

dr hab. inż. Piotr Mackiewicz, prof. uczelni^{1*)}

ORCID: 0000-0002-3363-9391

dr inż. Jarosław Kuźniowski¹⁾

ORCID: 0000-0003-4071-9207

Analysis of rheological phenomena of mineral-cement-emulsion mixtures based on creep testing

Analiza zjawisk reologicznych mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych na podstawie badania pełzania

DOI: 10.15199/33.2025.09.07

Abstract. The aim of the article is to address the issue of variability of parameters of mineral-cement-emulsion (MCE) mixtures under load, taking into account different temperatures and compositions of these mixtures. It was found that different cement and asphalt contents in MCE play a key role in the deformation properties of the material and show variability of rheological properties. Based on static creep tests, the stiffness modulus of the MCE mixture was determined. It was shown that its value depends on temperature and composition and that it shows variable characteristics during loading. For temperatures of even 5°C with extremely higher asphalt contents (6%) and simultaneously lower cement content (3%), it is crucial to include the variable value of the stiffness modulus in the numerical calculations of the pavement. Creep testing with evaluation of the deformation modulus over time allows for the optimization of MCE production processes in terms of increasing the durability of road surfaces. In the assessment of sensitivity to deformations, it is crucial to take into account the change in the stiffness modulus at the entire loading stage, which correctly interprets the rheological properties of MCE mixtures.

Keywords: recycling; mineral-cement-emulsion mixture; rheology; creep test; stiffness modulus.

Streszczenie. W artykule omówiono problematykę zmienności parametrów mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE) pod obciążeniem z uwzględnieniem różnej temperatury i składu tych mieszanek. Stwierdzono, że różna zawartość cementu i asfaltu w MCE ma bardzo duży wpływ na cechy odkształceniowe materiału i zmienność właściwości reologicznych. Na podstawie badań statycznych pełzania określono moduł sztywności mieszanki MCE. Wykazano, że jego wartość zależy od temperatury i składu, a także ma zmienną charakterystykę w czasie obciążenia. W przypadku temperatury nawet 5°C, przy skrajnie dużej zawartości asfaltu (6%) i jednocześnie małej cementu (3%) kluczowe jest uwzględnienie zmiennej wartości modułu sztywności w obliczeniach numerycznych nawierzchni. Badanie pełzania z oceną modułu odkształcenia w czasie umożliwia optymalizację procesów produkcji MCE pod kątem zwiększenia trwałości nawierzchni drogowych. W ocenie wrażliwości na odkształcenia ważne jest uwzględnianie, w całym etapie obciążania, zmiany modułu sztywności, który dobrze interpretuje cechy reologiczne mieszanek MCE.

Słowa kluczowe: recykling; mieszanka mineralno-cementowo-emulsyjna; reologia; badanie pełzania; moduł sztywności.

The application of proper material parameters in road pavement modelling is a fundamental element both in engineering and in scientific research. In the case of mineral-cement-emulsion (MCE) mixtures, which are increasingly used as a recycling material, the issue of accurate material assessment becomes particularly important. Due to the content of asphalt and asphalt emulsion, these materials exhibit thermoplastic properties under load. At low temperatures, MCE pavement layers display elastic characteristics responsible for reversible deformations, whereas at high temperatures, viscous properties play a significant role, being associated with permanent displacements of the material. A key challenge remains the proper identification of the rheological parameters of MCE mixtures.

Characteristics of recycled MCE mixtures

In the context of the production technology of complex MCE materials, rheology plays a significant role, particularly in the design of mixtures with an increasing propor-

Zastosowanie właściwych parametrów materiałowych w modelowaniu nawierzchni drogowych stanowi fundamentalny element zarówno w inżynierii, jak i w pracach naukowo-badawczych. W przypadku mieszanek MCE, będących coraz częściej stosowanym materiałem recyklingowym, kwestia właściwej oceny materiałowej nabiera szczególnego znaczenia.

Materiały te, ze względu na zawartość asfaltu i emulsji asfaltowej będą wykazywać pod obciążeniem cechy termoplastyczne. W niskiej temperaturze warstwy nawierzchni z MCE mają cechy sprężyste, odpowiadające za odwracalne deformacje, natomiast w wysokiej dużą rolę odgrywają właściwości lepkie, związane z trwałymi przemieszczeniami materiału. Kluczowym wyzwaniem pozostaje odpowiednia identyfikacja parametrów reologicznych mieszanek MCE.

Charakterystyka mieszanek recyklowanych MCE

W kontekście technologii produkcji złożonych materiałów MCE reologia odgrywa istotną rolę, szczególnie przy projektowaniu składu z coraz większą ilością destruktu asfaltowego

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

^{*)} Correspondence address: piotr.mackiewicz@pw.edu.pl



tion of reclaimed asphalt pavement. Recycling in road construction helps reduce landfilling of waste derived from damaged road surfaces, lowers the demand for natural mineral resources, and reduces aggregate transport costs, which is undoubtedly beneficial for environmental protection. The reuse of reclaimed asphalt, after appropriate preparation and mixing with a binder such as asphalt emulsion and a cementitious binder, allows for the production of fully functional materials intended for road pavement layers. The MCE mixture, characterised by continuous grading, consists of reclaimed asphalt and mineral aggregate. It is produced using a ‘cold recycling’ technology with cement and asphalt emulsion in specified proportions under optimal moisture conditions [1]. It is applied in the base layers of road pavements. The rheological properties of materials such as MCE mixtures have not yet been thoroughly investigated. In [2], the authors analysed models describing the behaviour of materials containing both a hydraulic component (cement) and a flexible binder (asphalt binder). Based on modelling, a relationship between the dynamic modulus and loading frequency was described. Another model characterised the rheological properties of cement–emulsion mortars depending on the cement-to-filler ratio. It should be noted that the interaction occurring in MCE between cement and asphalt emulsion affects both the fresh and hardened mixture and involves complex physical and chemical processes related to the adsorption of asphalt emulsion on cement and the destabilisation of the emulsion, as shown in [3]. In a mixture with a low asphalt-to-cement ratio, an anionic asphalt emulsion should be used to improve workability, whereas a mixture with a high asphalt-to-cement ratio should be prepared using a cationic asphalt emulsion to ensure good bonding at the early stage. Similar issues were analysed in [4]. The viscosity and plastic yield point of asphalt emulsion increase with the dosage of emulsifier, probably because asphalt droplets may become smaller with higher emulsifier content during the production of the asphalt emulsion.

