

Zachowania kotew chemicznych montowanych w różnych rodzajach betonu

Behavior of chemical anchors installed in different kinds of concrete

Özlem Çalışkan¹, Cenk Karakurt¹, Murat Aras^{1*}, Turgut Kaya²

¹Dept. of Civil Engineering, Bilecik Şeyh Edebali University, Bilecik, Turkey

²Batman University, Batman, Turkey

*Corresponding author: A. Murat, e-mail: murat.aras@bilecik.edu.tr

Streszczenie

Kotwy chemiczne znajdują szerokie zastosowanie w dodatkowych instalacjach żelbetu budowlanego, pracach naprawczych i zbrojeniowych. Dzięki coraz większej różnorodności materiałów i poprawie wiadomości na temat produktów odpadowych, możliwe stało się produkowanie różnych rodzajów betonu, o różnych właściwościach. W tym badaniu pręty żebrowane klasy B420C o średnicy 16 mm, zostały osadzone w czterech różnych rodzajach betonu, przy użyciu czterech różnych klejów chemicznych, a następnie zastosowano siłę rozciągającą. Wyznaczono sztywność, współczynnik plastyczności, zdolność do pochłaniania energii i siły rozciągającej oraz oceniono stopień zniszczenia na podstawie krzywych obciążenie-przemieszczenie, uzyskanych w wyniku doświadczeń. Stwierdzono, że siła rozciągająca i zdolność do pochłaniania energii wzrosła w wyniku osadzenia kotew i przyłożenia do betonu siły rozciągającej, uzyskanej przez dodanie materiałów domieszkowych do betonu referencyjnego. W części analitycznej wykorzystano sformułowanie podane w ACI 318, zidentyfikowano nośność i wytrzymałość obliczeniową oraz określono ich poziomy bezpieczeństwa, w porównaniu z wynikami badań.

Słowa kluczowe: kotwy chemiczne, cement z żużla wielkopięcowego, popiół lotny, włókno polipropylenowe, beton, ACI 318

Summary

Chemical anchors are widely used in additional installations of construction irons, repair and reinforcement work. Due to the increasing diversity of materials and the improved awareness of waste products, it has become possible to produce different kinds of concrete, with various properties. In this study, class B420C ribbed bars with 16 mm diameter, were installed in four different concretes by using four different chemical adhesives, and a tensile force was applied. The stiffness, displacement ductility ratio, energy-dissipation capability and tensile force values were determined and the failure modes were interpreted from the load-displacement curves, obtained as a result of the experiments. It was found that the tensile force and energy-dissipation capacity, had increased as a result of installing anchor and applying a tensile force to the concrete, that was obtained by adding admixture materials, to the reference concrete. In the analytical part of the study, the formulation provided in ACI 318 was used, capacity and design strengths were identified, and their safety levels were determined in comparison with the test results.

Keywords: chemical anchor, blast furnace slag cement, fly ash, polypropylene fibers, concrete, ACI 318

1. Wprowadzenie

Kotwy chemiczne są szeroko stosowane do instalowania dodatkowych elementów w konstrukcjach betonowych, ze względu na ich szybkie i łatwe zastosowanie. Zdolność adaptacyjna starych i nowych elementów, po dodaniu nowego elementu, zależy od połączenia zbrojenia z klejem chemicznym i betonem (1). W kotwach chemicznych, wiązanie jest możliwe dzięki sile tarcia między zbrojeniem kotwy z materiału chemicznego, z betonem. Aby za-

1. Introduction

Chemical anchors are widely used to install additional elements to concrete structures, due to their fast and easy applications. The adaptability of the old and new elements, after the addition of the new element, depends on the bonding between the reinforcement, the chemical adhesive and the concrete (1). In chemical anchors, the bonding is possible due to the frictional force between the chemical materials, anchor reinforcement and the concrete. To ensure

pewnić pełne związanie, konieczne jest dobranie odpowiedniego materiału. Parametry wpływające na osiowe rozciąganie kotew chemicznych są mechaniczne i fizyczne właściwości kleju chemicznego, obszar i metoda użytkowania, warunki środowiskowe, jakość pracy, a także średnicy i głębokości kotwy (2).

Nowe składniki mogą być montowane do elementu konstrukcyjnego – mechanicznie, za pomocą mieszanki lub kotew chemicznych (3). W ostatnich latach wzrosło zastosowanie kleju chemicznego do montażu dodatkowych, lub zapomnianych zbrojeń. Spowodowało to wzrost znaczenia klejów chemicznych. Od pierwszego projektu kotew chemicznych (3) i PCI (4), do chwili obecnej przeprowadzono wiele badań mających na celu określenie zachowania kotew przy rozciąganiu, z uwzględnieniem różnych parametrów (5-12). Są również badania, w których ocenia się wytrzymałość na rozciąganie osiowe, przez zastosowanie modeli matematycznych, algorytmów i rozwiązań projektowych (13).

Przeprowadzono badania mające na celu określenie wpływu środowiska, różnych odległości brzegowych zainstalowanych kotew oraz zachowania przy osiowym rozciąganiu, wpływu odległości między kotwami (14-16). Są również badania, w których jako zmienne wykorzystano epoksydy stosowane w montażach kotew (17,18).

W innym badaniu wykazano, że zbrojenia umieszczone w tym samym miejscu co zamontowane kotwy, miały bezpośredni wpływ na wytrzymałość na rozciąganie osiowe (19). Są również inne badania, wykorzystujące temperaturę jako zmienną np. (20-22). W swoich badaniach Tian i in. (23) zbadali, stosując obserwację empiryczną, uszkodzenie krawędzi betonu w kotwach pojedynczych i grupowych, po ekspozycji ognowej. Al-Mansouri i in. (24) stwierdzili, że po zwiększonej ekspozycji ognowej znacznie zmniejszyła się siła niszcząca beton z kotwami i zmienił się rodzaj zniszczenia. Autorzy dokonali ilościowej analizy wpływu pożaru na chemicznie związane kotwy, osadzone w betonie pozbawionym rys.

Wraz ze wzrostem różnorodności materiałów, przeprowadzono kilka badań z wykorzystaniem prętów FRP, GFRP i BFRP. W tych badaniach pręty zamontowano w betonach wzmacnionych włóknami, zamiast normalnego betonu (25-35). Kalthoff i Raupach (36) badali wpływ rodzaju betonu, jak również dodatku mikro-włókien ze stali stopowej, na przyczepność. Wspomnieli, że dodatek włókien stalowych poprawił, w zależności od rodzaju betonu, jego klasę do C53 i zapobiegał również pękaniu betonu. Achillides i Pilakoutas (37) zastosowali siłę rozciągającą do kotew zamontowanych w betonie z dodatkiem polimerów, które były wzmacnione włóknami szklanymi, węglowymi, aramidowymi i hybrydowymi oraz zmierzyli ich wytrzymałość.

Zbrojenia wzmacniane włóknem bazaltowym, jako nowym materiałem, są badane w kilku innych doświadczeniach, pod kątem ich zachowania się przy rozciąganiu, zginaniu i w wysokiej temperaturze (38-42).

Na wytrzymałość kotew montowanych w cylindrycznym otworze w betonie w późniejszych etapach, ma wpływ wiele zmiennych,

the full bonding, it is necessary to choose the appropriate material. The parameters affecting the axial tensile of the chemical anchors, are the mechanical and physical properties of the chemical adhesive used, the area and method of usage, environmental conditions, labor quality and the diameter and depth of the anchor (2).

New elements may be installed to the structural elements mechanically, by using a mixture or with a chemical anchor (3). In recent years, the use of chemical adhesive for the installation of additional or forgotten reinforcements, has increased. This has caused an increase in the importance of chemical adhesives. From the first design of the chemical anchors ACI, 349-2007 and PCI, Design Handbook (4) to date, many studies were conducted to determine the tensile behavior of anchors, under different parameters (5-12). There are also studies that estimate the axial tensile capacities, by using mathematical models, algorithms and design approaches (13).

Studies were conducted to determine the environmental effects, various edge distances of the installed anchors, and the axial tensile behavior in the distance parameters between anchors (14-16). There are also studies, in which the epoxies installations of the anchors were used as variables (17,18).

Another study has shown that the reinforcements placed in the same spot as the installed anchors, had the direct impact on the axial tensile capacity (19). There are also other studies that use the temperature as a variable (20-22). Also, examined by empirical observation, the concrete edge failure of the single and group anchors, after fire exposure by Tian et al. (23). They found that, after increased exposure to fire, the concrete breaking load of anchors decreased significantly and the failure mode changed. Moreover, chemically bonded anchors made the quantitative analysis of the impact of fire, installed in crack-free concrete (24).

As with the recent increase in the material diversity, there were some studies conducted by using FRP, GFRP and BFRP bars and in these studies. These bars were installed in fiber-reinforced concretes, instead of normal concrete (25-35). Further, examined the impact of concrete type as well as the addition of micro-alloyed steel fibers, on the adhesion by Kalthoff and Raupach (36). They mentioned that the addition of steel fibers improved the behavior, based on the concrete type up to C53 and were also effective in preventing the cracking of concrete. The anchors installed in polymer-reinforced concrete that are strengthened with glass, carbon, aramid, and hybrid fibers and measured their strength by Achillides and Pilakoutas (37).

Reinforcements strengthened with basalt fibers, as a new material, were examined in some other studies for their tensile, flexural, and high-temperature behaviors (38-42).

There are many variables in the strength of anchors mounted in a cylindrical holes, opened in the concrete in later stages, such as the reinforcements diameter, installation depth, the strength of the current concrete, humidity, environmental temperature, cleanliness of the surface, the distance of anchors from the edge, the distance

a mianowicie: średnica zbrojenia, głębokość montażu, wytrzymałość betonu, wilgotność, temperatura otoczenia, czystość powierzchni, odległość kotew od krawędzi elementu betonowego, odległość między kotwami oraz rodzaj kleju chemicznego. W tym ostatnim badaniu stosowano średnice kotew wynoszące 16 mm, a głębokość wprowadzenia kotwy – 160 mm. W celu określenia zachowania się tych kotew pod różnymi obciążeniami rozciągającymi, zmienne stosowane w tym badaniu analizowano, montując kotwy w 4 różnych rodzajach betonu, przy użyciu 4 różnych klejów chemicznych, a jednym z tych klejów był beton referencyjny – standardowy, bez dodatków.

