

Właściwości materiałów cementowych wzmacnianych odpornymi na środowisko zasadowe włóknami szklanymi, jako odpowiedniego materiału do zastosowań naprawczych

Properties of cementitious materials reinforced with alkali-resistant glass fibres as a suitable material for repair applications

Nourredine Arabi

Materials Geomaterials and Environment Laboratory, Badji Mokhtar Annaba University, BP 12 Annaba 23000, Algeria

e-mail: nourredine.arabi@univ-annaba.dz, nourredine.arabi@yahoo.fr

Streszczenie

Zbadano matrycę cementową, wzmocnioną włóknami szklanymi, jako odpowiedniego materiału do naprawy uszkodzonych konstrukcji. Zastosowano dwa podejścia do projektowania mieszanek: w pierwszym z nich stosowano konwencjonalną zaprawę, w drugim różne proporcje cementu i piasku, w celu wyboru najlepszej mieszanki. Osiągnięto korzystny stosunek urabialności z zawartością włókien. Stwierdzono, że stosunek cementu do piasku jest kluczowy dla urabialności mieszanki i powinien zawierać się w zakresie od 0,4 do 0,5. W doświadczeniach stosowano trzy długości włókien – 3, 6 i 12 mm. Przeprowadzono próby ściskania i zginania oraz zbadano zmiany skurczu, dla różnych zawartości i długości włókien. Stwierdzono poprawę wytrzymałości na zginanie zapraw cementowych wzmocnionych włóknami szklanymi, zwłaszcza gdy długość włókien zwiększono do 12 mm, w przypadku ich zawartości wynoszącej 2%. Wytrzymałość na ściskanie zmniejszyła się wraz z większą zawartością włókien.

Słowa kluczowe: włókna szklane; matryca cementowa; właściwości; urabialność; wytrzymałość na zginanie

Summary

The cement matrix reinforced with glass fibres was studied as a suitable material for the repair of damaged structures. Two approaches to mixture designs were tested: the first used a conventional mortar and the second with various cement-sand ratios to optimise the mixture. A compromise between the workability and high fibre ratio was achieved. Cement/sand ratio was found to be crucial for the workability of the mixes, with optimal values within the range 0.4-0.5. Three fibre lengths: 3, 6, and 12 mm were tested. Compression and flexural tests were carried out as well as the measurements of shrinkage evolution, which is a critical factor. Improvement was observed in the flexural behaviour of glass fibres reinforced cement mortars when the fibre length was increased to 12 mm with a glass fibre content of 2%. However, the compressive strength decreased with higher fibre content.

Keywords: glass fibre; cement matrix; properties; workability; flexural strength

1. Wprowadzenie

W ciągu ostatnich 40 lat wielu badaczy zajmowało się wzmacnianiem materiałów cementowych włóknami szklanymi (1-3). Pierwszymi stosowanymi włóknami były włókna szklane typu E. Mieszanki te dały wyniki niezadowolające ze względu na małą wytrzymałość (4). Było to spowodowane oddziaływaniem chemicznym zasadowej fazy ciekłej zaczynu cementowego na włókna szklane (5, 6). Szkło typu E zostało następnie zastąpione szkłem odpornym

1. Introduction

During the last 40 years, many researchers have discussed the reinforcement of the cementitious materials by glass fibres (1-3). The first fibres used were glass type E; these mixtures were unsatisfactory due to the poor durability (4). This is due to the chemical attack of fibres by alkalis present in the liquid phase of the very basic cement paste (5, 6). Glass type E was subsequently replaced by type alkali-resistant [AR] which had a different chemical composition. As

na środowisko zasadowe [SZ], które miało inny skład chemiczny. Jak stwierdzono w kilku pracach, zbrojenie włóknami szklanymi znacznie poprawia wytrzymałość, odporność na kruche pękanie i udarność kompozytów cementowych (7). W tym celu w matrycy cementowej powszechnie stosowane są obecnie włókna szklane odporne na działanie środowiska zasadowego (8). W okresie eksploatacji niektóre konstrukcje ulegają uszkodzeniom, spowodowanym oddziaływaniami mechanicznymi lub chemicznymi (9). W przypadku, gdy zastąpienie części materiału nośnego nowym o podobnych właściwościach staje się trudna, konieczne jest przeprowadzenie napraw. Wzmocniony włóknami szklanymi cement [WWSC] pozwala na uzyskanie kompozytu lepszej jakości, od tradycyjnego betonu. WWSC ma większą trwałość niż tradycyjny beton, dzięki ograniczeniu propagacji mikropęknięć i mniejszej przepuszczalności. WWSC jest lekki, około 50-70% lżejszy od tradycyjnego betonu (10). Włókno szklane odporne na SZ, o dużym module sprężystości podłużnej w porównaniu z włóknami polipropylenowymi, jest doskonałym wzmocnieniem do zapraw naprawczych (11). Autor zauważył jednak spadek urabialności przy wzroście zawartości włókien. Włókna szklane nie miały korzystnego wpływu na wytrzymałość betonu na ściskanie w porównaniu z wytrzymałością na rozciąganie i zginanie przy rozłupywaniu, które poprawiają się wraz ze wzrostem zawartości włókien. Jest to więc odpowiedni materiał do napraw lub opóźnienia procesu niszczenia konstrukcji (12, 13). Z punktu widzenia zastosowania, Homoro i in. (14) przeprowadzili badania dotyczące wpływu dodatku krótkich włókien szklanych na właściwości cieplne i mechaniczne betonu tak zbrojonego, przy równoczesnym działaniu podwyższonej temperatury i jednoosiowej siły rozciągającej. Z tych badań wynika, że dodatek krótkich włókien szklanych miał pozytywny wpływ na wytrzymałość, sztywność i odporność na pękanie, szczególnie w temperaturach od 20°C do 300°C. Włókna szklane odporne na SZ ograniczają skurcz i poprawiają kohezję materiału. Naprawa z użyciem zaprawy cementowej jest powszechnie stosowana do napraw ubytków na powierzchni betonu, spowodowanych korozją zbrojenia w konstrukcjach (15). Jednak każde wypełnienie ubytku konstrukcji musi spełniać wymagania jakościowe. Ważne jest powstrzymanie dalszego pogarszania się stanu konstrukcji. Materiał do naprawy powinien być odpowiednio nieprzepuszczalny dla czynników zewnętrznych, a naprawa powinna być również trwała. Materiał do odbudowy musi być zgodny jakościowo z podłożem (16). Autorzy pracy (16) wymieniają cztery główne wymagania dotyczące materiałów naprawczych. Po pierwsze, powinien on być w stanie zatrzymać dalsze niszczenie betonu, przede wszystkim korozję stali zbrojeniowej i nie przepuszczać agresywnych cieczy i gazów. Po drugie, dobrze połączyć się ze starym betonem. Po trzecie, musi być również wytrzymały i odporny na warunki atmosferyczne. W końcu musi mieć zgodne z naprawianym starym podłożem właściwości chemiczne, elektrochemiczne, przepuszczalność i zmiany wymiarowe – przede wszystkim skurcz.

Jest wiele zastosowań WWSC w praktyce, lecz niewiele jest badań, które podejmowałyby to zagadnienie. Aby to potwierdzić, należy przeprowadzić szereg badań tego materiału w celu dalszej poprawy jego właściwości. W niniejszych doświadczeniach badano

reported in several works, glass fibres reinforcement significantly improves the strength, fracture toughness, and impact resistance of concrete materials (7). For this purpose, alkali-resistant glass fibres is commonly used at present, in cement-matrix (8). During their service life, certain structures undergo damages, caused by mechanical or chemical deterioration (9). Where the replacement of sections of the support material with a new product with similar properties becomes difficult, it is necessary to carry out repairs. The glass fibres reinforced cement [GFRC] makes it possible to obtain products of better quality than the traditional concrete. The GFRC has a higher service life than traditional concrete due to controlling of micro-cracks propagation and less permeability. GFRC is lightweight and is about 50–70% lighter than traditional concrete (10). AR-glass fibres, with higher elastic modulus than the polypropylene fibres, is the perfect fibre reinforcement for repair mortar (11). However, the author noted a reduction in workability with an increase in fibres content. The glass fibres did not impart a positive effect on the compressive strength of concrete compared with the split tensile and flexural strength, which improve with an increase in fibre dosage. It is consequently an appropriate material for patching or to delay the evolution of deterioration (12, 13). From an application standpoint, Homoro et al. (14) conducted a study concerning the effect of the addition of short glass fibres, on the thermo-mechanical behaviour of textile-reinforced concrete, under combined thermal and uniaxial tensile loading. Their study shows that the addition of short glass fibres has a positive effect on the ultimate strength, stiffness and resistance to cracking, especially at temperatures between 20°C and 300°C. AR-glass fibres slow down the shrinkage and keep up the mortar in place. The repair by mortar is a common application for the repair of spalling caused by reinforcement corrosion in concrete structures (15). However, any patching accomplished on a structure must meet requirements. It is essential to stop further deterioration; the repair material be adequately impermeable to external agents and the repair should also be durable. The material of restore must be compatible with the substrate (16). These latter pointed out four major requirements for any repair material. First, the material has to be able to arrest further deterioration such as corrosion of the reinforcing steel and must be impermeable to aggressive liquids and gases. Second, it should be able to bond correctly with the old concrete. Third, it must also be durable and able to withstand severe weather conditions. Finally, it has a chemical, electrochemical, permeability and dimensional compatibility with the old substrate being repaired.

