

ПРОЕКТУВАННЯ ТА ОЦІНКА ШЕБЕНЕВО-МАСТИКОВОГО АСФАЛЬТОБЕТОНУ З ВИКОРИСТАННЯМ БІТУМУ, МОДИФІКОВАНОГО БІЛЬШ ЖОРСТКИМ СОРТОМ ГУМОВОЇ КРИХТИ

Анотація. Щебенево-мастиковий асфальтобетон (ЩМА) використовується в першу чергу як матеріал поверхневого шару, оскільки виявилось, що він є ефективним при інтенсивних умовах руху, і в той же час є більш економічним у порівнянні зі звичайними щільними сумішами. У цьому дослідженні була зроблена спроба включити бітум, модифікований більш жорстким сортом гумової крихти (CRMB) для проектування ЩМА. Було проведено широкі лабораторні дослідження сумішей, приготованих з різними модифікованими в'язучими та нормальними в'язучими (з волокнами). Отримані результати вказують на те, що ЩМА, розроблений з використанням CRMB-70 та CRMB-80, показав ефективні результати в інтенсивних умовах руху та в той же час без істотного збитку. Крім того, виявлено, що CRMB-80 є придатним при високих температурах, оскільки він дає дуже низьку накопичену деформацію, і тому рекомендується для проектування стійких до колієутворення довговічних сумішей. Крім того, CRMB-80 дає найменшу глибину колії 4,5 мм навіть після 20000 повторень навантаження.

Ключові слова: бітум, модифікований гумовою крихтою (CRMB), волокно, експлуатаційні характеристики, щебенево-мастиковий асфальтобетон (ЩМА)

1. ВСТУП

Для сталого розвитку дорожньої інфраструктури необхідно забезпечити її асфальтобетонним покриттям, стійким до колієутворення, втоми, термічних тріщин, з меншим обсягом робіт з утримання та тривалішим терміном експлуатації. Колієутворення на поверхневому шарі асфальтобетонних покриттів, підданих впливу інтенсивного транспортного навантаження та високої температури, є найпоширенішими видами руйнування. З останніх двох десятиліть багато країн прийняли технологію щебенево-мастикового асфальтобетону (ЩМА), яка забезпечує стійкість проти шипованих шин, а також колієутворення [1-5]. Дослідження, проведені в Європі та США, свідчать про те, що суміші ЩМА ефективніші для дорожнього покриття з інтенсивним транспортним навантаженням і, крім того, виявилися більш економічно ефективними порівняно зі звичайними щільними сумішами [6-8].

ЩМА містить двокомпонентну гарячу асфальтобетонну суміш, яка складається з каркасу крупнозернистого мінерального матеріалу з переривчастим гранулометричним складом та розчину з високим вмістом в'язучого. Каркас крупнозернистого мінерального матеріалу з одного боку зміцнює суміш завдяки контакту каменя з каменем, а з іншого, підвищує міцність суміші завдяки високому вмісту бітуму [9, 10]. Порожнини каркасу

крупнозернистого мінерального матеріалу в ЩМА заповнені розчином з великою кількістю в'язучого, що містить дрібнозернистий мінеральний матеріал, мінеральний порошок, бітумне в'язуче та стабілізуючу добавку. Завдяки високому вмісту бітумного в'язучого (порядку 6%) у сумішах ЩМА, в'язуче має тенденцію до дренажу мінерального матеріалу та осідання на дно під час зберігання та перевезення; явище, відоме як «стікання суміші» (“mix drain-down”). В результаті цього ефективність ЩМА може бути істотно змінена через найменші зміни вмісту бітумних в'язучих. Однак ефект «стікання» може бути мінімізований за рахунок використання в суміші комбінації більше дрібних (мінерального порошку) та стабілізуючих агентів. Brown et al. [9] припускають, що найбільш істотна проблема, пов'язана з ЩМА покриттям, - через жирові плями. Ці плями можуть виникнути через розшарування, стікання, високий вміст бітумних в'язучих та використання неправильного виду, а також кількості стабілізуючої добавки. Національний центр технологій асфальтобетону (NCAT), що оцінює ефективність ЩМА покриттів, передбачає, що вміст бітуму із вмістом повітряних порожнин 4% забезпечує захист від жирових плям та подальшого колієутворення, особливо в теплих кліматичних умовах.

Переривчастий гранулометричний склад ЩМА дозволяє в'язучому та пилу мінерального матеріалу стікати, коли суміш гаряча під час зберігання, переміщення та укладання, і для запобігання цього стікання використовують стабілізуючі добавки [11-13]. Різні стабілізатори можуть мати різний оптимальний вміст в'язучого для даної суміші при рівних проектних повітряних порожнинах. Це вказує на те, що стабілізатори можуть впливати на ущільнення суміші. Якщо стабілізатор надмірно жорстко зв'язує до точки, де ЩМА важче ущільнюється, суміші може знадобитися більше бітуму для досягнення цільового рівня повітряних порожнин що може в подальшому знизити ступінь контакту між крупнозернистим мінеральним матеріалом [12]. Таким чином, додавання стабілізаторів повинно зменшити стікання без зниження ефективності суміші. Для жорсткості суміші при високих температурах використовували такі добавки, як волокна, мінеральні порошки, гуму та полімери, однак серед них волокна виявились найбільш ефективними у запобіганні стіканню.

