

Streszczenie

Beton, będący drugim (po wodzie) najbardziej używanym materiałem na świecie, jest jednym z najstarszych i najszybciej rozwijających się materiałów konstrukcyjnych. Ten gwałtowny rozwój skutkuje nie tylko wzrostem wytrzymałości na ściskanie, ale również poprawą innych właściwości materiałowych, co jest zgodne z ideą *betonu wysokowartościowego* — *high performance concrete* (HPC). Dobrze znanym jest fakt, iż większa wytrzymałość na ściskanie jest związana z większą kruchością betonu. Aby przezwyciężyć tę podstawową wadę tego materiału konstrukcyjnego i polepszyć ciągliwość konstrukcji betonowych stosuje się zbrojenie betonu w postaci włókien. Wśród wielu różnych włókien stosowanych dziś do betonu, włókna polipropylenowe, obok stalowych, cieszą się dużą popularnością. Mają one przewagę nad włóknami metalowymi głównie jeśli chodzi o mniejszy ciężar, lepszą odporność korozyjną i - co istotne - mniejszy koszt. Niniejsza rozprawa dotyczy betonu wysokowartościowego zbrojonego włóknami polipropylenowymi – PFRHPC (z języka angielskiego: *polypropylene fibre reinforced high performance concrete*).

W pracy opisano podstawowe właściwości materiału PFRHPC. Zaprezentowane zostały istotne informacje zarówno na temat betonu wysokowartościowego jak i betonu zbrojonego włóknami polipropylenowymi. Tematyka PFRHPC budzi duże zainteresowanie świata naukowego, jak i wynika z potrzeb jego zastosowania w praktyce budowlanej.

Badania doświadczalne zostały przeprowadzone w laboratorium Politechniki Poznańskiej. Różnego typu testom poddano wiele próbek (łącznie 132 sztuki). Dzięki współpracy z renomowanymi partnerami przemysłowymi (COLAS, GÓRAŹDŹE, PEKABEX and SIKA) zastosowane materiały były najwyższej jakości. Duże zainteresowanie przemysłu prowadzonymi badaniami świadczy o zasadności podjęcia tego tematu badawczego. Wśród przeprowadzonych badań materiałów, które użyto do przygotowania betonu PFRHPC, wymienić można między innymi badanie wytrzymałości (zarówno standardowej jak i wcześniejszej) na zginanie i ściskanie cementu oraz mieszanki cementu z pyłem krzemionkowym i określenie gęstości nasypowej użytych kruszyw. W badaniach wykorzystano zaawansowany bezdotykowy system pomiarowy ARAMIS 6M bazujący na zasadzie cyfrowej korelacji obrazu (DIC). W celu określenia proporcji składników mieszanki betonowej przeprowadzono także szereg testów wstępnych.

Wytrzymałość betonu na ściskanie została określona zarówno na próbkach sześciennych jak i walcowych. Dla jednego z wariantów badawczych badanie wykonano również po dłuższym okresie czasu - jednego roku od czasu zabetonowania. Przyjęte wysokie dozowanie włókien skutkowało obniżeniem wytrzymałości na ściskanie; z drugiej jednak strony mechanizm zniszczenia przy ścisaniu uległ wyraźnej zmianie i w przypadku zastosowania włókien polipropylenowych nie był tak destrukcyjny (beton był mniej kruchy).



Próbki walcowe zostały także wykorzystane do określenia parametrów materiałowych, jakimi są moduł sprężystości podłużnej Younga oraz współczynnik Poissona. Przyjęcie metody A zgodnie z normą EN12390-13 [208] pozwoliło określić zarówno wstępną jak i ustabilizowaną wartość modułu Younga. Zaobserwowano kilkuprocentowy (5-10%) wzrost wartości modułu po stabilizacji w porównaniu z wartością wstępną.

