STEFAN FIRLEJ[1)]
JERZY KUKIEŁKA[2)]

LOAD BEARING CAPACITY OF A NATIONAL ROAD WITH BASE COURSE MADE OF MINERAL-CEMENT-EMULSION MIXTURE AFTER 12 YEARS OF EXPLOITATION

NOŚNOŚĆ NAWIERZCHNI DROGI KRAJOWEJ O PODBUDOWIE Z MIESZANKI MINERALNO-CEMENTOWO-EMULSYJNEJ PO 12 LATACH EKSPLOATACJI

STRESZCZENIE. W pracy przeprowadzono ocenę konstrukcji nawierzchni na oddanym do użytku w 2000 r. odcinku drogi krajowej DK 19. Zamieszczono analizę ugięć sprężystych FWD, oznaczonych po pierwszym i trzynastym roku jej eksploatacji. Obliczono moduły sztywności nawierzchni za pomocą autorskiego programu SF-PL i ELMOD, przyjmując modele dwu- i trójwarstwowej półprzestrzeni sprężystej. Dokonano także oceny modułów sztywności warstwy podbudowy wykonanej z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MMCE) z dodatkiem 5% (m/m) cementu i 3% (m/m) emulsji asfaltowej. W celu określenia nośności konstrukcji nawierzchni i szkody zmęczeniowej przeprowadzono analizę statystyczną obliczeń oraz analizę ruchu. Stwierdzono, że wyniki obliczeń nośności przy założeniu trójwarstwowej półprzestrzeni sprężystej charakteryzują się dużą zmiennością, około 2-krotnie większą niż w przypadku zastosowania modelu dwuwarstwowego. Przy założeniu modelu dwuwarstwowej półprzestrzeni sprężystej obliczone średnie wartości modułów sztywności w średniej temperaturze nawierzchni 22°C wynosiły w latach 2001 oraz 2013 odpowiednio 6191 MPa i 4584 MPa.

SŁOWA KLUCZOWE: mieszanka mineralno-cementowo-emulsyjna, moduł sztywności, nośność, ugięcia sprężyste.

ABSTRACT. The paper presents analysis of pavement structural performance on the section of national road DK 19 in 2000. FWD tests and analysis of elastic deflections were made after the first and thirteenth year of exploitation. The pavement stiffness moduli were calculated using author's programmes SF-PL and ELMOD, adopting two- and three-layer elastic half-space models. The evaluation of stiffness moduli of base course made of mineral cement-emulsion mixture (MCEM) with addition of 5% (m/m) cement and 3% (m/m) asphalt emulsion was carried out. Statistical analysis of calculations and traffic analysis were made to determine the load-bearing capacity of the pavement construction and to estimate fatigue damage. It was found that the results of calculations with the three-layer elastic half-space model are characterized by a large variation, about 2-fold higher than in the case of the of the two-layer model. The calculated mean values of stiffness moduli at average surface temperature of 22°C in 2001 and 2013 were 6,191 MPa and 4,584 MPa respectively in the model of a double-layered elastic half-space.

KEYWORDS: elastic deflections, load-bearing capacity, mineral-cement-emulsion mixture, stiffness module.

DOI: 10.7409/rabdim.019.014

[1)] Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Dróg i Mostów, ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin; s.firlej@pollub.pl
[2)] Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Dróg i Mostów; jerzy.kukielka@pollub.pl (✉)

1. WPROWADZENIE

Warunki techniczne recyklingu wykonywanego metodą „na zimno", w tym z użyciem emulsji asfaltowej i cementu, opracowywano już w końcu XX w. i na początku XXI w. m.in. w USA [1], Polsce [2], Francji [3], Wielkiej Brytanii [4] i w Niemczech [5]. Przykłady opracowanych wymagań technicznych zawarte w publikacjach PIARC [6] oraz w pracach opublikowanych w Norwegii [7], Japonii [8] i Chinach [9] są dowodem na różnorodność stosowanych technik recyklingu i potwierdzeniem ich dużego znaczenia w drogownictwie.

Według przepisów niemieckich mieszanki o dominujących wiązaniach hydraulicznych, jak np. B2, zaleca się stosować obecnie tylko na drogach o lekkim i średnim natężeniu ruchu. Moduły sztywności mieszanek B2 określone w temperaturze 5°C powinny mieścić się w przedziale od 7000 MPa do 12500 MPa [5]. We francuskich wytycznych technicznych z 2004 r zalecano wzmocnienie górnych warstw nawierzchni za pomocą dodatku cementu i emulsji asfaltowej w łącznej ilości od 3% (m/m) do 7% (m/m) dla warstw przypisanych do V klasy recyklingu [3]. Mieszanki o dominujących wiązaniach asfaltowych, w przypadku których w celu wzmacnia warstwy recyklowanej w pierwszej fazie i przyspieszenia rozpadu emulsji dodawany jest cement w ilości do 2% (m/m) były tematem publikacji [10, 11].

Przed 1995 r. w warstwach nawierzchni z betonu asfaltowego występował często niedostatek grysów i duża ilość asfaltu. Taki stan nawierzchni utrzymywał się głównie na drogach zlokalizowanych we wschodnich regionach Polski. Wspólną cechą destruktu uzyskanego z pakietu starych warstw asfaltowych była ich niejednorodność, uziarnienie do 25 mm i mała zawartość frakcji do 2 mm. Ziarna piasku obtoczonego mastyksem stanowiły swego rodzaju zaprawę, która wiązała grube ziarna kruszywa często tylko częściowo, pozostawiając odsłonięte znaczne fragmenty ich powierzchni.

Względnie duża zawartość kruszywa doziarniającego destrukt asfaltowy jak i dodatku cementu (w ilości zalecanej do 4% (m/m)) stosowana w celu spełnienia wysokich wymagań stabilności według Marshalla [2] była jednak powodem wykonywania zbyt sztywnych warstw podbudowy i w konsekwencji powstawania pęknięć poprzecznych na wielu drogach w różnych regionach Polski. W pracy [12] opisano przebieg badań 80 odcinków dróg o podbudowach z MMCE o grubości od 12 do 43 cm, zawierających: destrukt asfaltowy w ilości od 30% do 71% [m/m], emulsję asfaltową od 1,2% do 5,9% [m/m], oraz cement od 2,5% do 7,0% [m/m]. Stwierdzono występowanie zarówno odcinków bez uszkodzeń jak i ze spękaniami. Prawdopodobną przyczyną występowania spękań była zbyt duża ilość cementu w mieszankach MCE

1. INTRODUCTION

Technical conditions of recycling carried out through the "in cold" method including bitumen emulsion and cement were drawn up already at the end of the 20 th century and the beginning of the 21 st century in among others the United States [1], Poland [2], France [3], the Great Britain [4], and Germany [5]. Examples of worked out technical requirements contained in PIARC [6] publications and papers published in Norway [7], Japan [8], and China [9] make proofs of diversity of applied recycling techniques and confirming their great significance in highway engineering.

According to the German regulations mixtures with dominating hydraulic settings as e.g. B2 are now recommended for roads with a low and average traffic intensities. Stiffness modulus of mixtures B2 qualified at the temperature of 5°C should be in the range from 7,000 MPa up to 12,500 MPa [5]. In the French regulations of 2004 reinforcement of upper pavement layers was recommended through additive cement and bitumen emulsion in the total amount from 3% (m/m) up to 7% (m/m) for layers ascribed to the class V of recycling [3]. Mixtures with dominating asphalt bounds in which cement in the amount up to 2% (m/m) is added for strengthening recycled layers in the first phase and acceleration of breaking of bitumen emulsion were subjects of publications [10, 11].

Shortage of gravel and large amounts of asphalt in pavement layers made of asphalt concrete often appeared before 1995. That state of pavements remained mainly on roads located in the eastern regions of Poland. So the common feature of reclaimed asphalt pavement (RAP) of the package of old asphalt layers was their heterogeneity, granulation up to 25 mm and low content of fractions to 2 mm. Sand grains coated with mastic made a jointing mortar of its kind binds large grains only partially leaving considerable bare fragments of their surface.

Relatively high content of virgin aggregate re-graining RAP as also cement additive (in the recommended volume up to 4% (m/m)) is applied to fulfil high Marshall's stability requirements [2]. However, it caused making excessively rigid base-course layers and consequently creating transverse cracks on many roads in various regions of Poland. In the publication [12] researchers made investigation of 80 roads sections with MCE mixture base courses from 12 cm to 43 cm thickness, containing: RAP in the amount from 30% to 71% [m/m], bitumen emulsion from 1.2% to 5.9% [m/m], and cement from 2.5% to 7.0% [m/m]. Sections without damages as well as with cracks

i minimalny, zalecany dodatek emulsji asfaltowej. W pracy [13] opisano projekt odcinka drogi wojewódzkiej nr 762 i podano wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej nawierzchni w przypadku podłoża gruntowego o module sprężystości odpowiednio 50 MPa, 80 MPa i 100 MPa, dokładnie oceniając na tej podstawie jej nośność oraz aktualny stan techniczny.

W opracowaniach [14, 15] podjęto natomiast analizę m.in. wpływu zawartości asfaltu w ilości 3÷6% (m/m) na właściwości wytrzymałościowe MMCE, porównując wyniki statycznych i dynamicznych modułów sztywności uzyskane dla mieszanek spełniających warunki techniczne przedstawione w [2]. W pracy [16] opisano relatywnie innowacyjne (zastosowane 20 lat temu) technologie wykorzystane do wykonania konstrukcji nawierzchni na eksploatowanym do roku 2018 odcinku autostrady A4, którą to oddano do użytku w końcówce latach dziewięćdziesiątych XX w. Wybrany do badań odcinek drogi DK 19 został wykonany w 2000 r. i był już wcześniej przedmiotem analiz zawartych m.in. w dwóch referatach zgłoszonych na konferencję IBDiM w Kielcach [17, 18] oraz artykułu [19]. Obecnie planowana jest przebudowa drogi DK 19 na ekspresową poprzez wzmocnienie dotychczasowej nawierzchni i wykonanie na niej nowej warstwy ścieralnej. W tym kontekście niezbędna więc będzie ponowna ocena techniczna istniejących odcinków nawierzchni o podbudowie z mieszanek MCE.

