

Zastosowanie muszli morskich jako kruszywa w betonach wodoprzepuszczalnych

The use of marine shells as aggregates in pervious concretes

Fatma Zohra Melais^{1*}, Kamar Dorbani¹, Nourredine Arabi¹, Djamel Achoura¹

¹ Materials, Geomaterials and Environment Laboratory (LMGE), Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, Badji Mokhtar-Annaba University, P.O. Box 12, 23000, Annaba, Algeria

*Corresponding author: F.Z. Melais, e-mail: fatimazohra.melais@univ-annaba.dz

Streszczenie

Odzyskiwanie odpadów stanowi obecnie korzystne rozwiązanie z powodów technicznych i ekonomicznych. Celem tego badania jest ocena możliwości użycia muszli morskich do produkcji ekologicznego materiału odpowiadającego na problemy środowiskowe. Badania przedstawione w pracy skupiają się na zastąpieniu naturalnych kruszyw muszlami z recyklingu i badaniu ich wpływu na właściwości betonu wodoprzepuszczalnego. W tym celu przygotowano sześć mieszanek betonowych, z których trzy oparte były na naturalnych kruszywach z wapienia. Betony te miały porowatość 20% i różne zawartości cementu: 250, 300 i 350 kg/m³. Pozostałe trzy betony miały identyczne składy, z tym że zamiast naturalnych kruszyw zastosowano kruszywa z pokruszonych muszli. Otrzymane wyniki pokazują, że zastosowanie kruszonych muszli znacznie wpływa na właściwości badanych betonów. Wszystkie mieszanki betonowe wykazują duże wartości opadu stożka i małą gęstość. Zastosowanie kruszyw z muszli poprawia wytrzymałość mechaniczną, zwłaszcza wytrzymałość na rozciąganie w stanie stwardniałym. Mimo swojego kształtu, kruszywa z muszli użyte w tym badaniu nie wpływają na porowatość betonu, co powoduje uzyskaniem betonów o dobrej przepuszczalności.

Słowa kluczowe: beton wodoprzepuszczalny, kruszywa z muszli, odzyskiwanie, porowatość, przepuszczalność

Summary

Waste recovery is now a favourable solution for technical and economic reasons. The purpose of this study is the valuation of marine co-products – seashells, whose goal is to produce an eco-material that responds to the environmental problem. The experimental study focuses on the idea of replacing natural aggregates with recycled shell aggregates and studying their influence on the properties of pervious concrete. For this purpose, six concrete mixtures were prepared, where three of them were based on natural crushed limestone aggregates with 20% of porosity but had different dosages of cement 250, 300, and 350 kg/m³. The other three concretes have identical compositions, except that crushed shell aggregates substitute the natural aggregates. The obtained results are showing that the use of crushed shells considerably influences the properties of the studied concretes. In the fresh state, all concretes present high slump values and low density. Using shell aggregates improves the mechanical resistance, especially the tensile strength, by bending for the hardened state. Despite their shapes, the shell aggregates used in this study do not affect the concrete porosity, and consequently, draining concretes with good permeability have been obtained.

Keywords: pervious concretes, shell aggregates, recovery, porosity, permeability

1. Wprowadzenie

Algieria ma wybrzeże o długości 1622 km, przylegające do Morza Śródziemnego. Miasto Annaba znajduje się w północno-wschodniej części kraju, z wybrzeżem sięgającym ponad 122,5 km (1). Muszle morskie są szybko gromadzącymi się odpadami na takich brzegach, powodującymi poważny problem środowiskowy.

1. Introduction

Algeria has a coastline of 1622 km bordering the Mediterranean Sea. Annaba city is located in the northeast part of the country, with a coastline extending for over 122.5 km (1). Seashells are marine by-products rapidly accumulating on such seashores causing, a major environmental problem.

Betony konstrukcyjne, stosowane w infrastrukturze, produkuje się głównie z kruszyw pochodzących z naturalnego źródła. To nadmierne uzależnienie od naturalnych kruszyw prowadzi do wyczerpywania zasobów naturalnych. Podejmowano próby wykorzystania różnych odpadów i produktów ubocznych jako alternatyw dla naturalnych (2-7). Różne rodzaje muszli mogą być wykorzystane w betonie, w tym muszle ostryg, małży, omułków, przegrzebków, itp. (8). Te muszle są zazwyczaj czyszczone, rozdrabniane i przetwarzane w celu usunięcia materii organicznej i zapewnienia jednorodności. Spośród różnych muszli, te które składają się z kalcytu [CaCO_3] (9), mogą być stosowane jako składnik w materiałach cementowych. W związku z tym po rozdrobnieniu lub zmieleniu muszle morskie mogą zyskać drugie życie w betonie jako kruszywa lub dodatek do cementu. Korzyści ekonomiczne i środowiskowe wynikające z recyklingu są znaczne: pomagają chronić ograniczone zasoby naturalne, zmniejsza ilość odpadów, chroni przyrodę i oszczędza surowce (10-12).

Użycie muszli morskich jako części mieszanki betonowej było przedmiotem wielu wcześniejszych badań doświadczalnych, które dawały różne wyniki. W tym kontekście Sangeetha i in. (13) przedstawili pracę, która opisuje, jak cement i kruszywa można częściowo zastąpić proszkiem z muszli morskich i odpadami muszli morskich, aby uzyskać bardziej przyjazny dla środowiska beton. Zgodnie z ich ustaleniami, użycie produktów z muszli morskich zamiast cementu i kruszywa grubego zwiększa wytrzymałość na ściskanie o 30% w późniejszym okresie hydratacji [po 90 dniach dojrzewania], otwierając drogę do optymalnego ich wykorzystania jako zrównoważonego surowca do betonu. Ponadto, Eziefula i in. (14) omawiali przegląd kilku wartościowych właściwości betonu z kruszywem z muszli morskich, aby podkreślić potencjał wykorzystania muszli w materiałach budowlanych. Wnioskiem z tego przeglądu było to, że porowata natura, nierówna powierzchnia i kształt muszli morskich przyczyniają się do większej nasiąkliwości w porównaniu z typowymi kruszywami. Dodatkowo, zawartość materii organicznej, chlorków i siarczanów w większości kruszyw z muszli morskich może znacznie zmniejszyć wytrzymałość i trwałość betonu z kruszywem z muszli morskich. Wymaga to bardziej intensywnych procesów czyszczenia i obróbki muszli. Ponadto, główne właściwości definiujące jakość betonu, takie jak urabialność, gęstość stwardniałego betonu i wytrzymałość, generalnie maleją w miarę wzrostu procentowego zawartości muszli morskich. W przeciwieństwie do tego, beton przepuszczalny wykonany z kruszywem z sercówki jadalnej, co jest zgodne z celem naszego badania, oferuje lepsze właściwości absorpcji dźwięku niż standardowy beton przepuszczalny. Kontynuując tę samą linię analizy, niektórzy autorzy (15) podjęli kwestię redukcji śladu węglowego w produkcji cementu. Zalecają stosowanie zmielonych muszli morskich jako wypełniacza w cemencie, zmniejszając ilość klinkieru portlandzkiego. Wpłynęło to pozytywnie przy stosowaniu jako częściowy zamiennik cementu. Dobra jakość proszku z muszli morskich poprawia właściwości uzyskanego betonu.

Chodniki, parkingi i alejki zazwyczaj buduje się za pomocą konwencjonalnego, związłego betonu. W okresie zimowym te nieprzepuszczalne powierzchnie powodują powstawanie kałuż wody

Construction and public works concretes are made mainly from aggregates derived from the natural origin. This excessive dependence of the natural aggregates may lead to a depletion of earth resources. Attempts have been made to use by-products and wastes of various types as alternatives to natural aggregates to reduce the reliance on these resources for building (2-7). Various types of shells can be used in concrete, including oyster shells, clam shells, mussel shells, and scallop shells, i.e. (8). These shells are typically cleaned, crushed, and processed to remove organic matter and ensure uniformity. Of these shell wastes, marine seashells whose mineralogical composition is constituted of calcite [CaCO_3] (9) can be an option in the bill of materials used as ingredients in the cementitious binder. Because once crushed or ground, seashells can have a second life in concrete as aggregates or as an addition to cement. The economic and environmental benefits of recovery are considerable: it helps protect limited natural resources, reduce waste, protect nature, and save raw materials (10-12).

The use of seashells as part of a concrete mix has been the subject of several previous experimental researches, with varying results. In this regard, Sangeetha et al. (13) have presented a work that described details how cement and aggregates could be partially replaced by seashell powder and seashell waste to make more environmentally friendly concrete. According to their findings, the use of seashells products in place of cement and coarse aggregate increases the compressive strength by 30% at a later age [after 90 days of curing], paving the way for their optimal use as a sustainable material for concrete. Furthermore, Eziefula et al. (14) discussed an overview of the several valuable qualities of seashell aggregate concrete to highlight the potential of using shells in building materials. As a result of this review, seashells' porous nature and uneven surface and shape contribute to more water absorption than typical aggregates. In addition, the organic matter, chlorides, and sulphates present in the most seashell aggregates can significantly reduce the strength and durability of seashell aggregate concrete. This requires more intensive processes for cleaning and treating seashells. Further, the main properties defining the concrete quality, such as the workability, density of hardened, and strength properties of seashell aggregate concrete, generally decrease as the percentage of the seashells increases. In contrast, pervious concrete made with cockle shell aggregate, which aligns with our study's objective, offers sound absorption qualities superior to those of standard pervious concrete. Always with the same approach, some authors (15) have addressed the issue of how to reduce the CO_2 footprint in cement production. They recommend using grounding seashells as filler in cement, reducing the quantity of Portland clinker. This has resulted in a positive effect when used as a partial cement replacement; the high quality of seashell powder improves the performance of the resulting concrete.

