

MODEL OBLICZENIOWY UKŁADU KONSTRUKCJA WARSTWOWA – PODŁOŻE GRUNTOWE ZGODNIE Z EC7

Marta Kadela¹, Lidia Fedorowicz²

¹Instytut Techniki Budowlanej Oddział Śląski, Katowice

²Politechnika Śląska, Gliwice

Streszczenie. W artykule przedstawiono zasady tworzenia modelu obliczeniowego warstwowej konstrukcji drogowej współpracującej z podłożem gruntowym, zgodnie z wymaganiami EC7. Przedstawiono również możliwość adekwatnego odtworzenia zachowania podłoża gruntowego przy przyjęciu odpowiednich związków konstytutywnych do opisu zachowania poszczególnych warstw układu.

Słowa kluczowe: konstrukcje drogowe, model obliczeniowy, związki konstytutywne

WSTĘP

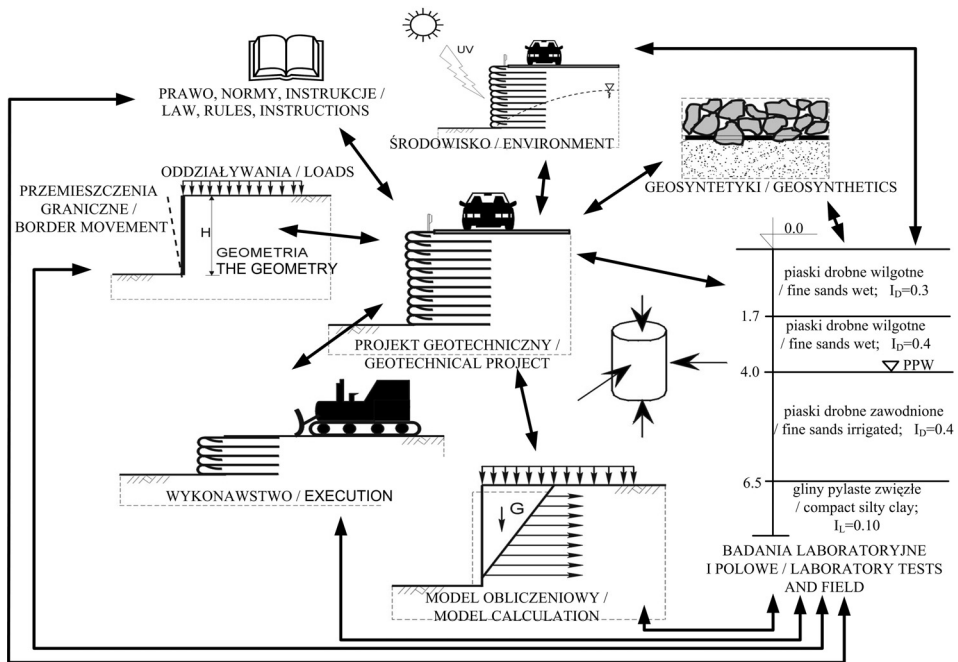
Rozważając możliwość wiarygodnej oceny pracy konstrukcji drogowej w numerycznym modelu obliczeniowym, należy zwrócić uwagę na silne sprzężenie odpowiedzi konstrukcji z zachowaniem podłoża gruntowego, co upoważnia nas do odwołania się do procedury stosowanej przy projektowaniu geotechnicznym. Wzajemne powiązania elementów procesu projektowania (zgodnie z EC7-1 [PN-EN 1997-1]) pokazuje przykładowy rysunek 1.

Zasadniczym problemem przedstawianym w pracy jest odpowiedniość opisu zagadnienia kontaktowego warstwowa konstrukcja drogowa – podłoże gruntowe, rozważana w dwóch aspektach:

- podejścia praktycznego, korzystającego z analiz typu klasycznego,
- podejścia zgodnego z EC7-1, wykorzystującego analizy numeryczne, bazujące zarówno na badaniach *in situ*, jak i badaniach laboratoryjnych.