Аналогічно, різні модифікатори волокон, такі як целюлозне волокно, поліефірне волокно та мінеральні волокна широко використовуються в ЩМА. Огляд літератури показує, що полімери як модифікатори волокон не рідко використовуються в ЩМА [14-16]. Система в'язучих ЩМА зміцнюється за рахунок використання волокон, які ефективно підвищують в'язкість системи, забезпечуючи тим самим більш високу стабільність і стійкість до втомного розтріскування асфальтобетонних сумішей. Це забезпечує більш високу стабільність та більшу стійкість до втомного розтріскування асфальтобетонної суміші [16-18]. Chen та Kueiyi [19] досліджували вплив целюлози, кам'яної вати та поліефірних волокон на інженерні властивості асфальтобетону та встановили, що хороша адгезія між волокнами та бітумом підвищує несучу здатність волокон волоконо-мастикового асфальтобетону. Shaopeng та ін. [20] також повідомили, що стійкість до втоми сумішей ЩМА можна покращити, використовуючи деякі

целюлозні волокна. Muniandy та Vujang [21] провели випробування реометру динамічного зсуву для вивчення реологічних властивостей асфальтобетону з різними волокнами. Їх результати свідчать про те, що опір колієутворенню асфальтобетону з волокнами можна покращити в значній мірі.

Целюлозні волокна не виробляються в Індії, а зазвичай їх імпортують, тим самим збільшуючи витрати на будівництво надмірно. Альтернативно, замість цього можуть використовуватися модифіковані більш жорсткі в'язучі, що забезпечують більш високу стабільність та більшу стійкість до колієутворення. Аналогічно, гумова крихта, отримана із подрібнених шин, широко використовується як модифікатор бітуму для зменшення будівельних витрат та енерговитрат, замість того, щоб використовувати дорогі полімери, такі як стирол-бутадієновий стирол (SBS) та стирольну бутадієнову гуму (SBR). Багато дослідників припускають, що додавання гумової крихти до бітуму покращує його еластичну функцію і зменшує вплив старіння. Величезна кількість зношених шин, що утворюється внаслідок збільшення виробництва автомобілів в країні, стає загрозою для навколишнього середовища. Muniandy та ін. [22] припускають, що існує великий потенціал, для створення ЩМА з подрібненої гуми від шин (до 4%) разом із 0,3% целюлозного волокна пальмового масла. Більш висока вартість, пов'язана з целюлозними волокнами та необхідністю повторного використання зношених шин, потребувала вивчення можливості використання більш жорсткого класу CRMB (Бітум, модифікований гумою крихти (наприклад, CRMB-70, CRMB-80)). Ефективність цих сумішей далі порівнюють із сумішами ЩМА, приготованими з використанням бітуму РМВ 40 та 60/70 (змішані різні види целюлозних волокон).

2. ПІДБІР СУМІШЕЙ

2.1. МАТЕРІАЛИ

2.1.1. Мінеральні матеріали

Для оцінки придатності мінеральних матеріалів, зібраних з місцевого кар'єру неподалік від Нью-Делі для використання в ЩМА в попередньому дослідженні, було проведено перевірку їх фізичних властивостей та гранулометричний склад. Дрібний мінеральний матеріал складається з кам'яного пилу. Результати, наведені в Таблиці 1, показують, що мінеральний матеріал відповідає вимогам для асфальтобетонних сумішей із переривчастим гранулометричним складом, встановленим Міністерством автомобільного транспорту та автомобільних доріг (MoRTH) в Індії [23].

Таблиця 1. Властивості мінерального матеріалу та його гранулометричний склад

Розмір сита [мм]	Прийнятий гранулометричний склад [% прохідність]	Специфікація IRC [% прохідність]
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
Фізичні властивості заповнювачів		
Опис випробування	Результати	Специфікація
Комбінований показник шаруватості і подовження [%]	24	30
Питома вага [-]	2.640	2.50-3.00
Водопоглинання	0.30	2.0 (max)
Значення впливу [%]	14.5	30 (max)
Величина абразивного зносу за методом Лос-Анджелеса [%]	21.3	30 (max)

2.1.2. Бітумні в'язучі

Для приготування більш жорсткого модифікованого в'язучого використовувався бітум 60/70, що зазвичай застосовується в Індії для укладання. Для модифікації бітумного в'язучого марки 60/70, що містить бітумну крихту, були отримані бітуми більш жорсткого якості з використанням варіаційних пропорцій гумової крихти. Гумові частки подрібнюються в розмірах від 150 мікрон до 300 мікрон з високоякісних зношених шин. Характеристики в'язучих, модифікованих гумовою крихтою, в'язучого РМВ-40, модифікованого полімером SBS, і нормальних в'язучих класу 60/70 також наведені в Таблиці 2. Це також свідчить про те, що виготовлений CRMB було визнано стійким до зберігання при температурі вище + 35 ° С. Різниця в значеннях температури розм'якшення зразків, зібраних з різної висоти, склала менше 3 ° С. Результати також вказують на те, що всі випробувальні властивості модифікованого в'язучого відповідають специфікаціям індійських стандартів для модифікованих в'язучих [24].

