

Modelowanie numeryczne odkształceń nawierzchni drogowej w świetle wyników monitoringu na przykładzie drogi dojazdowej do kompleksu hal logistycznych

Lidia Fedorowicz, Marta Kadela

W artykule przedstawiono wyniki analiz zachowania półsztywnej konstrukcji drogowej współpracującej z podłożem gruntowym.

W warstwie podbudowy zastosowano materiał z grupy UPS (ubocznych produktów spalania). Warunki zniszczenia materiału podbudowy badano wprowadzając w modelu obliczeniowym układ konstrukcja drogowa – podłoże model konstytutywny (e-p-d).

Równocześnie podano opis monitoringu założonego na badanym odcinku drogi (dojazdowej do hal w obszarze logistycznym w Bieruniu). Przedstawiono otrzymane wyniki – odkształcenia pionowe podłoża gruntowego w obszarze współpracy z obciążoną konstrukcją oraz odkształcenia poziome w warstwie podbudowy.

Artykuł recenzowany zgodnie z wytycznymi MNiSW

data zgłoszenia do redakcji: 26.03.2012

data akceptacji do druku: 15.06.2012



prof. nzw w Pol. Śl.
Lidia Fedorowicz
Katedra Budownictwa
Ogólnego i Fizyki Budowli
Wydział Budownictwa
Politechnika Śląska
lidia.fedorowicz@polsl.pl



mgr inż. Marta Kadela
Katedra Geotechniki
Wydział Budownictwa
Politechnika Śląska
marta.kadela@polsl.pl



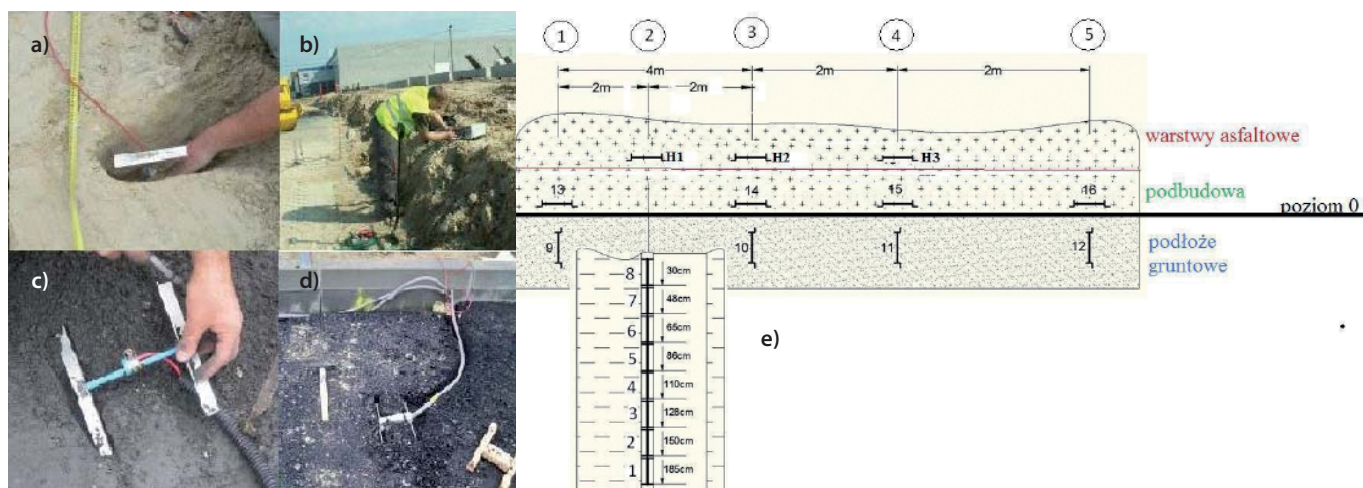
1. Koryto drogi – odcinek monitorowany, droga w trakcie realizacji

Warunki pracy konstrukcji drogowej wynikające z przenoszonych obciążeń mechanicznych oraz doznawanych wpływów atmosferycznych, uwiadamiają się w stanie in situ i są obserwowane na powierzchni, m.in. w postaci trwałych deformacji, spękań zmęczeniowych oraz przełomów wywołanych wpływami termicznymi. Właściwe określenie charakterystyk wytrzymałościowych materiałów konstrukcji, z uwzględnieniem odporności na postępujące deformacje oraz spękania, powinno być zatem podstawą związków konstytutywnych stosowanych w modelach obliczeniowych. Teoretycznie metody mechanistyczne dopuszczają w prowadzonych analizach wykorzystanie dowolnie rozbudowanych modeli obliczeniowych [6,10], w których modelowanie konstytutywne nie podlega żadnym ograniczeniom.