Rekomendowana przez Generalną Dyrekcję Dróg Krajowych i Autostrad Instrukcja [20] z 2014 r. ograniczyła stosowanie mieszanek MCE do dróg o kategorii ruchu KR1-KR2 i KR3-KR4, przyjmując dla nich dopuszczalny moduł sztywności określony metodą rozciągania pośredniego IT-CY po 28 dniach w temperaturze 5°C odpowiednio na poziomie do 5000 MPa i do 7000 MPa. W Instrukcji względnie wysokie są także wymagania dotyczące wytrzymałości mieszanek MCE na rozciąganie pośrednie po 28 dniach w temperaturze 5°C, czyli od 0,6 do 1,4 MPa w przypadku ruchu KR1-KR2 i od 0,7 do 1,6 MPa w przypadku ruchu KR3-KR4. Praktyczne wykorzystanie Instrukcji opracowanej w 2014 r. jest jednak nadal małe.

Ocenę mieszanek MCE pod kątem wymagań określonych w Instrukcji z 2014 r. [20] zawarto w [21, 22]. Autorzy pracy [21] stwierdzili, że największe zmiany modułów sztywności uzyskane wraz ze wzrostem zawartości cementu występują w mieszankach zawierających 2% (m/m) emulsji asfaltowej. W mieszankach o zawartości 4÷6% (m/m) cementu wpływ dodatku emulsji asfaltowej ponad 4% (m/m) na moduł sztywności jest mały. Na podstawie przeprowadzonych badań nie ustalono jednoznacznie granicy występowania w mieszankach MCE wiązań lepko-sprężystych lub tylko sprężystych.

were found. The probable reason of developing cracks was too large amount of cement in MCE mixtures, and minimal recommended addition of bitumen emulsion. The paper [13] describes the project of the district road No. 762 with results of calculations of fatigue durability of pavement in case of sub-grade with a modulus of elasticity at 50 MPa, 80 MPa and 100 MPa respectively, precisely assessing its load capacity and actual technical conditions.

However, in the studies [14, 15] i.a. the analysis of influence of asphalt content at 3-6 % (m/m) on resistance properties of MCE mixture, comparing measurement results of static and dynamic stiffness modulus obtained for mixtures fulfilling technical requirements introduced in [2] was undertaken. The paper [16] presents relatively innovative (employed 20 years ago) technologies applied for making pavement construction on the section of the highway A4 put to use at the end of 1990s and exploited to 2018. The selected section of the road DK 19 was made in 2000 and it was already the object of analysis contained i.a. in two papers presented on the Road and Bridge Research Institute conference in Kielce [17, 18], and the article [19]. Now a reconstruction of road DK 19 into an expressway is planned through strengthening the current pavement and making on it a new surface course. In that context the next technical assessment of existing pavement sections with base-course of MCE mixtures will be essential.

The manual [20] of 2014 recommended by the General Directorate for National Roads and Motorways limited application of MCE mixtures on roads of traffic categories TC1-TC2 and TC3-CT4 adopting for them the acceptable stiffness modulus determined through the method of indirect tension IT-CY after 28 days and the temperature of 5°C on the level from 5,000 MPa to 7,000 MPa respectively. In that manual relatively high are also requirements concerning indirect tensile strength of MCE mixtures after 28 days at the temperature of 5°C, what means from 0.6 MPa to 1.4 MPa in case of traffic TC3-TC4. Practical use of the manual drawn up in 2014 is still small.

Publications [21, 22] present the assessment of MCE mixtures paying special attention to requirements included in the manual of 2014 [20]. The authors of [21] claim that the biggest changes of stiffness modulus obtained with the growth of cement content occur in mixtures having 2% (m/m) of bitumen emulsion. In mixtures with the cement content at 4-6% (m/m) the influence of adding bitumen emulsion over 4% (m/m) on stiffness modulus is small. Basing on the conducted tests the boundary of occurring visco-elastic or only elastic bounds in MCE mixtures has not been explicitly established. Test results of resistance

Wyniki badań parametrów wytrzymałościowych próbek pobranych z odwiertów są według [22] istotnie gorsze od określonych na podstawie receptury laboratoryjnej czy w ramach badań odbiorczych. Nośność nawierzchni podatnych była także tematem wielu publikacji podejmujących m.in. problematykę: skumulowanej szkody zmęczeniowej [23], błędów pomiarowych [24], spękań zmęczeniowych [25], a także pomiarów fal mechanicznych i elektromagnetycznych (GPR) [26, 27].

2. CHARAKTERYSTYKA PROJEKTU PRZEBUDOWY, BADANIA W CZASIE REALIZACJI I PO ZAKOŃCZENIU ROBÓT

Przebudowa drogi DK 19 na odcinku 5 km polegała na wykonaniu jednostronnego poszerzenia jej do 7 m z przesunięciem istniejącej osi drogi o 0,75 m, co umożliwiało organizację i prowadzenie robót podczas ruchu. Technologia recyklingu na miejscu „in situ" wymagała wyrównania profilu jezdni za pomocą destruktu asfaltowego przed rozłożeniem kruszywa doziarniającego, a w lokalnych zagłębieniach przekroju podłużnego i poprzecznego przez ułożenie kruszywa łamanego 0/31,5 mm.

Zaprojektowano mieszankę MCE o zawartości destruktu asfaltowego 50% (m/m), kruszywa doziarniającego 43% (m/m), cementu 5% (m/m) i emulsji asfaltowej 3% (m/m). Łączna objętościowa zawartość asfaltu starego i z emulsji wynosiła 12% (v/v). Wyniki badań próbek z MMCE pobranych w czasie budowy z pasa przy krawędzi prawej (bez poszerzenia) potwierdziły przyjęte założenia i spełniły wymagania zawarte w specyfikacji technicznej (ST).

Stabilność próbek wg Marshalla zawierała się w przedziale od 7,8 kN do 13,9 kN, a jej wartość średnia wynosiła 10,16 kN, przy współczynniku zmienności τ=25%. Przemieszczenie metodą Marshalla osiągnęło wartość średnią 1,19 mm przy zanotowanym współczynniku zmienności τ=13%. Zawartość wolnych przestrzeni w próbce była względnie mała czyli 11,03% przy także bardzo małym współczynniku zmienności τ=3%.

W badaniach poprzedzających projektowanie etapu wzmocnienia nawierzchni stwierdzono, iż podłoże pod konstrukcją nawierzchni stanowią pyły piaszczyste lub piaski gliniaste o wskaźniku nośności *CBR*=7,4%. Analiza odkrywek (wcinek) wykonanych przy krawędzi starej nawierzchni pozwoliła ustalić grubość podsypki z piasku drobnoziarnistego h=20 cm, tłucznia h=15÷31 cm oraz starych warstw z betonu asfaltowego h=10÷20 cm.

parameters of samples taken from boreholes are acc. to [22] indeed worse than those determined on the ground of laboratory prescription or as a part of acceptance testing. Load capacity of flexible pavements was also the subject of many publications undertaking issues i.a.: accumulated fatigue damages [23], measuring errors [24], fatigue cracks [25], and also measurements of mechanical and electromagnetic waves (GPR) [26, 27].

2. CHARACTERISTICS OF THE RECONSTRUCTION PROJECT, TESTS DURING CONSTRUCTION AND AFTER FINISHING ROAD WORKS

The reconstruction of the road DK 19 on its section 5 km consisted in making its unilateral widening to 7 m with displacing its existing centre line 0.75 m further what enabled organization and getting down work during road traffic. The "in situ" technology of reconstruction required regulating the roadway profile with the use of RAP before putting re-graining aggregate and laying down crushed stone 0/31.5 mm in local hollows of lengthwise and transverse sections.

The designed MCE mixture contained reclaimed asphalt pavement 50% (m/m), re-graining aggregate 43% (m/m), cement 5% (m/m) and bitumen emulsion 3% (m/m). The total volume of old bitumen and from the emulsion amounted to 12% (v/v). Test results of MCE mixture samples taken from a lane by the right edge (without widening) in the time of construction confirmed requirements contained in the technical specification (ST).

The Marshall stability of samples was in the range from 7.8 kN to 13.9 kN while its average value was 10.16 kN with the coefficient of variation τ=25%. The Marshall deformation reached the average value 1.19 mm at the recorded coefficient of variation τ=13%. The content of air voids in the samples was relatively low i.e. 11.03% also at the very small coefficient of variation τ=3%.

It was found in the tests preceding designing the stage of pavement strengthening that subsoil under pavement structure was made of silt sands or clay sands with the bearing ratio *CBR*=7.4%. The analysis of pits (necks) allowed fixing the thickness of laying course of fine-sand h=20 cm, broken stone h=15-31 cm and old layers of asphalt concrete h=10-20 cm.

