



GAJENDRA KUMAR¹⁾
 UMESH C. SAHOO²⁾
 K. RAMACHANDRA RAO³⁾
 SUNIL BOSE⁴⁾

DESIGN AND EVALUATION OF STONE MATRIX ASPHALT USING STIFFER GRADE CRUMB RUBBER MODIFIED BITUMEN

PROJEKTOWANIE I OCENA MIESZANKI MASTYKSOWO-GRYSOWEJ PRZY ZASTOSOWANIU ASFALTU MODYFIKOWANEGO DODATKIEM GRANULATU GUMOWEGO O PODWYŻSZONYM MODULE SZTYWNOŚCI

STRESZCZENIE. Mieszanki mastyksowo-grysowe znajdują zastosowanie przede wszystkim jako materiał do wykonywania warstwy ścieralnej nawierzchni drogowej ze względu na ich bardzo dobrą charakterystykę pracy w warunkach dużego obciążenia ruchem oraz jako korzystna cenowo alternatywa w stosunku do klasycznych mieszanek mineralno-asfaltowych o ciągłym uziarnieniu. Przedmiotem pracy jest zastosowanie w mieszankach SMA sztywniejszego lepiszcza modyfikowanego granulatem gumowym. Przeprowadzono szerokie badania laboratoryjne mieszanek z różnymi lepiszczami modyfikowanymi i niemodyfikowanymi (z dodatkiem włókien). Uzyskane wyniki wskazują na dobre właściwości eksploatacyjne mieszanek SMA na bazie lepiszczy CRMB-70 i CRMB-80 w warunkach dużych obciążeń ruchem bez znaczącego problemu ze spływnością lepiszcza. Potwierdzono również zasadność zastosowania lepiszcza CRMB-80 do nawierzchni o zwiększonych wymaganiach w zakresie odporności na wysokie wartości temperatury. Bardzo niskie wartości skumulowanych odkształceń predestynują ten materiał do produkcji mieszanek o wysokiej odporności na koleinowanie. Ponadto, w przypadku wykorzystania lepiszcza CRMB-80 uzyskano najmniejszą głębokość koleiny wynoszącą 4,5 mm po 20000 cyklach obciążenia.

SŁOWA KLUCZOWE: lepiszcze modyfikowane granulatem gumowym (CRMB), mieszanka mastyksowo-grysowa (SMA), właściwości użytkowe, włókna.

ABSTRACT. Stone Matrix Asphalt (SMA) is primarily used as a surfacing layer material since it is found to perform well under heavy traffic conditions and at the same time is more cost-effective when compared to the conventional dense graded mixes. An attempt has been made in this study to incorporate a stiffer grade crumb rubber modified bitumen (CRMB) for design of SMA. Extensive laboratory studies on mixes prepared with different modified binders and normal binders (with fibers) were conducted. The results obtained indicate that SMA designed using CRMB-70 and CRMB-80 performs well under heavy traffic conditions and at the same time without significant drain-down. Further, CRMB-80 is found to be suitable at high temperatures since it yields a very low accumulated strain and is thus recommended for designing rut resistant durable mixes. In addition, CRMB-80 yields the least rut depth of 4.5 mm even after 20,000 load repetitions.

KEYWORDS: crumb rubber modified bitumen (CRMB), fiber, performance, stone matrix asphalt (SMA).

DOI: 10.7409/rabdim.019.010

¹⁾ Central Road Research Institute (CSIR), Flexible Pavements Division, New Delhi-110025, India; gk.crri@gmail.com

²⁾ Indian Institute of Technology Bhubaneswar, School of Infrastructure, Odisha-752050, India; ucsahoo@iitbbs.ac.in

³⁾ Indian Institute of Technology Delhi, Department of Civil Engineering, and Transportation Research and Injury Prevention Programme (TRIPP), New Delhi-110016, India; rrkalaga@civil.iitd.ac.in (✉)

⁴⁾ consultant in the field of Pavement Engineering, formerly - Central Road Research Institute (CSIR), New Delhi-110025, India; sunilb.crri@gmail.com

1. WPROWADZENIE

Zrównoważony rozwój infrastruktury drogowej wymaga projektowania nawierzchni asfaltowych, charakteryzujących się odpornością na koleinowanie, szkody zmęczeniowe, spękania termiczne i zapewniających długi okres eksploatacji przy niskich nakładach na utrzymanie. Koleiny powstające w górnej warstwie nawierzchni są najczęstszą formą zniszczenia nawierzchni asfaltowych eksploatowanych w warunkach dużych obciążeń ruchem drogowym i przy wysokich temperaturach otoczenia. W ciągu ostatnich dwóch dekad w wielu krajach wprowadzono do stosowania technologie mieszanek mastyksowo-gryzowych określanych skrótem SMA, które charakteryzują się odpornością na uszkodzenia przez opony z kolcami oraz na powstawanie kolein [1-5]. Wyniki badań europejskich i amerykańskich wskazują na lepsze właściwości użytkowe nawierzchni z mieszanek SMA w przypadku dużego obciążenia ruchem oraz wyższą efektywność ekonomiczną w stosunku do klasycznych mieszanek mineralno-asfaltowych o ciągłym uziarnieniu [6-8].

Mieszanki SMA to dwuskładnikowe mieszanki asfaltowe na gorąco zbudowane ze szkieletu z gruboziarnistego kruszywa o nieciągłym uziarnieniu oraz mastyksu o dużej zawartości lepiszcza. Szkielet kruszywowy z jednej strony zapewnia dużą wytrzymałość mechaniczną przez wykorzystanie efektu bezpośredniego kontaktu dużych ziaren kruszywa a z drugiej umożliwia zwiększenie trwałości nawierzchni dzięki większej zawartości lepiszcza [9, 10]. Puste przestrzenie szkieletu kruszywowego wypełnione są w mieszankach SMA bogatym w lepiszcze mastyksem zbudowanym z drobnego kruszywa, wypełniacza mineralnego, lepiszcza oraz stabilizatora. Wysoka zawartość lepiszcza bitumicznego (na poziomie 6%) skutkuje większą podatnością na jego spływanie z ziaren kruszywa i osiadanie na dnie zbiornika w trakcie przechowywania i przewożenia, co w literaturze anglojęzycznej określa się terminem „drain-down”. Wywołane tym zjawiskiem zmiany zawartości lepiszcza bitumicznego, nawet gdy są bardzo nieznaczne, mogą mieć istotny wpływ na charakterystykę użytkową materiału. Spływności lepiszcza można przeciwdziałać przez zwiększenie ilości frakcji drobnoziarnistej (wypełniacza mineralnego) w połączeniu z dodatkiem stabilizatora. Brown i inni [9] uważają plamy (wypływ) lepiszcza za najważniejszy problem, z jakim możemy mieć do czynienia w przypadku nawierzchni wykonanych z mieszanek SMA. Wśród możliwych przyczyn ich powstawania wymienić można segregację, spływanie i nadmierną ilość lepiszcza oraz niewłaściwy dobór ilości i rodzaju. Z oceny właściwości użytkowych nawierzchni SMA przeprowadzonej przez NCAT (Amerykańskie Narodowe Centrum Technologii Nawierzchni Asfaltowych) wynika, że zawartość lepiszcza i wolnych

1. INTRODUCTION

For sustainable road infrastructure development, there is a need to provide asphalt pavements that are resistant to rutting, fatigue, thermal cracking with low maintenance and a higher service life. Rutting of the surface course of asphalt pavements subjected to heavy traffic load and high temperature are the most common mode of modes of failure. Since the past two decades many countries have adopted Stone Matrix Asphalt (SMA) technology that provides resistance against studded tyre wear as well as rutting [1-5]. Studies conducted in Europe and USA suggest that SMA mixes perform better for pavements under heavy traffic loads and further found to be more cost-effective when compared with the conventional dense graded mixes [6-8].

SMA comprises two component hot mix asphalt, that consists of a coarse aggregate skeleton with a gap-graded gradation and a high binder content mortar. The coarse aggregate skeleton at one hand strengthens the mix due to stone-to stone contact and on the other, increases durability of the mix due to a high bitumen content [9, 10]. The voids of the coarse aggregate skeleton in SMA are filled with a binder-rich mortar that comprises fine aggregates, mineral filler, bituminous binder and a stabilizing additive. Due to a high bituminous binder content (the order of 6%) in SMA mixes, the binder has a tendency to drain off the aggregate and settle to the bottom during storage and hauling operations, a phenomenon known as “mix drain-down”. As a result of this, the performance of the SMA can be significantly altered due to the slightest variations in bituminous binder content. However, the drain down effect can be minimized by the use of a combination of more fines (mineral filler) and a stabilizing agent in the mix. Brown et al. [9] suggest that the most significant problem associated with the SMA pavement is due to fat spots. These spots may occur due to segregation, drain-down, high bituminous binder content, and use of improper kind as well as quantity of stabilizing additive. The National Center of Asphalt Technologies (NCAT) performance evaluation of SMA pavements suggests that the bitumen content with an air void content of 4% provides protection against fat spots and further proto rutting, particularly in warm climates.

