

Yeswanth Paluri, Associate Professor M. Heeralal, Professor P. Rathish Kumar

Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Warangal, India

Zastosowanie kruszyw odzyskanych ze zniszczonej nawierzchni asfaltowej w betonowych nawierzchniach drogowych

A study on the use of reclaimed asphalt pavement aggregates in pavement quality concrete

Słowa kluczowe: kruszywo z recyklingu zniszczonej nawierzchni asfaltowej, właściwości betonu z kruszywem ze zniszczonej nawierzchni asfaltowej

Keywords: aggregate from reclaimed asphalt pavement, the properties of concrete with aggregate from reclaimed asphalt pavement

1. Wprowadzenie

Produkcja surowców do betonu ma duży wpływ na środowisko naturalne, dlatego też bardzo ważne jest badanie alternatywnych surowców na rzecz zrównoważonego budownictwa (1). Klasyczny beton zawiera w swoim składzie cement oraz kruszywo grube i drobne, przy czym kruszywo stanowi więcej od 70% jego objętości. Zastosowanie materiałów alternatywnych / odpadowych zastępujących kruszywo naturalne pozwala na wyprodukowanie zrównoważonego betonu. Stosowanie odpadów lub materiałów pochodzących z recyklingu jako kruszyw do betonu wpływa nie tylko na zmniejszenie ich ilości na składowiskach, ale ma także korzyści ekologiczne, wynikające z mniejszego wydobycia i obróbki surowców naturalnych. Przy odpowiednim zastosowaniu, materiały z recyklingu zapewniają wytworzenie ekonomicznych materiałów budowlanych o dobrej jakości (2). Przeprowadzone dotychczas badania wykazały, że materiałami odpadowymi takimi jak odpady budowlane i rozbiórkowe [OBR], zniszczona nawierzchnia asfaltowa [ZNA] oraz odpady ze zużytych opon samochodowych,

1. Introduction

The ecological impact of raw material production for concrete is substantial, which makes it very important to study resources for sustainable construction (1). Conventional concrete consists of cement, coarse aggregate, and fine aggregate out of which, more than 70% of the volume of concrete is aggregates. Use of alternate / waste materials as aggregate replacement help in producing a sustainable concrete. Utilizing waste or recycled materials as aggregates in concrete not only reduces the degree of materials that are to be used for land filling, but also, reduces the ecological effects from extracting and handling virgin materials. When used properly recycled materials provide good quality, and economic construction materials (2). Previous studies showed that waste materials like construction and demolition waste [CDW], reclaimed asphalt pavement [RAP], and rubber tyre waste, can be used as partial replacement of coarse aggregates in concrete. In the current study, use of RAP aggregates is being considered as a partial replacement to natural aggregates. RAP is a reprocessed

można częściowo zastępować kruszywo grube w betonie. Praca obejmuje możliwości zastosowania kruszywa z ZNA częściowo zastępującego kruszywo naturalne. ZNA jest przetworzonym materiałem z nawierzchni, zawierającym asfalt i kruszywo. Powstaje przy rozbiórce związanej z rekonstrukcją drogi lub wymianie nawierzchni asfaltowej (3).

Każdego roku miliony ton zniszczonej nawierzchni asfaltowej powstają przy naprawie i budowie dróg (4). Pomimo, że ZNA ma kilka zastosowań, duża jego część pozostaje niewykorzystana (5). ZNA po skruszeniu i przetworzeniu można stosować jako materiał alternatywny zastępujący kruszywo naturalne, w celu ochrony środowiska poprzez zmniejszenie produkcji kruszywo naturalnych. Kruszywo z ZNA zawiera starą warstwę asfaltu oraz warstwę pyłu, na jego powierzchni. Proces starzenia powoduje sztywnienie warstwy asfaltu. Sztywnienie tej warstwy jest przyspieszone na skutek utleniania, podczas składowania (6). Zwykle ZNA jest wykorzystywana w nawierzchniach podatnych, co jest korzystną formą recyklingu z ekonomicznego i ekologicznego punktu widzenia, jednak wymaga dużego zużycia energii do zmiękczenia starego asfaltu. Co więcej, betonowe nawierzchnie drogowe stały się standardową metodą stosowaną w budownictwie drogowym przez Ministerstwo Transportu Drogowego i Autostrad w Indiach, ze względu na ich doskonałe parametry w porównaniu z nawierzchniami asfaltowymi. W ostatnich czasach stosowanie ZNA w betonie, a w szczególności w nawierzchniach betonowych nabiera rozmachu. Duża ilość ZNA powstaje podczas usuwania starych nawierzchni podatnych, w miejsce których ma powstać nawierzchnia betonowa. Wykorzystanie ZNA do budowy nowej nawierzchni może być bardzo ekonomiczną alternatywą dla naturalnych kruszyw. Zastosowanie ZNA w nawierzchniach betonowych badali Delwar i in. (7). Autorzy wykazali, że właściwości stwardniałego betonu z cementu portlandzkiego uległy gwałtownemu pogorszeniu w przypadku zastosowania kruszywa z ZNA. Zalecili, aby nie stosować betonu z dodatkiem ZNA do celów konstrukcyjnych (7). Hassan i in. (8), zaproponowali stosowanie betonu z ZNA do celów niekonstrukcyjnych, na przykład górna i dolna warstwa podbudowy drogowej. Huang i in. (9), badali zastosowanie w betonie zniszczonej nawierzchni asfaltowej, przygotowanej w laboratorium. W obu przypadkach wykazano, że wytrzymałość betonu uległa znacznemu zmniejszeniu, a wytrzymałość betonu zwiększyła się, prawdopodobnie z powodu obecności warstwy asfaltu w kruszywie z ZNA (3, 9). Al-Oraimi i in. (10) wykazali, że ze wzrostem zawartości ZNA właściwości świeżej mieszanki betonowej i stwardniałego betonu ulegały pogorszeniu i również zasugerowali stosowanie tego materiału w betonie niekonstrukcyjnym. Debieb i in. (11), Okafor (12), Mahmoud (13), Ibrahim i in. (14), Modarres i Hosseini (15), Settari i in. (16), Brand i Roesler (17,19), Berry i in. (18), Khodair i Raza (20), Al-Mufti i Fried (21), Singh S i in. (22, 23) również badali możliwości zastosowania ZNA w betonie i doszli do wniosku, że nawet jeśli dodatek ZNA zmniejsza wytrzymałość betonu, kruszywo z ZNA można stosować jako materiał częściowo zastępujący kruszywo naturalne. Sugerowano zastąpienie kruszywa naturalnego kruszywem z ZNA w ilości od 20% do 40% (11-23). Hossiney i in. (24-26) wykazali, że wytrzy-

pavement material containing asphalt and aggregates. RAP is generated when asphalt pavements are removed for reconstruction or resurfacing (3).