Adres do korespondencji – Corresponding author: Marta Kadela, Instytut Techniki Budowlanej Oddział Śląski, Zakład Elementów Konstrukcji Budowlanych i Budownictwa na Terenach Górniczych, Pracownia Budownictwa na Terenach Górniczych, al. Korfantego 191, 40-153 Katowice, e-mail: m.kadela@itb.pl

Lidia Fedorowicz, Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa, Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice, e-mail: lidia.fedorowicz@polsl.pl



Rys. 1. Proces projektowania geotechnicznego [PN-EN 1997-1]

Fig. 1. Process of the geotechnical designing [PN-EN 1997-1]

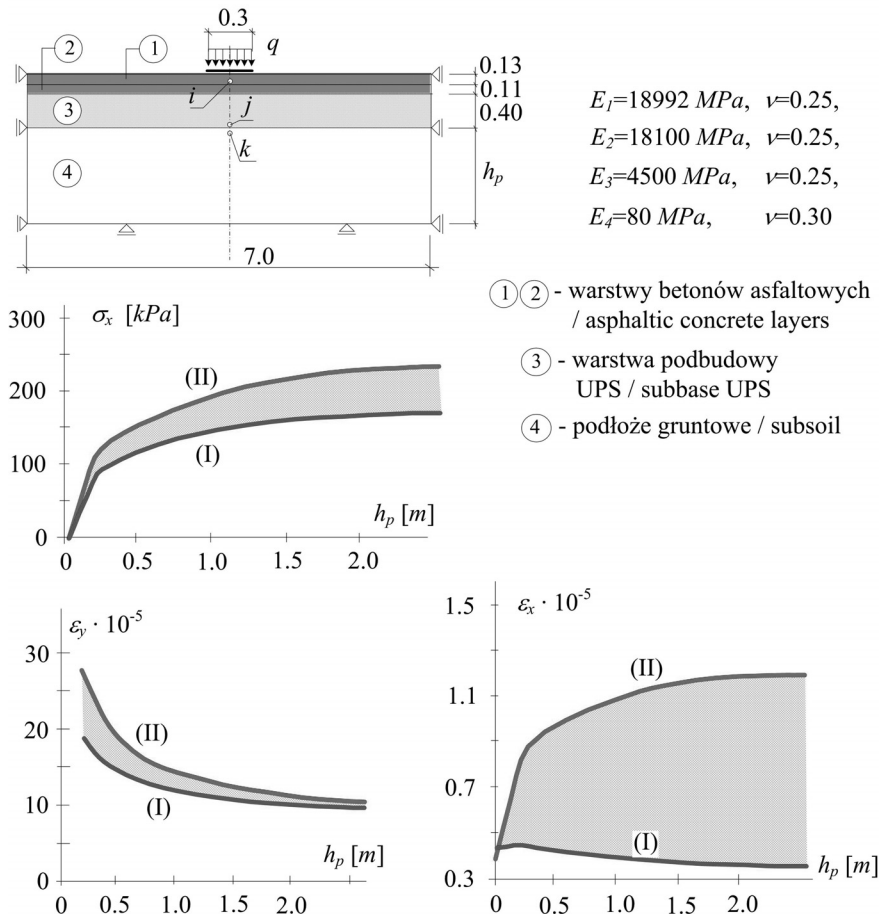
Podjęcie pierwsze zilustrowano opisem zachowania badanego układu konstrukcja drogowa – podłoże gruntowe, w którym zastosowano związki liniowej sprężystości. Z kolei pojęcie adekwatnego modelowania zostało użyte w podejściu drugim, głównie dla podkreślenia wymogu zapewnienia przez podkład, reprezentujący w modelu obliczeniowym obciążone konstrukcją podłoże gruntowe, możliwie najwierniejszego opisu zachowania tego podłoża w warunkach *in situ* – zgodnego z wynikami badań terenowych, a także niesprzecznego z opisem odpowiedzi gruntu na złożone ścieżki naprężenia rejestrowane we współczesnych badaniach laboratoryjnych, w przedziale małych i bardzo małych odkształceń [Gryczmański i Uliniarz 2008].

