

Lidia Fedorowicz, Marta Kadela**

ZASTOSOWANIE MODELU Z DEGRADACJĄ W ANALIZIE UKŁADU WARSTWOWEGO KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI DROGOWEJ WSPÓŁPRACUJĄCEJ Z PODŁOŻEM GRUNTOWYM

1. Wprowadzenie

Konstrukcję nawierzchni podatnych oraz półsztywnych w Polsce projektuje się przy przyjęciu kryteriów zmęzeniowych (według Instytutu Asfaltowego i Uniwersytetu Illinois w USA), stosując tzw. metodę mechanistyczną wykorzystującą teoretyczno-empiryczne sposoby postępowania [1]. Podejście takie jest związane z założeniem, że konstrukcja nawierzchni może ulec zniszczeniu zarówno na skutek powstania spękań warstw asfaltowych, jak i utworzenia się deformacji trwałych.

Istotnym dla poniższych rozważań jest stwierdzenie, że obecne teoretyczno-empiryczne metody projektowania konstrukcji nawierzchni drogowych bazują na stanie naprężenia i odkształcenia wyznaczanym w konstrukcji warstwowej współpracującej z podłożem gruntowym traktowanym jako półprzestrzeń sprężysta.

Rysunek 1 przedstawia przykładową, analizowaną dalej konstrukcję półsztywnej nawierzchni drogowej (typu KR-4) o przekroju i parametrach wytrzymałościowych zgodnych z zaleceniami dotyczącymi warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne oraz z Katalogiem nawierzchni podatnych i półsztywnych [2].

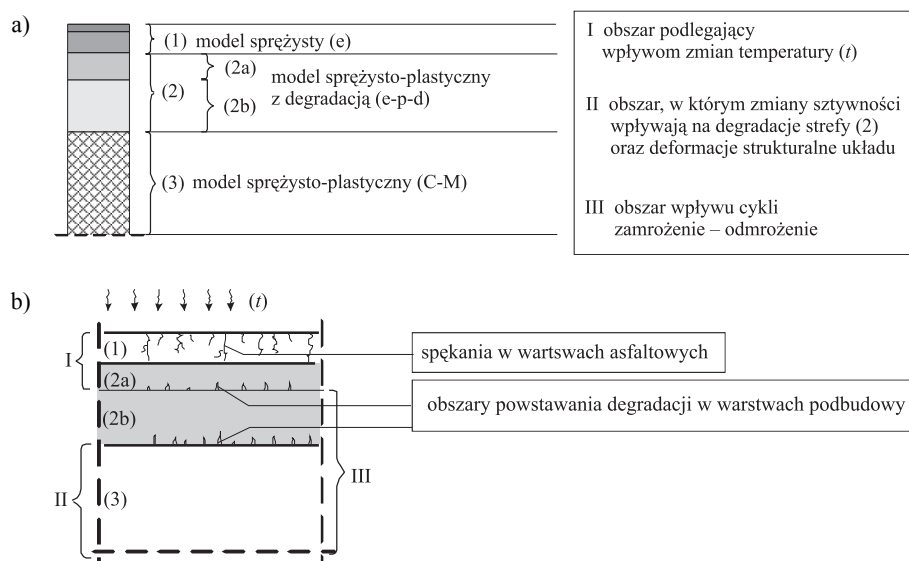
W modelu obliczeniowym rozważanego układu warstwowego wyodrębniono trzy strefy, w których zmiana opisu konstytutywnego materiałów może, zdaniem autorek wpływać znacząco na opis zachowania całego układu i ocenę trwałości konstrukcji nawierzchni.

Są to kolejno:

- 1) strefa górna nawierzchni z betonów asfaltowych, zawierająca warstwy ścieralną i wiążącą,

* Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, Gliwice

- 2) strefa podbudowy, rozdzielona w modelu na warstwę (2a) podbudowy zasadniczej z betonu asfaltowego, oraz warstwę (2b) podbudowy pomocniczej zbudowanej z gruntu lub kruszywa stabilizowanego hydraulicznie;
- 3) strefa reprezentująca podłoże gruntowe (w górnej warstwie podłoże wzmocnione).



Rys. 1. Analizowany układ konstrukcja nawierzchni drogowej – podłoże gruntowe

Na rysunku 1b przedstawiono obszary możliwych zniszczeń (pokazanych symbolicznie) zgodnych z obserwacjami *in situ*, oraz opisano część z wzajemnych wpływów, jakie zachodzą między wyróżnionymi strefami.