The first measurements of FWD elastic deflections of pavement layers were carried out on the tested section at

Pierwsze pomiary ugięć sprężystych FWD warstw nawierzchni o temperaturze od 4°C do 34°C wykonano na badanym odcinku w 2001 r. Moduły sztywności warstw nawierzchni obliczono wówczas korzystając z oprogramowania ELMOD. W przypadku warstw zespolonych: ścieralnej, wiążącej i podbudowy z MMCE, moduł sztywności dwuwarstwowej półprzestrzeni sprężystej w temperaturze 22°C osiągnął wartość E_1 = 6191 MPa. Miarodajna wartość modułu sprężystości podłoża, na poziomie tłucznia pod warstwą MMCE wynosiła E_m=97 MPa.

Po przebudowie, nowa konstrukcja zbudowana w celu wzmocnienia nawierzchni miała następujące grubości warstw:

- 5 cm – ścieralna z betonu asfaltowego,
- 8 cm – wiążąca z betonu asfaltowego,
- 19 cm – podbudowa z MMCE.

Zawartość asfaltu w podbudowie przyjęto podobnie jak w projekcie mieszanki MCE na poziomie V_b=12% (v/v), natomiast zawartość wolnych przestrzeni ustalono na podstawie badań próbek z odwiertów V_a=11% (v/v). Moduł sztywności w temperaturze średniorocznej wyniósł 6191 MPa, a parametry materiałowe warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych przyjęto zgodnie z rozporządzeniem [28]. Współczynnik Poissona wszystkich materiałów użytych w przypadku analizowanej konstrukcji nawierzchni przyjęto jako ν=0,30. Następnie wykorzystując oprogramowanie przeznaczone do projektowania nawierzchni metodą mechanistyczno-empiryczną (BISAR) uzyskano wartość odkształcenia rozciągającego na spodzie warstwy podbudowy z MMCE ε_r=57,87 · 10^{-6} oraz odkształcenia ściskającego w podłożu ε_c=189,5 · 10^{-6}. Trwałość zmęczeniową konstrukcji obliczono na podstawie kryterium Instytutu Asfaltowego USA dla nawierzchni podatnych i wyniosła ona N_f^{asf} =8 673 828 osi 100 kN/pas, czyli nieznacznie przekroczyła maksymalną wartość 7 300 000 osi 100 kN/pas dopuszczalną dla kategorii ruchu KR4.

3. OCENA NOŚNOŚCI NAWIERZCHNI

3.1. UWAGI OGÓLNE

Przebudowę odcinka drogi DK19 zakończono późną jesienią 2000 r. a pomiary ugięć sprężystych FWD przeprowadzono w roku 2001. Po roku eksploatacji nastąpiło początkowe zmęczenie podbudowy z MMCE pod wpływem ruchu pojazdów, lecz jednocześnie proces twardnienia cementu spowodował wzrost wytrzymałości warstwy. Wyniki badań FWD w temperaturze 5°C przeprowadzone na wiosnę oraz jesienią 2001 r. w tych samych miejscach pomiarowych różniły się minimalnie [19]. W efekcie nie potwierdziła się obawa o możli-

the temperature from 4°C to 34°C in 2001. At that time stiffness modulus of pavement layers were calculated using the ELMOD software. In case of complex layers: surface course, binder course, and MCE mixture base course, the stiffness modulus of two-layer elastic semi-space at the temperature of 22°C reached the value E_1 = 6,191 MPa. The reliable value of sub-grade modulus of elasticity on the broken stone layer under MCE mixture layer was E_m=97 MPa.

After reconstruction the new structure built to reinforce pavements had the following thicknesses of layers:

- 5 cm – surface course of asphalt concrete,
- 8 cm – binder course of asphalt concrete,
- 19 cm – base course of MCE mixture.

The bitumen content in the base course was taken on like in the project of MCE mixture on a level V_b=12% (v/v), while the content of air voids was fixed basing on tests of samples from boreholes V_a=11% (v/v). The stiffness modulus at the average-year temperature was 6,191 MPa, while material parameters of layers of hot rolled asphalt were adopted acc. to the regulation [28]. In case of the analysed structure the Poisson's ratio of all used materials was ν =0.30 adopted. Then using software for designing pavements with the mechanistic-empirical method (BISAR) values of tensile strain on the bottom of MCE mixture base course layer ε_r=57.87 · 10^{-6} and sub-base course compression strain ε_c=189.5 · 10^{-6} were obtained. The fatigue life of the pavement construction was calculated basing on a criterion of the Asphalt Institute, USA for flexible pavements. It valued at N_f^{asf} = 8,673,828 axles 100 kN/line slightly exceeding the maximal value 7,300,000 axles 100 kN/line permissible for the traffic category TC4.

3. THE ASSESSMENT OF PAVEMENT LOAD CAPACITY

3.1. GENERAL REMARKS

The reconstruction of the road section DK19 was fished late in autumn 2000 and measurements of FWD deflections were carried out in 2001. There was an initial fatigue of MCE mixture base course due to the road traffic after one year of exploitation but simultaneously the process of bitumen hardening caused an increase of the layer strength. The results of testing FWD at the temperature of 5°C carried out in the spring and autumn 2001 in the same measurement points differed minimally [19]. In the end, fear for a possibility of decrease of load capacity in the first year of exploitation was not confirmed.

wość obniżenia nośności w pierwszym roku eksploatacji nawierzchni, jak początkowo przypuszczano.

3.2. ANALIZA UGIĘĆ SPRĘŻYSTYCH FWD WYKONANYCH W 2001 R. I 2013 R.

W ramach badań przeprowadzonych w 2001 r. wykonano 51 pomiarów FWD w średniej temperaturze nawierzchni 22°C (Rys. 1). Na ich podstawie uzyskano średnie ugięcie w osi $w_{śr}$=204 μm, odchylenie standardowe σ=29 μm i współczynnik zmienności τ=14%, ugięcie miarodajne w_m= 204+2×29=263 μm.

3.2. THE ANALYSIS OF FWD DEFLECTIONS CARRIED OUT IN 2001 AND 2013

As a part of tests conducted in 2001, 51 FWD measurements at the average temperature 22°C (Fig. 1) were carried out. The following parameters obtained basing on them: mean axle deflection w_m=204 μm, standard deviation σ=29 μm, coefficient of variation τ=14 %, and reliable deflection w_{re}=204+2×29=263 μm.

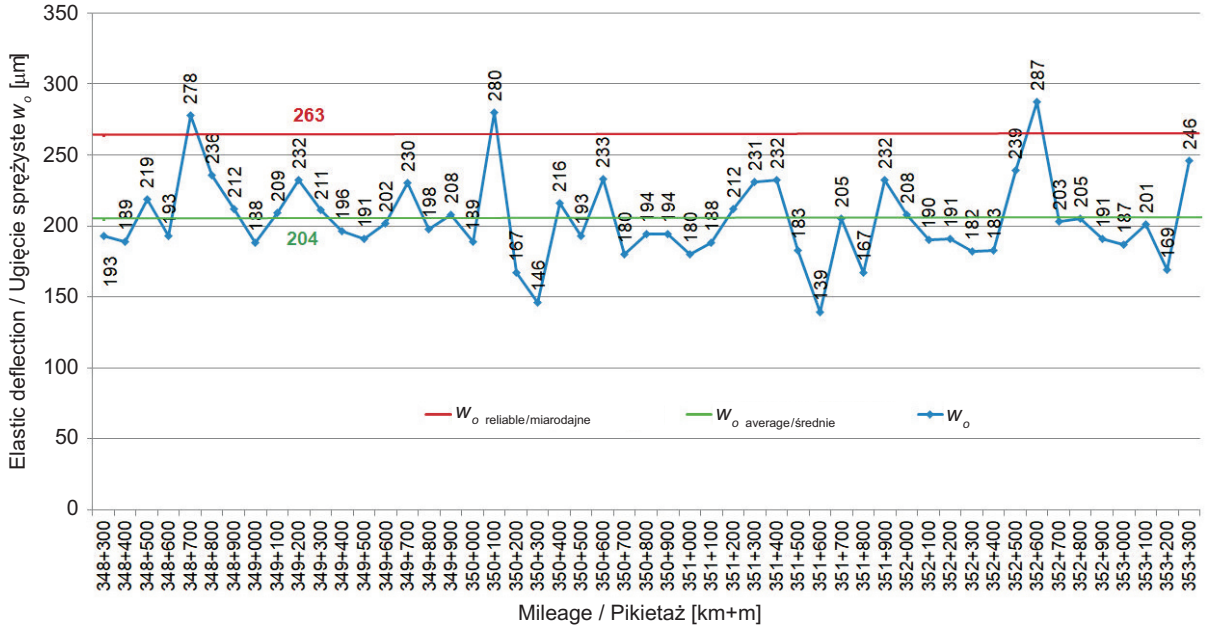

Fig. 1. FWD deflections on the road section DK 19 from km 348+300 to km 353+300 (the old mileage) measured in 2001 at the average temperature of pavement of 22°C

Rys.1. Ugięcia sprężyste FWD na odcinku DK 19 od km 348+300 do km 353+300 (stary pikietaż) zmierzone w 2001 r. w średniej temperaturze nawierzchni 22°C

W celu określenia nośności nawierzchni po 12 latach eksploatacji w lipcu 2013 r. wykonano ponownie 51 pomiarów FWD w średniej temperaturze nawierzchni 22°C w nowych punktach – po zmianie pikietażu (kilometracji) (Rys. 2). Średnie ugięcie w osi obciążenia wyniosło wówczas $w_{śr}$= 243 μm, odchylenie standardowe σ = 63 μm, współczynnik zmienności τ=26%, ugięcie miarodajne w_m= 243+ +2×63=369 μm. Po 12 latach eksploatacji nastąpił wzrost ugięcia miarodajnego o 40%, natomiast ugięcia średniego o 19%. Oceniając ugięcia FWD, które zmierzono po wielu latach użytkowania drogi, należy zwracać uwagę na ich ekstremalne wartości, które mogą wynikać nie tylko ze zmęczenia nawierzchni, ale także ze zmian zachodzących w podłożu, bezpośrednio związanych z warunkami gruntowo-wodnymi.

