

Lidia Fedorowicz*, Jan Fedorowicz**, Marta Kadela***

PROBLEMY WŁAŚCIWEJ INTERPRETACJI WYNIKÓW ANALIZ UKŁADÓW KONSTRUKCJA–PODŁOŻE GRUNTOWE

1. Wprowadzenie

O wytrzymałości geomateriałów decyduje ich wytrzymałość na ścinanie. W przypadku masywów gruntowych o ich nośności i wytrzymałości decyduje zarówno wytrzymałość jak i ściśliwość. Jeżeli obie te cechy chcemy właściwie ująć w modelu numerycznym to o adekwatności uzyskanego opisu w dużej mierze będą decydowały zastosowane związki konstytutywne oraz geometria utworzonego modelu obliczeniowego. Zatem z potrzeby możliwie adekwatnego opisu badanego zagadnienia powinna wynikać odpowiednia budowa modelu obliczeniowego. Ujmując problem bardzo ogólnie można powiedzieć, że potrzeba opisu i odtworzenia badanej rzeczywistości może zachodzić na różnych poziomach:

- 1) badań elementowych — rozumianych tu jako rzeczywiste laboratoryjne, lub wirtualne (numeryczne) badania zachowania ogólnie geomateriału dla różnych stanów naprężenia i odkształcenia,
- 2) analiz zachowania podłoża, w odniesieniu do badań prowadzonych w stanie *in situ*, oraz
- 3) opisu zachowania rzeczywistych układów konstrukcja budowlana — podłoże gruntowe.

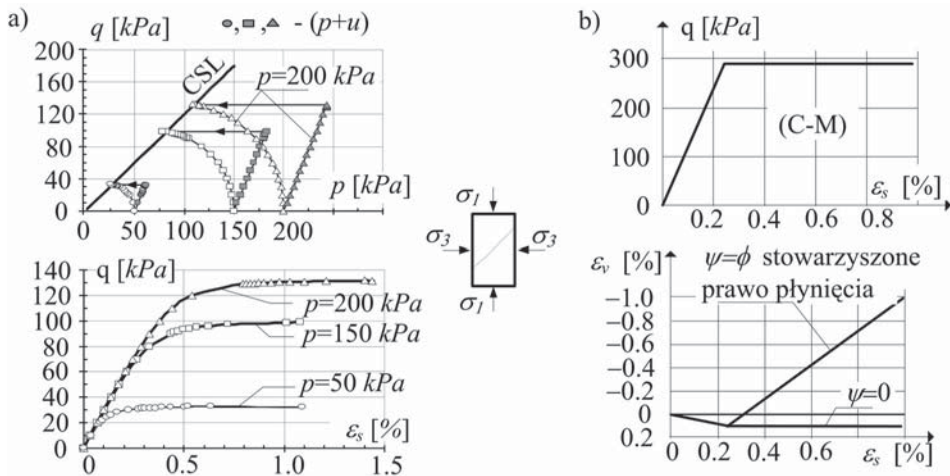
Na poziomie badań elementowych (1) numeryczne odtworzenie obserwacji wymaga odpowiednio rozbudowanego opisu konstytutywnego.

Przykładowo, na rysunku 1a pokazano zachowanie próbki gruntu w teście trójosiowego ściskania bez drenażu, odtworzone przez autorów w modelu Modified Cam–Clay (MCC). Rysunek 1b, potraktowany jako „tło” dla powyższego pokazuje niemożność korzystania ze sprężysto idealnie-plastycznego modelu Coulomba–Mohra (C–M) w analizach badawczych typu (1). Wiarygodność analiz zagadnień typu (2) i (3) jest natomiast związana nie tylko z doбором modeli konstytutywnych, ale także z problemem wprowadzenia warunków brze-

* Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli, Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, Gliwice

** Katedra Teorii Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, Gliwice

*** Katedra Geotechniki, Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, Gliwice



Rys. 1. a) Numeryczny test zachowania gruntu (NC) w badaniach trójosiowych; model (MCC),
b) charakterystyki ścinania i dylatacji w modelu (C-M)

gowych analizowanego obszaru w sposób odpowiednio uzasadniony. Ogólnie można stwierdzić, że jakość analiz numerycznych jest często obarczona brakiem jednoznacznych warunków przejścia zagadnienia brzegowego — reprezentującego badanie *in situ*, do zadania brzegowego — reprezentującego rzeczywisty układ konstrukcja — podłoże gruntowe [1].

