

BEATA GAJEWSKA¹⁾MARCIN GAJEWSKI²⁾CEZARY KRASZEWSKI³⁾LESZEK RAFALSKI⁴⁾

INVESTIGATIONS OF RESILIENT MODULI OF SELECTED HYDRAULICALLY BOUND MIXTURES (HBM) UNDER CYCLIC LOAD

BADANIA MODUŁÓW SPRĘŻYSTOŚCI WYBRANYCH MIESZANEK ZWIĄZANYCH HYDRAULICZNIE (HBM) POD OBCIĄŻENIEM CYKLICZNYM

STRESZCZENIE. W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych modułów sprężystości wybranych mieszanek HBM. Badania wykonano metodą testowego obciążenia statycznego i dynamicznego. Zbadano 13 mieszanek kruszyw związanych hydraulicznie, stosowanych w podbudowach drogowych i do ulepszania podłoża. Składnikami badanych mieszanek były kruszywa: granitowe, dolomitowe i z recyklingu betonu oraz spoiwo drogowe, cement i dwa popioły lotne. Badania przeprowadzono na próbkach obciążanych cyklicznie z czasem trwania impulsu obciążenia 0,248 s i 50 s. Ponadto wykonano badania wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie tych próbek. Badania wykazały brak istotnego wpływu czasu trwania impulsu siły na wartość modułu sprężystości badanych próbek. Wynikało to z dobrej korelacji liniowej między modułami oznaczonymi pod obciążeniem przyłożonym w czasie 0,248 s, a modułami oznaczonymi przy obciążeniu w czasie 50 s. Stwierdzono, że pomiędzy wytrzymałością na ściskanie i rozciąganie, a modułem sprężystości badanych mieszanek są zależności, które mają charakter nieliniowy. Zauważono, że są pewne różnice w przebiegu krzywych charakteryzujących poszczególne kruszywa i spoiwa.

SŁOWA KLUCZOWE: kruszywo, mieszanka związana hydraulicznie, moduł sprężystości, podbudowa drogowa, ulepszone podłoże, wytrzymałość na rozciąganie pośrednie, wytrzymałość na ściskanie.

ABSTRACT. This paper presents the results of resilient moduli tests carried out on selected hydraulically bound mixtures (HBM). Both static and dynamic loading procedures were used. In total, thirteen hydraulically bound mixtures designed for construction of road base and subgrade improvement were tested. The mixtures were composed of crushed granite, dolomite or recycled concrete mixed with a hydraulic road binder, cement and two types of fly ash. The specimens were subjected to cyclic loading with 0.248 s and 50 s load times. Moreover, the specimens were subjected to compressive and tensile strength tests. The tests showed that the load duration had no significant effect on the obtained resilient modulus. This resulted from good linear correlation between the values obtained with the two load times, namely 0.248 s and 50 s. Non-linear relationships were established between the values of compressive and tensile strength and the resilient modulus. Some differences were noted in the shape of curves drawn for the respective granular materials and binders. This indicates that some physical ingredients may have an impact on the above-mentioned relationships.

KEYWORDS: aggregate, capping, compressive strength, hydraulically bound mixture, indirect tensile strength, resilient modulus, road base.

DOI: 10.7409/rabdim.012.001

¹⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie; bgajewska@ibdim.edu.pl

²⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie oraz Politechnika Warszawska; marcin.gajewski@il.pw.edu.pl

³⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie; ckraszewski@ibdim.edu.pl (✉)

⁴⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie; lralfalski@ibdim.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Mieszanki związane hydraulicznie (ang. *Hydraulically Bound Mixtures* – HBM) stosowane są zwykle do wykonywania podbudów drogowych i ulepszonego podłoża drogowego. W metodzie badania wprowadzonej w roku 2005 w [1] wartość modułu sprężystości mieszanek HBM wyznaczana jest przy obciążeniu statycznym metodami: rozciągania bezpośredniego (osiowego), ściskania osiowego lub rozciągania pośredniego (ściskanie próbek walcowych po bocznej powierzchni tworzącej). Metody te polegają na statycznym obciążaniu próbki w czasie badania wynoszącym od 30 do 60 s, w zależności od wytrzymałości próbki i pomiarze przemieszczeń.

Konstrukcja nawierzchni drogowej jest obciążana pojazdami w sposób statyczny lub dynamiczny. Określanie modułu sprężystości (ang. *resilient modulus*) przy cyklicznym obciążaniu badanych próbek odzwierciedla sposób oddziaływania obciążenia na warstwy z mieszanek HBM. Ponadto mieszanki HBM poddawane są badaniom zmęczeniowym, które także polegają na obciążaniu próbki powtarzalnymi impulsami siły.

Moduł sprężystości pod obciążeniem cyklicznym jest zdefiniowany następującym wzorem:

$$E = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r}, \quad (1)$$

w którym:

- σ_d – dewiator naprężenia,
- ε_r – odkształcenie sprężyste.

W przypadku gruntów do oznaczenia modułu sprężystości stosujemy symbol M_r [2], [3].

W [4 - 7], w przypadku mieszanek HBM przyjęto uproszczoną zależność pomiędzy modułami sprężystości:

$$E = E_{it} = E_c, \quad (2)$$

w której:

- E – moduł sprężystości,
- E_{it} – moduł sprężystości określony przy rozciąganiu pośrednim,
- E_c – moduł sprężystości określony przy ściskaniu jednoosiowym.

Do określania modułu sprężystości pod obciążeniem cyklicznym stosujemy różne metody badań. Moduł sprężystości gruntów i kruszyw niezwiązanych przeznaczonych do podłoża nawierzchni oznacza się najczęściej przy

1. INTRODUCTION

Hydraulically Bound Mixtures (HBM) are used mainly for road base construction and strengthening of road subgrades. In the test method introduced in 2005 in [1] the resilient modulus of HBM is determined under static load with the following load schemes: direct (axial) tension, axial compression or indirect tension (compression of cylindrical specimens along the generating line). In these methods the displacements are measured after the specimens have been loaded for the load time between 30 s and 60 s (depending on the strength of specimen).