Aiming at determining the load capacity of pavement after 12 years of exploitation 51 FWD measurements in new points at the average pavement temperature of 22°C after changing a mileage (Fig. 2) were carried out once more in July 2013. Then the mean deflection in the load axis came to w_{av} = 243 μm, standard deviation σ = 63 μm, coefficient of variation τ=26%, and reliable deflection w_{re}=243+ +2×63=369 μm. After 12 years of exploitation came the rise of reliable deflection by 40% whereas average deflection by 19%. Assessing FWD deflections measured after many years of using a road, attention should be paid on their extreme values which can arose not only due to the pavement fatigue but also sub-grade changes directly bound by ground and water conditions.

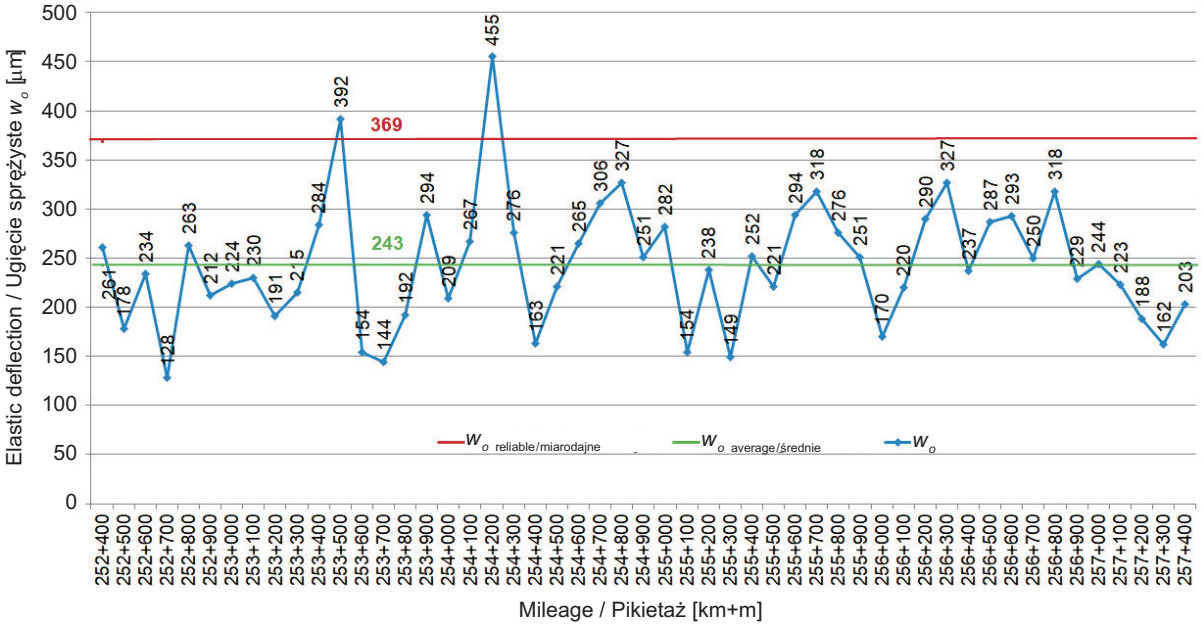

Fig. 2. FWD deflections on the road DK 19 from km 252+400 to km 257+400 (the new mileage) measured in 2013 at the average temperature of pavement of 22°C
Rys. 2. Ugięcia sprężyste FWD na DK 19 od km 252+400 do km 257+400 według nowego pikietażu zmierzone w 2013 r. w średniej temperaturze nawierzchni 22°C

3.3. OCENA PODBUDOWY MMCE NA PODSTAWIE OBLICZEŃ MODUŁÓW SZTYWNOŚCI

Do obliczeń modułów sztywności przyjęto metodę odwrotnych obliczeń SF-PL [29], polegającą na numerycznym utworzeniu $m = n - 1$ ciągów bezwymiarowych E_i/E_n (m – liczba warstw w rozważanym modelu), kwantowanych liczbowo i zmieniających się w zależności od otrzymywanych odpowiednio ilorazów przemieszczeń w_i/w_o dotąd, aż wartość bezwzględna każdego z odchyleń w ilorazach przemieszczeń (rzeczywistych i obliczonych) będzie mniejsza od ε – przyjmowanej dowolnie małej. W modelu przyjęto układ współrzędnych walcowych z pominięciem sił masowych. Ze względu na symetrię obciążenia, nie został uwzględniony kąt mierzony w płaszczyźnie poziomej. Zastosowano układ dwóch osi: pionowej z i poziomej r. Obliczenia przeprowadzono korzystając z funkcji naprężeń harmonicznych $\Phi(r, z)$, przy spełnionym warunku zerowania się operatora zwanego bilaplasjanem w równaniu różniczkowym funkcji Bessela, opisującej ugięcie płyty w układzie kartezjańskim.

Moduł sprężystości w modelu półprzestrzeni sprężystej i płyty podatnej można obliczyć na podstawie przemieszczenia pionowego w osi obciążenia wykorzystując wzór z pracy [29]:

3.3. THE ASSESSMENT OF MCE MIXTURE BASE COURSE BASING ON CALCULATIONS OF STIFFNESS MODULI

The SF-PL back-calculation method [29] was applied for calculating stiffness modulus. It relies on making digital $m = n - 1$ dimensionless sequences E_i/E_n (m – number of layers in a considered model), numerically quantified and changed depending on received displacement quotient w_i/w_o till the absolute value of each of deviations (real and calculated) will be less than ε – freely small accepted. The system of cylindrical coordinates passing over mass forces was accepted in the model. The angle measured in the horizontal plane were not taken into consideration because of the symmetry of loading. The system of two axes was applied: vertical z and horizontal r. Calculations were carried out using the function of harmonic stresses $\Phi(r, z)$, with fulfilled condition of clearing an bilaplacian operator in a differential equation of the Bessel's function describing the deflection of plate in the Cartesian's system.

The stiffness modulus in elastic semi-space and flexible plate can be calculated on the grounds of vertical displacement in the centre line of loading with the use of a formula from the paper [29]:

$$E = \frac{2 \cdot q \cdot a \cdot (1 - \nu^2)}{w_o}, \tag{1}$$

gdzie:

q – obciążenie jednostkowe pod płytą [MPa],

a – promień płyty obciążającej [m],

ν – współczynnik Poissona materiału,

w_o – ugięcie sprężyste w osi obciążenia [m].

Porównanie obliczonych modułów sztywności należy prawidłowo wykonywać w odniesieniu do tych samym punktów pomiarowych. W przypadku analizowanego odcinka drogi, po wieloletniej przerwie pomiędzy przeprowadzonymi pomiarami oraz zmianie kilometrażu nie było jednak możliwe wykonanie takiego porównania. W związku z tym przyjęto postępowanie polegające na ocenie, uzyskanych na analizowanym odcinku drogi, wartości średnich i miarodajnych ugięć oraz modułów sztywności.

Model trójwarstwowej półprzestrzeni sprężystej

Badania ugięć sprężystych FWD dokonane w 2001 r. i 2013 r. posłużyły do wykonania obliczeń modułów sztywności trójwarstwowej półprzestrzeni sprężystej (pakietu warstw asfaltowych, podbudowy z MMCE oraz podłoża) z wykorzystaniem programu SF-PL [29] (Rys. 3 i 4).

where:

q – unitary loading under plate [MPa],

a – radius of loading plate [m],

ν – Poisson's ratio of a material,

w_o – deflection in the load axle [m].

The comparison of calculated stiffness modulus should be correctly done with reference to the same measuring points. However, conducting such a comparison was impossible in case of the analysed road section, after a long-standing interruption between carried out measurements and change of mileage. By reason of the accepted rules of conduct relied on the assessment of acquired average and reliable values of deflections and stiffness modulus.

The model of three-layer elastic semi-space

Tests of deflections FWD carried out in 2001 and 2013 made possible calculating stiffness moduli of three-layer elastic semi-space (a packet of asphalt layers, base course of MCE mixture, and sub-grade) with the use of the programme SF-PL [29] (Fig. 3 and 4).