Usually, we build sidewalks, parking lots, and walkways using the conventional waterproof concrete. In winter, these impermeable surfaces cause the stagnation of rainwater, and the management of this water is a major concern in urban areas. To avoid this

deszczowej, a wykorzystanie tej wody stanowi poważny problem w obszarach miejskich. Aby uniknąć tego problemu, prostym rozwiązaniem jest stosowanie betonu wodoprzepuszczalnego (16).

Beton wodoprzepuszczalny to specjalny beton składający się głównie z kruszywa grubego, cementu i wody (17, 18). Ten beton posiada ciągłą sieć porów, co powoduje, że jest materiałem o dużej przepuszczalności, pozwalającym na szybki przepływ wody. Ten szczególny rodzaj betonu jest bardzo przepuszczalny, z porowatością sięgającą nawet 35%, co umożliwia absorpcję i odprowadzenie wody deszczowej oraz ułatwia jej naturalny przepływ w ziemi w sposób zrównoważony (19, 20).

Kruszywa pochodzące z recyklingu, kruszywa z żużla, a ostatnio także z muszli morskich, były przedmiotem szeroko zakrojonych badań w celu określenia ich potencjału jako substytutów naturalnych kruszyw w betonie wodoprzepuszczalnym (21-24). Jeśli chodzi o muszle, Nguyen i in. (25) zbadali trwałość betonu wodoprzepuszczalnego ze zmielonymi muszlami, przeprowadzając badania mrozoodporności, kolmatacji i ługowania. Wyniki ich badań wykazały, że beton wodoprzepuszczalny z muszli morskich ma mniejszą wytrzymałość mechaniczną w porównaniu z kontrolnym betonem wodoprzepuszczalnym bez muszli. Dodatkowo, mrozoodporność i wytrzymałość na ługowanie maleje, podczas gdy przepuszczalność betonu wodoprzepuszczalnego z muszli morskich wynosi około 3,5 mm/s, podczas gdy dla kontrolnego betonu wodoprzepuszczalnego jest to 2,25 mm/s. Z drugiej strony, nawierzchnia betonu wodoprzepuszczalnego składającego się z kruszywa z muszli [łupiny orzecha palmy olejowej i muszle sercówki jadalnej] została zbadana przez Khankhaje i in. (26). Ich praca porównywała wpływ stosowania różnych rozmiarów muszli jako częściowego zamiennika naturalnego kruszywa grubego na właściwości nawierzchni betonu wodoprzepuszczalnego. Wyniki ich badań pokazały, że im większa ilość muszli, tym większy wzrost zawartości pustek i większa przepuszczalność wody. Jednak te dwie właściwości ulegają pogorszeniu, gdy używane są muszle o większym rozdrobnieniu; to samo dotyczy wytrzymałości na ścislenie betonu wodoprzepuszczalnego, która maleje w miarę wzrostu zawartości muszli z powodu wzrostu zawartości pustek. Ostatnio Wang i in. (27) testowali beton wodoprzepuszczalny z muszlami morskimi jako warstwa nośna dolna i poddali go warunkom zamarzania; wykorzystano muszle ostryg i muszle przegrzebków. Badania wykazały, że dodatek 5% popiołu krzemionkowego to idealna ilość w betonie wodoprzepuszczalnym z zawartością muszli morskich, aby zwiększyć jego wytrzymałość na ścislenie, minimalizując utratę jego mrozoodporności. W wyniku tego doświadczenia, warstwa gleby betonu wodoprzepuszczalnego po 3 latach badań wykazała bardziej korzystny wpływ na wzrost roślin.

W pracy zbadano wpływ zastosowania muszli morskich jako kruszywa na właściwości betonu wodoprzepuszczalnego. Po pierwsze, jest to badanie mające na celu wyjaśnienie potencjału tych muszli w rozwiązywaniu problemów związanych z ochroną środowiska. Na podstawie starannego przeglądu literatury można stwierdzić, że większość badań skupia się na wykorzystaniu odpadów z muszli zwierząt jadalnych lub produktów pochodzących

problem, a simple solution is using pervious concrete or draining concrete (16).

Draining concrete is a special concrete made mainly of large aggregates, cement, and water (17,18). This concrete has sufficient interconnected voids that result in a highly permeable material, allowing water to pass quickly. This particular type of concrete is highly permeable with up to 35% porosity, which allows the absorption and evacuation of rainwater and facilitates its natural flow in the ground in a sustainable way (19,20).

Recycled aggregates, slag aggregates, and, most recently, seashells have all been the subject of extensive research on their potential use as a substitute for natural aggregates in pervious concrete (21-24). Regarding seashells, Nguyen et al. (25) have examined the durability of pervious concrete based on the crushed seashells, where freeze-thaw resistance, clogging, and leaching tests were carried out. As a result, seashell pervious concrete exhibits lower mechanical strength compared to pervious control concrete without shells. Also, the freeze/thaw durability and leaching decrease, while the permeability to water of seashell pervious concrete is about 3.5 mm/s according to the control pervious concrete that is 2.25 mm/s. On the other hand, pervious concrete pavement composed of shell aggregates [oil palm kernel shell and cockle shell] has been studied by Khankhaje et al. (26). Their paper compared the effect of using different shell sizes as partial replacement of natural coarse aggregate on pervious concrete pavement properties. The findings of their study showed that the larger the number of shells, the greater the increase in void content and water permeability. However, these two properties decrease when smaller shell particles are used. The same applies to the compressive strength of pervious concrete, which decreases as the shell content increases due to the increase in void content. Recently, Wang et al. (27) tested the seashell waste pervious concrete as a soil sub-base and subjected it to the freezing conditions; the shells used are oyster and scallop waste. Their tests revealed that 5% silica fume is the ideal amount to add to the seashell pervious concrete to maximize its compressive strength while minimizing its loss of resistance to freeze-thaw. As a result, this experiment of pervious concrete soil layer after 3 years of testing has given a more favourable effect on plant growth.

This paper investigated the effects of marine seashells used as aggregates on the properties of pervious concrete. First, it is a local experiment in valorising these shells, which is a significant step towards finding environmentally friendly solutions. Following an exhaustive literature review, most research focuses on valorising edible shell waste or products from fishing and shellfish farming industries. In contrast, relatively little work has been done on seashells washed up on beaches. In addition, in a sand-free pervious concrete context, the intended purpose is to agglomerate as much as possible elongated seashells having a specific surface developed with an increased cement paste while guaranteeing a mechanical resistance corresponding to the targeted void content. The effects of replacing crushed limestone aggregates with crushed shell aggregates and variation in cement dosage on fresh

z przemysłu rybnego i hodowli mięczaków. Jednak, stosunkowo niewiele badań zostało przeprowadzonych z muszlami znajduwanymi na plażach. Dodatkowo, w przypadku tego betonu wodoprzepuszczalnego pozbawionego piasku, celem jest użycie jak największej ilości wydłużonych muszli morskich, które mają rozwiniętą powierzchnię właściwą. Wzmocnione zaczynem cementowym, mają zapewniać odpowiednią wytrzymałość mechaniczną przy założonej objętości pustek. Zbadano wpływ zastępowania kruszyw z rozdrobnionego wapienia kruszywem z rozdrobnionych muszli oraz zmiany ilości cementu na właściwości betonu wodoprzepuszczalnego w stanie świeżym i stwardniałym. Wykonywane badanie metodą opadu stożka, badając gęstość, zawartość pustek, przepuszczalność oraz wytrzymałość na ściskanie, i porównano je z właściwościami betonu wodoprzepuszczalnego z kruszyw naturalnych. Przeprowadzone badania wzbogacą istniejącą literaturę o wykorzystaniu odpadów z muszli morskich w betonie.

2. Doświadczenia

2.1. Materiały

W pracy użyto cement portlandzki z Algierii klasy CEM II 42.5/A-LL - cement portlandzki wapienny zawierający 16-20% wapienia. Główne właściwości chemiczne i fizyczne cementu zostały przedstawione w tablicach 1 i 2.

W tym badaniu stosowano dwa rodzaje kruszyw o frakcji 3/8 mm: gysu z rozdrobnionego wapienia i kruszywa z muszli morskich z recyklingu [rys. 1 i 2]. Aby otrzymać ten drugi materiał, najpierw tradycyjnie zbierano muszle za pomocą grabi ręcznych na plaży Sidi Salem, która znajduje się po wschodniej stronie rzeki Seybouse w mieście Annaba [rys. 3 i 4]. Następnie muszle myto, rozdrabniano i przesiewano z kruszywem o frakcji 3-8 mm w laboratorium inżynierii lądowej na Uniwersytecie Badji Mokhtar w Annaba [rys. 5]. Główne właściwości fizyczne kruszywa pokazano w tablicy 3.

Obserwacja mokroskopowa ziarna kruszywa z muszli morskich z recyklingu [rys. 6] umożliwiła poznanie jego morfologii [kształtu, wielkości i stanu powierzchni]. Analiza ta ma na celu lepsze poznanie pewnych zjawisk fizycznych lub mechanicznych w betonie w stanie świeżym i stwardniałym. Wyraźnie widać, że powierzchnia jest zazwyczaj chropowata. Analiza kruszywa z rozdrobnionych



Fig. 1. Crushed shell aggregates

Rys. 1. Kruszone muszle

and hardened properties of pervious concrete, such as slump test, density, void content, permeability as well as compressive strength. They were studied and compared to those of pervious concrete based on natural aggregates. Finally, the present study will add value to the existing literature on the use of marine seashell waste in concrete.