Wykresy obciążenie-przemieszczenie zostały przyjęte, zgodnie z wynikami badań. Krzyże tych wykresów pozwala na zidentyfikowanie sztywności, współczynnika plastyczności przemieszczania i zdolności absorpcji energii, dla każdego doświadczenia. Nośność kotew obliczono analitycznie, zgodnie z zasadami normy ACI 318 (43) i oceniono porównując je z wynikami uzyskanymi w doświadczeniach.

2. Badania

2.1. Materiały

W badaniach tych 16 żebrowanych prętów zbrojeniowych klasy B420C, o średnicy 16 mm, zamontowano w 4 różnych rodzajach betonu na głębokości 160 mm, stosując 4 różne kleje chemiczne. Te środki chemiczne mają dwa składniki i są oferowane w sprzedaży, w gotowych wkładach. Nie wymagają specjalnego pistoletu do aplikacji, a do ich nakładania można używać zwykłych pistoletów, stosowanych do wkładów silikonowych. W tabeli 1 przedstawiono właściwości technologiczne materiałów z kotew chemicznymi, zastosowanych do ich montażu.

Tabela 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI TECHNOLOGICZNE KLEJÓW CHEMICZNYCH

TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF THE CHEMICAL ADHESIVES

Rodzaj kleju chemicznego Kind of chemical adhesive	Skład i stosowane technologie / Technological properties
M1	Dwuskładnikowy, epoksydowo-akrylowy, szybkowiążący materiał, który może być stosowany w pracach związanych z osadzaniem śrub kotwiących, w układach kotwienia śrubowego i specjalnego w betonie, stali lub cegiele dziurawkowej i pełnej. Two-component, epoxy acrylate-based fast-setting material, which can be used in anchor bolt embedment works, bolt and special anchoring systems, also in concrete, steel, or hollow and solid bricks.
M2	Dwuskładnikowy, poliestrowy, szybkowiążący materiał, który może być stosowany w pracach związanych z osadzaniem śrub kotwiących, w układach kotwienia śrubowego i specjalnego, w betonie oraz w cegle dziurawkowej i pełnej. Polyester-based, two-components fast-setting material which can be used in anchor bolt embedment works, bolt and special anchoring systems, concrete, and hollow or solid brick.
M3	Dwuskładnikowy, poliestrowy materiał kotwiący metakrylanu, który może być stosowany w pracach związanych z osadzaniem śrub kotwiących, w układach kotwienia śrubowego i specjalnego, w betonie oraz w cegle dziurawkowej i pełnej. Methacrylate-based, two-components, polyester anchor material which can be used in anchor bolt embedment works, bolt and special anchoring systems, concrete, and hollow or solid brick.
M4	Dwuskładnikowy materiał kotwiący z poliestru, szybkowiążący, który może być stosowany w kotwieniu śrub i prętów żelaznych. Two-components, polyester-based anchor material which can be used in the anchoring of bolt and iron bars, that settle very fast.

between anchors and kind of chemical adhesive. In this study, the anchor diameter was set to 16 mm and the installation depth was set to 160 mm. To determine behaviors of these anchors under various tensile loads, the variables examined in this study were examined by installing anchors in four different types of concrete, with 4 different chemical adhesives and one of these adhesives was a reference concrete standard, additive-free.

Load-displacement charts were created according to the results of the tests. By looking at these charts, stiffness, displacement, ductility ratio and energy dissipation capacities of each experiment, were identified. The ultimate load capacity of anchors was analytically calculated, according to the ACI 318, 2019 (43) regulation rules, and interpreted by comparing them with the results obtained from experiments.

2. Experimental

2.1. Materials

In this study, 16 pieces of ribbed reinforcement bars of B420C class with a diameter of 16 mm, were installed in 4 different concrete kinds at a depth of 160 mm, by using 4 different adhesives. In the installation of these anchors, four different chemical adhesives were used. These chemicals have two components and are offered for sale in ready-made cartridges. They do not require a special gun for application, regular silicon cartridge guns may be used, for their application. In Table 1 the technological properties of the chemical anchor materials used in installing the anchors, are presented.

In the selection of anchor adhesives that have various usage properties and chemical structures, those products which are used widely in the market, were preferred. Table 2 presents the physical

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE I MECHANICZNE KLEJÓW CHEMICZNYCH

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CHEMICAL ADHESIVES

Właściwości / Property	M1	M2	M3	M4
Liczba składników / Number of component	Dwuskładnikowy (A i B)/ Two-components (A ve B)			
Stosunek składników A/B / Mixture ratio, A/B	10:1			
Kolor / Color	Jasnoszary / Light grey			
Gęstość / Density, g/cm ³	1.60-1.68	1.7	1.63	1.60
Okres twardnienia / Curing period, 20°C, min	40	40	50	120
Okres uzyskania wytrzymałości / Endurance period, days	7			
Wytrzymałość na ściskanie / Compressive strength, MPa	60	74	50	50
Wytrzymałość na rozciąganie / Tensile strength, MPa	15-20	15-20	15-20	20-25
Wytrzymałość na zginanie / Bending strength, MPa	35-40	40-45	35-40	35-40

W doborze klejów kotwiących, które mają różne właściwości użytkowe i skład chemiczny, wybierano te produkty, które są powszechnie stosowane na rynku. W tablicy 2 przedstawiono właściwości fizyczne i mechaniczne klejów chemicznych, zgodnie z danymi firmy produkującej, a kleje te zakodowano według rodzaju produktu.

W doświadczeniach zastosowano 4 różne rodzaje betonu, przy czym jeden z nich był wzmocniony włóknami. W mieszankach betonowych stosowano cement portlandzki CEM I 42,5R, którego producentem była cementownia ÇİMSA Eskişehir. Odnośnie do kruszyw, w mieszankach betonowych zastosowano kruszywa wapienne, o wymiarach 0-5 mm, 5-15 mm i 15-25 mm, o odpowiednim uziarnieniu. Jeśli chodzi o dodatki mineralne, to stosowano popiół lotny – FaC, który był odpadem z elektrociepłowni Kütahya Tunçbilek. Zastąpiono nim 15% cementu, a stosowano także granulowany żużel wielkopiecowy, który był odpadem z huty żelaza i stali Ereğli. Stosowano także włókno polipropylenowe do betonu, o średnicy 0,2 mm i długości 6 mm. Na rys. 1 przedstawiono dodatki stosowane w mieszankach betonowych.

2.2. Metody

Beton do zastosowania w kotwach montażowych, zaprojektowano w oparciu o klasę wytrzymałości C30/37, a ilości materiałów użytych w mieszankach betonowych podano w tablicy 3.

Wszystkie mieszanki betonowe zaprojektowano tak, aby stosunek wody do cementu wynosił 0,53. Z każdego otrzymanego

and mechanical properties of chemical adhesives, as provided by the manufacturer and these adhesives were coded according to product type.

In experimental studies, 4 different concrete types were used, and one of those was fiber reinforced. As a rule, Portland cement of CEM I 42,5R class, which was manufactured by ÇİMSA Eskişehir cement plant, was used in concrete mixes. With regards to aggregates, limestone-based crushed-stone aggregates of 0-5 mm, 5-15 mm, and 15-25 mm sizes respectively, were used in concrete mixes, with appropriate grain size distribution. As per the mineral additives, the fly ash – FaC that was a waste of Kütahya Tunçbilek thermal power plant, was used instead of cement for 15%, also the granulated blast furnace slag – BFSC that was a waste of Ereğli iron-steel factory, was used. As polypropylene fiber – PPFC, concrete fiber with 0.2 mm diameter and 6 mm size, was preferred. Fly ash, ground granulated blast furnace – GGBFS and polypropylene -PP fiber used in concrete mixes are shown in Fig. 1.

2.2. Methods

The concrete to be used in the installed anchors, was designed based on the C30/37 strength class and the amounts of materials used in this concrete mixes, are shown in Table 3.

All concrete mixes were designed to have the water/cement ratio of 0.53 and samples were taken from each produced concrete kind in the form of cubes of 150×150×150 mm and standard cylinders of 150×300 mm. The workability of the fresh concrete



Rys. 1. Dodatki stosowane w mieszankach betonowych

Fig. 1. The components used in concrete mixes

Tablica 3 / Table 3

CONTENTS OF MATERIALS IN MASS AND VOLUME FOR 1 M³ CONCRETEILOŚCI MATERIAŁÓW W 1 M³ BETONU

Domieszka / Admixture	Cement, kg	Woda / Water, kg	0-5 mm, kg	5-15 mm, kg	15-25 mm, kg	FaC, kg	BFSC, kg	PPFC, kg
Beton wzorcowy / Reference - R	300	160	677	483	773	-	-	-
FaC	255	160	677	483	773	45	-	-
BFSC	255	160	677	483	773	-	45	-
PPFC	300	160	677	483	773	-	-	0.6

rodzaju betonu pobrano próbki, w postaci kostek o wymiarach $150 \times 150 \times 150$ mm i walców normowych, o wymiarach $\phi 150 \times 300$ mm. Urabialność świeżych betonów określano za pomocą metody opadu stożka. Dla stwardniałych próbek betonowych w kształcie sześciangu – $150 \times 150 \times 150$ mm, przeprowadzono badania masy jednostkowej, prędkości impulsu ultradźwiękowego i wytrzymałości na ściskanie oraz określono właściwości fizyczne i mechaniczne, tych próbek betonowych.

Jako pręty kotwiące, zamontowano na głębokości 160 mm żebrowane pręty zbrojeniowe klasy B420C, o średnicy 16 mm, które zostały związane za pomocą kleju chemicznego, w otworach o średnicy 20 mm. Te otwory wykonano w próbkach walcowych, o wymiarach $\phi 150 \times 300$ mm. Otwory, przed umieszczeniem kotelków oczyszczono z pyłu za pomocą sprężonego powietrza, aby zapobiec negatywnemu wpływowi ziaren pyłu, na przyczepność kleju. Podczas wprowadzenia prętów kotwiących umieszczono je w pozycji prostopadłej do betonu podkładowego i zabezpieczono, do czasu związymania kleju. Kotwy zamontowane w różnych rodzajach betonu były podnoszone za pomocą tłoka hydraulicznego. Wizualne i schematyczne ujęcie stanowiska doświadczalnego, przedstawiono na rys. 2. Obciążanie odbywało się przez ciągnięcie elementów kotwiących w kierunku osiowym, za pomocą tłoka hydraulicznego. Wykresy obciążenie-przemieszczenie, uzyskano w próbie rozciągania tłokiem hydraulicznym, przez podłączenie ogniwa obciążeniowego do tłoka i miernika przemieszczenia, do pręta kotwiącego.