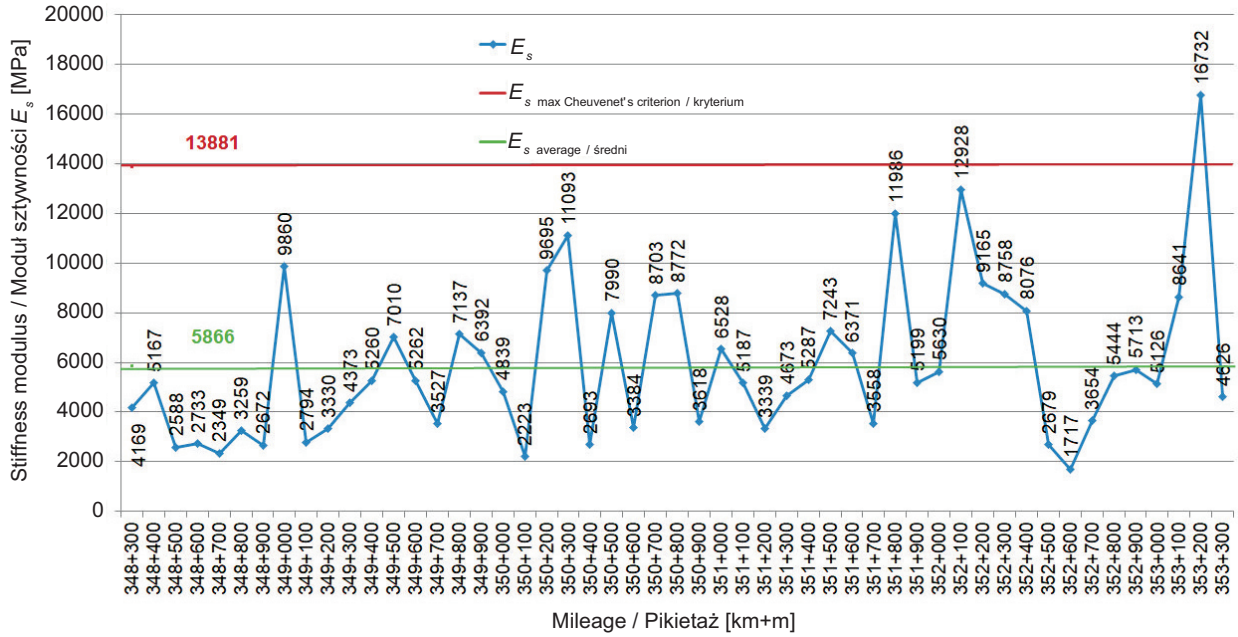

Fig. 3. Stiffness moduli of a base course of MCE mixture on the road section DK 19 from km 348+300 to km 353+300 (the old mileage) basing on measurements FWD of 2001 carried out at the average temperature of pavement 22°C and calculated with the use of the programme SF-PL

Rys. 3. Obliczone z wykorzystaniem programu SF-PL moduły sztywności podbudowy z MMCE na odcinku DK 19 od km 348+300 do km 353+300 (stary pikietaż) na podstawie pomiarów FWD z 2001 r. w średniej temperaturze nawierzchni 22°C

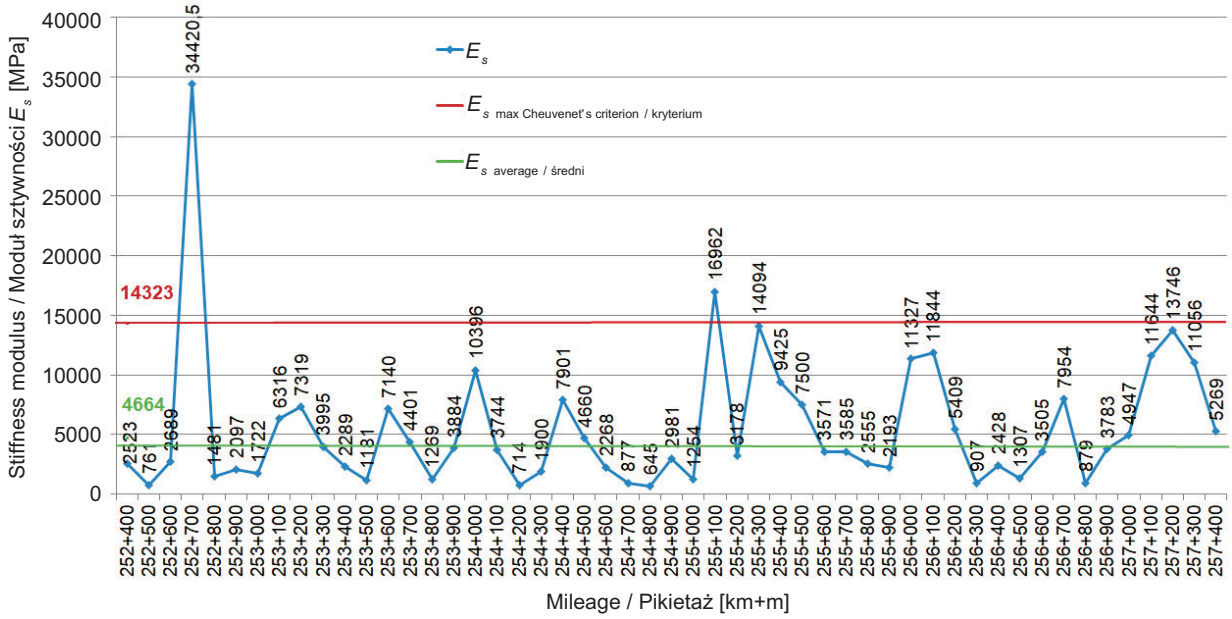

Fig. 4. Stiffness moduli of a base course of MCE mixture on the road section DK 19 from km 252+400 to km 257+400 (the new mileage) basing on measurements FWD of 2013 carried out at the average temperature of pavement 22°C and calculated with the use of the programme SF-PL

Rys. 4. Obliczone z wykorzystaniem programu SF-PL moduły sztywności podbudowy z MMCE na odcinku DK 19 od km 252+400 do km 257+400 (nowy pikietaż) na podstawie pomiarów FWD z 2013 r. w średniej temperaturze nawierzchni 22°C

Do oceny wyników przyjęto kryterium Chauveneta [30] przy prawdopodobieństwie obliczanym ze wzoru:

The Chauvenet's criterion [30] was used for assessment of results at probability calculated with a formula:

$$P = 1 - \frac{1}{2 \cdot N}, \tag{2}$$

gdzie:

N – ilość wyników podlegających sprawdzeniu wg kryterium.

where:

N – number of results submitted to verification acc. to the criterion.

Zgodnie z przyjętą metodą analizy niepewności pomiarowych 50 uzyskanych wyników odpowiada poziomowi ufności 99%. Wynik przekraczający wartość $E_{s\,\max} = E_{s\,śr} + t \cdot \sigma$ jest zaś traktowany jako błędny (1%), gdzie t - współczynnik Chauveneta, σ - odchylenie standardowe.

Można zauważyć, że po 13 latach eksploatacji badanego odcinka drogi nastąpił szczególnie duży wzrost liczby najmniejszych modułów sztywności MMCE, to znaczy mniejszych niż 2000 MPa (Rys. 4). Obliczony na podstawie badań z roku 2001 r. średni moduł sztywności podbudowy z MMCE wyniósł $E_{s\,śr}$=5866 MPa, odchylenie standardowe σ=3112 MPa, współczynnik zmienności τ=53%. W roku 2013 r. średni moduł sztywności wynosił natomiast $E_{s\,śr}$=4664 MPa, odchylenie standardowe σ=3750 MPa, współczynnik zmienności τ=80%. Tak duże wartości odchyleń standardowych powodują, że w tym przypadku nie jest uzasadnione obliczenie miarodajnego modułu sztywności.

According to the adopted analytical method of measurement uncertainty 50 obtained results correspond to the confidence level of 99%. The result exceeding value $E_{s\,\max} = E_{s\,av} + t \cdot \sigma$ is treated as an error (1%), where t - Chauvenet's coefficient, σ - standard deviation.

After 13 years of exploitation of the tested road section one can notice a particularly high rise in the number of the lowest MCE mixture stiffness moduli, lower than 2,000 MPa (Fig. 4). Calculated on the grounds of testing in 2001 the average stiffness module of the MCE mixture base course amounted to $E_{s\,av}$=5,866 MPa, standard deviation σ= 3,112 MPa, coefficient of variation τ=53%. In 2013, the average stiffness module reached value of $E_{s\,av}$ = 4,664 MPa, standard deviation τ = 3,750 MPa, coefficient of variation σ = 80%. So high values of standard deviations causes that calculations of reliable stiffness modulus is unjustifiable.

W przypadku obliczeń trójwarstwowej półprzestrzeni sprężystej wykonanych z wykorzystaniem programu SF-PL średni moduł sztywności warstwy MMCE po 12 latach eksploatacji zmalał o 20%. Należy jednak zwrócić uwagę na bardzo dużą niejednorodność uzyskanych wyników obliczeń, która świadczy o możliwości wystąpienia w podbudowie miejsc, gdzie zgodnie z podanym współczynnikiem zmienności moduł sztywności zmalał nawet o 80% w stosunku do wartości średniej.

Model dwuwarstwowej półprzestrzeni sprężystej

Przyjęcie modelu dwuwarstwowej półprzestrzeni sprężystej umożliwia uzyskanie wyników zdecydowanie bardziej jednorodnych niż w przypadku modelu trójwarstwowej półprzestrzeni, co zostało potwierdzone także w pracy [29] (Rys. 5 i 6). Średni moduł sztywności obliczony na podstawie danych z roku 2001 dla pakietu warstw asfaltowych w średniej temperaturze nawierzchni 22°C wynosił $E_{s\,śr}$=6191 MPa, odchylenie standardowe σ=1272 MPa, współczynnik zmienności τ=21%. W roku 2013 średni moduł sztywności określony w średniej temperaturze nawierzchni 22°C wyniósł $E_{s\,śr}$=4584 MPa, odchylenie standardowe σ=1872 MPa, współczynnik zmienności τ=41%. Obliczono także miarodajne moduły sztywności uzyskane na podstawie wyników badań z roku 2001 oraz z 2013, które w tych latach miały odpowiednio wartości $E_{s\,m}$=3646 MPa i $E_{s\,m}$=840 MPa.

In case of calculations of three-layer elastic semi-space carried out with the use of the SF-PL programme the average stiffness modulus fell down by 20% after 12 years of exploitation. However, the very un-homogeneous results of calculations should be noted. They prove the possibility of occurrence in the base course places where stiffness modulus according to the given coefficient of variation fell down even by 80% in comparison with the average value.