Таблиця 2. Фізичні властивості застосованих в'язучих

Властивість	В'язуче					IRC рекомендації [30] (темп. > 35°C)
	РМВ-40	CRMB - 60	CRMB - 70	CRMB - 80	60/70	
Пенетрація при 25°C (0.1 мм, 100 г, 5 сек.) [-]	36	38	23	17	68	30-50
Температура розм'якшення (кільце і куля) [°C]	65	66.2	72.7	83.4	48.3	60
Точка спалаху, по СОС [°C]	298	264	279	296	245	220 (мін)
В'язкість при 150°C [10^{-1} Па · с]	5.6	4.3	5.7	8.4	–	5-9
Питома вага [-]	1.01	1.0	1.0	1.0	1.0	0.97 - 1.02
Пружне відновлення (при 15 ° С)	78	56	48	39	18	50 (мін)
Випробування в тонкоплівковій печі (TFOT) на залишок						

Втрата в масі [%]	0.21	0.32	0.27	0.24	0.48	1.0 (макс)
Підвищення температури розм'якшення [°C]	4	4	3	2	–	5 (макс)
Зниження penetрації залишку, при 25°C [%]	19.4	36	24	16	–	35 (макс)
Пружне відновлення папіврिзьблення в дуктілометрі при 25°C [%]	74	42	33	24	–	35 (мін) [24]

2.1.3. Стабілізатори

Гранульовані волокна були додані в якості стабілізаторів до суміші ЦМА, приготовані з бітумом класу 60/70 для запобігання стіканню і надалі для поліпшення властивостей, пов'язаних з експлуатаційними характеристиками. В даному дослідженні використовувалися два целюлозних волокна - Волокно 1 і Волокно 2, типові властивості яких наведені в Таблиці 3.

Таблиця 3. Фізичні властивості волокон

Властивості	Целюлозні волокна
Середня довжина волокна [мм]	6 (макс.)
Товщина [мм]	0.045
Щільність [г / см ³]	1.0
Вміст води [%]	< 5
Вміст золи по масі [%]	23
Вміст целюлози [%]	80±5

2.2. ПІДБІР СУМІШІ

Суміші були підібрані за методом Маршалла 50 ударів відповідно до ASTM +1559 [25]. Далі в суміші використовували бітумне в'язуче з вмістом 5.5%, 6.0%, 6.5% і 7.0% за масою. Цільова температура змішування і ущільнення, обрана для немодифікованого в'язучого (60/70 з целюлозними волокнами), становила 160 ° C і 150 ° C відповідно. Крім того, для сумішей ЦМА з використанням РМВ-40, СРМВ-60, СРМВ-70 і СРМВ-80 прийняті температури змішування і ущільнення становили 170 ° C і 150 ° C відповідно. Крім того, оптимальний вміст бітуму (ОВС) ґрунтувався на 4% рівні повітряних порожнин. Також було встановлено, що розрахункові повітряні порожнини 4% можуть бути досягнуті при вмісті в'язучого 5,9% для 60/70 (з волокном 1 і волокном 2), 6% для СРМВ-60, 6,1% для СРМВ-70 і РМВ -40 і 6% для СРМВ-70 і РМВ-40 і 6% для СРМВ-70 і РМВ-40 для СРМВ-80. У випадку з СРМВ-80 оптимальний вміст в'язучого виявився високим, що можна пояснити високою жорсткістю в'язучого, яке в кінцевому підсумку дає більшу товщину плівки і скорочує старіння суміші. Отримані ОВС, відповідні проектним повітряним порожнинам, були перевірені на наявність мінімальних (17%) порожнин в мінеральних заповнювачах (VMA) для забезпечення прямого контакту каменю з каменем в мінеральних сумішах ЦМА. Сумарна маса суміші і об'ємні властивості

приведені в Табл. 4.

3. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СУМІШЕЙ ЦМА

3.1. ЗАГАЛЬНІ ЗАУВАЖЕННЯ

Експлуатаційні характеристики різних сумішей ЦМА оцінювалися в лабораторії за допомогою різних тестів, таких як випробування на модуль пружності, випробування на стікання, оцінка пошкоджень, викликаних вологою, випробування на динамічну повзучість і випробування на відстеження руху коліс. Сприйнятливість сумішей до вологи вивчалася далі на основі коефіцієнта непрямого опору розтягуванню. Потенціал колії різних сумішей ЦМА також визначався за допомогою пристрою для відстеження руху коліс і випробуванням на динамічну повзучість. Крім того, суміші ЦМА готувалися з CRMB-60, CRMB-70, CRMB-80 і порівнювалися з характеристиками ЦМА сумішей, попередньо укладених з асфальтом класу РМВ-40 і 60/70 (з волокном 1 і волокном 2).