Można więc sądzić, że współcześnie obie dziedziny – badania materiałowe oraz analizy konstrukcji – powinny reprezentować taki poziom zaawansowania, stanowiący zamknięty obszar, w którym nie ma miejsca na pytania podstawowe. Przedstawione w pracy przykłady pokazują jednak, że tworzenie modeli obliczeniowych konstrukcji drogowych współpracujących z podłożem gruntowym nie jest, pomimo rozbudowanej wiedzy w wymienionych wyżej obszarach, ani problemem prostym, ani zamkniętym. Do analizy wybrano – z uwagi na prowadzony monitoring – półsztywną konstrukcję drogową (rys. 1). W badanej konstrukcji podbudowę oraz wymaganą warstwę ulepszonego podłoża wykonano, jako „warstwę scaloną”, z materiału wykorzystującego uboczne produkty spalania (UPS), który jest coraz powszechniej stosowany w budownictwie inżynierskim i drogowym.

Rozwiązania wprowadzające półsztywne podbudowy drogowe z wykorzystaniem ubocznych produktów spalania UPS są bliskie koncepcji podbudów z gruntów

stabilizowanych spoiwami hydraulicznymi. Grunt stabilizowany wykazuje się ogólnie dużą sztywnością i wytrzymałością na ściskanie. Wadę stanowią jednak znaczne odkształcenia skurczowe powodujące spękania poprzeczne w stabilizowanej warstwie. Następstwem pojawiania się spękań w podbudowie są tzw. spękania odbite w warstwach wierzchnich, przyczyniające się do utraty trwałości nawierzchni drogowej. Poniżej zaproponowano numeryczny sposób przewidywania zjawiska spękania w podbudowie, stosując do opisu pracy materiału model sprężysto-plastyczny z degradacją. Jeżeli określone zjawiska (tu: współpraca konstrukcji z podłożem, czy degradacja sztywności materiału) są właściwie rozpoznane numerycznie, to powinny znaleźć swoje odzwierciedlenie w wynikach badań in situ. Dlatego w pracy przedstawiono również opis prowadzonego monitoringu na badanym odcinku drogi dojazdowej do hal w obszarze logistycznym w Bieruniu, koło Katowic – rys. 1.



2. a)-d) zakładanie czujników w podłożu i konstrukcji, e) schemat rozmieszczenia czujników

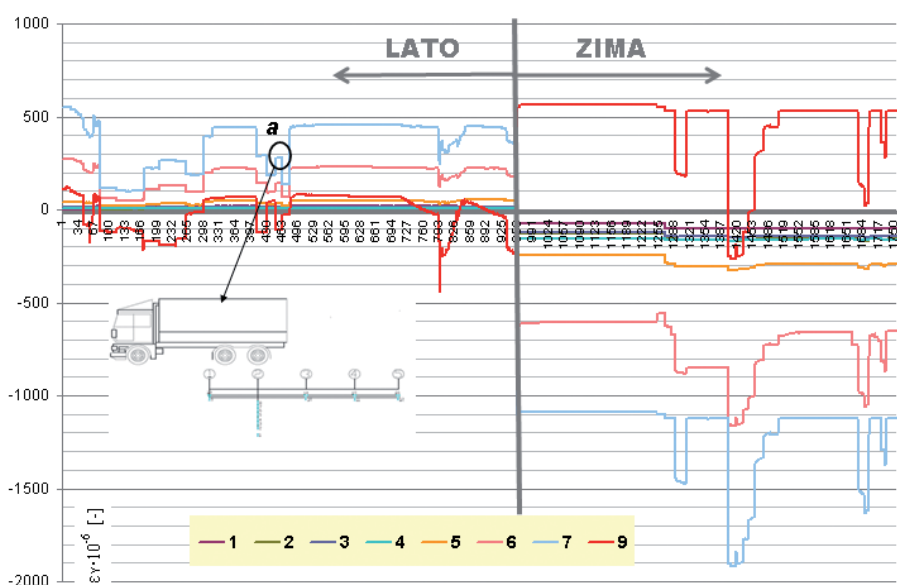
System monitorowania

Zdjęcia (rys. 2) pokazują kolejność zakładania bazy pomiarowej na monitorowanym poligonie doświadczalnym. Czujniki strunowe, model 4200 [12], zostały założone w podłożu gruntowym (rys. 2a) do głębokości ok. 2 m oraz w spodzie warstwy podbudowy (rys. 2c). Natomiast czujniki strunowe, model wysokotemperaturowy 4200HT, założono w spodzie warstw asfaltowych (rys. 2d). Rysunek 2b przedstawia podłączenie czujników do rejestratora wielokanałowego.