Every year, millions tons of reclaimed asphalt pavement is being produced through repair and construction of roads (4). Although RAP has been reused in several applications, a large portion of it remains unutilized (5). This unutilized RAP after crushing and processing can be used as an alternative to natural aggregates, to decrease the environmental impact due to production of natural aggregates. RAP aggregates comprises of aged asphalt layer and a layer of dust on its surface. The ageing process makes the asphalt film stiffer. The stiffening of the asphalt film is accelerated due to oxidation during stockpiling (6). Generally, RAP is reused in flexible pavements as it is economical and environment friendly way of recycling, but it requires a lots of energy to soften the aged asphalt. Moreover, concrete pavements were made the default method of construction by the Ministry of Road Transport and Highways – India (MORTH) due to its superior performance, when compared to flexible pavements. Use of RAP in concrete in general and concrete pavement in particular is gaining importance in the recent past. When old flexible pavement is removed to construct a new concrete pavement, a lot of RAP is produced. If this RAP can be used, then and there, for the construction of new pavement, it could be a very economical alternative to natural aggregates. Use of RAP in concrete pavements was initially studied by Delwar et al. (7). They found that the hardened properties of Portland cement concrete [PCC] reduce drastically when RAP aggregates were used. They recommended that RAP concrete can be used for non-structural purposes (7). Hassan et al. (8), recommended to use RAP for non-structural purposes such as road bases and subbases. Huang et al. (9), investigated the use of laboratory-made RAP and naturally available RAP in PCC. In both the cases it was determined that the strength of PCC are reducing drastically and the toughness of the concrete was increasing, due to the presence of asphalt film on the RAP aggregates (3, 9). Al-Oraimi et al. (10) found that with increase in RAP content the fresh and hardened properties of concrete were reduced, and suggested their use for non-structural concrete. Debieb et al. (11), Okafor (12), Mahmoud (13), Ibrahim et al. (14), Modarres and Hosseini (15), Settari et al. (16), Brand and Roesler (17,19), Berry et al. (18), Khodair and Raza (20), Al-Mufti and Fried (21), Singh et al. (22, 23) studied the use of RAP in concrete and were coming to the conclusion that even though the addition of RAP reduced the strength, RAP aggregates can be used as partial replacement of natural aggregates. The suggested replacement varying from 20% to 40 % of natural aggregates (11-23). Works done by Hossiney et al. (24-26), suggested that the flexural toughness of the RAP based concrete was higher, owing to the presence of a thin layer of stiff asphalt on RAP aggregates that helped dissipate more energy, when the cracks try to propagate. It was also found in previous studies that the properties of RAP based concrete differ from conventional concrete and further research is required before using RAP in concrete pavements.

małość na rozciąganie przy zginaniu betonu z kruszywem z ZNA była większa, ze względu na zawartość cienkiej warstwy sztywnego asfaltu na tym kruszywie, co zwiększa zużycie energii, podczas propagacji pęknięć. W dotychczasowych badaniach wykazano także, że właściwości betonu z dodatkiem kruszywa z ZNA różnią się od właściwości zwykłego betonu i potrzeba dalszych badań przed stosowaniem ZNA w betonowych nawierzchniach drogowych.

2. Program badań

Program badań obejmował przygotowanie i zbadanie próbek betonu, w których część kruszywa naturalnego zastąpiono kruszywem ze zniszczonej nawierzchni asfaltowej.

2.1. Materiały

W badaniach zastosowano cement portlandzki klasy 53 o ciężarze właściwym 3,12 i właściwościach zgodnych z normą indyjską IS: 12269:2013 (27). Klasa cementu 53 oznacza, że wytrzymałość na ściskanie zapraw po 28 dniach dojrzewania, badana na próbkach sześciennych przygotowanych z tego cementu nie jest mniejsza od 53 MPa.

Jako kruszywo drobne zastosowano piasek rzeczny o ciężarze właściwym 2,68, o właściwościach, które klasyfikują go do kategorii 2, zgodnie z normą indyjską IS: 383-2016 (28).

Zastosowano także naturalne kruszywo grube, którym był łamany granit o średnicy ziaren 20 mm, o prawidłowym uziarnieniu i właściwościach zgodnych z normą indyjską IS: 383-2016 (28).

Dodawano domieszkę upłynniającą Complast 430, która należy do grupy sulfonowanych kondensatów naftalenowo-formaldehadowych [SNF]. Ciężar właściwy tego superplastyfikatora wynosił 1,22.

Próbki zniszczonej nawierzchni asfaltowej pobrano z pobliskiego składowiska. Materiał ten ręcznie pokruszono i umyto za pomocą dysz wodnych w celu usunięcia brudu, a także innych cząstek przyklejonych do jego powierzchni. Następnie kruszywo wysuszono w powietrzu i zbadano jego właściwości, zgodne z normą indyjską IS 2386 – 2002 (29). Zawartość asfaltu przyczepionego do kruszywa oznaczono metodą wirowania zgodną z normą ASTM D2172 – 17 (30). Zawartość ta wynosiła zwykle pomiędzy 3% a 7% masowych (31). Natomiast zawartość asfaltu przyczepionego do kruszywa z ZNA, zastosowanego w badaniach wynosiła 4%.

2.2. Skład mieszanek betonowych

Beton o wytrzymałości 40 MPa zaprojektowano zgodnie z normą indyjską IS: 10262-2009 (32). Stosunek wodno-cementowy wynoszący 0,36 ustalono na mieszankach próbnych, a stosunek kruszywa grubego do drobnego utrzymywano na poziomie 0,55 do 0,45. Zbadano wytrzymałość i twardość betonu z ZNA.

2. Experimental study

The experimental program comprised of casting and testing concrete specimens with partial replacement of natural aggregates with RAP aggregates.

2.1. Materials

Ordinary Portland cement of 53 grade with a specific gravity of 3.12 and properties conforming to IS 12269-2013 (27) was used. 53 grade cement means the characteristic compressive strength after 28 days of curing of mortar cubes made from this cement is not lower than 53 MPa.

River sand of specific gravity 2.68 and properties conforming to zone II of IS: 383-2016 (28) was used as fine aggregate.