Таблиця 4. Узагальнення властивостей суміші ЦМА з використанням різних в'язучих

Тип в'язучого	Вміст в'язучого [%]	Щільність	VCA суміш [%]	VCA DRC [%]	Повітряні порожнини [%]	VMA [%]	Вміст заповнювача
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
РМВ-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 з Волокном 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 з Волокном 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

Примітка

VCA DRC - Порожнини в крупних інертних матеріалах в сухому подрібненому стані

VCA Mix - Порожнини в крупних інертних матеріалах в ущільненій суміші, VMA -

Порожнини в мінеральних інертних матеріалах

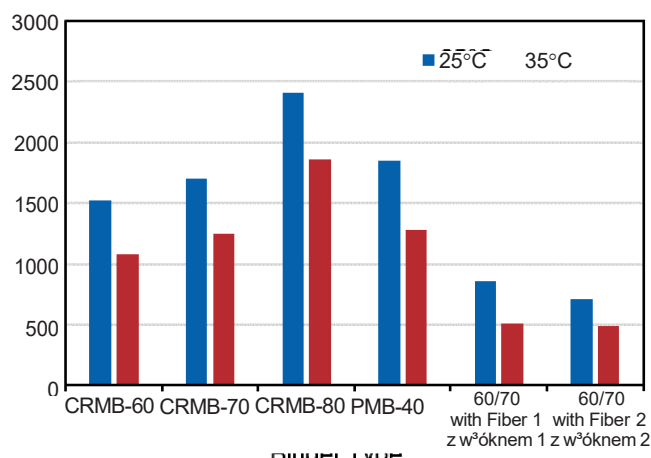
3.2. ВИПРОБУВАННЯ НА МОДУЛЬ ПРУЖНОСТІ

Дане випробування проводилося шляхом подачі гаверсинусних імпульсів навантаження на одну діаметральну вісь і вимірювання деформації на перпендикулярній осі відповідно до процедури випробування, описаної в стандарті ASTM D 4123 - 82. При проведенні випробування на модуль пружності зразок зазвичай піддається навантаженню до рівня напруги від 5% до 20% від непрямої міцності на розтяг. Таким чином, до проведення випробування по модулю пружності визначалася міцність зразка на розтяг. Випробування на модуль пружності проводилися на циліндричних зразках при 25 ° C і 35 ° C. Результати наведені на Рис. 1.

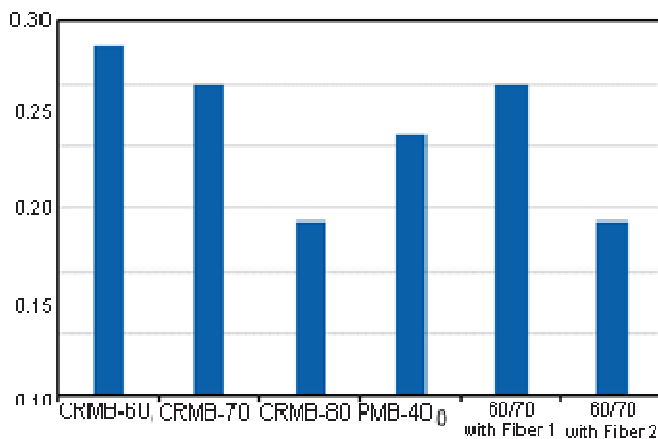
3.3. ВИПРОБУВАННЯ НА СТІКАННЯ

Для визначення ефективності стабілізаторів від стікання в'язучого і мінерального заповнювача було вибрано випробування на стікання, розроблене Національним центром асфальтових технологій (NCAT) [26]. Випробування на стікання проводилися на різних сумішах ЦМА, приготованих з бітуму класу 60/70 разом з волокнами, CRMB-60, CRMB-70, CRMB-80 і PMB-40. Відповідно до методики випробувань, зразок поміщається в дротяну корзину, яка розміщується на попередньо зваженій паперовій тарілці. В Індії типова температура розвантаження гарячої суміші для укладання становить 170 ° C, і, таким чином, ця ж температура приймається і для даного випробування. Зразок, корзина і плити були поміщені в піч з примусовою тягою на 1 годину при заданій температурі. Після закінчення 1 години кошик, що містить зразок, виймається з печі разом з тарілкою, і тарілка зважується, щоб визначити, яка кількість стікання відбувається. Вимірюється кінцева вага суміші і розраховується відсоток асфальту, що стік. Випробування на стікання були проведені для сумішей ЦМА з оптимальним вмістом бітуму (ОВС), що відповідає 4% повітряних порожнин. Далі були протестовані три зразка для випробування на стікання, результати якого представлені на Рис. 2. Індійський дорожній конгрес [30] визначає максимальне значення стікання в 0,3% для сумішей ЦМА.