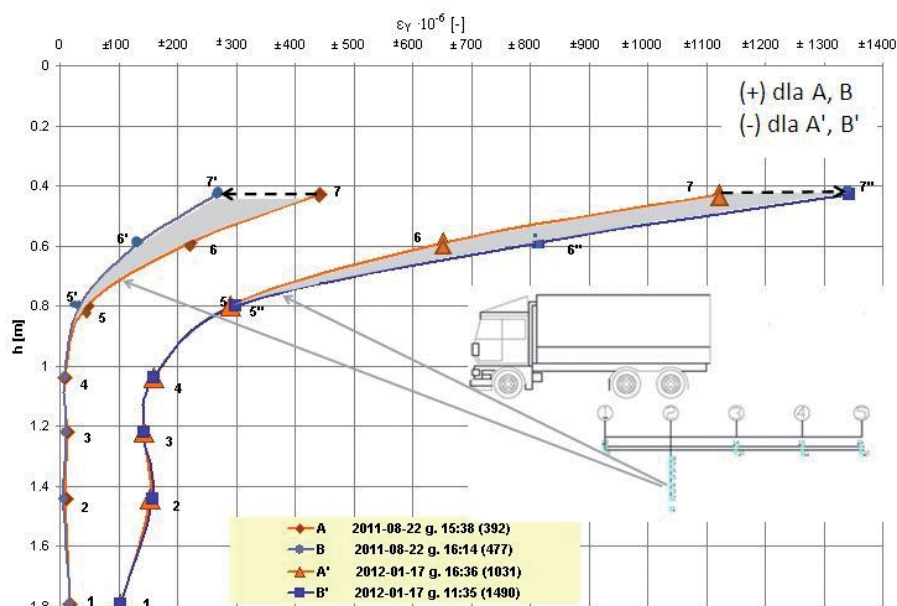
Rysunek 2e pokazuje przyjęte usytuowanie i numerację założonych czujników.

Na kolejnych rysunkach (rys. 3-5) pokazano fragmenty zapisów założonych czujników. Rysunek 3 pokazuje zapisy odkształceń pionowych w podłożu pod konstrukcją drogową, rejestrowane w 30 sekundowych interwałach przez czujniki o numerach i usytuowaniu zgodnym z rys. 2e. Rysunki 3, 4 i 5 przedstawiają fragmenty zapisów wybranych dni roboczych dla lata i zimy (22-23 VIII 2011 i 16-17 I 2012), w czasie których przeprowadzano kontrolowane manewrowanie ciężarówki o znanej masie nad przekrojami 1÷5 z rys. 2e. Przykładowo, odcinek a na rysunku 3 został zarejestrowany w chwili, gdy tylnia oś pojazdu znajdowała się nad przekrojem 2 (rys. 2e); są to jednak wyniki wymagające szerszego opisu.

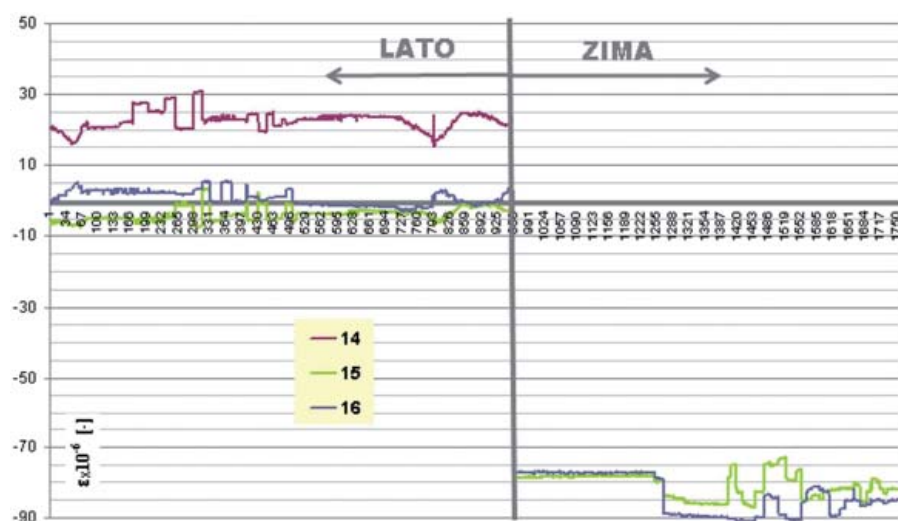
Podstawowe wyniki, dotyczące odpowiedzi określonej warstwy podłoża na obciążenie pojawiające się na konstrukcji przedstawia rysunek 4. Wynik pomiaru należy interpretować następująco – od pewnej bazy, utworzonej dla określonego rozkładu temperatur dla układu mierników nieobciążonych, odjęto stan odkształcenia wywołany obciążeniem zewnętrznym; przy czym obciążenie to może wartości odkształceń bazowych zwiększać lub zmniejszać (zależnie od aktualnej temperatury, rejestrowanej przez czujniki). Wartości pionowych odkształceń ściskających w podłożu oraz