2. Experimental

2.1. Materials

The cement used in this study was the Algerian Portland composite cement CEM II 42.5/A-LL [Portland-limestone cement with 16% to 20% of limestone added]. The main chemical and physical properties of cement are listed in Tables 1 and 2, respectively.

In this work, two types of 3/8 mm fraction aggregates were used: crushed limestone and recycled seashell [Figs. 1 and 2]. To obtain the latter, first, the shells were traditionally collected using a hand rake from the Sidi Salem beach, which is on the east side of the Seybouse River-Annaba [Figs. 3 and 4]. Next, these shells were washed, crushed, and sifted with 3/8mm fraction aggregates at the civil engineering laboratory of Badji Mokhtar-Annaba University [Fig. 5]. The main physical properties of aggregates are listed in Table 3 and Table 4, respectively.

SEM observation of a grain of recycled seashell aggregate illustrated in Fig. 6 made it possible to observe its morphology [shape, size, and surface condition]. This analysis aims to understand better certain physical or mechanical phenomena in concrete at fresh and hardened states. It is clearly visible that the surface condition is generally rough. The properties of crushed shell aggregate by the EDS analysis shows that it's composed mainly of calcium carbonate and minor amounts of other compounds such as SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O [Fig 7].

2.2. Methods

The experimental study has been conducted on prismatic and cubic specimens of $4 \times 4 \times 16$ cm, and $10 \times 10 \times 10$ cm, respectively. The test specimens were prepared according per the European EN 12390-1 standard (29).



Fig. 2. Crushed limestone aggregates

Rys. 2. Grys wapienny

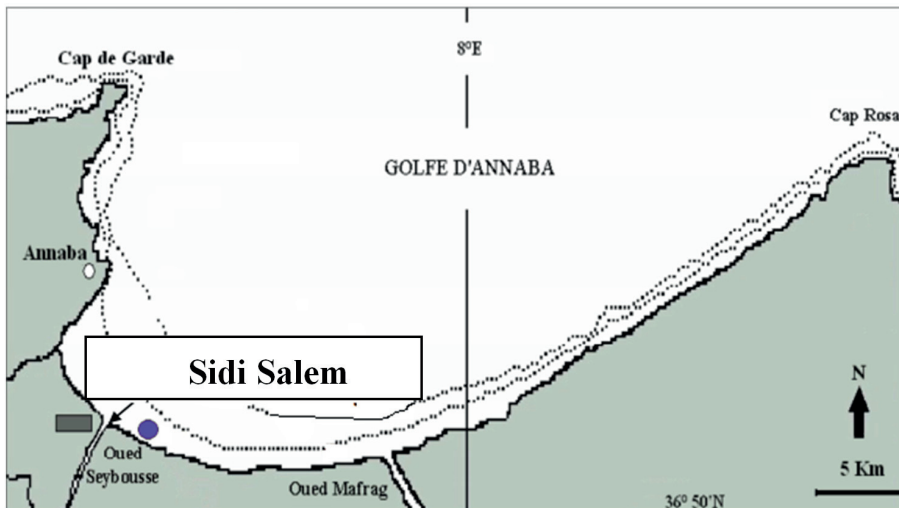


Fig. 3. Geographical location of the Gulf of Annaba and collection site (28)

Rys. 3. Położenie geograficzne Zatoki Annaba i miejsca zbiórki muszli

muszli za pomocą EDS pokazuje, że składa się głównie z wapnia [węglanu wapnia] i niewielkich ilości innych składników, takich jak SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O [rys. 7].

2.2. Metody

Badania przeprowadzono na próbkach w kształcie belek o wymiarach $4 \times 4 \times 16$ cm i sześciennych o wymiarach $10 \times 10 \times 10$ cm. Próbkę do badań przygotowano zgodnie z normą europejską EN 12390-1 (29).

2.2.1. Urabialność

Urabialność określono za pomocą badania metodą opadu stożka zgodnie z europejską normą NF EN 12350-2 (30).

2.2.2. Gęstość

Gęstość betonu oceniano na podstawie pomiaru mieszanki betonowej zgodnie z normą NF EN 12350-6 (31).

2.2.3. Wytrzymałość mechaniczna

Do określenia wytrzymałości mechanicznej w czasie użyto próbek wykonanych zgodnie z normami europejskimi NF EN 12390-5 (32) i EN 12390-3 (33). Ocenie poddano wytrzymałość na zgina-

2.2.1. Workability

The workability was defined by the slump test according to European standard NF EN 12350-2 (30).

2.2.2. Density

The density of concrete is estimated from the determination of the density of the fresh concrete mixes according to the standard NF EN 12350-6 (31).

2.2.3. Mechanical strength

Specimens made according to European standards NF EN 12390-5 (32) and EN 12390-3 (33) were used to determine the development of mechanical strength over time through the evaluation of flexural and compressive strength. The compression test was carried out on the cubic samples using the hydraulic press with a maximum capacity of 2000 kN [Fig. 8A]. The three-point flexural test was performed on prismatic samples using a ZWICK Roel press device with the maximum capacity of 2000 kN [Fig. 8B].



Fig. 4. Shells on the beach of Sidi Salem

Rys. 4. Muszle na plaży Sidi Salem



A/ Mycie / Washing



B/ Suszenie / Drying



C/ Kruszenie / Crushing



D/ Frakcjonowanie / Screening

Fig. 5. Crushed shell aggregates processing

Rys. 5. Przetwarzanie kruszywa z muszli

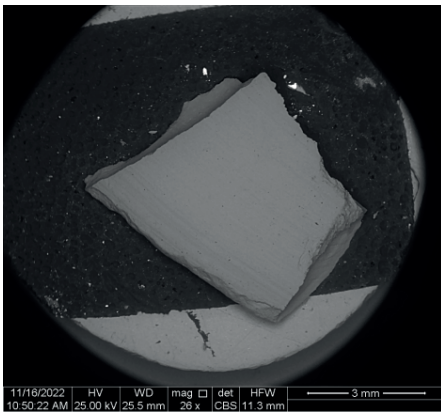


Fig. 6. Morphology of crushed shell aggregate

Rys. 6. Morfologia kruszonej muszli

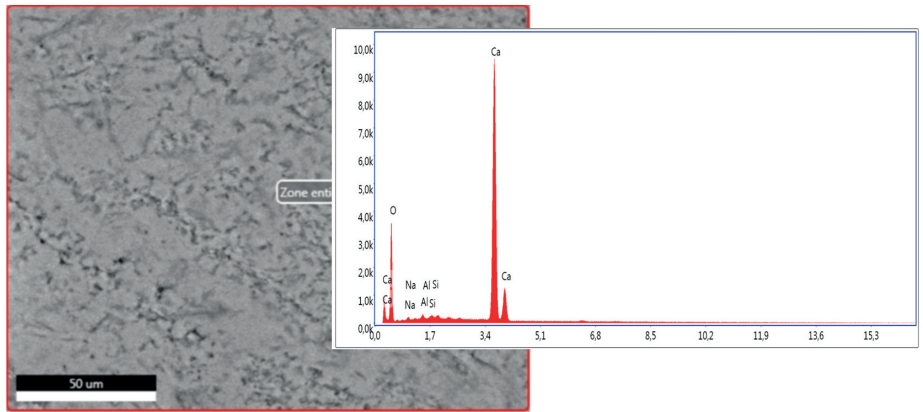


Fig.7. SEM image and EDS spectra of crushed shell aggregate

Rys. 7. Obraz mikroskopowy powierzchni muszli oraz analiza EDS składu

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY CEMENTU

CHEMICAL COMPOSITION OF CEMENT

Składniki	CaO	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO	Straty prażenia / LOI
Zawartość / Content, %	64.16	22.29	0.70	3.76	5.18	-	1.36

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE CEMENTU

PHYSICAL PROPERTIES OF CEMENT

Properties	Unit	Cement
Gęstość nasypowa / Bulk density	g/cm ³	1.03
Gęstość właściwa / Density	g/cm ³	3.00
Wodożądność / Normal consistency	%	28
Początek czasu wiązania / Initial setting time	h/min	2 /39
Powierzchnia właściwa / Specific surface area	cm ² /g	3900
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach Compressive strength at 28 days	MPa	43.5

nie i ściskanie. Badanie ściskania przeprowadzono na próbkach sześciennych za pomocą prasy hydraulicznej o maksymalnej sile 2000 kN [rys. 8A]. Próbę zginania trzypunktowego przeprowadzono na beleczkach za pomocą urządzenia ZWICK Roel o maksymalnej sile 20 kN [rys. 8B].

Tablica 3 / Table 3

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE KRUSZYW

PHYSICAL PROPERTIES OF AGGREGATES

Properties	Unit	Kruszywo z muszli Crushed shell aggregates	Grys wapienny Crushed limestone aggregates
Gęstość nasypowa / Bulk density	g/cm ³	0.93	1.26
Gęstość właściwa / Density	g/cm ³	2.77	2.56
Jamistość / Inter-granular porosity	%	66.42	51.17
Nasiąkliwość / Water absorption	%	12.05	2.8

2.2.4. Porosity

Porosity was determined by measuring the ratio of the volume of water that a porous concrete can absorb in its open pores to the total volume of concrete sample [Fig. 9].

2.2.5. Permeability

The permeability test was carried out using a device based on the principle of permeametry at the constant head, similar to the device used in soil mechanics. The test was carried out on cylindrical specimens of $\phi 11 \times 22$ cm; the concrete sample was sealed with rubber to prevent water from running down the walls and thus ensure that 100% of the water passes through the sample section [Fig. 10]. The coefficient of permeability was determined by Darcy's law [Eqs. 1-3].

$$Q = \frac{V}{t} = K \cdot J \cdot A \quad [1]$$

$$J = \frac{\Delta h}{L} \quad [2]$$



A/ Badanie wytrzymałości na ściskanie / Compression test



B/ Trójpunktowe badanie zginania / Three points bending tensile test.