Operation of the road results in static and dynamic loading of the pavements structure. Determination of the resilient modulus under cyclic loading of specimens represents real life loading of the HBM layers of pavement. Moreover, the mixtures are subjected to fatigue tests in which the load is repeatedly applied on the specimens.

The resilient modulus under cyclic loading is calculated as follows:

$$E = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r}, \quad (1)$$

where:

- σ_d – stress tensor deviator,
- ε_r – elastic strain.

The resilient modulus of soil is designated by M_r [2], [3].

In [4 - 7], the following, simplified relationship between the resilient moduli has been assumed for HBM:

$$E = E_{it} = E_c, \quad (2)$$

where:

- E – resilient modulus,
- E_{it} – resilient modulus under indirect tension,
- E_c – resilient modulus under uniaxial compression.

Various methods are used for determining the resilient modulus under cyclic loading. The resilient modulus of soil and unbound aggregate used for construction of road subgrades is determined most often under cyclic loading in triaxial testing machine [8], [9]. A number of correlations have been established between the resilient modulus and the California Bearing Ratio (CBR) for different types of soil [2], [3], [10]. Bituminous mixtures are most often tested by three- or four-point bending of beam-shaped specimens subjected to cyclic loading or with indirect tension

obciążeniu cyklicznym w aparacie trójosiowym [8], [9]. Dotychczas opracowano liczne korelacje pomiędzy modułem sprężystości a wskaźnikiem nośności CBR różnych rodzajów gruntów [2], [3], [10]. Mieszanki mineralno-asfaltowe bada się zwykle metodą trójpunktowo lub czteropunktowo zginanej belki przy obciążeniu cyklicznym lub metodą rozciągania pośredniego [11], [12] i na tej podstawie określa moduł sztywności sprężystej, jako część rzeczywistą zespolonego modułu sztywności (albo normę zespolonego modułu sztywności). Obecnie brak jest znormalizowanej metody określania modułu sprężystości mieszank HBM pod obciążeniem cyklicznym. W Polsce zgodnie z [13] do określania modułu sprężystości mieszanki HBM zaleca się stosowanie obciążeń krótkotrwałych i powtarzalnych, podobnie jak do mieszank mineralno-asfaltowych.

W [14] przedstawiono wyniki badań modułu sprężystości metodą statyczną według [1], wykonane na próbkach przygotowanych zgodnie z [4 - 7]. Uzyskane wartości modułu sprężystości E_c zbadane metodą ściskania były bardzo rozbieżne, różniące się wartościami w przypadku tej samej mieszanki nawet dziesięciokrotnie. Analizowano także wykresy odkształceń próbek, ale nie uzyskano miarodajnych i zbieżnych wyników. Stwierdzono, że duże ich rozrzuty mogły być spowodowane grubym uziarnieniem mieszanki (0 - 22 mm) i przemieszczaniem rozluźnionych ziaren kruszywa podczas badania, co wpływało na zakłócanie pomiaru odkształceń, gdyż jest to badanie niszczące. Zastosowany sposób badania, mimo zgodności z [1], nie zapewniał odpowiedniego umocowania próbek. Problemy z badaniem sprężystości mieszank HBM o małych wytrzymałościach otrzymanych przy statycznym obciążeniu opisuje również praca [15].

Wyniki badań modułu sprężystości mieszank HBM przy cyklicznym obciążeniu zawiera praca [16], w której autorzy wykazali, że odkształcenie badawcze mieszank związanych cementem powinno być mniejsze niż 0,005% odkształcenia, jakie stosuje się w przypadku badań mieszank asfaltowych. Wynika to z większej sztywności i kruchości mieszank HBM. Następnie wykonano badania stosując obciążenie wywołujące odkształcenie od 0,001 do 0,002%, co odpowiadało deformacji poziomej $1 \div 2 \mu\text{m}$ próbki o średnicy 100 mm. Na podstawie przeprowadzonych 5 cykli obciążeniowych wykazano brak wpływu częstotliwości obciążenia na wartości mierzonych modułów sprężystości, istotnej w badaniach mieszank mineralno-asfaltowych.

W amerykańskiej metodzie projektowania nawierzchni [17] możliwe jest określanie wartości modułu sprężystości

method [11], [12], in order to determine the resilient modulus as the real part of the complex modulus (or norm of the complex modulus). Presently there are no officially approved methods for determining the resilient modulus of HBM under cyclic loading. According to [13] the procedures with repeated load application and short load time, such as used for testing bituminous mixtures, are recommended in Poland for determination of the resilient modulus of HBM.

The results of tests determining the resilient modulus with the static method according to [1] on specimens prepared according to [4 - 7] are presented in [14]. The values of E_c obtained in compressive test were very diverse, differing by up to ten times for a single mixture. Reliable and coinciding results were not found either in the analysed stress-strain curves drawn for the tested specimens. It has been concluded that this scattering of results could be attributed to the large size of aggregate (0 - 22 mm) accompanied with movement of loose grains during the test, which affected the accuracy of measured displacements in a destructive test procedure. Although conforming to [1], the procedure used in the test did not ensure appropriate mounting of the specimen. The problems encountered in determining the elasticity of low strength HBM under static loading have been described in [15].

The determination of resilient modulus of HBM under cycling loading is described in [16] and the authors have proven that the strain range of cement-bound mixtures should be less than 0.005% of the range applied in testing bituminous mixtures. This is because of a higher stiffness and brittleness of HBM as compared to bituminous mixtures. Then the tests were carried out under strain range from 0.001% to 0.002%, corresponding to horizontal displacement of 1 - 2 μm of a specimen measuring 100 mm in diameter. The frequency of load application, which must be taken into account when determining the E -modulus of bituminous mixtures had no relevance to the measured values of resilient modulus of HBM.