Gap gradation of a SMA allows the binder and the aggregate dust to drain down when the mixture is hot during storage, hauling, and placement, and to prevent this drain-down use of stabilizing additives is used to prevent drain-downing [11-13]. Different stabilizers may result at different optimum binder contents for a given mix at equal

przestrzeni na poziomie 4% zapobiega powstawaniu plam lepiszcza oraz przedwczesnemu powstawaniu kolein, szczególnie w przypadku eksploatacji w krajach o cieplejszym klimacie.

Nieciągłość uziarnienia mieszanki SMA stwarza możliwość spływania gorącego lepiszcza wraz z frakcją pyłową kruszywa (mączka) podczas przechowywania, transportu i układania mieszanki, co rodzi konieczność stosowania środków przeciwdziałających temu niepożądanemu zjawisku – tzw. stabilizatorów mastyksu [11-13]. Przy takiej samej projektowej zawartości wolnych przestrzeni zastosowanie innego stabilizatora może skutkować zmianą optymalnej zawartości lepiszcza. Wskazuje to na możliwość wpływu stabilizatora na zagęszczalność mieszanki. W przypadku usztywnienia lepiszcza w stopniu utrudniającym proces zagęszczania mieszanki SMA wymagane może być więc zwiększenie zawartości lepiszcza w celu uzyskania zakładanej zawartości wolnych przestrzeni, co może ograniczyć bezpośredni kontakt grubych ziaren tworzących szkielet kruszywowy [12]. Należy więc zwrócić uwagę, by stabilizator dodawany do mieszanki w celu ograniczenia spływności nie miał negatywnego wpływu na jej właściwości technologiczne. Spośród dodatków dodawanych do mieszanki w celu zwiększenia jej wysokotemperaturowej sztywności, takich jak włókna, wypełniacze mineralne, granulaty gumowe i polimery najbardziej efektywne w przeciwdziałaniu spływności okazały się włókna.

Wśród włókien najczęściej dodawanych do mieszanek SMA wyróżnić można włókna celulozowe, włókna poliestrowe i włókna mineralne. Z przeprowadzonego przeglądu literatury wynika, że nierzadko wykorzystuje się również włókna polimerowe [14-16]. Mastyks mieszanki SMA zbrojony jest włóknami, które skutecznie zwiększają lepkość układu. Poprawia to stabilność mieszanki i zwiększa wytrzymałość nawierzchni na spękania zmęczeniowe [16-18]. Chen i Kueiyi [19] zbadali wpływ włókien celulozowych, włókien wełny mineralnej oraz włókien poliestrowych na właściwości asfaltu stwierdzając, że na nośność mastyksu wzmocnionego włóknami wpływ ma dobra adhezja między włóknami i lepiszczem. Pozytywny wpływ włókien celulozowych na wytrzymałość zmęczeniową mieszanek SMA stwierdzili również Shaopeng i inni. [20]. Zbadaniem właściwości reologicznych lepiszczy w zależności od rodzaju zastosowanych włókien zajęli się Muniandy i Bujang [21], którzy w tym celu przeprowadzili badania w reometrze dynamicznego ścinania. Uzyskane przez nich wyniki wskazują na znaczną poprawę odporności na koleinowanie mieszanek mineralno-asfaltowych w wyniku zastosowania włókien jako wzmocnienie lepiszcza.

design air voids. This indicates that stabilizers can affect the compaction of the mixture. If a stabilizer excessively stiffens a binder to a point where SMA is more difficult to compact, the mixture may require more bitumen to meet the target air voids level which could further decrease the degree of contact between the coarse aggregates [12]. Thus, addition of stabilizers should reduce the drain-down without decreasing the performance of the mixture. Additives such as, fibres, mineral fillers, rubbers and polymers have been used to stiffen the mix at high temperatures, however, amongst these, fibres were found to be most effective in preventing the drain-down.

Similarly, various fiber modifiers, such as cellulose fiber, polyester fiber, and mineral fibers are widely used in SMA. A review of the literature shows that polymers as fiber modifiers are not rarely used in SMA [14-16]. The binder system of a SMA is reinforced through the use of fibers that effectively increase in the viscosity of the system, thereby providing higher stability and resistance to fatigue cracking of asphalt mixes. This provides higher stability and higher resistance to fatigue cracking of the asphalt mix [16-18]. Chen and Kueiyi [19] investigated the effects of cellulose, rock wool and polyester fiber on the engineering properties of asphalt and found that good adhesion between fibers and bitumen enhances the load carrying ability of asphalt-fiber mastics. Shaopeng et al. [20] also reported that the fatigue resistance of the SMA mixes can be improved by using some cellulose fibers. Muniandy and Bujang [21] carried out dynamic shear rheometer test to study the rheological properties of asphalt with various fibers. Their results indicate that the rutting resistance of asphalt with fibers can be improved to a large extent.

Cellulose fibers are not manufactured in India and are usually imported thereby increasing the cost of construction exorbitantly. Alternatively, stiffer grade modified binders that provide higher stability and more resistance to rutting can be used instead. Likewise, crumb rubber, obtained from grinded scrap tires, is widely used as a bitumen modifier to reduce construction costs and energy consumption instead of using expensive polymers such as styrene butadiene styrene (SBS) and styrene butadiene rubber (SBR). Many researchers suggest that addition of crumb rubber to bitumen improves the elastic function of bitumen and decreases the effects of aging. A huge amount of scrap tires generated due to an increasing production of cars in the country is becoming a threat to the environment. Muniandy et al. [22] suggest that there is a great potential for ground tire rubber (up to 4%) along with 0.3% cellulose oil palm fiber to develop SMA. The

Ponieważ włókna celulozowe nie są produkowane w Indiach, trzeba je sprowadzić z zagranicy, co znacznie zwiększa koszt budowy. W tej sytuacji rozwiązaniem może być zastosowanie lepischer modyfikowanych o podwyższonym module sztywności, które zapewnią większą stabilność i wytrzymałość na koleinowanie. W tym samym celu stosuje się granulaty gumowy uzyskany przez zmielenie zużytych opon, który jest często wykorzystywany jako dodatek modyfikujący lepiscza asfaltowe jako alternatywa dla polimerów, takich jak kauczuk styrenowo-butadienowo-styrenowy (SBS) i kauczuk styrenowo-butadienowy (SBR) ze względu na niższe koszty inwestycji i oszczędność energii. Wielu badaczy zauważa pozytywny wpływ dodatku granulatu gumowego na elastyczność lepiscza i przeciwdziałanie skutkom starzenia. Olbrzymia ilość zużytych opon będąca skutkiem rozwoju motoryzacji zaczyna stanowić coraz większe zagrożenie dla środowiska naturalnego. Muniandy i inni [22] widzą bardzo duży potencjał dla stosowania w mieszankach SMA dodatku granulatu gumowego (w ilości do 4%) wraz z włóknami celulozowymi z palmy olejowej dozowanymi w ilości 0,3%. Duży koszt pozyskania włókien celulozowych oraz konieczność recyklingu zużytych opon samochodowych stanowiły przesłankę do poszukiwań możliwości zastosowania sztywniejszych odmian lepischer modyfikowanych granulatem gumowym (tj. CRMB-70, CRMB-80). Parametry użytkowe tej mieszanki porównano następnie z parametrami mieszank SMA przygotowanych przy zastosowaniu polimeroasfaltu PMB-40 i asfaltu niemodyfikowanego 60/70 z dodatkiem różnych włókien celulozowych.

2. PROJEKTOWANIE MIESZANEK

2.1. MATERIAŁY

2.1.1. Kruszywa

Kruszywa do zastosowania w mieszankach SMA oceniono na podstawie właściwości fizycznych i uziarnienia. Pozyskano je z miejscowego kamieniołomu zlokalizowanego w pobliżu New Delhi. Kruszywo drobne zawierało frakcję pyłową (mączkę kamienną). Na podstawie wyników przedstawionych w Tabl. 1 stwierdzić można spełnienie przez ww. kruszywa warunków technicznych określonych dla mieszank bitumicznych o nieciągłym uziarnieniu w wymaganiach indyjskiego ministerstwa transportu drogowego i autostrad (MoRTH) [23].

2.1.2. Lepiscza asfaltowe

Asfalt modyfikowany o podwyższonej sztywności przygotowano na bazie powszechnie stosowanego w Indiach asfaltu drogowego 60/70. Asfalt zmodyfikowano dodając granulaty

higher cost associated with the cellulose fibers and the need to reuse scrap tires necessitated one to explore the possibility of using stiffer grade CRMB (Crumb Rubber Modified Bitumen (i.e. CRMB-70, CRMB-80). The performance of this mix is further compared with SMA mixes prepared using PMB 40, and 60/70 grade bitumen (mixed different types of cellulose fibers).