There are many applications of the GFRC in practice, but with very little research to support it. To assert this, advanced research on GFRC can be conducted to improve its properties further. In this experimental study, the influence of fibre length and fibres content on the physical and mechanical properties of GFRC was examined. This mixture composition can be adapted to a specific repair situation.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY WŁÓKNA SZKLANEGO, % MAS

CHEMICAL COMPOSITION OF GLASS FIBRE, % BY MASS

SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ O + K ₂ O	CaO	MgO	ZrO ₂	F ₂ O ₃	TiO ₂
66	3	–	12	–	2	16.6	0.5	–

wpływ długości i zawartości włókien na fizyczne i mechaniczne właściwości WWSC. Badany materiał może być stosowany po odpowiednich korektach i dopasowaniu składu do napraw konstrukcji.

2. Materiały i ich właściwości

W pracy wykonano zaprawy z cementu CEM II 42,5, w celu ograniczenia powstawania wodorotlenku wapnia (17, 18), a tym samym niszczeniu włókien (19). Stosowano dwie frakcje piasku krzemionkowego: pierwszą w zakresie 0 do 4 mm, a drugą od 0 do 500 µm. W celu poprawy urabialności mieszanek dodawano superplastyfikator [SP] Sikament FF86, o gęstości 1,23 g/cm³, pH w zakresie 7-11, zawartości Cl < 0,1% oraz zawartości Na₂O < 6%.

Zastosowane włókna szklane odporne na ŚZ typu CemFil, zawierały 16,6% tlenku cyrkonu. Ich skład chemiczny podano w tablicy 1. Włókna te mają lepszą odporność na zasadowe środowisko fazy ciekłej zaczynu cementowego (20). Główne właściwości mechaniczne podane przez producenta, Saint Gobain Vetrotex, Francja, są następujące: gęstość 2,68 g/cm³, wytrzymałość na rozciąganie 3500 MPa, moduł Younga 72000 MPa, maksymalne zmiany długości 2,4%. Każda nitka przędzy składa się z 204 włókien, z których każde ma średnicę około 10 mikronów.

2.1. Skład zaprawy

Właściwości zaprawy nie mogą być określone na etapie doboru jej składu. Konieczne jest dobieranie składu zaprawy zgodnie z zastosowaniem, które musi być łatwe i nie może wymagać długiego czasu. Skład zapraw WWSC musi zapewniać odpowiednie właściwości materiału: optymalna zawartość włókien, dobre zagęszczenie mieszanki, dobre właściwości reologiczne – aplikacja powinna być łatwa i nie wymagać dużej ilości energii.

Pierwsze etap polegał na przygotowaniu tradycyjnej zaprawy o stosunku cementu do piasku [C/P] = 1/3, wzmocnionej włóknami szklanymi odpornymi na ŚZ, w której frakcja objętościowa włókien zastępuje równoważną ilość piasku. Projekty mieszanek opracowano zachowując stały stosunek w/c wynoszący 0,5 i uziarnienie piasku zawarte w przedziale od 0 do 4 mm. Zastosowano trzy długości włókien – 3, 6 i 12 mm, a zmienną wybraną do optymalizacji ich właściwości była frakcja objętościowa włókien.

Zgodnie z literaturą, w celu zapewnienia odpowiedniej urabialności zaprawy zawartość włókien, powinna spełniać następujące kryterium (21):

$$V_f \frac{l}{d} < 3 \quad [1]$$

2. Materials and properties

In this work, mortars were made with cement CEM II 42.5, to reduce the calcium hydroxide formation (17, 18) and thus fibre deterioration (19). Two size fractions of siliceous sand were used: the first varies from 0 to 4 mm and the second varies from 0 to 500 µm. To improve the workability of the mixtures, a superplasticizer [SP] Sikament FF86 was used. Its principal physicochemical characteristics are: specific gravity 1.23; aqueous solution of pH 7-11; Cl contents < 0.1%; Na₂O content < 6%.

The composition of glass fibres [CemFil type, alkali-resistant], is completed with zirconium, the chemical composition is shown in Table 1. This fibre exhibits better durability with respect to the alkaline attack of cement (20). The principal mechanical properties given by the manufacturer, Saint Gobain Vetrotex, France are specific gravity 2.68, tensile strength 3500 MPa, Young's modulus 72000 MPa, maximum length variation 2.4%. Each yarn is composed of 204 filaments, having a diameter of about 10 microns [Fig. 1].

2.1. Mortar composition

The GFRC composition of mortars must also meet the following requirements: optimal fibre content, appropriate compactness and good rheology - application must be easy and not require a lot of energy.

The first approach involves manufacturing conventional mortar with a cement/sand [C/S] ratio = 1/3 and reinforced by AR glass fibre, in which the fibre volume fraction replaces an equivalent volume of sand. The mixture designs were implemented by retaining a fixed w/c ratio of 0.5 and the sand grading between 0 and 4 mm. Three fibre lengths – 3, 6, and 12 mm were used, and the fibre volume fraction was the parameter selected for optimization.

According to the literature, correctly deriving the workability of mortar requires ensuring that the fibre rate set as a practical



Fig. 1. Włókna szklane odporne na środowisko zasadowe

Fig. 1. AR glass-fibres

Tablica 2 / Table 2

TEORETYCZNE ZAWARTOŚCI GRANICZNE WŁÓKIEN O RÓŻNEJ DŁUGOŚCI

THEORETICAL LIMIT VALUES OF THE FIBRE CONTENT, WITH DIFFERENT LENGTH

Długość włókna, l / Fibre length, l, mm	3	6	12
Ilość włókien V_f / Fibre rate V_f , %	2.04	1.02	0.50

gdzie V_f : wskaźnik zawartości włókien w %, l długość włókna i d średnica wiązki włókien.

Granica ta nie jest ograniczeniem, a raczej wytyczną. Wiązkę włókien szklanych traktuje się jako pojedynczą jednostkę wzmacniającą – średnica wiązki d i długość l, a nie bierze się pod uwagę pojedynczych włókien. Teoretyczne progi zawartości włókien o długości 3, 6 i 12 mm w mieszance podano w tablicy 2. Wartości te obliczono przyjmując, że wiązka włókien składa się z 204 włókien, z których każde ma średnicę 10 μm .

Na rys. 2 przedstawiono wyniki badania urabialności w stosunku do udziału objętościowego włókien w procentach. Urabialność wzmocnionych zapraw była oceniana na podstawie czasu przepływu mierzonego w sekundach. Wyznaczano ją za pomocą aparatu do badania urabialności zaprawy, który umożliwia weryfikację jednorodności zaprawy w odniesieniu do jej urabialności lub plastyczności, zgodnie z normami europejskimi NF EN 413-2 (22). Czas przepływu wydłuża się wraz ze wzrostem długości włókna i jego zawartości, co stwierdzono również w kilku innych pracach (23, 24). Mieszanki zbrojone włóknami o długości 3 mm wykazują mniejszy wewnętrzny opór przepływu i można zastosować w nich do 2,5% udział włókien. W mieszankach z włóknami o długości 6 i 12 mm, maksymalny udział włókien nie przekracza odpowiednio 1,5% i 1%. Większy dodatek nie jest możliwy, ze względu na zatrzymanie płynięcia mieszanki. Wartości graniczne zawartości włókien o trzech długościach, ustalone w praktyce, są stosunkowo zbliżone do tych obliczonych za pomocą równania 1 – tablica 2. Pod względem rozmiaru, 3 mm włókna szklane są podobne do piasku, którego wielkość ziaren wynosi od 0 do 4 mm. Włókna o długości 3 mm nie zakłócają upakowania ziaren piasku. Obecność włókien o długości 3 mm pod względem zagęszczenia kruszywa działa tak samo jak równoważna objętość piasku. Jest to najbardziej wiarygodne wyjaśnienie, dlaczego zaprawa może być wzmocniona włóknami szklanymi o długości 3 mm, w ilości aż do 2,5% przy zachowaniu dobrej urabialności.