The American pavement design method [17] allows to determine the resilient modulus of HBM on the basis of compressive strength as per Table 1.

The review of the literature showed that HBM are tested for elastic properties under static compression and cyclic loading, most often in indirect tension and the results concerning the relationships between the moduli obtained with different methods are not conclusive. The results are interpreted using a static solution of cylinder compression problem with load applied continuously along intersection

mieszanki HBM na podstawie wytrzymałości na ściskanie według Tablicy 1.

lines of any plane passing through the vertical axis of the cylinder running in the opposite directions on the opposite

Table 1. Relationship between the resilient modulus and compressive strength for different materials according to [17]
Tablica 1. Zależności modułu sprężystości od wytrzymałości na ściskanie dla różnych materiałów według [17]

Material Materiał	Formula ^{*)} for E and M_r [psi] Wzór ^{*)} na E i M_r [psi]	Test method Metoda badania
Lean concrete and cement-bound granular material Chudy beton i kruszywo stabilizowane cementem	$E = 57000 \cdot f_c^{0.5}$	AASHTO T22
Mixture of fly ash, cement and lime Mieszanka popiołu lotnego, cementu i wapna	$E = 500 + q_u$	ASTM C 593
Cement treated soil Grunt stabilizowany cementem	$E = 1200 \cdot q_u$	ASTM D 1633
Lime treated soil Grunt stabilizowany wapnem	$M_r = 0.124 \cdot q_u + 9.98$	ASTM D 5102
Remarks / Uwagi		
^{*)} E, M_r – resilient modulus / moduł sprężystości, f_c', q_u – uniaxial compressive strength / wytrzymałość na ściskanie w próbie jednoosiowej		

Z przeglądu literatury wynika, że właściwości sprężyste mieszanek HBM badane są metodą statyczną przy ściskaniu oraz pod obciążeniem cyklicznym, zwykle przy rozciąganiu pośrednim, przy czym wyniki dotyczące zależności pomiędzy modułami badanymi różnymi metodami nie są jednoznaczne. Wyniki badań są interpretowane przy zastosowaniu rozwiązania statycznego zadania ściskania walca z obciążeniem ciągłym, działającym na pobocznicy wzdłuż linii będących śladem przekroju dowolnej płaszczyzny przechodzącej przez oś pionową walca i przeciwnie skierowanym na przeciwległych krawędziach. W rozwiązaniu założono, że materiał walca jest liniowo sprężysty, a więc charakteryzują go dwie niezależne stałe (np. moduł sprężystości i stała Poissona). Rozwiązania zadania poszukuje się w ramach teorii sprężystości przy założeniu małych odkształceń. W teście pośredniego rozciągania można wyznaczyć jednocześnie moduł sprężystości i stałą Poissona, mierząc np. zmianę średnicy walca w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny obciążenia oraz zmianę średnicy w płaszczyźnie obróconej względem pionowej osi walca o 60 stopni w odniesieniu do płaszczyzny prostopadłej.

W niniejszym artykule przedstawiono wstępne wyniki badań modułów sprężystości w przypadku trzech kruszyw stabilizowanych różnymi spoiwami hydraulicznymi pod obciążeniem cyklicznym przy rozciąganiu pośrednim.

edges. The solution assumes that the cylinder material is linearly elastic and, as such, may be described by two independent constants (for example resilient modulus and Poisson's ratio). The problem is solved on the basis of the theory of elasticity, assuming low strain range. In the indirect tension test the E -modulus and Poisson's ratio may be determined simultaneously, for example by measuring the change of cylinder diameter in the plane perpendicular to the loading plane and change of diameter between the plane rotated by 60 degrees in relation to the vertical axis of the cylinder and the perpendicular plane.

This paper presents the initial results of the experimental determinations of the resilient moduli for three aggregates stabilised with different hydraulic binders by indirect tension test under cyclic loading.

2. MATERIALS AND TEST METHODS

The tests were carried out on dolomite, granite and recycled concrete aggregates. The binders were: Portland cement CEM I 42.5, hydraulic road binder Silment CQ25, calcareous fly ash from power station Chorzów and siliceous fly ash from power station Siekierki. The mixture compositions are given in Table 2.

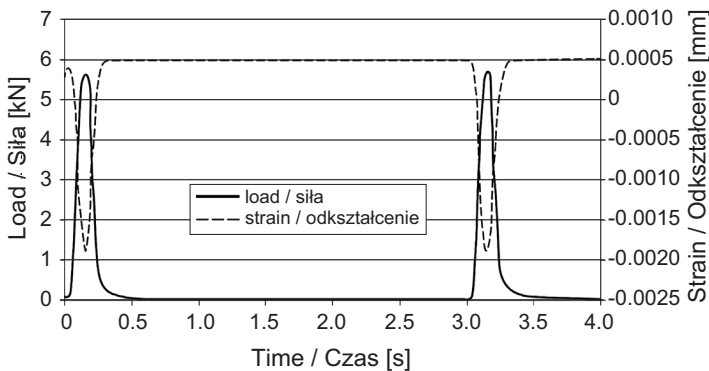
2. MATERIAŁY I METODY BADANIA

Do badań użyto trzech kruszyw: dolomitowego, granitowego oraz z recyklingu betonu. Jako spoiwo zastosowano cement portlandzki CEM I 42.5, hydrauliczne spoiwo drogowe Silment CQ25, wapienny popiół lotny z elektrowni Chorzów oraz krzemionkowy popiół lotny z elektrociepłowni Siekierki. Skład poszczególnych mieszanek przedstawiono w Tabelicy 2.

