

Charakterystyka zmęczeniowa recyklowanej podbudowy w aspekcie kontrolowanych naprężeń metodą IT-FT

Marek Iwański¹, Przemysław Buczyński², Grzegorz Mazurek³

^{1,2,3} Katedra Inżynierii Komunikacyjnej, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska, e-mail: ¹iwanski@tu.kielce.pl, ²p.buczynski@tu.kielce.pl, ³gmazurek@tu.kielce.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań podbudowy wykonanej w technologii recyklingu głębokiego na zimno z emulsją asfaltową MCE w aspekcie trwałości zmęczeniowej przy różnym poziomie naprężeń występujących wewnątrz podbudowy. Projekt recyklowanej podbudowy symulował proces recyklingu głębokiego na zimno z wykorzystaniem materiałów z istniejącej konstrukcji. Ocena jakości zaprojektowanej mieszanki MCE wykonano na podstawie badań właściwości fizycznych oraz mechanicznych tj. zawartość wolnej przestrzeni V_m , wytrzymałość na pośrednie rozciąganie ITS_{DRY} w 25°C, odporność na działanie wody TSR, moduł sztywności w pośrednim rozciąganiu S_m . Dodatkowo w celu określenia trwałości zmęczeniowej recyklowanej podbudowy poddano ją oddziaływaniu naprężeń normalnych tj. 250kPa, 400kPa oraz 500kPa, które symulowały oddziaływanie obciążenia wywołanego od poruszających się pojazdów. Do wyznaczenia trwałości wykorzystano metodę testu pośredniego rozciągania (ITT) wg metodyki IT-FT. Metodę wytypowano ze względów na zbieżny charakter pracy recyklowanej podbudowy MCE - rozciąganie.

Słowa kluczowe: recykling, recyklowana podbudowa, cement, moduł sztywności, odporność na zmęczenie IT-FT, test pośredniego rozciągania ITT

1. Wstęp

Jakość recyklowanych podbudów wykonywanych w technologii "in situ" ze względu na charakter prac oraz większe prawdopodobieństwo zmienności wykorzystywanych składników powinna być poddana ocenie trwałości zmęczeniowej. Ocena przydatności recyklowanej mieszanki na etapie projektowania w odniesieniu do standardowych parametrów może być niewystarczająca. Dodatkowo mieszanki MCE w swoim składzie zawierają cement, który może wywołać spękania odbite spowodowane znacznym naprężeniem rozciągającym w spodzie warstwy podbudowy [1]. Proces zmęczenia mma jest jednym z najważniejszych kryteriów projektowania konstrukcji nawierzchni drogowej. Ponadto pęknięcie zmęczeniowe jest jedną z głównych przyczyn obniżonej trwałości nawierzchni. Oddziaływanie sił wywołanych od poruszających się pojazdów generuje różne poziomy naprężenia wewnątrz konstrukcji. Przekroczenie trwałości warstw konstrukcyjnych inicjuje powstanie pęknięcia, a dalszy ruch pojazdów powoduje pogłębienie się tego zjawiska. Dlatego też określenie trwałości MCE jest ważnym elementem oceny jakości mieszanki.

2. Przedmiot badań

Przedmiotem badań w aspekcie odporności zmęczeniowej przy kontrolowanym naprężeniu rozciągającym σ_0 w środku próbki równym 250 kPa, 400 kPa oraz 500 kPa, była

mieszanka mineralno cementowo-emulsyjna wykonana w technologii recyklingu głębokiego na zimno MCE [2]. Recyklowaną mieszankę zaprojektowano na warstwę podbudowy drogowej przeznaczonej na kategorię ruchu KR4 (dla osi standardowej) obciążonej osiami 100kN [3].