Zagadnienia (typu (3)), przedstawione w kolejnych rozdziałach rozważane były z punktu widzenia analizy procesu progresywnego zniszczenia, dotyczącego bądź:

- 1) całego układu konstrukcja–podłoże, lub też
- 2) bezpośrednio konstrukcji współpracującej z podłożem gruntowym.

Powyższe analizy były próbą odpowiedzi na pytanie, kiedy numeryczny model obliczeniowy, wykorzystujący bazowy sprężysto idealnie-plastyczny opis konstytutywny Coulomba–Mohra zapewnia bezpieczną inżynierską ocenę zagrożenia zniszczeniem:

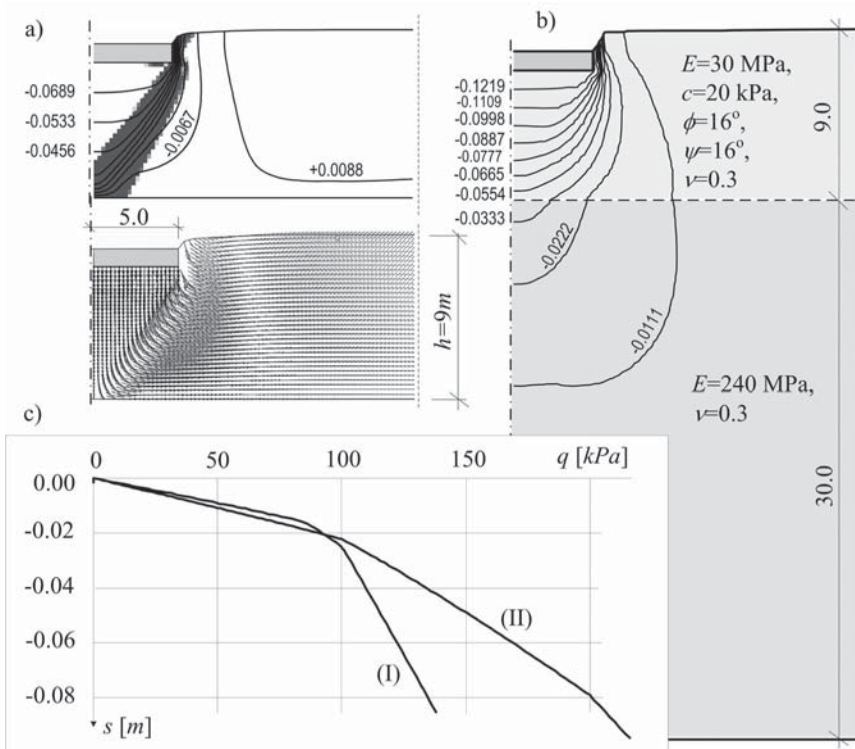
- w przypadku pierwszym — utratą nośności układu konstrukcja–podłoże; z równoczesnym wiarygodnym obrazem postaci rozwijającego się zniszczenia,
- w przypadku drugim — postępującą degradacją sztywności drogowej konstrukcji warstwowej współpracującej z podłożem gruntowym (wynikającej z postępującego niszczenia podbudowy); gdzie zniszczenie, nośność oraz trwałość konstrukcji są w przypadku tym bezpośrednio ze sobą związane.

W obu powyższych problemach pokazano, jaki wpływ ma budowa geometryczna modelu obliczeniowego na otrzymywane rezultaty oraz przedstawiono wnioski wynikające z analiz.

2. Numeryczna ocena zachowania układu konstrukcja–podłoże zagrożonego utratą nośności

W stanie *in situ* tzw. ogólna postać zniszczenia ma miejsce, gdy pod konstrukcją tworzą się powierzchnia lub powierzchnie poślizgu, rozwijające się i osiagające ostatecznie po-