Crushed granite of 20 mm nominal size with well graded aggregate and properties conforming to IS: 383- 2016 (28) was used as natural coarse aggregate.

Complast 430, a sulphonated naphthalene formaldehyde [SNF] condensate based high range water reducing admixture was used. The specific gravity of the superplasticizer was 1.22.

RAP was picked up from the debris of a local reclaimed asphalt pavements site. It was then manually crushed and washed with water jets to remove dirt and other particles, sticking on the surface of the RAP aggregates. These washed aggregates were then air dried and tested for different properties, as per IS 2386 – 2002 (29). The adhered asphalt content of the RAP aggregates is determined by centrifuge method as per ASTM D2172 – 17 (30). The asphalt content of RAP typically ranges between 3 and 7 percent by mass (31). The adhered asphalt content of RAP aggregate used in the current study is 4%.

2.2. Mix proportions

40 MPa concrete was designed as per IS: 10262-2009 (32). The water cement ratio of 0.36 was obtained from the trial mixes and the ratio of coarse aggregate to fine aggregate was kept at 0.55 to 0.45. The strength and toughness of RAP based concrete were measured.

3. Results and discussion

3.1. Physical properties of natural aggregates and RAP aggregates

The properties of RAP and natural aggregates are presented in Table 1.

As shown in Table 1, the specific gravity and bulk density of the RAP aggregate is slightly lower than that of natural aggregate. RAP aggregate has lower water absorption than natural aggregate. The low water absorption is due to the adhered asphalt layer on the aggregate surface. Decrease of elongation index and flakiness



Rys. 1. a) Usuwanie starej nawierzchni, b) Składowisko ZNA

Fig. 1. a) Old pavement being milled, b) RAP stockpile

3. Wyniki badań i dyskusja

3.1. Właściwości fizyczne kruszywa naturalnego i ze zniszczonej nawierzchni asfaltowej

Właściwości kruszywa naturalnego i kruszywa z ZNA przedstawiono w tabeli 1.

Jak pokazano w tabeli 1, ciężar właściwy i gęstość nasypowa kruszywa ze zniszczonej nawierzchni asfaltowej są nieznacznie mniejsze niż kruszywa naturalnego. Kruszywo z ZNA ma mniejszą nasiąkliwość, w porównaniu do naturalnego kruszywa. Jest to spowodowane warstwą asfaltu pokrywającą powierzchnię kruszywa. Spadek wskaźnika wydłużenia i płaskości kruszywa z ZNA świadczy o tym, że kruszywo to jest mniej wydłużone i płaskie. Łączony wskaźnik płaskości i wydłużenia kruszywa z ZNA wynosi 19%, więc jest mniejszy od 40%, czyli maksymalnej dopuszczalnej wartości określonej w normie indyjskiej IS 383:2016 (28). Ziarna

index of RAP aggregate indicate that there are lower elongated and flaky aggregates. The combined flakiness and elongation Index of RAP aggregate is 19% which is lower than 40%, the maximum allowed value as per IS 383: 2016 (28). RAP aggregate was mostly rounded but due to the presence of a viscous layer of asphalt on the aggregate surface, the angularity number of RAP aggregate was slightly higher than that of natural aggregate. RAP aggregate had lower aggregate impact value which means that its impact resistance is high, compared to that of natural aggregates. Even though RAP had higher impact resistance, but its abrasion resistance was lower compared to the natural aggregate. The increase in abrasion value can be attributed to the presence of agglomerated particles on the surface of RAP aggregates.

3.2. Properties of fresh concrete mix with RAP addition

From the slump measurement results it is evident that with an increase in the RAP addition in concrete, the workability of the fresh

Tablica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE KRUSZYWA NATURALNEGO I KRUSZYWA Z DA
PHYSICAL PROPERTIES OF NATURAL AND RAP AGGREGATES

Właściwości / Properties	Kruszywo naturalne Natural aggregate	Kruszywo z DA RAP aggregate
Gęstość nasypowa / Bulk density [g/cc]	1.49	1.37
Zawartość porów, % / % voids	44.26	47.31
Wskaźnik porowatości / Void ratio	0.79	0.90
Ciężar właściwy / Specific gravity	2.78	2.60
Wskaźnik miałkości / Fineness modulus	7.06	7.1
Nasiąkliwość / Water absorption [%]	1.2	1.04
Wskaźnik płaskości / Flakiness index [%]	22	10
Wskaźnik wydłużenia / Elongation index [%]	18	9
Wartość uderzeniowa kruszywa / Aggregate impact value [%]	18.2	14.5
Współczynnik kanciastości / Angularity number [%]	10.2	10.78
Wartość ścierania kruszywa / Abrasion value [%]	24.1	38.2
Zawartość asfaltu w DA / Adhered asphalt content [%]	-	4

kruszywa z ZNA są zazwyczaj zaokrąglone, jednak ze względu na zawartość lepkiej warstwy asfaltu na powierzchni kruszywa, ich współczynnik kanciastości jest nieco większy niż kruszywa naturalnego. Kruszywo z ZNA ma większą odporność na uder, co oznacza, że jego odporność na uderzenia jest większa w porównaniu do kruszywa naturalnego. Pomimo, że ZNA ma większą odporność na uder, jego odporność na ścieranie jest gorsza w porównaniu do kruszywa naturalnego. Zmniejszenie odporności na ścieranie kruszywa może być spowodowany zawartością nagromadzonych cząstek na powierzchni kruszywa z ZNA.

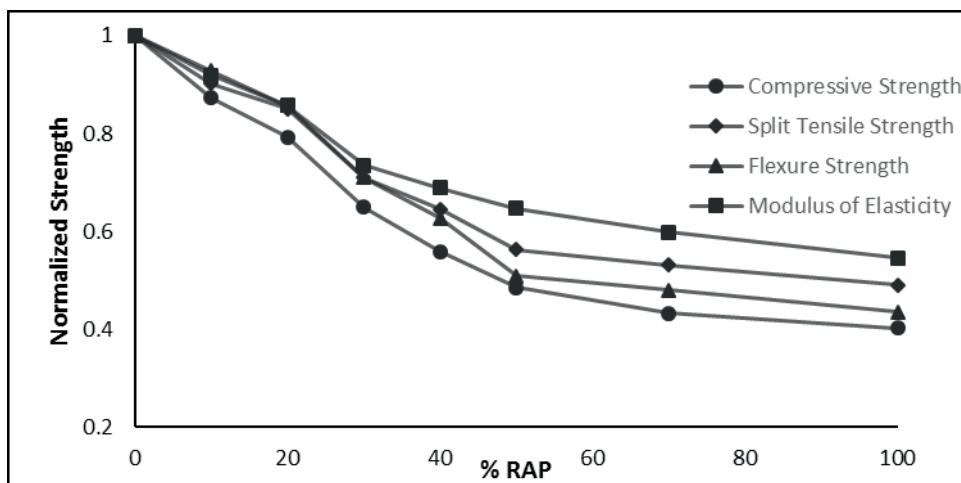
3.2. Właściwości świeżej mieszanki betonowej z dodatkiem kruszywa z ZNA