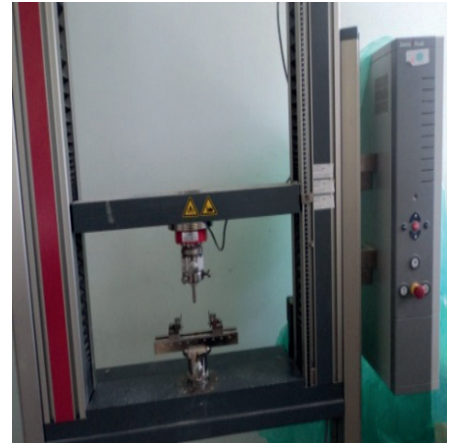


Fig. 8. Mechanical testing machines

Rys. 8. Stanowiska do badań wytrzymałości

2.2.4. Porowatość

Porowatość określono mierząc stosunek objętości wody, którą porowaty beton może absorbować w otwartych porach do całkowitej objętości próbki betonu [rys. 9].

2.2.5. Przepuszczalność

Badanie przepuszczalności przeprowadzono za pomocą permeametry przy stałej głowicy, podobnego do urządzenia używanego w mechanice gruntów. Badania przeprowadzono na cylindrycznych próbkach o wymiarach $\phi 11 \times 22$ cm. Próbkę betonową uszczelniono gumą, aby zapobiec spływaniu wody po ściankach i tym samym zapewnić, że 100% wody przechodzi przez przekrój próbki [rys. 10]. Współczynnik przepuszczalności określono na podstawie prawa Darcy'ego [równania 1-3].

$$Q = \frac{V}{t} = K \cdot J \cdot A$$

[1]

$$J = \frac{\Delta h}{L}$$

[2]

$$K = \frac{Q}{A \cdot J} = \frac{V \cdot L}{t \cdot A \cdot \Delta h}$$

[3]

gdzie:

Q – przepływ, l/s

K – współczynnik filtracji, mm/s

A – przekrój próbki, m²

J – spadek hydrauliczny

Δh – różnica poziomów, m

L – długość próbki, m

V – objętość wody, l

t – czas, s

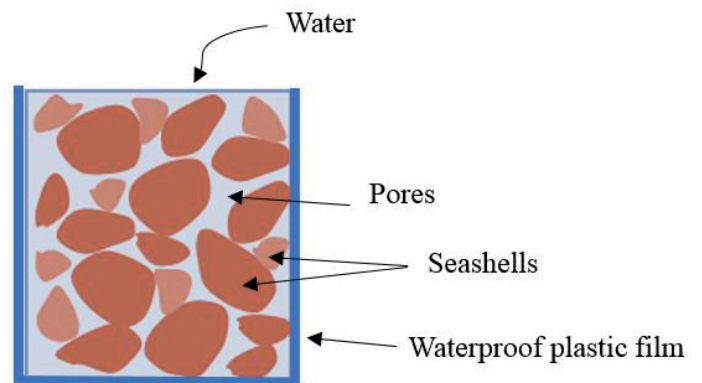


Fig. 9. Schematic diagram of measuring the porosity of the porous concrete

Rys. 9. Schemat pomiaru porowatości betonu przepuszczalnego

$$\frac{Q}{A \cdot J} = \frac{V \cdot L}{t \cdot A \cdot \Delta h} \quad [3]$$

where:

Q – flow, l/sec

[2] K – coefficient of permeability, mm/s

A – section of the specimen, m²

J – hydraulic gradient

Δh – hydraulic head

L – length of the cylindrical specimen, m

V – volume of water measured, l

t – time, sec

3. Mix composition

The formulation of pervious concrete is defined in the reports of ACI committees 211 and 522 (34,35). This formulation approach is based on the dry pouted density of coarse aggregates, determined according to the ASTM C 29 method (36). The mix proportions of concrete used in this study formulated with 20% porosity are given in Table 4.

3. Skład mieszanki

Projektowanie składu betonu wodoprzepuszczalnego jest opisane w raportach komitetów Amerykańskiego Instytutu Betonu ACI 211 i 522 (34,35). To podejście do badania składu betonu opiera się na zagęszczalności w stanie suchym kruszywa grubego, określonej zgodnie z metodą ASTM C 29 (36). Składy badanych w pracy mieszanek betonowych o 20% zawartości pustek, przedstawiono w tablicy 4.

4. Wyniki

4.1. Właściwości świeżego betonu

Opad stożka i gęstość badanych mieszanek betonu przedstawiono na rys. 11 - 13.



Fig. 10. Permeability device

Rys. 10. Stanowisko do pomiaru przepuszczalności

Urabialność betonów przedstawia rysunek 11. Widoczne jest, że na urabialność wpływa rodzaj kruszywa i ilość dodatku cementu; zauważalne jest, że wszystkie betony wodoprzepuszczalne z kruszywem z muszli z recyklingu dają bardzo duże wartości opadu stożka przy małym stosunku wodno-cementowym. Opady stożka są większe niż 13 cm, chociaż podczas mieszania było jasne, że te betony są bardzo sztywne. Wpływa na to brak piasku lub wystarczająca objętość zaczynu cementowego, która zapewnia

Tablica 4 / Table 4

SKŁADY BETONÓW

MIX PROPORTIONS OF CONCRETE

Oznaczenie betonu Designation of concrete	Zawartość / Content, kg/m ³				
	Cement	Woda / Water	Grys wapienny Crushed limestone aggregates	Kuszywo z muszli Crushed shell aggregates	W/C
CAN1	250	67.5	1062.5	-	0.27
CAN2	300	81	1062.5	-	0.27
CAN3	350	96.5	1062.5	-	0.27
CRA1	250	67.5	-	790.5	0.27
CRA2	300	81	-	790.5	0.27
CRA3	350	96.5	-	790.5	0.27

4. Results

4.1. Properties of fresh concrete

The slump and the density of fresh concrete mixtures are shown in Figs. 11 - 13.

The workability of concretes is shown in Fig. 11. It can be seen that this workability is affected by the aggregate types and the cement dosage; it is visible that all pervious concretes with recycled shell aggregates give very high slump values with a low W/C ratio. The slump values are greater than the 13 cm, although, during mixing, it was clear that these concretes are very stiff. The absence of sand or a lack of sufficient cement paste volume that ensures cohesion between the grains it is explaining. Fig 12 illustrates this situation; the concrete has given way like loose collection of grains. The absence of sand, which usually serves as a frictional barrier to the movement of coarse aggregates, causes this shearing effect. The existing paste volume was only used to wrap the aggregates and needed to be increased to ensure cohesion between the granular particles. The influence of the cement dosage seems evident since the increase in the volume of the cementitious paste made it possible to reduce the slump.

In contrast to the results observed in this study, in general, slump values of fresh pervious concrete are often very low [25]. The seashells experimented with in this work have irregular shapes [flaky and elongated] and are coated by a cement paste, which will act as a lubricant, so there would be less frictional resistance between the seashell particles. In addition, the seashells used are the same size [3/8 mm], which improves workability, as reported by Cuadrado-Rica et al. [37]. These authors have concluded that using seashell aggregates that are coarser than fine aggregates [sand] improves the workability of pervious concrete.

Fig. 13 shows that the density of concretes varies based on the aggregate type and the quantity of cement used. The density of porous concretes is lower than that of conventional concretes.

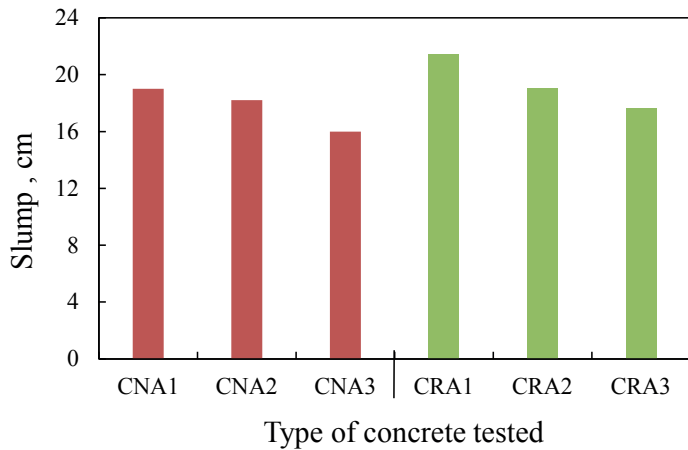
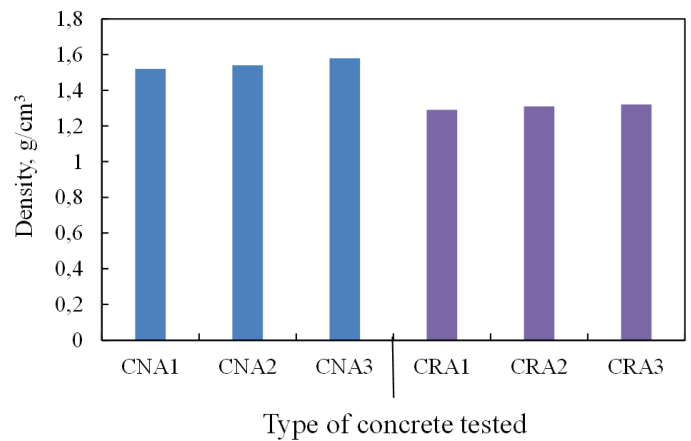


Fig. 11. Slump variation of pervious concretes according to the cement dosage

Rys. 11. Zmiany konsystencji mieszanki betonowej wraz ze zmianą ilości cementu



Rys. 13. Zmiany gęstości betonu przepuszczalnego w zależności od zawartości cementu

Fig.13. Variation in the density of pervious concretes depending on the cement dosage



Fig. 12. Slump test of pervious concrete

Rys. 12. Badanie opadu stożka



spójność pomiędzy ziarnami. Rysunek 12 ilustruje taki przypadek; beton ustępuje jak luźny zbiór ziaren. Brak piasku, który zazwyczaj służy jako bariera tarcia dla ruchu kruszywa grubego, powoduje ten efekt ścinający. Objętość zaczynu została użyta tylko do otulenia kruszywa i musiała zostać zwiększona, aby zapewnić spójność między ziarnami. Wpływ dodatku cementu wydaje się widoczny, ponieważ wzrost objętości zaczynu cementowego pozwolił zmniejszyć opad stożka.

