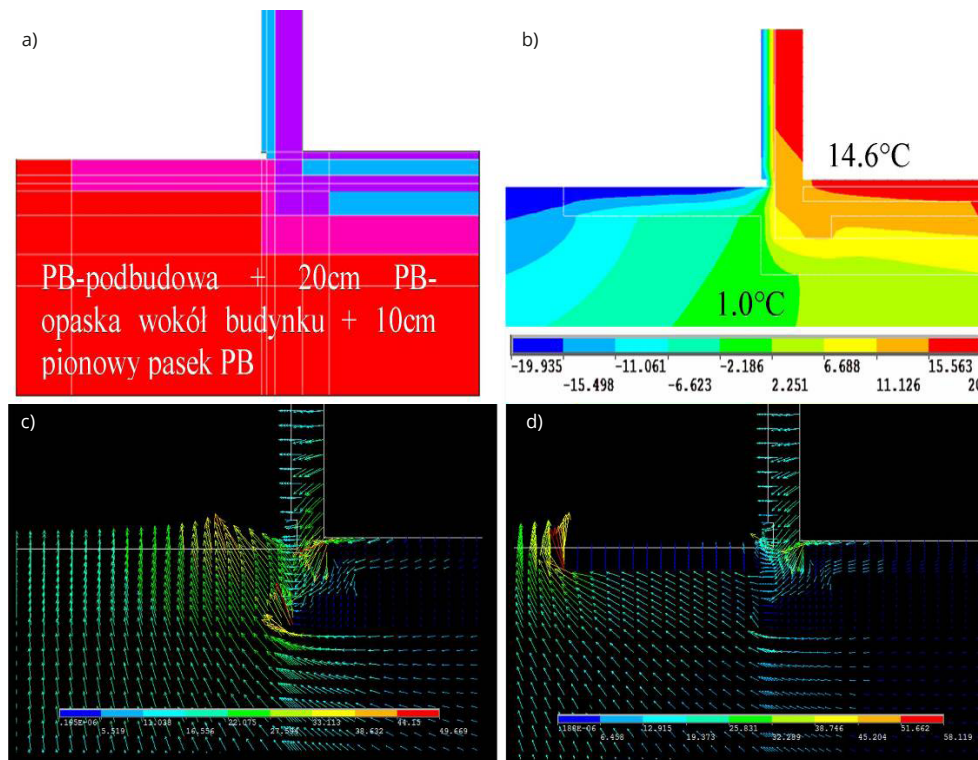


Rys.2. Numeryczny model wymiany ciepła w układzie budynek-podłoże

Fig. 2. Numerical model of heat transfer in building-subsoil system

Przedstawione w pracy analizy termiczne przeprowadzone zostały dla układu fundament-podłoże o wyjściowych założeniach konstrukcyjnych zgodnych z pracą [10]. W stosunku do wyjściowych założeń wprowadzane były kolejne zmiany dotyczące geometrii, położenia i grubości warstw pianobetonu. Na rys. 2 pokazano model obliczeniowy dla jednej z analizowanych dalej kombinacji. Układ prawidłowo przenosi obciążenie z konstrukcji poprzez fundament i podbudowę na podłoże. Warstwy pianobetonu PB wprowadzone zostały jako podbudowa, warstwa pionowa otaczająca fundament oraz warstwa pozioma pełniąca rolę opaski ciepłochronnej wokół budynku. Zapewnia to skuteczność w ochronie termicznej przyziemia (rys. 3a), która zależy od sposobu wbudowania materiału w układ oraz jego kontaktu z podłożem.

Dla określonych warunków rzeczywistych (rys. 2) strumień cieplny przenikający z budynku do gruntu zależy od rzeczywistego oporu cieplnego przegrody oraz istniejących różnic temperatur między wnętrzem budynku a gruntem. Temperaturę w gruncie na określonej głębokości przyjęto w modelu za [11] jako ustaloną w badanym przedziale czasu. Na rys. 3b przedstawiono porównanie strumieni ciepła dla układów – opisanego powyżej oraz z pianobetonem wprowadzonym jedynie jako warstwa podbudowy.