Wyniki pomiarów opadu stożka wykazały, że wraz ze wzrostem dodatku kruszywa z ZNA w betonie, urabialność świeżej mieszanki betonowej ulega pogorszeniu. Spadek urabialności betonu z ZNA może wynikać z dużej lepkości warstwy asfaltu na tym kruszywie (7, 11, 21, 22). Pomimo, że urabialność mieszanek betonowych z dodatkiem ZNA jest gorsza w porównaniu do mieszanki kontrolnej, opad stożka był wystarczający do zastosowania takich mieszanek w większości prac budowlanych.

3.3. Właściwości stwardniałego betonu z dodatkiem kruszywa z ZNA

Zbadano właściwości próbek stwardniałego betonu zawierających różną ilość kruszywa z ZNA zastępującego kruszywo naturalne, a wyniki badań przedstawiono w tabelicy 3. W tabelicy tej podano wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, wytrzymałość na zginanie oraz moduł sprężystości betonów, po 7 i 28 dniach dojrzewania.

Z tabelicy 3 i rysunku 2 wynika, że wytrzymałość betonu maleje wraz ze wzrostem zawartości kruszywa z ZNA. Przyczyną może być słabe wiązanie z lepiszczem asfaltowym pokrywającym ziarna kruszywa z ZNA, czyli w strefie przejściowej pomiędzy tym kruszywem a matrycą cementową. Podobny spadek zaobserwowano w przypadku wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, wytrzymałości na zginanie, a także modułu sprężystości.



Rys. 2. Znormalizowana wytrzymałość betonu z różnym dodatkiem ZNA [RAP]

Fig. 2. Normalized strength values for different dosages of RAP

Tablica 2 / Table 2

OPAD STOŻKA W ZALEŻNOŚCI OD ZAWARTOŚCI ZNA

VARIATION OF SLUMP OF CONCRETE WITH RAP ADDITION

% ZNA / % RAP	Opad stożka / Slump [mm]
0	100
10	100
20	90
30	80
40	80
50	75
70	70
100	70

concrete mix is decreasing. The lower workability of RAP concrete may be due to the high viscosity of asphalt layer on RAP aggregate (7, 11, 21, 22). Even though the workability of the concrete mix with RAP addition was lower than that of the control mix, the slump was sufficient enough for use in the most of the concreting works.

3.3. Properties of hardened concrete with RAP addition

The properties of hardened concrete with various replacements of natural coarse aggregates with RAP aggregates were examined and presented in Table 3. The compressive strength, split tensile strength, flexural strength and modulus of elasticity of concretes after 7 days and 28 days of curing is shown in Table 3.

From Table 3 and Fig. 2 it is evident that with increase in the dosage of RAP there is a decrease in the strength of concrete. This may be due to the weak bond between the asphalt binder coating around the RAP aggregate, i.e., in the ITZ of these aggregates and the cement matrix. There was a similar reduction in split tensile strength, flexural strength and modulus of elasticity as well.

Concrete made with up to 30% of RAP aggregate had flexural strength higher than 4.5 MPa after 28 days, which is the minimum required flexural strength for pavement quality concrete [PQC] as

per MORTH specifications for Road and Bridge Works (33). It can be stated that though there is a continuous decrease in strength with increase of RAP addition, there is a substantial loss in strength of concrete with more than 20 % of the natural aggregate replaced by RAP aggregate. Thus, concrete with 20% RAP addition can be used as pavement quality concrete [PQC] in the production of concrete pavements.

3.3.1. Flexural toughness

Fig. 3 shows the load-deflection curves of concrete for different replacements of natural aggregate with RAP aggregates.

Tablica 3 / Table 3

WŁAŚCIWOŚCI STWARDNIAŁEGO BETONU Z DODATKIEM ZNA
 PROPERTIES OF HARDENED CONCRETE WITH RAP ADDITION

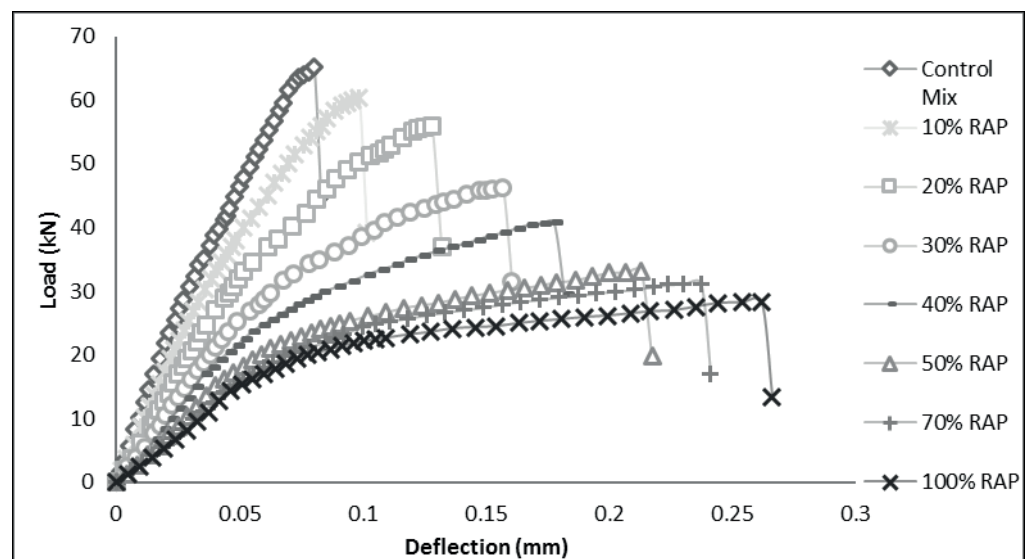
Zawartość ZNA RAP content [%]	Wytrzymałość na sciskanie Compressive strength [MPa]		Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu Split tensile strength [MPa]		Wytrzymałość na zginanie Flexural strength [MPa]		Moduł sprężystości Modulus of elasticity [MPa]
	7 dni / days	28 dni / days	7 dni / days	28 dni / days	7 dni / days	28 dni / days	28 dni / days
0	40.21	50.46	4.48	4.90	5.98	6.51	40171
10	35.82	44.08	4.00	4.42	5.51	6.04	36899
20	33.17	40.01	3.74	4.17	5.06	5.58	34440
30	27.24	32.80	3.09	3.48	4.16	4.62	29504
40	23.43	28.16	2.79	3.16	3.65	4.08	27660
50	20.42	24.50	2.37	2.76	3	3.31	25959
70	18.21	21.80	2.19	2.60	2.87	3.12	24012
100	17.51	20.30	2.30	2.40	2.56	2.83	21892