W przeciwieństwie do wyników pracy, ogólnie wartości opadu stożka świeżego betonu wodoprzepuszczalnego są często bardzo małe [25]. Morskie muszle poddane badaniom mają nieregularne kształty [fuszkowate i wydłużone] i są pokryte zaczynem cementowym, który działa jak środek powodujący mniejsze tarcie między cząstkami muszli. Dodatkowo, użyte muszle są tego samego rozmiaru [3-8 mm], co poprawia urabialność, jak stwierdzili Cuadrado-Rica i in. [37], którzy doszli do wniosku, że użycie kruszywa z muszli morskich o większych rozmiarach niż drobne kruszywo np. piasek, który poprawia urabialność betonu wodoprzepuszczalnego.

Rysunek 13 pokazuje, że gęstość betonów zmienia się w zależności od rodzaju kruszywa i ilości użytego cementu. Gęstość

4.1. Properties of hardened concrete

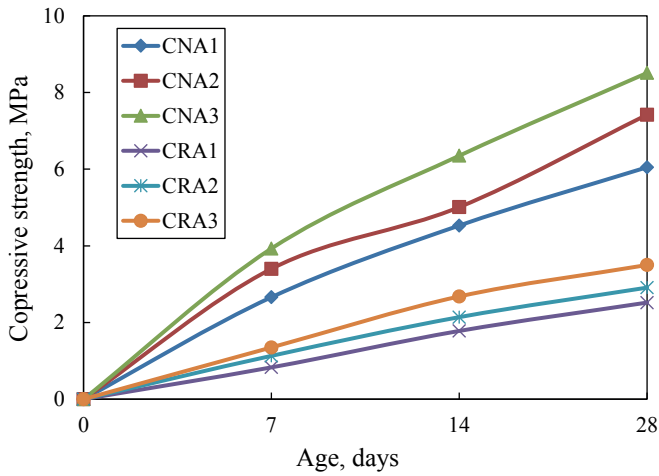
4.1.1. Mechanical strength

Tensile and compressive strength tests were carried out at different ages of the concrete: 7, 14, and 28 days. The results are presented in Fig. 14

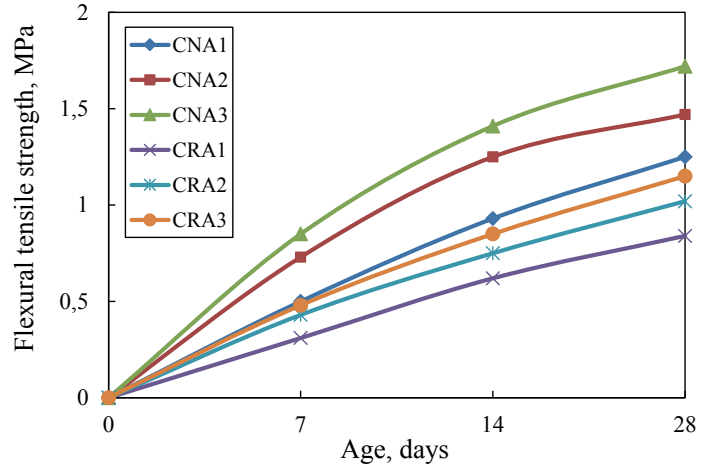
According to Fig. 14A, pervious concretes with shell aggregates record compressive strengths of less than 56%, 63% and 63% compared to pervious concretes with natural aggregates according to cement dosages of 250, 300, and 350 kg/m³, respectively. One of the fundamental causes of these resistance deficiencies is the presence of intergranular porosity or alveoli, as shown in the photo in

Fig. 15. Cement-coated aggregates are easily displaced under compressive loads because they are not confined, allowing them to slide freely without hindrance. Seashells, due to their elongated or flaky shape, are an important factor that contributes to the weakening of concrete. Bond strength is decreased because less cement material is available to coating the seashells' larger, smooth surface area of the seashells. Elongated seashells tend to take an orientation perpendicular to the flow direction during the placement because they are slender, and their length is much greater than their thickness. This favours the superimposed orientation of elongated seashells perpendicular to the direction of application of the compressive stress. When subjected to such a force, smooth seashells tend to slide over each other in the lateral direction due to the poor adherence to the cement paste. The compressive strength values of pervious concretes with natural aggregates correlate with those observed in the literature (18). These range between 7 and 25 MPa for the permeable concretes with porosities that vary between 15 and 30%.

Fig. 14B illustrates the effect of the cement dosage as well as the nature of the aggregates on the flexural strength of draining concretes of 20% porosity. According to this figure, increased



A. Wytrzymałość na ściskanie / Compressive strength



B. Wytrzymałość na zginanie / Flexural tensile strength

Fig. 14. Variation in the mechanical strength of pervious concretes depending on the cement dosage and the nature of aggregates

Rys. 14. Zmiany wytrzymałości betonów w zależności od ilości cementu i rodzaju kruszywa

betonów wodoprzepuszczalnych jest mniejsza od betonów konwencjonalnych.

4.1. Właściwości dojrzałego betonu

4.1.1. Wytrzymałość mechaniczna

Przeprowadzono pomiary wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie w różnych okresach twardnienia betonu: po 7, 14 i 28 dni. Wyniki przedstawiono na rys. 14

Zgodnie z rysunkiem 14A, betony wodoprzepuszczalne z kruszywem z muszli mają wytrzymałość na ściskanie mniejszą o 56%, 63% i 63% w porównaniu z betonami wodoprzepuszczalnymi z naturalnym kruszywem odpowiednio dla 250, 300 i 350 kg cementu w m³. Jedną z podstawowych przyczyn zmniejszenia wytrzymałości jest występowanie pustek międzyziarnowych, jak pokazano na zdjęciu na rysunku 15. Ziarna kruszywa pokryte zaczynem łatwo przemieszczają się pod obciążeniem ściskającym, ponieważ nie są ograniczone, co pozwala im swobodnie się przesuwają. Morskie muszle, ze względu na ich wydłużony lub łuskowaty kształt, stanowią ważny czynnik osłabiający beton. Przyczepność międzywarstwowa ulega pogorszeniu, ponieważ mniej cementu jest dostępne do pokrycia większej, gładkiej powierzchni muszli morskich. Wydłużone muszle morskie mają tendencję do ustawiania się prostopadłe do kierunku przepływu podczas wylewania, ponieważ są smukłe, a ich długość jest znacznie większa od grubości. Sprzyja to ułożeniu się wydłużonych muszli morskich prostopadłe do kierunku naprężenia ściskającego. Pod wpływem takiej siły gładkie muszle morskie mają tendencję do przesuwania się wzajemnie w kierunku bocznym z powodu słabego przylegania zaczynu cementowego. Wytrzymałość na ściskanie betonów wodoprzepuszczalnych

strength corresponds to increasing cement dosage. The natural aggregates give flexural tensile strength values varying from 1.25 to 1.72 MPa. The results are consistent with other studies (38, 39), whose values varied between 1 to 3.5 MPa. It is also noted that the shells give good resistance in tensile bending compared to the compressive resistance (40). They improved not only flexural strength but also improved ductility [see Fig. 16]. The shape of the shell aggregates gives the explanation this, these aggregates are flat and angular in shape, and their granular arrangement improves tensile strength, the results presented in this study are thus in agreement with those of (41).

4.1.2. Porosity and permeability

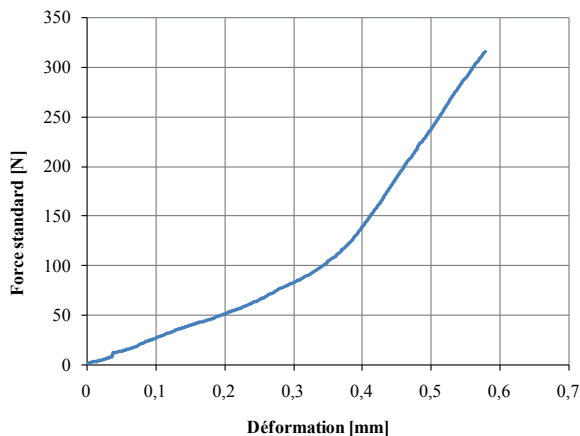
Porosity [volume of voids] and permeability variations according to the nature of the aggregates and the cement dosage are illustrated in Figs. 17 and 18.