Podział na strefy pozwala na przedstawienie propozycji sformułowania pojęcia odporności do analizowanego układu konstrukcja drogowa — podłoże gruntowe. Przez odporność konstrukcji budowlanej na wpływ oddziaływania D rozumieć należy ogólnie taką wartość D_o tego oddziaływania, której przekroczenie spowoduje przekroczenie określonego stanu granicznego. W szczególności może to być Stan Graniczny Nośności, stanowiący o bezpieczeństwie obiektu inżynierskiego, lub Stan Graniczny Użytkowalności, stanowiący o przydatności obiektu do użytkowania. Dla każdej strefy (i) zachodzić zatem powinno:

$$D_i < D_o^{(i)} \quad (1)$$

gdzie dla konkretnej strefy wielkość $D_o^{(i)}$ może reprezentować zarówno:

- liczbę dopuszczalnych obciążeń, aż do wystąpienia zniszczeń strukturalnych lub spękań zmęczeniowych, jak też bezpośrednio;
- nieprzekraczalną wartość sztywności warstwy (wchodzącej w skład strefy), która ulega redukcji w wyniku powtarzalnych obciążeń, lub innych czynników różnej natury.

Zgodnie z powyższym analizy przedstawione w pracy skoncentrowane zostały na jednej strefie, strefie podbudowy opisaną modelem sprężysto-plastycznym z degradacją.

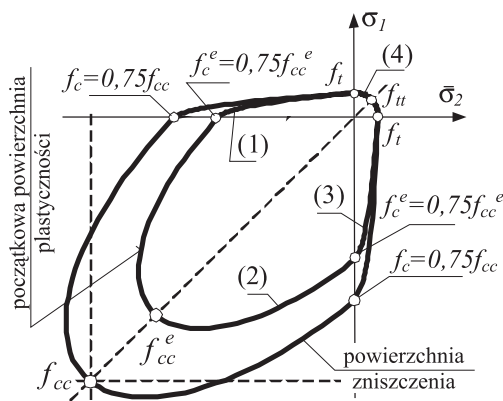
Stan sprężystej pracy warstw podbudowy lub stan pojawiania się obszarów degradacji materiału wiąże się:

- z wiarygodnością charakterystyk pracy obu materiałów podbudowy,
- ze stanem odkształcenia w warstwach podbudowy wywołwanym powtarzającym się obciążeniem warstw jezdni, a także
- właściwą współpracą konstrukcji nawierzchni z podłożem gruntowym.

2. Model sprężysto-plastyczny z degradacją

Zgodnie z uwagami podanymi we wprowadzeniu za odporność konstrukcji nawierzchni drogowej uznajemy zdolność konstrukcji do bezawaryjnego przejścia obciążenia ruchem pojazdów w określonym, „umownym” przedziale czasu. Poniżej przedstawiono propozycję oceny odporności analizowanego układu poprzez ocenę odporności warstw podbudowy, których pracę opisano modelem z degradacją sztywności materiału.

Przyjęty model sprężysto-plastyczny z degradacją materiału (czyli zmianą modułu sztywności) znany jest w literaturze pod nazwą Modelu Barcelona. W roku 2002 model ten został zaimplementowany w komercyjnym pakiecie MES ABAQUS [3]. Jest to model trzyparametrowy z niestowarzyszonym prawem płynięcia o nieliniowym wzmocnieniu izotropowym typu dwumechanizmowego [4, 5], opartym na hipotezie wzmocnienia odkształceniowego i sterowanym zmiennymi κ_c dla ściskania i κ_t dla rozciągania. Powierzchnię plastyczności stanowi rozszerzenie powierzchni klasycznego modelu Druckera-Pragera poprzez uwzględnienie niekołowości kształtu przekroju dewiatorowego. Dla stanu 2D charakterystyczne powierzchnie modelu pokazują rysunek 2.