Beton zawierający do 30% kruszywa z ZNA miał wytrzymałość na zginanie większą niż 4,5 MPa po 28 dniach, co jest minimalną wartością wytrzymałości na zginanie dla betonowych nawierzchni drogowych, określoną w Specyfikacji dla Robót Drogowych i Mostowych Ministerstwa Transportu Drogowego i Autostrad w Indiach (33). Należy zauważyć, że chociaż wraz ze wzrostem dodatku ZNA wytrzymałość ulega sukcesywnemu zmniejszeniu, to znaczny jej spadek występuje w przypadku, gdy więcej niż 20% naturalnego kruszywa zastąpiono kruszywem z ZNA. Tak więc beton z dodatkiem do 20% kruszywa z ZNA można stosować w betonowych nawierzchniach drogowych.

3.3.1. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu

Na rysunku 3 pokazano krzywe obciążenie-ugięcie betonu z różnym dodatkiem kruszywa z ZNA, zastępującego kruszywo naturalne. Można zauważyć, że betony z dodatkiem ZNA są również podatne na kruche zniszczenie. Jednakże, ze wzrostem dodatku kruszywa z ZNA, ugięcie, przy którym następowało zniszczenie, rosło, a zdolność pochłaniania energii i wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu – obszar pod krzywą obciążenie-ugięcie, były większe. W tabelicy 4 pokazano zmiany wytrzymałości na zginanie i wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu próbek betonu z dodatkiem ZNA. Procentowy spadek wytrzymałości na zginanie jest większy w betonach z większym dodatkiem ZNA.

Z wyników podanych w tabelicy 4 można stwierdzić, że wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu betonu z dodatkiem kruszywa z ZNA



Rys. 3. Krzywe obciążenie-ugięcie dla betonu z dodatkiem ZNA

Fig. 3. Flexural load – deflection curves of concrete with RAP addition

It can be seen that concretes with RAP addition also exhibited brittle failure. However, with the increase in the dosage of RAP aggregate, the deflection at failure increased and the energy absorbing capacity and flexural toughness – area under load-deflection curve, has been improved. Table 4 shows the variation in the flexural strength and toughness of concrete specimens with RAP addition. It can be noted that the percentage decrease in flexural strength is higher in the concretes with higher RAP content.

It can be noticed from Table 4 that the flexural toughness of concrete with RAP aggregate is higher compared to control mix, without RAP. This increase was probably due to the presence of a thin film of asphalt layer on RAP aggregates at the aggregate–cement matrix interface might have contributed to the higher dissipation of energy during crack propagation (24-26). Higher content of asphalt films around the RAP might have benefitted the bridging of aggregates, thereby increasing the flexural toughness.

Tablica 4 / Table 4

ZMIANY WYTRZYMAŁOŚCI NA ROZCIĄGANIE PRZY ZGINANIU BETONU Z DODATKIEM DA

VARIATION OF FLEXURAL TOUGHNESS OF CONCRETE WITH RAP ADDITION

Zawartość DA RAP content [%]	Wytrzymałość na zginanie Flexural strength [MPa]	Spadek wytrzymałości na zginanie Decrease in flexural strength [%]	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu Flexural toughness [N-m]	Wzrost wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu Increase in flexural tough- ness [%]
0	6.51	-	3.00	-
10	6.04	7.22	3.53	17.77
20	5.58	14.29	4.43	47.83
30	4.62	29.03	4.75	58.51
40	4.08	37.33	4.84	61.67
50	3.31	49.16	4.96	65.48
70	3.12	52.07	5.30	76.83
100	2.83	56.53	5.46	82.03

jest większa w porównaniu do mieszanki kontrolnej, bez zniszczonej nawierzchni asfaltowej. Wzrost ten jest prawdopodobnie spowodowany obecnością cienkiej warstwy asfaltu na ziarnach kruszywa z ZNA na granicy kruszywo-matryca cementowa, co mogło się przyczynić do większego rozproszenia energii podczas propagacji pęknięć (24-26). Większa grubość warstewki asfaltu na ziarnach kruszywa z ZNA może korzystnie wpływać na łączenie się ziaren kruszywa, zwiększając w ten sposób wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu.

3.3.2. Korelacja między wytrzymałością na ściskanie a innymi właściwościami mechanicznymi

Właściwości betonu z kruszywem z ZNA różnią się od właściwości zwykłego betonu i z tego względu zaproponowano nowe zestawienie zależności empirycznych wytrzymałości na ściskanie a innymi właściwościami mechanicznymi.

Korelację wytrzymałości na ściskanie z wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu pokazano na rysunku 4, a zależność tę podano w równaniu 1.

$$f_t = 0,23f_c^{0,78} \quad [1]$$

gdzie: f_t jest wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu, a f_c jest wytrzymałością na ściskanie w MPa.

Zależność wytrzymałości na ściskanie z wytrzymałością na zginanie pokazano na rysunku 5, a zaproponowane równanie ma kolejność 2.

$$f_{fs} = 0,17f_c^{0,94} \quad [2]$$

gdzie: f_{fs} jest wytrzymałością na zginanie a f_c jest wytrzymałością na ściskanie, w MPa.

Podobnie, zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie a modułem sprężystości pokazano na rysunku 6, a odpowiedni wzór empiryczny przedstawia równanie 3.

3.3.2 Correlation of compressive strength with other mechanical properties

The properties of concrete with RAP aggregate differ from conventional concrete and a new set of empirical relationships was proposed between compressive strength and other mechanical properties.

A correlation of compressive strength and split tensile strength variation is as shown in Fig. 4 and the relationship is shown in equation 1.

$$f_t = 0.23f_c^{0.78} \quad [1]$$

where: f_t is the split tensile strength and f_c is compressive strength in MPa.

