

Właściwości materiałowe betonu z dodatkiem włókien lub mikroprętów bazaltowych

Material properties of basalt fibres or microbars reinforced concrete

mgr inż. Rafał Kostro, dr inż. Julita Krassowska (ORCID: 0000-0001-9209-1285), dr hab. inż. Marta Kosior-Kazberuk, prof. PB (ORCID: 0000-0001-8171-2242), Instytut Inżynierii Lądowej, Politechnika Białostocka

DOI: 10.5604/01.3001.0054.7223

Streszczenie: Badania związane ze zjawiskiem ścinania belek zmierzają w kierunku wykorzystania zbrojenia rozproszonego w postaci mikroprętów i włókien wzmacniających te elementy konstrukcyjne. Jednym z materiałów wykorzystywanym do produkcji zbrojenia rozproszonego jest bazalt. Wprowadzenie mikroprętów i włókien do mieszanki betonowej przyczynia się do zwiększenia wytrzymałości na rozciąganie stwardniałego betonu oraz wpływa pozytywnie na parametry związane z mechaniką pęknięcia. W celu określenia tego wpływu wykonano siedem serii próbek, stosując różną zawartość zbrojenia rozproszonego w mieszankach betonowych. Określono wartości wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, wytrzymałości na ściskanie, wartości modułu Younga oraz przeprowadzono badania parametrów mechaniki pęknięcia betonu. Otrzymane wyniki porównano z wytrzymałościami określonymi dla betonu bez zbrojenia rozproszonego.

Słowa kluczowe: beton, włókna, mikropręty, mechanika pęknięcia, rozciąganie.

Abstract: Fibers and microbars reinforced concrete beams were commonly investigated to determinate their shear resistance. There are a lot of materials used in production of this type of reinforcement, one of them is basalt. There is commonly known that the incorporation of fibers and microbars improve the tensile strength of concrete and it has a positive effect on fracture mechanic parameters. In order to determinate these effects seven series of samples were made using different contents of dispersed reinforcement. The tensile strength, compression strength, Young modulus and fracture mechanics parameters were investigated and compared with properties of concrete without addition of reinforcement.

Keywords: concrete, fibers, microbars, fracture mechanics, tension.

1. Wprowadzenie

Beton jest materiałem powszechnie stosowanym w budownictwie, jednak ze względu na stosunkowo małą wytrzymałość na rozciąganie konstrukcje z niego wykonywane wymagają zastosowania zbrojenia. W praktyce projektowej najczęściej używa się prętów stalowych przenoszących siły rozciągające. Wzmacniają one jednak elementy konstrukcyjne tylko w miejscu wprowadzenia. W celu stworzenia kompozytu betonowego charakteryzującego się większą wytrzymałością na rozciąganie stosuje się zbrojenie rozproszone dodawane do mieszanki betonowej, poprawiające właściwości materiałowe kompozytu betonowego. Dodatek ten zmniejsza zazwyczaj wymaganą liczbę prętów zbrojeniowych elementów konstrukcyjnych, nie tylko ze względu na skurcz, ale też i na nośność na ścinanie. Powszechnie wykorzystuje się włókna oraz mikropręty wykonane z różnego typu materiałów, takich jak stal, bazalt, szkło, polimery jak również mieszanki włókien wykonanych z powyżej wymienionych materiałów [1–5]. Bada się wpływ zawartości, długości oraz kształtu włókien na stwardniały beton [3, 6, 7]. Zastąpienie zbrojenia metalicznego – niemetalicznym daje niebagatelne korzyści w kwestii ekologii. Wytwarzanie stali

wymaga dużego nakładu energii związanego z wysoką temperaturą przetapiania tego materiału, co przekłada się na emisję dwutlenku węgla do atmosfery. W celu określenia właściwości materiałowych betonu z dodatkiem włókien lub mikroprętów autorzy artykułu przeprowadzili badania siedmiu serii próbek z dodatkiem zróżnicowanego zbrojenia rozproszonego. Określono wytrzymałość na ściskanie, rozciąganie, moduł Younga oraz przeprowadzono badania parametrów mechaniki pęknięcia betonu. Wyniki porównano z uzyskanymi w przypadku betonu cementowego bez zbrojenia rozproszonego.