$$(1) \rightarrow \frac{1}{1-\alpha} (q - 3\alpha p + \beta \sigma_1) = f_c^e(\kappa_c)$$

$$(2) \rightarrow \frac{1}{1-\alpha} (q - 3\alpha p) = f_c^e(\kappa_c)$$

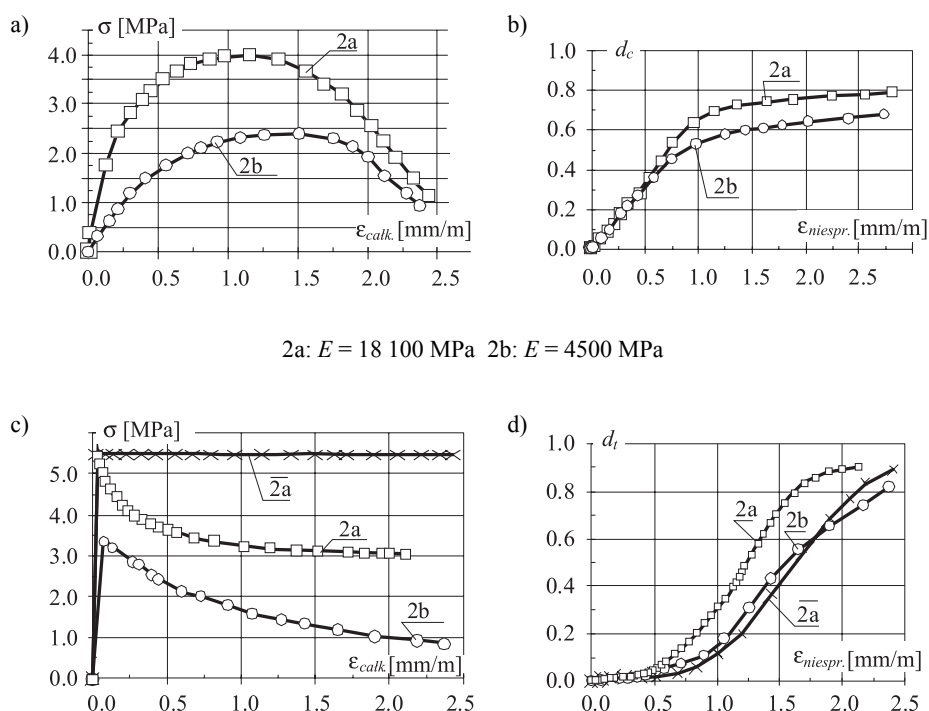
$$(3) \rightarrow \frac{1}{1-\alpha} (q - 3\alpha p + \beta \sigma_2) = f_c^e(\kappa_c)$$

$$(4) \rightarrow (\bar{\sigma}_1^2 + \bar{\sigma}_2^2) = f_t^e(\kappa_c)$$

$$\alpha = \frac{f_{cc}^e - f_c^e}{2f_{cc}^e - f_c^e}, \quad \beta = \frac{f_c^e}{f_t^e} (1-\alpha) - (1+\alpha)$$

Rys. 2. Charakterystyczne powierzchnie modelu Barcelona

Model Barcelona charakteryzuje izotropowa degradacja materiału, opisana dwiema zmiennymi degradacji materiału: d_t i d_c , odpowiednio dla stanu rozciągania i ściskania. Zmienne te, wyznaczone na podstawie niezależnych funkcji zniszczenia materiału (rys. 3) są ze sobą związane — opisują w modelu zarówno potwierdzony doświadczalnie wpływ degradacji materiału ściskanego d_c na wielkość degradacji materiału rozciąganego d_t po zmianie znaku naprężenia, jak i zjawisko odmienne polegające na częściowym odtwarzaniu pierwotnej sztywności materiału przy przejściu z rozciągania do ściskania materiału.



2a: $E = 18\ 100\ \text{MPa}$ 2b: $E = 4500\ \text{MPa}$

Rys. 3. Charakterystyki materiałowe oraz funkcje degradacji dla warstw podbudowy:
a) prawo wzmocnienia przy ściskaniu; b) prawo zniszczenia przy ściskaniu d_c ,
c) prawo osłabienia przy rozciąganiu; d) prawo zniszczenia przy rozciąganiu d_t

Ogólną postać warunku plastyczności modelu Barcelona wyrażoną za pomocą niezmienników (\bar{p}, \bar{q}) tensora naprężeń efektywnych $\{\bar{\sigma}\}$ pokazano na rysunku 2.

