

Badanie wytrzymałości betonu z przetworzonym kruszywem z recyklingu

A study of concrete strength with processed recycled aggregate

Słowa kluczowe: gęstość właściwa, kruszywo z recyklingu, projektowanie mieszanek betonowych, przetwarzanie kruszyw

1. Wstęp

Masowe stosowanie kruszywa naturalnego, związane z rozwojem budownictwa, nabiera coraz większego znaczenia ze względu na zasady zrównoważonego rozwoju. Aby ograniczyć wykorzystywanie kruszyw naturalnych można stosować kruszywa z recyklingu. Jednak te kruszywa cechują się dużą retencją wody, co jest spowodowane dużą zawartością zaprawy związanej z powierzchnią kruszywa, co utrudnia ich szersze wykorzystanie. Świeża mieszanka betonowa, zawierająca kruszywo z recyklingu, w celu uzyskania urabialności porównywalnej z betonem z kruszywa naturalnego, wymaga dodatkowej ilości wody. Taka zmiana może mieć duży wpływ na późniejsze właściwości mechaniczne betonu. Podobnie tekstura i kształt ziaren zastosowanego kruszywa grubego mogą mieć duży wpływ na urabialność, wytrzymałość i trwałość betonu. Kruszywa łamane, o chropowatej powierzchni, tworzą dużo pustych przestrzeni i wymagają więcej wody do produkcji betonu nadającego się do obróbki, w porównaniu z otoczkami o gładkiej powierzchni (1-3). Gęstość kruszyw z recyklingu betonu [KRB] jest mniejsza niż naturalnych kruszyw łamanych (4). Uważa się, że powodem mniejszej gęstości jest obecność starej zaprawy. Gęstość właściwa i gęstość nasypowa kruszyw poddanych recyklingowi są mniejsze niż gęstość naturalnego kruszywa granitowego [NKG] (5). Wynika to z większej porowatości zaprawy związanej z kruszywem. Zwiększa to równocześnie nasiąkliwość, a także wytrzymałość betonu wraz ze wzrostem maksymalnego wymiaru kruszyw, uzyskiwanych ze starego betonu. Szybka absorpcję wody kruszyw ze starego betonu potwierdzono w badaniach (6-8). Podczas pierwszych 30 minut moczenia kruszyw z recyklingu osiągnięto prawie 75% zdolności absorpcji wody kruszyw naturalnych po 24 godzinach. Wraz ze wzrostem udziału kruszyw z recyklingu utrata urabialności w pierwszych 10 minutach była odpowiednio większa. Dodatkowa ilość wody jest więc niezbędna do osiągnięcia urabialności porównywalnej z betonem z kruszywa naturalnego, ze względu na większą nasiąkliwość kruszyw z recyklingu, która jest wynikiem

Key words: attrition period, recycled aggregate, specific gravity, prediction, mix design

1. Introduction

The high mass utilization of natural aggregate, caused by the building development, has the increased importance, due to the rules of sustainable development. In order to overcome the utilization of natural aggregate, recycled aggregate can be used as a substitution material. However, recycled materials are portrayed by a high water retention limit identified with the proximity of old mortar adhered to the surface of materials hampers their wide utilization. The water ingestion limit influences both fresh and hardened state properties. At fresh state, the mix design of concrete with recycled aggregate requires an extra amount of water to acquire a comparative workability with that of natural aggregate. Such an alteration may clearly influence the mechanical properties of recycled aggregate concrete. Similarly the particle texture and shape characteristics of the recycled coarse aggregate used can significantly affect the workability, strength, and durability of the concrete. Angular aggregates with rough surface texture possess more voids compared to that of round aggregate of smooth surface texture demanding more water to produce workable concrete (1-3). The specific gravity of waste concrete aggregates [WCA] was lower than normal crushed aggregates (4). The reason for this was thought to be the fact that there was a certain proportion of mortar over these aggregates. However, the specific gravity and bulk density of recycled aggregates are comparatively lower than that of natural granite aggregate [NGA] (5). This is because of higher porosity of mortar adhered to aggregate surfaces which in turn gives higher water absorption capacity and also the strength increases with the increase in maximum size of the recycled aggregate. A rapid water absorption rate was observed for recycled aggregate (6-8). During the first 30 minutes of the soaking period almost 75% of the 24 hour water absorption capacity was reached. With increase in replacement ratio workability loss in the first 10 minutes was progressively higher. Additional amount of water is

zanieczyszczeń i pozostałości zaprawy (9-11). Przy mniejszym stosunku w/c urabialność maleje wraz ze zwiększeniem udziału kruszywa z recyklingu. Przy zmniejszonym stosunku w/c i 100% udziale kruszywa z recyklingu beton osiągnął większą wytrzymałość w porównaniu z betonem referencyjnym. Ale przy stałym stosunku w/c i 100% udziale kruszywa z recyklingu uzyskana wytrzymałość była mniejsza. Badano także płukane kruszywa z recyklingu, wykorzystywane jako kruszywo grube (12,13). Okazało się, że czyszczenie kruszyw z recyklingu wpłynęło bardzo korzystnie na jakość betonu. Gdy usunięto pyły, zanieczyszczenia i resztki zaprawy z powierzchni kruszywa wiązanie kruszywo-zaczyn było znacznie lepsze. Przy zmniejszonym w/c, po zastosowaniu płukania kruszywa zauważalna była również mniejsza różnica pomiędzy wytrzymałością betonu z kruszywa z recyklingu [BKR] a betonu z kruszywa naturalnego [BKN]. Podstawowym czynnikiem wpływającym na tę zmianę jest duża wytrzymałość zaczynu przy małym stosunku w/c. Mieszanka betonowa z kruszywa z recyklingu ma gorszą urabialność w porównaniu z mieszanką z kruszywa naturalnego, ze względu na porowate i chropowate powierzchnie kruszywa z recyklingu [14]. Wytrzymałość na ścislenie BKR jest mniejsza niż w przypadku BKN, co wynika z pozostałości starej zaprawy o dużej porowatości, która zmniejsza wytrzymałość.

W pracy zbadano próbki betonów o dwóch klasach wytrzymałości, z różnym udziałem kruszywa z recyklingu. Przeprowadzono także badania właściwości kruszyw.

2. Znaczenie badań

Zastąpienie kruszyw naturalnych kruszywem z recyklingu zmienia właściwości betonu. Właściwości fizyczne kruszyw z recyklingu mają znaczny wpływ na trwałość i wytrzymałość betonu. Jednakże prace nad badaniem wpływu kruszywa z recyklingu na te właściwości są bardzo ograniczone. W tej pracy podjęto próbę określenia właściwości kruszyw z recyklingu przez określenie współczynnika „kanciastości” według normy indyjskiej (19), gęstości właściwej i absorpcji wody. Badania pokazują zależność gęstości kruszywa z recyklingu od ilości starej zaprawy w tym kruszywie, co wpływa na nasiąkliwość oraz wpływ „kanciastości” na gęstość względną kruszywa z recyklingu. W tej pracy poddano badaniom próbki betonów, obejmujących dwie różne klasy oraz różny udział kruszywa z recyklingu w całkowitej masie kruszywa. KRB poddano obróbce polegającej na ścieraniu kruszywa w bębnie Devala przez dwie godziny i cztery godziny. Następnie badano wpływ tej obróbki na właściwości betonów.