2. DESIGNING MIXES

2.1. MATERIALS

2.1.1. Aggregates

To assess the suitability of aggregates collected from a local quarry near to New Delhi for use in SMA in the present study were tested for their physical properties and gradation. The fine aggregate comprise stone dust. The results are reported in Table 1 show that the aggregates meet the specifications for the gap-graded asphalt mixtures laid down by Ministry of Road Transport and Highways (MoRTH) in India [23].

Table 1. Properties of aggregate and its gradation
Tablica 1. Właściwości fizyczne kruszywa i jego uziarnienie

Sieve size [mm] Wymiar oczka sita	Gradation adopted [% passing] Przyjęte uziarnienie [przesiew w %]	IRC Specification [% passing] Wymagania IRC [przesiew w %]
19.0	100	100
13.2	91	90-100
9.5	64	50-75
4.75	27	20-28
2.36	20	16-24
1.18	17	13-21
0.600	13	12-18
0.300	13	10-20
0.075	9	8-12
Physical properties of aggregates / Właściwości fizyczne kruszyw		
Test description Opis badania	Results Wyniki	Specification Wymagania IRC: SP-79-2008
Combined flakiness and elongation index [%] Wskaźnik zawartości ziaren wydłużonych i płaskich [%]	24	30
Specific gravity / Gęstość względna [-]	2.640	2.50-3.00
Water absorption / Nasiąkliwość [%]	0.30	2.0 (max)
Impact value / Wartość udarności [%]	14.5	30 (max)
Los Angeles abrasion value [%] Ścieralność wg Los Angeles [%]	21.3	30 (max)

gumowy w różnych proporcjach w celu uzyskania różnych mieszanek CRMB. Granulat gumowy 150-300 μm uzyskuje się w procesie rozdrabniania wysokojakościowych zużytych opon samochodowych. W Tabl. 2 przedstawiono charakterystyki asfaltów modyfikowanych dodatkiem granulatu gumowego i polimeru SBS (polimeroasfalt PMB-40) oraz asfaltu niemodyfikowanego 60/70. Analizując informacje przedstawione w tablicy zauważyć można stabilność mieszanek CRMB podczas przechowywania w temperaturach powyżej 35°C. Różnice temperatury mięknięcia próbek pobranych z różnych wysokości zbiornika były mniejsze niż 3°C. Ponadto, w zakresie badanych właściwości, modyfikowany asfalt spełnia warunki techniczne określone dla asfaltów modyfikowanych w normach indyjskich [24].

Table 2. Physical properties of the applied binders
Tablica 2. Właściwości fizyczne zastosowanych lepiszczy

Property Właściwość	Binder / Lepiszczce					IRC Recommendations [30] (temp. > 35°C) Zalecenia IRC (temp. > 35°C)
	PMB-40	CRMB-60	CRMB-70	CRMB-80	60/70	
Penetration at 25°C (0.1 mm, 100 g, 5 sec.) [-] Penetracja w temperaturze 25°C (0,1 mm, 100 g, 5 s) [-]	36	38	23	17	68	30-50
Softening point (Ring & Ball) [°C] Temperatura mięknięcia (metoda PiK) [°C]	65	66.2	72.7	83.4	48.3	60
Flash point, by COC [°C] Temperatura zapłonu, przez COC [°C]	298	264	279	296	245	220 (min)
Viscosity at 150°C [10 ⁻¹ Pa·s] Lepkość w temperaturze 150°C [10 ⁻¹ Pa·s]	5.6	4.3	5.7	8.4	–	5-9
Specific gravity [-] Gęstość w stosunku do gęstości wody [-]	1.01	1.0	1.0	1.0	1.0	0.97-1.02
Elastic recovery (at 15°C) / Nawrót sprężysty (w 15°C) [%]	78	56	48	39	18	50 (min)
Thin Film Oven Test (TFOT) on residue / Odporność na starzenie (metoda TFOT po odparowaniu w suszarce cienkiej warstwy próbki)						
Loss in weight / Ubytek masy [%]	0.21	0.32	0.27	0.24	0.48	1.0 (max)
Increase in softening point [°C] Wzrost temperatury mięknięcia [°C]	4	4	3	2	–	5 (max)
Reduction in penetration of residue, at 25°C [%] Spadek penetracji oznaczony w temp. 25°C po starzeniu [%]	19.4	36	24	16	–	35 (max)
Elastic recovery of half thread in ductilometer at 25°C [%] Nawrót sprężysty w duktylocetrze w temp. 25°C [%]	74	42	33	24	–	35 (min) [24]

2.1.3. Stabilizatory

Peletyzowane włókna zostały dodane do asfaltu 60/70 w celu zmniejszenia spływności oraz dodatkowo, w celu poprawy parametrów związanych z charakterystyką użytkową. W opisanych badaniach wykorzystano dwa rodzaje włókien celulozowych: włókna typu 1 oraz włókna typu 2, których charakterystyki przedstawiono w Tabl. 3.

2.1.2. Bituminous binders

A stiffer grade modified binder was prepared using 60/70 grade bitumen commonly used for paving applications in India. The stiffer grade CRMBs were prepared using varying proportions of crumb rubber to modify 60/70 grade bituminous binder. The rubber particles are chipped into sizes between 150 micron and 300 microns from high quality worn out tires. Characteristics of the crumb rubber modified binders, SBS polymer modified binder PMB-40 and the 60/70 grade normal binders are also highlighted in Table 2. This is also to report that the manufactured CRMB was found to be stable against storage at temperature higher than 35°C. The difference in softening point values of the samples collected from different heights was less than 3°C. The results further indicate that all the test properties of the modified binder meet the Indian Standards specifications for modified binders [24].

2.1.3. Stabilizers

Pelletized fibers were added as stabilizers in SMA mixes prepared with 60/70 grade bitumen to prevent drain-down and further, to improve performance related properties. Two cellulose fibers namely Fiber 1 and Fiber 2 were used in this study, the typical properties of which are listed in Table 3.

2.2. PROJEKTOWANIE MIESZANEK

Mieszanki zaprojektowano stosując metodę Marshalla z zagęszczeniem próbek 50 uderzeniami ubijaka wg ASTM 1559 [25]. Asfalt dodawano do mieszanek w ilości 5,5%, 6%, 6,5% i 7% (m/m). W przypadku asfaltu niemodyfikowanego (60/70 z dodatkiem włókien celulozowych) założono otaczanie kruszywa lepiszczem w temp. 160°C i zagęszczanie w temp. 150°C. Mieszanki SMA z z lepiszczem PMB-40, CRMB-60, CRMB-70 i CRMB-80 przygotowywano w temp. 170°C i zagęszczano w temp. 150°C. Optymalną zawartość asfaltu określono dla zawartości wolnych przestrzeni na poziomie 4%. Odnotowano również zawartości poszczególnych lepiszczy, przy których możliwe było osiągnięcie wolnych przestrzeni na poziomie 4%, 5,9% w przypadku asfaltu niemodyfikowanego 60/70 (z dodatkiem włókien typu 1 i 2), 6% w przypadku CRMB-60, 6,1% w przypadku CRMB-70 i polimeroasfaltu PMB-40 oraz 6% w przypadku CRMB-80. Wysoką optymalną zawartość lepiszcza w przypadku CRMB-80 przypisać można wysokiej sztywności lepiszcza skutkującej większą grubością błonki lepiszcza i mniejszą podatnością mieszanki na starzenie. Uzyskane optymalne zawartości lepiszcza odpowiadające recepturowej zawartości wolnych przestrzeni w mieszance sprawdzono dla minimalnej zawartości wolnych przestrzeni w kruszywie mineralnym (min VMA=17%) w celu zapewnienia kontaktu między ziarnami szkieletu kruszywowego. Receptę i właściwości objętościowe mieszanek zestawiono w Tabl. 4.

3. OCENA WŁAŚCIWOŚCI TECHNICZNYCH MIESZANEK SMA

3.1. UWAGI OGÓLNE

Właściwości techniczne poszczególnych mieszanek SMA oceniono w warunkach laboratoryjnych przeprowadzając badania modułu sztywności, spływności lepiszcza, odporności na działanie wody, badanie dynamicznego pęcznienia oraz odporności na koleinowanie. Jako miarę odporności mieszanek na działanie wody przyjęto wartość wskaźnika wytrzymałości na rozciąganie pośrednie. Odporność poszczególnych mieszanek SMA na koleinowanie wyznaczono za pomocą koleinomierza oraz w badaniu dynamicznego pęcznienia. Przeprowadzono również porównanie właściwości technicznych mieszanek sporządzonych na bazie lepiszczy CRMB-60, CRMB-70, CRMB-80 z mieszankami na bazie polimeroasfaltu PMB-40 i asfaltu niemodyfikowanego 60/70 (z dodatkiem włókien typu 1 i 2).