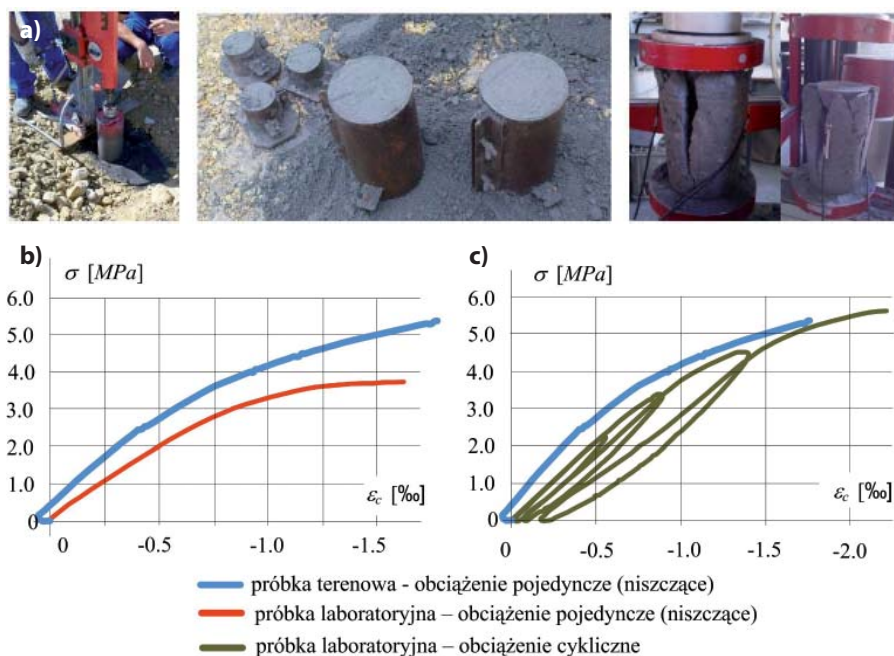
3. Zapis odkształceń pionowych w gruncie



4. Rozkład po głębokości odkształceń pionowych w gruncie



5. Zapis odkształceń poziomych w podbudowie



6. a) Pobieranie i przygotowanie próbek do badań oraz obraz zniszczenia próbki w badaniu jednoosiowego ściskania, b), c) wyniki badań laboratoryjnych

ich rozkład po głębokości otrzymuje się jako przyrosty wartości bazowych i pomierzonych – obszar zaciemniony na rysunku 4. Pomiar odkształceń poziomych w warstwie podbudowy przedstawia rysunek 5, gdzie sposób interpretacji wyników jest analogiczny jak dla odkształceń pionowych.

Zasady tworzenia modeli obliczeniowych

Adekwatny opis rzeczywistości symulowany w modelach numerycznych o odpowiedniej geometrii [1] powinien posiadać dwa poziomy odniesienia – badania laboratoryjne oraz badania in situ. W analizach numerycznych sygnałem zagrożenia bezpiecznej pracy układu konstrukcja - podłoże jest zazwyczaj osiągnięcie kresu sprężystej pracy któregoś z podukładów. W stanie in situ postać zniszczenia (wyczerpania nośności) układu

konstrukcja – podłoże zależy w dużej mierze od zachowania podłoża gruntowego [11]. W układzie konstrukcja drogowa-podłoże operujemy wartościami odkształceń pionowych ϵ_y (w gruncie, pod konstrukcją – rys. 8) bez porównania mniejszymi, aniżeli w przypadku fundamentów budowli. Prawidłowa ocena tych odkształceń wpływa bezpośrednio na ocenę wielkości ϵ_x σ_x w podbudowie oraz ϵ_x w spodzie warstw asfaltowych, a tym samym na ocenę trwałości konstrukcji nawierzchni [5] w mechanistycznych metodach projektowania.

