

Studium parametryczne wytrzymałości betonu na docisk na podstawie dotychczasowych badań

KS2015

Dr hab. inż. Andrzej Seruga, mgr inż. Piotr Sokal, Politechnika Krakowska

1. Wprowadzenie

Obecnie w Polsce większość budynków i budowli żelbetonowych wykonuje się z betonów klas od ok. C20/25 do C35/45. Zaobserwować można jednak pewną tendencję do stosowania betonów o większej wytrzymałości. Dostępność odpowiednich składników chemicznych daje możliwość produkcji betonów wysokowartościowych, co pozwala na konstruowanie obiektów z betonów o coraz wyższej wytrzymałości na ściskanie. Ważną grupą obiektów, w której wykorzystywane są mocniejsze betony, są konstrukcje kablobetonowe.

W konstrukcjach kablobetonowych oprócz zagadnień związanych ze zginaniem i ścinaniem istotną rolę odgrywa docisk. Występuje on przede wszystkim w strefach zakotwień kabli sprężających. Zjawisko docisku w betonie ma miejsce również w miejscach połączeń słupów prefabrykowanych oraz w okolicy podparcia belek mostowych na ciosach łożyskowych.

Od połowy XX wieku wykonano wiele badań dotyczących nośności na docisk betonu. Artykuł przedstawia główne badania, które zostały przeprowadzone w tym czasie. W publikacji uwzględniono zagadnienie dotyczące elementów z betonu niezbrojonego. Jedną z trudności w porównywaniu wyników badań są różnice w określeniu wytrzymałości betonu na ściskanie. Badania wytrzymałości betonu na ściskanie przeprowadzane były m.in. na: kostkach 15 x 15 x 15 cm lub 20 x 20 x 20 cm, walcach o średnicy 15 cm i wysokości 30 cm lub o średnicy 16 i wysokości 16 cm oraz na pryzmach o różnych wysokościach. W celu uzyskania bardziej miarodajnych wyników przyjęto pewne założenia.

Badania na docisk prowadzono również na kilku rodzajach elementów. Były to głównie kostki, walce i pryzmy. Głównym parametrem utrudniającym porównanie był stosunek wysokości próbki do jej wymiaru poprzecznego.

Na podstawie wyników badań określano wytrzymałość betonu na docisk. Głównymi badanymi czynnikami wpływającymi na wytrzymałość betonu na docisk były: stosunek R pola powierzchni przekroju próbki (w niektórych opracowaniach jest ona ograniczana i nazywa się

ją powierzchnią rozdziału, na którą rozchodzi się obciążenie) do pola docisku, wytrzymałość betonu na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie, wysokość próbek i sposób podparcia próbek.

W artykule opisano skrótowo badania różnych autorów dotyczące docisku betonu niezbrojonego. Przedstawiono badane elementy i wnioski wyciągnięte przez autorów. Różni badacze w swoich artykułach podawali wyniki uśrednione lub też dla każdej próbki. W dalszej części pracy przedstawiono wyniki analizy obliczeniowej mającej na celu określenie odpowiednich wzorów do obliczenia wytrzymałości na docisk.

2. Oznaczenia

W referacie użyto następujących oznaczeń:

d – wymiar poprzeczny elementu lub wartość współczynnika,

f_c – wytrzymałość betonu na ściskanie określona na próbkach walcowych,

f_{ck} – wytrzymałość charakterystyczna betonu na ściskanie,

h – wysokość elementu,

q – wytrzymałość betonu na docisk,

q_{exp} – wytrzymałość betonu na docisk – wartość uzyskana w badaniu,

q_{teo} – wytrzymałość betonu na docisk – wartość teoretyczna uzyskana ze wzoru,

q_{EC2} – wytrzymałość betonu na docisk, obliczona wg zaleceń EC2,

R – stosunek powierzchni przekroju próbki do powierzchni docisku,

f_{sp} – wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupaniu.

3. Główne dotychczasowe wzory do obliczania nośności na docisk

W tym rozdziale przedstawiono wzory dzięki którym można było obliczyć wytrzymałość na docisk. Same wzory nie są identyczne ze wzorami pochodzącymi z przywołanych niżej publikacji, ponieważ zazwyczaj korzystano

z pojęcia nośności na docisk niż wytrzymałości na docisk. Również oznaczenia we wzorach zostały przystosowane do współczesnych.

Pierwszym badaczem, którego pracę można znaleźć w literaturze dotyczącej docisku, jest Bauschinger [1], który swoje badania przeprowadził na próbkach kamiennych. Na podstawie tych eksperymentów zaproponował wzór (1):

$$q = \sqrt[3]{R} f_c \quad (1)$$

W polskich normach budowlanych w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych do obliczenia wytrzymałości na docisk występował wzór (2) pochodzący z normy francuskiej [2]. Współczynnik wzrostu wytrzymałości na docisk do wytrzymałości na ściskanie nie mógł jednak przekraczać wartości ω_{max} , która wynosiła około 2.5.

$$q = \left(4 + 2 \frac{1}{R} - \sqrt{\frac{1}{R}} \right) f_c \quad (2)$$

W połowie XX wieku kilku autorów: Komendant [3], Middendorf [4] na podstawie osobnych badań zaproponowali wzór (3). Wzór ten był używany w normie PN-B-03264:2002 [5] oraz został wprowadzony do normy EC2 [6]. Założono jednak, że $q \leq 3 f_c$. Najnowsza norma Model Code 2010 [7] również pozostała przy tych samych ustaleniach. Norma dotycząca konstrukcji mostowych EC2-2 [8] podała współczynnik redukujący (4) wytrzymałość na docisk dla betonów wysokiej wytrzymałości. Wartości współczynnika podano w tabeli 1.