It was found that the type and amount of mineral admixture in the form of fly ash and silica fume, verified using two rheological models – Bingham and Herschel-Bulkley – have a significant impact on the rheological parameters [5]. Based on experimental studies, it was shown that in the initial setting phase of the MCE mixture, the rheological properties are dominated by the interaction of cement particles, which can adsorb plasticizer molecules (e.g., polycarboxylate) and asphalt droplets [6]. The plasticizer promotes the release of asphalt droplets from the emulsion, which improves the rheological behaviour of the mixture. The addition of a copolymer in the form of redispersible polymer powder increases the viscoelastic properties, which may result from an increase in the phase angle compared with the reference mixture [7]. The results presented in [8] and [9] confirmed that MCE mixtures exhibit both elastic and viscoelastic properties.

Other long-term studies have shown that MCE mixtures exhibit viscoelastic behaviour during various curing peri-

ochodzącego z recyklingu. Recykling w budownictwie drogowym wpływa na ograniczenie składowisk odpadów pochodzących ze zniszczonych nawierzchni drogowych, zmniejsza zapotrzebowanie na naturalne surowce mineralne obniża koszty transportu kruszyw, co jest niewątpliwie korzystne w aspekcie ochrony środowiska. Powtórne wykorzystanie destruktu asfaltowego, po odpowiednim przygotowaniu i wymieszaniu z lepiszczem typu emulsja asfaltowa i spoiwem cementowym, umożliwia uzyskanie pełnowartościowych materiałów przeznaczonych do warstw nawierzchni drogowych. Mieszanka mineralno-cementowo-emulsyjna (MCE), charakteryzująca się ciągłym uziarnieniem, składa się z destruktu i kruszywa mineralnego. Wykonywana jest w technologii „na zimno” z cementem i emulsją asfaltową w określonych proporcjach, w warunkach optymalnej wilgotności [1]. Zastosowanie znajduje w warstwach podbudowy nawierzchni drogowych. Reologiczne cechy materiałów, do których należy mieszanka MCE, nie zostały dotychczas dokładnie zbadane. W pracy [2] autorzy przeanalizowali modele opisujące zachowanie się materiałów zawierających składnik hydrauliczny: cement oraz podatny: lepiszcze asfaltowe. Na podstawie modelowania opisano związek pomiędzy modulem dynamicznym a częstotliwością obciążenia. Innym modelem scharakteryzowano właściwości reologiczne zapraw cementowo-emulsyjnych na podstawie stosunku cementu do wypełniacza. Należy zwrócić uwagę, że interakcja występująca w MCE pomiędzy cementem a emulsją asfaltową wpływa zarówno na świeżą, jak i utwardzoną mieszankę oraz obejmuje skomplikowane procesy fizyczne i chemiczne dotyczące adsorpcji emulsji asfaltowej z cementem oraz destabilizacji emulsji asfaltowej, co wykazano w [3]. W mieszance o małym współczynniku asfaltu do cementu należy zastosować anionową emulsję asfaltową w celu poprawy płynności, natomiast mieszankę o dużym współczynniku asfalt/cement należy przygotować za pomocą kationowej emulsji asfaltowej, aby zapewnić dobre połączenie we wczesnym etapie. Podobne zagadnienia zostały przeanalizowane w [4]. Lepkość i granica plastyczności emulsji asfaltowej zwiększa się wraz z dawkowaniem emulgatora. Prawdopodobnie spowodowane jest to tym, że kropelki asfaltowe mogą stać się mniejsze przy większej zawartości emulgatora w procesie produkcji emulsji asfaltowej.

Stwierdzono, że rodzaj i ilość domieszki mineralnej w postaci popiołu lotnego i pyłu krzemionkowego, po weryfikacji dwóch modeli reologicznych Bingham i Herschel-Bulkleya, wpływają w istotny sposób na parametry reologiczne [5]. Na podstawie doświadczenia eksperymentalnego wykazano, że w początkowej fazie wiązania mieszanki MCE właściwości reologiczne zdominowane są przez interakcję cząstek cementu, które mogą adsorbować cząsteczki plastifikatora, np. polikarboksylanu oraz kropelki asfaltowe [6]. Plastifikator powoduje uwalnianie się kropelek asfaltowych z emulsji, które poprawiają zachowanie reologiczne mieszanki. Dodatek kopolimeru, w postaci proszku polimerowego, powoduje zwiększenie właściwości lepkosprężystych, co wynikać może ze wzrostu kąta przesunięcia fazowego w porównaniu z mieszanką odniesienia [7]. Wyniki badań przedstawione w [8] i [9] potwierdziły doświadczenia, że mieszanka MCE charakteryzuje się zarówno właściwościami sprężystymi, jak i lepkosprężystymi.



ods, even when the cement content reached 6% [10]. Nevertheless, adding more cement as a binding agent affects the curing process. The results presented in [11] demonstrated that the type of binder added to mixtures containing reclaimed asphalt pavement and cement has a significant effect on the value of the complex stiffness modulus. Furthermore, increasing the content of reclaimed asphalt resulted in a reduction of the modulus value. It should be noted that previous studies did not account for variable temperature and were mainly focused on material composition, properties during production, and tests under repetitive and short-term loading. Such studies provide interesting information regarding structural changes in MCE mixtures but do not allow for a full characterization of rheological properties occurring under long-term loading in pavements. Compacted cold MCE mixtures achieve a certain tensile strength due to aggregate friction, cohesion, and capillary activity [12]. During this process, asphalt binder is obtained from the asphalt emulsion. The cohesion of the binder is essential to ensure the stiffness of the mixture as well as its tensile strength and durability. Increasing the cement content in the mixture improves asphalt coalescence by accelerating the separation of asphalt from the emulsion through water binding.