W pracy analizę numeryczną przeprowadzono dwukrotnie: pierwszy raz – odwzorowując zachowanie materiału wszystkich warstw modelem konstytutywnym sprężystym (e) i drugi raz – przyjmując dla warstwy podbudowy model sprężysto-plastyczny z degradacją (e-p-d) [7,8]. Jest to model trzy-

parametrowy (gdzie przyjęte wartości α , β , γ podano na rysunku 9) z niestowarzyszonym prawem płynięcia o nieliniowym wzmocnieniu izotropowym typu dwu-mechanizmowego. Krótką ilustrację pracy modelu (e-p-d) w zakresie jednoosiowego ściskania i rozciągania oraz opisu zniszczenia materiału zachodzącego w tych stanach zawarto na rysunku 7a, b, c. Funkcje te zbudowano na podstawie wyników badań laboratoryjnych (rys. 6) zgodnie z zachowaniem betonów [9]. Więcej informacji o modelu (e-p-d) podano w [2,3]. Geometrię modelu obliczeniowego MES oraz przyjęte warunki brzegowe pokazano na rysunku 8a.

Wielokrotnej analizie poddano dwa układy obliczeniowe przedstawiające współpracę z podłożem gruntowym:

- 1) monitorowanej konstrukcji drogowej z rys. 1 (konstrukcja (I) na rysunku 8a),
- 2) konstrukcji bardziej wiotkiej (konstrukcja (II) na rysunku 8a).

W każdym przypadku w analizie zmianie ulegała miąższość warstwy (4) reprezentującej podłoże gruntowe. Przyjęte dane materiałowe podano: dla modelu (e) na rysunku 8b, dla modelu (e-p-d) na rysunkach 6 i 9. Obliczenia numeryczne przeprowadzono wykorzystując pakiety programów Abaqus oraz Z-Soil.

Wyniki - analizy sprężyste

Rysunek 8b przedstawia wybrane wyniki analiz w postaci funkcji (A) i (B), wyrażających współpracę konstrukcji drogowej i podłoża gruntowego; (A) – dla konstrukcji (I), (B) – dla konstrukcji (II). Funkcja bazowa (A) reprezentuje zachowanie prawidłowo zbudowanej drogi dojazdowej do hali logistycznej o obciążeniu ruchem KR6. Funkcja (B) odpowiada konstrukcji powstałej przez pocienienie warstwy (3), tzn. podbudowy z materiałów UPS. Podłoże gruntowe tworzą piaski średnie i drobne z nielicznymi wtrąceniami drobnych soczewek pyłów i glin. Zmienną w analizach numerycznych jest wartość h_p , obrazująca miąższość warstwy podłoża gruntowego. Funkcje (A) i (B) powstały na podstawie analiz (2D) przy wprowadzeniu obciążenia równoważnego(*) o wartości stałej $q=125$ kPa. (*) Za obciążenie równoważne uznano wartość obciążenia rozłożonego q , które w stanie (2D) wywołuje wartości odkształceń ϵ_x^i , ϵ_y^k oraz naprężenia σ_x^i możliwie najbliższe wartościom wyznaczanym w stanie osiowej symetrii (3D) dla rzeczywistej wartości q . Przykładowo, dla konstrukcji o warstwach zgodnych z konstrukcją (II) z rysunku 8a, na podłożu o nośności G1, przy wartości obciążenia $P=53$ kN otrzymujemy: $q^{(2D)}=750$ kPa, $\epsilon_y^k=1,204 \cdot 10^{-4}$, $\sigma_x^i=212,1$ kPa, $\epsilon_x^i=1,82 \cdot 10^{-5}$, oraz $q^{(2D)}=125$ kPa, $\epsilon_y^k=1,250 \cdot 10^{-4}$, $\sigma_x^i=200,8$ kPa, $\epsilon_x^i=1,00 \cdot 10^{-5}$.

Można zauważyć (rys. 8b), że poszuki-

wane wartości naprężeń i odkształceń σ_x, ε_x i ε_y stabilizują się przy określonej miąższości podłoża gruntowego h_p (tu przy wartości $h_p \geq 2$ m).

Dla podłoża opisanego modelem sprężystym jest to efekt jedynie numeryczny (występujący zarówno w analizach (2D) jak i (3D)), niezwiązany z rzeczywistym obszarem współpracy konstrukcji z podłożem gruntowym.