The compressive strength – flexural strength variation is as shown in Fig. 5 and the equation proposed from this measurement is shown in equation 2.

$$f_{fs} = 0.17f_c^{0.94} \quad [2]$$

where: f_{fs} is the flexural strength and f_c is compressive strength, both in MPa.

Similarly, the variation of compressive strength with modulus of elasticity is shown in Fig. 6 and the relevant empirical expression obtained is shown in equation 3.

$$E_c = 3351.8f_c^{0.632} \quad [3]$$

where: E_c is the modulus of elasticity and f_c is the compressive strength in MPa.

It is evident from Figs. 4, 5 and 6 that the empirical equations developed in this study could predict the mechanical properties of concrete based on the compressive strength with correlation coefficients close to 1, and hence they can be used for RAP based concrete.

$$E_c = 3351.8f_c^{0.632} \quad [3]$$

gdzie, E_c jest modułem sprężystości a f_c jest wytrzymałością na ściskanie w MPa.

Z rysunków 4, 5 i 6 wynika, że opracowane wzory empiryczne mogą pomóc przewidzieć inne *właściwości mechaniczne betonu na podstawie wytrzymałości na ściskanie*, bowiem współczynniki korelacji były bliskie 1, a więc można je stosować w przypadku betonu z kruszywem z ZNA.

4. Korelacja między właściwościami badanymi metodami nieniszczącymi a wytrzymałością na ściskanie

Wyniki pomiarów prędkości fali ultradźwiękowej i młotkiem Schmidta zestawiono w tabelicy 5. Na rysunkach 7 i 8 pokazano zmiany wytrzymałości na ściskanie oraz prędkości fali ultradźwiękowej i liczby odbicia.

Na rysunkach 7 i 8 pokazano korelacje liniowe pomiędzy prędkością fali ultradźwiękowej a liczbą odbicia oraz wytrzymałością na ściskanie. Wzory proponowane na podstawie tych korelacji przedstawiają równania 4 i 5.

$$f_c = 35v - 120 \quad [4]$$

$$f_c = 1,5N - 17,2 \quad [5]$$

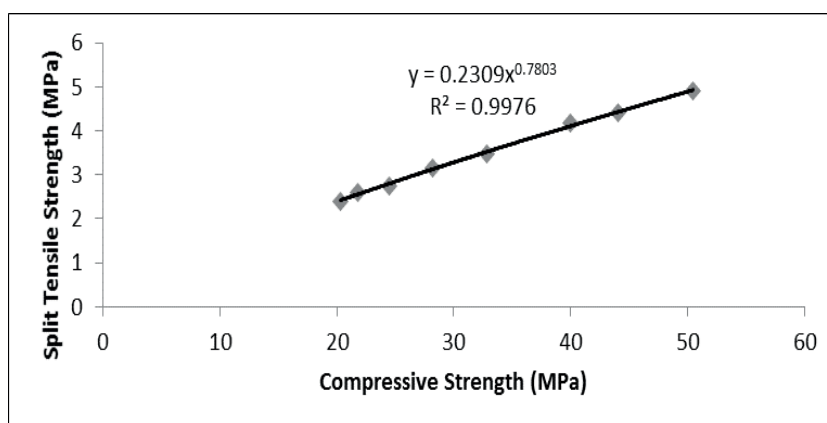
gdzie, f_c jest wytrzymałością na ściskanie w MPa, v jest prędkością fali ultradźwiękowej w km/s a N jest liczbą odbicia.

Należy stwierdzić, że jest dobra korelacja pomiędzy wartościami prędkości fali ultradźwiękowej, liczbą odbicia i wytrzymałością na ściskanie.

5. Wnioski

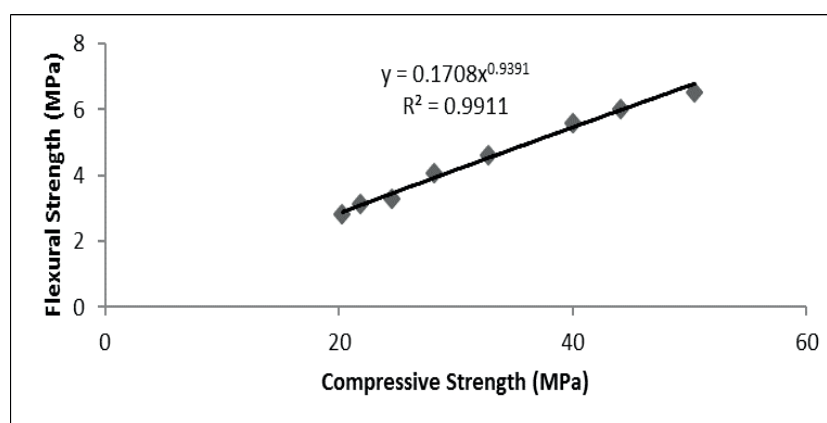
Doświadczenia przeprowadzono w celu zbadania możliwości zastosowania dodatku kruszywa z ZNA w betonowych nawierzchniach drogowych. Na podstawie uzyskanych wyników można wyciągnąć następujące wnioski:

- Gęstość nasypowa i ciężar właściwy kruszywa ze zniszczonej nawierzchni asfaltowej [ZNA] są nieco mniejsze w porównaniu do kruszywa naturalnego.
- Odporność na uderzenie kruszywa z ZNA jest duża, co może być prawdopodobnie spowodowane zawartością sztywnej warstwy asfaltu na powierzchni kruszywa z ZNA.
- Beton z dodatkiem kruszywa z ZNA miał mniejszą wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupy-



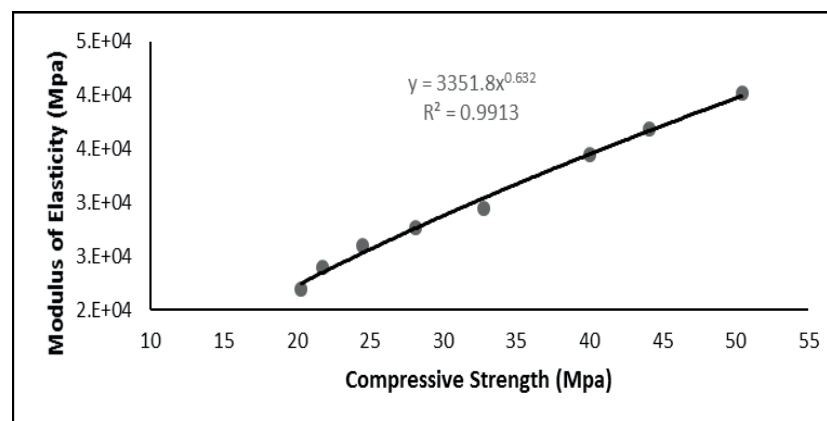
Rys. 4. Zależność wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu z wytrzymałością na ściskanie