3. Materiały

Zastosowano cement portlandzki klasy 53, zgodny z normą IS12269 (15), o następujących właściwościach: gęstość względna – 3,09, konsystencja normowa – 33%, początek czasu wiązania – 48 minut, koniec czasu wiązania – 215 minut. Zastosowano kruszywo zgodne z normą IS383 [16]. Jako kruszywo drobne wykorzystano żwir rzeczny, jako „piasek”. Gęstość względną, gęstość nasypowa

essential to attain comparable workability to that of natural aggregate concrete because of higher absorption capacity of recycled aggregate which is due to the presence of impurities and bond mortar content (9-11). At lower w/c ratio the workability decreases with increase in replacement of recycled aggregate. At lower w/c ratio, 100% recycled aggregate concrete achieves higher strength compared to normal concrete. But at the same w/c ratio concrete with 100% recycled aggregate is showing lower value. Some of the researchers studied the washed recycled aggregate utilized as coarse aggregate (12-13). They found that washed recycled aggregate involved higher quality than that of unwashed recycled aggregate. More prominent bond impacts were created when pollutants, powder and hurtful materials from the surface of recycled aggregates are washed out. They likewise distinguished that at low w/c ratio, the strength ratio of recycled aggregate concrete [RAC] to that of natural aggregate concrete [NAC] is reduced. Primary component which prompt this outcome is the high strength of the paste at low w/c ratio. The recycled aggregate concrete has worse workability as compared to the concrete made of natural aggregate, due to the porous and rough surfaces of the recycled aggregate (14). The compressive strength of recycled aggregate concrete are lower than natural aggregate concrete due to pores present in old mortar which weakens paste-aggregate bond.

Fifteen types of concrete are presented in this work with different RCA contents and different angularity, for two grades of concrete together with the behaviour of the concrete that incorporated the RCA. Testes were performed for the study of the properties of both the aggregates and the concretes.

2. Research significance

Substitution of natural aggregate with recycled aggregate alters the properties of concrete. Recycled aggregate physical characteristics have significant influence on concrete properties mechanical as well as durability concerns. However, limited work has been done in studying the effects of these characteristics systematically and quantitatively. In this work an attempt has been made to study the recycled aggregate characteristics specifically its angularity, specific gravity and water absorption. This study provides a relation of specific gravity with amount of mortar adhered on the recycled aggregate yielding its water absorption capacity and the effect of angularity on the specific gravity of recycled aggregate. In the present investigation fifteen mixes, with 0%, 25%, 50%, 75% and 100% of replacement with RCA and RCA attritioned for two hours and four hours for two different grades of concrete have been considered to understand the behaviour of concrete taking in to account the above mentioned parameters.

3. Materials

Ordinary Portland Cement [OPC] of 53 grade conforming to IS12269 (15) was used. Properties of cement are as follow: specific gravity – 3.09, standard consistency – 33%, initial setting time – 48

i moduł rozdrobnienia piasku wynosiły odpowiednio, 2,68 g/cm³, 1,41 g/cm³ i 3,25. Zastosowane kruszywo grube uzyskano z granitu, w kruszarce laboratoryjnej, o średnicy nominalnej 16 mm. Gęstość względna, gęstość nasypowa i moduł rozdrobnienia użytego kruszywa grubego wynosiły odpowiednio, 2,71 g/cm³, 1,46 g/cm³ i 7,1. Gruboziarniste KRB, o średnicy nominalnej 16 mm, uzyskano za pomocą kruszarki laboratoryjnej. W doświadczeniach stosowano wodę wodociągową.

4. Program badań

W celu zbadania wpływu udziałów kruszywa z recyklingu i kruszywa naturalnego, jak również czasu obróbki kruszywa z recyklingu na właściwości świeżej mieszanki i stwardniałego betonu, doświadczenia przeprowadzono w dwóch etapach:

Etap I: Badanie właściwości przetworzonego kruszywa z recyklingu.

Etap II: Oznaczanie wytrzymałości próbek na ściskanie.

4.1. Etap I, metody

W pracy uwzględniono różne właściwości fizyczne kruszywa, które wpływają na wytrzymałość i urabialność betonu. Zbadanie właściwości fizycznych kruszywa jest czasochłonne, ponieważ obejmuje określenie nasiąkliwości, w którym okres moczenia trwa 24 godziny. Znajomość tej właściwości jest niezbędna do zaprojektowania mieszanki betonowej z kruszywem z recyklingu. Aby skrócić czas badań, oznaczenia wykonano na próbkach kruszywa jednego rodzaju, na podstawie których oszacowano właściwości kruszyw o różnym udziale kruszywa z recyklingu. Tak więc badanie zostało przeprowadzone w dwóch etapach. W pierwszym etapie określono właściwości fizyczne kruszyw jednego rodzaju. Wyniki przedstawiono na wykresach. W drugim etapie, znając już gęstość i nasiąkliwość kruszyw dane dla kruszyw mieszanych, o różnych udziałach, odczytywano z wykresów.

Badania gęstości i wodożądności kruszyw z recyklingu jak i próbek z kruszywami mieszanymi, określono zgodnie z normą IS2386-3-1963 (17). Pobrano początkową objętość każdego z kruszyw [m_i]. Po określeniu gęstości poszczególne próbki KRB poddano kąpeli w 0,1 M HCl, w temperaturze 20°C, przez 24 godziny, a następnie płukano w wodzie destylowanej. Uzyskaną po badaniu objętość kruszywa oznaczono jako m_f . Określono w ten sposób udział starej zaprawy w badanym kruszywie, co wyliczono zgodnie z równaniem [1]:

$$\% \text{ starej zaprawy} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \cdot 100\% \quad [1]$$

Badania czasu ścierania KRB o uziarnieniu 12,5-16 mm przeprowadzono w bębnie Devala, trwające 2 i 4 godziny. Badane próbki oznaczano A1 i A2, a kruszywo nie poddane badaniu oznaczono A0. Uzyskany po badaniu materiał przesiano w celu usunięcia drobniejszych ziaren, dokładnie przemyto i wysuszono. Próbki

mins, final setting time – 215 mins. Aggregates conforming to IS 383 (16) were used. The fine aggregate used in this study was acquired from river source. The bulk density, specific gravity, and fineness modulus of the sand used were 1.41 g/cm³, 2.68, and 3.25 respectively. The coarse aggregate used was acquired from a local crushing unit of granite having 16 mm nominal size. The bulk density, specific gravity and fineness modulus of the coarse aggregate used were 1.46 g/cm³, 2.71 and 7.1 respectively. The recycled coarse aggregate was obtained from a local crushing unit having 16 mm nominal size. Potable water was used in the experimental work for both mixing and curing.