3. Wyniki doświadczeń

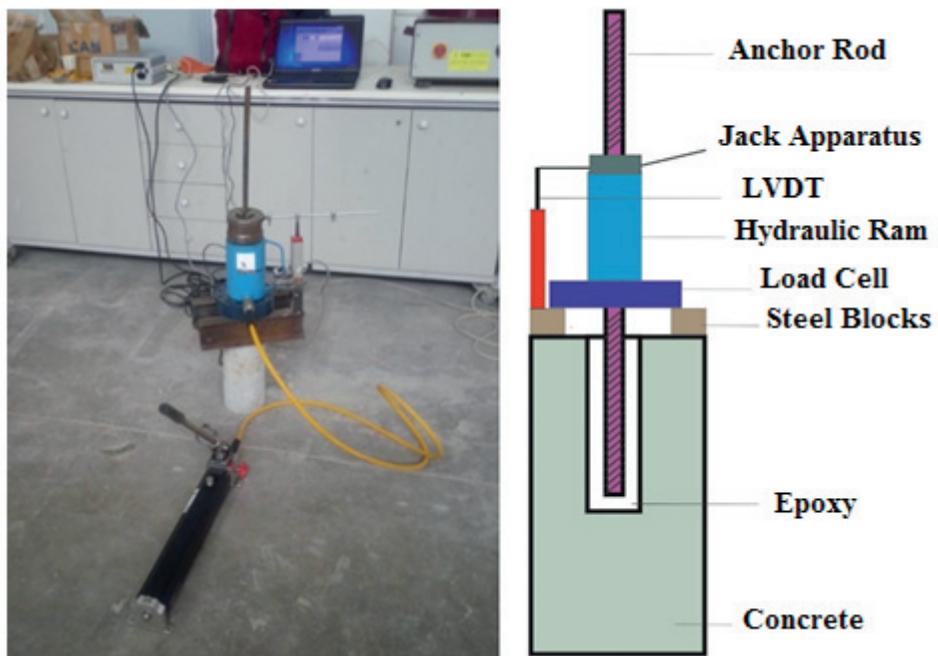
3.1. Wyniki doświadczeń z betonem świeżym i stwardniającym

W tablicy 4 podano wyniki doświadczeń urabialności mieszank betonowych i właściwości fizycznych i mechanicznych stwardniałych betonów. Stwierdzono, że uzyskane wyniki badań metodą stożka opadowego, wahają się w granicach 40-90 mm. Nastąpiła znaczna utrata urabialności, zwłaszcza w przypadku betonu serii PPFC, który zawierał dodatek włókien po-

was determined by using the slump test. Unit weight, ultrasonic pulse velocity and compressive strength tests were applied to the hardened cube concrete samples – $150 \times 150 \times 150$ mm, as well as physical and mechanical properties of these concrete samples, were measured.

As anchor bars, class B420C ribbed reinforcement bars of 16 mm were installed at 160 mm depth, with the chemical adhesive to the 20 mm-diameter holes that were opened in the 150×300 mm-size cylinder samples. The holes were opened before the application of anchors and were cleaned of dust, by using compressed air to prevent any negative impact on the anchor adhesive's adherence. While installing the anchor bars, care was maintained to place them in the position perpendicular to the ground concrete and to protect them until the adhesive will set.

The anchors mounted in different concrete types, were lifted by using a hydraulic piston. The visual and schematic display of the experimental setup is shown in Fig. 2. Loading was performed by pulling the anchor elements in the axial direction, by using a hydraulic piston. Load-displacement charts were obtained in the



Rys. 2. Wizualne i schematyczne przedstawienie stanowiska doświadczalnego

Fig. 2. Visual and schematic display of experiment setup

lipropilenowych. Powodem był nie tylko opór przepływu włókien, lecz także zwiększoną kohezją mieszanki (44). Zmniejszenie oporu stożka mieszanki, z dodatkiem popiołu lotnego serii FaC oraz betonu z dodatkiem żużla wielkopiecowego serii BFSC, określono odpowiednio na 20 mm i 10 mm.

Analizując wyniki badań gęstości próbek betonowych stwierdzono, że wyniki były dość zbliżone do siebie. Najmniejszą gęstość, uzyskano dla betonu serii PPFC, co może być związane z pogorszeniem urabialności.

Z kolei wyniki badań prędkości przejścia impulsów ultradźwiękowych wykazały, że wartości prędkości tych impulsów mieściły się w przedziale 4230–4630 m/s. Po skorelowaniu z wynikami badań wytrzymałości na ściskanie, stwierdzono, że jest wprost proporcjonalna zależność pomiędzy tymi wynikami, a wytrzymałością betonu na ściskanie. Podczas gdy 28-dniowa wytrzymałość betonu na ściskanie wynosiła 40,70 MPa w próbce referencyjnej betonu serii PPFC, wytrzymałość na ściskanie, w pomiarach określono na poziomie 26,70 MPa. Stwierdzono, że wytrzymałość na ściskanie wyniosła odpowiednio 35,70 MPa i 37,40 MPa, w betonach serii FaC i BFSC. W ich skład wchodziły FaC i BFSC w ilości 15%, jako dodatek mineralny. Wyniki wytrzymałości są o 12% i 8% mniejsze, od wartości uzyskanych dla betonu referencyjnego. Na podstawie tych wyników można wywnioskować, że dodatek BFSC wykazuje lepsze właściwości ściskające we wcześnieym okresie eksploatacji, w porównaniu z dodatkiem FaC.

3.2. Wyniki próby wyciągania kotew

3.2.1. Obserwacja i ogólne rodzaje uszkodzeń

W wyniku przeprowadzonych badań sporządzono dla każdej próbki wykresy obciążenie-przemieszczenie. Monitorowano przebieg doświadczeń i na ich podstawie obliczono maksymalną wytrzymałość na rozciąganie osiowe, sztywność początkową, współczynniki plastyczności przemieszczania oraz wydajność rozpraszania energii. Wyniki uzyskane na podstawie badań doświadczalnych, podano w tablicy 5.

Dokonano także interpretacji mechanizmu zniszczenia i stwierdzono ogólny przebieg obciążenia i przemieszczenia w wyniku badań oraz zbadano właściwości kotwy chemicznej i mechanizmu zniszczenia. Wyniki badań doświadczalnych przedstawiono następująco: na rys. 3 przedstawiono wykresy obciążenie-przemieszczenie, w zależności od rodzaju betonu, na rys. 4 wykresy obciążenie-przemieszczenie w zależności od rodzaju kleju–epoksydu, a na rys. 5 próbki ze zdjęć, obrazujących rodzaj zniszczenia, wywołany badaniami.

3.2.2. Właściwości próbki referencyjnej

W badaniach kotew, umocowanych z zastosowaniem 4 rodzajów żywic epoksydowych, w próbkach betonu przygotowanych jako referencyjne, stwierdzono, że największą wytrzymałość na rozciąganie miała kotwa zamontowana za pomocą materiału M2 – 165,38 kN, a najmniejszą – 117,59 kN, kotwa umocowana

tensile test with a hydraulic piston, by connecting a load cell to the piston and a displacement gauge to the anchor bar.

3. Results of experiments

3.1. Results of experiments with fresh and hardened concrete

Table 4 provides the results of the workability, physical and mechanical experiments conducted on the concrete mixes manufactured, to be used in experimental studies. It can be seen that the slump test results obtained vary within the range of 40-90 mm. It was observed that there has been a significant loss of consistency on workability, especially for the concrete of PPFC series, which included polypropylene fibers components. Not only the flow resistance of fibers, but also the increased cohesion of fresh concrete was effective in this regard (44). Slump loss levels of fly ash-reinforced concrete of FaC series and blast furnace slag-reinforced concrete of BFSC series were identified as 20 mm and 10 mm, respectively.

When the unit weight test results of concrete samples were analyzed, it was found that the results were rather close to each other. However, the lowest unit weight value that was obtained from the concrete of PPFC series, varied on the decreasing workability. Ultrasonic pulse velocity test results, on the other hand, had shown that the pulse velocity values were in a range between 4230-4630 m/sec. When correlated with the compressive strength test results, it was identified that there was a directly proportional relationship between these results and the concrete compressive strength levels. While the 28-day concrete compressive strength was measured as 40.70 MPa in the reference sample, the compressive strength was measured as 26.70 MPa in the concrete of the PPFC series. It was found that the compressive strength values were to be 35.70 MPa and 37.40 MPa respectively, in the concrete types of FaC and BFSC series, which included FaC and BFSC at the rate of 15%, as a mineral additive. These results are 12% and 8% lower than the figures obtained with reference concrete. It may be deduced from these results that the addition of BFSC exhibits a better compressive performance in the early ages compared to the additive of FaC.

3.2. Anchor tensile test results

3.2.1. Observation and general failure modes

As a result of the tests, load-displacement charts were drawn for each sample and the experiments were monitored and by using these load-displacement charts, maximum axial tensile strength, initial stiffness, displacement ductility ratios, and energy consumption capacities were calculated. The results obtained from the experimental study were provided in Table 5.