Sztywna konsystencja, uniemożliwiająca płynięcie zaprawy przy zastosowaniu włókien o długości 6 i 12 mm w ilościach większych niż wspomniane wcześniej,

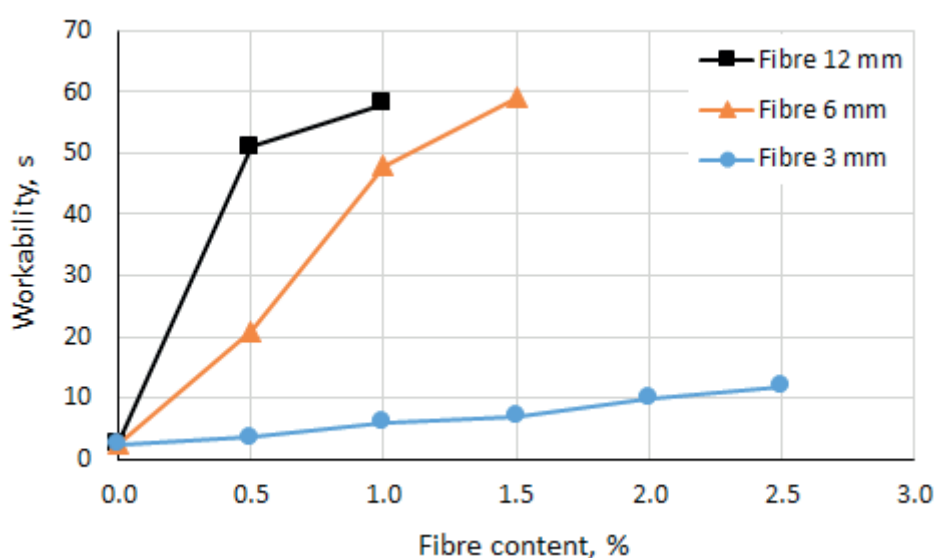
feasibility limit for composite reinforcement satisfies the following criterion (21):

$$V_f \frac{l}{d} < 3 \quad [1]$$

where V_f : the fibre rate in %, l the fibre length and d the diameter of a fibre bundle.

This limit is a parameter of appreciation and not a restrictive limit, and a glass fibre bundle is considered to behave as a single reinforcement unit – bundle diameter d and length l, rather than individual fibres. The theoretical fibre content thresholds necessary to introduce fibres that are 3, 6, and 12 mm long into a mortar mixture are given in Table 2. These values were calculated on the basis that the fibre bundle is composed of 204 filaments, each having a diameter of 10 μm .

The results obtained using the first approach are shown in Fig. 2, which represents the measure of workability versus the volume fibres fraction in percentage. The workability of reinforced mortars is evaluated on the basis of flow time, measured in seconds. It is determined using a mortar workability apparatus, which enables the verification of mortar homogeneity in relation to its workability or plasticity, as specified in European standards NF EN 413-2 (22). Flow time increases with increasing fibre length and fibres content an observation that was also reported in several other works (23, 24). Reinforced mixtures composed of 2.5% of fibres that are 3 mm long offer less internal resistance to flow. In mixtures with fibres that are 6 and 12 mm long, the maximum fibres fraction do not exceed 1.5% and 1%, respectively. Beyond these percentages, it is impossible for a mixture to flow. The fibres content limits under the three fibres lengths, ascertained through practice, are relatively close to those calculated with Eq. 1 [Table 2]. In terms of size, the 3 mm glass fibre length is similar to sand, whose particle size varies from 0 to 4 mm. The 3 mm fibre length does not disrupt the granular packing of sand. The fibres volume accompanying



Rys. 2. Urabialność wzmocnionej zaprawy w funkcji zawartości włókien

Fig. 2. Workability of reinforced mortar vs fibre content

wynika ze zwiększonego współczynnika smukłości włókien, co potwierdzają różne badania. Współczynnik ten to stosunek długości włókien do ich średnicy. Włókna takie zmniejszają gęstość upakowania ziaren ze względu na ich trzy do czterech razy większą długość w stosunku od wymiarów ziaren piasku. Podczas wibracji włókna mają tendencję do orientowania się równolegle do przepływu laminarnego, to znaczy równolegle do powierzchni ściany formy. Jest to dodatkowo wzmocnione w przypadku zwiększonej długości włókien i większej ich zawartości. Ponadto wiązki włókien tworzą gęste strefy splątania, ułożone warstwowo, które utrudniają swobodny przepływ matrycy cementowej. Piasek o wielkości 0/4 mm, którego zawartość jest znaczna – stosunek C/P = 1/3, oraz zawartość długich włókien, zwiększają opory płynięcia świeżej zaprawy, ponieważ powodują zaplątywanie się włókien i tarcie pomiędzy ziarnami kruszywa.

W kilku badaniach stwierdzono, że najlepszą metodą poprawy urabialności zaprawy wzmocnionej włóknami jest wzbogacenie mieszanki o drobne cząstki, czyli przez zwiększenie zawartości cementu lub zastosowanie plastyfikatora (12, 25, 26). Drugie podejście polega na uzyskaniu mieszanki z zaprawy o optymalnej zawartości włókien, przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiedniego przepływu zaprawy. W tym celu użyty piasek powinien mieć rozkład wielkości ziaren wynoszący od 0 do 500 µm zamiast frakcji o wielkości od 0 do 4 mm. Należy również stosować stały stosunek w/c wynoszący 0,5 oraz dodatek superplastyfikatora [SP] wynoszące 1% masy cementu. Uwzględniono trzy stosunki C/P: 0,3, 0,4 oraz 0,5. Dla każdego stosunku C/P zastosowano trzy proporcje włókien, a mianowicie 0, 1 i 2%. Projekty mieszanek zostały wykonane z włókna o długości 6 mm, a dla porównania wykonano próbkę wzorcową o zawartości 0% włókien i 0% SP. Mieszanki te, oznaczone jako cement zbrojony włóknem szklanym [CZWS], przedstawiono w tabelicy 3.

Zgodnie z wynikami przedstawionymi na rysunku 3, urabialność, tzn. czas przepływu w sekundach, zmniejsza się wraz ze zwiększeniem stosunku C/P. Bardzo znaczne skrócenie czasu przepływu stwierdzono, gdy stosunek C/P w mieszankach z włóknami wzrasta z 0,3 do 0,4. Ten wzrost stosunku C/P poprawia zagęszczenie kompozytu cementowego z włóknami. Drobne cząstki cementu ułatwiają wypełnienie przestrzeni między ziarnami piasku. W ten sposób uzyskuje się optymalną plastyczność szkieletu kruszywa, jeżeli dodaniu włókna towarzyszy dodatek frakcji pyłowej i cementu. W ten sam sposób rosnący stosunek C/P przyczynia się do urabialności mieszanki, którą uzyskuje się bardziej przez uzupełnienie cementu, niż przez dodanie większej ilości piasku.

Dodatek superplastyfikatora pozwala na deflokulację cząstek cementu, co poprawia właściwości reologiczne tych mieszanek, o dużej zawartości włókien. Superplastyfikator sprzyja równocześnie dobremu rozkładowi włókien w matrycy (28). Dla tego składu stosunek C/P powinien mieścić się w zakresie od 0,4 do 0,5.

a length of 3 mm acts in the same way as an equivalent sand volume in terms of compactness in a granular skeleton. This is the most plausible explanation of why a mortar mixture can be reinforced with the 3 mm glass fibres length and the fibres volume fraction equal to 2.5%.

The impossibility of the mortar flow at 6 and 12-mm fibre lengths above a certain threshold of fibres content, is due to the increased slenderness ratio of fibre, as reported in various studies. This ratio represents the fibre length/diameter ratio. Long fibres loosen granular packing and create a shield through an effect exerted by the local wall. During vibration, fibres tend to be oriented parallel to streamline flow, that is, parallel to the surface of a mould wall. This orientation preference is further amplified under increased fibre length and fibres content. Furthermore, fibres bundles form dense entanglement zones, arranged in layers, which impede the free flow of a cementitious matrix. A granular phase i.e. sand of the size of 0/4 mm, which is a significant quantity – C/S ratio = 1/3, and the presence of long fibres increase the shear force of fresh mortar because these induce fibres entanglement and friction, among aggregate particles.

Several studies have reported that the best method of improving the workability of fibres reinforced mortar is to enrich the mixture with fine particles, far more by increasing the content of cement, or use of plasticizer (12, 25, 26). The second approach involves creating the mortar mix with the most optimal fibres content, while ensuring appropriate mortar flow. To this approach, the used sand should have the particle size distribution falling between 0 and 500 µm, instead of a size fraction varying from 0 to 4 mm. A fixed w/c ratio of 0.5 and a superplasticizer [SP] dosage of 1% by cement mass should also be used. Three C/S ratios were considered: 0.3, 0.4 and 0.5. For each C/S ratio, two fibres contents were employed, namely 1% and 2%. The mixture designs were carried out with the 6 mm fibre length and a reference sample without fibres and SP, was prepared for comparison. These mixtures, denoted as fibreglass reinforced cement [FGRC], are presented in Table 3.