4. Experimental program

In order to understand the behaviour of concrete in fresh and the hardened state, considering replacement percentages and attrition period of recycled coarse aggregate, an experimental work has been conducted in two phases:

Phase I: Investigation of processed recycled aggregate properties.

Phase II: Compressive strength determination on the test specimens.

4.1. Phase I: Experimental

In this study the various physical properties of aggregate which influence the strength and workability of concrete are considered. The determination of physical properties of aggregate takes much time as it involves 24 hours soaking period for water absorption, the basic property which is used for designing the mix involving recycled aggregate. In order to reduce this, an experimental study was conducted on a sample of single sized aggregate particles from which combined or lumped mass of aggregate properties are drawn. So, the investigation was done in two stages. In the initial stage tests required for the determination of physical properties of aggregate were done on certain number of single pieces of aggregate. The results plotted on the graphs. In the later stage knowing the specific gravity values for the combined material, water absorption values are drawn from the already plotted graphs.

Specific gravity and water absorption tests were conducted on single and combined recycled aggregate as per IS 2386-3(1963) (17). Initial volume of individual samples [m_i] was taken. After conducting the specific gravity test, the single recycled aggregate samples were subjected to pre-soaking in 0.1 M HCl at 20°C for 24 h and then washed with distilled water to remove the acidic solvents. The final mass of aggregate residues obtained was taken as [m_f] to find out the bond mortar percentage given in equation (1)

$$\% \text{ bond mortar} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \cdot 100\% \quad [1]$$

Deval's attrition machine was used for performing attrition on combined recycled aggregate of size fraction 16-12.5 mm for two different periods. The aggregate sample on which attrition was

do badania wpływu obróbki kruszywa KRB przez ścieranie na właściwości betonu z jego udziałem wynoszącym 25%, 50%, 75% i 100% oznaczono odpowiednio numerami 2, 3, 4 i 5, a bez jako 1. Kruszywa dokładnie zhomogenizowano metodą kwartowania, zgodnie z normą IS2430-1986 (18). Poszczególne mieszniny kruszyw oznaczono według schematu: A01, gdzie pierwszy człon [A0] oznacza ścieralność kruszywa grubego, a drugi człon to procent zamiany kruszywem z recyklingu. Dla przygotowanych wcześniej porcji kruszywa wyznaczono współczynnik „kanciastości” [AN], zgodnie z normą IS 2386-1963 część I (19), na podstawie równania (2):

$$AN = 67 - \frac{100 \cdot W}{C \cdot G_A} \quad [2]$$

gdzie: W – masa zagęszczonego kruszywa, kg; C – objętość cylindra, m³; G_A – gęstość względna danej frakcji kruszywa

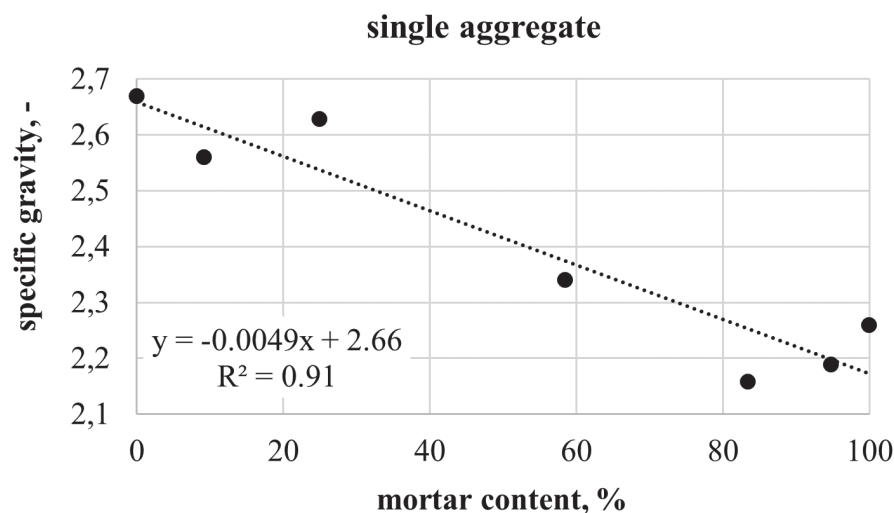
4.2. Etap I – wyniki i dyskusja

4.2.1. Zmienność gęstości względnej i nasiąkliwości w zależności od udziału zaprawy dla kruszywa z recyklingu i kruszywa mieszanych

Dane pokazane na rysunkach 1 i 2 pokazują, że wraz ze wzrostem udziału starej zaprawy w kruszywie, maleje gęstość względna i rośnie zdolność absorpcji wody. Zawartość zaprawy cementowej na ziarnach kruszywa zwiększa udział pustek powietrznych i jest najprawdopodobniej przyczyną zaobserwowanych zmian. Rysunek 5 pokazuje, że mierzone wielkości w zasadzie nie zależą od długości czasu poddania kruszywa ścieralności.

4.2.2. Wpływ udziału KRB na gęstość względną i absorpcję wody

Rysunki od 1 do 4 obrazują liniową zmianę gęstości względnej oraz nasiąkliwości ze zmianą udziału zaprawy, jednak obserwuje się niewielkie odchylenie, które obliczono za pomocą regresji liniowej. Równania linii tendencji i odpowiadające im współczynniki regresji



Rys. 1. Zależność gęstości względnej od pozostałości starej zaprawy dla kruszywa z recyklingu

Fig. 1. Variation of specific gravity with mortar content for single aggregate

applied for a period of two hours and four hours is designated as A1 and A2 respectively and the aggregate without attrition is designated as A0. The material so obtained from the cylinder was sieved for removing finer particles, washed thoroughly and kept for drying. The quantity of aggregate obtained from artificial attrition was sampled based on different replacement percentages of natural aggregate with recycled aggregate such as 0%, 25%, 50%, 75% and 100% numbered as 1, 2, 3, 4, 5 respectively. The aggregate was mixed thoroughly, using coning and quartering method of sampling as per IS 2430-1986 (18), filled in bags and stacked separately. Each combination is designated as A01, where first letter [A0] represents coarse aggregate attrition and the second one represents replacement percentage of recycled aggregate. For this sampled aggregate angularity number [AN] test was conducted as per IS: 2386-1963 Part-I (19) based on the following equation (2):

$$AN = 67 - \frac{100 \cdot W}{C \cdot G_A} \quad [2]$$

where: W – mass of the compacted aggregate in kg, C – volume of cylinder in m³, G_A – specific gravity of aggregate size fraction.