Table 3. Physical properties of the fibers
Tablica 3. Właściwości fizyczne włókien

Properties Właściwości	Cellulose fibers Włókna celulozowe
Average fiber length [mm] Średnia długość włókna [mm]	6 (max)
Thickness / Grubość [mm]	0.045
Density / Gęstość [g/cm ³]	1.0
Moisture content / Wilgotność [%]	< 5
Ash content by weight [%] Zawartość popiołu [% m/m]	23
Cellulose content [%] Zawartość celulozy [%]	80±5

2.2. MIX DESIGN

Mixtures were designed by the 50-blow Marshall method as per ASTM 1559 [25]. Further, bituminous binder content of 5.5%, 6.0%, 6.5%, and 7.0% by weight were used in the mixture. The target mixing and compaction temperature adopted for unmodified binder (60/70 with cellulose fibers) were 160°C and 150°C, respectively. Furthermore, for SMA mixes using PMB-40, CRMB-60, CRMB-70 and CRMB-80, the mixing and compaction temperatures adopted were 170°C and 150°C, respectively. Besides this, optimum bitumen contents (OBCs) were based on 4% air voids level. It was also observed that the design air voids of 4% could be achieved when a binder content of 5.9% for 60/70 (with Fiber 1 and Fiber 2), 6% for CRMB-60, 6.1% for CRMB-70 and PMB-40 and 6% for CRMB-80 were adopted. In the case of CRMB-80, the optimum binder content was found to be high and this could be attributed to a high stiffness of binder that eventually yields a larger film thickness and reduced aging of the mix. The OBC obtained corresponding to designed air voids were checked for minimum (17%) voids in mineral aggregates (VMA) to ensure stone-to-stone contact in the SMA mixes. The summary of the mix design and the volumetric properties are given in Table 4.

3. PERFORMANCE EVALUATION OF SMA MIXES

3.1. GENERAL REMARKS

Performance of different SMA mixes were evaluated in the laboratory using various tests such as resilient modulus test, drain-down test, moisture induced damage evaluation, dynamic creep test and wheel tracking tests. The moisture susceptibility of mixes was further studied on the basis of indirect tensile strength ratio. The rutting potential of different SMA mixes was also determined using wheel

Table 4. Summary of SMA mixture properties using different binders

Tablica 4. Zestawienie właściwości mieszanek SMA w przypadku zastosowania różnych lepiszczy

tracking device and dynamic creep test. Also, SMA mixes were prepared with CRMB-60, CRMB-70, CRMB-80, and compared with the performance of SMA mixes prepared with PMB-40 and 60/70 grade asphalt (with Fiber 1 and Fiber 2).

Type of binder Rodzaj lepiszcza	Binder content [%] Zawartość lepiszcza	Density [g/cm ³] Gęstość	VCA Mix [%]	VCA DRC [%]	Air voids [%] Wolne przestrzenie	VMA [%]	Aggregate content [%] Zawartość kruszywa
CRMB-60	5.5	2.314	36.48	39.52	5.34	17.64	94.50
	6.0	2.331	35.60		3.99	17.47	94.00
	6.5	2.322	35.64		3.72	18.23	93.50
	7.0	2.311	36.10		3.57	19.07	93.00
CRMB-70	5.5	2.307	36.20	39.52	5.63	17.89	94.50
	6.0	2.327	35.74		4.16	17.61	94.00
	6.5	2.324	35.94		3.64	18.16	93.50
	7.0	2.309	36.14		3.64	19.13	93.00
CRMB-80	5.5	2.309	36.20	39.52	5.54	17.82	94.50
	6.0	2.316	35.74		4.61	18.00	94.00
	6.5	2.342	35.94		2.89	17.52	93.50
	7.0	2.329	36.14		2.81	18.43	93.00
PMB-40	5.5	2.312	36.04	39.52	5.40	17.78	94.50
	6.0	2.327	35.63		4.14	17.86	94.00
	6.5	2.343	35.18		2.83	17.47	93.50
	7.0	2.328	35.61		2.83	18.45	93.00
60/70 with Fiber 1 z włóknem 1	5.5	2.297	36.20	39.52	6.03	18.24	94.50
	6.0	2.335	35.74		3.85	17.35	94.00
	6.5	2.326	35.94		3.58	18.10	93.50
	7.0	2.316	36.14		3.34	18.87	93.00
60/70 with Fiber 2 z włóknem 2	5.5	2.303	36.20	39.52	5.79	18.03	94.50
	6.0	2.338	35.74		3.72	17.24	94.00
	6.5	2.324	35.94		3.66	18.17	93.50
	7.0	2.315	36.14		3.38	18.91	93.00

Note / Objasnienie:

VCA DRC – Voids in coarse aggregates in dry rodded condition / Zawartość wolnych przestrzeni w kruszywie grubym w stanie suchym, zagęszczonym ubijakiem, VCA Mix – Voids in coarse aggregates in the compacted mix / Zawartość wolnych przestrzeni w zagęszczonej mieszance kruszywa, VMA – Voids in mineral aggregate / Zawartość wolnych przestrzeni w kruszywie mineralnym

3.2. BADANIE MODUŁU SZTYWNOŚCI

Badanie modułu sztywności przeprowadzono przykładając zmienne obciążenie o przebiegu określonym funkcją haversin w jednej osi i mierząc odkształcenie w osi prostopadłej do osi obciążonej, zgodnie z procedurą badania opisaną w normie ASTM D 4123 - 82. W badaniu modułu sztywności do próbki przykładana się obciążenie wywołujące naprężenia na poziomie 5-20% wytrzymałości na rozciąganie pośrednie; przed przystąpieniem do badania mającego na celu wyznaczenie modułu sztywności niezbędne jest wyznaczenie wytrzymałości na rozciąganie. Badania modułu sztywności przeprowadzono na próbkach walcowych w temperaturach 25°C i 35°C. Wyniki badań przedstawiono na Rys. 1.

3.2. RESILIENT MODULUS TEST

This test was performed by applying haversine load pulses on one diametric axis and measuring the deformation on the perpendicular axis as per the test procedure laid down in ASTM D 4123 - 82. For the resilient modulus test, the specimen is normally loaded to a stress level between 5% to 20% of the indirect tensile strength. Thus prior to conducting the resilient modulus test, the tensile strength of the specimen was determined. Resilient modulus tests were carried out on the cylindrical specimens at 25°C and 35°C. The results are shown in Fig. 1.

3.3. BADANIE SPŁYWNOŚCI

Skuteczność poszczególnych stabilizatorów w ograniczeniu spływności lepiszcza wyznaczono w badaniu spływności wg NCAT [26]. Badania przeprowadzono na próbkach wykonanych z różnych mieszanek SMA przygotowanych na bazie asfaltu niemodyfikowanego 60/70 z dodatkiem włókien i polimeroasfaltu PMB-40 lub asfaltów modyfikowanych dodatkiem granulatu gumowego: CRMB-60, CRMB-70, CRMB-80. Zgodnie z procedurą badania próbki umieszczono w drucianym koszu, który ustawia się na płycie kartonowej o znanej masie. W Indiach temperaturę technologiczną układania mieszanek mineralno-asfaltowych przyjmuje się na poziomie 170°C i taką też przyjęto temperaturę badania. Próbkę, druciany kosz oraz płytki kartonowe umieszczono w piecu z wymuszonym obiegiem powietrza na 1 godzinę w temperaturze badania. Po godzinie z pieca wyjęto kosz z próbką oraz płytkę kartonową, którą następnie zważono w celu określenia ilości lepiszcza, które spłynęło z mieszanki. Na koniec, na podstawie masy mieszanki po badaniu obliczono procentowy wskaźnik spływności. Badania przeprowadzono na poszczególnych mieszankach SMA z optymalną zawartością asfaltu, dla której zawartość wolnych przestrzeni wynosi 4%. Badania przeprowadzono na trzech próbkach, a uzyskane wyniki przedstawiono na Rys. 2. W przypadku mieszanek SMA maksymalna wartość spływności dopuszczona przez IRC (Indian Roads Congress) [30] wynosi 0,3%.