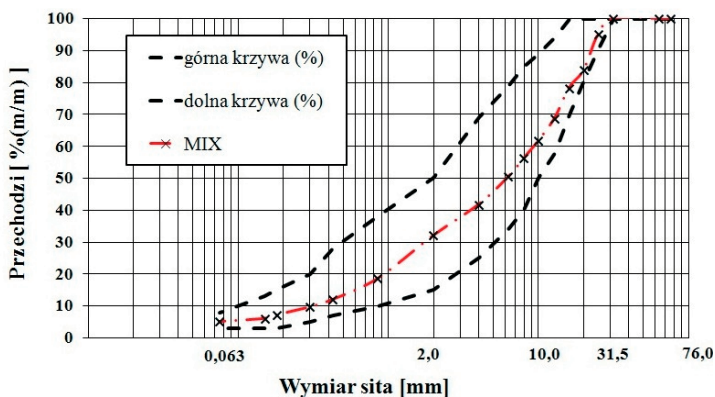
Podbudowę poddano weryfikacji w odniesieniu do wartości naprężeń uzyskanych dla przyjętego rozwiązania układu warstw konstrukcyjnych dla drogi o kategorii ruchu KR4. Do oceny stanu naprężeń i odkształceń w podbudowie wykorzystano metodę mechanistyczną. Naprężenia i poziom odkształceń występujących w układzie warstw konstrukcyjnych określono w oparciu o teorię wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej [4,5]. Uzyskany poziom sił wewnątrz recyklowanej podbudowy wg metody mechanistycznej zestawiono z rezultatami badań trwałości zmęczeniowej recyklowanej podbudowy z warunkami laboratoryjnymi przy pośrednim rozciąganiu IT-FT wg PN EN 12697-24. Analiza rezultatów badań pozwala na stwierdzenie o możliwości zastosowania zaprojektowanego składu do wykonania trwałej podbudowy drogowej z mieszanki mineralno cementowo-emulsyjnej w procesie recyklingu głębokiego na zimno.

2.1. Projekt i wykonanie recyklowanej mieszanki

Projekt recyklowanej mieszanki przeznaczonej na warstwę podbudowy zakładał uzyskanie ciągłości uziarnienia zgodnie z wymogami przedstawionymi w wytycznych [6, 7].

W składzie recyklowanej mieszanki podbudowy zastosowano trzy materiały mineralne: grunt podłoża (piasek drobnoziarnisty 0/2 zawierający 8,6% frakcji pylasto-ilastej), kruszywo o ciągłym uziarnieniu 0/32 oraz destruk asfaltowy.

Piasek odpowiadał podłożu gruntowemu, kruszywo o ciągłym uziarnieniu 0/32 symulowało podbudowę z kruszywa. Natomiast destruk asfaltowy odpowiadał zniszczonym warstwą konstrukcyjnym z mieszanek mineralno-asfaltowych. Połączenie wymienionych składników pozwoli na symulację procesu recyklingu głębokiego na zimno w technologii na miejscu. Jako spoiwo zastosowano rekomendowany cement portlandzki CEM I 32,5R w ilości 2,5% w składzie mieszanki mineralnej. Przebieg krzywej uziarnienia zaprojektowanych mieszanek mineralnych przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Przebieg projektowanej krzywej uziarnienia

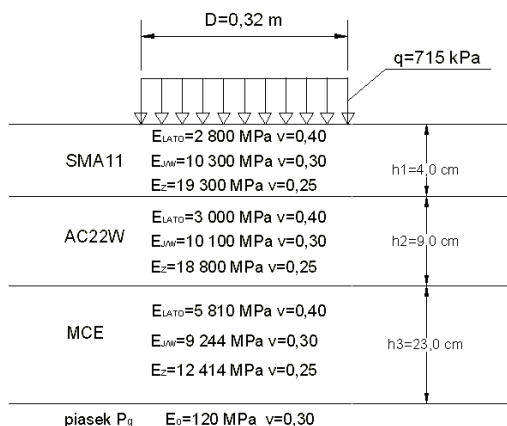
Jako lepiszcze zastosowano kationową emulsję asfaltową wolnorozpadową C60B10 ZM/R wg PN EN 13808 w ilości 3% w składzie mieszanki mineralno cementowo-emulsyjnej. Zagęszczanie próbek wykonano zgodnie z metodą II zawartą w wytycznych [2] opracowaną przez IBDiM. Do zagęszczania próbek wykorzystywano prasę hydrauliczną o nacisku 120 kN z możliwością utrzymania obciążenia w określonym czasie. Zagęszczanie

mieszanki MCE w perforowanej formie Marshalla wykonano pod stałym naciskiem 100 kN w ciągu 5 minut.

Próbki po zagęszczeniu wyjmując się natychmiast z formy, stosując urządzenie do wyciskania próbek. Próbki wyjęte z formy przetrzymywane były w temperaturze otoczenia przez 28 dni, w miejscu osłoniętym przed bezpośrednim nasłonecznieniem.

2.2. Model obliczeniowy - układ warstw konstrukcyjnych

Do obliczeń naprężeń oraz odkształceń w konstrukcji nawierzchni drogowej przyjęto stałe materiałowe w odniesieniu do wymagań [8]. Zastosowano średnie wartości temperatur warstw konstrukcyjnych nawierzchni w odniesieniu wymagań określonych wytycznych [3].