4.2. Phase I: Results and discussion

4.2.1. Variation of specific gravity and water absorption with percentage of mortar for single and combined recycled aggregate

Data in Figs. 1 and 2 show, that with increase in percentage of mortar adhered to the aggregate, specific gravity values decreases and water absorption capacity increases. The presence of adhered cement mortar on the aggregate particles having higher percentage of voids is most likely the reason for such results. Figs. 3 and 4 show that there is no appreciable change in these values with increase in attrition period

4.2.2. Correlation between variation of specific gravity and water absorption with % of mortar for single aggregate and combined aggregate

Figures 1 to 4 showed the linear variation of specific gravity, water absorption with % of mortar, however a little deviation is observed which can be studied by linear regression analysis. The trend line equations and corresponding regression coefficients are shown on the respective figures. From these equations one can conclude that, the trend line equations of variation of specific gravity [SG] with mortar content [M] for single recycled aggregate and combined recycled aggregate are very similar:

$$SG_{\text{single aggregates}} = -0,0049M + 2,66, \quad R^2 = 0,91 \quad [3]$$

$$SG_{\text{combined aggregates}} = -0,0052M + 2,74, \quad R^2 = 0,92 \quad [4]$$

przedstawiono na rysunkach. Z równań wynika, że zmienność gęstości względnej [SG] w zależności od udziału zaprawy [M] dla jednego kruszywa i kruszyw mieszanych są prawie takie same:

$$SG_{\text{kruszywo z recyklingu}} = -0,0049M + 2,66, R^2 = 0,91 \quad [3]$$

$$SG_{\text{kruszywo mieszane}} = -0,0052M + 2,74, R^2 = 0,92 \quad [4]$$

Podobnie, równania linii zmienności nasiąkliwości [WA] w zależności od udziału zaprawy dla kruszywa z recyklingu i kruszyw mieszanych są prawie takie same:

$$WA_{\text{kruszywo z recyklingu}} = 0,0720M + 0,007, R^2 = 0,93 \quad [5]$$

$$WA_{\text{kruszywo mieszane}} = 0,0708M + 0,007, R^2 = 0,95 \quad [6]$$

4.2.3. Zależność współczynnika „kanciastości” od udziału KRB

Wyniki badania współczynnika kanciastości po dwóch i czterech godzinach ścierania zamieszczono w tablicy 3, a zmienność przedstawia wykres na rysunku 5, który pokazuje tendencję wzrostową wraz ze wzrostem udziału KRB i tendencję spadkową z wydłużeniem czasu ścierania.

4.3. Etap II

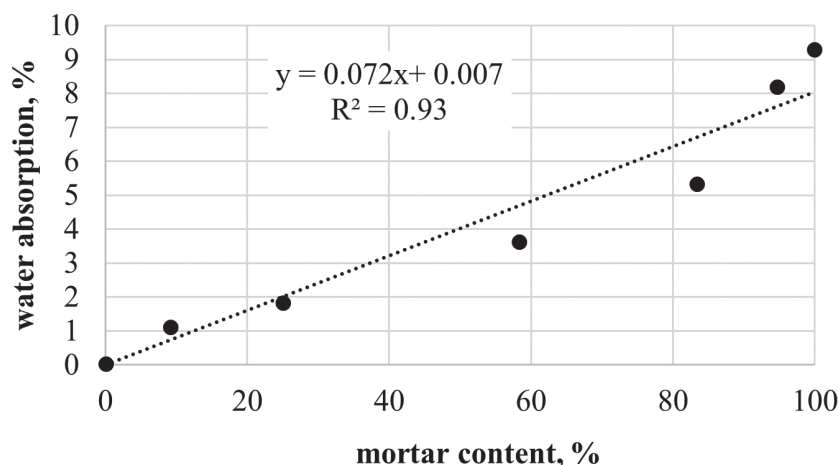
4.3.1. Badania

Składy mieszanek betonu M25 i M35, które podano w tablicach 5 i 6, obliczono zgodnie z normą IS 10262 (20). Przygotowano i zbadano piętnaście mieszanek o różnym udziale KRB: 0%, 25%, 50%, 75% i 100% w całkowitej zawartości kruszywa grubego, wraz z próbką referencyjną (0%) oraz dwu i czterogodzinnym czasem ścierania dla każdej klasy betonu. Beton nie zawierający KRB i kruszywo nie poddane ścieraniu przyjęto jako wzorcowe. Przed formowaniem próbek przeprowadzono badanie opadu stożka w celu określenia konsystencji betonu, zgodnie z normą IS 1199-1959 (21). Mieszanie betonu i formowanie próbek przeprowadzono w laboratorium, a następnie próbki rozformowano po 24h ± 2h od czasu mieszania i umieszczono w wodzie w temperaturze 25±2°C na 27 dni. Zbadano wytrzymałość na ścislenie wszystkich próbek, zgodnie z normą IS 516-1959 (22).

4.3.2. Składy mieszanek

Mieszanki oznaczono według schematu: M_aA01, gdzie M_a oznacza klasę betonu, A0 oznacza rodzaj kruszywa grubego z uwzględnieniem ścierania, a 1 oznacza udział KRB. Analogicznie dla drugiej klasy próbek oznaczono jako M_b. Obliczone na podstawie normy IS 10262 (20) składy mieszanek betonów M25 i M35 z naturalnego kruszywa grubego wynoszą: M25 – 1 : 2,97 : 2,27 oraz M35: – 1 : 2,46 : 1,8. Jednak biorąc pod uwagę efekt ścierania i zamiany

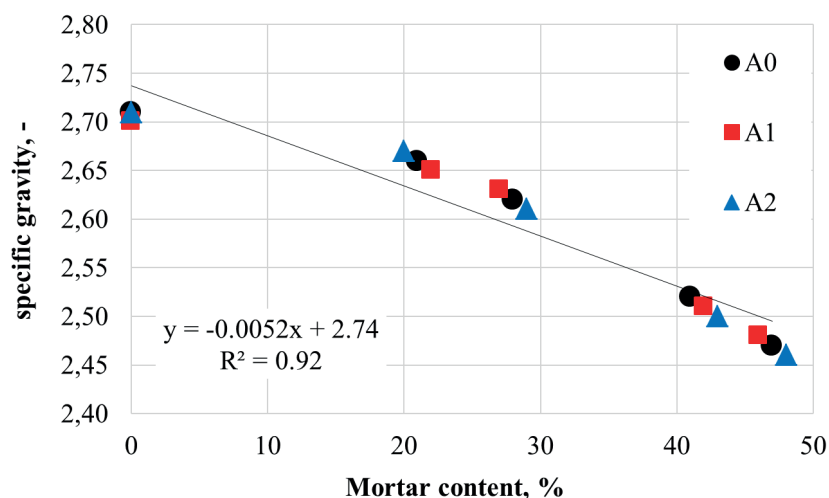
single aggregate



Rys. 2. Zależność wodożądności od pozostałości starej zaprawy dla kruszywa z recyklingu