Obtained results depend on the cement dosages and the nature of the aggregates used. Regarding Figs. 17 and 18, it can be seen that the nature of the aggregates, the cement dosage, and the porosity influence the permeability coefficient of pervious concrete. The permeability coefficient increases with inter-granular porosity

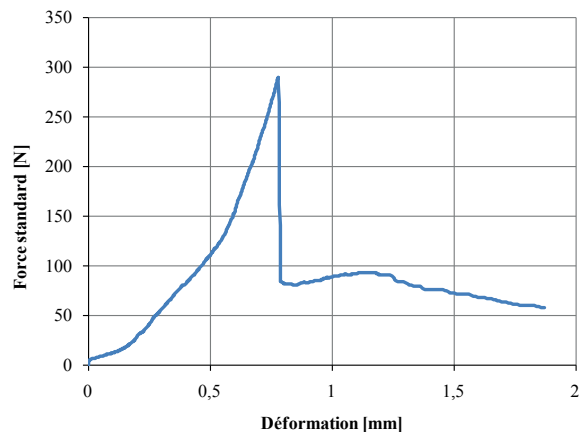


Fig.15. Porous texture of pervious concrete with shell aggregate

Rys. 15. Porowata tekstura betonu z kruszywem z muszli



A. Beton z grysem wapiennym / Pervious concrete with crushed limestone aggregates



B. Beton z kruszywem z muszli / Pervious concrete with shell aggregates

Fig. 16. Force-displacement curve

Rys. 16. Krzywe naprężenie - odkształcenie

nych z naturalnym kruszywem zgadzają się z obserwowanymi w literaturze (18). Mają one zmienne wartości wytrzymałości od 7 do 25 MPa dla betonów wodoprzepuszczalnych o porowatości w zakresie od 15 do 30%.

Rysunek 14B przedstawia wpływ ilości cementu oraz rodzaju kruszywa na wytrzymałość na zginanie betonów przepuszczalnych o porowatości 20%. Zgodnie z tym rysunkiem, wzrost wytrzymałości wynika ze zwiększenia ilości cementu. Naturalne kruszywa mają wytrzymałości na zginanie od 1,25 do 1,72 MPa. Te wyniki są zgodne z innymi badaniami (38, 39), w których wartości te mieściły się w zakresie od 1 do 3,5 MPa. Warto również zauważyć, że muszle wykazują dobrą wytrzymałość na zginanie w porównaniu do wytrzymałości na ściskanie (40). Poprawiły one nie tylko wytrzymałość na zginanie, ale również zwiększyły ciągliwość [patrz rys. 16]. Można to wyjaśnić płaskimi kształtami ziaren kruszywa z muszli, ponieważ taki kształt i układ ziaren jest korzystny dla wytrzymałości na rozciąganie, co jest zgodne z wynikami przedstawionymi w pracy Cuadrado Rica (41).

4.1.2. Porowatość i przepuszczalność

Zmiany porowatości w tm objętość porów i przepuszczalności w zależności od rodzaju kruszywa i zawartości cementu przedstawione są na rys. 17 i 18.

Uzyskane wyniki zależą od ilości cementu i rodzaju użytego kruszywa. W odniesieniu do rysunków 17 i 18 można zauważyć, że rodzaj kruszywa, dawek cementu i porowatość wpływają na współczynnik przepuszczalności betonu wodoprzepuszczalnego. Współczynnik przepuszczalności wzrasta wraz z porowatością międzyziarnową i maleje, gdy muszle morskie zastępują naturalne kruszywo i ilość cementu wzrasta.

Właściwości ośrodka porowatego, a przede wszystkim wielkość i kształt ziaren, wpływają na przepuszczalność betonu. Ta ostatnia właściwość zależy także od przepływu cieczy i stopnia nasycenia ośrodka porowatego. Muszle morskie mają płaski i kanciasty

and decreases when shell aggregates replace natural aggregates cement dosage increases.

Properties of the porous medium, such as grain size and shape, affect the concrete permeability. The latter also depends upon the nature of the fluid flow and the degree to which the porous medium is saturated. Shell aggregates are flat and angular in shape [Fig. 19]. The grain arrangement of this type of aggregate reduces the possibility of forming a continuous pore path and makes the concrete less permeable. The slenderness of the shell grains is quite significant [ratio of the length to the thickness], and the orientation of these grains in superpositions on the horizontal plane prevents the flow of water. Also, the increase in the cement dosage decreases the porosity and, consequently, the decrease in the permeability.

The quantity and quality of paste are undoubtedly the most important factors influencing the properties of pervious concrete. In this study, the water/cement ratio is constant [$W/C=0.27$], and the effect of the amount of the paste evolves.

Fig. 20 shows the variation in compressive strength at 28 days and the permeability of pervious concretes as a function of the paste volume. For all concretes, the compressive strength increases linearly with the volume of paste [$R^2 = 0.945$ and $R^2 = 0.994$, respectively, for natural aggregates and shell aggregates]. It is a well-established fact that the compressive strength increases with the increase in the volume of paste, which holds for both natural and shell aggregates.

The high compressive strength of the concrete corresponds to low permeability concrete; conversely, low strength, with high porosity guarantees a more permeable concrete. The increase in the paste volume guarantees high mechanical resistance and reduced permeability. It is possible to find a compromise between mechanical resistance and permeability with the choices of the appropriate paste volume.

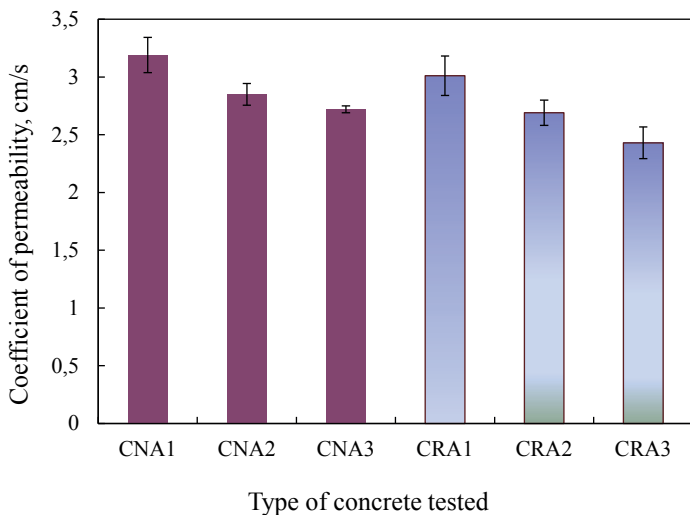


Fig. 17. Effect of the cement dosage and aggregates type on the permeability for pervious concrete.

Rys. 17. Wpływ ilości cementu oraz rodzaju kruszywa na przepuszczalność betonów

kształt [rys. 19]. Układ ziaren tego kruszywa zmniejsza możliwość utworzenia ciągłej ścieżki porów i sprawia, że beton jest mniej przepuszczalny. Smukłość ziaren muszli jest dosyć ważne [stosunek długości do grubości] i orientacja tych ziaren w nakładających się warstwach na płaszczyźnie poziomej uniemożliwia przepływ wody. Dodatkowo, zwiększenie ilości cementu zmniejsza porowatość i w konsekwencji obniża przepuszczalność.

Ilość i jakość zaczynu są niewątpliwie najważniejszymi czynnikami wpływającymi na właściwości betonów wodoprzepuszczalnych. Stosunek wodno/cementowy jest stały [$w/c = 0,27$], a wpływ ilości zaczynu ewoluuje.

Rysunek 20 pokazuje zmiany wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach i przepuszczalności betonów wodoprzepuszczalnych w funkcji objętości zaczynu. Dla wszystkich betonów wytrzymałość na ściskanie rośnie liniowo wraz z objętością zaczynu [$R^2 = 0,945$ i $R^2 = 0,994$, odpowiednio, dla kruszywa naturalnego i kruszywa z muszli]. Jest to powszechnie przyjęte, że wytrzymałość na ściskanie rośnie wraz ze wzrostem objętości zaczynu, co dotyczy zarówno kruszywa naturalnego, jak i muszli.

Duża wytrzymałość na ściskanie betonu odpowiada betonowi o małej przepuszczalności. Z kolei niska wytrzymałość, przy dużej porowatości, zapewnia bardziej przepuszczalny beton. Zwiększenie objętości zaczynu zapewnia dużą wytrzymałość mechaniczną i zmniejsza przepuszczalność. Możliwe jest znalezienie kompromisu między wytrzymałością mechaniczną a przepuszczalnością przez wybór odpowiedniej objętości zaczynu.

Zmienność przepuszczalności w funkcji zawartości cementu jest przedstawiona na rysunku 21. Oznaczenie przepuszczalności potwierdziło, że badane betony są rzeczywiście przepuszczalne. Współczynnik przepuszczalności maleje, gdy dawka cementu wzrasta, co jest czynnikiem ważniejszym niż zmiana rodzaju kruszywa. Ten wynik jest zgodny z wynikami Yahii i Kabagire (42),

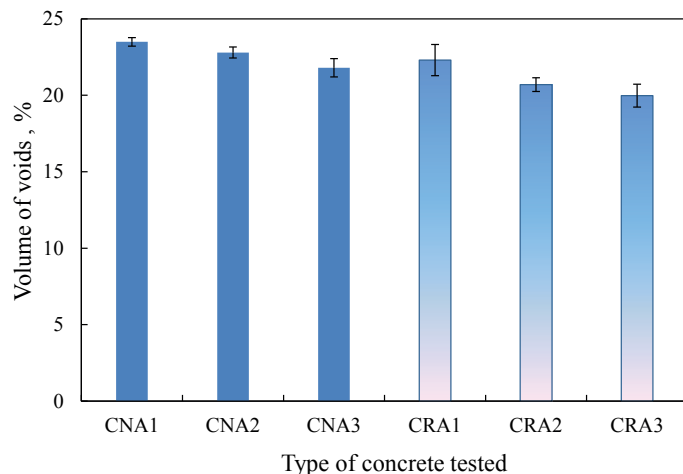


Fig. 18. Effect of the cement dosage and aggregates type on the porosity for pervious concrete.