ZASADY TWORZENIA MODELI OBLICZENIOWYCH – EFEKT STOSOWANIA SPRĘŻYSTOŚCI

Przedstawiając problem, ogólnie można powiedzieć, że wiarygodny opis rzeczywistości symulowany w modelach numerycznych o odpowiedniej geometrii [Fedorowicz 2006] powinien posiadać dwa poziomy odniesienia – badania laboratoryjne oraz badania *in situ*. W analizach numerycznych sygnałem zagrożenia bezpiecznej (bezawaryjnej) 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

[Whitlow 1995]. W układzie konstrukcja drogowa – podłoże operujemy wartościami odkształceń pionowych (ϵ_y), rozpatrywanych w gruncie, pod konstrukcją (rys. 2), bez porównania mniejszymi aniżeli w przypadku fundamentów budowli. Prawidłowa ocena tych odkształceń wpływa bezpośrednio na ocenę wielkości σ_x (ϵ_x) w podbudowie oraz ϵ_x w spodzie warstw asfaltowych, a tym samym na ocenę trwałości konstrukcji nawierzchni [Kadela 2012] w mechanistycznych metodach projektowania [Kukielka i Szydło 1986, Judycki 1995, 1996, Szydło 2004].

Rysunek 2 przedstawia wybrane wyniki analiz w postaci funkcji wyrażających współpracę rzeczywistej półsztywnej konstrukcji drogowej z podłożem gruntowym. Funkcja bazowa (I) reprezentuje zachowanie badanej drogi dojazdowej do kompleksu hal magazynowych o obciążeniu ruchem KR4. Poligon badawczy (rys. 3b) stanowi omiernikowany fragment drogi dojazdowej do kompleksu hal magazynowych.



Rys. 2. Numerycznie oceniany efekt współpracy konstrukcji drogowej i podłoża gruntowego
 Fig. 2. Numerically evaluated of the effect of interaction road structures and subsoil

Zmiany wartości ε_x , ε_y , σ_x (czyli wielkości wchodzących w kryteria zmęczeniowe przy projektowaniu konstrukcji nawierzchni) zależne są od zmian miąższości podukładu reprezentującego podłoże gruntowe w modelu obliczeniowym (warstwa 4 na rys. 2).

Zaszraflowana przestrzeń poniżej lub powyżej funkcji (I) obrazuje wrażliwość układu na zmiany grubości podbudowy, gdzie odpowiedź układu odpowiadająca funkcji (II) wynika z pocienienia podbudowy o 50%.

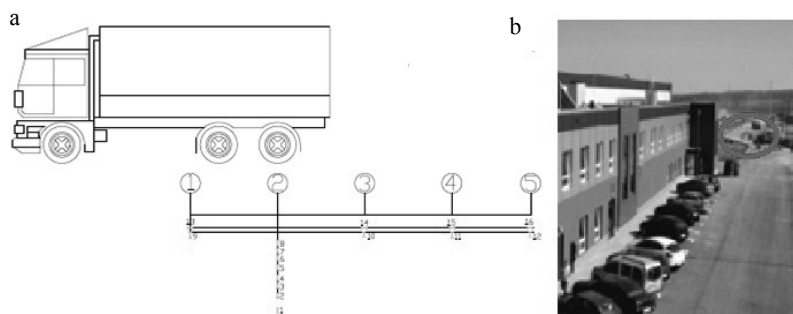
„Zaniżenie” miąższości podukładu reprezentującego podłoże w modelu sprężystym wpływa natomiast bezpośrednio na wartości kryterialne, a tym samym na ocenę trwałości nawierzchni. Należy tu zwrócić uwagę, że funkcje (I) i (II) powstały na podstawie analiz (2D) przy wprowadzeniu obciążenia zastępczego o wartości $q = 125$ kPa [Kadela 2012].

Podsumowując, możemy stwierdzić, że wykorzystując w postępowaniu mechanicznym ciągły, sprężysty model podłoża, należy przyjmować wartości ustalone wyznaczanych funkcji kryterialnych, aby nie popełnić błędu przeszacowania ocenianej trwałości nawierzchni.

UOGÓLNIENIE PROBLEMÓW MODELOWANIA PODŁOŻA GRUNTOWEGO W UKŁADACH KONSTRUKCJA DROGOWA – PODŁOŻE GRUNTOWE

Rysunek 3 przedstawia ogólny widok poligonu badawczego oraz rozmieszczenie czujników na poligonie. Czujniki (typ Geokon 4200 i Geokon 4200HT [Kadela 2012]) zostały założone w śladzie prawego koła drogi dojazdowej, na określonych głębokościach w celu dokonania pomiarów: odkształceń pionowych w podłożu gruntowym, odkształceń poziomych w spodzie warstwy podbudowy oraz odkształceń poziomych w spodzie warstw asfaltowych.