Fig. 2. Variation of water absorption with mortar content for single aggregate

combined aggregate



Rys. 3. Zależność gęstości względnej od udziału starej zaprawy w kruszywie mieszanym

Fig. 3. Variation of specific gravity with mortar content for combined aggregate

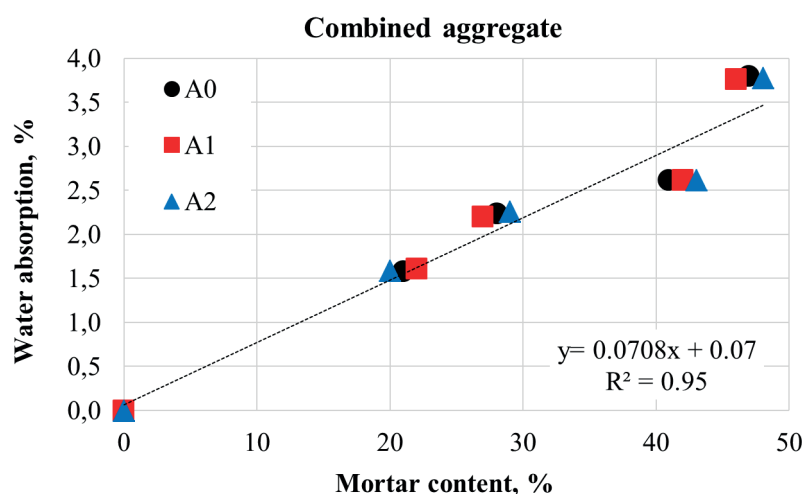
Similarly, the trend line equations of variation of water absorption [WA] with mortar content for single aggregate and combined aggregate are nearly the same:

$$WA_{\text{single aggregates}} = 0,0720M + 0,007, R^2 = 0,93 \quad [5]$$

$$WA_{\text{combined aggregates}} = 0,0708M + 0,007, R^2 = 0,95 \quad [6]$$

4.2.3. Correlation of angularity number with replacement of RCA

The results of angularity number for two and four hours of attrition are presented in Table 1 and the variation is plotted in Fig. 5, which shows the increasing trend with the percentage replacement of recycled aggregate and decreasing trend with attrition period.



Rys. 4. Zależność wodochłonności od udziału starej zaprawy w kruszywie mieszanym

Fig. 4. Variation of water absorption with % mortar for combined aggregate

KRB, rzeczywiste składki mieszanek różniły się ze względu na zmianę nasiąkliwości i gęstości względnej. Składki mieszanek dla różnych rodzajów betonu podano w tablicach 4 i 5.

4.3.3. Wytrzymałość na ściskanie

Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono na belkach o wymiarach 100×100×200 mm, po 28 dniach dojrzewania, zgodnie z normą IS 516-1959 (22), na prasie o maksymalnym obciążeniu 1000 KN.

5. Omówienie wyników

5.1. Zależność urabialności betonu od ścierania i udziału KRB

Na urabialność ma wpływ zawartość KRB i jego właściwości. Opad stożka mieszanek z różnymi udziałami KRB zamieszczono w tablicy 4. Aby pokazać zmienność, na osi rzędnych podano opad stożka, a udział KRB na osi odciętych, oddzielnie dla każdego rodzaju kruszywa: A0, A1 i A2, jak to pokazano na rysunku 6. Wraz ze wzrostem udziału KRB następuje pogorszenie urabialności betonu. Wynika to z pozostałości zaprawy, która zwiększa nasiąkliwość. Zawartość porów, zdolność absorpcyjna kruszywa w stosunku do gęstości względnej, tekstura i współczynnik „kanciastości” KRB są przyczynami gorszej urabialności betonu z KRB.

5.2. Zależność wytrzymałości na ściskanie od ścierania i udziału KRB

Wytrzymałość na ściskanie każdej mieszanki obliczono jako średnią z 3 próbek o wymiarach 100 mm × 100 mm × 200 mm. Wyniki

4.3. Phase II

4.3.1. Experimental

The mix proportions for M25 and M35 grade of concrete were calculated as per IS 10262 (20), which are tabulated in Tables 2 and 3. Fifteen types of mixes with varying replacement percentage of recycled aggregate such as 0%, 25%, 50%, 75% and 100% of the total coarse aggregate content along with zero, two and four hour attrition period have been prepared for each grade. Concrete with 0% RCA content and attrition free aggregate was regarded as reference concrete. Before casting the specimens, slump cone test was carried out in determining the workability of concrete as per IS 1199-1959 (21). Mixing and casting of specimens was carried out in laboratory. Samples were removed from the moulds after 24 ± 2 hours from the time of mixing and then submerged in water at temperature 25 ± 2°C for a curing period of 28 days. All the specimens were tested for compressive strength according to IS 516-1959 (22).

4.3.2. Mix proportions

Each mix is designated as M_aA01 where M_a represents grade of concrete A0 represents designation of coarse aggregate based on

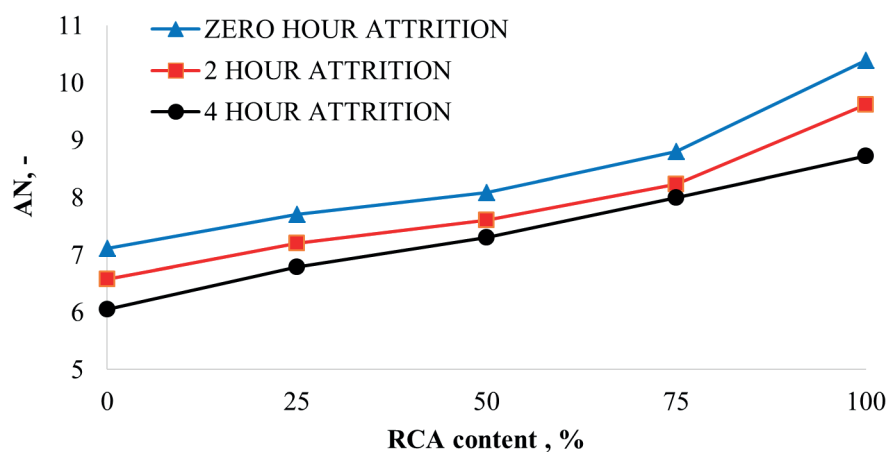
Tablica 1 / Table 1

WSPÓŁCZYNNIK KANCIASCI KRSZYW

ANGULARITY NUMBER OF COMBINED AGGREGATE

%RA	A0	A1	A2
0	7.11	6.58	6.05
25	7.70	7.20	6.79
50	8.09	7.60	7.30
75	8.80	8.23	8.00
100	10.39	9.62	8.72

Angularity number vs RCA content



Rys. 5. Zmiana współczynnika kanciastości w zależności od udziału kruszywa z recyklingu.