Rys. 2. Model konstrukcji drogi z podbudową MCE

Założony model obliczeniowy konstrukcji drogi dla kategorii ruchu KR4 odnosi się do najczęściej stosowanego rozwiązania w przypadku dróg remontowanych w technologii recyklingu głębokiego na zimno z emulsją asfaltową. Należy również dodać, że spełniony został układ warstw w odniesieniu do typowego rozwiązania konstrukcyjnego z zastosowaniem podbudowy MCE wg wytycznych [2].

3. Metodyka badań

Program badań recyklowanej podbudowy obejmował trzy etapy. W etapie I określono podstawowe parametry recyklowanej podbudowy w odniesieniu do wymagań [2, 6]: zawartość wolnej przestrzeni V_m , wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek suchych ITS_{DRY} , wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek nawilżonych ITS_{WET} , odporność na działanie wody TSR oraz moduł sztywności w pośrednim rozciąganiu IT-CY. W etapie II określono wartości naprężeń oraz odkształceń wg metody mechanistycznej. Natomiast w etapie III określono odporność na zmęczenie w pośrednim rozciąganiu wg metodyki badawczej IT-FT zawartej w PN-EN 12697-24 zał. E. Badanie zmęczeniowe przeprowadzono dla trzech poziomów kontrolowanego naprężenia 250 kPa, 400 kPa oraz 500 kPa. Sumaryczny czas obciążenia równy 0,5s odpowiada częstotliwości 2Hz natomiast czas oddziaływania siły ściskającej i deformacji poziomej 0,1s odpowiada częstotliwości 10Hz [9]. W badaniu za utratę trwałości przyjęto moment kiedy odkształcenie odczytane po 100 cyklu zwiększa się dwukrotnie. Do ustalenia wartości siły (P) niezbędnej do utrzymania stałej wartości naprężenia wykorzystano wzór na naprężenie rozciągające σ_0 w środku próbki:

$$\sigma_0 = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot t \cdot D} \quad (1)$$

gdzie: P – siła pionowa [N], t – wysokość próbki [mm], D – średnica próbki [mm].

4. Rezultaty analiz

4.1. Właściwości fizyczne i mechaniczne

Rezultaty badań z etapu I, odnoszące się do jakości recyklowanej podbudowy, przedstawiono w tabeli 1. Analiza wyników badań umożliwi określenie prawidłowości dobranych składników i ich proporcji w składzie mieszanki.

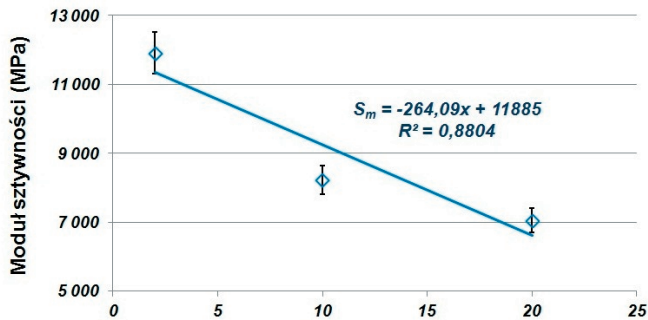
Tabela 1. Podstawowe właściwości recyklowanej podbudowy MCE

Lp.	Badany parametr	j.m	Wynik badań	Współczynnik zmienności [%]
1	Zawartość wolnej przestrzeni	%	9,7	1,2
2	Nasiąkliwość	%	2,0	2,9
3	Stabilność	kN	15,5	3,3
4	Odształcenie	mm	1,7	3,0
5	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie ITS _{DRY}	kPa	799,77	4,4
6	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie ITS _{WET}	kPa	574,83	5,8
7	Odporność na działanie wody TSR	-	0,72	9,8

Na podstawie analizy wyników badań przedstawionych w tabeli 1 należy stwierdzić, że w odniesieniu do wymagań [2] zaprojektowana mieszanka spełnia założone w nich kryteria. Pozwala to stwierdzić, że zaprojektowana i wykonana warstwa podbudowy w technologii recyklingu w sposób bezpieczny przeniesie obciążenia na podłoże gruntowe. Należy również dodać, że wartość współczynnika zmienności określający jednorodność uzyskanych wyników badań oscyluje wokół wartości 10%.