In accordance with the results plotted in Fig. 3, the workability, i.e., the flow time in seconds, decreases as the C/S ratio increases. A very significant flow-time reduction is observed when the C/S ratio of the fibres mixtures increases from 0.3 to 0.4. This increase in C/S ratio improves the compaction of the mix. The fine cement particles help to fill the spaces between the grains of sand. Thus, optimal compaction of the granular skeleton is obtained, if the addition of fibres is accompanied by the addition of fines and cement. In the same way, the increasing C/S ratio contributes to the workability

Tablica 3 / Table 3
ZAWARTOŚĆ WŁÓKIEN W RÓŻNYCH MIESZANKACH
DETAILS OF MIXTURE ADDITIONS/

Mieszanki / Mixtures	GFRC1 [Reference] CZWS1 [Wzorcowy]	GFRC2 / CZWS2	GFRC3 / CZWS3	GFRC4 / CZWS4
Fibre / Włókna, %	0	1	2	2
SP, %	0	0	0	1

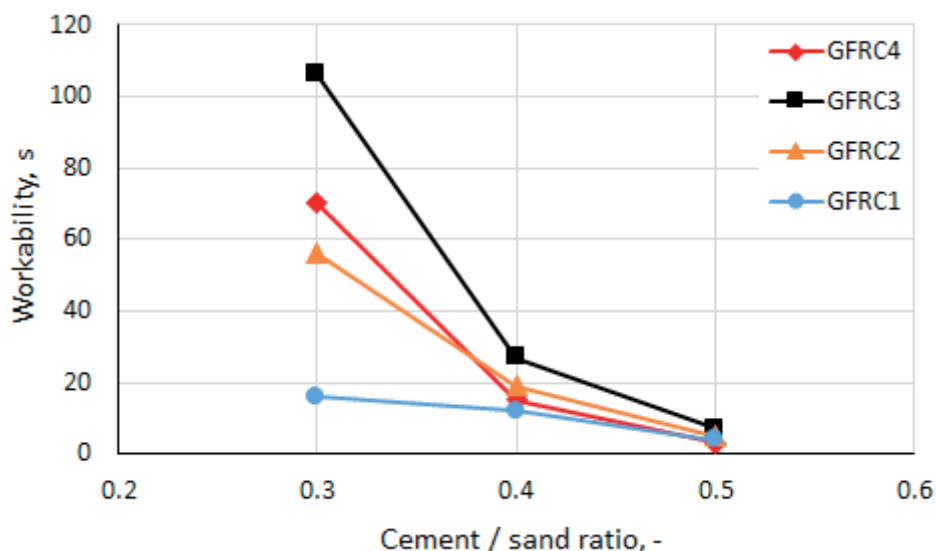


Fig. 3. Workability of reinforced mortars vs C/S ratios

Rys. 3. Urabialność zbrojonych zapraw w funkcji różnego stosunku C/P

Poprawę zagęszczenia potwierdza pomiar zawartości powietrza w świeżej zaprawie, który jest wykonywany za pomocą aparatu do pomiaru zawartości powietrza, zgodnie z normą europejską NF EN 413-2 (22). Rysunek 4 przedstawia zmianę procentową zawartości powietrza w odniesieniu do stosunku C/P różnych mieszanek. Zwiększenie stosunku C/P umożliwia zwiększenie objętości cementu, tak, aby drobne cząstki cementu wypełniały przestrzenie między ziarnami piasku. Należy również zaznaczyć, że superplastyfikator odgrywa ważną rolę powodując zmniejszenie lepkości plastycznej zaprawy.

2.2. Metody

W celu zbadania właściwości mechanicznych materiałów kompozytowych po stwardnieniu, przygotowano różne próbki. Wykonano serię próbek o wymiarach 40 mm x 40 mm x 160 mm z zaprawy wzorcowej bez włókien i zaprawy wzmocnionej włóknami szklanymi, o zawartości włókien 0,5%, 1%, 1,5%, 2% i 2,5% oraz długości włókien 3, 6 i 12 mm. Dla wszystkich mieszanek stosunek w/c i stosunek C/P wynosiły 0,5. Zawartość plastyfikatora nie przekraczała 1%. Przed badaniem wytrzymałości na ściskanie i zginanie próbki były przechowywane w komorze środowiskowej w 20°C i 95% RH. Pomiar skurczu oznaczono na próbkach przechowywanych w komorze środowiskowej w 22°C i 65% RH. Badanie skurczu przeprowadzono w dylatometrze, zaprojektowanym specjalnie dla próbek o wymiarach 40 mm x 40 mm x 160 mm.

Wytrzymałość na zginanie była określana za pomocą prasy hydraulicznej na próbkach o wymiarach 40 mm x 40 mm x 160 mm,

of the mixture, this being induced more by supplementing the cement content, than by higher sand addition.

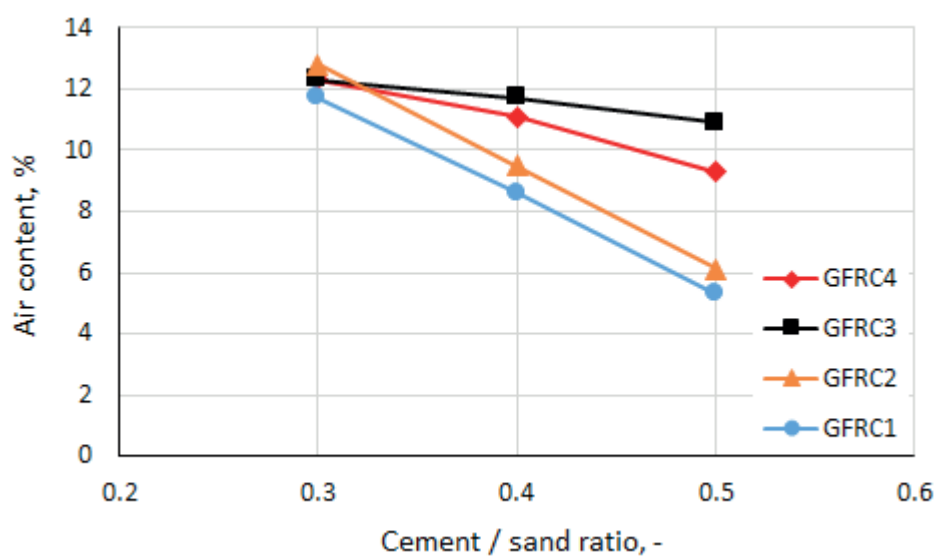
The addition of superplasticizer allows the cement to be deflocculated, which improves the rheological behaviour of these mixtures, i.e. mixtures with the high fibres content. The superplasticizer thereby fosters a good distribution of fibres in the matrix (28). For this formulation, it has been determined that the C/S ratio should be in the range of 0.4 to 0.5.

The improvement in compaction is confirmed by measuring the air content of fresh mortar, which is performed by using an air entrainment meter for mortar in compliance with the European standard NF EN 413-2 (22). Fig. 4 indicates the change in the percentage of air content in relation to C/S ratios of different mixtures. Increasing the

C/S ratio makes it possible to increase the volume of cement, so that the fine cement particles fill the spaces between the sand grains. It should also be pointed out that the superplasticizer plays an important role in the fluidity increase and for this purpose this admixture is used.

2.2. Methods

In order to study the mechanical performance of the composite after hardening, various samples were prepared. Series of samples of the glass fibres reinforced mortars of the dimension 40 mm x 40 mm x 160 mm were prepared with 0.5%, 1%, 1.5%, 2%, and 2.5% of fibres and 3, 6 and 12 mm fibre lengths and the reference sample without fibres. For all the mixtures, the w/c ratio and the C/S ratio were kept constant at 0.5. The plasticizer content



Rys. 4. Zmiana objętości powietrza w odniesieniu do stosunków C/P

Fig. 4. Change of the air content volume in relation to C/S ratios



Rys. 5. Aparat do pomiaru zmian liniowych

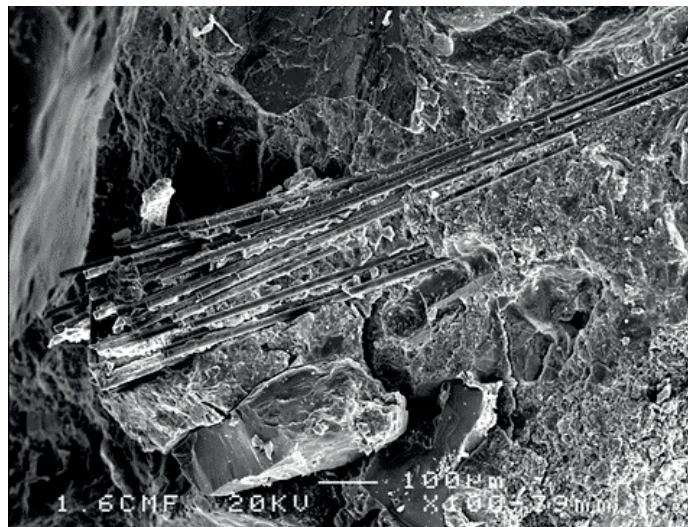
Fig. 5. Shrinkage measuring device

metodą trójpunktowego obciążenia zginającego. Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono na połówkach próbek otrzymanych po badaniu wytrzymałości na zginanie, o powierzchni 40 mm x 40 mm. Pomiary te wykonywano przy użyciu prasy, połączonej z systemem akwizycji danych. Pomiary wytrzymałości przeprowadzono po 7 i 28 dniach, a badania skurczu po 1, 2, 3, 7, 14, 21 i 28 dniach. Na rysunku 5 pokazano aparat do pomiaru skurczu.