Badania belek laboratoryjnych (10x10x50 cm) zostały przeprowadzone, by wyznaczyć różnicę w mechanizmie zniszczenia próbek z i bez włókien polipropylenowych.

Wśród wszystkich zbadanych próbek należałoby podkreślić szczególne znaczenie pełnowymiarowych belek (12x24x260 cm). Elementy te zbrojone włóknami polipropylenowymi, podłużnymi prętami stalowymi lub dwoma wspomnianymi rodzajami zbrojenia poddano trójpunktowemu zginaniu. Dokonano również dywersyfikacji pod względem: (1) zastosowanych materiałów (różne pyły krzemionkowe i kruszywa), (2) miejsca przygotowania próbek (warunki betonowania laboratoryjne i przemysłowe) oraz (3) różne długości włókien (48 mm i 60 mm). W badaniach cyklicznego obciążenia-odciążenia przyjęto stopniowe (co 1 mm) zwiększanie przemieszczenia w środku rozpiętości belki. Zaprezentowano wykresy siła-przemieszczenie zarówno w formie histerezy jak i obwiedni maksymalnych wartości sił. Przemieszczenia były rejestrowane jednocześnie za pomocą trzech różnych systemów pomiarowych: maszyną wytrzymałościową INSTRON 8505, liniowym czujnikiem przemieszczeń oraz bezdotykowym systemem pomiarowym ARAMIS. Otrzymane wartości liczbowe wykazują pełną wzajemną zgodność.

Badania doświadczalne zostały uzupełnione modelowaniem i numeryczną analizą belek wykonanych z PFRHPC. Po sformułowaniu problemu i opisanie założeń modelu plastyczno-degradacyjnego (*Concrete Damage Plasticity - CDP*) zaprezentowano model obliczeniowy belek poddanych trójpunktowemu zginaniu. Model ten został przygotowany w oparciu o wybrane wyniki własnych eksperymentów laboratoryjnych oraz propozycje literaturowe. Zbrojenie rozproszone uwzględniono w modelu obliczeniowym poprzez modyfikację związków konstytutywnych betonu, co ma duże znaczenie w strefie rozciąganego betonu. Przeprowadzono również weryfikację wrażliwości gęstości siatki elementów skończonych na przebieg ścieżki siła-przemieszczenie.

Specjalną uwagę poświęcono w pracy zagadnieniu ciągliwości. Dokonany został przegląd różnych miar ciągliwości proponowanych w literaturze. Parametry ciągliwości, takie jak energia pęknięcia, długość charakterystyczna, długość ciągliwości czy wskaźniki ciągliwości zostały obliczone w oparciu o wyniki własnych badań laboratoryjnych. W próbkach z PFRHPC zanotowano znaczący wzrost każdego z tych parametrów w porównaniu do próbek nie zawierających włókien polipropylenowych.

Podsumowanie i wnioski końcowe zostały zaprezentowane w rozdziale 7 pracy, gdzie zawarto też spis planowanych kierunków przyszłych prac badawczych. Dodatkowo w pracy zamieszczono dwa załączniki. W załączniku A przedstawiono uzupełniające wykresy siła-przemieszczenie z trójpunktowego zginania pełnowymiarowych belek, podczas gdy w załącznik B zawiera mapy rozkładu i koncentracji odkształceń w wybranych cyklach obciążania-odciążania badanych belek. Objasnienia symboli i skrótów użytych w pracy podano na początku rozprawy, podczas gdy Bibliografię, Spis rysunków i Spis tabel umieszczono na końcu tej dysertacji.

16.05.2022



Abstract

Concrete, which is the second after the water most consumed material in the world, is also one of the oldest and the fastest developing structural material. This rapid advancement results in not just increase of its compressive strength but also in improvement of other material properties, what is consistent with the idea of *high performance concrete* (HPC). It is a known fact that higher compressive strength is related to higher brittleness of concrete. To overcome this downside of concrete and enhance the ductility of concrete structure fibre reinforcement can be applied. Among many different fibres used nowadays as the concrete reinforcement, next to steel ones, polypropylene fibres are very popular. Their advantages over steel fibres include smaller weight, higher resistance against corrosion and what is important - the smaller cost. The following thesis concerns polypropylene fibre reinforced high performance concrete (PFRHPC).