Rozpatrując parametr zawartości wolnej przestrzeni oraz nasiąkliwości należy stwierdzić, że recyklowana mieszanka podbudowy charakteryzuje się wysoką szczelnością. Przekłada się to na znaczną wartość wytrzymałości na pośrednie rozciąganie (ITS_{DRY} oraz ITS_{WET}) oraz na odporności oddziaływania wody oznaczonej za pomocą wskaźnika TSR, którego wartość jest większa od wartości minimalnej TSR=0,70.

Ocenę wrażliwości recyklowanej podbudowy z emulsją asfaltową MCE na wpływ temperatury w aspekcie rodzaju zastosowanego spoiwa dokonano w oparciu o badanie modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu według metody IT-CY opisanej w normie badawczej PN EN 12697-24. Badania wykonano w temperaturach 2°C, 10°C oraz 20°C po 28 dniach pielęgnowania prób. Zastosowane temperatury odnoszą się do pracy podbudowy w zależności od pory roku [3]. Uzyskane wartości średnie oraz ich przedziały ufności przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Wpływ temperatury badania na moduł sztywności recyklowanej podbudowy

Dokonując analizy rezultatów badań należy stwierdzić, że wartość modułu sztywności recyklowanej podbudowy określonej dla ekwiwalentnej temperatury dla okresu zimowego uzyskała największą sztywność równą 11918 MPa. Natomiast w okresie letnim wartość modułu jest niższa o około 40% niż w odniesieniu do okresu w zimowego. Należy również stwierdzić, że wraz ze spadkiem temperatury w badanej mieszance następuje znaczny przyrost modułu sztywności, średnio o około 270 MPa na 1°C.

W celu określenia dokładnej wartości modułu sztywności możliwe jest obliczenie poszukiwanej wartości z wykorzystaniem równania regresji liniowej przy $R^2=88\%$. Błąd estymacji uzyskanych wyników eksperymentalnych dla regresji jest mniejszy niż wartość zmienności zarejestrowana dla modułu sztywności względem pojedynczego przypadku zadanej temperatury pomiaru. W związku z tym do określenia stanu naprężeń i odkształceń dla różnych pór roku wykorzystano wartość odczytaną z równania regresji (rys. 2).

4.2. Określenie poziomu naprężeń

Rozwiązanie problemu układu wielowarstwowego wykonano wykorzystując metodykę zaproponowaną w pracy [10]. W modelu założono, że pomiędzy wykonanymi warstwami konstrukcyjnymi występuje całkowita szczepność międzywarstwowa. Wyniki analizy układu warstwowego w oparciu o teorię wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej przedstawiono w tabeli 2.

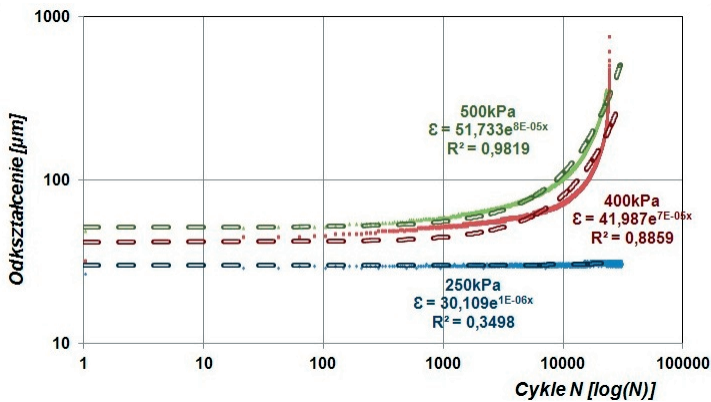
Tabela 2. Wyniki analizy z metody mechanistycznej dla recyklowanej podbudowy

Lp.	Warstwa	Pora roku	Poziom naprężenia [kPa]	Poziom odkształcenia [$\mu\epsilon$]
1	Warstwa podbudowy z mieszanki mineralno cementowo-emulsyjne MCE	lato	613	65,7
		wiosna/jesień	546	41,9
		zima	519	31,7

Uzyskane wartości naprężeń, niezależnie od analizowanej pory roku utrzymują się powyżej wartości 500kPa. Wyniki oznaczeń według rozciągania pośredniego ITS są większe niż obliczone wartości. W związku z tym mało prawdopodobne jest natychmiastowe pęknięcie w strukturze podbudowy MCE. Jednak wartość naprężenia obliczonego jest stosunkowo wysoka, co w konsekwencji cykliczności charakteru obciążenia może w perspektywie czasu zainicjować pęknięcie. Odkształcenia, niezależnie od wartości przykładowego obciążenia, są dwukrotnie mniejsze od wymaganych wg normy PN EN 12697-24 dla rekomendowanego poziomu naprężenia równego 250kPa.