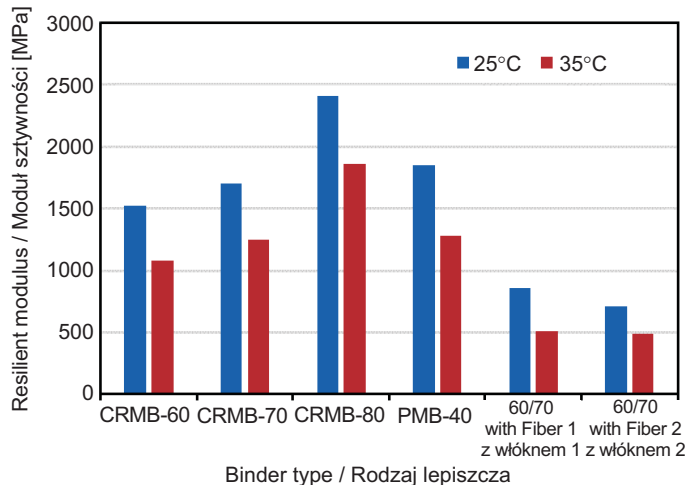


Fig. 1. Resilient modulus of SMA mixes with different binders
Rys. 1. Moduł sztywności mieszanek SMA z różnymi lepiszczami

3.4. BADANIE ODPORNOŚCI NA DZIAŁANIE WODY

Odporność analizowanych mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody ustalono na podstawie wyznaczonego doświadczalnie wskaźnika wytrzymałości na rozciąganie (TSR).

3.3. DRAIN DOWN TEST

The drain-down test developed by National Centre for Asphalt Technology (NCAT) was selected to determine the efficiency of stabilizers against drain-down of the binder and mineral filler [26]. Drain-down tests were carried out on different SMA mixtures prepared with 60/70 grade bitumen along with fibers, CRMB-60, CRMB-70, CRMB-80 and PMB-40. According to the test procedure, the sample is placed in a wire basket which is positioned on a pre-weighed paper plate. In India, a typical hot mix discharge temperature adopted is 170°C for paving mixes and thus the same temperature is adopted for this test also. The sample, the basket and the plates were placed in a forced air oven for 1 hour at a prescribed temperature. At the end of 1 hour, the basket containing the sample is removed from the oven along with the plate and the plate is weighed to determine the amount of drain-down that takes place. The final weight of the mixture is measured and the percentage of asphalt drained is calculated. The drain-down tests were carried out for SMA mixtures at an Optimum Bitumen Content (OBC) corresponding to 4% air voids. Further, three samples were tested for drain-down test and the results are presented in Fig. 2. Indian Roads Congress [30] specifies a maximum drain down value of 0.3% for SMA mixtures.

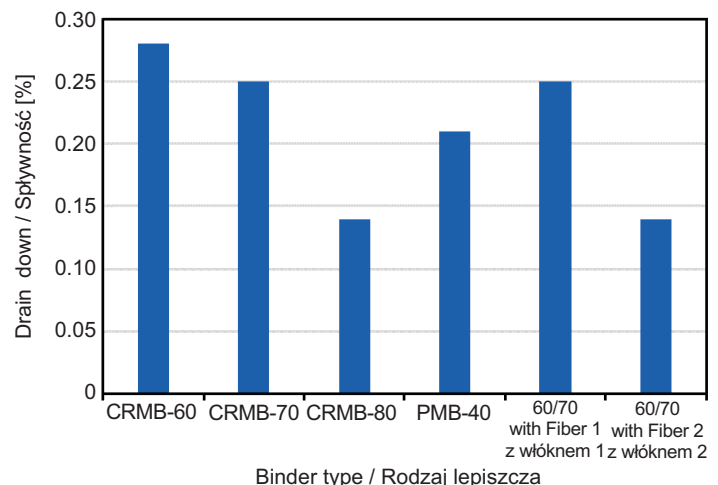


Fig. 2. Drain down of SMA mixes with different binders
Rys. 2. Spływność lepiszcza w mieszankach SMA w zależności od zastosowanego lepiszcza

3.4. EVALUATION OF RESISTANCE TO MOISTURE

Tensile Strength Ratio (TSR) is used to determine the moisture susceptibility of asphalt mixes in the study. Through this test, the impact of stagnant water due to

Określa się w ten sposób wpływ zastoisk wody powstających w wyniku nieprawidłowego odprowadzenia wód opadowych na stan nawierzchni, odmywanie lepiszcza z powierzchni kruszywa oraz przedwczesne zniszczenie nawierzchni [27]. Badania przeprowadzono zgodnie z procedurą badawczą wyznaczania wytrzymałości na rozciąganie pośrednie i wskaźnika wytrzymałości na rozciąganie pośrednie wg AASHTO T283-03 [28]. Dla każdego lepiszcza przygotowano standardowe, cylindryczne próbki Marshalla o średnicy 100,0 mm i wysokości 63,5 mm. Badanie przeprowadzono przykładając do próbek obciążenie ściskające w płaszczyźnie pionowej do osi próbki z prędkością 50,8 mm/min. Próbki kondycjonowano przez 2 godziny w temperaturze badania 25°C. Za wytrzymałość na rozciąganie pośrednie badanej mieszanki mineralno-asfaltowej (zwaną również wytrzymałością na rozciąganie pośrednie na próbkach z zestawu suchego) przyjmuje się wartość obciążenia, przy którym następuje zniszczenie próbki. Próbki poddano sezonowaniu umieszczając je w kąpielii wodnej o temp. 60°C na 24 godz. i przekładając bezpośrednio do komory klimatycznej w celu kondycjonowania w stałej temperaturze 25°C przez następne 2 godziny. Przygotowane w ten sposób próbki poddano badaniu wytrzymałości na pośrednie rozciąganie. Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie oznaczoną na nasączonych w ten sposób próbkach określa się terminem wytrzymałość na rozciąganie pośrednie na próbkach z zestawu mokrego. Dzielać wartości wytrzymałości wyznaczone na próbkach z zestawu suchego przez wytrzymałości próbek z zestawu mokrego otrzymuje się wskaźnik wytrzymałości na rozciąganie pośrednie badanej mieszanki mineralno-asfaltowej (TSR).

3.5. BADANIE PEŁZANIA DYNAMICZNEGO

Badanie jednoosiowego pełzania stanowi praktyczną metodę określania wrażliwości mieszanki mineralno-asfaltowej na trwałe odkształcenia lub powstawanie kolein. Badanie pełzania przeprowadza się zazwyczaj w temperaturze eksploatacyjnej przy obciążeniach wywołujących naprężenia występujące podczas eksploatacji. Stwierdzono wrażliwość wyników badania pełzania na zmienność parametrów mieszanki, takich jak gatunek i zawartość asfaltu, rodzaj kruszywa, zawartość wolnych przestrzeni, temperatura badania oraz stan naprężenia. Pomiar odkształceń trwałych przeprowadzono na próbkach Marshalla o średnicy 100 mm obciążonych osiowo bez skrępowania bocznego kolejno w temperaturze 40°C, 50°C i 60°C. Jako miarę dopuszczalnej wytrzymałości mieszanki na obciążenie w badaniu pełzania często przyjmuje się całkowite odkształcenie w momencie zniszczenia po okresie około 3600 s wpływu obciążenia. Badane mieszanki poddano więc 3600 cyklom obciążenia wywołującym naprężenia na pozi-

inadequate drainage system on the pavement surface, as well as stripping of asphalt film from aggregates and premature failure of flexible pavement is determined [27]. The test procedure adopted for indirect tensile and tensile strength ratio was as per AASHTO T283-03 [28]. The standard Marshall Specimens of 100 mm diameter and 63.5 mm height are prepared for each binder. The test is preformed by loading the Marshall sample with a compressive load, which act parallel to and along the vertical diametric-loading plane at a rate of 50.8 mm/minute. The test temperature is maintained at 25°C and the specimens are conditioned at 25°C for 2 hours prior to the test. The load at which the specimen fails is taken as the indirect tensile strength (also referred as the dry indirect tensile strength) of the bituminous mix. Few specimens are placed in the water bath maintained at 60°C for 24 hours and then immediately placed in the environmental chamber maintained at 25°C for two hours. These conditioned samples are then tested for Indirect Tensile Strength. The indirect tensile strength of these soaked samples are called wet indirect tensile strength. The ratio of the wet to dry indirect tensile strength is recorded as Tensile Strength Ratio (TSR) of the bituminous mix.

3.5. DYNAMIC CREEP TEST

The uniaxial creep test is effective in identifying the sensitivity of asphalt concrete mixtures to permanent deformation or rutting. The creep test is usually performed at a realistic testing temperature and at a stress level replicating field stress conditions. The creep test is found to be sensitive to mixture variables such as grade of binder, binder content, aggregate type, air void content, temperature of testing and testing stress state. UTM 14 was used for measuring the permanent deformation of 100 mm diameter unconfined Marshall specimens subjected to axial loading at a test temperature of 40°C, 50°C and 60°C respectively. The total strain at failure after a period of loading, of about 3,600 seconds is often used to define an acceptable mixture response in a creep test. Hence, the specimens were subjected to 3,600 load pulses of 100 kPa stress level (with 0.2 second loading and 1.8 second rest period) and the resulting permanent strain values were subsequently recorded.