Мал. 1. Модуль пружності сумішей ЦМА з різними в'язучими



Мал. 2. Стікання сумішей ЦМА з різними в'язучими



3.4. ОЦІНКА СТІЙКОСТІ ДО ВОЛОГИ

Коефіцієнт міцності на розтяг (TSR) використовується для визначення сприйнятливості асфальтобетонних сумішей до вологи в ході дослідження. В ході даного випробування визначено вплив застійної води внаслідок неадекватної дренажної системи на поверхні покриття, а також розшарування асфальтової плівки від заповнювачів і передчасного руйнування нежорсткого покриття [27]. Процедура випробування, прийнята для коефіцієнта непрямої міцності на розтяг і міцності на розтяг, відповідала вимогам AASHTO T283-03 [28]. Для кожного в'язучого готуються стандартні зразки Маршала діаметром 100 мм і висотою 63,5 мм. Випробування виконується шляхом навантаження зразка Маршалла стискаючим навантаженням, яке діє паралельно і вздовж вертикальної діаметральної площини навантаження зі швидкістю 50,8 мм / хв. Температура випробування підтримується на рівні 25 ° С, а зразки витримуються при температурі 25 ° С протягом 2 годин до початку випробування. Навантаження, при якому руйнується зразок, приймається за непряму міцність на розтяг (також відому як суха непряма міцність на розтяг) бітумної суміші. Кілька зразків поміщають у водяну баню при температурі 60С протягом 24 годин, а потім відразу ж поміщаються в кліматичну камеру і витримуються при температурі 25⁰С протягом двох годин. Потім ці кондиціоновані зразки піддаються випробуванню на непряму міцність на розтяг. Непряма міцність на розтяг цих просочених водою зразків називається вологою непрямою міцністю на розтяг. Співвідношення сухої і вологої непрямої міцності на розтяг реєструється як Коефіцієнт міцності на розтяг (TSR) бітумної суміші.

3.5. ДИНАМІЧНЕ ВИПРОБУВАННЯ НА ПОВЗУЧИСТЬ

Одноосьовий тест на повзучість ефективний для визначення чутливості асфальтобетонних сумішей до постійної деформації або колії. Випробування на повзучість зазвичай проводиться при реалістичній випробувальній температурі і на рівні напруг, що моделює умови напруг поля. Встановлено, що випробування на повзучість є чутливим до таких змінних суміші, як клас в'язучого, вміст в'язучого, тип заповнювача, вміст повітряних порожнин, температура випробування і стан напруг випробування. УТМ 14 використовувався для вимірювання постійної деформації необмежених зразків Маршалла діаметром 100 мм, що піддаються осьовому навантаженню при температурі випробування 40 ° С, 50 ° С і 60 ° С відповідно. Загальна

деформація при руйнуванні після періоду навантаження тривалістю близько 3600 секунд часто використовується для визначення прийнятної реакції суміші при проведенні випробування на повзучість. Тому зразки піддавалися впливу 3600 імпульсів навантаження з рівнем напруги 100 кПа (з навантаженням 0,2 секунди і періодом спокою 1,8 секунди), а отримані значення постійного навантаження були послідовно зареєстровані.

3.6. ВИПРОБУВАННЯ НА ВІДСТЕЖЕННЯ КОЛІЇ КОЛЕСА

Аналогічним чином було проведено випробування на відстеження колії колеса на зразках ЩМА плити розміром 300 × 300 × 55 мм. Зразок випробування, утримуваний на опорному столі, піддавався стандартному навантаженню (520 ± 5) N через колесо. Переміщення столу туди-сюди в нерухомій горизонтальній площині під колесом. Центр зони контакту шини піддається простому гармонійному переміщенню по відношенню до верхнього центру зразка з частотою (21 ± 0,2) циклів навантаження на хвилину і загальною відстанню переміщення (230 ± 5) мм. Крім того, зразки витримуються при заданій температурі випробування протягом як мінімум 2 годин до початку випробування. Таким чином, перед початком випробування було забезпечено досягнення температури випробування з допуском ± 0,1. Потім випробування проводилося протягом 6 годин або до досягнення зразком рівня деформації 10 мм, в залежності від того, що станеться раніше.

4. РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

В даному дослідженні були проведені експерименти з вивчення можливості використання в'язучих, модифікованих жорсткою гумовою крихтою для підбору сумішей ЩМА, які могли б добре і без значного стікання працювати в умовах інтенсивного дорожнього руху. Далі суміші готувалися з різними в'язучими, і експлуатаційні характеристики суміші оцінювалися шляхом проведення різних випробувань.