Moreover, interpretations were made regarding failure mechanism and observed general load-displacement behavior as a result of tests and behavior of chemical anchorage and failure mechanisms

Tablica 4 / Table 4

WYNIKI BADAŃ BETONÓW

TEST RESULTS OF CONCRETE KINDS

Rodzaj betonu / Concrete kind	Opad stożka Slump, mm	Gęstość Density, kg/dm ³	Szybkość przejścia fali ultradźwiękowej Ultrasonic pulse velocity, m/s	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa
Beton wzorcowy / Reference - R	90	2.44	4630	40.70
FAC	70	2.44	4620	35.70
BFSC	80	2.47	4550	37.40
PPFC	40	2.42	4230	26.70

Tablica 5 / Table 5

EXPERIMENTAL PARAMETERS AND TEST RESULTS

PARAMETRY DOŚWIADCZALNE I WYNIKI BADAŃ

Rodzaj betonu Concrete kind	Rodzaj kleju Epoxy	Sila wyrywająca Tensile force, kN	Początkowa sztywność Initial stiffness, kN/mm	Współczynnik odkształcenia plastycznego Displacement, ductility ratio	Dolność pogłaniania energi Energy dissipation capacity, kN.mm	Sposób zniszczenia Failure mode
Beton wzorcowy Reference	M1	134.39	28.42	1.214	368.88	Wyciągnięcie + rozłupanie betonu / Pullout + concrete splitting
	M2	165.38	34.75	1.225	473.80	Wyciągnięcie + rozłupanie betonu / Pullout + concrete splitting
	M3	164.00	40.97	1.046	421.47	Wyciągnięcie + rozłupanie betonu / Pullout + concrete splitting
	M4	117.59	38.66	1.332	368.12	Wyciągnięcie + rozłupanie betonu / Pullout + concrete splitting
FaC	M1	167.90	26.28	1.230	608.60	Wyrwanie betonu / Concrete breakout
	M2	202.12	28.34	1.125	840.93	Rozłupanie betonu / Concrete splitting
	M3	151.19	39.97	1.205	374.81	Wyrwanie i rozłupanie betonu / Concrete breakout + splitting
	M4	166.54	28.75	1.223	707.70	Wyrwanie betonu / Concrete breakout
BFSC	M1	184.78	31.79	1.252	777.04	Wyrwanie betonu / Concrete breakout
	M2	201.58	21.82	1.380	867.93	Wyciągnięcie / Pullout
	M3	182.58	37.95	1.348	630.92	Rozłupanie betonu / Concrete splitting
	M4	167.98	40.31	1.071	399.35	Rozłupanie betonu / Concrete splitting
PPFC	M1	150.20	33.07	1.608	607.88	Rozłupanie betonu / Concrete splitting
	M2	166.40	32.65	1.166	548.32	Rozłupanie betonu / Concrete splitting
	M3	134.30	31.68	1.237	370.83	Rozłupanie betonu / Concrete splitting
	M4	151.15	27.04	1.430	582.16	Wyrwanie i rozłupanie betonu / Concrete breakout + splitting

materiałem M4. Średnia wartość prób rozciągania kotew, wykonanych z 4 różnych rodzajów żywic epoksydowych, w tej grupie wyniosła 145,34 kN. Stwierdzono, że rodzaj zniszczenia kotew, wyciągniętych z betonu referencyjnego, to sytuacje w których wystąpiło jednoczesne odspojenie i pęknięcie.

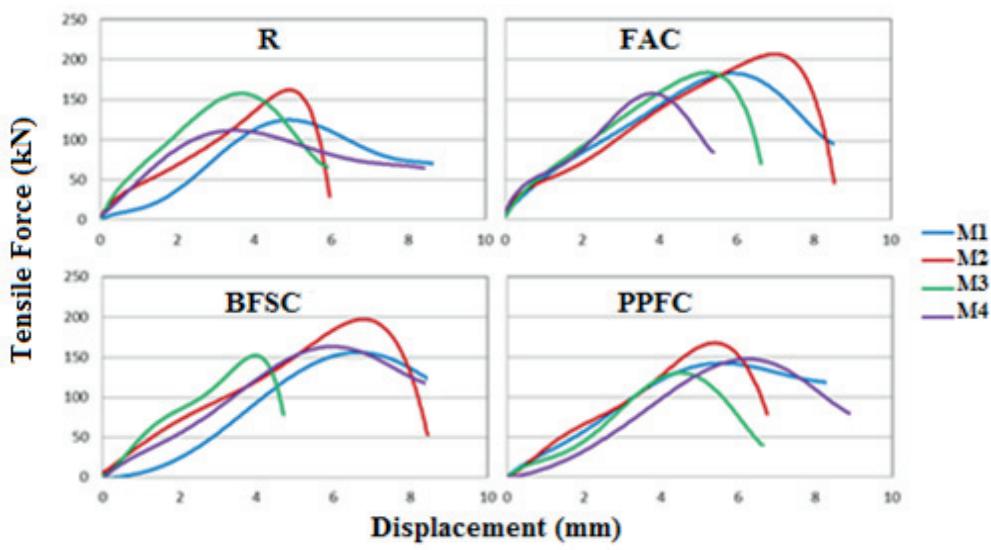
3.2.3. Właściwości próbki FaC

W doświadczeniach kotew umocowanych czterema rodzajami żywic, w próbkach betonu z dodatkiem popiołu lotnego, stwierdzono,

were interpreted. Results of the experimental test presented as follows: Fig. 3 presents the load-displacement charts according to concrete types, Fig. 4 presents the load-displacement charts according to adhesive type [epoxy] and Fig. 5 presents samples from the photographs regarding the failure modes caused by tests.

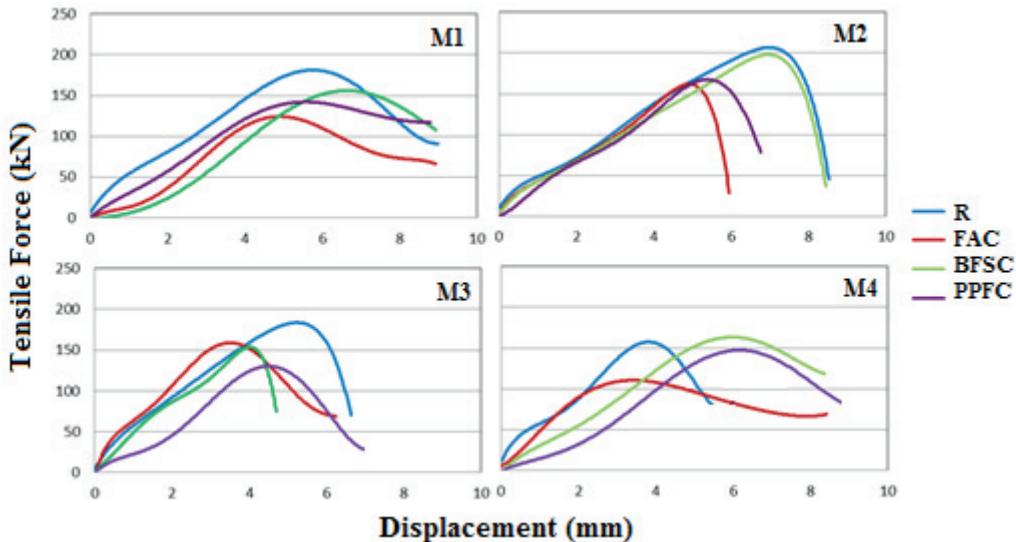
3.2.2. Reference sample properties

In experiments of the anchors, installed with 4 kinds of epoxies in the concrete samples, prepared as a reference, the highest tensile



Rys. 3. Zależności obciążenie-przemieszczenie dla próbek badawczych

Fig. 3. Load-displacement relationships of test specimens



Rys. 4. Zależność obciążenie-przemieszczenie, w zależności od rodzaju kleju

Fig. 4. Load-displacement relationships, the adhesive type

że największą wytrzymałość na rozciąganie miała kotwa zamocowana materiałem M2 – 201,12 kN, a najmniejszą – 151,19 kN, kotwa umocowana za pomocą materiału M3. Średnia z prób rozciągania kotew, umocowanych czterema różnymi rodzajami żywic epoksydowych, wynosiła 171,69 kN. Rodzaj zniszczenia kotew wyciągniętych z betonu wzmacnionego popiołem lotnym, obejmował stożkowe pęknięcie betonu oraz zerwanie stożkowe + odszczerbowanie.

3.2.4. Właściwości próbki BFSC

W doświadczeniach kotew umocowanych za pomocą 4 rodzajów żywic, w próbkach betonu z dodatkiem żużla wielkopiecowego, stwierdzono, że największą wytrzymałość na rozciąganie miała kotwa zamontowana za pomocą materiału M2 – 201,58 kN, a najmniejszą – 167,98 kN, kotwa umocowana za pomocą materiału

force found was 165.38 kN of the anchor installed with M2 material and the lowest tensile force was 117.59 kN, in the case of the anchor, installed with M4 material. The average value of anchor tensile tests, made with 4 different kinds of epoxy material in this group, was 145.34 kN. The failure modes of the anchors pulled out of the reference concrete, were found to be the situations, where simultaneous de-bonding + cracking occurred.

3.2.3. FaC sample properties

In the experiments of anchors, installed with 4 types of epoxies in the fly ash-modified concrete samples, the highest tensile force found was 201.12 kN, of the anchor installed with M2 material and the lowest tensile force was 151.19 kN of the anchor installed with M3 material. The average of the anchor tensile tests, made with 4 different types of epoxy material, was in this group 171.69 kN. The

M4. Średnia wartość prób rozciągania kotew wykonanych z 4 różnych rodzajów materiału epoksydowego w tej grupie, wyniosła 184,23 kN. Rodzaj zniszczenia kotew, wyjętych z betonu wzmocnionego żużlem wielkopiecowym obejmował zerwanie stożkowe, odspojenie i spękanie betonu.

3.2.5. Właściwości próbki PPFC

W badaniach kotew zamontowanych z zastosowaniem 4 rodzajów epoksydów, w próbkach betonu wzmocnionego włóknem polipropylenu, stwierdzono, że największą wytrzymałość na rozciąganie miała kotwa zamontowana materiałem M2 - 166,40 kN, a najmniejszą - 134,30 kN, kotwa umocowana materiałem M3. Średnia wielkość prób rozciągania kotew wykonanych z 4 różnych rodzajów

failure modes of the anchors, taken out of the fly ash-reinforced concrete, were conical rupture, concrete cracking and conical rupture + debonding.

3.2.4. BFSC sample behavior

In experiments of anchors installed with 4 kinds of epoxies in the blast furnace slag-reinforced concrete samples, the highest tensile force was found as 201.58 kN in the anchor installed with M2 material and the lowest tensile force as 167.98 kN in the anchor installed with M4 material. The average value of anchor tensile tests, made with 4 different types of epoxy material in this group, was 184.23 kN. The failure modes of the anchors taken out of



Rys. 5. Zdjęcia rodzaju zniszczenia elementów badanych

Fig. 5. Test elements failure mode photographs

materiału epoksydowego w tej grupie, wyniosła 150,51 kN. Rodzaj zniszczenia kotew, wyjętych z betonu wzmocnionego włóknami polipropylenowymi, obejmował spękanie betonu.