Dla opisu odpowiedzi modelu na powtarzające się obciążenie zdefiniowano zmienną d określoną wzorem (2), reprezentującą degradację materiału powstałą w obu możliwych mechanizmach zniszczenia — jednoosiowego ściskania oraz jednoosiowego rozciągania; gdzie parametry s_t i s_c są określonymi funkcjami stanu naprężeń efektywnych:

$$d = (1 - s_t \cdot d_c) \cdot (1 - s_c \cdot d_t) \quad (2)$$

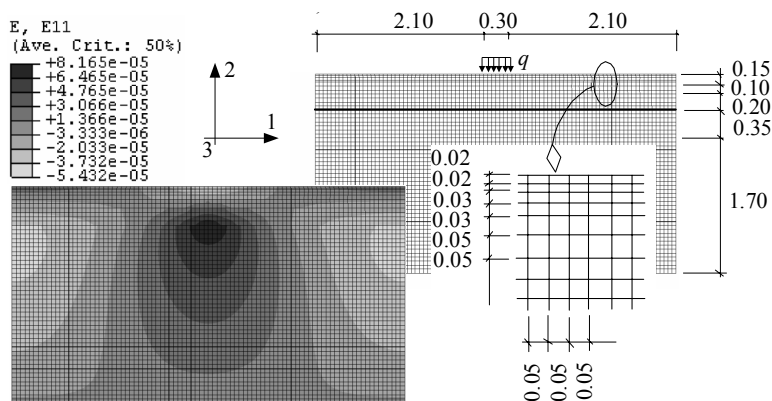
Prawidłowe zbudowanie wyjściowej powierzchni plastyczności oraz powierzchni granicznej modelu wymaga danych dotyczących zachowania się materiału w 1-osiowych stanach ściskania i rozciągania (w badaniu cyklicznym prowadzonym do zniszczenia materiału), a także opisu procesu niszczenia (związku degradacji materiału z jego odkształceniami). Są to informacje pochodzące zarówno z badań laboratoryjnych jak i obserwacji *in situ*.

Na rysunku 3 pokazano charakterystyki oraz funkcje degradacji modelu (e-p-d) zbudowane dla warunków przyjętych w analizach (oznaczenia bez nadkreśleń). Zalecane wartości modułów sztywności oraz wytrzymałości skorelowano z wartościami granicznych odkształceń sprężystych materiałów obu warstw podbudowy [6, 7], górnej (2a) oraz dolnej (2b). Są to funkcje podstawowe dla przedstawionych poniżej analiz. Funkcje dodatkowe (oznaczone nadkreśleniem) podano w celu pokazania wpływu zmiany półki osłabienia materiału na zmiany w funkcji degradacji materiału.

3. Obliczenia numeryczne i wnioski

Analizowany jest ośrodek warstwowy, w płaskim stanie odkształcenia o układzie i grubościach warstw oraz przyjętych modelach konstytutywnych jak na rysunku 1.

Przyjęto tym samym, że spełnienie warunku (1) z rozdziału 1 zależy od nie przekroczenia pewnego poziomu degradacji, czyli spadku sztywności warstw opisanych modelem Barcelona (e-p-d). Parametry materiałowe warstw przyjęto zgodnie z powyżej przedstawionym opisem. Specyfika problemów nawierzchni konstrukcji drogowej oraz podłoża gruntowego wyraża się powtarzalnością przekazywanych obciążeń.

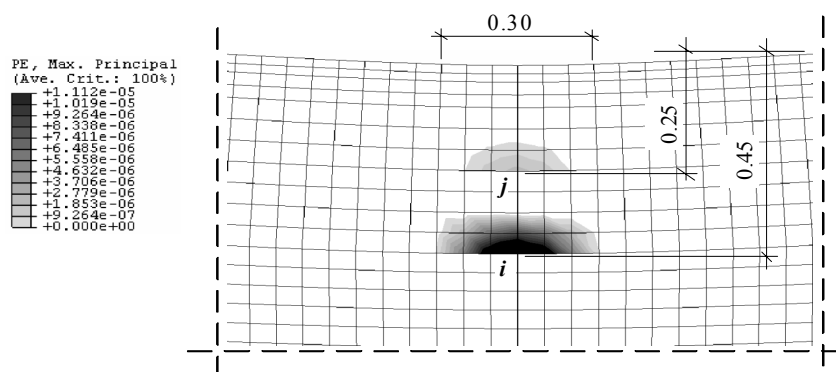


Rys. 4. a) Model obliczeniowy układu konstrukcja nawierzchni drogowej – podłoże gruntowe;
b) mapa całkowitych odkształceń ex w pierwszym cyklu przy obciążeniu