3.6. WHEEL TRACKING TESTS

Similarly, a wheel tracking test was carried out on slab SMA specimens of 300×300×55 mm size. The test specimen held on a reciprocating table was subjected to a standard load of (520±5) N through the wheel. The motion of

mie 100 kPa (każdy cykl obejmował 0,2 s obciążenia i 1,8 s spoczynku), po których odnotowano wartości trwałych odkształceń.

3.6. BADANIA KOLEINOWANIA

Badanie koleinowania przeprowadzono na prostopadłościennych próbkach SMA o wymiarach 300×300×55 mm. Próbkę zamocowano na stole poruszającym się ruchem posuwisto-zwrotnym przykładając obciążenie o wartości 520±5 N za pomocą ustawionego na próbce koła pomiarowego. W trakcie badania stół poruszał się do przodu i do tyłu w jednej płaszczyźnie pod kołem pomiarowym. Środek powierzchni kontaktu z oponą przemieszczał się ruchem harmonicznym prostym w stosunku do środka próbki z częstotliwością równą 21±0,2 cykli obciążenia na minutę pokonując całkowitą odległość 230±5 mm. Analogicznie do poprzedniego, również w tym badaniu próbki były kondycjonowane w ustalonej temperaturze badania przez przynajmniej 2 godz. bezpośrednio przed badaniem. Przed rozpoczęciem badania sprawdzono, z dokładnością ± 0,1°C, czy próbka osiągnęła temperaturę badania. Badanie trwało 6 godzin aż do czasu, kiedy nastąpiło trwałe odkształcenie próbki o głębokości 10 mm.

4. WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Przedmiotem programu badań była ocena możliwości zastosowania lepszycy modyfikowanych dodatkiem granulatu gumowego o zwiększonej sztywności w produkcji mieszanek SMA, które zapewniłyby pożądaną charakterystykę pracy przy niskiej śływności lepszycza w warunkach dużego obciążenia ruchem. W ramach badania przygotowano szereg mieszanek zawierających różne lepszycza i poddano je zróżnicowanym badaniom w celu wyznaczenia ich charakterystyki użytkowej.

Otrzymane w wyniku badań wartości modułu sztywności poszczególnych mieszanek SMA przedstawiono na Rys. 1. Wyraźnie wyższą wartość modułu sztywności uzyskano w przypadku mieszanki SMA na bazie asfaltu modyfikowanego granulatem gumowym CRMB-80. Wynosiła ona około 2400 MPa. Tak wysokich wartości modułu sztywności oczekuje się zwykle w przypadku mieszanek betonu asfaltowego (o ciągłym uziarnieniu), a nie w przypadku badanych tutaj mieszanek o uziarnieniu nieciągłym. Przy tak wysokiej wartości modułu sztywności założyć można dużą wytrzymałość zmęczeniową mieszanki na bazie lepszycza CRMB-80 przy wielu cyklach obciążeniowych w długim horyzoncie czasowym.

Przedstawione na Rys. 2 wyniki badań śływności wskazują na spełnienie wymagań technicznych przez badane mieszanki SMA oparte na bazie asfaltu 60/70 (z dodatkiem dwóch

the table is to and fro in a fixed horizontal plane beneath the wheel. The centre of the contact area of the tyre undergoes a simple harmonic motion with respect to the top centre of the specimen at a frequency of (21±0.2) load cycles per minute and a total distance to travel of (230±5) mm. Also, the samples were conditioned at the predefined testing temperature for a minimum period of 2 hours prior to testing. Thus, before starting the test it was ensured that the specimen had attained the test temperature with a tolerance of ± 0.1°C. Subsequently, the test was conducted for a period of 6 hours or till the sample reached a deformation level of 10 mm, whichever occurs earlier.

4. RESULTS AND DISCUSSION

In this study, experiments were conducted to explore the possibility of using stiff crumb rubber modified binders for design of SMA mixes that could perform well and without significant drain down under heavy traffic conditions. Further, the mixtures were prepared with different binders and the performance of the mix is evaluated by conducting various tests.

Results from the resilient modulus testing of different SMA mixes are presented in Fig. 1. From the experiments it is quite clear that the modulus of SMA with CRMB-80 is significantly high when compared with other mixes. The experiments yield a resilient modulus value of approximately 2,400 MPa for SMA with CRMB-80 grade modified binder. Such high values of resilient modulus are usually expected in asphalt concrete and dense graded mixes, but are not prevalent in gap graded mixes. These high resilient modulus values imply that SMA mixes designed using CRMB-80 results in achieving long lasting pavements that do not get fatigued even after they are subjected to a large numbers of repetitions.

Similarly, from the drain-down test results shown in Fig. 2 indicate that the percentage of drain-down for SMA mixes with 60/70 bitumen (with two types of cellulose fibers) and with PMB-40, CRMB-60, CRMB-70 and CRMB-80 meet the required specifications. A loss of less than 0.2 % of the mix weight indicates that a binder drain down would not occur, however, losses of up to 0.3% are assumed still acceptable. It can further be seen that the test results meet the requirements of Indian Roads Congress [29] specifications for SMA mixtures.

Likewise, the indirect tensile strength values for controlled and conditioned samples, obtained using different binders with varying bitumen contents are highlighted in Table 5. The tensile strength ratio (TSR) is a ratio of conditioned strength over the control strength of the mix.

rodzajów włókien celulozowych), polimeroasfaltu PMB-40 oraz asfaltów modyfikowanych dodatkiem granulatu gumowego: CRMB-60, CRMB-70 i CRMB-80. Utrata masy na poziomie poniżej 0,2% przy dopuszczalnym poziomie do 0,3% oznacza, że nie występuje problem ze spływaniem lepiszcza. Na podstawie analizy wyników badań stwierdzić można również spełnienie wymagań technicznych określonych dla mieszanek SMA przez IRC [29].

A minimum TSR of 80% is generally assumed acceptable; however, a higher TSR ensures durability of the mix. The tested samples were found to have TSR more than 80%, indicating there was no significant reduction in the tensile strength due to moisture conditioning of samples. For SMA with CRMB-80, the TSR values achieved were more than 96%, indicating that the mix had a high resistance to moisture.

Table 5. Indirect tensile strength (ITS) and moisture inducing damages to SMA mixtures
Tablica 5. Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie (ITS) i odporność mieszanek SMA na działanie wody

Type of binder Rodzaj lepiszcza	Binder content [%] Zawartość lepiszcza	ITS [MPa] (dry / próbka sucha)	ITS [MPa] (soaked / próbka mokra)	TSR [%]
CRMB-60	5.5	1.19	1.07	90.4
	6.0	1.12	1.02	91.6
	6.5	1.04	0.95	91.8
	7.0	1.01	0.94	92.4
CRMB-70	5.5	1.36	1.26	91.9
	6.0	1.33	1.23	92.3
	6.5	1.07	0.99	93.0
	7.0	0.76	0.72	94.7
CRMB-80	5.5	1.74	1.66	95.7
	6.0	1.60	1.53	96.0
	6.5	1.59	1.54	96.9
	7.0	1.56	1.50	96.3
PMB-40	5.5	1.46	1.38	94.5
	6.0	1.38	1.31	95.4
	6.5	1.31	1.26	95.9
	7.0	1.27	1.21	95.8
60/70 with Fiber 1 z włóknem 1	5.5	0.72	0.60	83.9
	6.0	0.59	0.50	84.8
	6.5	0.51	0.43	85.7
	7.0	0.44	0.38	86.1
60/70 with Fiber 2 z włóknem 2	5.5	0.79	0.69	86.6
	6.0	0.74	0.65	87.5
	6.5	0.67	0.60	88.9
	7.0	0.62	0.55	89.0

W Tabl. 5 podano wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie pośrednie kontrolnych i sezonowanych próbek wykonanych z mieszanek na bazie różnych lepiszczy dozowanych w różnych proporcjach. Dzieląc wartości wytrzymałości próbek sezonowanych przez wytrzymałości próbek kontrolnych otrzymujemy wskaźnik wytrzymałości na rozciąganie badanej mieszanki (TSR). Jako dopuszczalną wartość wskaźnika TSR przyjmuje się 80% z korzystnym wpływem na trwałość mieszanki powyżej tej wartości. Uzyskane wartości TSR wypadają powyżej 80% wskazując na brak istotnego negatywnego wpływu sezonowania w wodzie na wytrzymałość na

Further, the accumulated strain values (%) of the specimens were recorded at temperatures of 40°C, 50°C, and 60°C, respectively at the end of 3,600 cycles using different binders while conducting the dynamic creep test. The details of the obtained permanent strains are given in Fig. 3. The accumulated strains observed in CRMB-80, CRMB-70, CRMB-60 and PMB-40 mixes at 7% binder content and at a temperature of 40°C were found to be lower than those observed with 5.5%, 6%, and 6.5% binder content at the same temperature. A similar trend was also observed at a temperature of 50°C, however,

rozciąganie badanych próbek. Wartości TSR na poziomie przekraczającym 96%, które uzyskano w przypadku próbek pobranych z mieszanki na bazie lepiszcza CRMB-80 oznaczają wysoką jej odporność na działanie wody.