Rys. 18. Wpływ ilości cementu oraz rodzaju kruszywa na porowatość betonów



Fig. 19. Shell aggregate shape

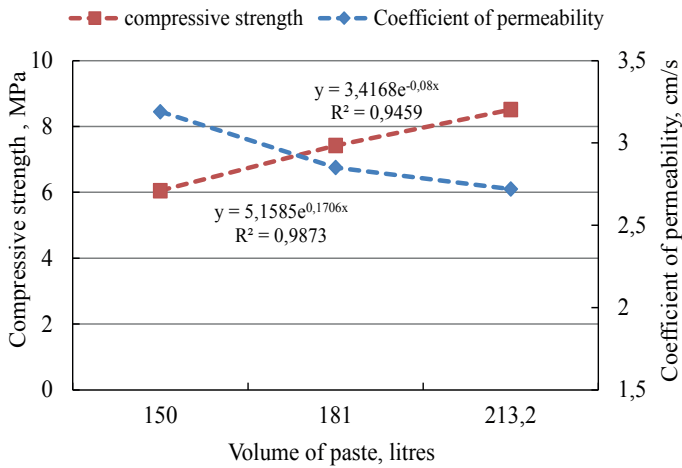
Rys. 19. Kształt ziaren kruszywa z muszli

The variation of permeability as a function of cement dosage is illustrated in Fig. 21. The permeability test confirmed that these experimented concretes are indeed permeable. The permeability coefficient decreases when the cement dosage increases, which is more predominant than when the type of aggregate changes. This result is in accordance with the outcomes of Yahia and Kabagire (42), which showed that the resistance of pervious concrete is improved if the cementitious binder quantity increases, because it produces a higher volume of paste. Excess paste clogs the open-pore structure of pervious concrete, reducing the void ratio and increasing strength.

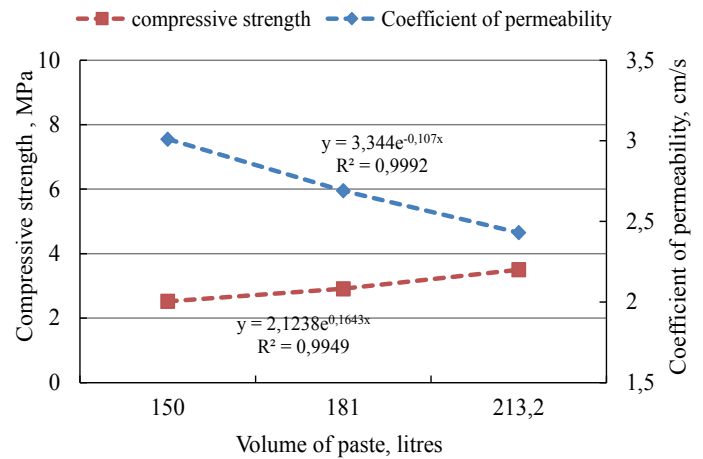
4.1.3. Porous texture of pervious concrete

The porous texture of pervious concrete with shell aggregates essentially depends on the granular arrangement of the constituents, which is well illustrated in Figs. 15 and 22.

Fig. 15 shows the photograph of the sample of pervious concrete with shell aggregates. One can see the distribution, shape, and



A/ Beton z grysem wapiennym / Concrete with crushed limestone aggregates



B/ Beton z kruszywem z muszli / Concrete with crushed shell aggregates

Fig. 20. Evolution of compressive strength and permeability as a function of paste volume (popraw proszę „dough” na „paste”)

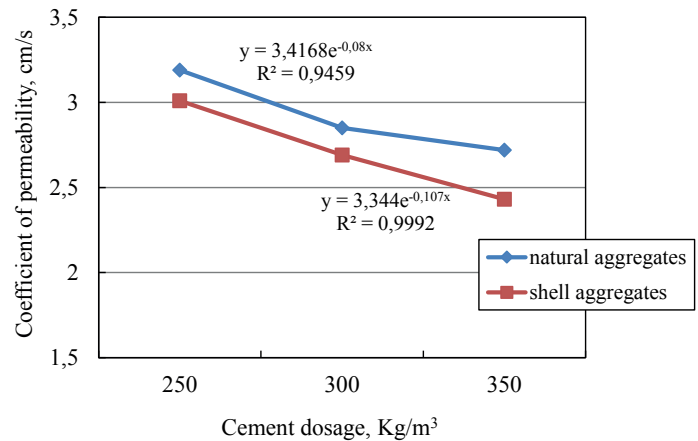
Rys. 20. Zmiany wytrzymałości na ściskanie i przepuszczalności w funkcji objętości zaczynu

które wykazały, że odporność betonu wodoprzepuszczalnego poprawia się, jeśli wzrasta ilość spoiwa cementowego, ze względu na to, że powstaje większa objętość zaczynu. Zbyt duża ilość zaczynu zmniejsza otwarte pory betonu wodoprzepuszczalnego, ograniczając udział porów i zwiększając wytrzymałość.

4.1.3. Porowata tekstura betonu wodoprzepuszczalnego

Porowatość tekstury betonu wodoprzepuszczalnego z kruszywem z muszli zależy przede wszystkim od rozmieszczenia ziaren składników, co dobrze ilustrują rysunki 15 i 22.

Rys. 15 przedstawia fotografię próbki betonu wodoprzepuszczalnego z kruszywem z muszli. Można zobaczyć rozkład, kształt i wielkość porów. Przepuszczalność zależy głównie od wielkości połączonych porów zawartych w betonie przepuszczalnym. Wszystkie badane betony mają system połączonych porów o wielkości wynoszącej od 2 do 5 mm. Według Sumanasooriya i Neithalath (43) na wielkość porów wpływa wielkość zastosowanych kruszyw i zawartość zaczynu. Obrazy SEM struktury porowatej betonu przepuszczalnego z kruszywem z muszli przedstawione na rysunku 22 pokazują, że wszystkie badane betony mają połączony system porów.



Rys. 21. Zależność przepuszczalności od zawartości cementu

Fig. 21. Variation of permeability as a function of cement dosage

size of the pores. The permeability is mainly dependent on the size of the interconnected pores present in pervious concrete. All the concretes studied are presented by the system of interconnected pores with a pore size ranging from 2 to 5 mm. According to Sumanasooriya and Neithalath (43) the pore size is influenced by the size of the aggregates used and the paste content. The SEM

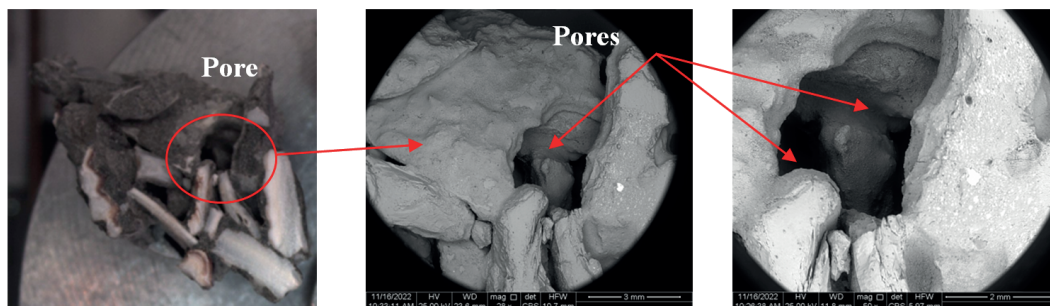


Fig. 22. SEM images of the porous texture of pervious concrete with shell aggregates

Rys. 22. Obrazy mikroskopowe tekstury betonu przepuszczalnego z kruszywem z muszli

5. Podsumowanie

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań możliwości wykorzystania kruszywa z muszli z recyklingu do produkcji betonu wodoprzepuszczalnego. Analizując te wyniki, można wyprowadzić następujące wnioski.

- Otrzymane wyniki pomiarów opadu stożka zmieniają się od 16 do 20 cm; te wartości klasyfikują betony zgodnie ze standardem jako płynne. Jednak stosunek wodno-cementowy wynoszący 0,27 bez plastyfikatora, nie zapewnia płynności betonu. Brak drobnych cząstek spowodował zmniejszenie mieszanki w trakcie badania.
- Na zmienność gęstości w stanie świeżym betonów wodoprzepuszczalnych wpływa ilość cementu w mieszance i rodzaj kruszywa.
- Ilość cementu wpłynęła na poprawę wytrzymałości mechanicznej. Kruszywo z muszli jest kruche, a betony zawierającą ten składnik wykazują małą wytrzymałość na ściskanie.
- Użycie kruszywa z muszli poprawia wytrzymałość na zginanie i ciągliwość betonów.
- Pomiar przepuszczalności potwierdził, że badane betony są rzeczywiście przepuszczalne. Współczynnik przepuszczalności maleje wraz ze wzrostem ilości cementu.

Ostatecznie, ta praca badawcza pokazała, że możliwy jest recykling produktów ubocznych z morza – muszli – do postaci kruszywa, dając ekologiczny materiał, który odpowiada na problemy środowiskowe.

Konflikt interesów

Badanie nie było dofinansowane.

Podziękowania

Autorzy pragną podziękować personelowi Laboratorium Narodowej Szkoły Górniczej i Metalurgii w Annabie, Algieria, za pomoc w analizie SEM i EDS.

Literatura / References

1. M. Kacemi, Protection of the coast in Algeria between management and legislation The case of the industrial center of Arzew (Oran, Algeria). *law and society*, **73**, 687- 701 (2009). <https://www.cairn.info/revue-droit-et-societe1-2009-3-page-687.htm>
2. E. Ghorbel, G. Wardeh, Influence of recycled coarse aggregates incorporation on the fracture properties of concrete. *Constr. Build. Mater.*, **154**, 51-60 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.183>
3. Z. Zhao, J. Xiao, Z. Duan, J. Hubert, S. Grigoletto, L. Courard, Performance and durability of self-compacting mortar with recycled sand from crushed brick. *Build. Engin.*, **57**, 104867 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104867>

images of the porous structure of pervious concrete with shell aggregates illustrated in Fig 22 show that all studied concretes present a connected pore system.