3.3. Właściwości kotwy chemicznej

3.3.1. Właściwości materiału M1

Poziomy wytrzymałości uzyskane dla kotew zamontowanych w betonie z dodatkiem żużla wielkopiecowego, betonie referencyjnym, betonie z dodatkiem popiołu lotnego i betonie wzmocnionym włóknami polipropylenowymi, przy użyciu dwuskładnikowego materiału M1 uzyskanego z epoksydowo-akrylowej, który został użyty do prac związanych z montażem kotew, wyniosły odpowiednio 184,78, 134,39, 167,90 i 150,20 kN. Średnia wytrzymałość na rozciąganie kotew zamontowanych przy użyciu tego materiału, wyniosła 159,32 kN. Stwierdzono, że ich ogólny rodzaj zniszczenia polega na jednoczesnym zerwaniu stożkowym, spękaniem betonu oraz odspojeniu + spękaniu betonu.

3.3.2. Właściwości materiału M2

Poziomy wytrzymałości uzyskane w przypadku kotew, zamontowanych w betonie z dodatkiem żużla wielkopiecowego, betonie referencyjnym, betonie z dodatkiem popiołu lotnego i betonie wzmocnionym włóknami polipropylenowymi, przy użyciu dwuskładnikowego materiału M2 opartego na poliestrze, który zastosowano do prac związanych z montażem kotew, wyniosły odpowiednio 201,58, 165,38, 201,12 i 166,40 kN. Średnia wytrzymałość na wyciąganie kotew, zamontowanych przy użyciu tego materiału, wyniosła 183,62 kN. Stwierdzono, że ich ogólny rodzaj zniszczenia, to w przeważającej mierze spękania betonu.

3.3.3. Właściwości materiału M3

Poziomy wytrzymałości, uzyskane z kotwami zamontowanymi w betonie z dodatkiem żużla wielkopiecowego, betonie referencyjnym, betonie z dodatkiem popiołu lotnego i betonie wzmocnionym włóknami polipropylenowymi, przy zastosowaniu dwuskładnikowego materiału M3, opartego na metakrylanie, który zastosowano do prac związanych z montażem kotew, wyniosły odpowiednio 182,58, 164,00, 151,19 i 134,30 kN. Średnia wytrzymałość na wyciąganie kotew zamontowanych przy użyciu tego materiału, wyniosła 158,02 kN. Stwierdzono, że ich ogólny rodzaj zniszczenia, to zerwanie stożkowe oraz spękanie betonu.

3.3.4. Właściwości materiału M4

Poziomy wytrzymałości uzyskane w przypadku kotew zamontowanych w betonie z dodatkiem żużla wielkopiecowego, betonie referencyjnym, betonie z dodatkiem popiołu lotnego i betonie wzmocnionym włóknami polipropylenowymi, przy zastosowaniu dwuskładnikowego materiału M4, opartego na poliestrze, który zastosowano do prac związanych z montażem kotew, wyniosły odpowiednio 167,98, 117,59, 166,54 i 151,15 kN. Średnia wytrzymałość na wyciąganie kotew zamontowanych przy zastosowaniu tego materiału, wyniosła 150,82 kN. Stwierdzono, że ich ogólny

the blast furnace slag-reinforced concrete were conical rupture, debonding and concrete cracking.

3.2.5. PPFC sample behavior

In experiments of anchors installed with 4 types of epoxies in the polypropylene fiber-reinforced concrete samples, the highest tensile force was found as 166.40 kN in the anchor installed with M2 material and the lowest tensile force was 134.30 kN in the anchor installed with M3 material. The average value of anchor tensile tests made with 4 different kinds of epoxy material in this group, was 150.51 kN. The failure modes of the anchors taken out of the polypropylene fiber-reinforced concrete were concrete cracking.

3.3. Chemical anchor behaviors

3.3.1. M1 material behavior

The tensile force levels obtained from the anchors installed in the blast furnace slag-reinforced concrete, reference concrete, fly ash-reinforced concrete and polypropylene fibre-reinforced concrete by using epoxy acrylate-based, two-component M1 material which was used in anchor installation works, were found as 184.78, 134.39, 167.90 and 150.20 kN respectively. The average tensile force of the anchors installed by using this material was 159.32 kN. It was observed that their general failure modes were simultaneous conical rupture, concrete cracking and debonding + concrete cracking.

3.3.2. M2 material behavior

The tensile force levels obtained from the anchors installed in the blast furnace slag-modified concrete, reference concrete, fly ash-modified concrete, and polypropylene fiber-reinforced concrete, by using polyester-based two-component M2 material, which was used in anchor installation works, were found as 201.58, 165.38, 201.12 and 166.40 kN, respectively. The average tensile force of the anchors installed by using this material was 183.62 kN. It was found that their general failure mode, is predominantly concrete cracking.

3.3.3. M3 material behavior

The tensile force levels, obtained from the anchors installed in the blast furnace slag-modified concrete, reference concrete, fly ash-modified concrete and polypropylene fiber-reinforced concrete, by using methacrylate main two-component M3 material, used in anchor installation works, were found as 182.58, 164.00, 151.19 and 134.30 kN, respectively. The average tensile force of the anchors, installed by using this material was 158.02 kN. It was found that their general failure modes, were conical rupture and concrete cracking.

3.3.4. M4 material behavior

The tensile force levels obtained from the anchors installed in the blast furnace slag-reinforced concrete, reference concrete, fly ash-reinforced concrete and polypropylene fiber-reinforced concrete,

rodzaj zniszczenia polega na jednoczesnym zerwaniu stożkowym, spękaniu betonu oraz odspojeniu + spękaniu betonu.

3.4. Wytrzymałość i sztywność początkowa

Na rys. 6 podano wytrzymałości na wyciąganie, uzyskane w badaniach wykonanych z użyciem 4 różnych klejów na 4 różnych rodzajach betonu, a w tablicy 5 przedstawiono wytrzymałość na wyciąganie i sztywność początkową, z 16 badań wykonanych w ramach badań doświadczalnych.

Jeżeli porównamy wytrzymałość na wyciąganie kotew zamontowanych w betonie referencyjnym, z kotwami zamontowanymi w betonach modyfikowanych, to wytrzymałość na wyciąganie wzrosła o 26% w betonie z dodatkiem żużla wielkopiecowego, o 18% w betonie z popiołami lotnymi i o 3%, w betonie wzmacnianym polipropylenem.

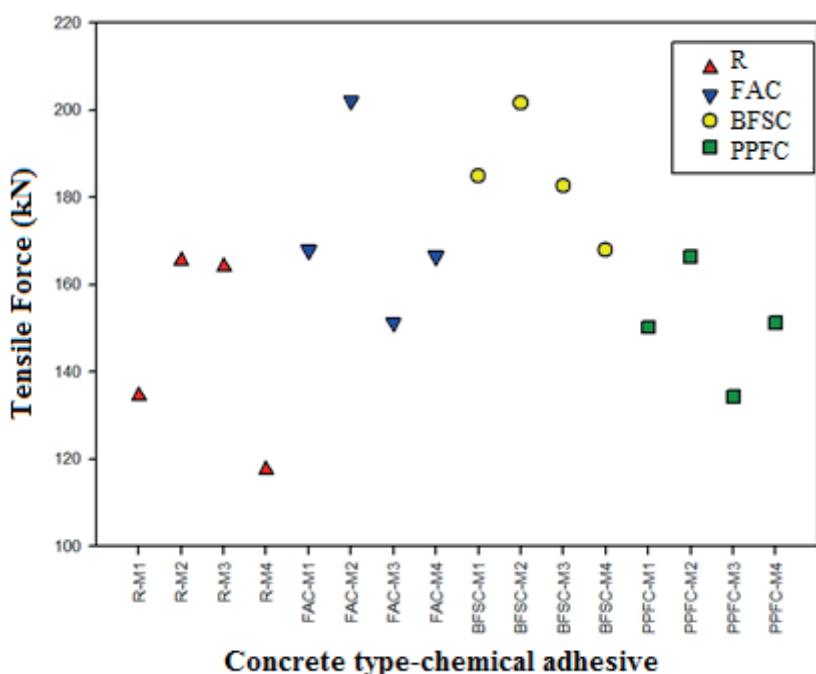
Sztywność początkową wyznaczono z wykresów obciążenie-przemieszczenie, które uzyskano w próbach rozciągania, wykonanych na kotwach zamontowanych w 4 różnych rodzajach betonu i przy zastosowaniu 4 różnych materiałów epoksydowych. Analizując sztywności, które określono jako nachylenie stycznej narysowanej na krzywych obciążenie-przemieszczenie, widać, że największe wielkości uzyskano w przypadku betonu referencyjnego, a najmniejsze w przypadku betonu wzmacnionego włóknami polipropylenowymi. Nabylenie stycznych, zaznaczonych na wykresach obciążenie-przemieszczenie, które uzyskano w wyniku zamontowania kotew w betonie zbrojonym, co uzyskuje się przez dodanie materiału zbrojeniowego w betonie zwykłym i przyłożenia do tych kotew siły rozciągającej, maleje.

3.5. Współczynnik odkształcenia plastycznego

Współczynniki plastyczności określono z uwzględnieniem krzywych obciążenie-przemieszczenie oraz w zależności od rodzajów uszkodzeń. Różne współczynniki plastyczności elementów badanych, zostały obliczone jako proporcjonalne przemieszczenie w punkcie zniszczenia, w stosunku do jego wielkości na granicy plastyczności.

W elementach badanych, za punkt zniszczenia uznano punkt, w którym maksymalna wytrzymałość na rozciąganie uległa zmniejszeniu do 85%, a więc przy spadku o 15%. Natomiast przemieszczenie tego punktu, uznano za wielkość w punkcie zniszczenia. Z kolei, za granicę plastyczności uznano punkt, w którym w badanych elementach osiągana jest maksymalna nośność, a za wielkość przemieszczenia tego punktu, przyjęto przemieszczenie na granicy plastyczności. Współczynniki plastyczności wszystkich próbek, podano w tablicy 5.

Po oznaczeniu współczynnika plastyczności, w odniesieniu do rodzaju betonu, stwierdzono, że wynosi on średnio 1,204 w betonie referencyjnym, 1,263 w betonie z żużlem wielkopiecowym, 1,196



Rys. 6. Wytrzymałość na rozciąganie w zależności od rodzajów betonu i epoksydu

Fig. 6. Tensile capacities according to concrete and epoxy kinds

by using polyester-based, two-component M4 material, which is used in anchor installation works, were found as 167.98, 117.59, 166.54 and 151.15 kN, respectively. The average tensile force of the anchors, installed by using this material, is 150.82 kN. It was found that their general failure modes were simultaneous conical rupture, concrete cracking and de-bonding + concrete cracking.