2. Przegląd zagadnienia

Na przestrzeni ostatnich kilkadziesiąt lat prowadzono liczne badania nad wpływem dodatku włókien oraz mikroprętów na właściwości betonu. Zbrojenie rozproszone było stosowane głównie w posadzkach przemysłowych w celu uniknięcia zarysowania spowodowanego skurczem w trakcie wiązania i wysychania mieszanki betonowej [8]. Zbrojenie rozproszone wytwarzano przeważnie ze stali, ale obecnie popularność uzyskują włókna bazaltowe, szklane, polimerowe oraz ich mieszanki [1–5]. Wykorzystanie innych materiałów niż stal daje

alternatywę zastąpienia zbrojenia metalicznego, np. w przypadku wzrostu jego ceny. Ważną kwestią jest przyczepność włókien i mikroprętów do matrycy cementowej. Współpraca między materiałami odgrywa kluczową rolę, jeśli chodzi o poprawę właściwości materiałowych. Aby zwiększyć jakość zakotwienia zbrojenia rozproszonego, stosuje się różne kształty oraz długości włókien i mikroprętów [9]. Do najczęściej spotykanych kształtów mikroprętów należą pręty proste, falowane lub z zagiętymi końcami. Najlepszą przyczepnością charakteryzują się mikropręty i włókna inne niż proste i gładkie. Wyniki licznych badań materiałowych betonów z dodatkiem mikroprętów lub włókien powodują poszerzenie zastosowania tego typu zbrojenia rozproszonego na elementy konstrukcyjne inne niż posadzki betonowe. Obecnie dodaje się je do betonu przeznaczonego do wykonywania elementów belkowych w celu zwiększenia nośności na ścinanie tych elementów konstrukcyjnych [10]. Włókna powodują zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie stwardniałego betonu proporcjonalnie do ilości tego dodatku. Stosowanie zbrojenia rozproszonego poprawia właściwości materiałowe matrycy betonowej w każdym punkcie ośrodka kompozytowego w przeciwieństwie do tradycyjnego zbrojenia prętami. W celach projektowych opracowano procedury wymiarowania belek betonowych ze zbrojeniem rozproszonym ze względu na nośność na ścinanie i zawarto je w normach [11–16]. Coraz częściej krytykuje się metodę betonowych krzyżulców i zastępuje ją Uproszczoną, Zmodyfikowaną Teorią Pól Ściskanych [24]. Uwzględnia ona wytrzymałość resztkową na rozciąganie betonu.

3. Metodyka badań

Badaniom poddano betony z różną zawartością włókien bazaltowych i mikroprętów bazaltowych i porównano z betonem bez dodatku zbrojenia rozproszonego (mieszanka B). Zastosowano następujące zawartości mikroprętów 1,5 kg/m³ (mieszanka M15), 2,5 kg/m³ (M25), 3,5 kg/m³ (M35) i zawartości włókien 6,0 kg/m³ (W6), 8,0 kg/m³ (W8), 10,0 kg/m³ (W10). Proste mikropręty miały długość 50 mm i średnicę 0,02 mm, natomiast włókna miały długość 50 mm. Dodano je w miejsce kruszywa frakcji 2–16 mm. Do wykonania próbek użyto betonu CEM I 42,5 R. W każdej mieszance zawartość cementu wynosiła 320 kg/m³, zawartość wody 160 kg/m³, piasku 0–2 mm – 732 kg/m³, i kruszywa 2–16 mm – 1203 kg/m³. Zastosowano domieszkę uplastyczniającą Chryso Optima 185 w celu poprawienia urabialności mieszanki betonowej i równomiernego rozprowadzenia zbrojenia rozproszonego. Superplastyfikator dodano w ilości 3,2 kg/m³ (1% suchej masy cementu). Wykonanie mieszanek betonowych rozpoczęto od mieszania kruszywa „na sucho” przez okres 1 min. W przypadku mieszanki z mikroprętami dodano następnie cement i mieszano 1 min, by po upływie tego czasu stopniowo dodawać wodę w trakcie ciągłego mieszania. Następnie dodano superplastyfikator. Jako ostatnie wsypywano mikropręty, nieustannie

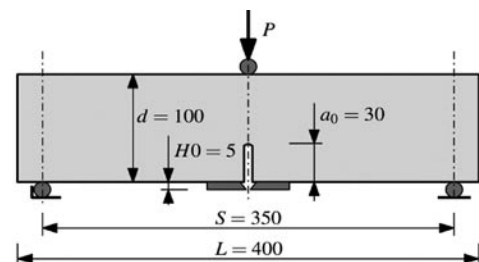
mieszając mieszankę betonową. W przypadku mieszanki z włóknami dodawano je do kruszywa przed zaaplikowaniem cementu, w celu równomiernego rozprowadzenia ich w betonie. Dalsza procedura była identyczna jak w przypadku mikroprętów. Próbkę formowano warstwowo, zagęszczając je na stole wibracyjnym. Rozformowano je po upływie 24 h i przechowywano w wodzie przez 28 dni.