Rysunek 4a pokazuje siatkę dyskretną modelu obliczeniowego z obciążeniem równomiernie rozłożonym $q = 300$ kPa na odcinku $d = 0,30$ m. Odpowiada to obciążeniu $P = P_{na os}$

określonymu w [kN/1 m] wymiaru prostopadłego do modelu konstrukcji. Obciążenie wzrastało i malało w sposób przyrostowy w kolejnych cyklach obciążenia i odciążenia. Rysunek 4b przedstawia stan całkowitych odkształceń poziomych ε_x w obciążonym układzie, z wyraźną koncentracją maksymalnych odkształceń towarzyszących rozciąganiu na styku warstw podbudowy pomocniczej opisaney modelem sprężysto-plastycznym z degradacją i warstwy podłoża wzmocnionego opisanego modelem sprężysto-plastycznym Coulomba-Mohra.

Stan maksymalnych odkształceń plastycznych otrzymanych po zdjęciu obciążenia na spodzie warstw podbudowy, zasadniczej i pomocniczej wskazuje, że dla zastosowanych materiałów, (opisanych charakterystykami z rys. 3) należy oczekiwać już od pierwszych cykli obciążenie — odciążenie minimalnych efektów degradacji materiału — rysunek 5.



Rys. 5. Odształcenia plastyczne na spodzie warstw podbudowy po zdjęciu obciążenia

Rysunek 6a, b stanowi rejestrację stanu naprężenia i odkształcenia w wyróżnionym punkcie i spodu podbudowy pomocniczej w postaci: funkcji $\varepsilon_x - \sigma_x$ (z „tłem” w postaci charakterystyki pracy materiału przy jednoosiowym rozciąganiu — linia ciągła) — rysunek 6a, oraz ścieżki naprężeń w układzie naprężeń głównych (σ_1, σ_2) dla pierwszych pięciu cykli obciążenie – odciążenie — rysunek 6b; gdzie ścieżka (A1, B1, C1) odpowiada obciążeniu, (C1, D1) odciążeniu pierwszego cyklu obciążenie – odciążenie, oraz kolejne od (D1, C2), (C2, D2), aż do (D4, C5), (C5, D5) pozostałym czterem cyklom.

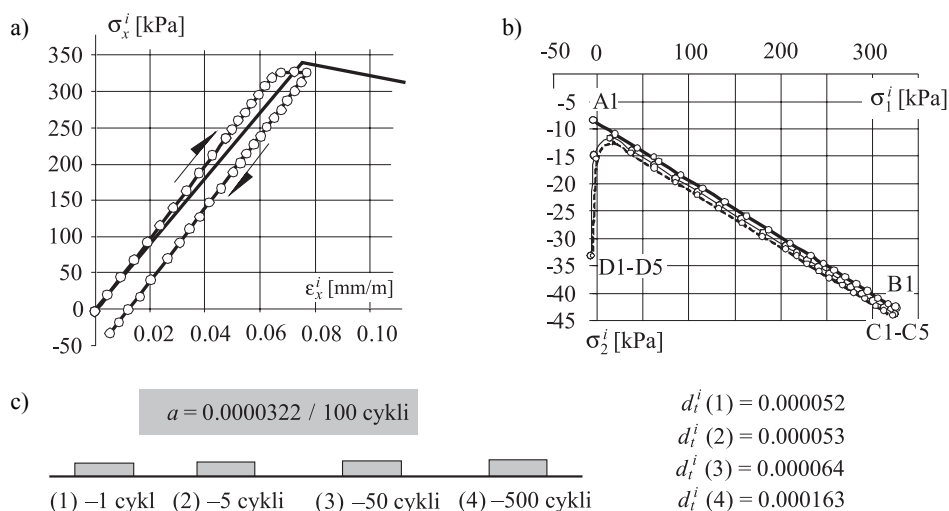
Kolejny rysunek 6c przedstawia rejestrację wzrostu niemalejącej degradacji d_t towarzyszącej rozciąganiu w kolejno zwiększanej liczbie cykli obciążenie – odciążenie.