Fig. 5. % RCA vs angularity number

Tablica 2 / Table 2

SKŁADY MIESZANEK KLASY M25

MIX PROPORTIONS FOR M25 GRADE OF CONCRETE

Mix Mieszanka	Cement, kg/m ³	NA Kruszywo naturalne, kg/m ³	RA Kruszywo z recyklingu, kg/m ³	Total coarse aggregate Kruszywo grube, kg/m ³	FA Kruszywo drobne, kg/m ³	Effective water content Woda efektywna, kg/m ³	Water added Woda dodana do mieszanki, kg/m ³	Total water Woda całkowita, kg/m ³	W/C	Mix ratio Proporcje mieszanek
M _a A01	360	1069	0	1069	818.6	172.8	0	172.8	0.48	1:2.97:2.27
M _a A02	360	784	261	1045	815.5	172.8	2.7	175.5	0.487	1:2.9:2.27
M _a A03	360	514	514	1027	814.2	172.8	3.8	176.6	0.49	1:2.85:2.26
M _a A04	360	247	740	987	813.2	172.8	4.5	177.3	0.492	1:2.74:2.26
M _a A05	360	0	965	965	811.1	172.8	6.6	179.4	0.498	1:2.68:2.25
M _a A11	360	1035	0	1035	818.6	172.8	0	172.8	0.48	1:2.96:2.27
M _a A12	360	781	260	1041	815.5	172.8	2.8	175.6	0.487	1:2.89:2.27
M _a A13	360	516	516	1031	814.3	172.8	3.8	176.6	0.49	1:2.87:2.26
M _a A14	360	246	738	983	813.5	172.8	4.5	177.3	0.492	1:2.73:2.26
M _a A15	360	0	969	969	811.2	172.8	6.5	179.3	0.498	1:2.69:2.25
M _a A21	360	1069	0	1069	818.6	172.8	0	172.8	0.48	1:2.97:2.27
M _a A22	360	787	262	1049	815.5	172.8	2.7	175.5	0.487	1:2.91:2.27
M _a A23	360	512	512	1024	814.2	172.8	3.9	176.7	0.49	1:2.84:2.26
M _a A24	360	245	735	980	813.5	172.8	4.5	177.3	0.492	1:2.72:2.26
M _a A25	360	0	961	961	811.1	172.8	6.5	179.3	0.498	1:2.67:2.25

Tablica 3 / Table 3

SKŁADY MIESZANEK KLASY M35

MIX PROPORTIONS FOR M35 GRADE OF CONCRETE

Mix Mieszanka	Cement, kg/m ³	NA Kruszywo naturalne, kg/m ³	RA Kruszywo z recyklingu, kg/m ³	Total coarse aggregate Kruszywo grube, kg/m ³	FA Kruszywo drobne, kg/m ³	Effective water content Woda efek- tywna, kg/m ³	Water added Woda dodana do mieszanki, kg/m ³	Total water Woda całkowita, kg/m ³	W/C	Mix ratio Proporcje mieszanek
M _b A02	420	1034	0	1034	792	176.4	0	176.4	0.42	1:2.46:1.89
M _b A02	420	758	253	1011	789	176.4	2.8	179.2	0.426	1:2.41:1.88
M _b A03	420	497	497	994	787	176.4	3.9	180.3	0.429	1:2.38:1.88
M _b A04	420	239	716	955	787	176.4	4.6	181	0.43	1:2.27:1.87
M _b A05	420	0	933	933	784	176.4	6.7	183.1	0.436	1:2.22:1.87
M _b A11	420	1029	0	1029	792	176.4	0	176.4	0.42	1:2.45:1.89
M _b A12	420	755	252	1006	789	176.4	2.8	179.2	0.426	1:2.4:1.88
M _b A13	420	499	499	997	787	176.4	3.9	180.3	0.429	1:2.37:1.87
M _b A14	420	238	713	951	787	176.4	4.6	181	0.43	1:2.26:1.87
M _b A15	420	0	937	937	784	176.4	6.6	183	0.435	1:2.23:1.87
M _b A21	420	1034	0	1034	792	176.4	0	176.4	0.42	1:2.46:1.89
M _b A22	420	761	254	1014	789	176.4	2.8	179.2	0.426	1:2.41:1.88
M _b A23	420	495	495	990	787	176.4	4	180.4	0.429	1:2.36:1.87
M _b A24	420	236	709	945	786	176.4	4.6	181	0.43	1:2.25:1.87
M _b A25	420	0	929	929	784	176.4	6.6	183	0.435	1:2.21:1.87

Tablica 4 / Table 4

OPAD STOŻKA W ZALEŻNOŚCI OD ILOŚCI KRUSZYWA Z RECYKLINGU
 VARIATION OF SLUMP WITH RECYCLED AGGREGATE CONTENT

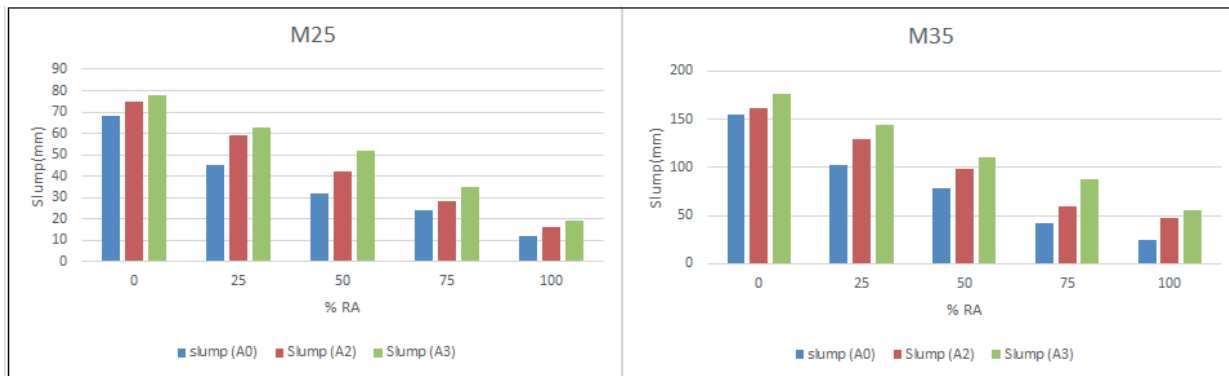
%RA	Slump, mm					
	A0		A1		A2	
	M25	M35	M25	M35	M25	M35
0	68	155	75	162	78	176
25	45	102	59	130	63	144
50	32	79	42	98	52	110
75	24	42	28	60	35	88
100	12	25	16	48	19	56