To verify how rheological phenomena occur in MCE mixtures, we conducted creep tests and analysed the variability of the stiffness modulus. This is particularly important because MCE mixtures simultaneously exhibit both viscous and elastic connections. Due to the filling of voids with cement mortar and the adsorption of asphalt on cementitious materials, MCE mixtures are characterised by three types of interfacial bonds: aggregate-cement paste, aggregate-asphalt, and cement paste-asphalt. The presence of asphalt bonds, which act as plastic hinges facilitating stress relaxation, imparts to the material properties similar to asphalt concrete, i.e., the ability to restore disturbed bonds during solar heating or thermal contraction. At the same time, the rigid bonds present in the structure reduce the influence of temperature on mechanical properties and limit deformation.

Testing of MCE mixtures

The tested MCE mixtures had a boundary grain size of 0/16 (see Table). The asphalt granulate used in the study was obtained from milling the wearing and binder courses of asphalt concrete. The material originated from the DK8 road section. The asphalt content in the granulate was determined using an extractor, and its average asphalt content was 2.95%. The supplementary aggregate was used to complement the reclaimed material. Crushed aggregate from the Siedlimowice quarry was applied. The cement used for the study was Portland cement CEM I class 32.5, which met the requirements of standard [13]. The asphalt emulsion was a cationic, slow-breaking type C60B10ZM/R, compliant with standard [14], and the parameters of the mixing water for concrete met the requirements specified in [15].

Przeprowadzone inne badania długoterminowe wykazały, że w mieszankach MCE w różnych okresach dojrzewania widoczne było zachowanie lepkosprężyste, nawet gdy zawartość cementu dochodziła do 6% [10]. Niemniej jednak dodanie więcej cementu, jako środka wiążącego, wpływa na proces dojrzewania. Wyniki badań przedstawione w [11] wykazały, że rodzaj dodanego lepiszcza do mieszanek zawierających odtyskany materiał asfaltowy (destrukty) oraz cement ma istotny wpływ na wartość zespolonego modułu sztywności. Ponadto zwiększenie zawartości destruktu spowodowało obniżenie wartości modułu. Należy zwrócić uwagę, że dotychczasowe badania nie uwzględniały zmiennej temperatury i skupione były na składzie materiału, cechach na etapie produkcji oraz badaniach pod obciążeniem powtarzalnym i krótkotrwałym. Takie badania dają interesujące informacje dotyczące zmiany struktury mieszanek MCE, ale nie pozwalają w pełnym zakresie wyodrębnić cech reologicznych zachodzących przy długotrwałych obciążeniach w nawierzchniach. Zagęszczona mieszanka MCE na zimno uzyskuje określoną wytrzymałość na rozciąganie ze względu na występowanie takich czynników, jak: tarcie kruszywa; kohezja; aktywność kapilarna [12]. Występuje wówczas proces, w którym uzyskuje się lepiszcze asfaltowe z emulsji asfaltowej. Kohezja lepiszcza jest niezbędna do zapewnienia sztywności mieszanki oraz wytrzymałości na rozciąganie i trwałości. Zwiększenie zawartości cementu w mieszance poprawia koalescencję asfaltu, przyspieszając proces wytrącania się asfaltu z emulsji przez wiązanie wody.

W celu weryfikacji, jak zjawiska reologiczne zachodzą w mieszankach MCE, przeprowadziliśmy badania pełzania oraz przeanalizowaliśmy zmienność modułu sztywności. Jest to o tyle istotne, że w mieszankach MCE występują jednocześnie oba rodzaje połączeń: lepkie i sprężyste. Ze względu na wypełnianie wolnych przestrzeni zaprawą cementową i adsorpcję asfaltu na materiałach cementowych, mieszanki MCE charakteryzują się trzema rodzajami połączeń, które występują na granicy faz: kruszywo-zaczyn cementowy; kruszywo-asfalt; zaczyn cementowy-asfalt. Obecność połączeń asfaltowych, które pełnią rolę przegubów plastycznych, sprzyjających relaksacji naprężeń powoduje, że materiał uzyskuje cechy betonu asfaltowego, tj. zdolność do odtwarzania zakłóconych połączeń podczas nagrzewania promieniami słonecznymi lub przy skurczu termicznym. Jednocześnie występujące w strukturze połączenia sztywne powodują zmniejszenie wpływu temperatury na cechy mechaniczne i ograniczenie deformacji.

Badania mieszanek MCE

Badaniom poddano mieszanki MCE o uziarnieniu granicznym 0/16 (tabela). Granulat asfaltowy do badań wykorzystano z frezowania warstwy ścieralnej i wiążącej z betonu asfaltowego. Materiał ten pochodził z odcinka DK8. Badanie zawartości asfaltu w granulacie asfaltowym przeprowadzono w ekstraktorze, a średnia zawartość w nim asfaltu wyniosła 2.95%. Kruszywo doziarniające wykorzystano jako uzupełnienie destruktu. Zastosowano kruszywo łamane, pochodzące z kopalni Siedlimowice. Cement użyty do badań, to cement portlandzki CEM I klasy 32,5, który spełniał wymagania normy [13]. Emulsja asfaltowa, kationowa, wolnorozpadowa C60B10ZM/R odpowiada wyma-



The study examined MCE mixtures with varied particle size, composition, and different contents of cement and asphalt (emulsion):

- asphalt granulate – 60% of the mineral mixture content;
- filler aggregate (crushed) – 40% of the mineral mixture content;
- cationic, slow-breaking emulsion (containing 60% asphalt by weight) – the total asphalt content (in asphalt granulate and in the emulsion) relative to the mineral mixture was, for different batches: 3%, 4%, 5%, 6%;
- cement (Portland 32.5) – content: 3% and 4% relative to the mineral mixture content;
- water – 10% relative to the mineral mixture content (optimal moisture according to Proctor).