Moduły sprężystości oraz wytrzymałości na rozciąganie zbadano metodą pośredniego rozciągania na próbkach o wymiarach $\phi = 100$ mm i $h \cong 60$ mm (Rys. 1), zagęszczonych metodą Proctora o energii $0,6$ MJ/m³ według [18], po ich całkowitym związaniu i nasyceniu wodą zgodnie z [19]. Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono według [20] na próbkach o wymiarach $\phi = 100$ mm i $h = 120$ mm, a wytrzymałości na rozciąganie pośrednie według [21], przy czym wymiary próbki wynosiły $\phi = 100$ mm i $h \cong 60$ mm.

Fig. 1. Specimens used for determination of resilient modulus
Rys. 1. Próbkę użyte do badania modułu sprężystości

Badanie modułu sprężystości każdej mieszanki poprzedzono oznaczeniem jej wytrzymałości na rozciąganie. W celu wyznaczenia wytrzymałości na rozciąganie rozłupywano próbkę, przykładając obciążenie ze stałą prędkością wynoszącą mniej niż $0,2$ MPa/s zgodnie z [1]. Wytrzymałość na ściskanie próbek badano z obciążeniem stałym o prędkości takiej, aby próbka uległa zniszczeniu w czasie $30 \div 60$ s według [20].



Moduł sprężystości badano przy obciążeniu cyklicznym odpowiadającym około $0,3$ siły niszczącej. W celu określenia wpływu czasu przyłożenia obciążenia wykonano badania modułów mieszanek przy obciążeniu impulsem siły $0,248$ s (Rys. 2) i 50 s (Rys. 3). Czas $0,248$ s jest

The resilient modulus and tensile strength values were determined by indirect tension test on specimens of 100 mm in diameter by ca. 60 mm high (Fig. 1), compacted at standard Proctor effort of $0,6$ MJ/m³ according to [18], completely set and saturated with water according to [19]. Compressive strength was tested on specimens of 100 mm in diameter by ca. 120 mm high according to [20] and indirect tensile strength was tested on specimens of 100 mm in diameter by ca. 60 mm high [21].



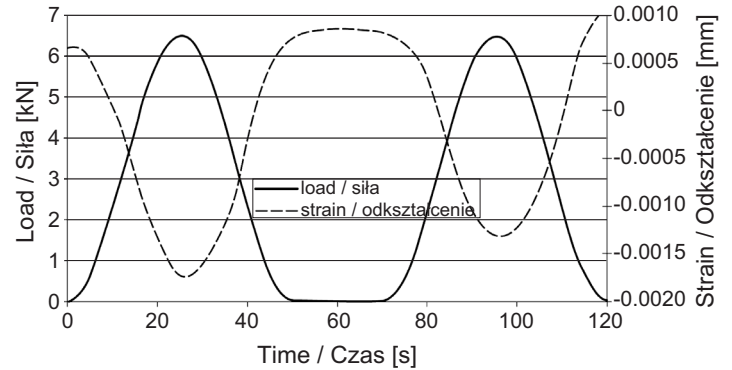
Before determining the resilient modulus each mixture was tested for tensile strength. The tensile strength was determined by splitting the specimen by application of the load at a constant rate of minimum $0,2$ MPa/s according to [1]. Compressive strength was tested by application of a constant load and the rate of load application was such that it failed in $30 - 60$ s according to [20].

Fig. 2. Load and strain vs. time, $t = 0,248$ s load time
Rys. 2. Obciążenie i odkształcenie próbek w funkcji czasu w przypadku czasu trwania impulsu siły $t = 0,248$ s

The resilient modulus was tested under repeatedly applied load of ca. $0,3$ of the breaking force. In order to verify whether the load time had an effect on the resilient modulus the mixtures were loaded for $0,248$ s (Fig. 2) and 50 s (Fig. 3) respectively. Load time of $0,248$ s is commonly used in testing bituminous mixtures and 50 s load time corresponds to the load application rate below $0,2$ MPa/s according to the input assumptions of [1].

standardowo stosowany przy badaniu próbek asfaltowych, a czas 50 s odpowiadał prędkości mniejszej niż 0,2 MPa/s, odpowiednio do założeń podanych w [1].

Fig. 3. Load and strain vs. time, $t = 50$ s load time
Rys. 3. Obciążenie i odkształcenie próbek w funkcji czasu w przypadku czasu trwania impulsu siły $t = 50$ s



3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Wyniki badań przedstawiono w Tabelicy 2.

3. PRESENTATION AND ANALYSIS OF THE TEST RESULTS

The test results are presented in Table 2.

Table 2. Resilient modulus, compressive and tensile strength values determined by testing HBM specimens
Tabelica 2. Wyniki badań modułów sprężystości oraz wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie próbek mieszanek HBM

Mixture composition Skład mieszanki	Resilient modulus determined with load time of $t = 0.248$ s $E_{0.248}$ [MPa] Moduł sprężystości przy obciążeniu impulsem siły w czasie $t = 0,248$ s $E_{0.248}$ [MPa]	Resilient modulus determined with load time of $t = 50$ s E_{50} [MPa] Moduł sprężystości przy obciążeniu impulsem siły w czasie $t = 50$ s E_{50} [MPa]	Tensile strength Wytrzymałość na rozciąganie R_t [MPa]	Compressive strength Wytrzymałość na ściskanie R_c [MPa]
Crushed dolomite bound with calcareous fly ash from Power Station Chorzów, 25% content Kruszywo dolomitowe związane popiołami lotnymi (wapiennymi) z Elektrowni Chorzów w ilości 25%	22548.0	22158.5	2.08	15.58
Recycled concrete aggregate bound with hydraulic road binder, 6% content Kruszywo z recyklingu betonu związane spoiwem drogowym w ilości 6%	4141.0	3364.1	0.16	1.41
Recycled concrete aggregate bound with cement, 6% content Kruszywo z recyklingu betonu związane cementem w ilości 6%	10863.3	10062.4	0.52	4.63