4.3. Zmęczenie ITT

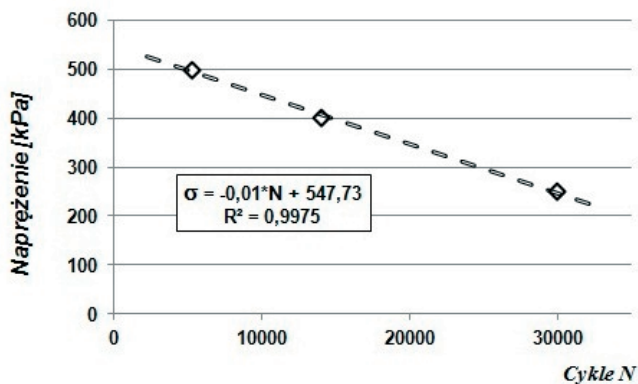
Badanie zmęczenia wykonano w odniesieniu do procedury badawczej opisanej w normie PN EN 12697-24 zał. E. W odniesieniu do literatury [11] należy stwierdzić, że możliwe jest wydzielenie trzech faz w cyklu badawczym. W fazie I następuje znaczny przyrost odkształcenia w badanej próbce związany z wewnętrznym ogrzewaniem się materiału, wystąpienie odkształcenia plastycznego badanego materiału [12]. W fazie II przyrost odkształcenia następuje stopniowo, występuje liniowy charakter zmęczenia. W fazie III następuje gwałtowne zniszczenie próbki i znaczny przyrost odkształcenia związany z propagacją pęknięcia, aż do zniszczenia materiału. W badaniu zastosowano kontrolowane naprężenie (250kPa, 400kPa oraz 500kPa) przy założonym czasie obciążenia próbki 0,1s natomiast czas odciążenia 0,4s. Za pomocą czujników poziomych dokonywano pomiaru wartości odkształcenia. Wyniki badań zmęczenia w aspekcie kontrolowanego naprężenia dla recyklowanej podbudowy w technologii MCE przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Charakterystyki zmęczeniowe recyklowanej podbudowy w aspekcie naprężenia

Dokonując analizy charakterystyki zmęczenia recyklowanej podbudowy wykonanej w technologii MCE można stwierdzić, że dwukrotny wzrost poziomu naprężenia spowodował 60% wzrost odkształcenia w początkowej fazie badania recyklowanej podbudowy. Aby uzyskać informację na temat ogólnego trendu szybkości przyrostu odkształcenia równania regresji należy zlogarytmować. W wyniku tego zabiegu poziom wykładnika będzie w sposób przybliżony charakteryzować szybkość deformacji. Należy zwrócić uwagę, że dla poziomu naprężenia 400 kPa i 500 kPa poziom szybkości deformacji jest zbliżony. Dla tej wartości naprężeń przyrost odkształcenia odbywa się stopniowo od 100-tego cyklu aż do zniszczenia próbki. Natomiast dla przyłożonego naprężenia 250 kPa wartość nachylenia dąży do zera. W związku z tym, dla naprężenia 250 kPa wynik prognozowanej trwałości zmęczeniowej dąży do nieskończoności. Znając poziom naprężeń obliczonych i uzyskanych dla próbek w warunkach laboratoryjnych, w odniesieniu do projektowania parametrów mechanicznych podbudowy należy konfrontować z wynikami analizy numerycznej. Trzeba również dodać, że uzyskane wartości odkształcenia i naprężenia z badań laboratoryjnych oraz określonych wg metody mechanistycznej są zbieżne. Uzyskane wartości odkształcenia przy wyższych wartościach naprężenia kontrolowanego są mniejsze niż 100µm określonych w normie badawczej PN EN 12697-24 zał. E.

Końcowy etap badań obejmował wyznaczenie trwałości zmęczeniowej dla recyklowanej mieszanki podbudowy MCE w zależności od wartości naprężenia. Dla danej wartości naprężenia odczytano ilość cykli obciążeniowych i przedstawiono ich zależność na rys. 4.