Rys.3. Wynik analizy termicznej: a) rozkład temperatur w obszarze przyziemia, b) w podłożu gruntowym, c) i d) porównanie strumieni ciepła dla różnie izolowanych układów

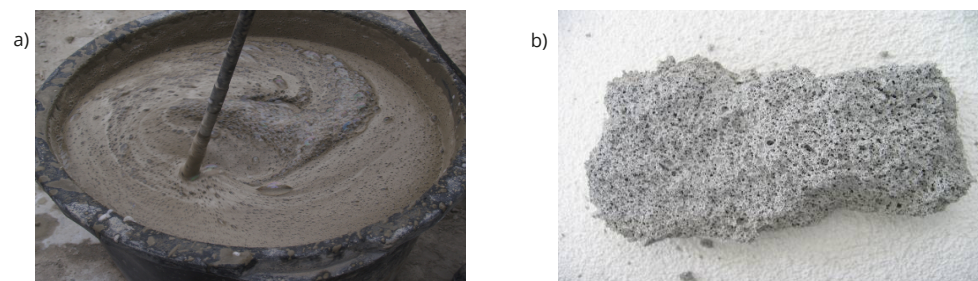
Fig. 3. The results of thermal analysis: a) temperature distribution in the basement, b) in the subsoil, c) and d) comparison of different heat fluxes for isolated systems

2. Propozycje oceny parametrów pianobetonu w modelowaniu konstrukcji

W zależności od proporcji odpowiednich składników materiał może cechować się:

- jednorodną strukturą (rys. 4),
- odpowiednią wytrzymałością mechaniczną (rys. 6),
- dużą izolacyjnością cieplną (rys. 3) i akustyczną,
- wysoką hydroizolacyjnością (testy in-situ rys. 5) i ognioodpornością.

Rysunek 4 pokazuje mieszankę pianobetonu przygotowaną w warunkach laboratoryjnych w Zakładzie Elementów Konstrukcji Budowlanych i Budownictwa na Terenach Górniczych Instytutu Techniki Budowlanej oraz strukturę otrzymanych próbek.



Rys. 4. Pianobeton: a) mieszanka pianobetonu w warunkach laboratoryjnych, b) przykładowa struktura pianobetonu

Fig. 4. Foamed concrete: a) mixture of foamed concrete in the laboratory, b) sample structure of the foamed concrete

Rysunek 5 pokazuje rejestrację badań in-situ, mających za zadanie ocenę hydroizolacyjności otrzymanego materiału w różnych warunkach kontaktu z podłożem gruntowym.



Rys. 5. Ocena hydroizolacyjności pianobetonu w warunkach in-situ
Fig. 5. Evaluation of hydro-insulation of the foamed concrete in the in situ state

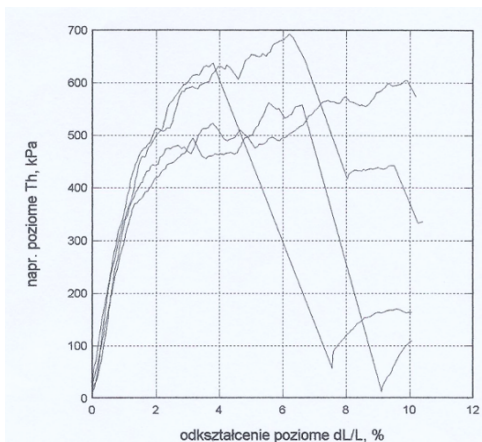
Rozważmy teraz przypadek, gdy pianobeton jest materiałem uczestniczącym w przenoszeniu obciążenia. Żądanie bezawaryjnego działania konstrukcji – zbudowanej z różnych materiałów, w tym z warstwy pianobetonu – można zinterpretować jako wymóg niedopuszczenia do procesu degradacji materiału o niewyznaczonej zmienności charakterystyk wytrzymałościowych w czasie pracy konstrukcji w miejscu wbudowania.

Proces degradacji rozumie się tu jako redukcję sztywności materiału i zmniejszenie wartości modułu Younga w wyniku obciążenia powodującego przekroczenia zakresu sprężystej pracy analizowanego materiału (w odniesieniu do pierwotnych charakterystyk materiału).

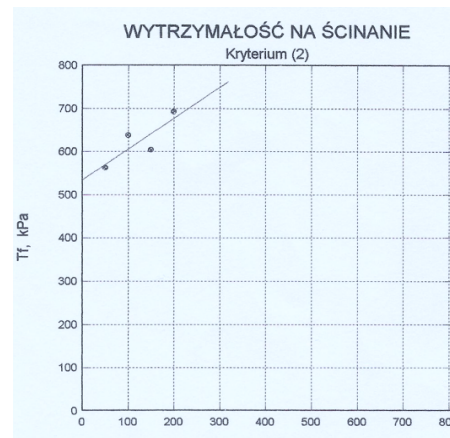
Takie podejście implikuje żądanie sprężystej pracy podbudowy w rozważanych konstrukcjach warstwowych współpracujących z podłożem gruntowym.