Результати випробувань на модуль пружності різних сумішей ЩМА представлені на Рис. 1. З проведених експериментів видно, що модуль ЩМА з CRMB-80 досить високий в порівнянні з іншими сумішами. Експерименти дають значення модуля пружності близько 2400 МПа для ЩМА з модифікованим в'язучим класу CRMB-80. Такі високі значення модуля пружності зазвичай очікуються в асфальтобетонних сумішах і щільних сумішах, але вони не типові для сумішей з переривчастим гранулометричним складом. Ці високі значення модуля пружності означають, що суміші ЩМА, підібрані з використанням CRMB-80, сприяють досягненню тривалого терміну служби дорожнього одягу, які не втомлюються навіть після великої кількості повторень.

Аналогічним чином, з результатів випробувань на стікання, показаних на Рис. 2, впливає, що відсоток стікання для сумішей ЩМА з бітумом 60/70 (з двома типами целюлозних волокон) і з РМВ-40, CRMB-60, CRMB-70 і CRMB-80 відповідають необхідним специфікаціям. Втрата менше 0,2% маси суміші вказує на те, що стікання в'язучого не відбудеться, проте передбачається, що втрати до 0,3% все ж прийнятні. Далі видно, що результати випробувань відповідають вимогам специфікацій Індійського дорожнього конгресу [29] для сумішей ЩМА.

Аналогічним чином, в Таблиці 5 наведені значення непрямой міцності на

розтяг для контрольних і кондиційованих зразків, отриманих з використанням різних в'язучих з різним вмістом бітуму. Коефіцієнт міцності на розтяг (TSR) являє собою відношення умовної міцності до контрольної міцності суміші.

Зазвичай вважається, що мінімальний TSR становить 80%, проте вищий TSR забезпечує довговічність суміші. Було встановлено, що TSR у випробовуваних зразків становить понад 80%, що вказує на відсутність істотного зниження межі міцності на розтяг через кондиціонування зразків вологою. Для ЦМА з CRMB-80 досягнуті значення TSR склали більше 96%, що вказує на те, що суміш має високий опір до вологи.

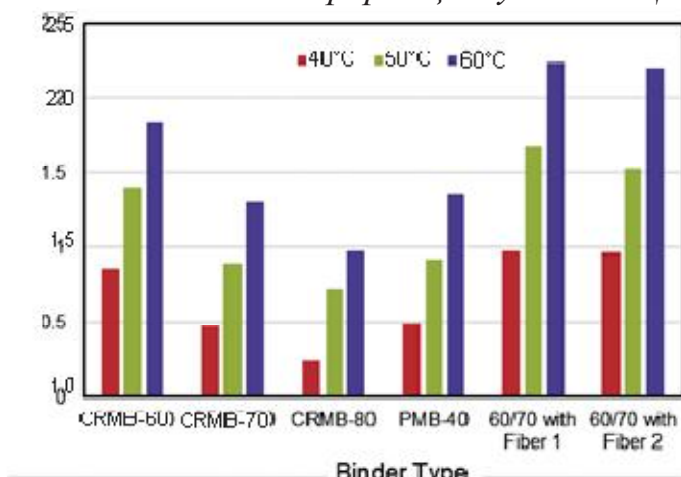
Таблиця 5. Непряма міцність на розтяг (ITS) і волога, що викликає пошкодження ЦМА суміші

Тип в'язучого	Вміст в'язучого [%]	ITS [МПа]	ITS [МПа]	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 З Волокном 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 З Волокном 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

Далі, при проведенні випробування на динамічну повзучість при температурі 40С, 50 ° С і 60 ° С в кінці 3600 циклів з використанням різних в'язучих були зафіксовані накопичені значення деформації (%) зразків при температурі 40° С, 50 ° С і 60 ° С, відповідно. Деталі отриманих постійних деформацій наведені на Рис. 3. Встановлено, що накопичені деформації, які спостерігаються в сумішах CRMB-80, CRMB-70, CRMB-60 і PMB-40 при вмісті в'язучого 7% і температурі 40 ° С, при тій же температурі виявилися нижчими, ніж спостережувані при вмісті в'язучого 5.5%, 6% і 6,5%. Аналогічна тенденція спостерігалася і при температурі 50 ° С, однак при температурі 60 ° С було відзначено, що накопичені значення деформації були вище при 7% вмісті в'язучого в порівнянні з 5.5%, 6% і 6,5% при тій же температурі. З цього можна