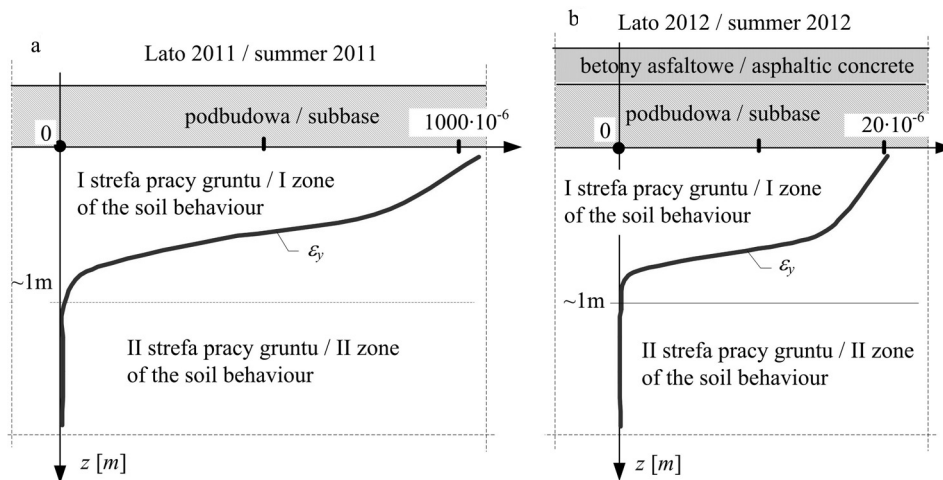
Badane podłoże do głębokości rozpoznanej wierceniami (8,0 m p.p.t.) budują utwory czwartorzędowe akumulacji rzecznej. W obszarze poligonu badawczego podłoże stanowią piaski średnie i drobne z nielicznymi wtrąceniami drobnych soczewek pyłów i glin. Dla tak jednorodnego podłoża gruntowego otrzymywany obraz odpowiedzi na obciążenie jest bardzo czytelny. Pozwala to na dokonanie pewnych uogólnień opisanych dla dwóch wybranych i przedstawionych poniżej reprezentatywnych zapisów pracy badanego układu.



Rys. 3. a – Rozmieszczenie czujników na poligonie badawczym, b – ogólny widok drogi dojazdowej, której fragment (zaznaczony kółkiem) stanowi poligon badawczy

Fig. 3 a – Location of sensors on the testing ground, b – overview of testing ground, which is a part (marked circle) of the access road

Rysunek 4 przedstawia zarejestrowany obszar odpowiedzi podłoża gruntowego na określone obciążenie przekazywane z tylnej osi pojazdu na przekrój 2 z rysunku 3a za pośrednictwem podbudowy, bez warstw betonów asfaltowych (lato 2011 – rys. 4a) oraz pełnej konstrukcji (lato 2012 – rys. 4b).



Rys. 4. Odpowiedź podłoża pod nawierzchnią: a – w lecie 2011, b – w lecie 2012

Fig. 4. Response of subsoil under the pavement: a – in summer 2011, b – in summer 2012

We wszystkich zarejestrowanych w badaniach *in situ* odpowiedziach podłoża na obciążenie (opisywanych wartościami odkształceń pionowych) wydzielić można zdecydowanie dwie strefy wpływu obciążenia na zachowanie gruntu:

- I strefę pracy podłoża pod konstrukcją drogową, za którą można uznać obszar odkształceń pojawiających się w strefie bezpośredniego kontaktu podłoża z konstrukcją (w strefie „aktywnej” pracy gruntu) o zasięgu około 1,0 m,
- II strefę pracy podłoża pod konstrukcją drogową, czyli obszar odkształceń, których wartości można zakwalifikować jako wchodzące w przedział bardzo małych odkształceń; zasięg rejestrowanego oddziaływania sięga do około 2,0 m.

W I strefie, „aktywnej” pracy gruntu, zarejestrowano zjawisko zagęszczania gruntu zachodzące w wyniku ruchu pojazdów. Rysunek 4 jest obrazem ustalonej już odpowiedzi podłoża, powstałej po zakończeniu procesu zagęszczania gruntu.