Podczas przeprowadzania badania dynamicznego pełzania zmierzono również skumulowane odkształcenia (%) po 3600 cyklach obciążenia w temperaturach 40°C, 50°C i 60°C dla mieszanek na bazie poszczególnych lepiszczy. Dane dot. odnotowanych trwałych odkształceń podano na Rys. 3. Mieszanki na bazie asfaltów modyfikowanych CRMB-80, CRMB-70, CRMB-60 i PMB-40 charakteryzowały się niższym poziomem skumulowanych obciążeń w temperaturze badania 40°C w przypadku zawartości asfaltu 7% w porównaniu do mieszanek o zawartości asfaltu 5,5%, 6% i 6,5%. Podobną prawidłowość odnotowano w badaniu w temp. 50°C. Natomiast w temperaturze 60°C wartości skumulowanych naprężeń były wyższe w przypadku mieszanki o zawartości lepiszcza 7% (w porównaniu do mieszanek zawierających 5,5%, 6% i 6,5% lepiszcza). Można stąd wysnuć wniosek, że przy wyższych temperaturach (60°C) celowe będzie dążenie do niższej zawartości lepiszcza, jednak bez zmniejszania grubości błonki. W przypadku nawierzchni długowiecznych dąży się do uzyskania skumulowanych obciążeń na poziomie poniżej 1% i takie wartości osiągają badane mieszanki wykonane na bazie lepiszczy o większym module sztywności, takie jak CRMB-80, nawet w wysokich temperaturach, np. 60°C. Ponieważ tak wysokie temperatury utrzymują się w Indiach przez krótki czas, tj. przez 6-8 godz. dziennie w okresie od 2 do 4 miesięcy w porze letniej, również lepiszcza o mniejszej sztywności niż CRMB-80, tj. CRMB-70, CRMB-60 i PMB-40 można z powodzeniem stosować w produkcji mieszanek SMA.

Wyniki badań odporności na odkształcenia trwałe w temperaturze 60°C przy użyciu koleinomierza przestawiono na Rys. 4. Najmniejsze nachylenie krzywej pełzania otrzymano w przypadku mieszanki SMA CRMB-80 a największe w przypadku mieszanki SMA 60/70 z włóknami typu 2. Najmniejszą głębokość koleiny po 20000 cyklach obciążenia, wynoszącą 4,5 mm, uzyskano na próbkach z mieszanek na bazie lepiszcza CRMB-80, co można przypisać jego wysokiej temperaturze mięknięcia. W przypadku mieszanek na bazie asfaltu 60/70 z dodatkiem włókien typu 2, głębokość koleiny po 10000 cyklach obciążenia wyniosła 10 mm, co może wynikać z mniejszej wartości modułu sztywności tego lepiszcza. W próbkach wykonanych z mieszanek na bazie lepiszczy CRMB-60, CRMB-70 i PMB-40 głębokości kolein po 20000 cyklach obciążenia wyniosły odpowiednio: 6,63 mm, 5,71 mm i 6,15 mm. Na tej podstawie jako lepiszcze zapewniające trwałość użytkową SMA wskazano asfalt modyfikowany

at 60°C it was observed that the accumulated strain values were higher for a 7% binder content compared to those at 5.5%, 6% and 6.5% binder content. From this it can be inferred that at a higher temperature (60°C) it is desirable to go in for lower binder content without compromising on the thickness of the film. Accumulated strains of less than 1% are preferred for long lasting pavements and thus it can be concluded from the study that for a stiffer grade modified binder like CRMB-80, the accumulated strain would be lesser even at higher temperature, like 60°C. Since these high temperatures are expected to last for a short period of 6 to 8 hours in a day during the 2 to 4 months of summers in India, even modified binders such as CRMB-70, CRMB-60 and PMB-40, which are less stiff compared to CRMB-80 could be effectively used to design SMA.

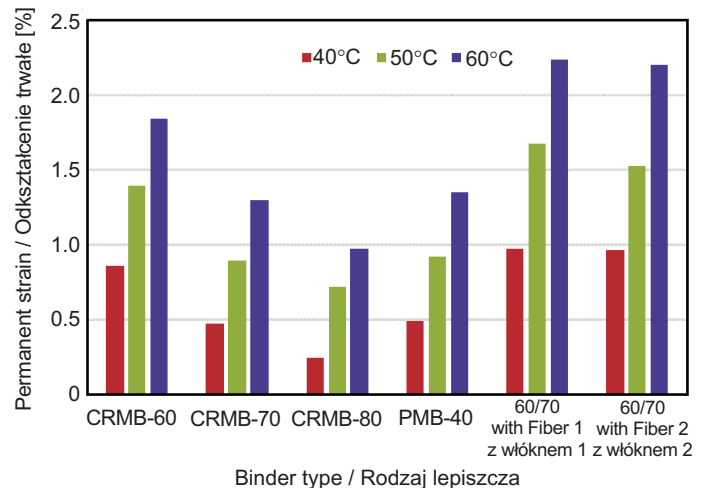


Fig. 3. Permanent strain of SMA mixes with different binders
Rys. 3. Odształcenie trwałe mieszanek SMA w przypadku zastosowania różnych lepiszczy

Furthermore, the results of the wheel tracking tests carried out to determine resistance against permanent deformation using different mixes at temperature of 60°C are presented in Fig. 4. Amongst all the SMA mixes, the creep slope of SMA CRMB-80 is found to be the least while a maximum slope is observed for SMA 60/70 mixes with Fiber 2. The rut depth obtained after 20,000 cycles for CRMB-80 mixes was found to be the least at 4.5 mm and this could be attributed to a high softening point of CRMB-80. In the case of 60/70 mixes with Fiber 2, a rut depth of 10 mm was reached in about 10,000 repetitions which is possibly due to a lesser stiffness value of the 60/70 bitumen. In case of CRMB-60, CRMB-70 and PMB-40 the rut depths obtained were 6.63 mm, 5.71 mm, and 6.15 mm respectively after 20,000 repetitions. Thus,

dotądkiem granulatu gumowego typu CRMB-80 ze względu na odpowiednie odprężenie zapobiegające rozwojowi odkształceń trwałych również w przypadku znacznych wahań temperatur w warunkach eksploatacyjnych oraz możliwość uniknięcia konieczności dodawania drogich włókien.

5. WNIOSKI

Opisane powyżej wyniki badań pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- 1) Mieszanki SMA na bazie lepiszczy CRMB i PMB charakteryzują się sływnością nie przekraczającą dopuszczalnych wartości. W związku z powyższym nie jest konieczne dodawanie włókien celulozowych i można tym samym uniknąć dodatkowych kosztów.
- 2) W przypadku mieszanki na bazie lepiszcza CRMB-80 wartości modułu sztywności wynoszą 2400 MPa i są wyższe niż zwykle obserwowane w mieszankach o nieciągłym uziarnieniu. Z tego względu mieszanki SMA na bazie lepiszcza CRMB-80 mogą znaleźć zastosowanie w projektowaniu nawierzchni długowiecznych, które nie ulegają spękanom zmęczeniowym po bardzo dużej liczbie cykli obciążeniowych.
- 3) Wartości wskaźnika wytrzymałości na rozciąganie (TSR) mieszanek przygotowanych na bazie asfaltów modyfikowanych przekraczają 90%, osiągając w przypadku CRMB-80 wartość 96% świadcząca o najlepszej odporności tych mieszanek na działanie wody.
- 4) Ze względu na bardzo niskie wartości skumulowanych odkształceń, również w wysokich temperaturach na poziomie 60°C, lepiszcze CRMB-80 można polecić do projektowania mieszanek o wysokiej odporności na powstawanie kolein.
- 5) W przypadku mieszanki z lepiszczem CRMB-80 głębokość koleiny po 20000 cyklach obciążenia w badaniu koleinowania wyniosła 4,5 mm.

Podsumowując należy zwrócić uwagę na możliwość uniknięcia konieczności dodawania drogich włókien celulozowych dzięki zastosowaniu w mieszance SMA porównywalnych kosztowo, sztywniejszych lepiszczy modyfikowanych dodatkiem granulatu gumowego ze zużytych opon, takich jak CRMB-70 lub CRMB-80.