wierzchnię terenu, a zniszczenie jest nagłe, połączone z wychyleniem konstrukcji. Zniszczenie lokalne natomiast, sygnalizowane jest znaczącymi przemieszczeniami pionowymi konstrukcji, poprzedzającymi rozwój powierzchni ścinania i przypisywane jest gruntom ściśliwym [2]. W analizach numerycznych natomiast — w przypadku zastosowania do opisu zachowania gruntu modelu Coulomba–Mohra, podstawowego z punktu widzenia inżynierskiego — sygnałem zagrożenia bezpiecznej pracy układu konstrukcja–podłoże gruntowe jest zazwyczaj osiągnięcie kresu sprężystego zachowania materiału w niepokojąco dużym obszarze obciążonego podłoża. Ponieważ w stanie rzeczywistym postać zniszczenia zależy głównie od ściśliwości grunty, to wszystko wskazuje na to, że uzyskanie odpowiedniej numerycznej postaci zniszczenia wiąże się ściśle z problemem oceny wiarygodnego obszaru współpracy konstrukcji z podłożem gruntowym; prościej odpowiedniej miąższości podukładu reprezentującego podłoże w zastosowanym modelu obliczeniowym — rysunek 2.



Rys. 2. a) Analiza (I), obszar uplastycznienia oraz obraz wypierania gruntu dla obciążenia $q=160\text{ kPa}$, b) analiza (II), c) funkcje q - s dla postaci zniszczenia w analizie (I) i (II)

Przykładem potwierdzającym powyższe stwierdzenie może być przedstawiona analiza (2D) zachowania układu fundament–podłoże w postaci warstwy gruntu o miąższości 9 m i następujących parametrach fizyczno-mechanicznych: $E_o = 30\text{ MPa}$, $\phi = 16^\circ$, $c = 20\text{ kPa}$, $\nu = 0,3$. Poniżej tej warstwy zalega grunt, który z uwagi na wartości modułów $E_o = 120\div 240\text{ MPa}$ uzna-

no w pierwszej wersji analizy (I) za dostatecznie sztywny, aby tworzył dolne brzegowe warunki podparcia w zadaniu brzegowym z rysunku 2a. W wersji drugiej (II) zbudowano model „pełny” uwzględniający deformacje pionowe sztywnego ($E_o = 240$ MPa) obszaru podłoża, rysunek 2b.

Otrzymane dla obu ujęć numerycznych (I) i (II) obrazy osiadań konstrukcji sugerują możliwość różnych postaci zniszczenia — rysunek 2c:

- w analizie (I), w przypadku warstwy na podłożu ocenionym jako sztywne, ogólna postać zniszczenia połączona z wypieraniem gruntu spod fundamentu ukazuje zagrożenie układu szybką utratą nośności,
- w analizie (II) uwzględnienie obszaru sztywnego pod warstwą ściśliwą daje obraz „monotonnie” rosnących przemieszczeń pionowych konstrukcji, sugerując lokalną postać zniszczenia układu.

3. Numeryczna ocena zachowania układu konstrukcja warstwowa–podłoże zagrożonego spadkiem trwałości konstrukcji

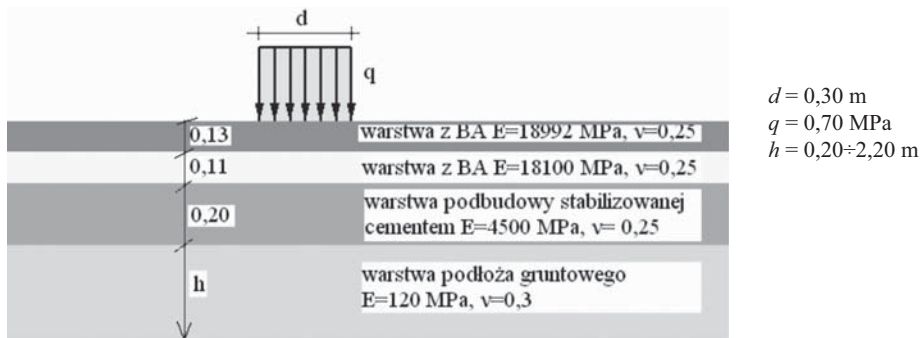
Badając tak specyficzną konstrukcję, jaką jest konstrukcja drogowa współpracująca z podłożem gruntowym wiemy, że powinna ona być tak zaprojektowana i wykonana, by posiadała odpowiednią trwałość w zamierzonym okresie użytkowania. Obserwujemy wyraźny wpływ miąższości podłoża w modelu obliczeniowym na odpowiedź obciążonego modelu w postaci ugięć maksymalnych i wielkości wchodzących do kryteriów zmęczeniowych. Dla przyjętej do analizy konstrukcji drogi półsztywnej są to wielkości:

- 1) odkształcenie poziome (rozciągające) ε_x wyznaczane w spodzie warstw asfaltowych (w kryterium spękań warstw asfaltowych),
- 2) odkształcenie (naprężenie) poziome w spodzie warstwy podbudowy (w kryterium spękań zmęczeniowych dla podbudów związanych spoiwami hydraulicznymi), oraz
- 3) odkształcenie pionowe ε_v w górnej warstwie podłoża gruntowego (w kryterium deformacji strukturalnych),

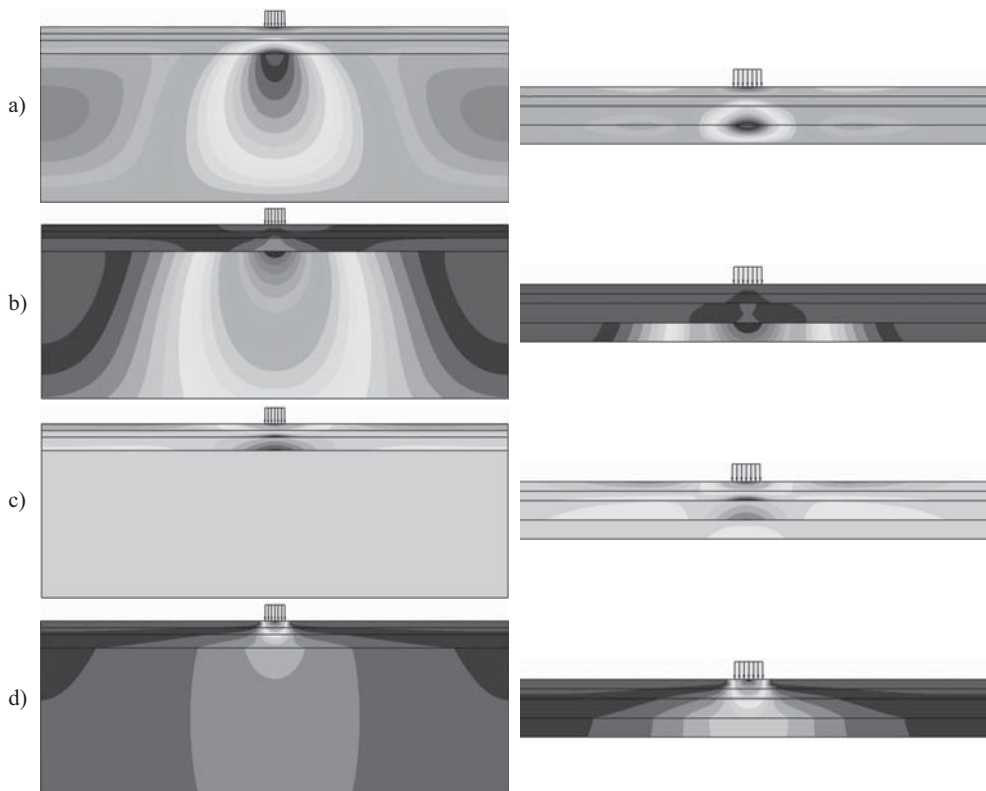
pozwalające zgodnie z powyższymi kryteriami na ocenę trwałości konstrukcji określonej dopuszczalnym dla danej kategorii ruchu przedziałem wartości trwałości zmęczeniowej N_i (liczby osi obliczeniowych 100 kN w założonym okresie obliczeniowym 20 lat). Na wartości i rozkład wymienionych powyżej odkształceń (i naprężeń) mają wpływ zmiany sztywności warstw rozważanej konstrukcji, zmieniających się wraz z osłabieniem konstrukcji. W trwałość konstrukcji półsztywnej „wpisany jest” bowiem proces progresywnego zniszczenia, zachodzący w warstwie podbudowy [3, 4].

Rysunek 3 pokazuje przyjęty do rozważań przekrój badanego układu, analizowanego w stanie osiowej symetrii (3D). Wprowadzając model konstytutywny Coulomba-Mohra do opisu zachowania warstwy podbudowy możemy obserwować:

- 1) proces tworzenia się obszarów, w których ścieżki naprężenia od obciążenia kołem pojazdu „wychodzą” ze strefy sprężystej pracy materiału prowadzą do spadku sztywności materiału, co sprzęgnięte jest z obniżeniem wartości jego spójności — rysunek 5 (strefy uplastycznienia w warstwie podbudowy, oraz



Rys. 3. Opis warstw modelu konstrukcji drogowej ułożonych na podłożu o miąższości h