Table 2. continued
 Tablica 2. ciąg dalszy

Mixture composition Skład mieszanki	Resilient modulus determined with load time of $t = 0.248$ s $E_{0.248}$ [MPa] Moduł sprężystości przy obciążeniu impulsem siły w czasie $t = 0,248$ s $E_{0,248}$ [MPa]	Resilient modulus determined with load time of $t = 50$ s E_{50} [MPa] Moduł sprężystości przy obciążeniu impulsem siły w czasie $t = 50$ s E_{50} [MPa]	Tensile strength Wytrzymałość na rozciąganie R_t [MPa]	Compressive strength Wytrzymałość na ściskanie R_c [MPa]
Recycled concrete aggregate bound with cement, 12% content Kruszywo z recyklingu betonu związane cementem w ilości 12%	17643.4	17339.7	1.63	9.19
Crushed dolomite bound with cement, 6% content Kruszywo dolomitowe związane cementem w ilości 6%	14061.3	12346.8	0.52	3.33
Crushed dolomite bound with hydraulic road binder, 6% content Kruszywo dolomitowe związane spoiwem drogowym w ilości 6%	9435.4	8018.8	0.56	5.50
Crushed dolomite bound with cement, 12% content Kruszywo dolomitowe związane cementem w ilości 12%	28435.8	31061.4	2.56	12.09
Crushed granite bound with cement, 6% content Kruszywo granitowe związane cementem w ilości 6%	17833.6	18331.5	0.76	6.32
Crushed granite bound with hydraulic road binder, 12% content Kruszywo granitowe związane spoiwem drogowym w ilości 12%	19307.0	21832.6	1.04	14.00
Crushed granite bound with cement, 12% content Kruszywo granitowe związane cementem w ilości 12%	22085.6	21798.4	1.68	20.11

Table 2. continued
 Tablica 2. ciąg dalszy

Mixture composition Skład mieszanki	Resilient modulus determined with load time of $t = 0.248$ s $E_{0.248}$ [MPa] Moduł sprężystości przy obciążeniu impulsem siły w czasie $t = 0,248$ s $E_{0.248}$ [MPa]	Resilient modulus determined with load time of $t = 50$ s E_{50} [MPa] Moduł sprężystości przy obciążeniu impulsem siły w czasie $t = 50$ s E_{50} [MPa]	Tensile strength Wytrzymałość na rozciąganie R_t [MPa]	Compressive strength Wytrzymałość na ściskanie R_c [MPa]
Crushed granite bound with hydraulic road binder, 6% content Kruszywo granitowe związane spoiwem drogowym w ilości 6%	12879.4	10067.2	0.24	4.54
Crushed dolomite bound with hydraulic road binder, 12% content Kruszywo dolomitowe związane spoiwem drogowym w ilości 12%	22907.6	21804.6	1.04	10.10
Crushed dolomite bound with siliceous fly ash from Power Station Siekierki, 25% content Kruszywo dolomitowe związane popiołami lotnymi (krzemionkowymi) z Elektrociepłowni Siekierki w ilości 25%	16019.6	15949.1	1.32	13.15

Zbadane mieszanki charakteryzowały się następującymi właściwościami:

- modułem sprężystości $E_{0.248} = 4141,0 \div 28435,8$ MPa przy obciążeniu w czasie 0,248 s,
- modułem sprężystości $E_{50} = 3364,1 \div 31061,4$ MPa przy obciążeniu w czasie 50 s,
- wytrzymałością na rozciąganie $R_t = 0,16 \div 2,56$ MPa,
- wytrzymałością na ściskanie $R_c = 1,41 \div 20,11$ MPa.

Przy dwukrotnym zwiększeniu ilości spoiwa wagowo odnotowano około dwukrotny wzrost wartości modułu jedynie w przypadku mieszank z kruszywa dolomitowego. W pozostałych przypadkach ten wzrost był znacznie mniejszy. W przypadku próbek z kruszywem granitowym wyniósł on od 24% do 50%, a z kruszywem betonowym – 62%. W przypadku mieszank z tym samym kruszywem i taką samą ilością popiołów lotnych, lecz z różnych elektrowni, wartość modułu różniła się o około 30%. Oznacza

The following values were determined for the tested mixtures:

- resilient modulus $E_{0.248} = 4141.0 - 28435.8$ MPa for the load application time 0.248 s,
- resilient modulus $E_{50} = 3364.1 - 31061.4$ MPa for the load application time 50 s,
- tensile strength: $R_t = 0.16 - 2.56$ MPa,
- compressive strength: $R_c = 1.41 - 20.11$ MPa.

With doubled amount of binder by weight a corresponding increase in the value of resilient modulus was noted only for mixtures containing crushed dolomite. This increase was much lower for the remaining mixtures. The values were higher by between 24% and 50% for mixtures containing crushed granite and by 62% for mixtures containing recycled concrete aggregate. The modulus value varied by ca. 30% between mixtures produced with the same aggregate and containing fly ash obtained from different

to istotny wpływ różnych składników i ich zawartości na wartości modułu sprężystości mieszanek.

Przeprowadzone badania wykazały brak istotnego wpływu czasu trwania impulsu siły na wartość modułu sprężystości badanych próbek. Wynika to z dobrej korelacji liniowej typu $y=ax+b$ (przy relatywnie niedużej wartości parametru b) pomiędzy modułami oznaczonymi pod obciążeniem przyłożonym w czasie 0,248 s a modułami oznaczonymi przy obciążeniu w czasie 50 s (Rys. 4), co potwierdza uzyskany współczynnik determinacji, tj. miara jakości dopasowania przyjętego równania do wyników badań, wynoszący $R^2=0,97$. Na podstawie otrzymanych wyników badań przeanalizowano zależności pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie i ściskanie a modułami sprężystości $E = f(R_t)$ i $E = f(R_c)$ badanymi w czasie 0,248 s i 50 s. Wyniki obliczeń przedstawiono w formie graficznej na Rys. 5 i 6.