Pomimo wystąpienia możliwego do zarejestrowania w badaniach *in situ* zjawiska wzmocnienia gruntu, zachodzącego pod wpływem obciążeń cyklicznych (dokładniej powtarzających się), nie istnieje na razie możliwość jego bezpośredniego odniesienia do badań dotyczących piasków [Świdziński 2006], m.in. z uwagi na brak rejestracji odkształceń poziomych w podłożu. Wyniki badań pozwalają natomiast na zadowalającą interpretację pracy gruntu pod konstrukcją drogową i na stwierdzenie, że zarejestrowana odpowiedź jest obrazem zmian sztywności gruntu (zmieniającej się od wartości bardzo dużych w II strefie do wartości „inżynierskich” bezpośrednio pod konstrukcją), sprzęgniętych z powstającym pod konstrukcją stanem odkształcenia.

Można już na tym etapie badań stwierdzić, że w analizach mechanistycznych stosujących model sprężysty do opisu pracy podłoża „wewnętrzny” obraz odpowiedzi gruntu na obciążenie przekazywane z konstrukcji drogowej jest obrazem całkowicie różnym od obrazu rejestrowanego w badaniach *in situ*.

Bazując na doświadczeniach wynikających z badań *in situ* (przykładowo rys. 4) oraz biorąc pod uwagę wcześniejsze doświadczenia [Fedorowicz 2006], można stwierdzić, że realne jest wprowadzenie w postępowaniu mechanistycznym analiz bazujących na niesprężystych modelach pracy gruntu, które w sposób realny sprzęgają powstający pod konstrukcją stan naprężenia ze zmianami objętościowymi gruntu.

W związku z powyższym przeprowadzono próbę odtworzenia rzeczywistego zachowania podłoża gruntowego w bazowym modelu stanu krytycznego MCC o silnie nieliniowej macierzy podłoża.

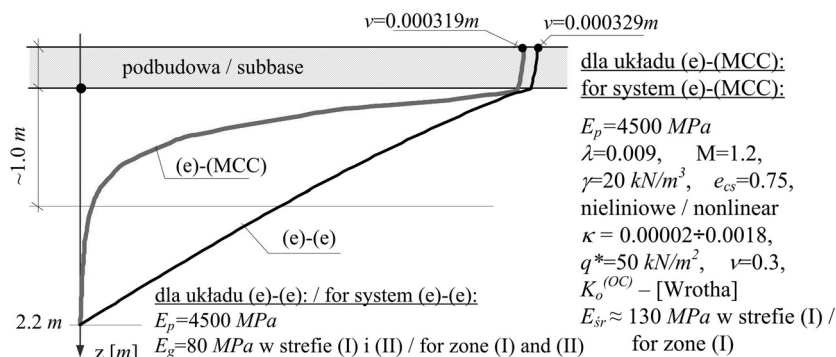
Efekt wykonanych analiz pokazano dla układu z rysunku 4a, przedstawiając rozkład funkcji przemieszczeń pionowych w podłożu pod konstrukcją:

- dla układu modelowanego całkowicie sprężysto (e)–(e),
- dla układu (e)–(MCC), z zastosowaniem modelu sprężystego dla warstwy podbudowy oraz modelu stanu krytycznego Modified Cam-Clay dla gruntu.

Na rysunku 5 pokazano wprowadzone do obliczeń parametry modelu (MCC), dające:

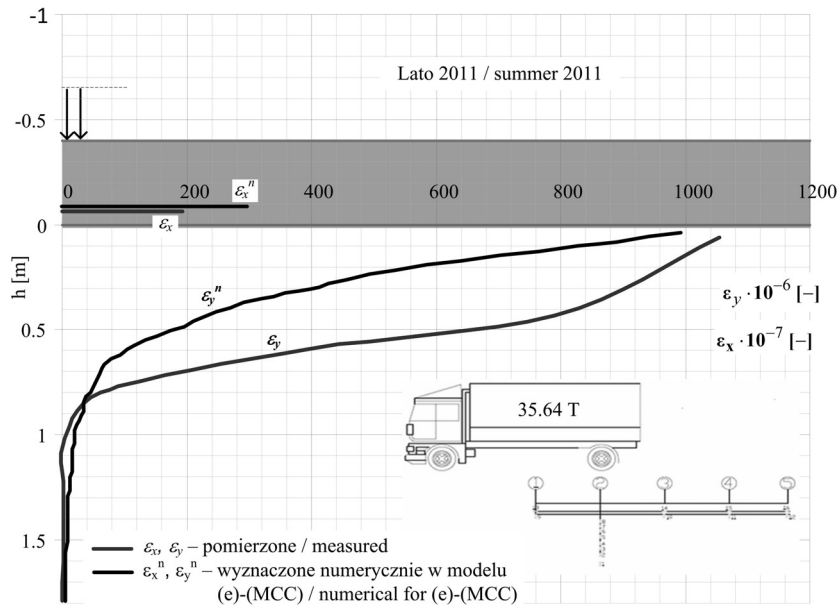
- zgodność przemieszczeń pod konstrukcją w obu modelach obliczeniowych (e)–(e) i (e)–(MCC),
- rozkład przemieszczeń (rys. 5),
- rozkład odkształceń (rys. 6) odpowiadający I i II strefie pracy gruntu, zgodnie z obserwacjami *in situ* (rys. 4).