The following designations were used for the MCE mixtures: MCE-3_3 (3% cement, 3% asphalt); MCE-3_4 (3% cement, 4% asphalt); MCE-3_5 (3% cement, 5% asphalt); MCE-3_6 (3% cement, 6% asphalt); MCE-4_3 (4% cement, 3% asphalt); MCE-4_4 (4% cement, 4% asphalt); MCE-4_5 (4% cement, 5% asphalt) and MCE-4_6 (4% cement, 6% asphalt). Cylindrical samples were prepared with a diameter of 100 mm and a height of 63.5 mm.

Creep under compression was tested using a Nottingham Asphalt Tester, which is characterised by good repeatability of results. The following technical conditions were adopted for the creep test: constant load $0.10 \text{ MPa} \pm 0.3\%$; duration of loading $3600 \text{ s} \pm 5 \text{ s}$; duration of unloading $300 \text{ s} \pm 5 \text{ s}$ and test temperature $5\text{--}40^\circ\text{C}$.

The adopted loading conditions are appropriate for the stress levels most commonly occurring at the base layer level of pavements made from MCE mixtures. Temperature variation depends on the location within Poland and the season of the year. The compressive load was applied using a pneumatic unit, and the force was controlled by an electropneumatic converter. The entire testing setup was placed in a thermal chamber equipped with displacement sensors of the alternating current type (Linear Variable Differential Transformer). Vertical deformation of the sample was recorded throughout the entire test. The main objective of the study was to determine the sample deformation and to calculate the stiffness modulus using the relationship in equation (1):

$$E_n = \frac{\sigma}{\varepsilon_n} \quad (1)$$

The grain-size composition of the 0/16 mm mineral aggregate mixture

Skład ziarnowy mieszanki mineralnej 0/16 mm

Sieve / Sito [mm]	Type of material / Rodzaj materiału	
	asphalt granulate 0/16 / granulat asfaltowy 0/16 [mm]	crushed aggregate 0/16 / kruszywo łamane 0/16 [mm]
	retained on sieve / pozostaje na sicie [%]	
16,0	0	0
12,8	11,10	12,50
8,0	10,19	14,00
6,3	7,50	8,01
4,0	7,90	12,39
2,0	10,80	18,03
0,85	18,20	14,50
0,42	15,01	6,79
0,3	9,20	4,70
0,15	3,80	3,09
0,075	3,20	3,09
<0,075	3,10	2,90

ganiom normy [14], a parametry wody zarobowej do betonów były zgodne z [15].

Badaniu poddano mieszanki MCE o zróżnicowanym uziarnieniu, składzie i różnej zawartości cementu oraz asfaltu (emulsji):

- granulat asfaltowy – 60% zawartości mieszanki mineralnej;
- kruszywo doziarniające (łamane) – 40% zawartości mieszanki mineralnej;
- emulsja kationowa, wolnorozpadowa (asfalt w niej zawarty wynosił 60% wagowo) – łączna zawartość asfaltu (w granulacie asfaltowym i w emulsji) w stosunku do mieszanki mineralnej wynosiła w przypadku różnych zarobów: 3%, 4%, 5%, 6%;
- cement (portlandzki 32,5) – zawartość: 3% i 4%

w stosunku do zawartości mieszanki mineralnej;

- woda – 10% w stosunku do zawartości mieszanki mineralnej (wilgotność optymalna wg Proctora).

Zastosowano następujące oznaczenie mieszanek MCE: MCE-3_3 (3% cementu, 3% asfaltu); MCE-3_4 (3% cementu, 4% asfaltu); MCE-3_5 (3% cementu, 5% asfaltu); MCE-3_6 (3% cementu, 6% asfaltu); MCE-4_3 (4% cementu, 3% asfaltu); MCE-4_4 (4% cementu, 4% asfaltu); MCE-4_5 (4% cementu, 5% asfaltu); MCE-4_6 (4% cementu, 6% asfaltu). Wykonano próbki walcowe o średnicy 100 mm i wysokości 63,5 mm.

Badanie pełzania przy ściskaniu przeprowadzono w urządzeniu Nottingham Asphalt Tester, charakteryzującym się dobrą powtarzalnością wyników. Przyjęto następujące warunki techniczne badania pełzania: obciążenie stałe $0,10 \text{ MPa} \pm 0,3\%$; czas trwania obciążenia $3600 \text{ s} \pm 5 \text{ s}$; czas trwania odciążenia $300 \text{ s} \pm 5 \text{ s}$; temperatura badania w zakresie $5\text{--}40^\circ\text{C}$.