Dla każdego z siedmiu składów mieszanek betonowych wykonano po trzy próbki do badań wytrzymałości na ściskanie (100x100x100 mm), rozciąganie przy zginaniu (100x100x400 mm) oraz do modułu Young'e'a (cylindry o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm). Przeprowadzono również badania parametrów mechaniki pękania betonu, wykorzystując próbki pryzmatyczne o wymiarach 100x100x400 mm. Próbkę wykonano zgodnie z normami PN-EN 12390-1 [17] i PN-EN 12390-2 [18].

Wytrzymałość na ściskanie została określona zgodnie z normą PN-EN 12390-3 [19], a wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu zgodnie z normą PN-EN 12390-5 [20], przyjmując wartość wytrzymałości jako naprężenie powodujące powstanie pierwszej rysy w próbce. Moduł Young'e'a wyznaczono zgodnie z normą PN-EN 12390-13:2014 [21].

Badania parametrów mechaniki pękania betonu przeprowadzono na próbkach belkowych o wymiarach 100x100x400 mm w próbie trójpunktowego zginania (rys. 1), zgodnie z procedurami opisanymi w normach [22, 23]. Przed testami w próbkach wykonano szczelinę pierwotną za pomocą piły diamentowej. Karb miał kształt typu „U” o głębokości 30 mm i szerokości 3 mm. Promień zaokrąglenia był w przybliżeniu równy 1,5 mm. Szczelina została wykonana dzień przed badaniem w środku rozpiętości belki.

W trakcie badania próbkę obciążano siłą skupioną w środku rozpiętości i mierzono rozwarście szczeliny pierwotnej CTOD za pomocą ekstensometru. Wynikiem testu są krzywe obrazujące zależność szerokości karbu od obciążenia (rys. 2–4). Przy zwiększaniu siły szerokość rozwarścia szczeliny CTOD zwiększała się. Maksymalną siłę skupioną osiągnięto, zwiększając obciążenie tak, by proces ten trwał około 5 min. Stanowiła ona 95% obciążenia niszczącego, a po jej osiągnięciu odciążono próbkę do wartości obciążenia 100 N. Następnie belkę obciążono po raz kolejny aż do maksymalnej wartości siły, która była mniejsza niż w poprzednim cyklu. Cykl obciążenie-odciążenie przeprowadzono czterokrotnie. Następnie próbka została obciążona aż do zniszczenia. Obciążenie przykładano w sposób automatyczny.



Rys. 1. Schemat próbki do badań parametrów mechaniki pękania betonu

Parametrem decydującym o przebiegu testu i wielkości przykładanej siły była rozwarłość szczeliny pierwotnej CTOD.

4. Wyniki badań i analiza

Wyniki badań właściwości fizycznych betonów przedstawia tabela 1. Pokazują one, że dodatek włókien lub mikroprętów do betonu nie poprawia wytrzymałości na ściskanie, a wręcz wpływa na jej pogorszenie. W przypadku mikroprętów ich dodatek 1,5 kg/m³ do betonu spowodował spadek nośności na ściskanie o około 10% w stosunku do zwykłego betonu, a zaaplikowanie włókien dało spadek o około 15%.

W przypadku wytrzymałości na rozciąganie dodatek zbrojenia rozproszonego powoduje jej wzrost (tab. 1) o około 4-15% w przypadku mikroprętów i o około 6-16% w przypadku włókien w odniesieniu do zwykłego betonu. Zauważono, że im większy dodatek, tym wytrzymałość na rozciąganie wzrasta. Wartość modułu Younga spada wraz z dodatkiem zbrojenia rozproszonego. Najoptymalniejszymi mieszankami okazały się M25, gdzie wartość modułu była przybliżona do tej dla betonu bez dodatków i mieszanka W8 i W10, gdzie moduł spadł około 16% w stosunku do czystego betonu (tab. 1).