Rys. 4. Trwałość zmęczeniowa recyklowanej podbudowy w aspekcie naprężenia

Wyniki spadku trwałości zmęczeniowej przy wzroście poziomu naprężenia rozciągającego układają się względem liniowej funkcji regresji. W związku z tym ocena trwałości zmęczeniowej metodą IT-FT może dostarczyć informacji na temat zachowania mieszanki. Ponadto może stanowić punkt wyjścia w podejmowaniu decyzji o grubości projektowanych warstw i stanu naprężeń w podbudowie MCE.

5. Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników badań oraz ich analizy można formułować następujące wnioski:

- Uzyskane poziomy odkształceń przy danym poziomie naprężeń na próbkach w warunkach laboratoryjnych są zbliżone do wartości odkształceń wg analizy numerycznej;
- Występujący zakres naprężeń w warstwie podbudowy wykonanej z recyklowanej mieszanki MCE w okresie lata może doprowadzić do inicjacji spękań z uwagi na spadek modułu warstw asfaltowych wyżej leżących;
- Przy projektowaniu mieszanki MCE należy uwzględnić określony stan naprężeń metodą analityczną w oparciu o teorię wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej (model wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej) i odnieść do badań trwałości zmęczeniowej w warunkach laboratoryjnych;
- Wyznaczenie trwałości zmęczeniowej IT-FT dostarcza szybkiej informacji na temat zachowania się podbudowy MCE w aspekcie cykliczności obciążenia.

Literatura

- 1 Piłat J. Radziszewski P. Nawierzchnie asfaltowe. WKŁ, 2009
- 2 IBDiM 1999 Warunki techniczne wykonywania warstw podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MCE), Zeszyt 61, IBDiM [Road and Bridge Research Institute], Warszawa, p. 44
- 3 IBDiM. 2001. Katalog Wzmocnień i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. Warszawa. 225 p.
- 4 Firlej S. Mechanika nawierzchni drogowej. Lublin 2007
- 5 Kukielka J. Szydło A. Projektowanie i budowa dróg. WKiŁ, 1986
- 6 Asphalt Academy, Technical Guideline TG2: Bitumen Stabilised Materials, A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials. Second Edition, Pretoria, South Africa, 2009

- 7 Wirtgen Group, Cold Recycling Technology. 1th edition, Wirtgen, Germany, 2012.
- 8 Dz.U.1999.43.430 Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie.
- 9 Stefańczyk B., Mieczkowski P., Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 2008. 320 s
- 10 Judycki J. Jaskuła P. Fronc T. Sierosławski T. Badania i ocena wpływu czepności międzywarstwowej na trwałość konstrukcji nawierzchni asfaltowej, Raport z drugiego etapu badań, Politechnika Gdańska, GDDKiA, 2006
- 11 Di Benedetto H., Asheyer Soltani A., Chaverot P., Fatigue damage for bituminous mixtures. Proceedings of The Fifth International Rilem Symposium MTBM Lyon 1997
- 12 Amir Kavussi, Amir Modarres Laboratory fatigue models for recycled mixes with bitumen emulsion and cement, Construction and Building Materials 24 (2010) 1920

Characteristics of the fatigue life (IT-FT) of the recycled base course at the controlled stresses state

Marek Iwański¹, Przemysław Buczyński², Grzegorz Mazurek³

^{1,2,3} Faculty of Transportation Engineering, Department of Civil Engineering and Architecture, Kielce University of Technology, e-mail: ¹iwanski@tu.kielce.pl, ²p.buczynski@tu.kielce.pl, ³gmazurek@tu.kielce.pl

Abstract: The paper presents the results of the base course made in the cold deep recycling technology with the emulsion in aspect of its durability for a different tensile stress level. The recycled base design simulated a deep recycling process with materials from existing crushed bituminous pavement layers ("in-situ" technology). While assessing the quality of the designed MCE mixture, the following physical and mechanical parameters were considered: void contents V_m , indirect tensile strength ITS_{DRY} at 25°C, tensile strength ratio TSR, stiffness modulus S_m . Additionally, the evaluation of fatigue was done at three stress cases: 250 Pa, 400 Pa, 500 Pa. The impact of the vehicle axle load on the stress state in the base course was simulated. For the purpose of determining the pavement durability, one of the method of fatigue life test was used. The tests were done according to IT-FT, based on an indirect tensile test (ITT). This method was chosen because it exhibits good equivalence to the real road pavement behaviour.

Keywords: recycling, recycled base course, cement, stiffness modulus, fatigue IT-FT, indirect tensile test ITT