Aby pogodzić powyższe warunki ze standardami współczesnego modelowania konstytutywnego układów konstrukcja-podłoże gruntowe zaproponowano opisanie zachowania pianobetonów w podbudowach przy użyciu parametrów wytrzymałościowych geomateriałów.

a)



b)





Rys. 6. Badania próbek pianobetonu: a) i b) wyniki testów bezpośredniego ścinania próbek GeoPBG D5, c) i d) wyznaczenie modułu odkształcenia w próbie jednoosiowego ściskania (próbka nr 36)

Fig.6. Investigation of foamed concrete samples a) and b) direct shear test results of samples GeoPBG D5, c) and d) determination of the deformation modulus in uniaxial compression test (sample 36)

W zamieszczonych w pracy analizach wykorzystano parametry wyznaczone dla pianobetonu typu Geo PBG D5. Materiał ten (utworzony przez Sircontec Ltd; www.sircontec.sk) poddany był podstawowym testom (w laboratoriach Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej oraz Katedry Geotechniki Uniwersytetu w Żilinie), umożliwiającym zdefiniowanie jego cech fizycznych i mechanicznych [4, 10].

Rysunki 6a i 6b przedstawiają przykłady otrzymywanych charakterystyk ścinania oraz parametrów wytrzymałościowych dla pianobetonu Geo PBG D5 w teście bezpośredniego ścinania w warunkach powietrzno-suchych przeprowadzonych w laboratorium Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Określono wartość kohezji pozornej $c = 534.7 \pm 44.9$ [kPa] oraz kąt tarcia wewnętrzny $\varphi = 35.6 \pm 12.4$ [°], odniesiony do naprężeń efektywnych. Wielkości wybranych parametrów (gęstość objętościowa, współczynnik Poissona, edometryczny moduł odkształcenia, kohezja, kąt tarcia wewnętrzny) zostały ocenione na próbkach wielkowymiarowych, niezależnie w laboratoriach uniwersyteckich w Żilinie i Bratysławie [4, 10]. Wyniki te uznano za porównywalne – ze zwróceniem uwagi na konieczność wykalibrowania stosowanych procedur dla tworzonego materiału oraz weryfikacji poprzez inne testy. Rysunki 6c i 6d przedstawiają próbę rozszerzenia powyżej stosowanych procedur badawczych (testy na próbkach pianobetonów w ramach projektu badawczego 537/L-4/2012, wykonane w laboratorium ITB w Katowicach w 2014 roku).

3. Pianobeton jako podbudowa konstrukcji warstwowych

W każdym z przypadków zastosowania nowego materiału, tu w charakterze podbudowy w konstrukcji warstwowej, należy szczegółowo rozważyć zjawisko interakcji podukładów konstrukcja-podłoże gruntowe. Bezawaryjna praca podukładu górnego, czyli konstrukcji jest bowiem bezpośrednio związana z jego sztywnością (rodzajem i układem warstw), a także obszarem współpracy z podukładem dolnym, reprezentowanym przez podłoże gruntowe.

Wymóg bezawaryjnej pracy podukładu górnego (konstrukcji) jest tu rozumiany, jak zapisano w rozdziale 2, jako niedopuszczenie do zjawiska degradacji materiału (czyli spadku jego sztywności przy obniżeniu wartości modułu Younga). Wskazanie to wiąże się z wymogiem nieprzekroczenia przedziału sprężystej pracy materiału podbudowy.

Wskazanie powyższe wydaje się niezwykle istotne zarówno z uwagi na przyczyny wymienione w rozdziale 2 dotyczące charakterystyk materiałowych, jak też na cel wprowadzania nowego materiału o cechach umożliwiających wykorzystywanie go w warunkach szczególnych, np. przy słabych podłożach gruntowych.