3.4. Strength and initial stiffness

Fig. 6 provides the tensile capacity values, obtained in the tests made with 4 different adhesives on 4 different concrete types and Table 5 presents the tensile capacity and initial stiffness values of 16 tests, made as a result of the experimental study.

If we compare the tensile strength of the anchors installed in the reference concrete with the anchors installed in reinforced concretes; tensile strength increased at the rate of 26% in blast furnace slag-reinforced concrete, at the rate of 18% in fly ash-reinforced concrete and the rate of 3% in polypropylene-reinforced concrete.

The initial stiffness values were determined from the load-displacement charts that were obtained as a result of the tensile tests made on the anchors installed in 4 different concrete kinds by using 4 different epoxy materials. When the stiffness values, which are defined as the slope of the tangent drawn on the load-displacement curves, are analyzed, it is seen that the highest values were obtained for the reference concrete and the lowest values were obtained for the polypropylene fiber-reinforced concrete. The slope of tangents drawn on the load-displacement charts, that were obtained as a result of installing anchors in reinforced concrete [which is obtained by adding reinforcement material in standard concrete] and of applying tensile force on these anchors, decreases.

w betonie z popiołem lotnym i 1,360 w betonie wzmacnionym włóknami polipropylenowymi. W przypadku oceny z uwzględnieniem rodzaju kleju, stwierdzono, że średnie wartości wynoszą 1,326 w materiale M1, 1,224 w materiale M2, 1,209 w materiale M3 i 1,264 w materiale M4. Wynika stąd, że wielkości opisujące odkształcanie plastyczne, są zbliżone do siebie.

3.6. Zdolność pochłaniania energii

Zdolności pochłaniania energii zostały obliczone dla każdego badanego elementu. Zdolności pochłaniania energii uzyskano podczas doświadczenia krzywych obciążenie-przemieszczenie. Zdolności pochłaniania energii obliczano mierząc obszar pod odcinkami wykresów obciążenie-przemieszczenie, do punktu zniszczenia. Wartości pochłaniania energii wszystkich próbek podano w tablicy 5 i na rys. 7. Z porównania zdolności pochłaniania energii przez kotwy zamontowane w betonie referencyjnym, z wytrzymałością na rozciąganie kotew zamontowanych w betonie z dodatkami, wynika, że pod względem wytrzymałości na rozciąganie nastąpił wzrost o 63% w betonie z żużlem wielkopiecowym, wzrost o 55% w betonie z popiołami lotnymi i wzrost o 29% w betonie wzmacnionym włóknami polipropylenowymi.

Po oznaczeniu tych wielkości, największy poziom zdolności do pochłaniania energii występuje w betonie z żużlem wielkopiecowym, a najmniejszy w betonie referencyjnym. Po zbadaniu rodzaju zniszczenia występującego w próbkach betonu, w betonie referencyjnym stwierdzono, że obejmuje ono odspojenie + spękanie betonu. W rodzaju zniszczenia, jakim jest spękanie betonu, pęknięcie nastąpiło w najkrótszej odległości, a zdolność do pochłaniania energii pozostała mniejsza, w porównaniu z innymi rodzajami betonu. Jeżeli ocena ma dotyczyć materiału epoksydowego, to możliwości absorpcji energii osiągnęły największe wielkości w kotwach zamontowanych, przy użyciu materiału M2.

W drugiej kolejności jest to materiał M1. Z oceny właściwości mechanicznych materiałów epoksydowych wynika, że wytrzymałość na ściskanie i zginanie materiału M2 jest większa, niż pozostałych użytych materiałów epoksydowych. Materiał M1 zajmuje pod tym względem drugie miejsce. Można w związku z tym wywnioskować, że właściwości kleju chemicznego są ważnymi czynnikami, wpływającymi na wytrzymałość na rozciąganie i zdolność absorpcji energii, przez kotwy.

4. Badania analityczne

Amerykański Instytut Betonu [American Concrete Institute] (ACI 318-19) podzielił kotwy montowane w betonie, na dwie grupy. Są to kotwy umieszczane podczas wylewania betonu oraz te, które montuje się w stwardniającym betonie. Zniszczenia kotew chemicznych zamontowanych w stwardniającym betonie, w wyniku działania osiowej siły rozciągającej, podzielono na stożkowe zerwanie betonu, z jednoczesnym stożkowym zerwaniem-odspojeniem, odspojenie zbrojenia kotwy, zerwanie zbrojenia kotwy oraz zniszczenie betonu przez spękanie. W tablicy 6 przedstawiono analityczne wielkości nośności, które zostały obliczone z wzoru, podanego w ACI 318-

3.5. Displacement ductility ratio

Ductility ratios were determined by taking account of load-displacement slopes and according to the failure modes. Different field ductility ratios of the tested elements, were calculated by proportioning the failure point displacement values, to the yield point displacement values. In test elements, the failure point was considered as the point in which the value of maximum tensile capacity decreased to 85% by a decrease of 15% and the displacement of this point was deemed, to be the failure point displacement value. The yield point, on the other hand, was considered to be the point where the maximum ultimate load capacity is reached in test elements, and the displacement value of this point was taken as the yield point displacement. Ductility ratios of all samples were provided in Table 5.

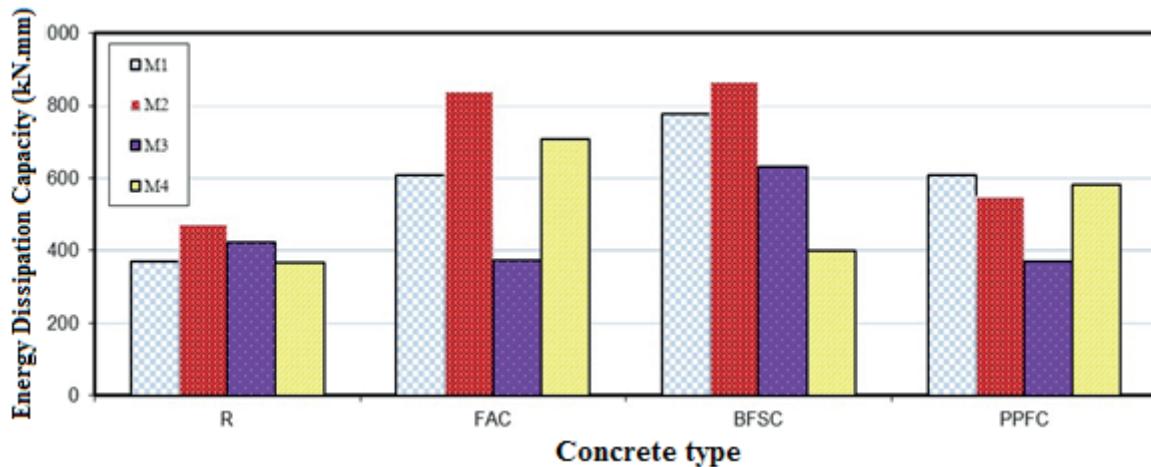
When ductility ratio was evaluated in terms of concrete kind, it was found to be, on average, 1.204 in reference concrete, 1.263 in blast furnace slag concrete, 1.196 in fly ash concrete and 1.360 in polypropylene fiber-reinforced concrete. When it was assessed in terms of adhesive type, the average values were found to be 1.326 in M1 material, 1.224 in M2 material, 1.209 in M3 material and 1.264 in M4 material. Ductility values were found to be close to each other.

3.6. Energy dissipation capacity

Energy dissipation capacities were calculated for each test element. Energy dissipation capacities were obtained from the load-displacement slopes generated during the experiment. Energy dissipation capacities were calculated by measuring the area below the sections of the load-displacement charts up to the failure point. Energy dissipation values of all samples are provided in Table 5 and Fig. 7. If we compare the energy dissipation capacity of the anchors installed in the reference concrete with the tensile strengths of the anchors installed in the reinforced concrete; we observed that in terms of tensile strength there was a 63% increase in blast furnace slag concrete, 55% increase in fly ash concrete and a 29% increase in polypropylene fiber-reinforced concrete.

When the values are examined, the highest level of energy dissipation capacity is seen in blast furnace slag concrete and the lowest level of it in reference concrete. When the failure kinds observed in concrete samples were examined, failure kinds of debonding + concrete cracking was observed in the reference concrete. In the failure type that resulted in concrete cracking; the crack occurred in the shortest way and energy capacity values remained lower compared to other concrete types. If an evaluation is to be made for epoxy material, energy dissipation capacities reached the highest values in the anchors installed by using M2 material.

It is followed by M1 material. If we analyse the mechanical properties of epoxy materials, the compressive and bending strength values of M2 material are higher, than the other epoxy materials used. M1 material is the second highest in this regard. It might be deduced at this point that the properties of the chemical adhesive



Rys. 7. Zdolność do pochłaniania energii, w zależności od rodzaju betonu

Fig. 7. Energy dissipation capacities, according to the concrete kind

19, dla elementów doświadczalnych. Uzyskane na drodze obliczeń wartości projektowych modeli zniszczenia, porównano z wynikami badań i rodzajem zniszczenia – tablica 7.

W przeprowadzonych badaniach współczynnik zmniejszenia wytrzymałości został wybrany na poziomie 0,60 – średnia ze średnich wartości bezpieczeństwa 0,55 i 0,65, co oznacza, że wpływ uszkodzeń odspojenia, zerwania stożka, uszkodzenia betonu, betonu bez wzmacnienia, jakości wykonania i warunków środowiskowych, byłby mierny. Poziomy bezpieczeństwa określono przez proporcjonalne odniesienie wyników badań doświadczalnych do nośności i wytrzymałości projektowych.

Po zbadaniu nośności i wytrzymałości, poziom bezpieczeństwa pozostał mniejszy od 1, dla wszystkich próbek – rys. 8. Zgodnie z

are important factors for tensile strength and energy dissipation capacity, values of anchors.