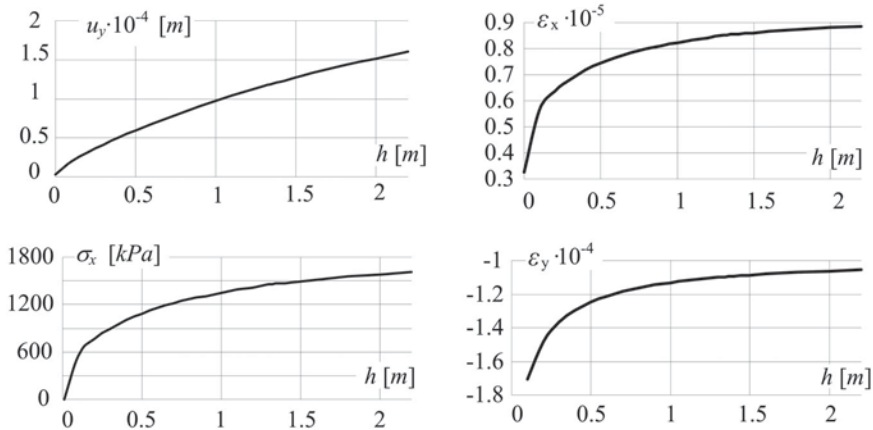
Rys. 4. Model konstrukcji drogowej na podłożu o miąższości $h = 2,2 \text{ m}$ (po lewej) i $h = 0,2 \text{ m}$ (po prawej stronie); a) rozkład odkształceń ε_x , b) rozkład odkształceń ε_y , c) rozkład naprężeń σ_x , d) rozkład naprężeń σ_y

- 2) mechanizm poszerzania się strefy zniszczenia, od dołu warstwy podbudowy ku górze; gdzie prognozowanie „szybkości” rozwoju takiego stanu w modelu obliczeniowym związane jest ze sztywnością i miąższością warstwy podłoża gruntowego.

Na rysunkach 4 i 6 przedstawiono (w zakresie sprężystej pracy układu) wpływ miąższości podłoża gruntowego w modelu obliczeniowym na otrzymywane wielkości ε i σ , wchodzące do kryteriów zmęczeniowych. Na rysunku 5 pokazano z kolei obszary uplastycznienia warstwy podbudowy opisaną modelem sprężysto-idealnie plastycznym o powierzchni plastyczności Coulomba-Mohra, otrzymane przy zdecydowanie różnych miąższościach warstwy podłoża gruntowego w modelu obliczeniowym.



Rys. 5. Strefy plastyczności w warstwie podbudowy ($c = 70 \text{ kPa}$, $\phi = 30^\circ$) dla modeli j.w.



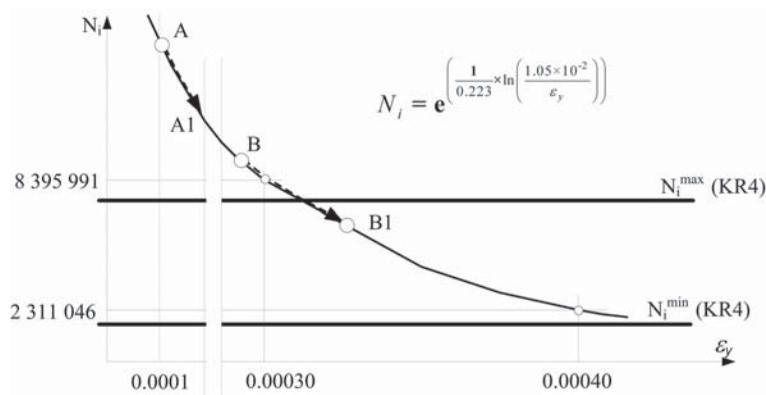
Rys. 6. Wpływ grubości warstwy podłoża h (z rys. 3) na stany przemieszczeń, naprężeń i odkształceń konstrukcji warstwowej (KR 4)

Łatwo można zauważyć analizując zachowanie układów opisanych modelami z rysunków 4 i 5, że proces przyjmowania miąższości podłoża gruntowego w modelach obliczeniowych powinien być „wspomagany” ustalonymi kryteriami. Szczególnie efekty uplastycznienia, czy degradacji sztywności określonych warstw konstrukcji są silnie sprzęgnięte ze sztywnością i miąższością warstwy reprezentującej podłożo gruntowe [5–7]. Rysunek 6 przedstawiając pewne, wybiórcze badania powyższego wpływu pokazuje „stabilizację” określonych wartości odkształceń ε_x i ε_y oraz naprężenia σ_x przy wartości $h = 2,0 \text{ m}$.