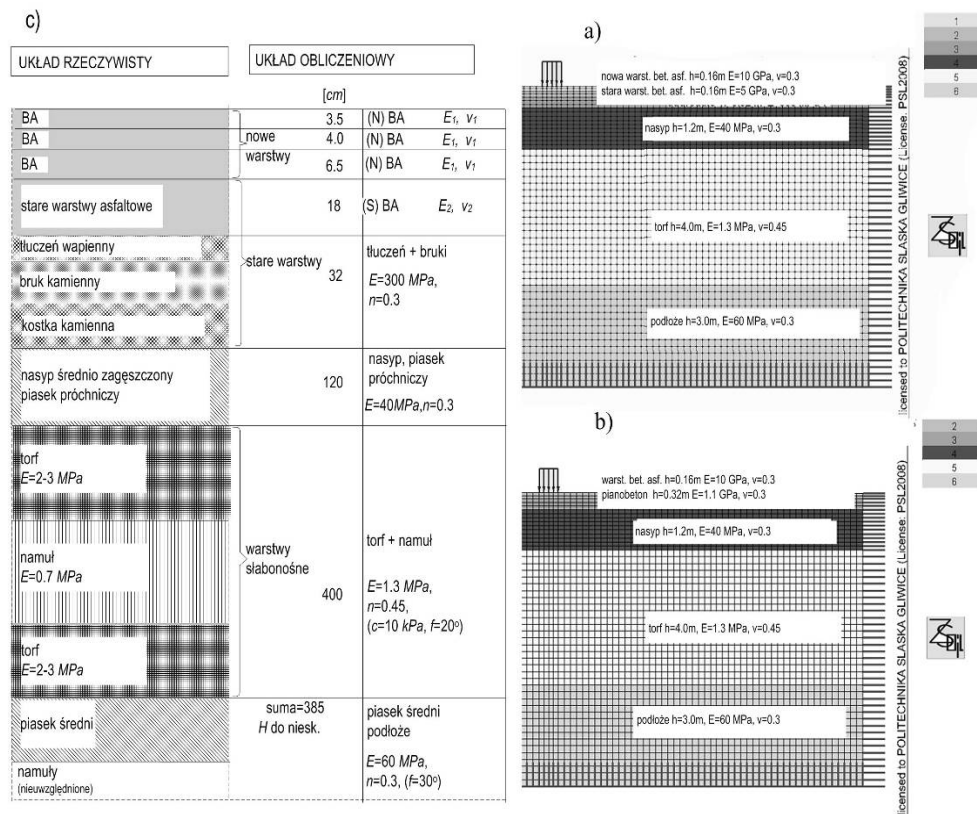
Poniżej przedstawiono realność takiego wymogu, oraz sposób jego kontroli w analizie numerycznej przeprowadzonej dla układu typu: warstwowa konstrukcja drogowa – podatne podłoże gruntowe; „wymieniając” w analizie rzeczywistą podbudowę z kruszywą stabilizowanego mechanicznie na podbudowę z pianobetonu. Na rys. 7 pokazano, zaczerpnięty z literatury [6]:

rzeczywisty profil geotechniczny wraz z warstwami konstrukcji drogowej poddanej remontowi. Nakładka wzmacniająca złożona jest z trzech nowych warstw asfaltowych. Dla układu tego wykonane zostały badania in-situ z wykorzystaniem urządzenia FWD [6]. Poniżej przedstawiono własną analizę numeryczną:

I. stanowiącą ocenę pracy konstrukcji po naprawie, współpracującej ze słabym podłożem gruntowym – analiza I (sprężysta), zgodna z postępowaniem inżynierskim,

II. analizę, w której podbudowa z kruszywa zagęszczonego została „wymieniona” na warstwę pianobetonu (bez nakładki wzmacniającej) – analiza II (sprężysta).

W obydwu przypadkach określone zostały ugięcia powierzchni pod obciążeniem odpowiadającym obciążeniu skupionemu od koła równemu 115kN/oś. Model obliczeniowy 2D został zbudowany zgodnie ze wskazaniami dotyczącymi geometrii oraz obszaru współpracy podkładów podanymi w [5, 7].