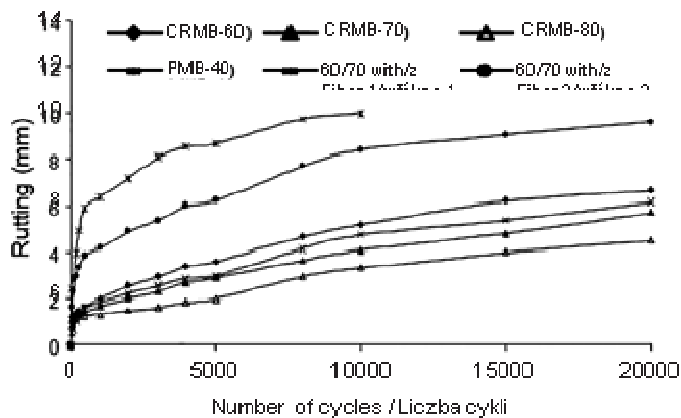
зробити висновок, що при більш високій температурі (60 ° С) бажано використовувати нижчий вміст в'язучого без шкоди для товщини плівки. Накопичені деформації менше 1% переважні для довговічних шарів дорожнього одягу, тому з дослідження можна зробити висновок, що для більш жорсткого модифікованого в'язучого, такого як CRMB-80, накопичені деформації будуть менше навіть при більш високій температурі, наприклад 60 ° С. Оскільки очікується, що ці високі температури будуть зберігатися в Індії протягом короткого періоду від 6 до 8 годин на добу протягом 2-4 місяців літа, навіть такі модифіковані в'язучі речовини, як CRMB-70, CRMB-60 і РМВ-40, які є менш жорсткими у порівнянні з CRMB-80, можуть бути ефективно використані для проектування ЩМА.

Мал. 3. Постійна деформація сумішей ЩМА з різними в'язучими



Крім того, на Рис. 4 представлені результати випробувань на відстеження колії колеса на стійкість до постійної деформації з використанням різних сумішей при температурі 60 ° С. З усіх сумішей ЩМА найменший ухил повзучості було зафіксовано у ЩМА CRMB-80, а максимальний ухил спостерігається у сумішей ЩМА 60/70 з волокном 2. Глибина колії, отримана після 20 000 циклів для сумішей ЩМА CRMB-80, виявилася найменшою при 4.5 мм, що можна віднести до високої температури розм'якшення суміші CRMB-80. У разі сумішей 60/70 з волокном 2 глибина колії 10 мм була досягнута приблизно в 10 000 повторень, що, можливо, пов'язано з меншим значенням жорсткості бітуму 60/70. У випадку сумішей CRMB-60, CRMB-70 і РМВ-40 глибина колії складала 6.63 мм, 5.71 мм і 6.15 мм відповідно після 20 000 повторень. Таким чином, ЩМА із застосуванням CRMB-80 рекомендується при підборі довговічних сумішей ЩМА, оскільки навіть при значних коливаннях температури в польових умовах відбувається достатнє відновлення деформації, і можна уникнути використання дорогих волокон.

Мал. 4. Результати випробувань по відстеженню колії колеса сумішей ЩМА з різними в'язучими



5. ВИСНОВКИ

На підставі результатів тесту можна зробити наступні висновки:

1) суміші ЩМА з CRMB і PMB характеризуються значеннями стікання, які знаходяться в допустимих межах. Крім того, використання будь-якого целюлозного волокна за додаткову плату не має істотного значення.

2) Значення модуля пружності знаходяться в діапазоні 2400 МПа для сумішей ЩМА з модифікованим в'язучим класу CRMB-80, і таке високе значення модуля пружності, як правило, не спостерігається в сумішах з переривчастим гранулометричним складом. На підставі цього можна зробити висновок, що суміші ЩМА, підібрані з використанням CRMB-80, забезпечать тривалий термін служби покриття, яке не вийде з ладу через втому, особливо після великої кількості повторень навантажень.

3) Коефіцієнт міцності на розтяг (TSR) сумішей, приготованих з модифікованими в'язучими, становить понад 90%, а найвище значення, зазначене для CRMB-80, становить 96%, що вказує на кращу вологостійкість.

4) CRMB-80 призводить до дуже низької накопиченої деформації навіть при високій температурі 60⁰С і, таким чином, може бути рекомендований для проектування довговічних сумішей, стійких до колієутворення.

5) За результатами тесту відстеження колії колеса було помічено, що ЩМА, приготована з використанням CRMB-80, після 20 000 циклів призводить до глибини колії 4.5 мм.

Нарешті, дослідження показало, що при проектуванні можна використовувати в'язучі, модифіковані гумовою крихтою більш жорсткого сорту, такі як CRMB-70 і CRMB-80, оскільки використання відпрацьованих гумових шин для довговічних сумішей ЩМА буде економічним порівняно з використанням дорогих целюлозних волокон для виробництва ЩМА.

ПОДЯКА

Автори висловлюють вдячність директору CRRI в Нью-Делі за його невтомну підтримку в ході досліджень, про які йдеться в статті.



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-grysowych 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 mieszanek 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 mieszanek 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 przykładano 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, druczany 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%.