4. Analytical study

American Concrete Institute (ACI 318-19) has sorted the anchors installed in concrete into two groups. These are the anchors placed while pouring the concrete and those that are installed in the hardened concrete. The failure mechanisms of the chemical anchors installed in hardened concrete due to axial tensile force are the conical rupture of concrete, simultaneous conical rupture-debonding, debonding of anchor reinforcement, rupture of anchor reinforcement and failure of concrete by cracking. Table 6 presents the analytical ultimate load capacity values that were calculated

Tablica 6 / Table 6

WIELKOŚCI OBLCZONE WEDŁUG ACI 318 I WYNIKI BADAŃ

ACI 318 CALCULATION VALUES AND TEST RESULTS

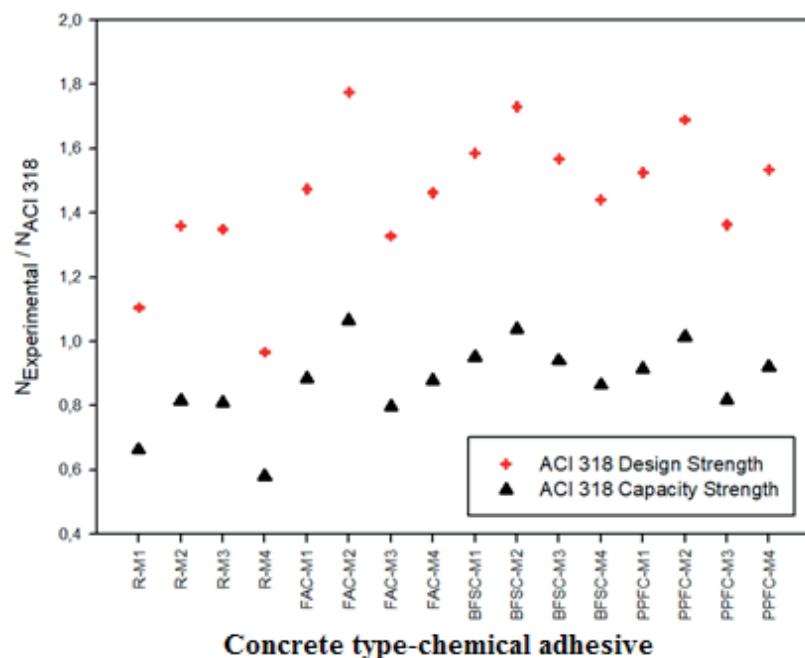
Próbka / Sample	ACI 318		Wyniki doświadczalne / Experimental results	
	Sila niszcząca Tensile force, kN	Sposób zniszczenia Failure mode	Sila niszcząca Tensile force, kN	Sposób zniszczenia Failure mode
Referencyjna / Reference-M1	121.54	CB	134.39	P + CS
Referencyjna / Reference-M2	121.54	CB	165.38	P + CS
Referencyjna / Reference-M3	121.54	CB	164.00	P + CS
Referencyjna / Reference-M4	121.54	CB	117.59	P + CS
FAC-M1	113.83	CB	167.90	CB
FAC-M2	113.83	CB	202.12	CS
FAC-M3	113.83	CB	151.19	CB + P
FAC-M4	113.83	CB	166.54	CB + P
BFSC-M1	116.51	CB	184.78	CB
BFSC-M2	116.51	CB	201.58	P
BFSC-M3	116.51	CB	182.58	CS
BFSC-M4	116.51	CB	167.98	CB
PPFC-M1	98.45	CB	150.20	CS
PPFC-M2	98.45	CB	166.40	CS
PPFC-M3	98.45	CB	134.30	CS
PPFC-M4	98.45	CB	151.15	CS

wartościami nośności i wytrzymałości wg ACI 318 stwierdzono, że średnie wartości wynoszą 0,72 w betonie referencyjnym, 0,95 w betonie z żużlem wielkopiecowym, 0,91 w betonie z popiołem lotnym i 0,92 w betonie wzmacnionym włóknami polipropylenowymi. Wartości zbliżone do 1 stwierdzono w betonach innych niż beton referencyjny. Gdy przeanalizowano wytrzymałości projektowe, które zostały znalezione przez pomnożenie przez współczynnik redukcji wytrzymałości, wszystkie doświadczenia, z wyjątkiem 1 mają poziomy bezpieczeństwa powyżej 1. Jeśli chodzi o wartości średnie, to poziomy bezpieczeństwa wynoszą 1,20 w betonie referencyjnym, 1,58 w betonie z żużlem wielkopiecowym, 1,51 w betonie z popiołem lotnym i 1,53 w betonie wzmacnionym włóknami polipropylenowymi. Gdy analizuje się ogólne wyniki wszystkich doświadczeń, poziom bezpieczeństwa 94% próbek wynosi powyżej 1. Po zbadaniu rodzaju zniszczenia stwierdzono, że chociaż zgodnie z ACI 318, dominować miało zerwanie stożkowe, to podczas doświadczeń stwierdzono pękanie betonu oraz jednocześnie występowanie zjawiska odspajania + spękania betonu.

5. Wnioski

W badaniach, 16 sztuk żebrowanych prętów stalowych klasy B420C o średnicy 16 mm, zamontowano w 4 różnych rodzajach betonu na głębokości 160 mm, za pomocą 4 różnych klejów. Te 16 prętów kotwiących poddano działaniu siły rozciągającej i w efekcie uzyskano krzywe obciążenie-przemieszczenie. W wyniku przeprowadzonych doświadczeń i uzyskanych zależności wyciągnięto następujące wnioski:

- Podczas badania właściwości mechanicznych czterech różnych klejów chemicznych stwierdzono, że materiał M2 wykazuje większy poziom wytrzymałości na ściskanie i zginanie, w stosunku do pozostałych materiałów. W przeprowadzonych doświadczeniach materiał M2 osiągnął większą wytrzymałość na rozciąganie i zdolność do pochłaniania energii, w stosunku do pozostałych materiałów. Stwierdzono, że właściwości mechaniczne kleju chemicznego zastosowanego do montażu kotew, wpłynęły na ich wytrzymałość na rozciąganie.
- Jeżeli porównamy wytrzymałość na rozciąganie kotew zamontowanych w betonie referencyjnym, z kotwami zamontowanymi w betonach wzmacnianych, to wytrzymałość na rozciąganie wzrosła o 26% w betonie z żużlem wielkopiecowym, o 18% w betonie z popiołem lotnym i o 3%, w betonie wzmacnianym polipropylenem.
- Pomimo, że 28-dniowa wytrzymałość na ściskanie betonu referencyjnego, jest większa od betonu modyfikowanego, dodatek materiału do betonu referencyjnego wpływał pozytywnie na wytrzymałość na rozciąganie kotwy.



Rys. 8. Poziomy bezpieczeństwa

Fig. 8. Safety levels

by using the formulation given in ACI 318-19 for experimental elements. The design values-failure modes obtained by way of calculation were compared with the test results and failure modes [Table 6].

In the study conducted, the strength reduction factor was chosen as 0.60 [the average of mid-level safety values of 0.55 and 0.65] which means the impact of debonding damage, conical rupture, concrete damage, concrete without reinforcement, workmanship quality and environmental conditions would be mediocre. Safety levels were determined by proportioning the experimental test results to capacity and design strengths.

When the capacity strengths are examined, the safety level remained below 1 for all samples [Fig. 8]. According to the ACI 318 capacity strength values, the average values were found to be 0.72 in reference concrete, 0.95 in blast furnace slag-reinforced concrete, 0.91 in fly ash-reinforced concrete and 0.92 in polypropylene fiber-reinforced concrete. Values close to 1 were found in reinforced concrete kinds, other than the reference concrete. When design strengths that were found by multiplying with strength reduction factor were analyzed, all experiments, except 1 have safety levels over 1. When it comes to average values, the safety levels are 1.20 in reference concrete, 1.58 in blast furnace slag-reinforced concrete, 1.51 in fly ash-reinforced concrete and 1.53 in polypropylene fiber-reinforced concrete. When the overall results of all experiments are analyzed, the safety level of 94% of samples is over 1. When the failure modes were examined, it was found that, although conical rupture was expected to be dominant per ACI 318; concrete cracking and simultaneous debonding + concrete cracking occurrence were observed during the experiments.

- Odnośnie do sztywności, największe wartości uzyskano w betonie referencyjnym, a najmniejsze w betonie wzmacnionym polipropylenem. Nachylenie stycznych na wykresach obciążenie-przemieszczenie, które uzyskano w wyniku zamontowania kotew w betonie zbrojonym – co uzyskuje się przez dodanie materiału zbrojeniowego do betonu zwykłego, i przyłożenia do tych kotew siły rozciągającej, maleje. Innymi słowy, sztywność betonu modyfikowanego jest mniejsza niż betonu referencyjnego.
- Pochłanianie energii, uzyskane z wykresów zależności obciążenie – przemieszczenie, w wyniku przyłożonej siły rozciągającej, wzrosły o 63% w betonie z żużlem wielkopiecowym, o 55% w betonie z popiołem lotnym i o 29% w betonie wzmacnionym włóknami polipropylenowymi. Podczas gdy sztywność różnych rodzajów betonu wzmacnionego uległa zmniejszeniu, wzrosła ich wytrzymałość na rozciąganie i zdolność do pochłaniania energii.
- W części analitycznej badań określono nośność i wytrzymałość obliczoną, a także rodzaj zniszczenia kotew, stosując opisy podane w ACI 318, i porównano je z wynikami badań i rodzajem zniszczeń. Po ocenie wszystkich wyników badań okazało się, że 94% próbek miało poziom bezpieczeństwa większy od 1. Opisy podane w ACI 318 nie uwzględniają wpływu materiałów wzmacniających, dodanych do betonu. W opisach tych uwzględniono jedynie wytrzymałość betonu na ściskanie. Przyjmując za podstawę wartości uzyskane w betonie referencyjnym, można zastosować współczynnik 0,78, jako mnożnik dla rodzajów betonu wzmacnionego, w opisie podanym w ACI 318.

Literatura / References

1. R.A. Cook, Behavior of chemically bonded anchors. ASCE J. Struct. Eng. **119**(9), 2744-2762 (1993).
2. Ö. Çalışkan, An experimental research on anchorage applications for strengthening the current reinforced concrete buildings with curtain wall. Eskişehir Osmangazi University Institute of Life Sciences, Ph.D. Thesis, June 2010,(in Turkish).
3. ACI 349 2007, Qualification of post-Installed mechanical anchors in concrete and commentary, American Concrete Insitute, Detroit, USA.
4. PCI design handbook-precast and prestressed concrete. 5th ed. Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, 1999.
5. D. Darwin, S.S. Zavaregh, Bond strength of grouted reinforcing bars. ACI Struct. J. **93**(4), 486-495 (1996).
6. M. McVay, R.A. Cook, K. Krishnamurthy, Pull out simulation of post-installed chemically bonded anchors. J. Struct. Eng. **122**(9), 1016-1024 (1996).
7. M. Obata, M. Inoue, Y. Goto, The failure mechanism and the pull-out strength of a bond-type anchor near a free edge. Mechan. Mater. **28**, 113-122 (1998).
8. D. Lotze, R.E. Klingner, H.L. Graves, Static behavior of anchors under combinations of tension and shear loading. ACI Struct. J. **98**(4), 525-536 (2001).