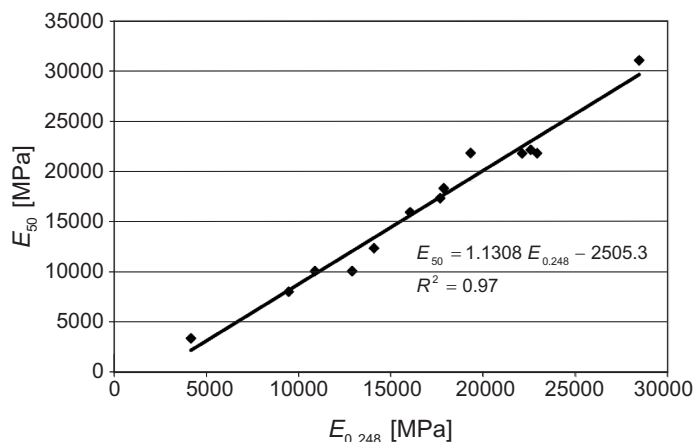


Fig. 4. Relationship between E_{50} and $E_{0,248}$ moduli
Rys. 4. Zależność modułu E_{50} od modułu $E_{0,248}$

Zgodnie z oczekiwaniem w obu przypadkach otrzymano korelacje pomiędzy wytrzymałością na ściskanie i rozciąganie a modułem sprężystości badanych mieszanek. Zależność $E = f(R_t)$ charakteryzowała się współczynnikiem determinacji $R^2=0,77$, a zależność $E = f(R_c)$ współczynnikiem $R^2=0,76$. Oznacza to, że są zależności pomiędzy wytrzymałością na ściskanie i rozciąganie a modułem sprężystości badanych mieszanek, które mają charakter nieliniowy. Zgodność wyników empirycznych z obliczonymi równaniami jest dobra pod względem statystycznym, ale należy zauważyć, że około 23÷24% zmienności wyników empirycznych nie zostało wyjaśnione przez otrzymane zależności.

power stations added at the same amount. This indicates that variation of the ingredients and their content has a significant effect on the value of resilient modulus.

The tests showed that the load time had no significant effect on the value of resilient modulus. This results from good linear correlation given by the function $y=ax+b$ (at a relatively low value of b) between the values obtained with load times of 0.248 s and 50 s (Fig. 4), as confirmed by the value of the coefficient of determination of $R^2=0.97$, defining the strength of fit between the equation and the test results. The test results were used to investigate the relationships between the values of tensile and compressive strength and resilient moduli: $E = f(R_t)$ and $E = f(R_c)$ for the load application time 0.248 s and 50 s. The results of these calculations are presented graphically in Fig. 5 and Fig. 6.

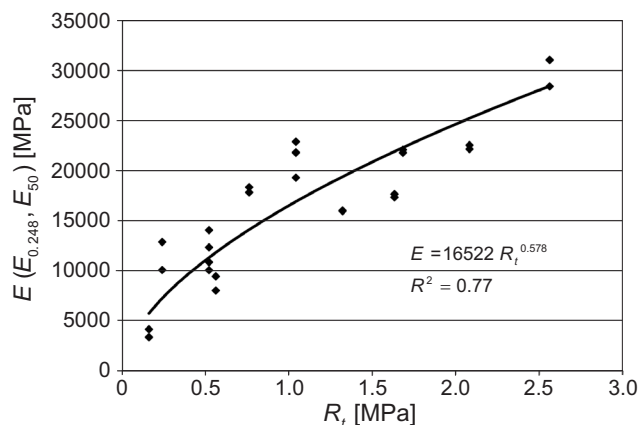


Fig. 5. Relationship between E -moduli ($E_{0,248}$ and E_{50}) and the tensile strength R_t for all the tested mixtures
Rys. 5. Zależność modułu sprężystości E ($E_{0,248}$ i E_{50}) od wytrzymałości na rozciąganie R_t wszystkich mieszanek

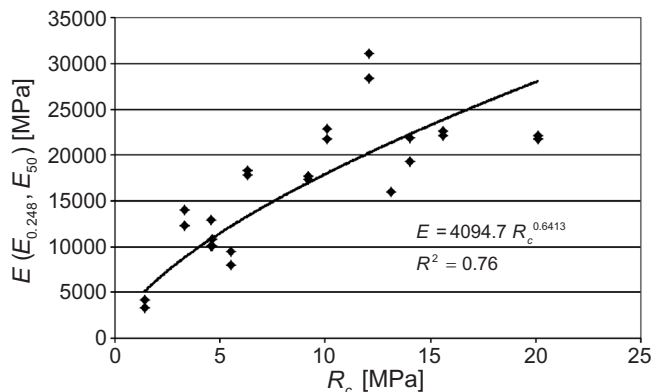


Fig. 6. Relationship between E -moduli ($E_{0,248}$ and E_{50}) and the compressive strength R_c for all the tested mixtures
Rys. 6. Zależność modułu sprężystości E ($E_{0,248}$ i E_{50}) od wytrzymałości na ściskanie R_c wszystkich mieszanek

W dalszych analizach przyjęto hipotezę, że poszczególne składniki, zwłaszcza kruszywa i spoiwa mogą mieć wpływ na zależności pomiędzy modułem sprężystości a wytrzymałością badanych mieszanek. W związku z tym przeanalizowano zależności $E = f(R_c)$ w mniejszych zbiorach wyników badań, z podziałem na rodzaj spoiwa i kruszywa, przy czym pominięto zależności dotyczące popiołów lotnych z uwagi na małą liczbę wyników badań. Wyniki tych analiz podano w Tablicy 3 oraz na Rys. 7 i 8.