INFORMACJE DODATKOWE

Autorzy składają podziękowanie Dyrektorowi Centralnego Instytutu Badawczego Dróg (CRRI) w New Delhi za uzyskane wsparcie podczas realizacji badań opisanych w artykule.

SMA designed using CRMB-80 is recommended for designing durable SMA mixes because there is sufficient recovery of deformation even when there is considerable variation in the temperature in the field and one can avoid the use of expensive fibers.

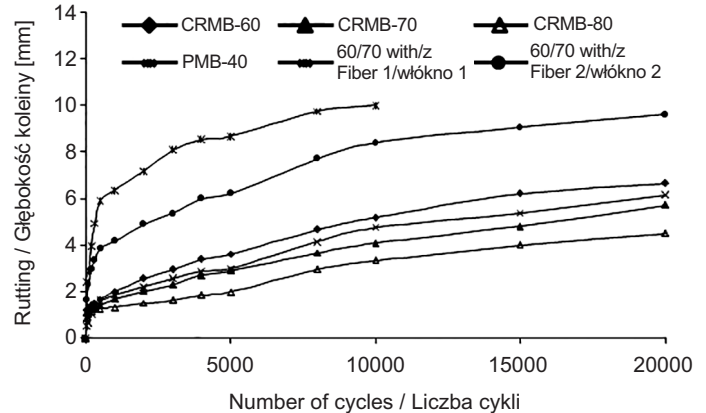


Fig. 4. Test results of wheel tracking of SMA mixes with different binders

Rys. 4. Wyniki badań koleinowania mieszanek SMA w przypadku zastosowania różnych lepiszczy

5. CONCLUSIONS

Basing on the test results, the following conclusions can be drawn:

- 1) SMA mixes with CRMB and PMB are characterized by drain down values which are within the permissible limits. Further, the use of any cellulose fiber at an additional cost would not be essential.
- 2) Resilient modulus values are in the range of 2,400 MPa for SMA with CRMB-80 grade modified binder and such a high resilient modulus value is usually not observed in gap graded mixes. On account of this, it may be concluded that SMA mixes designed using CRMB-80 would yield a long lasting pavement which would not fail due to fatigue, especially after a large numbers of load repetitions.
- 3) Tensile strength ratios (TSR) of the mixes prepared with modified binders are found to be more than 90% and the highest value observed for CRMB-80 was 96%, thereby indicating a better resistance to moisture.
- 4) CRMB-80 results in a very low accumulated strain even at high temperature of 60°C and thus can be recommended for designing rut resistant durable mixes.
- 5) From the wheel tracking test, it was observed that SMA prepared using CRMB-80 results in a rut depth of 4.5 mm after 20,000 cycles.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Bellin P.*: Use of Stone Matrix Asphalt in Germany - State of the Art. Report Prepared for A2F02 Committee 71st Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1992
- [2] *Stuart K.D.*: Stone Matrix Asphalt (SMA) Mixture Design. Report No. FHWA-RD-92-006, Federal Highway administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., 1992
- [3] *Mogawer W.S., Stuart K.D.*: Evaluation of Stone Matrix Asphalt versus Dense-Graded Mixtures. Transportation Research Record, 1454, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1994, 58-65
- [4] *Brown E.R.*: Evaluation of Stone Matrix Asphalt Used in Michigan in 1991. Transportation Research Record. 1427, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1993, 54-60
- [5] *Reinke G.*: Laboratory Investigation into the Impact of Polymer Type, Polymer Concentration, and Aggregate Gradation on the Properties of Stone Matrix Mixes. Electronic Journal of Association of Asphalt Paving Technologies, **62**, 1993, 314-343
- [6] *Davidson J.K., Kennepohl G.J.*: Introduction to Stone Matrix Asphalt in Ontario. Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists, Charleston, SC, 1992, Association of Asphalt Paving Technologists, Charleston, SC, 517-534
- [7] *Brown E.R.*: Experience with Stone Matrix Asphalt in the United States. NCAT Report No. 93, National Centre for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, AL, 1992
- [8] *Tung-Wen H., Jeng-Thoa L.*: Evaluation of Permanent Deformation of Stone Matrix Asphalt Mixtures. Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 11-15, 1998, National Research Council, Washington, D.C.
- [9] *Brown E.R., Mallick R.B., Haddock J.E., Bukowski J.*: Performance of Stone Matrix Asphalt (SMA) Mixtures in the United States. Electronic Journal of Association of Asphalt Paving Technologies, **66**, 1997, 426-457
- [10] *Brown E.R., Mallick R.B., Haddock J.E., Bukowski J.*: Development of a Mixture Design Procedure for Stone Matrix Asphalt. Electronic Journal of Association of Asphalt Paving Technologies, **66**, 1997, 1-32
- [11] *Karnemaat R.J., Vreibel D.J., Van Deusen C.H.*: Stone Matrix Asphalt: Introduction of Loose Cellulose Fibers into Drum Mix Plant. TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1993
- Finally, the study suggests that stiffer grade crumb rubber modified binders such as CRMB-70 and CRMB-80 can be used in the design as use of waste rubber tyres for durable SMA mixes will be economically comparable to expensive cellulose fibers for manufacturing SMA.
- ACKNOWLEDGEMENT**
- The authors gratefully acknowledge the Director CRRRI in New Delhi for his unstinted support during the studies described in the paper.
- [12] *Stuart K.D., Malmquist P.*: Evaluation of Using Different Stabilizers in the U.S. Route 15 (Maryland) Stone Matrix Asphalt (SMA). Transportation Research Record, 1454, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1994, 48-57
- [13] *Harris B.M., Stuart K.D.*: Analysis of Using Mineral Fillers and Mastics Used in Stone Matrix Asphalt. Electronic Journal of Association of Asphalt Paving Technologies, **64**, 1995, 54-95
- [14] *Putman B.J., Amirkhanian S.N.*: Utilization of Waste Fibers in Stone Matrix Asphalt Mixtures. Resources Conservation and Recycling, **42**, 2004, 265-274
- [15] *Tayfur S., Ozen H., Aksoy A.*: Investigation of Rutting Performance of Asphalt Mixture Containing Polymer Modifiers. Construction and Building Materials, **21**, 2007, 328-337
- [16] *Sharma V., Goyal S.*: Comparative Study of Performance of Natural Fibers and Crumb Rubber Modified Stone Matrix Asphalt Mixtures. Canadian Journal of Civil Engineering, **33**, 2, 2006, 134-139
- [17] *Roberts. F.L., Kandhal P.S., Brown E.R., Lee D.Y., Kennedy T.W.*: Hot Mix Asphalt Materials Mixture Design and Construction. NAPA Research and Education Foundation, Lanham, MD, 1996
- [18] *Decoene Y.*: Contribution of Cellulose Fibers to the Performance of Porous Asphalts. Transportation Research Record, 1265, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., **82**, 1990, 82-86
- [19] *Chen J.S., Kueiyi L.*: Mechanism and Behavior of Bitumen Strength Reinforcement Using Fibers. Journal of Material Science, **40**, 1, 2005, 87-95
- [20] *Shaopeng W., Zheng C., Qunshan Y., Weidong L.*: Effects of Fibre Additive on the High Temperature Property of Asphalt Binder. Journal of Material Science, **21**, 1, 2006, 28-31
- [21] *Muniandy R., Bujang B.K.H.*: Laboratory Diametral Fatigue Performance of Stone Matrix Asphalt with Cellulose Oil Palm Fiber. American Journal of Applied Sciences, **3**, 9, 2006, 2005-2010

- [22] *Muniandy R., Selim A.A., Hassim S., Omar H.*: Laboratory Evaluation of Ground Tire Rubber in Stone Mastic Asphalt. *The Journal of Engineering Research*, 1, 2004, 53-58
- [23] *Specifications of Road and Bridge Works*, the 4th revision. Ministry of Road Transport and Highways, Indian Roads Congress, New Delhi, India, 2001
- [24] IS 15462:2004 Polymer and Rubber Modified Bitumen – Specifications, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India
- [25] ASTM 1559:1989 Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus, Annual Book of ASTM Standards, 04.03, ASTM International, West Conshohocken, PA
- [26] *Designing and Constructing SMA Mixtures-State of the Practice*, Quality Improvement Series (QIS), 122, National Asphalt Pavement Association (NAPA), Lanham, MD, 1999
- [27] *Sikdar P.K., Jain S.S., Bose S., Kumar P.*: Premature Cracking of Flexible Pavements. *Journal of Indian Roads Congress*, **60**, 3, 1999, 355-398
- [28] AASHTO T283 Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage, AASHTO, 2003
- [29] IRC: SP: 79, 2008 Tentative Specifications for Stone Matrix Asphalt. Indian Roads Congress, New Delhi, India
- [30] IRC: SP: 53, 2010 Guidelines on Use of Modified Bitumen in Road Construction. Indian Roads Congress, New Delhi, India