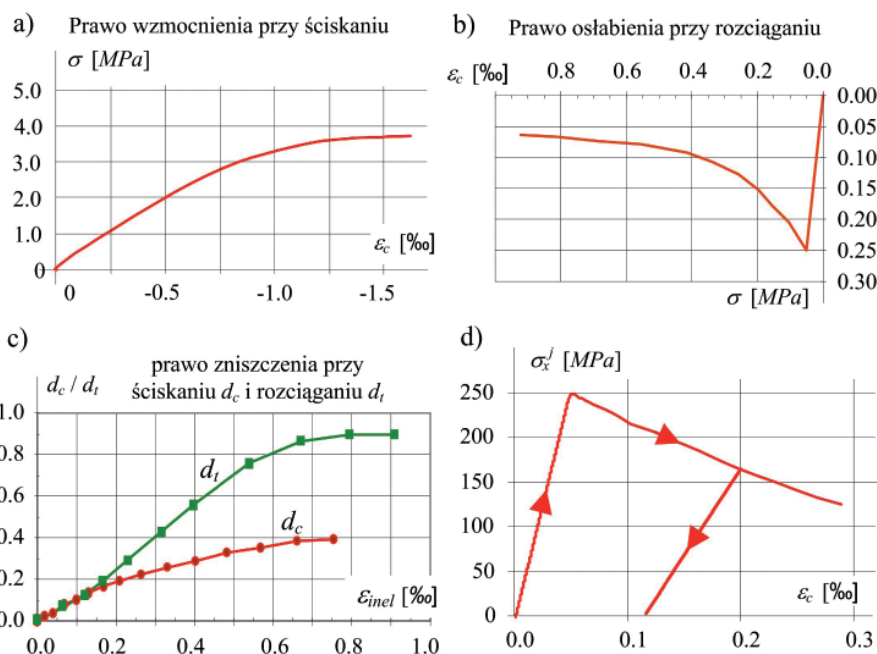
W pracy rozważono propozycję poszerzenia oceny zachowania konstrukcji w zakresie sprężystym o opis rzeczywistego zachowania materiału podbudowy półsztywnej, ulegającego degradacji sztywności. Funkcje degradacji (proste $\sigma_x^{\text{deg(I)}}$ i $\sigma_x^{\text{deg(II)}}$), przedstawione na rys. 8b, pozwalają na bezpośrednią, wizualną ocenę korzystnych, bądź niekorzystnych efektów wprowadzanych zmian w przekroju konstrukcji drogowej. Przykładowo funkcja (B) dla konstrukcji o pocienionej podbudowie reprezentuje konstrukcję niespełniającą warunków wymaganych dla KR 6. Obrazem tego jest przecięcie się funkcji (B) z funkcją degradacji, reprezentowanej (rys. 8b) przez prostą: $\sigma_x^{\text{deg(II)}}=180$ kPa (dla obciążenia $q=120$ kPa, przy $h_p=1$ m i $q=95$ kPa, przy $h_p=2,2$ m); gdzie $\sigma_x^{\text{deg(I)}}=250$ kPa (dla $q=210$ kPa, przy $h_p=1$ m i $q=178$ kPa, przy $h_p=2,2$ m).

Wyniki - analizy niesprężyste

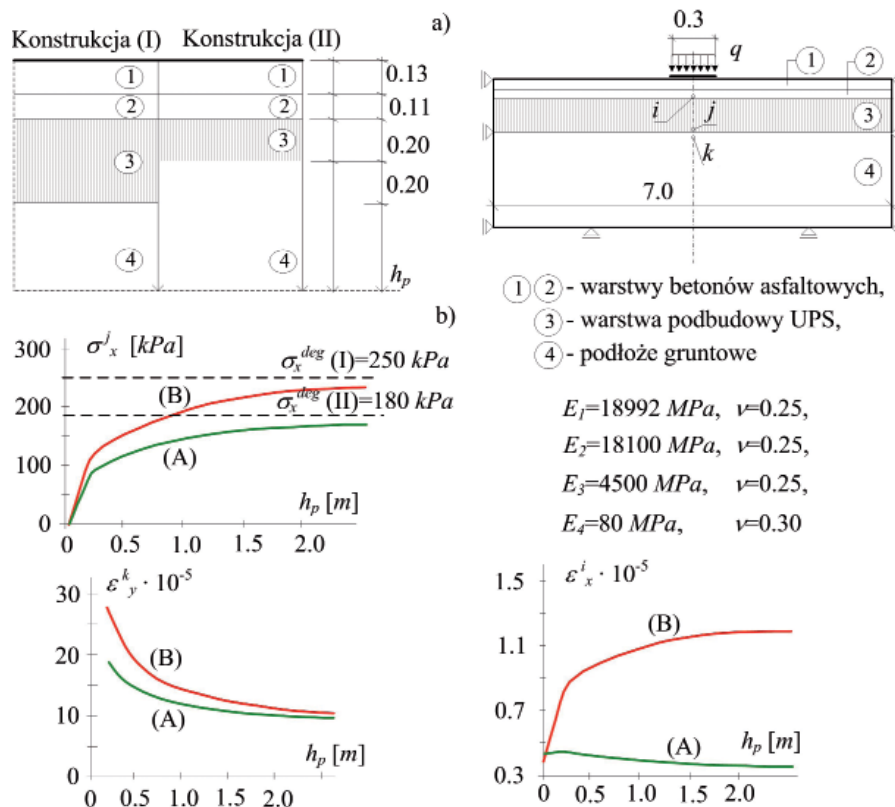
Przyjrzyjmy się teraz zachowaniu podbudowy, wykorzystując w analizie numerycznej pełne informacje o pracy materiału, wynikające z badań laboratoryjnych – rys. 6.