Przyjęte warunki obciążenia są adekwatne do warunków naprężeń, jakie najczęściej występują na poziomie warstw podbudowy wykonanych z mieszanek MCE. Zmienność temperatury zależy od lokalizacji na obszarze Polski oraz pory roku. Obciążenie ściskające wywoływane było przez jednostkę pneumatyczną, a siła kontrolowana przez konwerter elektropneumatyczny. Cały zestaw badawczy znajdował się w komorze termicznej z czujnikami przemieszczeń prądu zmiennego Linear Variable Differential Transformer. Podczas całego testu rejestrowano odkształcenie pionowe próbki. Głównym celem badania było określenie odkształcenia próbki oraz wyznaczenie modułu sztywności z zależności (1):

$$E_n = \frac{\sigma}{\varepsilon_n} \quad (1)$$

where:

E_n – stiffness modulus under creep [MPa];

σ – applied compressive stress during the test [MPa];

ε_n – accumulated axial strain over time [–].

gdzie:

E_n – moduł sztywności przy pełzaniu [MPa];

σ – zastosowane naprężenie ściskające podczas badania [MPa];

ε_n – skumulowane odkształcenie osiowe w czasie [–].

Analysis of test results

Figures 1÷4 show example creep test results for the analysed MCE mixture samples.

It should be emphasized that, depending on the composition of the MCE mixtures, the deformation over time changes significantly. At a temperature of +40°C, mixtures containing 2% more asphalt show nearly twice the susceptibility to deformation for a cement content of 3%. In contrast, for a cement content of 4%, the difference in deformations is smaller, approximately 1.4. At the lower temperature (+5°C), the difference is even smaller, averaging around 1.3.

To assess the effect of asphalt content, selected creep curves are presented for a temperature of 20°C and a constant cement content of 3% (Figure 5) and 4% (Figure 6).

For a more comprehensive analysis of the effect of composition on the behaviour of the MCE mixture, the stiffness modulus values E_{3600} at the final stage of loading (i.e., at 3600 s) were determined. Figures 7 and 8 show the relationships between asphalt content and stiffness modulus at temperatures of 5°C, 20°C, and 40°C.

Based on the conducted analysis of the test results, it was found that the creep stiffness modulus of MCE mixtures changes significantly with the test temperature and depends on the mixture composition. As the test temperature increases, the stiffness of the mixtures decreased by up to 40%. The greatest sensi-

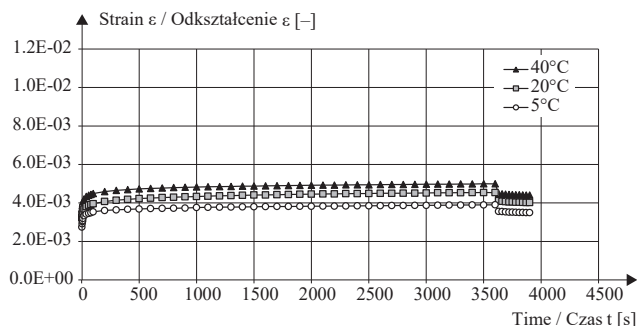


Fig. 1. Creep curve for the MCE-3_4 mixture

Rys. 1. Krzywa pełzania mieszanki MCE-3_4

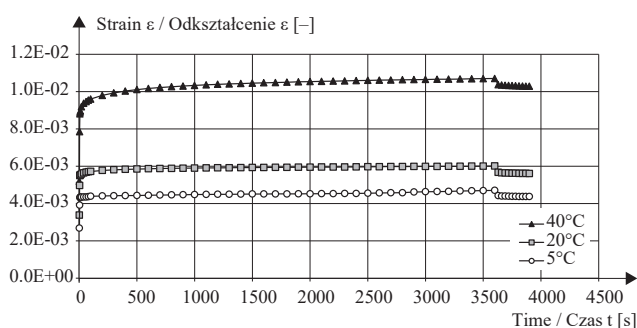


Fig. 2. Creep curve for the MCE-3_6 mixture

Rys. 2. Krzywa pełzania mieszanki MCE-3_6

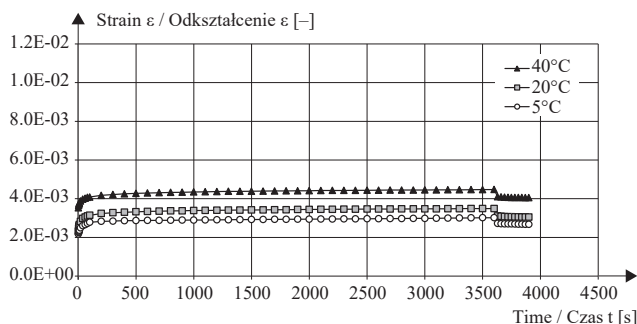


Fig. 3. Creep curve for the MCE-4_4 mixture

Rys. 3. Krzywa pełzania mieszanki MCE-4_4

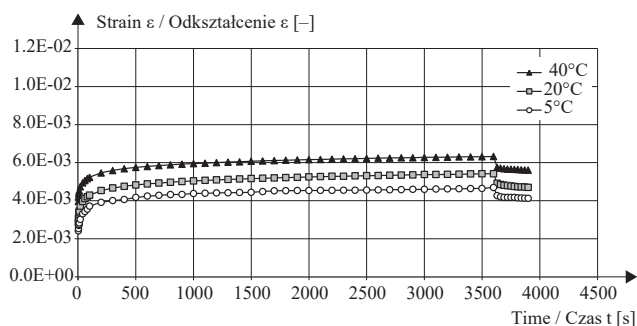


Fig. 4. Creep curve for the MCE-4_6 mixture

Rys. 4. Krzywa pełzania mieszanki MCE-4_6

Analiza wyników badań

Na rysunkach 1÷4 przedstawiono przykładowe wyniki pełzania analizowanych próbek mieszanki MCE.

Należy podkreślić, że w zależności od składu mieszanek MCE istotnie zmienia się przebieg odkształcenia w czasie. W temperaturze +40°C mieszanki zawierające o 2% więcej asfaltu wykazują prawie dwukrotnie większą podatność na odkształcenia w przypadku zawartości cementu 3%. Natomiast przy zawartości cementu 4% różnica w odkształceniach jest mniejsza i wynosi ok. 1,4. Dla niższej temperatury (+5°C) różnica jest jeszcze mniejsza i wynosi średnio 1,3.