The model of two-layer elastic semi-space

Adoption of two-layer semi-space enables receiving results decidedly more consistent than in case of the model of three-layer semi-space what has been confirmed in a monograph [29] (Fig. 5 and 6). The average stiffness modulus calculated basing on data of 2001 for a packet of asphalt layers in the average temperature of pavement 22°C amounted to $E_{s\,av}$=6,191 MPa, standard deviation σ=1,272 MPa, coefficient of variation τ=21%. In 2013 the average stiffness modulus determined at the average temperature of pavement 22°C was $E_{s\,av}$=4,584 MPa, standard deviation σ=1,872 MPa, coefficient of variation τ=41%. Reliable results of stiffness moduli received basing on test results of 2001 and 2013 were also calculated. They were valued at $E_{s\,re}$=3,646 MPa and $E_{s\,re}$=840 MPa respectively.

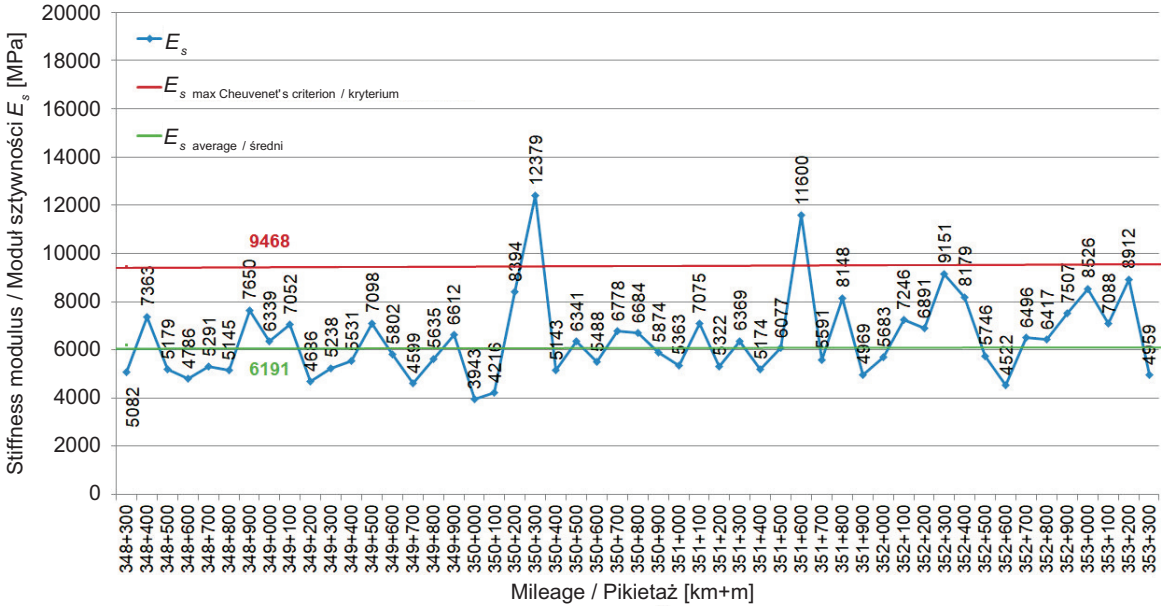

Fig. 5. Stiffness moduli of a packet of asphalt layers (including MCE mixture) on the road section DK 19 from km 348+300 to km 353+300 (the old mileage) basing on measurements FWD of 2001 carried out at the average temperature of pavement 22°C and calculated with the use of the programme ELMOD

Rys. 5. Obliczone za pomocą programu ELMOD moduły sztywności pakietu warstw asfaltowych (w tym MMCE) na odcinku DK 19 od km 348+300 do km 353+300 (stary pikietaż) na podstawie pomiarów FWD z 2001 r. wykonanych w średniej temperaturze nawierzchni 22°C

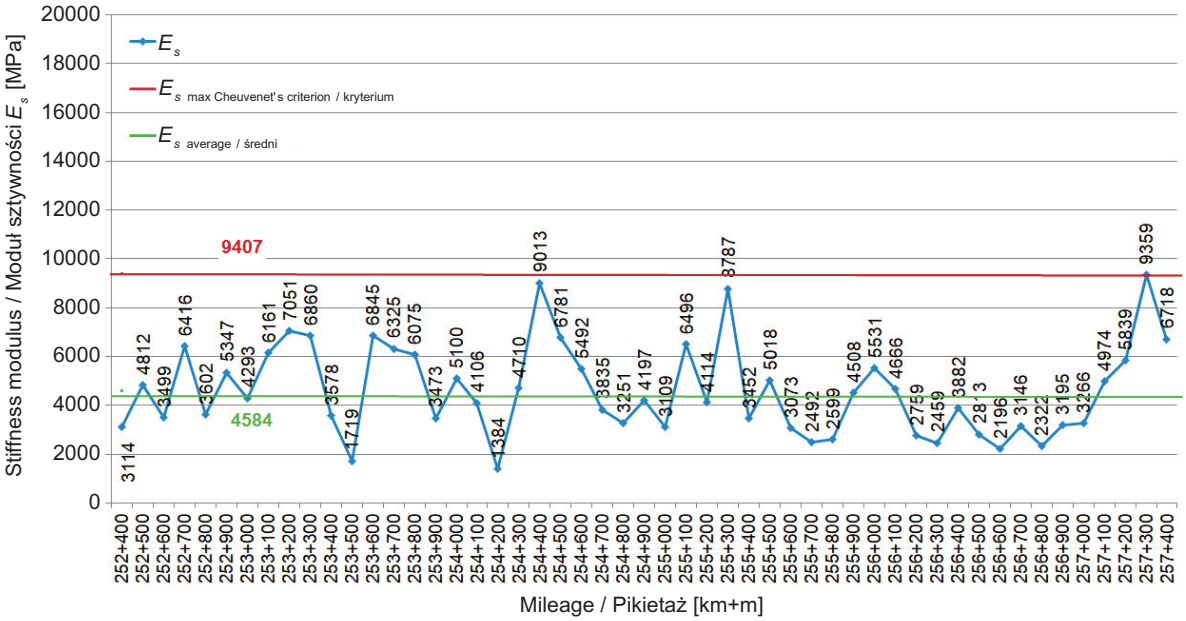

Fig. 6. Stiffness moduli of a packet of asphalt layers (including MCE mixture) on the road section DK 19 from km 252+400 to km 257+400 (the new mileage) basing on measurements FWD of 2013 carried out at the average temperature of pavement 22°C and calculated with the use of the programme SF-PL

Rys. 6. Obliczone za pomocą programu SF-PL moduły sztywności pakietu warstw asfaltowych (w tym MMCE) odcinku na DK 19 od km 252+400 do km 257+400 (nowy pikietaż) na podstawie pomiarów FWD w 2013 r. wykonanych w średniej temperaturze nawierzchni 22°C

Porównując np. najmniejsze wartości modułów sztywności na Rys. 5 i 6 obliczone odpowiednio dla tych samych punktów pomiarowych można zauważyć, że po 12 latach eksploatacji badanego odcinka drogi DK 19 różnią się one około 2-krotnie w stosunku do tych z roku 2001 i opowiadają lokalnym miejscom o szkodzie zmęczeniowej $D \approx 50\%$. Można zatem wnioskować, że największa degradacja warstwy podbudowy z MMCE nastąpiła podczas jej użytkowania w miejscach o najmniejszych modułach sztywności i tym samym największych zmierzonych ugięciach.

3.4. ANALIZA RUCHU I PROGNOZOWANEJ SZKODY ZMĘCZENIOWEJ

Szkodę zmęczeniową D konstrukcji nawierzchni można obliczyć za pomocą wzoru [31]:

Comparing eg. the lowest values of stiffness moduli on Fig. 5 and 6 determined respectively for the same measurement points one can see that after 12 years of exploitation of the tested road section DK 19 they differ ca. twice in relation to those from 2001 reflecting local points with fatigue damage $D \approx 50\%$. One may also conclude that the biggest degradation of the MCE Mixture road-base layer took place during its exploitation in places with the lowest stiffness moduli and therefore the biggest measured deflections.

3.4. TRAFFIC ANALYSIS AND ANALYSIS OF FORCAST FAFIGUE DAMAGES

The fatigue damage D of pavement structure can be calculated with the use of formula [31]:

$$D = \left(1 - \frac{E_n}{E_0}\right) \cdot 100\% , \tag{3}$$

gdzie:

E_n – momoduł sztywności konstrukcji nawierzchni po n latach [MPa],

E_0 – pierwotny moduł sztywności konstrukcji nawierzchni [MPa].

where:

E_n – stiffness modulus of a pavement structure after n years [MPa],

E_0 – primary stiffness modulus of a pavement structure [MPa].

Szkoda zmęczeniowa D po 12 latach eksploatacji analizowanego odcinka drogi obliczona na podstawie miarodajnego modułu sztywności wynosiła aż 77%, podczas gdy w przypadku uwzględnienia średniego modułu sztywności – tylko 26%.

Szkoda zmęczeniowa może być także oceniania na podstawie ruchu prognozowanego i rzeczywistego, który wystąpił na analizowanym odcinku drogi. Ruch archiwalny obliczono na podstawie GPRD realizowanego przez GDDKiA w latach 2000, 2005, 2010, 2015. Przeliczenie pojazdów rzeczywistych na osie obliczeniowe 100 kN (Tabl. 1) przeprowadzono zgodnie ze wzorem zamieszczonym w katalogu KTNPiP opracowanym w 2014 r [32]:

The fatigue damage D after 12 years of exploitation of the analysed road section calculated basing on the reliable stiffness modulus was as much as 77%, when taking into account the average stiffness modulus – only 26%.