Na rysunku 9 pokazano wynik analizy numerycznej dla konstrukcji (I) z rysunku 8, w której warstwę podbudowy opisano modelem (e-p-d). Wykonano dwie symulacje pracy konstrukcji, przyjmując miąższość podkładu reprezentującego podłoże gruntowe $h_p=1,0$ m oraz $h_p=2,2$ m, co wynika z badań terenowych (rys. 4) oraz numerycznych (rys. 8). W wyniku przyrostowo realizowanego obciążenia otrzymujemy pierwsze sygnały pojawiającej się degradacji materiału przy obciążeniu $q=q_{\text{deg}}=210$ kPa dla symulacji pierwszej oraz $q=q_{\text{deg}}=178$ kPa dla symulacji drugiej; gdzie wartości $q>q_{\text{deg}}$ można potraktować jako „przeciążenie” konstrukcji.

Wynikiem analizy jest ocena możliwej degradacji podbudowy w badanej konstrukcji półsztywnej. Obrazem tego są ścieżki odpowiedzi obciążonego układu konstrukcja – podłoże. Przykładowo (rys. 7d) ścieżka w punkcie j pokazuje stan σ_x^j – ε_x^j towarzyszący wzrostowi obciążenia, aż do pojawienia się degradacji i osłabienia materiału (część opadająca ścieżki). Kolejny zwrot ścieżki towarzyszy częściowemu odciążeniu, do stanu $\sigma_x^j=0$, któremu towarzyszy trwale odkształcenie ε_x^j , część plastyczna i degradacyjna.



7. Opis pracy materiału podbudowy w modelu (e-p-d)



8. Numerycznie oceniany efekt współpracy konstrukcji drogowej i podłoża gruntowego

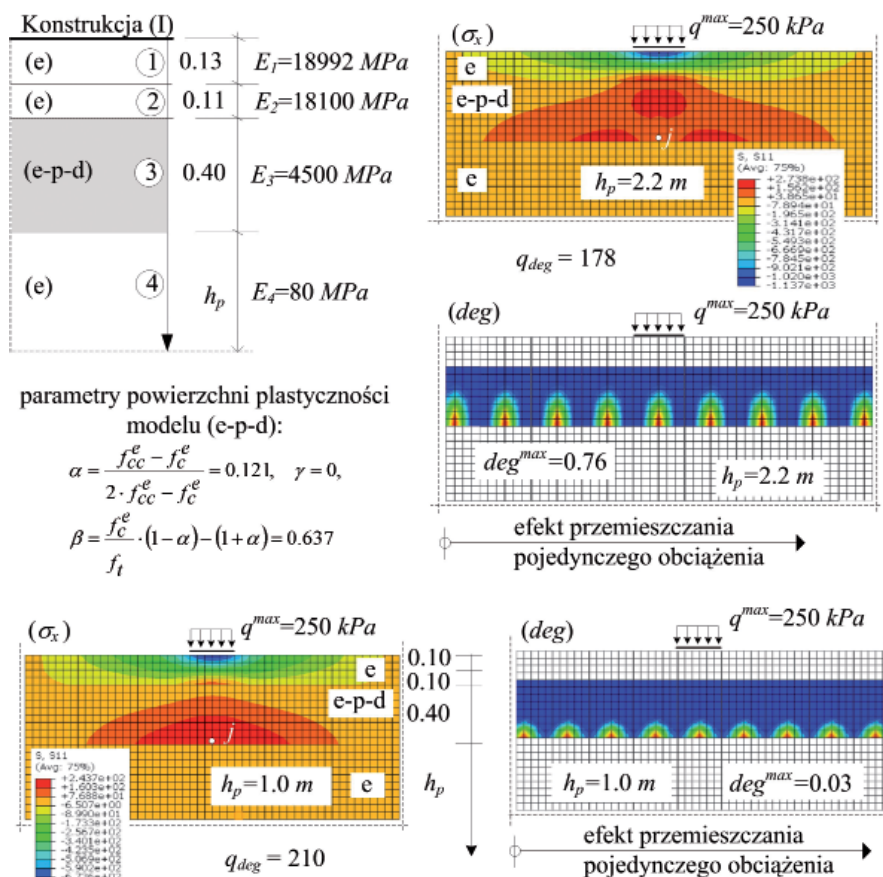
Powyższe doświadczenie potwierdza zasadność poszerzenia oceny w zakresie sprężystym o opis rzeczywistego zachowania materiału podbudowy półsztywnej, rozpatrywanego powyżej.