W celu oceny wpływu zawartości asfaltu, zaprezentowano wybrane krzywe pełzania w przypadku temperatury 20°C i stałej zawartości cementu, tj. 3% (rysunek 5) i 4% (rysunek 6).

W celu bardziej kompleksowej analizy wpływu składu na zachowanie się mieszanki MCE określono wartości modułów sztywności E_{3600} w końcowej fazie obciążenia (tj. w przypadku 3600 s). Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono zależności pomiędzy zawartością asfaltu a modułem sztywności w temperaturze: 5°C, 20°C i 40°C.

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań stwierdzono, że wartość modułu sztywności przy pełzaniu mieszanek MCE zmienia się istotnie ze zmianą temperatury badania oraz w zależności od składu. Wraz ze wzrostem temperatury badania sztywność mieszanek zmniejszyła się nawet o 40%. Najwięk-





tivity is observed in mixtures with lower cement content (i.e., 3%) and higher asphalt content. In contrast, for mixtures with higher cement content, the change in stiffness modulus within the asphalt content range of 4–6% is smaller. Undoubtedly, the observed relationships are consistent with preliminary expectations, but they have not previously been analysed quantitatively, for example, using the creep stiffness modulus. Therefore, it should be noted that when designing the mixture composition, extreme component values (high asphalt content and low cement content) should be avoided, as they cause a significant reduction in the modulus and deterioration of deformation characteristics. Additional analyses of the test results indicate that during loading, the rheological behaviour of the studied materials can be characterised by the variability of the stiffness modulus over time under load. Figures 9 and 10 show the change in the creep stiffness modulus over the entire loading period for two selected MCE mixtures representing the extremes in terms of composition.

It should be emphasized that within a short loading period (up to 40 s), the stiffness modulus changes by approximately 20% (at 40°C) to 10% (at 5°C) compared to the initial modulus for “stiffer” mixtures, e.g., MCE-4_3 (high cement content – 4%, low asphalt content – 3%). In contrast, for “softer” mixtures, e.g., MCE-3_6 (low cement content – 3%, high asphalt content – 6%), the rheological process identified by the change in modulus occurs over a shorter period. Practically, after just 8 s

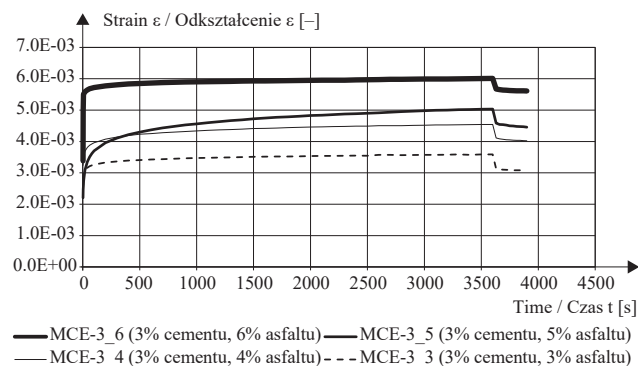


Fig. 5. Creep curves for mixtures containing 3% cement (20°C)
Rys. 5. Krzywe pełzania mieszanek z zawartością 3% cementu (20°C)

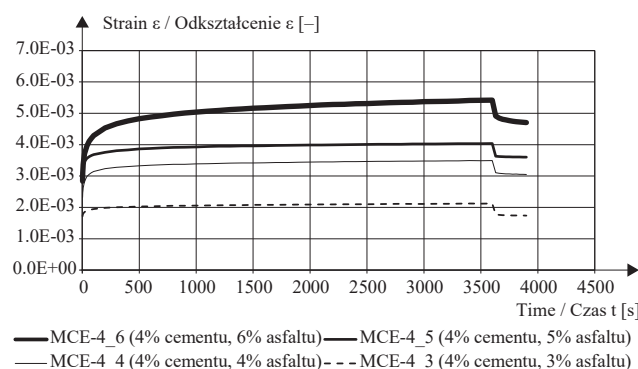


Fig. 6. Creep curves for mixtures containing 4% cement (20°C)
Rys. 6. Krzywe pełzania mieszanek z zawartością 4% cementu (20°C)

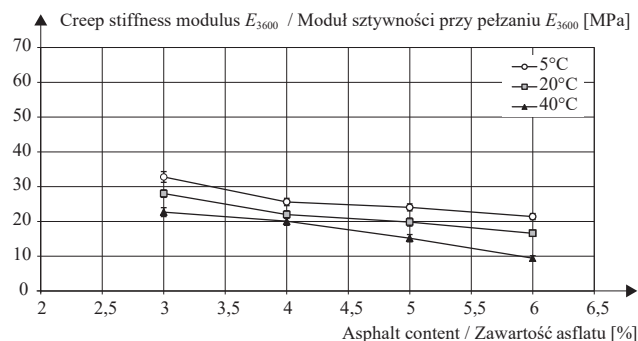


Fig. 7. Creep stiffness modulus for MCE mixtures with 3% cement content
Rys. 7. Moduł sztywności przy pełzaniu mieszanek MCE przy 3% zawartości cementu