Badania parametrów mechaniki pęknięcia przeprowadzono dla betonu bazowego – B, betonu M15 oraz W6 i W8. Każda próbka została poddana czterem cyklom obciążeniowym, a następnie obciążona aż do zniszczenia. Obrazują to wykresy na rysunkach 2–4. W pierwszej fazie obciążeniowej betony wykazywały liniową zależność obciążenia od szerokości rozwarcia szczeliny. Najdłuższą liniową część wykresu wykazał beton kontrolny. Wszystkie betony miały zbliżone nachylenie do poziomu wykresów w tej fazie. Po osiągnięciu maksymalnego obciążenia P_{max} będącego 95% siły niszczącej, nastąpiło odciążenie próbek. Największą wartość P_{max} osiągnął beton kontrolny. Siła ta wskazuje na początkowy moment inicjacji pęknięcia wierzchołka szczeliny. Pierwszy cykl obciążeniowy wykorzystano do wyznaczenia parametrów mechaniki pęknięcia betonu. W kolejnych cyklach obciążeniowych wartość maksymalnej siły była mniejsza, a nachylenie krzywej obciążeniowej do poziomu malało. Obrazuje to utratę sprężystości betonu jako materiału kruchego. Wszystkie cykle obciążeniowe przebiegały analogicznie. Z każdym powtórzeniem próbki z włóknami wykazywały większą podatność na odkształcenia w procesie pęknięcia niż beton kontrolny (rys. 3, 4).

Do analizy procesu pęknięcia betonu obliczono krytyczną długość efektywnej szczeliny a_c , krytyczny współczynnik intensywności naprężeń przy największym obciążeniu K_{Ic}^s , krytyczną wartość rozwarcia wierzchołka szczeliny CTOD_c oraz wartość Q i wyniki zamieszczono w tabeli 2. Wielkości te

Tabela 1. Właściwości fizyczne betonów po 28 dniach [MPa]

Parametr	B	M15	M25	M35	W6	W8	W10
σ_c [MPa]	59,5±5,1	52,5±6,2	57,9±5,1	56,9±4,3	50,8±4,4	50,6±3,5	49,9±3,9
σ_t [MPa]	3,06±0,1	3,18±0,1	3,34±0,2	3,50±0,3	3,24±0,3	3,41±0,1	3,56±0,3
E [GPa]	33,5±0,4	30,3±1,0	33,0±1,4	31,9±0,7	26,6±1,1	28,1±0,4	28,1±0,9

σ_c – wytrzymałość na ściskanie, σ_t – wytrzymałość na rozciąganie, E – moduł Younga

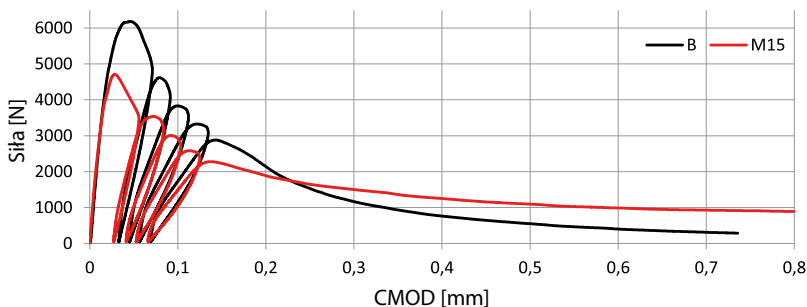
określono na podstawie wykresów (rys. 2– 4) zależności wartości przyłożonej siły P od szerokości rozwarcia szczeliny CMOD. Parametr Q zdefiniowano zgodnie z [25]. Im wartość tego parametru jest mniejsza, tym materiał jest bardziej kruchy. W przypadku betonu wartość Q powinna się mieścić w przedziale 100–350 mm.

$$Q = \left(\frac{E \cdot CTOD_c}{K_{Ic}^s} \right)^2$$

Tabela 2. Wartości parametrów mechaniki pęknięcia

Mieszanka	a_c [m]	K_{Ic}^s [MN/m ^{3/2}]	CTOD _c [m × 10 ⁻⁵]	Q [mm]
B	0,0445	1,728	1,5420	142
M15	0,0465	1,456	1,7025	175
W6	0,0448	1,626	1,6771	146
W8	0,0463	1,631	1,9213	171