Wnioski

Podstawową rolę założonego systemu monitorowania [4,12] jest rejestracja zmian zachodzących w materiale pracującym

w obciążonej konstrukcji pod wpływem rzeczywistych warunków atmosferycznych oraz starzejącym się z upływem lat. Bieżącym zadaniem jest jednak „wspomaganie” informacjami utworzonego modelu obliczeniowego układu konstrukcja drogowa – podłoże gruntowe w celu jego wykalibrowania.

Przeprowadzone analizy pozwalają na sformułowanie wstępnych spostrzeżeń dotyczących pracy układu konstrukcja drogowa-



9. Ocena degradacji podbudowy w modelu (e-p-d)

podłoże gruntowe:

- 1) wartości odkształceń pionowych w górnej warstwie podłoża gruntowego pod obciążoną konstrukcją drogową ocenione w modelu (2D), przy obciążeniu zastępczym $q=125 \text{ kPa}$, dla miąższości podłoża $h_p=1.0 \text{ m}$ i wynoszące $\varepsilon_y=1.40 \cdot 10^{-4}$ (rys. 8), są zadowalająco bliskie wartościom pomierzonym w stanie in situ – równym $\varepsilon_y=1.74 \cdot 10^{-4}$ (rys. 3 – dla warunków letnich),
- 2) zasięg współpracującej obciążonej konstrukcji z podłożem gruntowym obserwuje się do głębokości ok. 1,0 m (rys. 4),
- 3) wartości odkształceń poziomych zmierzonych w podbudowie w stanie in situ (rys. 5) okazały się mniejsze od wartości ocenionych numerycznie ($\varepsilon_x=2.8 \cdot 10^{-5}$) dla materiału pracującego w zakresie sprężystym, czyli obciążenia q nie przekraczającego wartości 125 kPa. ◀

Podziękowania

Analizy numeryczne przeprowadzone były na ACK CYFRONET Kraków w ramach grantu MNISW/SGI3700/PŚląska/056/2010.

Materiały źródłowe

- [1] Fedorowicz L.: Zagadnienie kontaktowe budowla – podłoże gruntowe. Kryteria modelowania i analiz podstawowych zagadnień konstrukcja budowlana – podłoże gruntowe. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2006.
- [2] Fedorowicz L., Fedorowicz J., Kadela M.: Evaluation of road's pavement resistance of traffic-load KR4 of category in application of the elastic-plastic model with degradation. Proceedings on CD-ROM of the International Conference 70 Years of FCE STU, Slovakia, December 4 - 5, Bratislava 2008, p. 10
- [3] Fedorowicz L., Kadela M.: Zastosowanie modelu z degradacją w analizie układu warstwowego konstrukcji nawierzchni drogowej współpracującej z podłożem gruntowym. Górnictwo i Geoinżynieria, kwartalnik AGH Kraków, z. 1, 2009, s. 161-168.
- [4] Instrukcja nr 443. Bezdotykowe metody obserwacji i pomiarów obiektów budowlanych. Wydawnictwo ITB, Warszawa 2009
- [5] Kadela M.: Rola modelu obliczeniowego układu konstrukcja warstwowa – podłoże w ocenie trwałości konstrukcji drogowej. Monografia „Badania i analizy wybranych zagadnień z dziedziny budownictwa” Praca zbiorowa pod redakcją Joanny Bzówki. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011, s. 79-86
- [6] Katalog wzmocnień i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych. Wydawnictwo IBDM, Warszawa, 2001
- [7] Lee J., Fenves G. L.: A Plastic-Damage Concrete Model for Earthquake Analysis of Dams. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 27, 1998, p. 937-956
- [8] Lubliner J., Oliver J., Oller S., Oñate E.: A Plastic-Damage Model for Concrete. Int. Journal of Solids and Structures, vol. 25, 1989, p. 299-329
- [9] Maekawa K., Pimanmas A., Okamura M.: Nonlinear mechanics of reinforced concrete. Spoon Press Taylor and Francis Group, London and New York 2003
- [10] Szydło A.: Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego. Teoria. Wymiarowanie. Realizacja. Wydawnictwo Polski Cement Sp. z o.o., Kraków, 2004
- [11] Whitlow R.: Basic Soil Mechanics. Logman Group Limited, Edinburgh Gate 1995
- [12] www.neostrain.pl