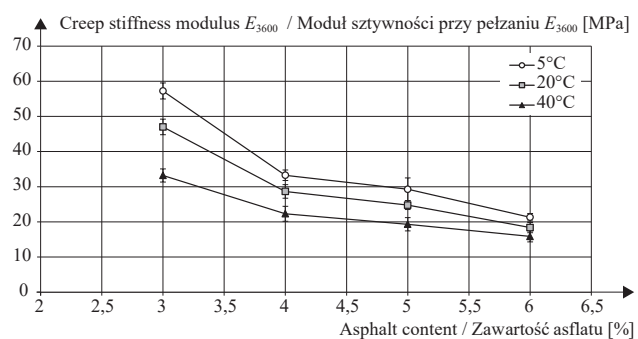


Fig. 8. Creep stiffness modulus for MCE mixtures with 4% cement content
Rys. 8. Moduł sztywności przy pełzaniu mieszanek MCE przy 4% zawartości cementu

sza wrażliwość widoczna jest w przypadku mniejszej zawartości cementu, tj. 3% i przy większej zawartości asfaltu. Z kolei w przypadku mieszanek z większą zawartością cementu występuje mniejsza zmiana wartości modułu sztywności w przedziale zawartości asfaltu 4–6%. Niewątpliwie pokazane zależności są zgodne ze wstępnymi oczekiwaniami, ale dotychczas nie były przeanalizowane w sposób ilościowy, jakim jest np. moduł sztywności pełzania. Trzeba mieć zatem na uwadze, że przy projektowaniu składu należy unikać skrajnych wartości komponentów (dużej zawartości asfaltu i małej cementu), gdyż powoduje to znaczne obniżenie wartości modułu i pogorszenie cech odkształceniowych. Dodatkowe analizy wyników badań wskazują, że w trakcie obciążenia, zachodzące zjawiska reologiczne badanych materiałów można scharakteryzować zmiennością modułu sztywności w zależności od czasu działania obciążenia. Na rysunkach 9 i 10 zaprezentowano zmianę wartości modułu sztywności przy pełzaniu w całym czasie obciążenia w przypadku wybranych dwóch mieszanek MCE „skrajnych pod względem składu”.

Należy podkreślić, że w krótkim czasie obciążenia (do 40 s) mieszanek „sztywniejszych”, np. MCE-4_3 (duża zawartość cementu – 4%, mała zawartość asfaltu – 3%), następuje zmiana wartości modułu od ok. 20% (40°C) do 10% (w 5°C) w porównaniu z modulem początkowym. W przypadku mieszanek „podatnych”, np. MCE-3_6 (mała zawartość cementu – 3%, duża zawartość asfaltu – 6%), proces reologiczny identyfikowany zmianą wartości modułu zachodzi natomiast w krótszym

of applied load, the modulus reaches 10–22 MPa, i.e., three times lower values than that of the MCE-4_3 sample. The creep stiffness modulus of the MCE-3_6 mixture over 40 s changes by approximately 40% (at 40°C) to 30% (at 5°C) compared to the initial modulus.

Summary

Based on the conducted tests and the identification of the creep stiffness modulus, it was found that **MCE mixtures exhibit variable rheological characteristics depending on the test temperature and composition**. The modulus value is also significantly dependent on the duration of loading, especially for the “softer” mixtures (low cement content, high asphalt content). When modelling the behaviour of MCE mixtures in pavement, it is therefore necessary to select an appropriate stage for identifying the stiffness modulus, dependent on the duration of loading and the operating temperature of the pavement. The creep test conducted under the adopted conditions (loading time, temperature) provides an effective method for determining the rheological variability of mixtures containing asphalt. In assessing deformation sensitivity, it is crucial to consider the change in stiffness modulus throughout the entire loading period, as it effectively reflects the thermo-viscoelastic characteristics of MCE mixtures. Both MCE mixtures with high and low asphalt content show, over a short loading period (up to 40 s), a change in stiffness modulus ranging from approximately 40% (at 40°C) to 10% (at 5°C). It is therefore recommended to account for the material variability of MCE in both short-term and long-term loading when performing pavement modelling and mechanistic calculations. In particular, at temperatures as low as 5°C, numerical pavement analyses should consider the variable stiffness modulus, especially for mixtures with extremely high asphalt content (6%) and simultaneously low cement content (3%).

In further studies, the analysed properties of the MCE mixture will be verified based on pavement durability calculations using the finite element method (FEM) for various parameters. Additionally, changes in the MCE mixture parameters will be examined in dynamic fatigue testing, as these parameters also vary due to dissipation processes and structural changes in the material.

Received: 17.04.2025

Revised: 04.06.2025

Published: 19.09.2025

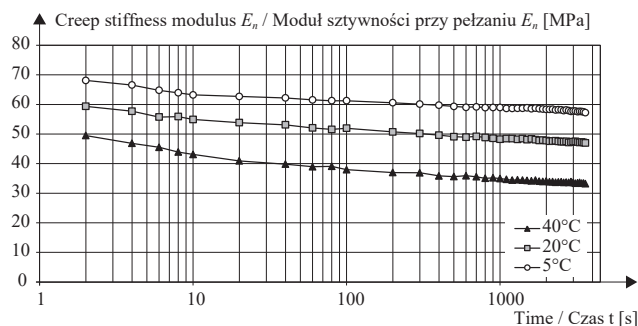


Fig. 9. Creep curve for the MCE-4_3 mixture

Rys. 9. Krzywa pełzania mieszanki MCE-4_3

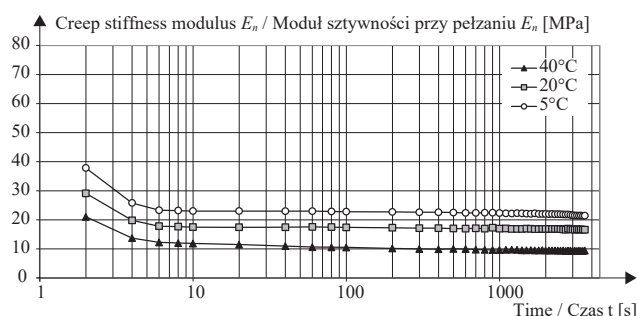


Fig. 10. Creep curve for the MCE-3_6 mixture

Rys. 10. Krzywa pełzania mieszanki MCE-3_6

czasie. Praktycznie już po 8 s oddziaływania obciążenia moduł osiąga wartość 10–22 MPa, tj. trzykrotnie mniejszą niż w przypadku próbki MCE-4_3. Moduł sztywności przy pełzaniu mieszanki MCE-3_6 w czasie 40 s zmienia się od ok. 40% (w 40°C) do 30% (w 5°C) w porównaniu z modułem początkowym.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz identyfikacji wartości modułu sztywności pełzania stwierdzono, że **mieszanki MCE wykazują zmienne cechy reologiczne w zależności od temperatury badania oraz składu**. Wartość modułu jest także istotnie zależna od czasu trwania obciążenia, przede wszystkim w przypadku „bardziej podat-