Fatigue damages can be also assessed by forecast and real traffics which occurred on the analyzed road section. The historical traffic was calculated basing on general measurement of road traffic carried out the General Directorate for National Roads and Motorways in the years 2000, 2005, 2010, and 2015. The conversion of real vehicles into calculative axles 100 kN (Table 1) was carried out acc. to the formula placed in the catalogue drawn up in 2014 [32]:

$$SDR_{100} = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot (SDR_C \cdot \tau_C + SDR_{C+P} \cdot \tau_{C+P} + SDR_A \cdot \tau_A) . \quad (4)$$

Do obliczeń przyjęto następujące wartości współczynników:

f_1=0,5; f_2=1; f_3=1; τ_C=0,5; τ_{C+P}=1,6; τ_A=1,2.

The following values of factors were applied for calculations:

f_1=0.5; f_2=1; f_3=1; τ_C=0.5; τ_{C+P}=1.6; τ_A=1.2.

Table 1. Average daily annual traffic on the road section DK 19 in the measurement point 80401
Tablica 1. Średni dobowy ruch roczny na odcinku DK 19 w punkcie pomiarowym 80401

Measurement year Rok pomiaru	Lorries without trailers Samochody ciężarowe bez przyczep SDR_C	Lorries with trailers Samochody ciężarowe z przyczepami SDR_{C+P}	Coaches Autobusy SDR_A	SDR_{100}
2000	288	516	101	545
2005	264	765	66	718
2010	344	1135	57	1028
2015	309	1806	46	1550
2020	Forecast based on a regression curve / Prognoza na podstawie krzywej regresji			2228

W celu obliczenia całkowitego 20-letniego ruchu na odcinku DK 19 na podstawie zarchiwizowanych danych dotyczących jego natężenia w danym punkcie pomiarowym w latach 2000-2015 wykreślono przebieg krzywej regresji średniego dobowego ruchu w przeliczeniu na 100 kN osie SDR_{100} (Rys. 7).

The regression curve of the average daily traffic converted into axles 100 kN SDR_{100} (Fig. 7) was drawn up aiming at calculating twenty years' traffic on the road section DK 19 basing on archival data referring to its intensity in given measuring points in years 2000-2015.

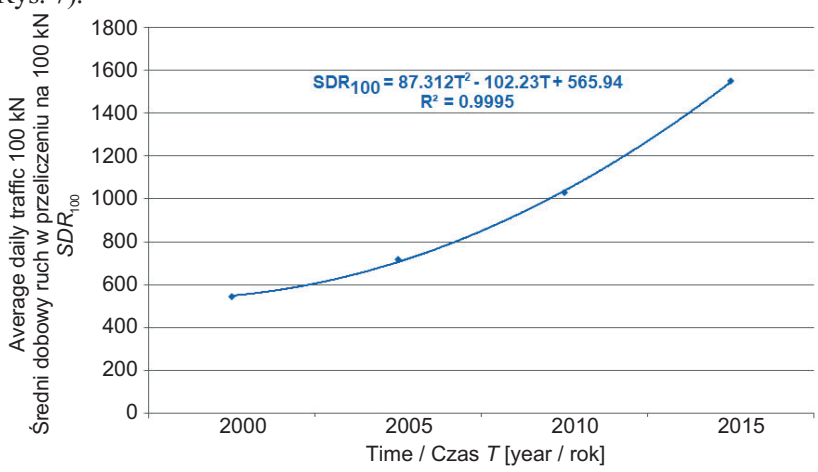

Fig. 7. Regression curve SDR_{100} depending on the measurement year
Rys. 7. Krzywa regresji SDR_{100} w zależności od roku pomiaru

Całkowity ruch (Tabl. 2) pojazdów w przeliczeniu na osie 100 kN w okresie 2000-2015 obliczono na podstawie wzoru z pracy [31]:

The total traffic (Table 2) converted into axles 100 kN in the period 2000-2015 calculated basing on the formula of the catalogue [31]:

$$N_{100/line/pas} = \tag{5}$$
$$= 365 \cdot \left[5 \cdot \left(\frac{SDR_{2000} + SDR_{2005}}{2} \right) + 5 \cdot \left(\frac{SDR_{2005} + SDR_{2010}}{2} \right) + 5 \cdot \left(\frac{SDR_{2010} + SDR_{2015}}{2} \right) + 5 \cdot \left(\frac{SDR_{2015} + SDR_{2020}}{2} \right) \right].$$

Table 2. Total traffic converted into axles 100 KN on the tested road section DK 19 in the period 2000-2015 and forecast traffic in the period 2000-2020
Tablica 2. Ruch całkowity w przeliczeniu na osie 100 kN na badanym odcinku DK 19 w latach 2000-2015 oraz prognozowany w okresie 2000-2020

Computational period in years / Okres obliczeniowy w latach	Total traffic / Całkowty ruch $N_{100/line/pas}$
15	5 097 818
20	8 544 924

Prognozowana szkoda zmęczeniowa na analizowanym odcinku DK 19 po 15 latach eksploatacji nawierzchni, zgodnie ze wzorem zamieszczonym w Katalogu [31], wyniosła:

According to the formula in the Catalogue [31] after 15 years of exploitation the forecast fatigue damage on the analysed road section DK 19 was:

$$D = \frac{N_{100/line/pas}}{N_f^{asf}} \cdot 100\% = \frac{5\ 097\ 818}{8\ 673\ 828} \cdot 100\% = 59\% \ . \tag{6}$$

Prognozowany ruch na okres 20 lat (do roku 2020) wpływa na trwałość zmęczeniową konstrukcji nawierzchni, którą można obliczyć stosując metodę mechanistyczną zgodnie z kryterium spękań zmęczeniowych Instytutu Asfaltowego USA dla warstw asfaltowych podatnych. W metodzie tej przyjmuje się stan graniczny występowania spękań zmęczeniowych o szerokości większej od 2 mm na poziomie 20% powierzchni jezdni lub wystąpienie deformacji strukturalnej o głębokości 12,5 mm [31].

The forecast traffic for the period of 20 years (till 2020) influences the fatigue life of pavement construction which can be calculated using the mechanistic method acc. to the criterion of fatigue cracks of the Asphalt Institute, USA for flexible asphalt layers. Appearing fatigue cracks wider than 2 mm on a level of 20% of roadway surface or structural deformations with depth of 12.5 mm [31] make the critical state accepted in this method.

3.5. SPĘKANIA POPRZECZNE

Zasadniczą wadą nawierzchni o podbudowach z MMCE, opisaną już w 2006 r. w [12], były stwierdzone pęknięcia poprzeczne na ponad 300 km odcinków dróg wykonanych w latach 2003÷2005. W październiku 2016 r. przeprowadzono wizję lokalną fragmentu DK-19. Na analizowanym odcinku długości 5 km stwierdzono tylko dwa pęknięcia poprzeczne (Rys. 8).

Przedmiotem niniejszej analizy nie były spękania warstwy ścieralnej z betonu asfaltowego, gdyż na jej stan wpływały również dodatkowe czynniki powodujące przyspieszoną degradację. Począwszy od 2000 r. GDDKiA zaleciła wykonywanie warstw ścieranych na drogach krajowych z mieszanek SMA. Nowy Katalog z 2014 r. [32] zaleca w przypadku nawierzchni obciążonej ruchem KR4 wykonanie na podbudowie z mieszanki MCE trzech warstw asfaltowych o grubości

3.5. TRANSVERSE CRACKS

The essential disadvantage of pavements with MCE mixture bases described already in 2006 in [12] were confirmed transverse cracks on over 300 km of road sections executed in the period 2003-2005. There was an on-site visit of the road section DK-19 in October 2016. There were only two transverse cracks (Fig. 8).

Cracks of surface course of asphalt concrete were not the subject of present analysis because some additional factors causing accelerated degradation also influenced its condition. Starting in 2000 the General Directorate for National Roads and Motorways recommended the execution of surface courses on national roads made of SMA mixtures. In case of a pavement with traffic load TC4 the new catalogue of 2014 [32] recommends executing on a base course of MCE mixture yet three asphalt layers of thickness h = 4+5+7 cm respectively. There were not any

odpowiednio h = 4+5+7 cm. Na odnowionej w 2017 r. warstwie ścieralnej z SMA nie stwierdzono żadnych pęknięć poprzecznych, a w 2018 r uznano jej stan za bardzo dobry.

transverse cracks on the new SMA surface course made in 2017, and its condition was found very good in 2018.

Fig. 8. Transverse cracks on the road section DK 19 observed in 2016 (photo by J. Kukiełka)
Rys. 8. Pęknięcia poprzeczne na odcinku drogi DK 19 zaobserwowane w 2016 r. (zdjęcia: J. Kukiełka)

4. WNIOSKI

1) Analiza błędów zastosowana w obliczeniach modułów sprężystości w przypadku 3- oraz 4-warstwowego modelu nawierzchni opisana w pracy [29], umożliwiła ocenę nośności warstw podbudów z mieszanek MCE wykonanych według warunków technicznych z 1999 r. [2] – na tle obszerniejszych ich badań przedstawionych w 2006 r. w [12]. Zastosowany w odniesieniu do odcinka DK 19 model 2-warstwowej półprzestrzeni sprężystej charakteryzował się mniejszymi współczynnikami zmienności niż te, które otrzymano w przypadku pozostałych dwóch modeli.
2) Nawierzchnia o podbudowie z mieszanki MCE wykonana przy pomocy recyklera na podłożu z tłucznia o zmiennej grubości i nośności (E_0> 97 MPa), charakteryzowała się w początkowym okresie jej użytkowania ugięciami sprężystymi FWD: $w_{śr}$=204 μm oraz względnie niskim współczynnikiem zmienności (rozkładu wyników) τ=14%, które jednak po 12 latach eksploatacji zwiększyły się i wynosiły odpowiednio: $w_{śr}$=243 μm i τ=26%. Pogorszenie niejednorodności zarejestrowanych wyników ugięć sprężystych było powodem występowania zmian modułów sprężystości, głównie w miejscach o stwierdzonej najmniejszej nośności.
3) Ocena modułów sprężystości mieszanek MCE na podstawie pierwszych wersji oprogramowania ELMOD z 2001 r. była możliwa tylko w przypadku przyjęcia 2-warstwowego modelu półprzestrzeni sprężystej nawierzchni, gdzie