3. Wyniki i omówienie

3.1. Zmiana długości

Na rysunku 6 pokazano zmiany wymiarów próbek zapraw w funkcji ich wieku. W tej części przedstawiono tylko wyniki skurczu próbek z 2% zawartością



Rys. 7. Rozmieszczenie włókien o długości 12 mm w matrycy cementowej

Fig. 7. Distribution of 12 mm fibres within the cement matrix

did not exceed 1%. Prior to compressive and flexural strength tests, samples were stored in an environmental chamber at 20°C and 95% HR. For the measurements of shrinkage the samples stored in the environmental chamber at 22°C, 65% RH were used. The shrinkage test was carried out on a dilatometer, specially designed for the 40 mm x 40 mm x 160 mm samples.

The flexural strength is determined with 3-point flexural loading on prismatic specimens of 40 mm x 40 mm x 160 mm, using the hydraulic press. Compressive strength was measured on half of the samples, which were broken in the flexural strength test, with a bearing surface of 40 mm x 40 mm. These tests were carried out using a testing machine connected to a data acquisition system. Measurements of strength were carried out at 7 and 28 days and shrinkage tests at 1, 2, 3, 7, 14, 21 and 28 days. Fig. 5 shows the shrinkage measuring device.

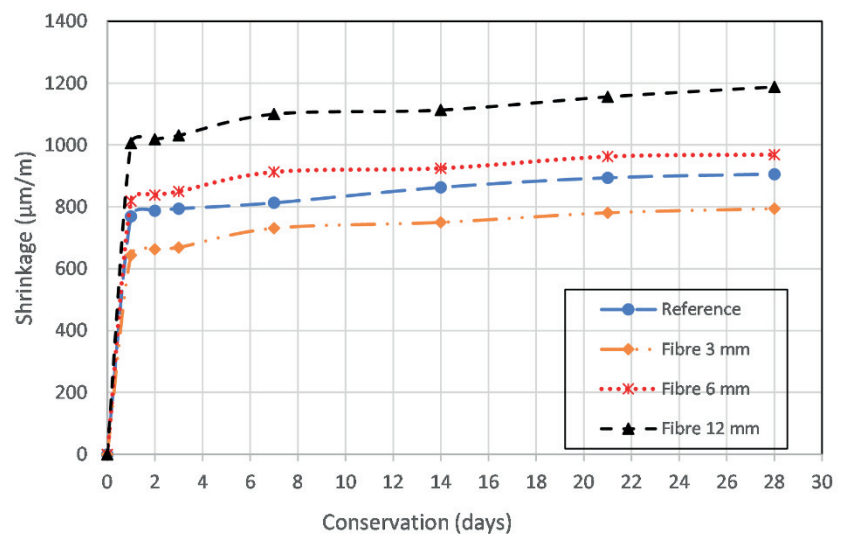


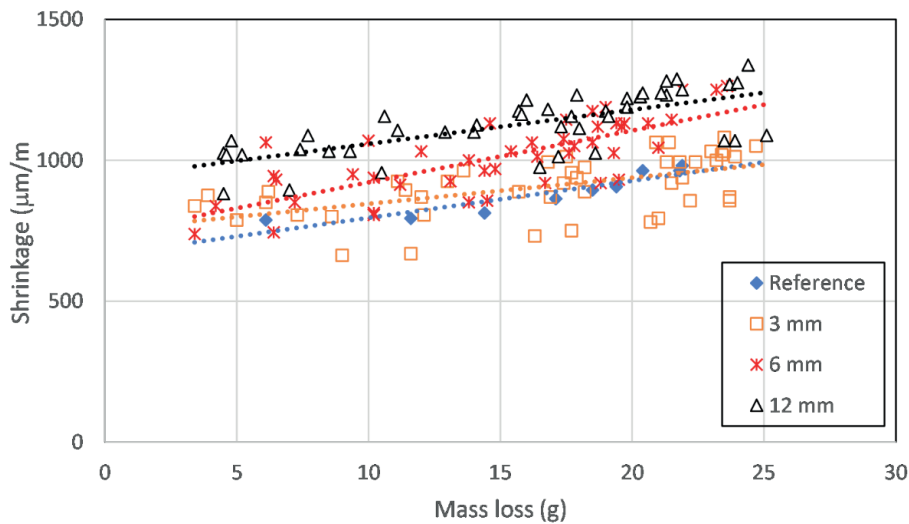
Fig. 6. Length variation of samples vs curing time, in days

Rys. 6. Zmiany długości próbek w funkcji czasu pielęgnacji, dni

3. Results and discussion

3.1. Length variation

In Fig. 6 the length change of the mortar samples, as the function of their age, is presented. In this section, only the shrinkage results for mortars with 2% fibre content are shown. The total shrinkage is significant during the first days and it stabilises after three weeks. The mortar without fibres also presents the similar behaviour. This is normally associated with the formation of cement hydration products. Only the GFRC1 and GFRC2 mixtures present the shrinkage values close to those of standard mortar limited to 800 µm/m, measured according to the standard NF EN 1992-1-1 (29). However, the other mixtures exceed this limit. The evolution of the total shrinkage is influenced by the glass-fibres geometric characteristics. The 3 mm fibre length seems to give a better behaviour towards the total shrinkage, by comparison with the other fibre lengths and even the control mixture. The long fibres



Rys. 8. Relacja pomiędzy skurczem a utratą masy próbek zapraw

Fig. 8. Shrinkage variation vs mass loss

włókien. Całkowity skurcz jest znaczny w pierwszych dniach i stabilizuje się po trzech tygodniach. Podobne zmiany występują również w przypadku zaprawy bez włókien. Jest to zazwyczaj związane z powstawaniem hydratów w zaczynie cementowym. Tylko mieszanki GFRC1 i GFRC2 wykazują skurcz zbliżony do skurczu standardowej zaprawy, który wynosi 800 $\mu\text{m/m}$, mierzony zgodnie z normą NF EN 1992-1-1 [29]. Natomiast pozostałe zaprawy przekraczają ten limit. Na rozwój całkowitego skurczu wpływa geometria włókien szklanych. W porównaniu z innymi długościami włókien, a nawet z mieszanką kontrolną, długość 3 mm wydaje się zapewniać lepszy skurcz całkowity. Długie włókna nie dają gęstej zaprawy, ponieważ są one bardzo źle rozłożone w ziarnistej matrycy kruszywa [rys. 7]. Wyniki te są zgodne z innymi pracami (30, 31). Autorzy tych prac doszli do wniosku, że dodatek dłuższych włókien zwiększa zawartość dużych porów w zaczynach cementowych, wpływając tym samym na wydzielanie mleczka. Zasugerowali oni również, że dla danej frakcji objętościowej włókien, zmiana długości włókien lub ich geometrii nie ma zauważalnego wpływu na skurcz.

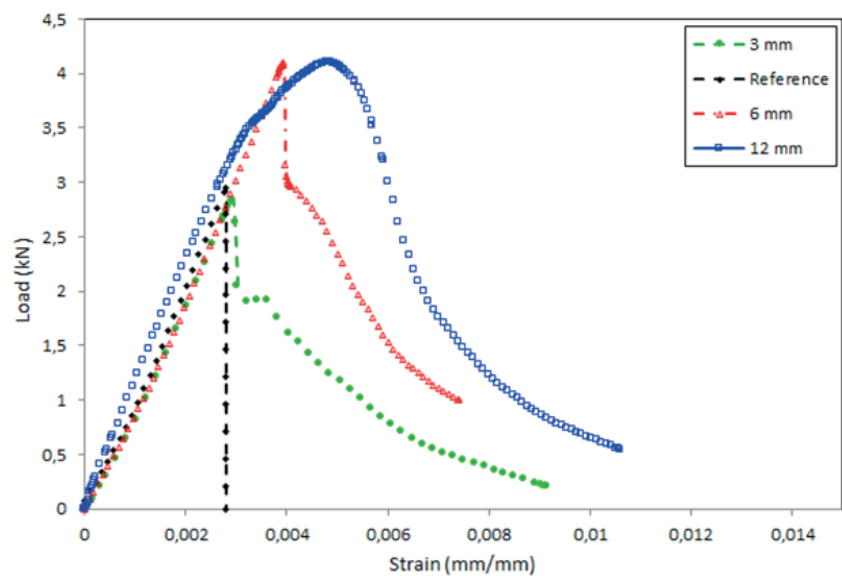
Na rysunku 8 zestawiono wszystkie wartości skurczu całkowitego w funkcji ubytku masy mieszanki, uwzględniając przy tym zmiany frakcji objętościowej włókien i ich długości. Choć położenie punktów wydaje się bardzo rozproszone, linie regresji podkreślają bardzo silny związek między całkowitym skurczem, a utratą masy. Potwierdza to przedstawioną wcześniej analizę, a tym samym stwierdza wpływ długości włókien na całkowity skurcz.