nych” mieszanek (mała zawartość cementu, duża zawartość asfaltu). Przy modelowaniu zachowania się mieszanek MCE w nawierzchni należy zatem dobrać odpowiedni etap identyfikacji modułu sztywności, uzależniony od czasu działania obciążenia i temperatury pracy nawierzchni. Zrealizowane badanie pełzania, w przyjętych warunkach badania (czas obciążenia, temperatura), stanowi skuteczną metodę określania zmienności reologicznej mieszanek zawierających asfalt. W ocenie wrażliwości na odkształcenia kluczowe jest uwzględnianie, w całym etapie obciążania, zmiany modułu sztywności, który dobrze interpretuje cechy termo-lepkosprężyste mieszanek MCE. Zarówno mieszanki MCE o dużej, jak i małej zawartości asfaltu wykazują, w krótkim czasie obciążenia (do 40 s), zmianę wartości modułu sztywności od ok. 40% (w 40°C) do 10% (w 5°C). Rekomenduje się zatem, aby w procesie modelowania nawierzchni oraz w obliczeniach metodą mechanistyczną uwzględniać zmienność materiałową MCE zarówno w przypadku obciążeń krótkotrwałych jak i długotrwałych. Szczególnie w temperaturze już od 5°C należy uwzględniać, w obliczeniach numerycznych nawierzchni, zmienne wartości modułu sztywności, przy skrajnie dużej zawartości asfaltu (6%) i jednocześnie małej zawartości cementu (3%).

W dalszych badaniach zostanie przeprowadzona weryfikacja przeanalizowanych właściwości mieszanki MCE na podstawie obliczeń trwałości konstrukcji z wykorzystaniem MES dotyczących różnych parametrów. Ponadto przeanalizowana zostanie zmiana parametrów mieszanek MCE w dynamicznym badaniu zmęczenia i zmian, które także ulegają zmianie ze względu na procesy dyssypacji i zmian strukturalnych materiału.

Artykuł wpłynął do redakcji: 17.04.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 04.06.2025 r.

Opublikowano: 19.09.2025 r.



Literature

- [1] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad: Instrukcja projektowania i wbudowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE). Załącznik nr 9.4.2 RID, 2019.
- [2] Ouyang J, Zhao S, Yang W, Baoguo H. Effect of filler volume fraction on viscoelastic properties and interaction of cement asphalt emulsion mortar. *Construction and Building Materials*. 2025; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140337>.
- [3] Lei Fang L, Zhou J, Yang Z, Yuan Q, Que Y. Interaction between cement and asphalt emulsion and its influences on asphalt emulsion demulsification, cement hydration and rheology. *Construction and Building Materials*. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127220>.
- [4] Ouyang J, Han B, Cao Y, Zhou W, Li W, Shah SP. The role and interaction of superplasticizer and emulsifier in fresh cement asphalt emulsion paste through rheology study. *Construction and Building Materials*. 2016; <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.085>.
- [5] Zhang H, Zhang Q, Tang S, Pei Y, Skoczylas F. Effects of fly ash and silica fume on the rheological properties of magnesium phosphate cement-emulsified asphalt (MPC-EA) composite repair materials. *Construction and Building Materials*. 2024; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136708>.
- [6] Peng J, Deng D, Huang H, Yuan Q, Peng J. Influence of superplasticizer on the rheology of fresh cement asphalt paste. *Construction and Building Materials*. 2015; <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2015.05.002>.
- [7] Buczynski P, Iwanski M. Rheological properties of mineral-cement mix with foamed bitumen with the addition of redispersible polymer powder. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 471 (2019) 032013; doi:10.1088/1757-899X/471/3/032013.
- [8] Dołżycki B, Jaczewski M, Szydłowski C, Bańkowski W, Gajewski M. Analiza wybranych cech mechanicznych mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (mce). *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*. 2023; DOI: 10.7409/rabdim.023.003.
- [9] Skotnicki Ł, Kuźniewski J, Szydło A. Research on the properties of mineral-cement emulsion mixtures using recycled road pavement materials. *Materials*. 2021; <https://doi.org/10.3390/ma14030563>.
- [10] Dołżycki B, Jaczewski M, Szydłowski C, Bańkowski W, Gajewski M. The long-term properties of mineral-cement-emulsion mixtures. *Construction and Building Materials*. 2017; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.032.
- [11] Buczyński P, Iwański M. Complex modulus change within the linear viscoelastic region of the mineral-cement mixture with foamed bitumen. *Construction and Building Materials*. 2018; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.214>.
- [12] Brown SF, Needham D. A study of cement modified bitumen emulsion mixtures. *Conference: Association of Asphalt Paving Technologists*. 2000; 69: pp. 92-121.
- [13] PN-EN 197-1:2012: Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- [14] PN-EN 13808:2013-10: Asfalty i lepiszcza asfaltowe – Zasady klasyfikacji kationowych emulsji asfaltowych.
- [15] PN-EN 1008:2004: Woda zarobowa do betonu – Specyfikacja pobierania próbek, badanie i ocena przydatności wody zarobowej do betonu, w tym wody odzyskanej z procesów produkcji betonu.