4. CONCLUSIONS

1) The analysis of errors applied in calculations of stiffness modulus in case of three-layer and four-layer of a pavement model described in paper [29] enables the load capacity assessment of base layers made of MCE mixtures - carried out acc. to technical specifications of 1999 [12]. The model of two-layer elastic semi-space applied in the road section DK 19 was distinguished by lower variation coefficients than those obtained from two remaining models.
2) The pavement with a base course of MCE mixture executed with the use of a recycler on a broken stone sub-base with variable thickness and bearing capacity (E_0> 97 MPa), was characterized in its initial practical period by FWD deflections w_{av}=204 μm and relatively low variation coefficient (result distribution) τ=14%, but which increased after 12 years of exploitation and amounted to w_{av}=243 μm and τ=26% respectively. The deterioration in homogeneity of registered results of deflections resulted with coming out changes in stiffness moduli mainly in places of a found lowest load capacity.
3) The assessment of stiffness modulus of MCE mixtures based on using the first versions of ELMOD software of 2001 was possible only in case of adopting the model of two-layer elastic semi-space with the upper layer made of a surface and binder courses of asphalt concrete, and base course of MCE mixture.

górną warstwę stanowiły łącznie ścieralna i wiążąca z betonu asfaltowego oraz podbudowa z MMCE.

4) Niezbędnymi warunkami uzyskania wymaganej nośności i trwałości nawierzchni są: jednorodność mieszanki MCE, stała grubość warstw konstrukcyjnych oraz odpowiednio ulepszone podłoże gruntowe.

5) Zasadniczy wniosek praktyczny odnosi się do wykorzystywania mieszanek MCE zgodnie z wymaganiami Instrukcji z 2014 r. [20] i dotyczy potrzeby stosowania przede wszystkim mobilnych wytwórni do recyklingu na zimno do ich wytwarzania oraz układarek do wbudowywania.

INFORMACJE DODATKOWE

Autorzy artykułu serdecznie dziękują GDDKiA Oddział Lublin, za udostępnienie pomiarów ugięć sprężystych FWD wykonanych w 2013 r.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

[1] Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments FHWA-SA-98-042, Washington 1997

[2] *Sybilski D.*, *Mechowski T.*, *Zawadzki J.*, *Matras J.*: Warunki techniczne wykonania warstw podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MMCE). Wydanie II uzupełnione. IBDiM, Seria „S", Zeszyt 61, Warszawa 1999

[3] Guide Technique Retraitement des Chaussées et Recyclage des Matériaux Bitumineux de Chaussées, Service d'Études Techniques des Routeset Autoroutes, Juillet 2004

[4] A Guide to the Use and Specification of Cold Recycled Materials for the Maintenance of Road Pavements. TRL Report 611Crowthorne, UK 2004

[5] Merkblatt für Kaltrecycling in situ im Straßenoberbau. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsgruppe Mineralstoffe im Straßenbau, Köln, 2005

[6] Pavement Recycling Guidelines. PIARC Committee C7/8 - "Road Pavements", 2003

[7] Manual no. 198, Cold Base Course Mixes. Public Roads Administration, NRRL, Oslo, 2000

[8] *Yoshida T.*, *Noda E.*: Technical Guidelines For In-Situ Recycling Of Base Course In Japan. 1st International Symposium on Subgrade Stabilization and in situ Pavement Recycling Using Cement, Salamanca, Spain 2001, paper 93, 1-13

[9] *Jian Xu*, *Songchang Huang*, *Yongchun Qin*, *Feng Li*: The Impact of Cement Contents on the Properties of Asphalt Emulsion Stabilized Cold Recycling Mixtures. International Journal of Pavement Research and Technology, **4**, 1, 2011, 48-55

4) The necessary conditions to achieve the required pavement load capacity and durability are homogeneity of MCE mixture and appropriately improved sub-grade.

5) The basic practical conclusion applies to using MCE mixtures in accordance with requirements of manual of 2014 [20], and it concerns the needs to use first of all mobile cold recycling mixing plants for making them and asphalt pavers for laying them.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors of the paper acknowledge the General Directorate for National Roads and Motorways, Department Lublin for making available the results of measurements of FWD deflections carried out in 2013.

[10] *Bocci M.*, *Grilli A.*, *Cardone F.*, *Graziani A.*: A Study on The Mechanical Behaviour of Cement-Bitumen Treated Materials. Construction and Building Materials, **25**, 2, 2011, 773-778

[11] *Iwański M.*, *Chomicz-Kowalska A.*: The Effects of Using Foamed Bitumen and Bitumen Emulsion in the Cold Recycling Technology. Environmental Engineering The 8th International Conference May 19-20, 2011, Vilnius, Lithuania, 1089-1096

[12] *Judycki J.*, *Dołżycki B.*, *Hutnik K.*, *Stienss M.*: Weryfikacja zasad projektowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych. Zlecenie GDDKiA 2005. Praca naukowo-badawcza Politechniki Gdańskiej, 2006 r.

[13] *Chomicz-Kowalska A.*, *Stępień J.*: Recykling głęboki na zimno z zastosowaniem mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych przy przebudowie istniejącej nawierzchni asfaltowej. Logistyka, 6, 2014, 2626-2635

[14] *Kuźniewski J.*: Wpływ wybranych parametrów na moduły sztywności mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych. Drogownictwo, **LXV**, 11, 2010, 365-373

[15] *Kuźniewski J.*: Porównanie wyników badań statycznego i dynamicznego modułu sztywności mieszanek MCE, uzyskanych przy zastosowaniu różnych procedur badawczych. Drogownictwo, **LXVIII**, 9, 2013, 277-282

[16] *Jabłoński K.*: Historia nawierzchni autostrady A4 na odcinku Wrocław - Strzelce Opolskie. Część 2. Realizacja inwestycji. Drogownictwo, **LXXIII**, 4, 2018, 111-117

[17] *Kukiełka J.*, *Firlej S.*, *Kukiełka J.*: Odkształcalność podbudów z mieszanek mineralno-cementowo emulsyjnych (MCE). VIII Międzynarodowa Konferencja Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe, Kielce 7-8 maja 2002, 367-374

[18] *Kukieka J.*, *Sybilski D.*: Durability of Base Courses with Mineral-Cement-Emulsion Mixes. 2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 356 012006. Konferencja Nowoczesna Diagnostyka i Naprawy Nawierzchni Drogowych. Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe. 8-9 maj 2018, Kielce

[19] *Kukiełka J.*: Trwałość podbudów z mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MMCE). Zeszyt naukowy WIBiS PL „Budownictwo i architektura", **1**, 1, 2007, 45-56

[20] Instrukcja projektowania i wbudowywania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych. Politechnika Gdańska. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa 2014

[21] *Dołżycki B.*, *Jaczewski M.*, *Szydłowski C.*: The influence of binding agents on stiffness of mineral-cement-emulsion mixtures. Modern Building Materials, Structures and Techniques MBMST 2016. Procedia Engineering, **172**, 2017, 239-246

[22] *Zieliński P.*: Problemy oceny własności mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE). Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, **63**, 1/II, 2016, 383-392

[23] *Collop A.C.*, *Cebon D.*: Stiffness Reductions of Flexible Pavements due to Cumulative Fatigue Damage. Journal of Transportation Engineering, **122**, 2, 1996, 131-139, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1996)122:2(131)

[24] *Sangghaleh A.*, *Pan E., Green R.*, *Wang R.* , *Liu X.* , *Cai Y.*: Back Calculation of Pavement Layer Elastic Modulus and Thickness with Measurement Errors. International Journal of Pavement Engineering, **15**, 6, 2014, 521-531, DOI: 10.1080/10298436.2013.786078

[25] *Pożarycki A.*, *Górnaś P.*, *Zalewski P.*: The Influence of Cracks on Changes in Stiffness Moduli of Asphalt Mixtures Based on in Situ Tests. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **14**, 4, 2015, 257-270, DOI: 10.7409/rabdim.015.017

[26] *Pożarycki A.*, *Górnaś P.*, *Sztukiewicz R.*: Application of Mechanical and Electromagnetic Waves in an Integrated Determination of Pavement Bearing Capacity. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **16**, 2, 2017, 101-114, DOI: 10.7409/rabdim.017.007

[27] *Batrakova A.G.*, *Batrakov D.O.*, *Antyufeyeva M.S.*: Pavement Deterioration Model Based on GPR Datasets. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **17**, 1, 2018, 55-71, DOI: 10.7409/rabdim.018.004

[28] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie. Dz. U. Nr 43, poz. 430. z 1999 r.

[29] *Firlej S.*: Wyznaczanie parametrów modelu nawierzchni drogowej z dynamicznych badań FWD. Monografie Politechniki Lubelskiej, Lublin 2015 r.

[30] *Firlej S.*: Wykorzystanie kryterium Chauveneta do oceny wyników badań. Drogownictwo, **LXIII**, 6-7, 2008, 201-204

[31] Katalog Przebudów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. GDDKiA, IBDiM, Warszawa 2013 r.

[32] Katalog Typowych Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. Załącznik do zarządzenia Nr 31 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r., GDDKiA, Politechnika Gdańska, Katedra Inżynierii Drogowej, Warszawa 2014 r.