3.2. Wytrzymałość na zginanie

Przykładowe krzywe obciążenie/odkształcenie pokazano na rysunku 9. Dotyczą one próbki normowej bez włókien oraz próbek wzmocnionych 2% udziałem *włókien szklanych*, o długości 3,

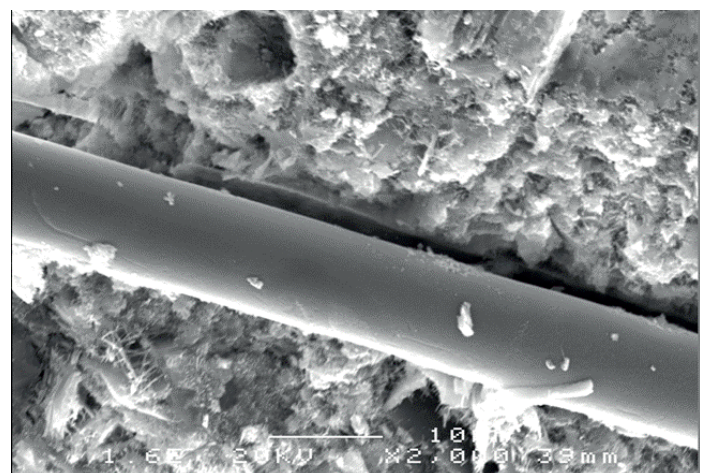
do not give a compact mortar because fibres are badly distributed in the granular matrix [Fig. 7]. These results are in agreement with the cited works (30, 31). The authors of these studies concluded that the longer fibres increase the number of large pores in cement paste, thus influencing its bleeding behaviour. They also suggested that for a given volume fraction of fibres, changing the fibre length or geometry did not have a noticeable effect on the shrinkage.

In Fig. 8, all the values of total shrinkage versus the mixtures mass loss, following the variations of fibre volume fraction and length, are assembled. Although the point cloud appears dispersed, the regression lines highlight a strong link between total



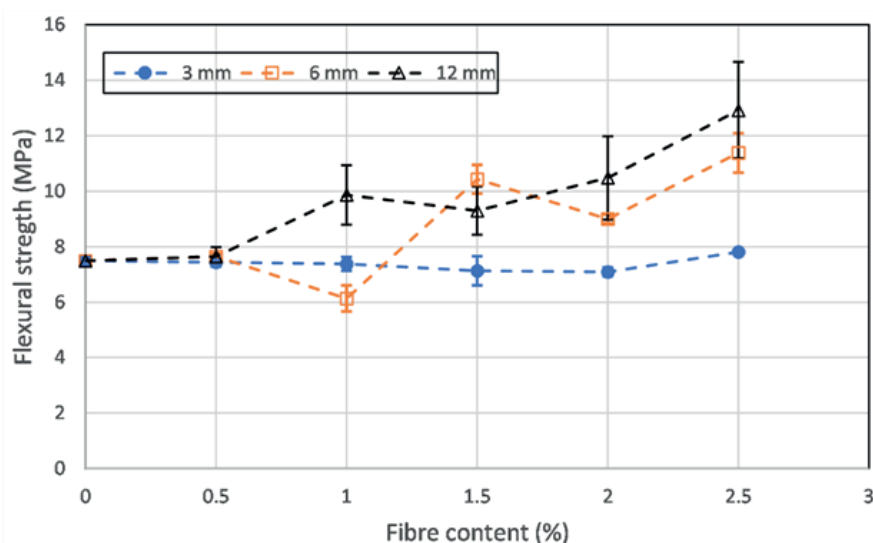
Rys. 9. Krzywe obciążenie - odkształcenie

Fig. 9. Load-deflection curves



Rys. 10. Przerwanie wiązania włókna z matrycą cementową

Fig. 10. Disruption between fibre and cement matrix



Rys. 11. Wytrzymałość na zginanie po 7 dniach

Fig. 11. Flexural strength after 7 days of curing

6 i 12 mm. Z krzywych wynika, że próbki wzmocnione krótkimi włóknami, o długości 3 lub 6 mm, zachowują się w podobny sposób jak próbki bez włókien. Na podstawie kształtu krzywych można stwierdzić ich quasi-liniowość aż do punktu zerwania, co oznacza pękanie kruche. W przypadku próbek wzmocnionych włóknami o długości 12 mm, uzyskana krzywa przedstawia trzy fazy: elastyczną, wielokrotnych pęknięć i po wielokrotnym popękaniu. Druga faza wielokrotnego popękania odpowiada ewolucji uszkodzeń, w wyniku rozwoju mikropęknięć w materiale. W tej fazie rozwój małych szczelin staje się niekontrolowalny. Dla tej części krzywej długość i gładkość zależą od wytrzymałości wiązania włókno–matryca i wytrzymałości na zginanie będzie od niej zależała. Jak pokazano na rysunku 9, wpływ włókien o długości 12 mm jest korzystny. Kształt tej części zależności obciążenie–odkształcenie może być związany z liczbą i rozwarciem pęknięć, opisanych przez Barhuma i Mechtcherine’a (13). Stan końcowy jest

fazą po wielokrotnym popękaniu, w którym drobne spękania, powstałe już w drugiej fazie, uzyskują dalej większe rozwarcie, aż do osiągnięcia wytrzymałości włókien na rozciąganie i do zniszczenia kompozytu. W tej fazie, jak pokazano na rysunku 10, występują lokalne zniszczenia wiązania włókien z matrycą, lecz nie dochodzi do zerwania włókien.

Na rys. 11 i 12 pokazano wytrzymałość na zginanie po 7 i 28 dniach twardnienia, w zależności od trzech długości włókien i ich udziału objętościowego. Włókna o długości 3 mm nie wykazywały żadnego widocznego wpływu na obciążenie zginające, nawet w przypadku dużego udziału objętościowego. Poprawa widoczna jest przy długości włókien 6 mm i 12 mm. W przypadku wzmocnionych próbek o zawartości włókien mniejszej niż 2%, różnice

shrinkage and mass loss. This confirms the analysis developed before, consequently validating the effect of fibre length on the total shrinkage.

3.2. Flexural Strength

An example of load/deflection curves is shown in Fig. 9. This represents the standard sample without fibres and the samples reinforced with AR-glass fibre of 2% content, having the lengths of 3, 6 and 12 mm. As the first observation, the specimens reinforced with short fibres 3 mm and 6 mm behave in a similar manner to that without fibres. It can be seen from the curves that there is a quasi-linearity up to the point of the rupture, which means the brittle fracture behaviour. By contrast, the specimens reinforced with fibres of 12 mm length, show the curves with three phases: elastic, multiple cracking and post-multiple

cracking. The second phase of multiple cracking corresponds to the evolution of damage, due to the development of micro-cracks in the material. In this phase, the development of fine fissures become uncontrollable.

For this portion of the curve, the length and smoothness rely on the quality of the fibre–matrix bond, and the flexural strength will depend on it. As shown in Fig. 9, the efficiency of 12 mm fibre length is quite obvious. In fact, the aspect of this part of the load–strain relation can be related to the number and widths of cracks, as described by Barhum and Mechtcherine (13). The final condition is related to the phase of post-multiple cracking or “post-peak behaviour after the maximum load”, where the fine fissures, already formed in the second phase, further increase their spacing, until the tensile strength of the fibre is reached and the composite fails. In this phase, as shown in Fig. 10, it is the fibre local debonding at