5. Conclusions

In this study, 16 pieces of ribbed steel bars of B420C class with a diameter of 16 mm were installed in 4 different concrete types at a depth of 160 mm by using 4 different adhesives. These 16 anchor bars were exposed to tensile force and load-displacement slopes were obtained as a result. The following are concluded as a result of the experiments made and the slopes obtained:

- When the mechanical properties of the four different chemical adhesives are examined, it was seen that the M2 material has higher levels of compressive and bending strength values with respect to other materials. In the experiments, M2 material had higher tensile force and energy dissipation capacity with respect to other materials. It was observed that the mechanical properties of the chemical adhesive used to install the anchors have been effective on their tensile strengths.
- If we compare the tensile strengths of the anchors installed in the reference concrete with the anchors installed in modified concrete types; the tensile strength increased at the rate of 26% in blast furnace slag concrete, at the rate of 18% in fly ash concrete and at the rate of 3% in polypropylene-reinforced concrete.
- Although the 28-day compressive strength of reference concrete is higher than the modified concrete types, the addition of additive material to reference concrete made a positive impact on the tensile strength of the anchor.
- As for the stiffness values, the highest values were obtained in reference concrete and the lowest values were obtained in polypropylene-reinforced concrete. The slope of tangents drawn on the load-displacement charts, which were obtained as a result of installing anchors to reinforced concrete [which is obtained by adding reinforcement material in the concrete] and of applying tensile force on these anchors, decreases. In other words, the stiffness of reinforced concrete is lower than the reference concrete.
- The energy dissipation capacities obtained from the load-displacement slopes, as a result of the applied tensile force, increased by 63% in blast furnace slag-reinforced concrete, by 55% in fly ash-reinforced concrete and by 29% in polypropylene fiber-reinforced concrete. While the stiffness of reinforced concrete types was decreased, their tensile strength and energy dissipation capacity had increased.
- In the analytical part of the study, capacity and design strength values, as well as failure modes of anchors, were identified by using the formulation given in ACI 318 and they were compared with the test results and failure modes. When all the test results are assessed, 94% of the samples had safety levels over 1. The formulation given in ACI 318 does not involve the impact of reinforced materials added to the concrete. The formulation includes only the compressive strength of the concrete. By taking the values obtained from reference concrete as a basis, the coefficient 0.78 may be used as a multiplier for reinforced concrete kinds in the formulation given in ACI 318.

9. N.A. Zamora, R.A. Cook, R.C. Konz, G.R. Consolazio, Behavior and design of single, headed and unheaded, grouted anchors under tensile load. *ACI Struct. J.* **100**(2), 222-230 (2003).
10. M. Shirvani, R.E. Klingner, H.L. Graves, Breakout capacity of anchors in concrete part 1: tension. *ACI Struct. J.* **101**(6), 813-820 (2004).
11. M. Štrba, M. Karmazinová, Actual behavior and objective load-carrying capacity of tension steel expansion anchors to concrete. *Proc. Eng.* **40**, 440-444 (2012).
12. J. Kim, W. Jung, M. Kwon, B. Ju, Performance evaluation of post-installed anchor for sign structure in South Korea. *Constr. Build. Mater.* **44**, 496-506 (2013).
13. R. Elighausen, R.A. Cook, Behavior and design adhesive bonded anchors. *ACI Struct. J.* **103**(6), 822-831 (2006).
14. C.C. Higgins, R.E. Klingner, Effects of environmental exposure on the performance of cast-in-place and retrofit anchors in concrete. *ACI Struct. J.* **95**(5), 506-517 (1998).
15. R.A. Cook, R.C. Konz, Factoring influencing bond strength of adhesive anchors. *ACI Struct. J.* **98**(1) 76-86 (2001).
16. Ö. Çalışkan M. Aras, Experimental investigation of behaviour and failure modes of chemical anchorages bonded to concrete. *Constr. Build. Mater.* **156**, 362-375 (2017).
17. M. Bajer, J. Barnat, The glue-concrete interface of bonded anchors. *Constr. Build. Mater.* **34**, 267-274 (2012).
18. S. Epakachi, O. Esmaili, S.R. Mirghaderi, A.S.T. Behbahani, Behavior of adhesive bonded anchors under tension and shear loads. *J. Constr. Steel Res.* **114**, 269-280 (2015).
19. H.T. Turker, E. Ozbay, M. Balçırkanlı, Pullout capacity development of cast in place anchors with embedded studs. *Constr. Build. Mater.* **102**, 39-43 (2016).
20. A.E. Richardson, S. Dawson, L. Campbell, G. Moore, C. Mc Kenzie, Temperature related pull-out performance of chemical anchor bolts in fibre concrete. *Constr. Build. Mater.* **196**, 478-484 (2019).
21. V. Hlavíčka, E. Lublý, Concrete cone failure of bonded anchors in thermally damaged concrete. *Constr. Build. Mater.* **171**, 588-597 (2018).
22. G. Ba, X. Weng, C. Liu, J. Miao, Bond strength of corroded reinforcements in concrete after high-temperature exposure. *Constr. Build. Mater.* **270**, 121400 (2021).
23. K. Tian, J. Ožbolt, J. Hofmann, Experimental investigation of concrete edge failure for single stud anchors and anchor groups after fire exposure. *Constr. Build. Mater.* **266**, 120982 (2021).
24. O. Al-Mansouri, R. Mège, N. Pinoteau, T. Guillet, R. Piccinin, K. McBride, S. Rémond, Numerical investigation of parameters influencing fire evaluation tests of chemically bonded anchors in uncracked concrete. *Eng. Struct.* **209**, 110297 (2020).
25. A. El Refai M.A. Ammar, R. Masmoudi, Bond performance of basalt fiber reinforced polymer bars to concrete, *J. Compos. Constr.* **19**, 1-12 (2015).
26. H. Zhang, S. Smith, R.J. Gravina, Z. Wang, Modelling of FRP-concrete bonded interfaces containing FRP anchors. *Constr. Build. Mater.* **139**, 394-402 (2017).
27. R. Nilforoush, M. Nilsson, L. Elfgen, Experimental evaluation of tensile behaviour of single cast-in-place anchor bolts in plain and steel fibre-reinforced normal-and high- strength concrete. *Eng. Struct.* **147**, 195-206 (2017).
28. M.U. Saleem, N. Khurram, M.N. Amin, K. Khan, Finite element simulation of RC beams under flexure strengthened with different layouts of externally bonded fiber reinforced polymer (FRP) sheets, *J. Constr.* **17**(3), 383-400 (2018).
29. Y. Li, S. Yin, Y. Lu, C. Hu, Experimental investigation of the mechanical properties of BFRP bars in coral concrete under high temperature and humidity. *Constr. Build. Mater.* **259**, 120591 (2020).
30. H.C. Biscaia, C. Chastre, Design method and verification of steel anchorages for FRP-to-concrete bonded interfaces. *Compos. Struct.* **192**, 52-66 (2018).
31. M. Tóth, B. Bokor, A. Sharma, Anchorage in steel fiber reinforced concrete – concept, experimental evidence and design recommendations for concrete cone and concrete edge breakout failure modes. *Eng. Struct.* **181**, 60-75 (2019).
32. P. Motwani, N. Perogamvros, S. Taylor, A. Laskar, Performance of industrial wedge-anchors for pre-stressing BFRP bars: Experimental and numerical studies. *Compos. Struct.* **215**, 112592 (2020).
33. A. Albidah, A. Altheeb, F. Alrshoudi, A. Abadel, H. Abbas, Y. Salloum, Bond performance of GFRP and steel rebars embedded in metakaolin based geopolymer concrete. *Structures* **27**, 1582-1593 (2020).
34. T. Li, H. Zhu, Q. Wang, J. Li, T. Wu, Experimental study on the enhancement of additional ribs to the bond performance of FRP bars in concrete. *Constr. Build. Mater.* **185**, 545-554 (2018).
35. Q. Wang, H. Zhu, Y. Tong, W. Su, P. Zhang, Bond-slip behaviour of the CFRP ribbed bars anchored with the innovative additional ribs in concrete. *Compos. Struct.* **262**, 113595 (2021).
36. M. Kalthoff, M. Raupach, Pull-out behaviour of threaded anchors in fibre reinforced ordinary concrete and UHPC for machine tool constructions. *J. Build. Eng.* **33**, 101842 (2021).
37. Z. Achillides, P. Pilakoutas, Bond behaviour of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions. *J. Compos. Constr.* **8**, 173-181 (2004).
38. M. Urbanski, A. Lapko, A. Garbacz, Investigation on concrete beams reinforced with basalt rebars as an effective alternative of conventional R/C Structures. *Proc. Eng.* **57**, 1183-1191 (2013).
39. J.A.H. Rami, M.A. Megat Johari, R.H. Haddad, Mechanical properties and bond characteristics of different fiber reinforced polymer rebars at elevated temperatures. *Constr. Build. Mater.* **142**, 521-535 (2017).
40. G.B. Maranan, A.C. Manalo, W. Karunasena, B. Benmokrane, Pullout behaviour of GFRP bars with anchor head in geopolymer concrete. *Compos. Struct.* **132**, 1113–1121 (2015).
41. G. Ma, Y. Huang, F. Aslani, T. Kim, Tensile and bonding behaviours of hybridized BFRP–steel bars as concrete reinforcement. *Constr. Build. Mater.* **201**, 62-71 (2019).
42. E. Henin, R. Tawadrous, G. Morcos, Effect of surface condition on the bond of Basalt Fiber-Reinforced Polymer bars in concrete. *Constr. Build. Mater.* **226**, 449-458 (2019).
43. ACI 318, 2019, Building code requirements for reinforced concrete, American Concrete Institute, Detroit, USA.
44. H. Mazaheriipour, S. Ghanbarpour, S.H. Mirmoradi, I. Hosseinpour, The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened light-weight self-compacting concrete. *Constr. Build. Mater.* **25**, 351-358 (2011).