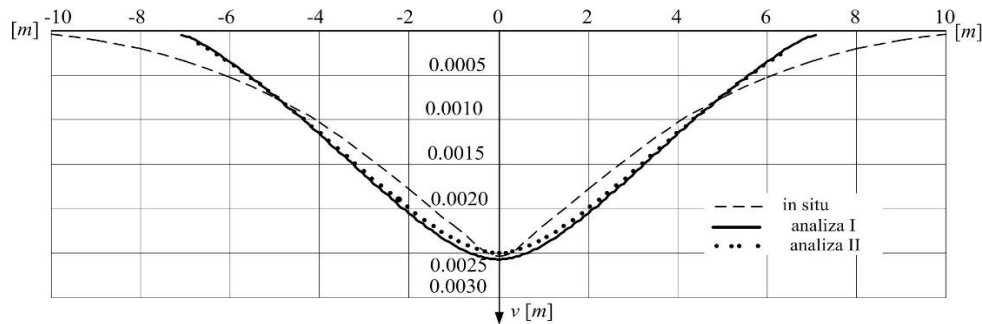


Rys. 7. Model obliczeniowy stosowany w: a) analizie I, b) analizie II, c) profil geotechniczny wg [6]

Fig. 7. Numerical model for: a) analysis I, b) analysis II, c) geotechnical profile acc. [6]

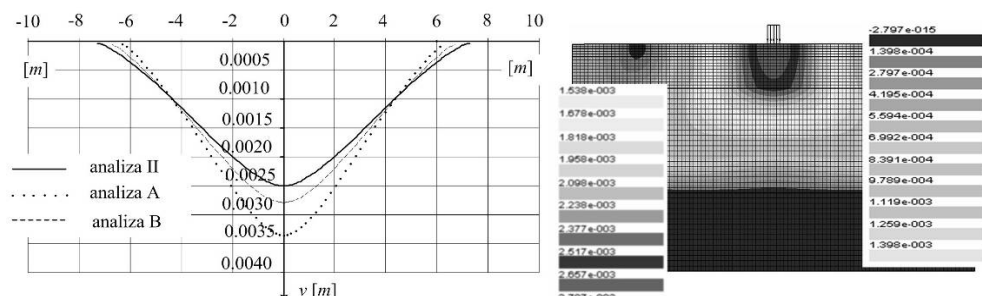
4. Wyniki analiz numerycznych oraz wnioski

Wyniki powyższych analiz sprężystych zostały przedstawione w postaci czaszy ugięć na rys. 8, z tłem wynikającym z badań in-situ [6]. Biorąc jednak pod uwagę postawiony na początku wymóg zachowania sprężystej pracy warstwy pianobetonu pod obciążeniem rzeczywistym powyższe analizy powtórzono, przyjmując warstwę tę za geomateriał o cechach wytrzymałościowych opisanych parametrami modelu Coulomba-Mohra (do badań przyjęto materiał Geo PBG D5 o $c = 534.7 \pm 44.9$ [kPa] i $\phi = 35.6 \pm 12.4$ [°] za [4, 10]). za [4, 10]).



Rys. 8. Czasza ugięć w analizach sprężystych I i II
Fig. 8. Surface deformations for elastic analyses I and II

Obliczenia układu z rys. 7b powtórzone teraz dwukrotnie (rys. 9), zachowując jako tło analizę II:
A) wprowadzając model Coulomba-Mohra do opisu zachowania podłoża gruntowego i nasypu – analiza A,
B) wprowadzając model Coulomba-Mohra do opisu podłoża gruntowego oraz zachowując opis sprężystości dla nasypu (o sztywności zależnej od sztywności warstw położonych poniżej nasypu, który przy projektowaniu uznany byłby za warstwę tworzącą „podparcie” konstrukcji drogowej) – analiza B.
Zadaniem analiz A i B było sprawdzenie zagrożenia uplastycznieniem materiału podbudowy.



Rys. 9a) Czasze ugięć w analizach A i B, b) mapa przemieszczeń pionowych w analizie B
Fig.9a) Surface deformations for analyses A and B, b) vertical displacements map for B

Niezależnie od wartości przemieszczeń powierzchni (reprezentowanych przez tzw. czasze ugięć) oraz pojawiających się stref uplastycznienia w warstwach niższych nie zarejestrowano w przeprowadzonych analizach A i B obszarów uplastycznienia w warstwie pianobetonu Geo PBG D5.

Widzimy skuteczność numerycznych symulacji procesu interakcji zachodzącej pomiędzy konstrukcją warstwową a podłożem gruntowym, z możliwością śledzenia obszarów „odpowiedzialnych” za zbyt duże deformacje układu.