In this dissertation, the fundamental properties of the abovementioned material are discussed. Basic information about high performance concrete (HPC) as well as polypropylene fibre reinforced concrete (PFRC) is presented. The world research interest in this field with examples of application of PFRHPC are also provided.

The experimental research was conducted in the laboratory of Poznan University of Technology. In the research many specimens (132) were subjected to different tests. Thanks to the cooperation with industry partners the used constituents of concrete mix were of the highest quality. The considerable industry interest in this research may indicate on desirability of undertaken project. Among conducted testing of materials used in the research the determination of flexural and compressive strength (both standard and early strengths) of cement and cement-silica fume mix as well as determination of bulk density of aggregates can be mentioned. The advanced contact-free measuring system ARAMIS 6M based on the principle of digital image correlation (DIC) was applied in the research. The series of preliminary tests had to be done to determine the final concrete mix proportions.

The compressive strength was determined on the cube as well as cylinder specimens. For one of the variants the compression test was carried out also after one year after concreting. High dosage of polypropylene fibres will result in a decrease in compressive strength of concrete; on the other hand the mechanism of failure under compression changes and in case of the polypropylene fibres presence is not so destructible

Cylinder specimens were also used in determination of material parameters like modulus of elasticity and Poisson's ratio. The method A according to Standard EN12390-13 [208] assumed in the research enabled the establishment of initial as well as stabilized



Young's modulus. Some 5 to 10 percentage increase of initial value after stabilization was recorded.

The testing of laboratory beams (10x10x50 cm) was conducted in order to determine the difference in failure mechanism of bended specimen with and without polypropylene fibres.

Among all specimens full-scale beams (12x24x260 cm) shall be highlighted. Beams reinforced by polypropylene fibres, steel longitudinal bars and mix of mentioned types of reinforcement were subjected to three-point bending. There is also other diversity with regard to used materials (silica fume and aggregates) from the other manufacturer, place of preparation of samples (laboratory vs industrial conditions) and the length of polypropylene fibre. In the test the cyclic loading-unloading procedure with gradually increased mid-span deflection was provided. The force-displacement graphs as hysteresis and the envelopes for the maximum values of forces were plotted. Displacements of the beams were recorded simultaneously by using three different measurement systems: testing machine INSTRON 8505, linear variable differential transformer and non-contact measuring system ARAMIS 6M. The obtained results are in very good agreement.

Experimental research was complemented by modelling and numerical analysis of PFRHPC beams. After the formulation of the problem and description of Concrete Damage Plasticity model of concrete the computational model of beam under monotonous mid-span deflection is presented. The model was prepared by using selected results of own experiments and literature proposals. The fibre reinforcement was included in the model by the modification of tensile stress-strain of concrete. The mesh-sensitivity verification was carried out also.

A special attention is paid to the ductility issue. A review of different measurements of ductility has been done. The ductility parameters like fracture energy, characteristic length, ductility length and toughness indices were calculated based on my own experimental results. The increase of all considered ductility parameters in comparison with specimens without polypropylene fibres - was observed.

The summary and all conclusions are presented in chapter 7 of the thesis. The possible directions of further work are also included there. After the main part of the work two appendixes are situated. In appendix A force-displacement graphs from three-point bending tests of full-scale beams are included, whereas in the appendix B maps of horizontal strains in selected loading-unloading cycles in abovemention tests are located. The notation of symbols and abbreviations used in the thesis reader may find at the beginning of the work, whereas the bibliography, list of figures and list of tables are provided at the end of this dissertaton.

16.05.2022