Wraz ze wzrostem dodatku włókien lub mikroprętów do betonu krytyczna długość efektywnej szczeliny a_c zwiększała się. Największą długość osiągnął beton W8. Im większa zawartość włókien w objętości betonu, tym wartość a_c większa. Podobną zależność uzyskano w przypadku wartości krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K_{Ic}^s . Dodatek zbrojenia rozproszonego powodował, iż betony uzyskiwały większe wartości współczynnika. Wraz ze wzrostem zawartości włókien w objętości betonu wartość K_{Ic}^s była większa. Wartość krytycznego rozwarcia wierzchołka szczeliny CTOD_c również była większa dla betonów z mikroprętami i włóknami. Wartość parametru Q charakteryzująca kruchość materiału zwiększała się wraz z dodatkiem zbrojenia rozproszonego oraz ze wzrostem jego ilości w objętości betonu. Im wartość Q większa, tym materiał jest mniej kruchy. Najmniejszą kruchość wykazały betony M15 i W8. Im większa zawartość włókien w objętości betonu, tym beton jest mniej kruchy.



Rys. 2. Wykres porównawczy wartości zależności obciążenia od rozwarcia rysy dla betonu kontrolnego i betonu M15

5. Podsumowanie

Wyniki badań pokazują, że dodatek zbrojenia rozproszonego w postaci włókien i mikroprętów korzystnie wpływa na wytrzymałość na rozciąganie betonu. Im większa zawartość włókien lub mikroprętów w objętości betonu, tym wytrzymałość ta również jest większa. Dodatek włókien spowodował obniżenie wytrzymałości na ściskanie betonu w przybliżeniu o 15% oraz pomniejszenie wartości modułu Younga o około 15% w stosunku do betonu kontrolnego. W przypadku betonu M25 uzyskano podobną wytrzymałość na ściskanie i zbliżoną wartość modułu sprężystości do betonu kontrolnego, pozostałe dwie mieszanki uzyskały gorsze właściwości.

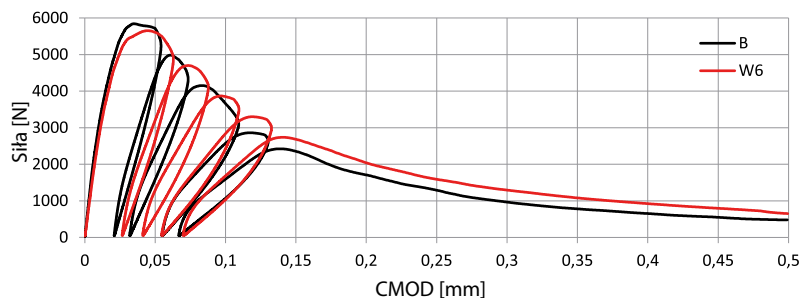
Wyniki badań parametrów mechaniki pęknięcia wykazały, że beton z mikroprętami bazaltowymi osiągał nieco mniejsze wartości siły niszczonej niż beton bez dodatków. Pomimo tego, wartości parametrów mechaniki pęknięcia, takie jak krytyczny współczynnik intensywności naprężeń, krytyczne rozwarście wierzchołka szczeliny, a także krytyczna długość efektywnej rysy były porównywalne lub przekraczały wartości parametrów zarejestrowanych dla betonu kontrolnego.

Korzystne wartości parametrów mechaniki pęknięcia a także większa wytrzymałość na rozciąganie betonów z bazaltowym zbrojeniem rozproszonym mogą przyczynić się do zmniejszenia liczby i szerokości rys w elementach konstrukcyjnych, co zwiększa trwałość i niezawodność konstrukcji.

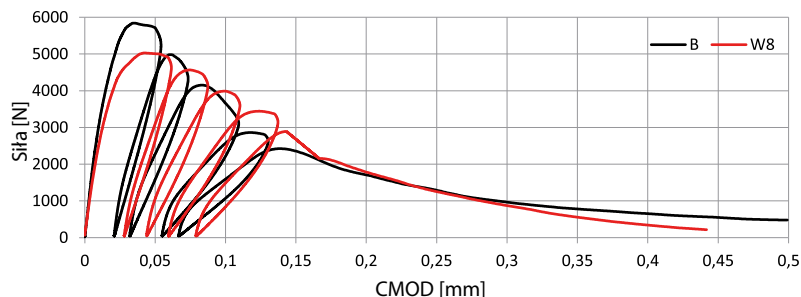
Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że kluczowym aspektem przy projektowaniu i wykonywaniu konstrukcji z włóknobetonu jest zapewnienie jednorodności mieszanki betonowej. Można to osiągnąć poprzez odpowiednią technologię mieszania, optymalizację ilości dodawanych włókien lub mikroprętów, a także rygorystyczną kontrolę jakości na każdym etapie produkcji betonu.