Wskazana wydaje się ocena stanu naprężenia w warstwie podbudowy tworzonej przy zastosowaniu pianobetonu; jest to w pewnym sensie powrót do koncepcji kryterium stosowanego dla układów półsztywnych w postępowaniu mechanistycznym (zgodnie z Katalogiem typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych, IBDM, Warszawa 1997), jednak bez możliwości rozważenia dwóch faz pracy materiału.

Ocena wpływu powstałych deformacji na proces niszczenia konstrukcji jest bowiem nie tylko związana z wyborem modeli konstytutywnych w fazie analiz obliczeniowych, ale głównie z wiarygodnością parametrów określanych w badaniach laboratoryjnych oraz badaniach in situ.

Literatura:

- [1] Allied Foam Tech. Montgomeryville, Pennsylvania, <http://www.alliedfoamtech.com/>, 2009.
- [2] Bartoszek, M., Fedorowicz, L.: Temperature distribution for systems subsoil-laminated structure with lightweight concrete layer (PBG). Zbornik z konferencie s medzinárodnou účasťou, CD-ROM, Poruchy a obnova obalových konštrukcií budov, 13.-15.4.2011, Podbanské – Vysoké Tatry, Slovakia 2011, ISBN 978-80-553-0651-3.
- [3] Bartoszek, M., Fedorowicz, L., Kadela, M.: Modelowanie numeryczne konstrukcji warstwowych w świetle badań laboratoryjnych i badań in situ. Modelowanie Inżynierskie Nr 12/2012, s. 15-26.
- [4] Drusa, M., Fedorowicz, L., Kadela, M., Scherfel W.: Application of geotechnical models in the description of composite foamed concrete used in contact layer with the subsoil. Zbornik 10 Slovenskej geotechnickej konferencie s medzinárodnou ucast'ou, Bratislava, 30-31 maj 2011, Slovenska Technicka Univerzita, CD-ROM, s. 644-652.
- [5] Fedorowicz, L.: Zagadnienie kontaktowe budowla – podłoże gruntowe. Część I. Kryteria modelowania i analiz podstawowych zagadnień konstrukcja budowlana – podłoże gruntowe. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.
- [6] Judycki, J., Jaskuła, P.: Analiza stanu naprężeń, odkształceń i ugięć w nawierzchni asfaltowej wykonanej na niskim nasypie posadowionym na słabonośnym gruncie. VIII Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, Kielce 2002, s. 49-59.
- [7] Kadela M.: Kryteria modelowania i analiz konstrukcji warstwowych współpracujących z podłożem gruntowym. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2012.
- [8] Lightweight foamed concrete. EABASSOC, <http://www.eabassoc.co.uk/>, Cheshire, England 1997.
- [9] PROVOTON Foam Concrete, a Division of CEMATRIX Corporation, Bristol, <http://www.provoton.com/>, 2013.
- [10] Rudišín, R., Knoppik-Wróbel, A., Scherfel, W.: New solution of a dwelling house foundation structure – foundation slab made of lightweight concrete (PBG). Zbornik z konferencie s medzinárodnou účasťou, CD-ROM, Poruchy a obnova obalových konštrukcií budov, 13.-15.4.2011, Podbanské – Vysoké Tatry, Slovakia 2011, ISBN 978-80-553-0651-3.
- [11] Staniec, M.: Rozkład temperatury w gruncie wokół budynków częściowo lub całkowicie zagłębionych w gruncie. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Budownictwo, 2007.
- [12] Tian, W., Li L., Zhao, X., Zhou, M., Wang N.: Application of foamed concret in road engineering. International Conference on Transportation Engineering ICTE, China, Chengdu 2009, pp. 2114-2120.

MODELING OF THE FOAMED CONCRETE BEHAVIOR FOR THE LAYERED STRUCTURES COOPERATING WITH SUBSOIL

SUMMARY

Application of the lightweight concrete for dwelling houses as well as subbase of the secondary rods and parking gives very promising prospect. Computation analyses for systems layered structure – subsoil should be based on elements of the mechanics, as well as on the results of experiments. In the paper some approach, based on numerical “support” for exploration of the optimal design solution if a new construction or insulating material to the process of a building designing is presented. As the material introduced experimentally the foamed concrete was adopted. Practical application of the approach requires detailed research in the following area:

- thermal parameters of the tested lightweight materials;
- strength parameters necessary to calculate scalar parameter of material degradation
- numerical and in-situ results correlation.

KEYWORDS

layered structures, subsoil, foamed concrete, numerical modeling