Podsumowanie przeprowadzonych analiz może stanowić poniższe stwierdzenie. Wprowadzenie oceny możliwego stanu zniszczenia materiału w modelu obliczeniowym (tu obszarów uplastycznienia w warstwie geomateriału konstrukcji) może zapewnić bezpieczniej-

szere oszacowanie trwałości zmęczeniowej konstrukcji N_i dla danej kategorii ruchu, aniżeli w przypadku analizy sprężystej układu konstrukcja-podłoże.

Ilustrację problemu przedstawia rysunek 7 na przykładzie kryterium strukturalnego. Wartości trwałości zmęczeniowej z przedziału $N_i^{\max} - N_i^{\min}$ nie byłyby rozważane w analizie kryterialnej w zakresie sprężystej pracy przykładowej konstrukcji KR4, która dla modeli o $h = 0,2$ m i $h = 2,0$ m (z rys. 3) reprezentowana jest przez punkty A i B (nie wchodzące w podany obszar), w zakresie plastycznej natomiast pracy podbudowy (rys. 5) przez punkty A1 i B1 (wchodzący już w rozważany obszar).



Rys. 7. Trwałość zmęczeniowa konstrukcji według kryterium deformacji strukturalnych

4. Podsumowanie

Właściwe badawcze i inżynierskie zastosowanie analiz numerycznych w przypadku układów konstrukcja-podłoże gruntowe wymaga rozważenia możliwie szeroko kryteriów postępowania zarówno w procesie tworzenia modeli obliczeniowych analizowanych układów, jak i przy ocenie wiarygodności wyników analiz.

Na bazie istniejących doświadczeń uznaje się, że obszar odpowiedzi gruntu na obciążenie przekazywane z konstrukcji ma charakter lokalny (niezależnie od rodzaju gruntu lub jego stanu), przy czym wielkość tego obszaru jest funkcją obciążenia, sztywności i kształtu konstrukcji oraz warunków istniejących w podłożu, np. stanu gruntu.

Celem przedstawionych w pracy zagadnień było pokazanie:

- „wrażliwości” numerycznych analiz zachowania układów konstrukcja-podłoże na geometrię podukładu reprezentującego w modelu obliczeniowym podłoże gruntowe; gdzie „ogólność” przedstawianego problemu podkreśla różny typ rozważanych zadań, ale przede wszystkim,
- „sprzęgnięcia” wyników numerycznej oceny nośności konstrukcji (w zadaniu pierwszym) oraz trwałości (w zadaniu drugim) z adekwatnością utworzonego modelu obliczeniowego.

LITERATURA

- [1] *Fedorowicz L.*: Zagadnienie kontaktowe budowla — podłoże gruntowe. Kryteria modelowania i analiz podstawowych zagadnień konstrukcja budowlana — podłoże gruntowe. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006
- [2] *Whitlow R.*: Basic Soil Mechanics. Longman Group Limited, Edinburgh Gate 1995
- [3] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. Wydawnictwo IBDM, Warszawa 1997
- [4] *Szydło A.*: Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego. Teoria. Wymiarowanie. Realizacja. Wydawnictwo Polski Cement Sp. z o. o., Kraków 2004
- [5] *Fedorowicz L., Fedorowicz J., Kadela M.*: Evaluation of Road's Pavement Resistance of Traffic-load KR4 in Application of the Elastic-plastic Model with Degradation. Proceedings on CD-ROM of the International Conference 70 Years of FCE STU, Bratislava, December 2008, p. 10
- [6] *Fedorowicz L., Kadela M.*: Zastosowanie modelu z degradacją w analizie układu warstwowego konstrukcji nawierzchni drogowej współpracującej z podłożem gruntowym. „Górnictwo i Geoinżynieria” Kwartalnik Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, 2009, s. 161–168
- [7] *Kadela M.*: Problemy budowy wiarygodnego modelu konstrukcja drogowa — podłoże gruntowe. X Jubileuszowa Konferencja Naukowa Doktorantów i Młodych Doktorów Wydziałów Budownictwa. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej z. 114, Gliwice, 2009, s. 61–65