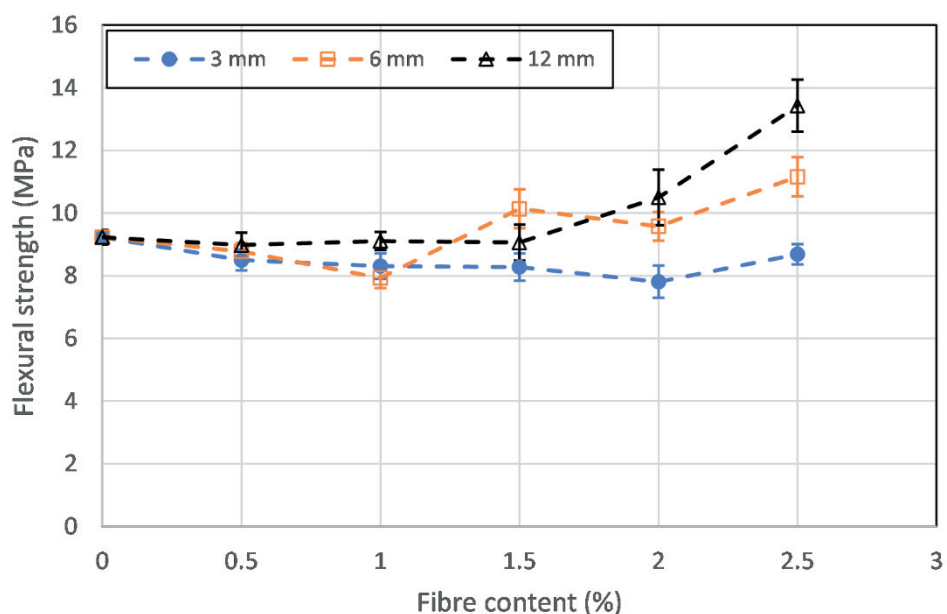


Fig. 12. Flexural strength after 28 days of curing

Rys. 12. Wytrzymałość na zginanie po 28 dniach dojrzewania

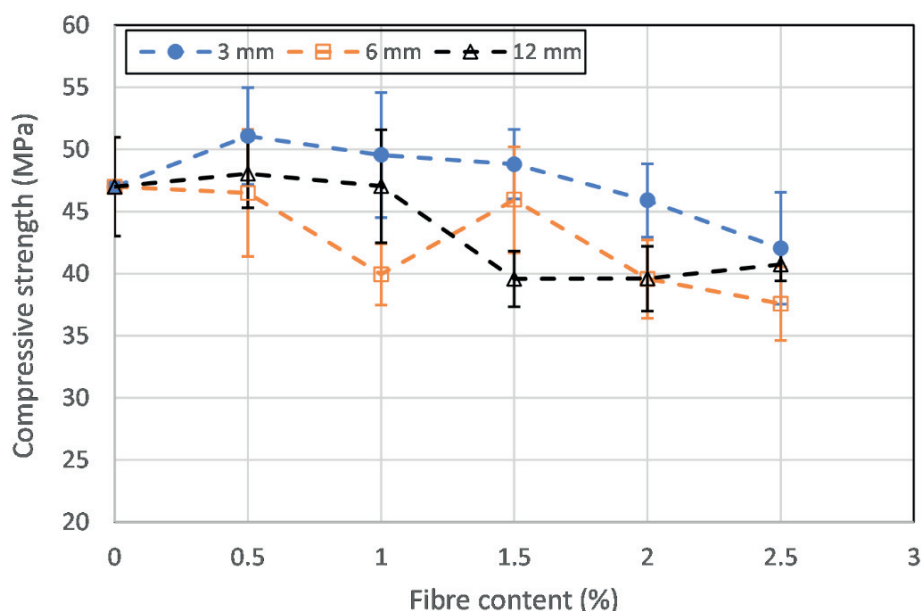


Fig. 13. Compressive strength after 28 days of curing

Rys. 13. Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania

pomiędzy wynikami wytrzymałości po 7 dniach twardnienia są mniej lub bardziej znaczące. Jednak po 28 dniach twardnienia te różnice między wynikami stają się mniej znaczące. Rossi (32) opisał te zależności, łącząc je z dojrzałością matrycy, która nadal twardnieje i gęstnieje w czasie. Wraz z upływem czasu twardnienia poprawia się wiązanie włókno-matryca, a więc wiązanie międzyfazowe, dzięki czemu przenoszenie obciążenia przez włókna, po obu stronach mikropęknięcia stają się skuteczne (33). Po 28 dniach twardnienia, matryca osiąga dojrzałość wystarczającą do przenoszenia obciążeń.

3.3 Wytrzymałość na ściskanie

Wyniki przedstawione na rysunku 13 pokazują, że włókna mają niekorzystny wpływ na wytrzymałość na ściskanie. Wydaje się, że im więcej włókien jest dodawanych do próbek, zwłaszcza przy dużej ich zawartości, tym ich wytrzymałość na ściskanie jest mniejsza od próbki wzorcowej.

Zaprawy wzmocnione długimi włóknami szklanymi wykazują największy spadek wytrzymałości na ściskanie, co wynika z obecności długich wiązek włókien, które sprawiają, że matryca jest gorzej zagęszczona i mniej zwarta.

Dodatek włókien szklanych odpornych na ŚZ do zapraw cementowych wydaje się korzystny przy naprężeniu rozciągającym, lecz niekorzystny przy ściskaniu. Pokazuje to współczynnik R_f/R_c - stosunek wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu do wytrzymałości na ściskanie, pokazany na rysunku 14. Najdłuższe włókna dają lepsze wyniki, jak podają Rossi i in. (34).

the fibre matrix interface that is observed, so the rupture of fibre has not occurred.

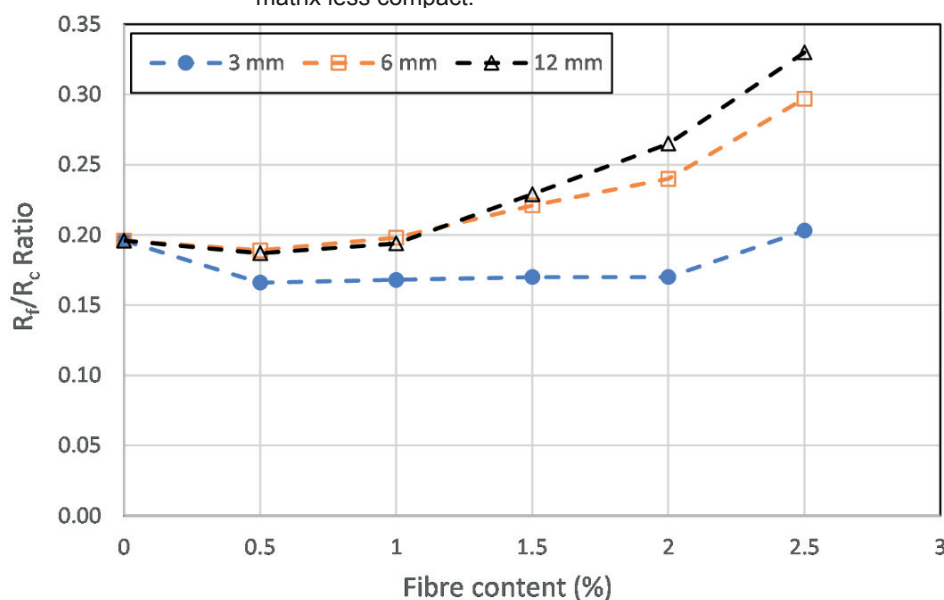
Figs. 11 and 12 show the flexural strength results at 7 and 28 days of curing, according to the three fibre lengths and the fibres volume fraction used in this study. The 3 mm fibre length did not show any apparent effect under a flexural load, even when the fibres volume fraction is increasing. The improvement is seen with 6 and 12 mm fibre lengths and the increase in fibres content. For reinforced samples at rates less than 2% of fibres, the differences between the results are more or less significant i.e. resistances obtained after 7 days of curing. However, after 28 days of curing, these differences between the results become less significant. Rossi (32) has reported this behaviour by assigning it to the maturity of the matrix, which continues to mature and increasing the density over time. With the

curing time, the fibre-matrix bond, or interfacial bond, improves, so the load transfer by the fibres, on either side of the micro-crack becomes effective (33). At 28 days of curing, the matrix develops a sufficient maturity to withstand the loads.

3.3. Compressive strength

The results presented in Fig. 13, show that the fibres have an unfavourable role in compressive strength. A downward trend seems to appear as more fibres are added to the samples, especially at higher fibres content, the compressive strength is decreasing and became lower than the reference sample.

GFRC reinforced with long fibres record the sharpest drop, as a consequence of the concentration of fibres bundles that make the matrix less compact.



Rys. 14. Zmiany stosunku R_f/R_c po 28 dniach w funkcji zawartości włókien

Fig. 14. Evolution of R_f/R_c after 28 days vs fibres content

4. Wnioski

Z uzyskanych wyników można wyciągnąć następujące główne wnioski:

- Projektowanie składu zaprawy naprawczej zbrojonej włóknami, różni się od projektowania klasycznej zaprawy. W tym przypadku urabialność jest często ważnym czynnikiem przy wykonywaniu napraw konstrukcji.
- W celu uzyskania lepszej urabialności mieszanki o dużej długości i zawartości włókien, konieczne jest dostosowanie stosunku cementu do piasku.
- Dodatek 1 % plastyfikatora okazuje się wystarczający w przypadku zapraw o małej zawartości włókien, a jest niewystarczający w przypadku mieszanek zawierających więcej niż 2 % włókien, o długości 12 mm. W tym przypadku trudności związane z homogenizacją są bardzo ważne.
- Zastosowanie włókien szklanych o długości 3 mm znacznie zmniejsza całkowity skurcz zaprawy.
- Zastosowanie włókien szklanych poprawia wytrzymałość na zginanie zapraw wzmocnionych włóknami szklanymi. Przy długości włókien 12 mm i 2% ich zawartości, stwierdzono synergię – wzmocnienie matrycy, ale jest to szkodliwe dla urabialności, często wymaganej dla materiału naprawczego.
- Wytrzymałość na ściskanie zapraw wzmocnionych włóknami szklanymi, zmniejsza się wraz z dodatkiem włókien.

Podziękowanie

Autor wyraża podziękowania panom Joseph Le Lannic i Francis z Goutefangeas, CMEBA Rennes1 University, Francja, za ich pomoc w badaniach pod elektronowym mikroskopem skaningowym.