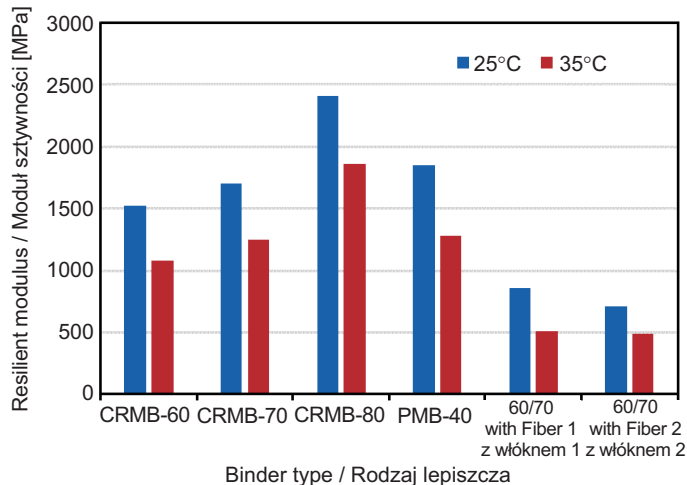


Fig. 1. Resilient modulus of SMA mixes with different binders
Rys. 1. Moduł sztywności mieszanek SMA z różnymi lepiszczami

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.

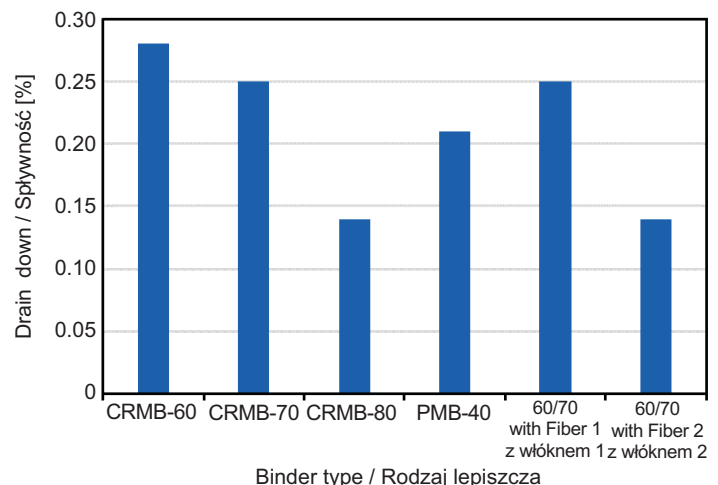


Fig. 2. Drain down of SMA mixes with different binders
Rys. 2. Spływność lepiszcza w mieszankach SMA w zależności od zastosowanego lepiszcza

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 kąpeli 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. Dzieliąc 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 pozio-

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.

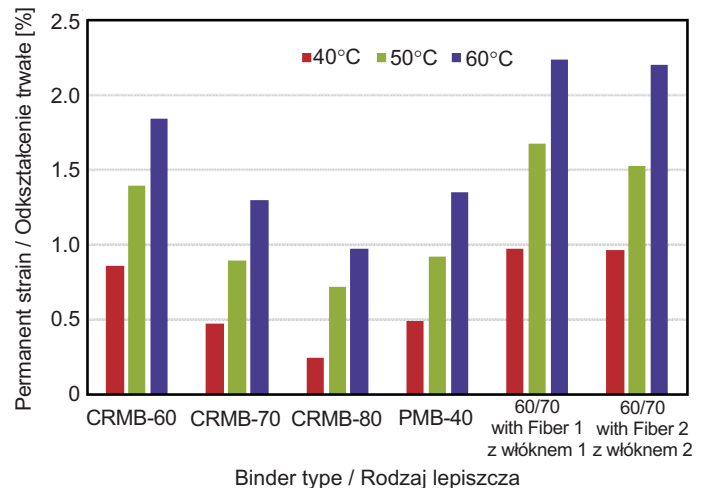


Fig. 3. Permanent strain of SMA mixes with different binders
Rys. 3. Odształcenie trwałe mieszanek SMA w przypadku zastosowania różnych lepiszczy

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 splotnością 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.

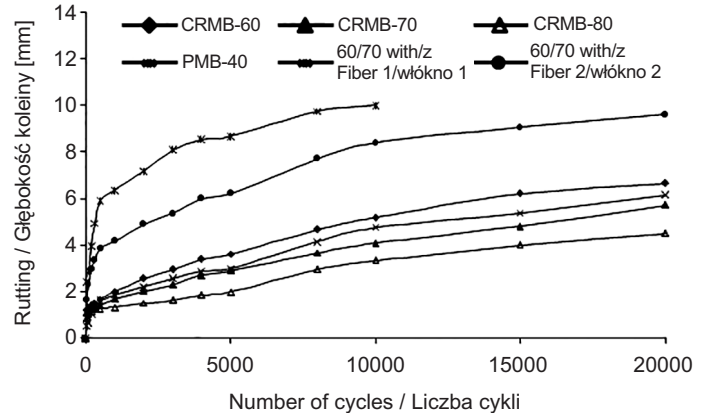


Fig. 4. Test results of wheel tracking of SMA mixes with different binders

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
- [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., Amirkhani 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

ACKNOWLEDGEMENT

The authors gratefully acknowledge the Director CRRRI in New Delhi for his unstinted support during the studies described in the paper.

- [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