Tablica 5 / Table 5

WPLYW RODZAJU I UDZIAŁU KRUSZYWA Z RECYKLINGU NA
 WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE

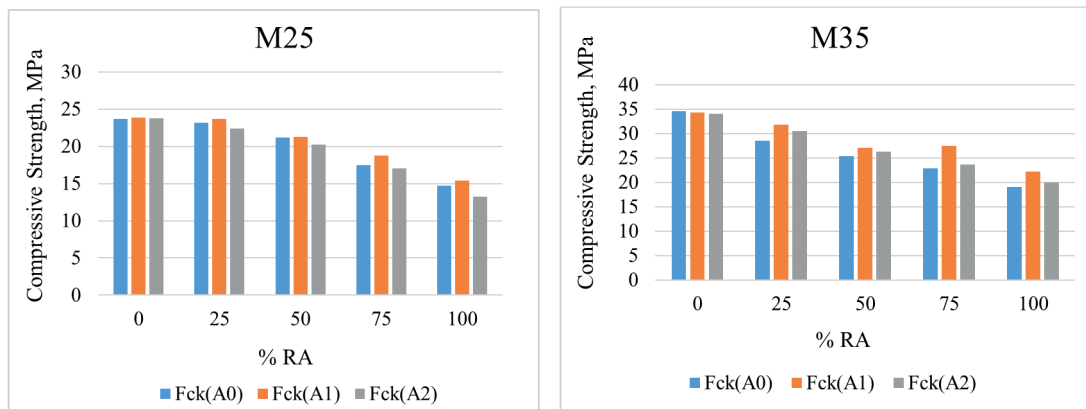
INFLUENCE OF TYPE OF RECYCLED AGGREGATE AND ITS AMOUNT
 ON COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE

%RA	f_{ck} (A0), MPa		f_{ck} (A1) MPa		f_{ck} (A2) MPa	
	M25	M35	M25	M35	M25	M35
0	23.7	34.6	23.9	34.3	23.8	34.1
25	23.2	28.5	23.7	31.8	22.4	30.5
50	21.2	25.4	21.3	27.1	20.2	26.3
75	17.5	22.8	18.8	27.4	17	23.7
100	14.7	19	15.4	22.2	13.2	20



Rys. 6. Opad stożka w zależności od udziału kruszywa z recyklingu

Fig. 6. Slump vs. recycled aggregates content for two grades of concrete



Rys. 7. Wpływ udziału kruszywa z recyklingu na wytrzymałość na ściskanie dla obu klas betonu

Fig. 7. Variation of compressive strength with % RA for two grades of concrete

wytrzymałości na ściskanie, dla kruszyw A0, A1 i A2 z różnymi udziałami KRB, zamieszczono w tablicy 5.

Wytrzymałość na ściskanie betonu z KRB zależy od udziału tego kruszywa. Największą wytrzymałość zawsze wykazywały próbki nie zawierające KRB, a wytrzymałość próbek zawierających to kruszywo malała z jego wzrostem, a spadkiem kruszywa naturalnego. Jest to wynikiem dużej porowatości resztek zaprawy oraz samego procesu kruszenia, wywołującego pękanie, przez co powstają osłabione strefy w kruszonym betonie. Zwiększanie udziału KRB

attrition and 1 represent recycled aggregate percentage. Similarly for second grade it is represented as M_b . The basic mix proportions obtained for M25 and M35 grades of concrete using natural coarse aggregate based on IS 10262 (20) is 1:2.97:2.27 for M25 and 1:2.46:1.89 for M35. However, considering the effect of attrition and replacement of RCA, the mix design proportions varied, because of change in water absorption and specific gravity values. Finally the proportions arrived for different grades of concrete are given in the Tables 2 and 3.

powoduje wzrost słabych stref oraz prawdopodobieństwo ich łączenia się w ciągłą sieć spękań. Stąd po przekroczeniu pewnego progowego udziału KRB występuje większe zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie. Zmniejszenie wytrzymałości betonu z 50% udziałem KRB wynosi około 15-20%, w porównaniu do betonu bez dodatku KRB. Beton z KRB, a bez kruszywa naturalnego wykazał zmniejszenie wytrzymałości o około 45%. Dwugodzinny okres ścierania powoduje poprawę wytrzymałości o około 7% dla betonu M25 i o 20% dla betonu M35, który zawierał 75% KRB.

6. Wnioski

1. Gęstość względna kruszywa z recyklingu betonu waha się od 2,67 do 2,26 g/cm³, przy czym udział starej zaprawy wykazuje duże wahania.
2. Gęstość względna mieszanego kruszywa zmniejsza się wraz ze zwiększaniem się udziału KRB. Nie ma dużych zmian gęstości względnej kruszywa mieszanego, spowodowanych czasem ścierania. Równania regresji gęstości względnej z udziałem mieszanych i niemieszanych KRB były podobne. Na podstawie tych równań, znając gęstość względną, można oszacować pozostałość starej zaprawy i nasiąkliwość badanego kruszywa z recyklingu, bez przeprowadzania badań.
3. Na nasiąkliwość kruszywa mieszanego ma wpływ udział KRB. Ilość wody zwiększa się proporcjonalnie do KRB, a proces ścierania nie ma dużego wpływu na tę wartość. Zachodzi szybka absorpcja w początkowym okresie [pierwsza godzina] wsiąkania wody zarówno w przypadku mieszanego jak i niemieszanego KRB.
4. Współczynnik „kanciastości” rośnie się wraz ze wzrostem udziału kruszywa z recyklingu i zmniejsza się z wydłużeniem okresu jego ścierania.
5. Spadek urabialności postępuje wraz ze zwiększaniem udziału KRB. Stwierdzono, że czas ścierania powoduje poprawę urabialności.
6. Dwugodzinny okres ścierania spowodował poprawę wytrzymałości, maksymalnie o 7% dla klasy M25 i o 20% dla klasy M35. Natomiast utrata wytrzymałości następuje w przypadku mieszanek betonowych zawierających kruszywo ścierane przez cztery godziny.
7. Wydłużenie czasu ścierania zmniejsza pozostałość starej zaprawy w KRB. Dwugodzinny proces ścierania wpływa korzystnie na wytrzymałość i urabialność betonu, w związku z tym proponuje się raczej stosowanie kruszyw przetworzonych niż pochodzących bezpośrednio z recyklingu.
8. Z wyników badań można wywnioskować, że wytrzymałość na ściskanie betonu z KRB jest mniejsza niż wytrzymałość betonu z kruszywa naturalnego. Stwierdzono jednak, że wytrzymałość betonu z KRB można w pewnym stopniu poprawić poprzez ich ścieranie.

Literatura / References

1. F.A. Shergold, The percentage voids in compacted gravel as a measure of its angularity, *Mag. Concr. Res.*, **13**, 3-10 (1953).

4.3.3. Compressive strength test

The compressive strength test was conducted on prisms having dimensions 100 mm x 100 mm x 200 mm at the age of 28 day as per IS 516-1959 (22) using universal dynamic testing machine of 1000 kN capacity.