Literatura / References

1. C. Zanotti, N. Banthia, G. Plizzari, A study of some factors affecting bond in cementitious fiber reinforced repairs. *Cem. Con. Res.* **63**, 117–126 (2014). <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.05.008>
2. N. Arabi, L. Molez, D. Reangeard, Durability of Alkali-Resistant Glass Fibers Reinforced Cement Composite: Microstructural Observations of Degradation. *Period. Polytech. Civ. Eng.* **62**(3): 653-659 (2018). <https://doi.org/10.3311/PPci.10631>
3. N. Arabi, Static and cyclic performance of cementitious composites reinforced with glass-fibres. *Mater. Constr.* **68**(329), 1–11 (2018). <https://doi.org/10.3989/mc.2018.10216>
4. C.L. Schutte, Environmental durability glass fiber composites. *Mater. Sci. Eng. B Rep.* **13**(7), 265–323 (1994). [https://doi.org/10.1016/0927-96X\(94\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0927-96X(94)90002-7)
5. A.J. Majumdar, P.L. Walto, Durability of fiber cement composites. *ACI Mater. J.* **126**(8), 745-771 (1991). <https://doi.org/10.14359/2370>
6. N. Arabi, Influence of Curing Conditions on the Durability of Alkali-resistant Glass Fibers in Cement Matrix. *Bull. Mater. Sci.* **34**(4): 775–783 (2011). <https://doi.org/10.1007/s12034-011-0194-1>

The incorporation of AR glass fibres in GFRC appears advantageous under tensile stress but unfavourable in compression. The determination of the R_f/R_c ratio – flexural tensile strength/compressive strength points out, [Fig. 14] that the longest fibres are more efficient, as reported by Rossi et al. (34).

4. Conclusions

From the obtained results the following main conclusions can be drawn:

- The quantification of the mixture design and its composition with fibres in repair mortars is different from the classical mortar. In this case, the workability is often an important consideration when repairing failures or fractures.
- In order to obtain a better mixture workability with high fibre lengths and content, it is essential to adjust the cement/sand ratio.
- The addition of 1 % of plasticizer proves to be a maximum for the mortars with low fibres contents and insufficient for mixtures containing more than 2 % of the 12 mm fibres. In this case, the difficulties of homogenisation are highly significant.
- The addition of 3 mm glass fibres remarkably reduces the total shrinkage of mortar
- The addition of glass-fibres improves the flexural behaviour of glass fibres reinforced cement. With a 12 mm fibre length and 2% fibres content, a synergy in matrix reinforcement was observed, but this is detrimental to the workability, often required for repair material.
- Conversely, the compressive strength of the glass fibres reinforced cement tends to decrease.

Acknowledgement

The author expresses thanks to Joseph Le Lannic and Francis Goutefangeas, CMEBA Rennes1 University, France, for their assistance in SEM.

7. V.R. Sivakumara, O.R. Kavithab, G. Prince Arulrajc et al., An experimental study on combined effects of glass fiber and metakaolin on the rheological, mechanical, and durability properties of self-compacting concrete. *Appl. Clay Sci.* **147** 123–127 (2017). <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2017.07.015>
8. K.B. Jonalagadda, D.C.K. Jagarapu, A. Eluru, Experimental analysis on supplementary cementitious materials with alkali resistant glass fibers. *Mater. Today Procc.* **27**(2): 1569–1574 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.209>
9. O. Czoboly, É. Lublőy, V. Hlavička, G.L. Balázs, O. Kéri, I.M. Szilágyi, Fibers and fiber cocktails to improve fire resistance of concrete. *J. Therm. Anal. Calor.* **128**(3): 1453–1461 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10973-016-6038-x>
10. M. İskender, B. Karasu, Glass Fibre Reinforced Concrete (GFRC). *El-Cezeri J. Sci. Eng.* **5**(1), 136-162 (2018). <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/418809>
11. H. Zhang, *Building Materials in Civil Engineering*. Woodhead Publishing, Philadelphia, USA, 2011.
12. V. Langlois, B. Fiorio, A.L. Beaucour, R. Cabrillac, D. Gouvenot, Experimental study of the mechanical behaviour of continuous glass and carbon yarn-reinforced mortars. *Const Build Mater.* **21**, 198–210 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.048>
13. R. Barhum, V. Mechtcherine, Influence of short dispersed and short integral glass fibres on the mechanical behaviour of textile-reinforced concrete. *Mater Struct.* **46**, 557–572 (2013). <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9913-3>
14. O. Homoro, X. Hong Vu, E. Ferrier, Experimental and analytical study of the thermo-mechanical behaviour of textile-reinforced concrete (TRC) at elevated temperatures: Role of discontinuous short glass fibres. *Const Build Mater.* **190**, 645–663 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.142>
15. D.A. Koleva, An Innovative Approach to Control Steel Reinforcement Corrosion by Self-Healing. *Materials.* **11**(309), 2-26 (2018). <https://doi.org/10.3390/ma11020309>
16. N. Banthia, C. Zanotti, M. Sappakittipakorn, Sustainable fiber reinforced concrete for repair applications. *Const Build Mater.* **67**, 405–412 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.073>
17. B. Sing, A.J. Majumdar, GRC made from supersulphated cement: 10 years results. *Composites.* **18**(4), 329-333 (1987). [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(87\)90297-7](https://doi.org/10.1016/0010-4361(87)90297-7)
18. S. Marikunt, C. Aldea, S.P. Shah, Durability of glass fiber reinforced cement composites: Effect of silica fume and metakaolin. *Adv Cem. Based Mater.* **5**(3-4), 100-108 (1997). [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(97\)00003-5](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(97)00003-5)
19. A. Peled, J. Jones, S.P. Shah, Effect of matrix modification on durability of glass fiber reinforced cement composites. *Mater Struct.* **38**(2): 163–171 (2005). <https://doi.org/10.1007/BF02479341>
20. A. Bentur, S. Mindess, *Fibre reinforced cementitious composites*. Second edition. London and New York, Taylor and Francis, 2007.
21. D. Jęjcic, K. Zangelini, *Mortiers et ciments armés de fibres : Une étude bibliographique*. Annales de l'institut technique et des travaux publics. **347** (1997).
22. NF EN 413-2. 2017. *Masonry cement - Part 2: Test methods*.
23. A. Mariak, M. Kurpinska, The effect of macro polymer fibres length and content on the fibre reinforced concrete. *MATEC Web Conf.* **219**, 03004 (2018). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821903004>
24. D. Gueciouer, G. Youcef, N. Tarek, Rheological and mechanical optimization of a steel fiber reinforced self-compacting concrete using the design of experiments method. *European J Env Civ Eng*. Published online: 11 Dec 2019. <https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1697758>
25. N. Arabi, *Contribution à l'étude du comportement mécanique du composite Ciment-Verre et durabilité des fibres de verre*. Thesis, Annaba University, Algeria. 2006. <https://www.researchgate.net/publication/274898763>
26. K.C. Arvind, A.T. Manzoor, Strain-sensing characteristics of self-consolidating concrete with micro-carbon fibre. *Australian J Civ Eng.* **18**, 46-55 (2020). <https://doi.org/10.1080/14488353.2019.1704206>
27. R. Feret, *Sur la compacité des mortiers hydrauliques*. Annales de ENPC de Paris. France, 1886.
28. F.C. Cheong, *Effect of Admixtures on the Use of Short Fibres In Structural Concrete to Enhance Mechanical Properties*. BSc Thesis, University of Southern Queensland, Australia. 2004. <https://core.ac.uk/download/pdf/11034544.pdf>
29. NF EN 1992-1-1. Eurocode 2: design of concrete structures - Part 1-1: general rules and rules for buildings, 2005.
30. K. Wang, S.P. Shah, P. Phuaksuk, Plastic Shrinkage Cracking in Concrete Materials—Influence of Fly Ash and Fibers. *ACI Mater J.* **98**(6): 458-464 (2001). <https://doi.org/10.14359/10846>
31. A.E. Naaman, T. Wongtanakitcharoen, G. Hauser, Influence of Different Fibers on Plastic Shrinkage Cracking of Concrete. *ACI Mater J.* **102**(1): 49-58 (2005). <https://doi.org/10.14359/14249>
32. P. Rossi, Influence of fibre geometry and matrix maturity on the mechanical performance of ultra-high-performance cement-based composites. *Cem. Concr. Comp.* **37**, 246-248 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.005>
33. A. Ali, S. Iqbal, K. Holschemacher, T.A. Bier, Comparison of Flexural Performance of Lightweight Fibre-reinforced Concrete and Normalweight Fibre-reinforced Concrete. *Period. Polytech. Civ Eng.* **61**(3), 498-504 (2017). <https://doi.org/10.3311/PPci.8858>
34. P. Rossi, A. Arca, E. Parant, P. Fakhri, Bending and compressive behaviors of a new cement composite. *Cem. Concr. Res.* **35**, 27–33 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.043>