5. Conclusion

The paper presents the experimental results of a study on the possibility of using recycled shell aggregates to produce pervious concrete. By analysing these results, the following proposals can be stated.

- The results obtained from the slump measurements vary between 16 and 20 cm; these values classify these concretes according to the standard as fluid concretes. However, the w/c ratio = 0.27 used and without a plasticizer will not be able to guarantee the fluid concrete. The absence of fine particles has led to the pervious concrete mixes to collapse of the cone during the measurement.
- The variation of the fresh state density of pervious concretes is influenced by the cement dosage and the nature of the aggregates.
- The favourable effect of the cement quantity is highlighted to improve the mechanical resistance. Shell aggregates are fragile aggregates and concretes present poor compressive strength.
- Using shell aggregates improves flexural strength and the ductility of concretes.
- The permeability test confirmed that our study concretes are indeed permeable. The coefficient of permeability decreases when the dosage of cement increases.

Finally, this research work has revealed that the valorisation of marine by-products – shells, as aggregates is possible and gives us an eco-material that responds to the problem of the environment.

Conflict of interest

This study was unfunded.

Acknowledgments

The authors would like to thank the staff of the Laboratory of the National School of Mines and Metallurgy, Annaba, Algeria, for their assistance with SEM and EDS analyses.

4. L. Berredjem, N. Arabi, L. Molez, Mechanical and durability properties of concrete based on recycled coarse and fine aggregates produced from demolished concrete. *Constr. Build. Mater*, **246**, 118421 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118421>.
5. N. Arabi, H. Meftah, L. Berredjem, Valorization of recycled materials in development of self-compacting concrete: Mixing recycled concrete aggregates – Windshield waste glass aggregates . *Constr. Build. Mater*, **209**, 364-376 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.024>.
6. K.H. Mo, U.J. Alengaram, M.Z. Jumaat, S.C. Lee, W.I. Goh, C.W. Yuen, Recycling of seashell waste in concrete: A review. *Constr. Build. Mater*, **162**, 751–764 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.009>
7. S. Muthu Lakshmi, S. Geetha, M. Selvakumar, Effective usage of seashell waste to improve the strength characteristics. *Mater. Tod: Proce*, **65**, 484-488 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.647>
8. G. O. Bamigboye, A. T. Nworgu, A. O. Odetoyan, M. Kareem, D. O. Enabulele, D. E. Bassey, Sustainable use of seashells as binder in concrete production: Prospect and challenges. *J. Build. Engin.* **34**, 101864 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101864>
9. Y. Zhang, D. Chen, Y. Liang, K. Qu, K. Lu, S. Chen, M. Kong, Study on engineering properties of foam concrete containing waste seashell . *Constr. Build. Mater*, **260**, 119896 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119896>
10. H. N. Ruslan, K. Muthusamy, N.F. Ariffin, M.M. Abdul Wahab, N. Mohamad , Effect of crushed cockle shell as partial fine aggregate replacement on workability and strength of lightweight concrete. *Mater. Tod. Proc*, **48**, 1826–1830 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.140>.
11. M. H. Ahsan, M. S. Siddique, S.H. Farooq, M. Usman, M.A. Ul Aleem, M.Hussain, A.Hanif, Mechanical behavior of high-strength concrete incorporating seashell powder at elevated temperatures. *Build. Engin*, **50**, 104226 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104226>
12. B.A. Tayeh, M. W. Hasaniyah, A.M. Zeyad, M.O. Yusuf, Properties of concrete containing recycled seashells as cement partial replacement: A review. *Clean. Prod*, **237**, 117723 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117723>
13. P. Sangeetha, M. Shanmugapriya, K. Santhosh Saravanan, P. Prabhakaran, V. Shashank, Mechanical properties of concrete with seashell waste as partial replacement of cement and aggregate. *Mater. Tod. Proc*, **61**, 320-326 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.501>
14. U.G. Eziefula , J. C. Ezeh , B. I. Eziefula, Properties of seashell aggregate concrete: A review. *Constr. Build. Mater*, **192**, 287–300 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.096>
15. H. M. Hamada, F. Abed, B. Tayeh, M. S. Al Jawahery, A. Majdi, S.T. Yousif, Effect of recycled seashells on concrete properties: A comprehensive review of the recent studies. *Constr. Build. Mater*, **376**, 131036 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131036>
16. C. L. Hwang, C.T. Chen, H. L. Huang, S. S. Peng, L. A. Tuan Bui, Y. Yi Yan, The Design and Case Study of Pervious Concrete Materials. *Advan. Mater. Resea*, **287-290**, 781-784 (2011). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.287-290.781>.
17. T. Joshi, U. Dave, Construction of pervious concrete pavement stretch, Ahmedabad, India – Case study . *Case. Studi. Constr. Materi*, **16**, e00622 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00622>
18. K.S. Elango, R. Gopi, R. Saravanakumar, V. Rajeshkumar, D. Vivek, Properties of pervious concrete – A state of the art review. *Mater. Tod. Proc*, **45**, 2422-2425 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.839>.
19. J. Shan, Y. Zhang, S. Wu, Z. Lin, L. Li, Q. Wu, Pore characteristics of pervious concrete and their influence on permeability attributes. *Constr. Build. Mater*, **327**, 126874 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126874>.
20. X. Wang, Y. Wang, X. Ge, B. Tong, V. Schaefer, K. Wang, C. Li, The quantitative assessment of clogging and cleaning effects on the permeability of pervious concrete. *Constr. Build. Mater*, **335**, 127455 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127455>.
21. Y. Zhang, Hui Li, A. Abdelhady, J. Yang, Comparative laboratory measurement of pervious concrete permeability using constant-head and falling-head permeameter methods. *Constr. Build. Mater*, **263**, 120614 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120614>
22. A.A. Aliabdo, A.M. Abd Elmoaty, A.M. Fawzy, Experimental investigation on permeability indices and strength of modified pervious concrete with recycled concrete aggregate. *Constr. Build. Mater*, **193**, 105–127 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.182>.
23. E. Khankhaje, M.R. Salim, J. Mirza, M. W. Hussin, M.Rafieizonooz, Properties of sustainable lightweight pervious concrete containing oil palm kernel shell as coarse aggregate. *Constr. Build. Mater*, **126**, 1054–1065 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.010>.
24. I. Horiguchi, Y.Mimura, P. J.M. Monteiro, Plant-growing performance of pervious concrete containing crushed oyster shell aggregate. *Clean. Mater*, **2**, 100027 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100027>.
25. D.H. Nguyen, M. Boutouil, N. Sebaibi, L. Leleyter, F. Baraud, Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers. *Constr. Build. Mater*, **49**, 151-160 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.017>.
26. E. Khankhaje, M. Rafieizonooz, M. R. Salim, J. Mirzac, Salmiati, M. W. Hussin, Comparing the effects of oil palm kernel shell and cockle shell on properties of pervious concrete pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **10**, 383–392 (2017). <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.05.003>
27. D Wang, Q. Zhao, C. Yang, Y. Chi, W. Qi, Z. Teng, Study on frost resistance and vegetation performance of seashell waste pervious concrete in cold area. *Constr. Build. Mater*, **265**, 120758 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120758>.
28. W. Rezaiguia, Les monogènes parasites: inventaire et distribution chez 9 espèces de poissons téléostéens pêchés dans le golfe d'Annaba. *Magisterium Memory, Badji Mokhtar- Annaba University, Algeria*, 130 (2008). <https://biblio.univ-annaba.dz/wp-content/uploads/2015/10/Rezaiguia-Wafa.pdf>
29. NF EN12390-1, Essai pour béton durci, partie1: Forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules, (2001).
30. NF EN 12350-2, Essai pour béton frais. Partie 2: Essai d'affaissement, AFNOR, (999).
31. NF EN 12350-6, Masse Volumique Du Béton Frais, AFNOR, (999).
32. NF EN12390-5, Essai pour béton durci, partie5 : résistance à la flexion sur éprouvette, AFNOR, (2001).
33. NF EN12390-3, Essai pour béton durci, partie3 : résistance à la compression sur éprouvette, AFNOR, (2000).
34. ACI Committee 211. Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1-26 (2002).
35. ACI Committee 522. Report on Pervious Concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1-38 (2010).
36. ASTM C29/C29M, Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate, (2017).
37. H. Cuadrado-Rica, N. Sebaibi, M. Boutouil, B. Boudart, Properties of ordinary concretes incorporating crushed queen scallop shells, *Mater. Struct.* **49**, 1805–1816 (2016). <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0613-7>.

38. K. Obla, Pervious Concrete for Sustainable Development. Proceedings of the First International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Washington DC, USA, (2007).
39. M. Sonebia, M. Bassuonib, A. Yahia, Pervious Concrete: Mix Design, Properties and Applications, RILEM. Techn. Lett, 109 – 115 (2016). <http://dx.doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.24>.
40. M. Olivia, A. Mifshella, L. Darmayanti, Mechanical Properties of Seashell Concrete. Proc. Engin, **125**, 760-764 (2015), DOI: 10.1016/j.pro-eng.2015.11.127.
41. H. Cuadrado Rica, Étude du comportement de bétons de coproduits coquilliers pour une utilisation en récifs artificiels. doctoral thesis, University of Caen Normandy, French, 211 (2017). <https://theses.hal.science/tel-01578986/document>.
42. A. Yahia, D. Kabagire, New approach to proportion pervious concrete. Constr. Build. Mater, **62**, 38-46 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.025>.
43. M. S. Sumanasooriya, N. Neithalath, Pore structure features of pervious concretes proportioned for desired porosities and their performance prediction. Ceme.Conc. Comp, 33, 778–787 (2011). doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.06.002.