5. Discussion

5.1. Correlation of workability of concrete with attrition and replacement of recycled aggregate

Workability is influenced by the recycled aggregate content and aggregate characteristics. Slump values with different combinations of recycled aggregate are presented in Table 4. In order to ascertain the pattern of variation, the points are plotted by taking the slump as ordinate and RA content as abscissa separately for each type aggregate: A0, A1 and A2 as shown in Fig. 6. With the increasing replacement of recycled aggregate there was a proportionate decrease in the workability of concrete. This is because of adhered mortar, which yields high water absorption. The presence of internal pores, absorption capacity of aggregate in relation to the specific gravity, the texture and angular shape of RA are the reasons for lower workability of recycle aggregate concrete.

5.2. Correlation of compressive strength with attrition and replacement of recycled aggregate

Compressive strength of each mix is taken as the average of compressive strength of 3 prisms of size 100x100x200 mm. The compressive strength of each mix is tabulated in Table 5 for coarse aggregate of type A0, A1 and A2 with different replacements of RA.

The compressive strength of recycled aggregate concrete has been influenced by the recycled aggregate proportion. Amongst all, the maximum strength is attained by concrete with 0% recycled aggregate, followed by 25%, 50%, 75% and 100% replacement of recycled aggregate concrete. Data presented in Fig.7 shows, that higher percentages of recycled aggregate decreases the compressive strength. This is because of highly porous nature of adhered mortar which was subjected to crushing process and weak zones are created in the concrete specimen. While going to higher levels of replacement these zones would have higher chances of getting interconnected with each other. Hence, when the threshold limit was reached, compressive strength reduction has been observed. The strength variation between concrete with 0% RCA content and 50% of the RCA content strength is 15-20%. Whereas for 100% recycled aggregate concrete, the maximum strength loss is observed to be around 45%. The 2 hour attrition period shows improvement in strength to a maximum of 7 % for M25 grade and 20% for M35 grade with 75% replacement of recycled aggregate.

6. Conclusions

1. Specific gravity of single recycled aggregate varies from 2.67 to 2.26 with percentage of mortar varying from 0 to 100 adhered on it.

2. M.F. Kaplan, The effects of the properties of coarse aggregates on the workability of concrete, *Mag. Concr. Res.* **29**, 63-74 (1958).
3. L.J. Murdock, The workability of concrete, *Mag. Concr. Res.* **36**, 135-144 (1960).
4. B. Topçu, S. Şengel, Properties of concretes produced with waste concrete aggregate, *Cem. Concr. Res.* **34**, 1307-1312 (2004).
5. A.K. Padmini, K. Ramamurthy, M.S. Mathews, Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* **23**, 829–836 (2009).
6. N.K. Bairag P, Kishore Ravande b and V.K. Pareek, "Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates", *Resour. Conserv. Recycl.* **9**, 109-126 (1993).
7. J. Thomas, N. N. Thaickavil, P.M. Wilson, Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates, *J. Build. Eng.* **19**, 349-365 (2018).
8. J.-C. Souchea, A.Z. Bendimeradb, E. Roziereb, M. Salguesa, P.Devillersc, E. Garcia-Diaz, A. Loukilib, Early age behaviour of recycled concrete aggregates under normal and severe drying conditions, *J. Build. Eng.* **13** 244-253 (2017).
9. J. Xiao, L.Y. Fana, X. Huang, An overview of study on recycled aggregate concrete in China, *Constr. Build. Mater.* **31**, 364-383 (2012).
10. K. Sagoe-Crentsil, T. Brown, A.H. Taylor, Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate, *Cem. Concr. Res.* **31**, 707-712 (2001).
11. B. Gonzalez, F. Martínez, Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume, *Mater. Mech. Prop. Build. Environ.* **43**, 429–437 (2008).
12. M. Tavakoli, P. Soroushian, Strength of recycled aggregate concrete made using field demolished concrete as aggregate". *ACI Mater. J.* **93**, 182-190 (1996).
13. H.J. Chen, T. Yen, K.H. Chen, Use of Building Rubbles as Recycled Aggregates, *Cem. Concr. Res.* **33**, 125-132 (2003).
14. M. F. Alam, C.R. Sharma, V. Pandey, Study of Characteristic Strength of Recycle Aggregate Concrete with Partial Replacement of Cement with Silica Fume, *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Tech.* **5**, 135-140 (2016).
15. IS 12269-1997(Part-I): Indian standard code of practice for ordinary Portland cement—53 Grade (1997).
16. IS 383-1970: Coarse and fine aggregates for natural sources for concrete (1970).
17. IS 2386 (Part III)-1963: Indian standard methods of test for aggregate for concrete (1963).
18. IS 2430-1986: Methods for Sampling of Aggregates for Concrete (1986).
19. IS 2386 (Part I)-1963: Method of test for aggregates for concrete Particle size and shape (1963).
20. IS 10262-2009: Guidelines for concrete mix design proportioning (2009).
21. IS 1199-1959: Methods for Sampling and analysis of Concrete (1959).
22. IS 516-1959: Indian standard methods of tests for strength of concrete (1959).

2. The specific gravity of combined recycled aggregate decreases with increasing replacement percentage. Whereas no significant variation observed in specific gravities of combined aggregate with attrition period. Trend line equations of specific gravity variation with percentage of mortar for single and combined recycled aggregates were almost similar. From these equations knowing the specific gravity values, we can find out the percentage of adhered mortar and corresponding water absorption capacity of combined material without conducting the test experimentally.
3. Water absorption of concrete is influenced by on the amount of recycled aggregate. The amount of absorbed water is proportionately increasing with increase in recycled aggregate content with no significant change with attrition. However rapid rate of absorption during initial period [1 hour] of soaking for both single and combined recycled aggregate takes place.
4. Angularity number increases with increase in replacement percentage level, but decreases with increase in attrition period.
5. Effect on workability of recycled aggregate concrete has been observed. Loss of workability is progressing with increase in replacement ratio. The influence of attrition on workability is found to be increasing with attrition.
6. The two hour attrition period showed improvement in strength to a maximum of 7 % for M25 grade and 20% for M35 grade. Whereas, loss of strength is observed for recycled aggregate concrete mixes for four hour attrition.
7. Percentage loss of adhered material on recycled aggregate increases with increase in attrition period. As two hour attrition is showing better results on strength and workability while going to higher grades and higher replacement, it is proposed to use this processed aggregate rather than using recycled aggregate directly.
8. From the test results we can infer that the compressive strength of the recycled aggregate concrete is found to be lower than that of natural aggregate concrete. However, it was conclude that the strength of recycled aggregate concrete can be improved by attrition to some extent.

Acknowledgement

The authors would like to thank the Department of Civil engineering, National Institute of Technology Warangal for providing research facilities to carry out this research work.