Rysunek 5 można uznać za obraz zadowalająco wykalibrowanego modelu obliczeniowego (e)–(MCC). Pełny obraz pracy obu podukładów przedstawia rysunek 7.



Rys. 5. Przemieszczeniowa odpowiedź podłoża dla układu opisanego modelami (e)–(e) i (e)–(MCC)

Fig. 5. Displacement response of subsoil in (e)–(e) and (e)–(MCC) model



Rys. 6. Odształceniowa odpowiedź układu oceniona w modelu (e)-(MCC), tło stanowią wartości pomierzone

Fig. 6. Strain response of system assessed in model (e)-(MCC), the measured strain values are given

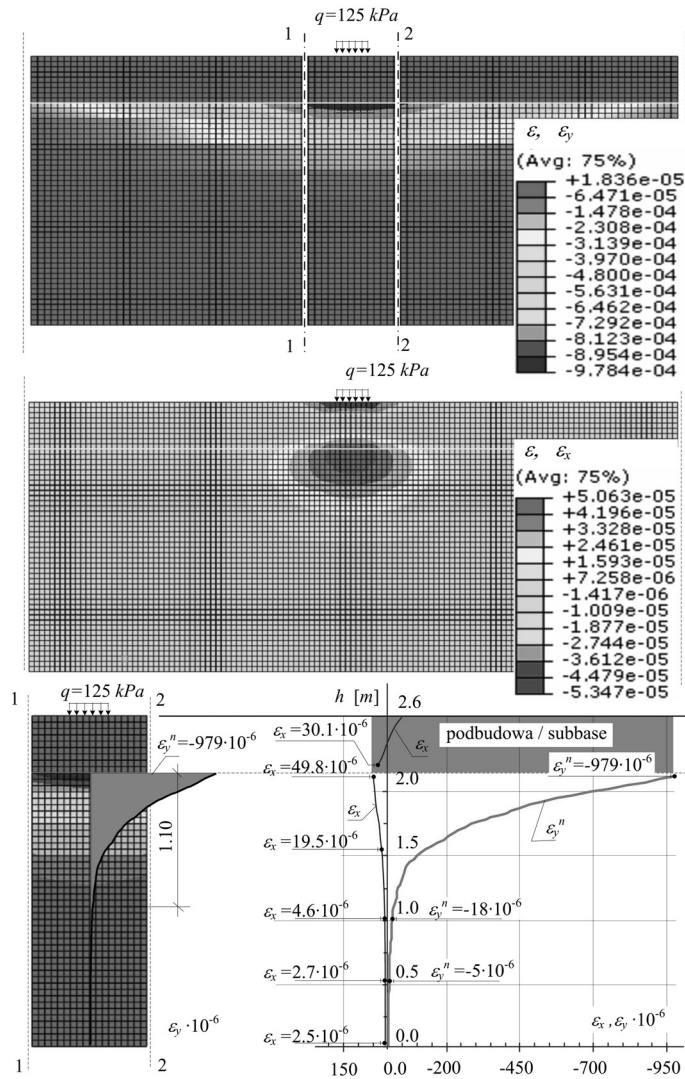
PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania *in situ* i wynikające z nich doświadczenia upoważniają, zdaniem autorek pracy, do podjęcia próby odpowiedzi na pytanie o konsekwencje uproszczeń w modelowaniu mechanicznym, wprowadzających do opisu pracy podłoża gruntowego model sprężysty.