Table 3. Relationships between compressive strength R_c and E -moduli ($E_{0,248}$ and E_{50}) for various aggregates and binders

Tablica 3. Zależności pomiędzy wytrzymałością na ściskanie R_c a modułem sprężystości $E_{0,248}$ i E_{50} z uwzględnieniem różnych kruszyw i spoiw

Material Rodzaj materiału	Formula for E Wzór na E	Coefficient of determination Współczynnik determinacji R^2
Crushed dolomite Kruszywo dolomitowe	$E = 7660.9 \ln(R_c) - 2604.7$	0.40
Crushed granite Kruszywo granitowe	$E = 6136.3 \ln(R_c) + 4214.9$	0.78
Recycled concrete aggregate Kruszywo z recyklingu betonu	$E = 7142.4 \ln(R_c) + 821.3$	0.97
Cement	$E = 7497.1 \ln(R_c) + 2838.8$	0.48
Hydraulic road binder Spoiwo drogowe	$E = 8187.9 \ln(R_c) - 564.7$	0.82

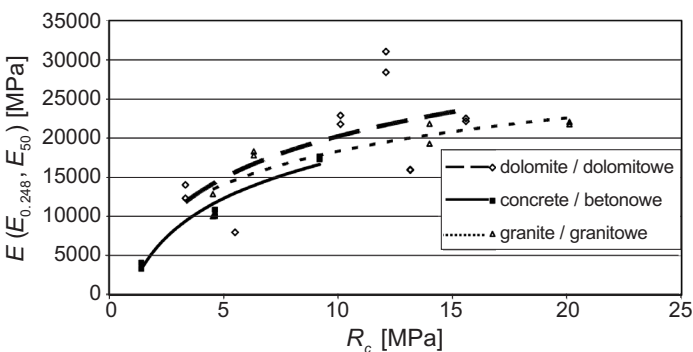


Fig. 7. Relationship between E -moduli ($E_{0,248}$ and E_{50}) and the compressive strength R_c for all the tested aggregates
Rys. 7. Zależność modułu sprężystości E ($E_{0,248}$ i E_{50}) od wytrzymałości na ściskanie R_c mieszanek z różnymi kruszywami

As it has been expected, correlation between the compressive and tensile strength values as one variable and the resilient modulus as the other were obtained in both cases. The coefficient of determination R^2 obtained the values of 0.77 and 0.76 for the relationships $E = f(R_c)$ and $E = f(R_c)$ respectively. This confirms existence of non-linear relationships between the compressive and tensile strength and the resilient modulus values for the tested mixtures. Goodness of fit has been established between the empirical results and the formulated equations, although still ca. 23-24% of variability in empirical results remains without explanation.

Therefore, it has been assumed for the purpose of further analyses that the relationships between the modulus and the strength may strongly depend on the choice of ingredients, including in particular

aggregate and binder. Consequently, the $E = f(R_c)$ relationships were analysed in smaller sets of test results, broken down by the type of binder and aggregate, leaving out relationships concerning fly ash due to insufficient number of results. The results of these analyses are presented in Table 3 and illustrated in Fig. 7 and Fig. 8.

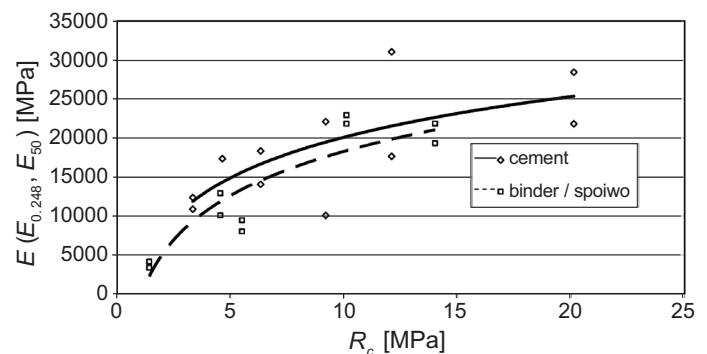


Fig. 8. Relationship between E -moduli ($E_{0,248}$ and E_{50}) and the compressive strength R_c for the mixtures bound with cement and hydraulic road binder

Rys. 8. Zależność modułu sprężystości E ($E_{0,248}$ i E_{50}) od wytrzymałości na ściskanie R_c mieszanek z cementem i spoiwem drogowym

Otrzymane zależności $E = f(R_c)$ obliczone z podziałem na rodzaje kruszyw i spoiw są bardzo zróżnicowane pod względem zgodności statystycznej, a ich współczynnik determinacji jest bardzo zróżnicowany i wynosi $R^2 = 0,40 \div 0,97$. Widoczne są pewne różnice w przebiegu krzywych charakteryzujących poszczególne kruszywa i spoiwa. Można przewidywać, że prawdopodobnie niektóre składniki mogą mieć wpływ na analizowane zależności, lecz ze względu na niewielkie różnice przebiegu krzywych otrzymanych w mniejszych zbiorach, na tym etapie badań nie można wnioskować o istotnym wpływie poszczególnych składników na analizowane zależności.

4. WNIOSKI

Wyniki badań mieszanek HBM o wytrzymałości na ściskanie $R_c = 1,41 \div 20,11$ MPa, wytrzymałości na rozciąganie $R_t = 0,16 \div 2,56$ MPa i charakteryzujących się modułami sprężystości w zakresie $E = 3364,1 \div 31061,4$ MPa wykazały, że na wartość modułu sprężystości mieszanki HBM określonej metodą pośredniego rozciągania czas trwania impulsu obciążania nie ma istotnego wpływu. Wynika to z dobrej liniowej korelacji pomiędzy wartościami modułów oznaczonych w czasie trwania obciążenia 0,248 s i 50 s. Moduły sprężystości wyznaczone w obydwu tych przypadkach są do siebie zbliżone. Oznacza to, że do badania modułu mieszanek HBM można przyjąć czas przyłożenia obciążenia taki, jak w przypadku mieszanek mineralno-asfaltowych, czyli 0,248 s lub 50 s.