BIBLIOGRAFIA

[1] Kosior-Kazberuk M., Krassowska J., Fracture behavior of basalt and steel fiber reinforced concrete, *Civil and Environmental Engineering* 6/2015, str. 73–80
 [2] Liu Q., Qiao P., Lu L., Mixed mode fracture characterization of GFRP-concrete bonded interface using four-point single leg bending test, *Engineering Structures* 171, 2018, str. 647–657
 [3] Singh B., Jain K., Appraisal of steel fibers as minimum shear reinforcement in concrete beams, *ACI Structural Journal* 111(5)2014, str. 1191–1202
 [4] Said M., Adam M., Mahmoud A., Shanour A., Experimental and analytical shear evaluation of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars, *Construction & Building Materials*, 102, 2016, str. 574–591
 [5] Shi F., Pham T., Hao H., Hao Y., Post-cracking behaviour of basalt and macro polypropylene hybrid fibre reinforced concrete with different compressive strengths, *Construction & Building Materials* 262, 2020, str. 120108
 [6] Lantsoght E., Database of Shear Experiments on Steel Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrups, *Materials* 12(6)2019, str. 917



Rys. 3. Wykres porównawczy wartości zależności obciążenia od rozwartości rysy dla betonu kontrolnego i betonu W6



Rys. 4. Wykres porównawczy wartości zależności obciążenia od rozwartości rysy dla betonu kontrolnego i betonu W8

[7] Wang X., Wang Z., Wu Z., Cheng F., Shear behavior of basalt fiber reinforced polymer (FRP) and hybrid FRP rods as shear resistance members, *Construction & Building Materials* 73, 2014, str. 781–789
 [8] Pająk Z., Wieczorek M., Posadzki przemysłowe. Posadzki betonowe. Część 6, *Builder* 12/2016, str. 84–89
 [9] Dinh H., Parra-Montesinos G., Wight J., Shear behavior of steel fiber-reinforced concrete beams without stirrup reinforcement, *ACI Structural Journal* 107(5)2010, str. 597–606
 [10] Krassowska J., Kosior-Kazberuk M., Berkowski P., Shear behavior of two-span fiber reinforced concrete beams, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 19(4)2019, str. 1442–1457
 [11] DIN-EN 1992-1-1
 [12] RILEM TC 162-TDF: Test design methods for steel fibre reinforced concrete, *Materials and Structures* 36, 10/2003, str. 550–567
 [13] RILEM TC-TDF: Test and design methods for steel fiber reinforced concrete, Uni-axial tension test for steel fiber reinforced concrete, *Materials and Structures* 34, 1–2/2001, str. 3–6
 [14] Model Code 2010, Final draft, tom 1
 [15] Model Code 2010, Final draft, tom 2
 [16] CNR-DT 204/2006
 [17] PN-EN 12390-1: Badania betonu, Część 1: Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek do badania i form
 [18] PN-EN 12390-2: Badania betonu, Część 2: Wykonanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych
 [19] PN-EN 12390-3: Badania betonu, Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
 [20] PN-EN 12390-5: Badania betonu, Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badania
 [21] PN-EN 12390-13:2014: Oznaczenie siecznego modułu sprężystości stwardniałego betonu przy ścisaniu
 [22] Recommendation TC 50-FMT RILEM, *Materials and Structures* 18, 1985, str. 285–290
 [23] Recommendation TC 89-FMT RILEM, *Materials and Structures* 23, 1990, str. 457–460
 [24] Benz E. C., Vecchio F. J., Collins M. P., Simplified Modified Compression Field Theory for calculating shear strength of reinforced concrete elements, *ACI Structural Journal Technical Paper* 7–8/2006, str. 614–624
 [25] Kosior-Kazberuk M., Ocena parametrów mechaniki pęknięcia betonu cementowego, *Przegląd Budowlany* 11/2012, str. 20–23