Fig. 4. Split tensile strength vs compressive strength



Rys. 5. Związek wytrzymałości na zginanie z wytrzymałością na ściskanie

Fig. 5. Flexural strength vs compressive strength

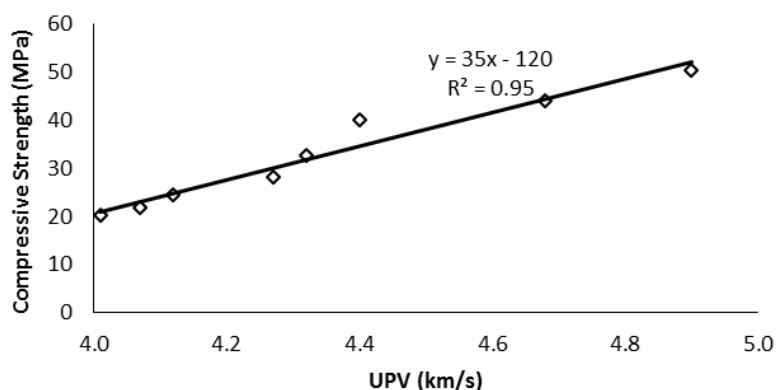


Rys. 6. Zależność pomiędzy modułem sprężystości a wytrzymałością na ściskanie

Fig. 6. Modulus of elasticity vs compressive strength

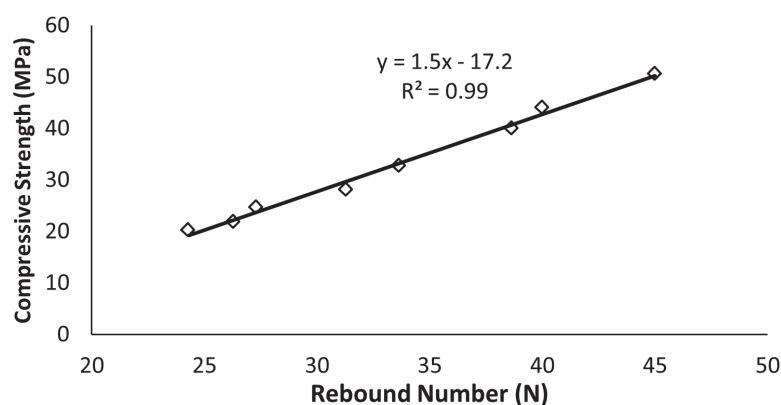
4. Correlation between NDT and compressive strength

The results of ultrasonic pulse velocity [UPV] and rebound hammer tests are shown in Table 5. Figs. 7 and 8 show the variation of compressive strength with UPV and rebound number.



Rys. 7. Korelacja między prędkością fali ultradźwiękowej a wytrzymałością na ściskanie

Fig. 7. Correlation of UPV with compressive strength



Rys. 8. Korelacja między liczbą odbicia a wytrzymałością na ściskanie

Fig. 8. Correlation of rebound number with compressive strength

Tablica 5 / Table 5

ZMIANY PRĘDKOŚCI FALI ULTRADŹWIĘKOWEJ I LICZBY ODBICIA W BETONIE Z DODATKIEM KRUSZYWA Z ZNA

VARIATION OF UPV AND REBOUND NUMBER [N] OF CONCRETE WITH RAP CONTENT

% ZNA / % RAP	Prędkość fali ultradźwiękowej UPV [km/s]	Liczba odbicia Rebound number, N	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength [MPa]
0	4.90	45	50.46
10	4.68	40	44.08
20	4.40	39	40.01
30	4.32	34	32.80
40	4.27	31	28.16
50	4.12	27	24.50
70	4.07	26	21.80
100	4.01	24	20.30

waniu i wytrzymałość na zginanie przy dodatku zastępującym kruszywo naturalne w ilości większej od 20%. Z tego względu zaleca się zastąpienie kruszywa naturalnego kruszywem z ZNA tylko do 20%.

- Moduł sprężystości próbek betonu z dodatkiem kruszywa z ZNA był mniejszy w porównaniu do próbek betonu z kruszywem naturalnym. To wskazuje na małą sztywność początkową

- Concrete made of RAP aggregate caused decrease in compressive, split tensile and flexural strengths beyond 20 % replacement. So, it is advisable to replace natural aggregates with RAP aggregates up to 20% only.

- The modulus of elasticity found for concrete specimens from RAP aggregate was lower compared to the natural aggregate concrete specimens. This is suggestive of low initial stiffness

Figs. 7 and 8 show a linear correlation between UPV and rebound number and compressive strength. The relationships proposed from this study are shown in equations 4 and 5.

$$f_c = 35v - 120 \quad [4]$$

$$f_c = 1.5N - 17.2 \quad [5]$$

where: f_c is compressive strength in MPa, v is UPV in km/s and N is the rebound number.

It can be noted that there is a good correlation between the UPV values, rebound number and compressive strength.

5. Conclusions

An experimental study was carried out to investigate the RAP addition in pavement quality concrete. Based on the experimental results, the following conclusions can be drawn:

- Bulk density and specific gravity of the reclaimed asphalt pavement (RAP) aggregates were slightly lower, compared to that of natural aggregates.
- The impact resistance of RAP aggregate was high and this can be probably attributed to the presence of stiff asphalt layer on the surface of RAP aggregates.

próbek betonu z dodatkiem kruszywa z ZNA w porównaniu do betonu z kruszywem naturalnym.

- Beton zawierający do 30% kruszywa z ZNA miał wytrzymałość na zginanie większą niż 4,5 MPa, co jest minimalną wytrzymałością na zginanie dla betonowych nawierzchni drogowych, określoną w Specyfikacji dla Robót Drogowych i Mostowych Ministerstwa Transportu Drogowego i Autostrad w Indiach (33).
- Cienka warstwa asfaltu na kruszywie z ZNA znacznie poprawiła zdolność pochłaniania energii i wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu. W przypadku betonu z 20% dodatkiem ZNA, pomimo, że wytrzymałość na zginanie była o 14% mniejsza niż mieszanki kontrolnej, to wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu była o 48% większa w porównaniu do mieszanki kontrolnej.

of RAP concrete specimens compared to natural aggregate concrete.