Stwierdzono, że pomiędzy wytrzymałością na ściskanie i rozciąganie a modułem sprężystości badanych mieszanek są zależności, które mają charakter nieliniowy. Zależność $E = f(R_t)$ charakteryzowała się współczynnikiem determinacji $R^2 = 0,77$, a zależność $E = f(R_c)$ współczynnikiem $R^2 = 0,76$. Przeanalizowano także wpływ poszczególnych kruszyw i spoiw na zależności $E = f(R_c)$ w mniejszych zbiorach wyników badań, z podziałem na spoiwa i kruszywa. Zauważono, że są pewne różnice w przebiegu rzędnych krzywych charakteryzujących poszczególne kruszywa i spoiwa. Prawdopodobnie niektóre składniki mogą mieć wpływ na analizowane zależności, lecz ze względu na niewielkie różnice przebiegu krzywych otrzymanych w mniejszych zbiorach, na tym etapie badań nie można wnioskować o istotnym wpływie poszczególnych składników mieszanek na analizowane zależności.

The results obtained with the $E = f(R_c)$ relationships varied strongly in terms of statistical consistency and coefficient of determination, which ranged $R^2 = 0.40-0.97$. Some differences were noted in the shape of curves between the respective aggregates and binders. Although one can expect that some ingredients may have an influence on the analysed relationships, the differences between the curves drawn for smaller sets of data were too small to allow us to conclude at this stage of research that the choice of ingredients has a significant effect on the analysed relationships.

4. CONCLUSIONS

The results of indirect tension tests, i.e. compressive strength in the range $R_c = 1.41-20.11$ MPa, tensile strength in the range $R_t = 0.16-2.56$ MPa and E -modulus in the range $E = 3364.1-31061.4$ MPa show that the load time has no significant effect on the value of the resilient modulus of the tested HBM. These results from good linear correlation between the values of resilient modulus obtained with load times of 0.248 s and 50 s respectively. Similar values of resilient modulus were obtained for these two load times. This means that the modulus of HBM may be determined by testing with load times of 0.248 s or 50 s as normally used in testing bituminous mixtures.

Non-linear relationships were established between the compressive and tensile strength as one variable and the resilient modulus as the other. The coefficient of determination R^2 obtained the values of 0.77 and 0.76 for the relationships $E = f(R_t)$ and $E = f(R_c)$ respectively. Moreover, the relationships $E = f(R_c)$ were established for the respective aggregates and binders based on subsets of data. This analysis showed some differences in the shape of curves between the respective aggregates and binders. Therefore, although some ingredients may have an influence on the analysed relationships, the differences between the curves drawn for smaller sets of data were too small to allow concluding at the current stage of research that choice of ingredients has a significant effect on the analysed relationships.

REFERENCES / BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 13286-43 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym – Część 43: Metoda oznaczania modułu sprężystości mieszanek związanych spoiwem hydraulicznym

- [2] *George K.P.*: Prediction of resilient modulus from soil index properties. Final report. The University of Mississippi, Mississippi, 2004
- [3] *Hopkins T.C., Beckham T.L., Sun Ch., Ni B.*: Resilient modulus of Kentucky soils. University of Kentucky, Kentucky, 2001
- [4] PN-EN 14227-1 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym – Wymagania – Część 1: Mieszanki związane cementem
- [5] PN-EN 14227-2 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym – Specyfikacje – Część 2: Mieszanki żuźlowe
- [6] PN-EN 14227-3 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym – Wymagania – Część 3: Mieszanki związane popiołami lotnymi
- [7] PN-EN 14227-5 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym – Wymagania – Część 5: Mieszanki związane spoiwem drogowym
- [8] AASHTO T274 Resilient Modulus of Unbound Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils
- [9] PN-EN 13286-7 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym – Część 7: Próba cyklicznego obciążania trójosiowego mieszanek niezwiązanych (oryg.)
- [10] *Powell W.D., Potter J.F., Mayhew H.C., Nunn M.E.*: The structural design of bituminous roads. TRRL Report, 1984
- [11] ASTM D4123-82 Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures
- [12] PN-EN 12697-26 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 26: Sztywność
- [13] Praca zbiorowa: Katalog Wzmocnień i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych KWRNPP-2001. IBDiM, 2001
- [14] Praca zbiorowa: Badania i analiza porównawcza właściwości mieszanek związanych hydraulicznie według dotychczasowych norm PN i nowych norm PN-EN 14225:1÷5. IBDiM, Warszawa, 2007
- [15] *Edwards J.P.*: Laboratory Characterisation of Pavement Foundation Materials. A dissertation thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the award of the degree Doctor of Engineering (EngD). Loughborough University, March, 2007
- [16] *Marrani A., Lancieri F.*: Performance of cement stabilized recycled crushed concrete. First International Conference on Transport Infrastructure ICTI, Beijing, China, 2008
- [17] Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide (MEPDG). A Manual of Practice. American Association of State Highway and Transportation Officials, June, 2008
- [18] PN-EN 13286-2 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym – Część 2: Metody określania gęstości i zawartości wody – Zagęszczanie metodą Proctora
- [19] Praca zbiorowa: Wymagania techniczne. Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym. WT 5, IBDiM, 2010
- [20] PN-EN 13286-41 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym – Część 41: Metoda oznaczania wytrzymałości na ściskanie mieszanek związanych spoiwem hydraulicznym
- [21] PN-EN 13286-42 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym – Część 42: Metoda oznaczania wytrzymałości na rozciąganie pośrednie mieszanek związanych spoiwem hydraulicznym