Rozwój procesu tworzenia się deformacji trwałych, mierzonych poziomem niemalejącej składowej degradacji d_t , możliwej do pomierzenia przy przeprowadzonej na tym etapie badań liczbie cykli określono jako wartość średnią:

$$\delta d_t \approx a/100 \text{ cykli} \quad (3)$$

Jeżeli w materiale, w którym dochodzi do przekroczenia wytrzymałości na rozciąganie zapewniony jest proces łagodnego osłabiania materiału degradacja materiału zachodząca

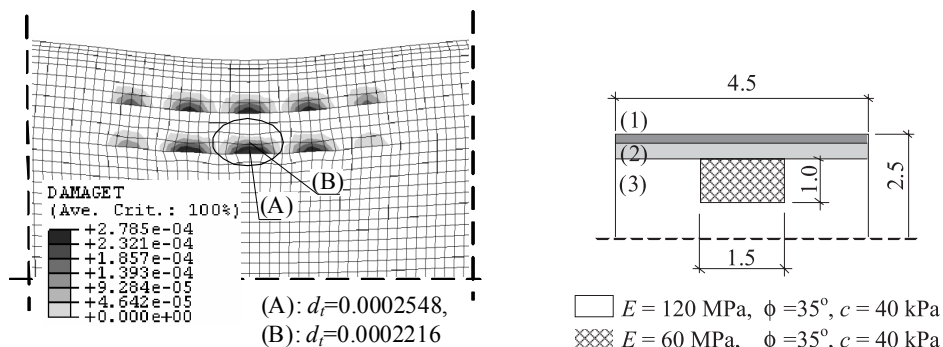
jedynie w wyniku powtarzalności obciążeń rozwija się sposób bardzo wolny (patrz funkcje zniszczenia — rys. 3), niemniej jest to proces postępujący obejmujący swym zasięgiem coraz większą część warstwy podlegającej degradacji.



Rys. 6. Rejestracja w punkcie i zachowania dolnej warstwy podbudowy:

- a) stan $\epsilon_x - \sigma_x$; b) ścieżki naprężeń głównych dla 5 cykli obciążenie – odciążenie;
 c) wzrost niemalejącej degradacji d_t towarzyszącej rozciąganiu

Jeżeli natomiast analizowany proces połączony zostanie z osłabieniem podłoża gruntowego (lub niewłaściwą oceną jego sztywności) to zjawisko niszczenia może rozszerzać się stosunkowo szybko. Na rysunku 7 pokazano wynik prostej symulacji, gdy przy lokalnej zmianie sztywności podłoża i przemieszczeniu się nad obszarem osłabionym obciążenia o intensywności jak powyżej otrzymano „smugę” degradacji o maksymalnych wartościach podanych na rysunku.



Rys. 7. Degradacja warstw podbudowy w wyniku lokalnego osłabienia podłoża

Powyższe, uproszczone na tym etapie rozważań analizy pokazują skuteczność zastosowanego modelu sprężysto-plastycznego z degradacją w próbie oceny odporności konstrukcji drogowej, rozumianej (zgodnie z nierównością (1)) jako ocena oddziaływania, które nie powinno ulec przekroczeniu, jeżeli analizowany układ konstrukcja nawierzchni drogowej – podłoże gruntowe ma pracować w sposób bezawaryjny.

LITERATURA

- [1] *Judycki J., Dołycki B., Jaskula P.*: Przedwczesne uszkodzenia nawierzchni asfaltowych. Politechnika Gdańska, 2006, p.1–9, www.zie.pg.gda.pl/~dwisnie/drogi/pubpgdr/2006_4.pdf
- [2] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. IBDM, Warszawa, 1997
- [3] *Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.*: Dokumentacja programu ABAQUS v.6.3.1, m.in.: Getting Started with ABAQUS/Standard: Interactive Version; ABAQUS/Standard User's Manual; ABAQUS/CAE User's Manual, ABAQUS Example Problems Manual, ABAQUS Theory Manual, 2002
- [4] *Lubliner J., Oliver J., Oller S., Oñate E.*: A Plastic-Damage Model for Concrete. *International Journal of Soilds and Structures*, vol.25, 1989, pp. 299–329
- [5] *Lee J., Fenves G.L.*: A Plastic-Damage Concrete Model for Earthquake Analysis of Dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol.27, 1998, pp. 937–956
- [6] *Kadela M.*: Próba uwzględnienia degradacji sztywności warstw podbudowy konstrukcji nawierzchni drogowej w modelu numerycznym. Rozprawa Licencjacka, Katedra Geotechniki, Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, Gliwice, 2008
- [7] *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. *International Scientific Conference 70 Years of FCE STU, Bratislava, Slovak Republic 2008*, p. B012-16 on CD-ROM