- Concrete with up to 30% of RAP aggregate had flexural strength higher than 4.5 MPa which is the minimum required for flexural strength of pavement quality concrete, as per MORTH specifications for Road and Bridge Works (33).
- Due to presence of a thin film of asphalt layer on the RAP aggregate, the energy absorption capacity and flexural toughness of the concrete improved significantly. With 20 % RAP concrete, although the flexural strength was 14% lower than the control mix, the flexural toughness was 48% higher, compared to that of control mix.

Literatura / References

1. Rahal, K. "Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate". *Building and environment*, 42(1), 407-415 (2007).
2. Bolden, J., Abu-Lebdeh, T., & Fini, E. "Utilization of recycled and waste materials in various construction applications." *American Journal of Environmental Science*, 9(1), 14-24 (2013).
3. Huang, B., Shu, X., & Burdette, E. G. "Mechanical properties of concrete containing recycled asphalt pavements." *Magazine of Concrete Research*, 58(5), 313-320 (2006).
4. Collins, R. J., & Ciesielski, S. K. "Recycling and use of waste materials and by-products in highway construction" *NCHRP Synthesis of Highway Practice, No. 199, Transportation Research Board* 1994.
5. Taha, R., Al-Harthy, A., Al-Shamsi, K., & Al-Zubeidi, M. Cement stabilization of reclaimed asphalt pavement aggregate for road bases and subbases. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(3), 239-245 (2002).
6. Singh, S., Ransinching, G. D. R. N., & Kumar, P. "Feasibility study of RAP aggregates in cement concrete pavements" *Road Materials and Pavement Design*, 1-20. (2017)
7. Delwar, M., Fahmy, M., & Taha, R. "Use of reclaimed asphalt pavement as an aggregate in Portland cement concrete." *Materials Journal*, 94(3), 251-256. (1997)
8. Hassan, K. E., Brooks, J. J., & Erdman, M.. "The use of reclaimed asphalt pavement (RAP) aggregates in concrete." *Waste management series* (Vol. 1, pp. 121-128). Elsevier (2000).
9. Huang, B., Shu, X., & Li, G. "Laboratory investigation of Portland cement concrete containing recycled asphalt pavements." *Cement and Concrete Research*, 35(10), 2008-2013 (2005).
10. Al-Oraimi, S., Hassan, H. F., & Hago, A. "Recycling of reclaimed asphalt pavement in Portland cement concrete." *The Journal of Engineering Research (TJER)*, 6(1), 37-45 (2009).
11. Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., & Degeimbre, R. "Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates." *Cement and Concrete Composites*, 32(6), 421-426 (2010).
12. Okafor, F. O. "Performance of recycled asphalt pavement as coarse aggregate in concrete." *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 17, 47-58 (2010).
13. Mahmoud, E., Ibrahim, A., El-Chabib, H., & Patibandla, V. C. Self-consolidating concrete incorporating high volume of fly ash, slag, and recycled asphalt pavement. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7(2), 155-163 (2013).

14. Ibrahim, A., Mahmoud, E., Khodair, Y., & Patibandla, V. C. "Fresh, mechanical, and durability characteristics of self-consolidating concrete incorporating recycled asphalt pavements." *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(4), 668-675 (2013).
15. Modarres, A., & Hosseini, Z. "Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material." *Materials & Design*, 64, 227-236 (2014).
16. Settari, C., Debieb, F., Kadri, E. H., Boukendakdji, O. "Assessing the effects of recycled asphalt pavement materials on the performance of roller compacted concrete." *Construction and Building Materials*, 101, 617-621 (2015).
17. Brand, A. S. and Roesler, J. R. Expansive and concrete properties of SFS-FRAP aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2), 04015126 (2015).
18. Berry, M., Kappes, B., & Kappes, L. "Optimization of Concrete Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement." *ACI Materials Journal*, 112(6) (2015).
19. Brand, A. S. and Roesler, J. R. "Ternary Concrete with Fractionated Reclaimed Asphalt Pavement." *ACI Materials Journal*, 112(1) (2015).
20. Khodair, Y. and Raza, M. Sustainable self-consolidating concrete using recycled asphalt pavement and high volume of supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 131, 245-253 (2017).
21. Al-Mufti, R. L. and Fried, A. N. "Improving the strength properties of recycled asphalt aggregate concrete." *Construction and Building Materials*, 149, 45-52 (2017).
22. Singh, S., Ransinchung, G. D., & Kumar, P. "Effect of mineral admixtures on fresh, mechanical and durability properties of RAP inclusive concrete." *Construction and Building Materials*, 156, 19-27 (2017).
23. Singh, S., Ransinchung, G. D., & Kumar, P. An economical processing technique to improve RAP inclusive concrete properties. *Construction and Building Materials*, 148, 734-747 (2017).
24. Hossiney, N., Wang, G., Tia, M., & Bergin, M. *Evaluation of Concrete Containing Recycled Asphalt Pavement for Use in Concrete Pavement* (No. 08-2711) (2008).
25. Hossiney, N., Tia, M., & Bergin, M. J. "Concrete containing RAP for use in concrete pavement." *International Journal of Pavement Research and Technology*, 3(5), 251-258 (2010).
26. Tia, M., Hossiney, N., Su, Y. M., Chen, Y., & Do, T. A. "Use of reclaimed asphalt pavement in concrete pavement slabs." *Tallahassee, FL*, 321 (2012).
27. "Ordinary Portland cement 53 grade – Specification." IS 12269: 2013. *Bureau of Indian Standards, New Delhi* (2013).
28. "Specification for coarse and fine aggregates from natural sources for concrete." IS: 383-2016. *Bureau of Indian Standards, New Delhi* (2016)
29. "Methods of Test for Aggregates for Concrete." IS 2386: 1963 – Reaffirmed 2002. *Bureau of Indian Standards, New Delhi* (2002)
30. "Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures." ASTM D2172/D2172M-17 *ASTM International*. (2017).
31. Chesner, W.H., Collins, R.J. and MacKay, M.H., "User guidelines for waste and by-product materials in pavement construction" No. FHWA-RD-97-148 (1998).
32. "Proportioning-Guideline, Indian Standard Concrete Mix." IS 10262: 2009. *Bureau of Indian Standards, New Delhi* (2009).
33. "MORTH Specifications for Road and Bridge Works, 5th revision" *Indian Roads Congress (IRC), Ministry of Road Transport & Highways (MORTH)* (2013)