Należy zwrócić jednak uwagę, że dysponowanie wynikami badań *in situ* nie rozwiązuje w sposób automatyczny problemu budowy adekwatnego modelu obliczeniowego układu konstrukcja – podłoże gruntowe. Pomierzony obszar współpracy może bowiem zostać jednoznacznie odtworzony (co do zasięgu i „intensywności” odpowiedzi) jedynie przy zastosowaniu odpowiedniego konstytutywnego opisu zachowania gruntu.

Porównując definicję podłoża określoną w PN-EN 1997-1 i Wytycznych... [2002] z wynikami obserwacji *in situ*, łatwo można popełnić błąd, uznając, że możemy w modelu sprężystym podłoża uwzględnić jedynie I strefę (z pominięciem II strefy małych odkształceń. „Zredukowanie” w modelu miąższości obszaru podłoża do wartości $h_p=1,0$ m daje w konsekwencji:

- wszystkie niezadowolające zachowania podłoża obserwowane ogólnie w sprężystości (niezależnie od wartości h_p),
- odpowiedź jak dla podłoża sztywniejszego – sztucznie zeszywnianego w skutek ograniczenia go warunkami brzegowymi na krawędzi dolnej.



Rys. 7. Odpowiedź numeryczna układu konstrukcja drogowa – podłoże opisana modelami (e)–(MCC)*

Fig. 7. Numerical response of the road structure – subsoil system in model (e)–(MCC)

W przypadku natomiast, gdy nie można posłużyć się zaawansowanym opisem pracy podłoża (ze względu na przykład na brak parametrów gruntu, których wyznaczenie wymaga zaawansowanych badań), to podejściem optymalnym, a zarazem bezpiecznym jest zbudowanie modelu obliczeniowego, w którym wyznaczone mogą zostać funkcje kryterialne osiągające wartości ustalone (rys. 2).

*Rys. 7 w kolorze na wkładce po stronie 184.

PIŚMIENNICTWO

- Cichy W., 2004. Geotechnika w budownictwie drogowym. Geoinżynieria 1, 36–42.
- Fedorowicz L., 2006. Zagadnienia kontaktowe budowla – podłoże gruntowe. Część I: Kryteria modelowania i analiz podstawowych zagadnień kontaktowych konstrukcja budowlana – podłoże gruntowe. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 1729, Gliwice.
- Gryczmański M., Uliniarz R., 2008. A simple critical state model with small strain nonlinearity for overconsolidated soils. Foundations of Civil and Environmental Engineering 49–60.
- Judycki J., 1995. Zasady wymiarowania konstrukcji nawierzchni. Materiały konferencyjne Międzynarodowego Seminarium „Trwale i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, Kielce, 17–33.
- Judycki J., 1996. Mechanistyczne metody projektowania podatnych i półsztywnych konstrukcji nawierzchni drogowych. Drogownictwo 6, 167–180.
- Kadela M., 2012. Kryteria modelowania i analiz konstrukcji warstwowych współpracujących na podłożu gruntowym. Rozprawa doktorska, Gliwice.
- Kukielka J., Szydło A., 1986. Projektowanie i budowa dróg. Zagadnienia wybrane. WKŁ, Warszawa.
- PN-87/S/02201 Drogi samochodowe. Nawierzchnie drogowe. Podział, nazwy, określenia.
- PN-EN 1997-1 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- Szydło A., 2004. Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego. Teoria. Wymiarowanie. Realizacja. Wydawnictwo Polski Cement Sp. z o. o., Kraków.
- Świdziński W., 2006. Mechanizmy zagęszczania i upłynniania gruntów sypkich. Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk.
- Whitlow R., 1995. Basic Soil Mechanics. Logman Group Limited, Edinburgh Gate.
- Wytyczne wzmocnienia podłoża gruntowego w budownictwie drogowym, 2002. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa.

CALCULATION MODEL OF THE LAYERED STRUCTURE – SUBSOIL ACCORDING EC7

Abstract. The paper describes the principle of creating a computation model of the layered road structure cooperating with subsoil; according with rules of EC7. There were presented different approaches to description of the subsoil behaviour, tested *in situ*. Ground behaviour in numerical system road structure – subsoil was evaluated using the Modified Cam-Clay model.

Key words: calculation model, constitutive relationships, layered structure

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 22.07.2013