Tabela 1. Redukcja wytrzymałości na docisk wg EC2-2 [8]

Klasa betonu	Współczynnik redukcyjny χ
C55/67	1.02
C60/75	1.01
C70/85	0.98
C80/95	0.95
C90/105	0.92

$$q = \sqrt{R} f_c \quad (3)$$

$$\chi = \frac{0.46 \cdot f_{ck}^{2/3}}{1 + 0.1 f_{ck}} \quad (4)$$

4. Badania docisku betonu niezbrojonego

4.1. Shelson (1958)

Shelson [9] prowadził badania na próbkach kostkowych wykonanych z szybkowiążącej zaprawy o wytrzymałości około 50 MPa. Badał on również na próbkach walcowych wpływ wysokości próbki na nośność. Na podstawie tych badań zaobserwował, że dla próbek o wysokości

mniej niż szerokość można zaobserwować mniejsze wartości wytrzymałości na docisk.

4.2. Au i Baird (1960)

Au i Baird [10] wykonali eksperymenty na kostkach i pryzmach. Głównym celem badań było określenie wpływu wielkości powierzchni przekroju poprzecznego próbki do powierzchni docisku. Elementy wykonane były z betonów o wytrzymałości na ściskanie od około 27 MPa do 69 MPa. Drugim istotnym badanym czynnikiem była wysokość próbki. Dość ciekawą obserwacją był fakt, że próbki o mniejszej wysokości miały większą wytrzymałość na docisk.

4.3. Middendorf (1960)

Middendorf [4] prowadził badania docisku na walcach betonowych, w których określał wpływ stosunku R , a także wpływ wieku betonu oraz wytrzymałości na ściskanie na wytrzymałość na docisk. Dodatkowo analizował efekt zastosowania prostokątnych płyt dociskowych i przekręcenia kwadratowych płyt dociskowych na próbkach pryzmatycznych. Na podstawie wykonanych badań wprowadził wniosek, że bardziej poprawne wyniki podaje wzór (3) oraz, że wytrzymałość na docisk obliczana według tego wzoru nie powinna przekraczać dwukrotnej wytrzymałości na ściskanie.

4.4. Zieliński i Rowe (1963)

Zieliński i Rowe [11] podczas swoich badań z zastosowaniem konkretnych systemów sprężających, wraz ze zbrojeniem, wykonali pewne próbki niezbrojone, które poddali obciążeniu dociskowemu.

4.5. Ciesielski i Ziobroń (1963)

Ciesielski i Ziobroń [12] prowadzili badania docisku betonu niezbrojonego oraz zbrojonego siatką lub spiralą. Niektóre próbki miały wprowadzone podłużne otwory.

4.6. Muguruma i Okamoto (1965)

W Japonii Muguruma i Okamoto [13] przebadali 52 kostki i pryzmy z betonu o wytrzymałości około 50 MPa. Analizowali oni wpływ wymiarów powierzchni docisku na wytrzymałość na docisk. Wśród próbek, na których wykonano eksperymenty, znajdowały się próbki o kwadratowej powierzchni docisku.

4.7. Badora i Putko (1965)

Badora i Putko [14] badali głównie wytrzymałość na docisk betonu na kruszywie łupkoporytowym. Uzyskane wartości dla betonu zwykłego i łupkoporytowego były zbliżone.

4.8. Hawkins (1968)

Bardzo obszerne badania dotyczące docisku prowadził w Stanach Zjednoczonych Hawkins [15]. Głównym celem całego zbioru badań było określenie wpływu stosowania różnej grubości płyt dociskowych. Płyty podzielił

na sztywne [15], półsztywne i wiotkie [16]. W tym artykule zostaną uwzględnione tylko wyniki dla płyt sztywnych. Przeprowadził on również badania docisku pasmowego, czyli takiego, w którym jeden wymiar płyty dociskowej wynosi tyle samo co wymiar elementu w tym samym kierunku. Badania prowadził na betonie o wytrzymałości na ściskanie w przedziale 19 do 53 MPa. Zaproponował wzór (5) na obliczenie wytrzymałości na docisk, według którego wytrzymałość na docisk nie rośnie liniowo z wytrzymałością betonu na ściskanie. We wzorze tym w mianowniku pod pierwiastkiem należy wstawić wartość w MPa, a wartość K zależy od kąta tarcia wewnętrznego betonu i można bezpiecznie przyjmować ją równą 50.

$$q = \left(1 + \frac{K}{\sqrt{145} f_c} (\sqrt{R} - 1) \right) f_c \quad (5)$$

4.9. Haagsma (1969)

Bardzo podobne badania do eksperymentów Muguruma i Okamoto [13] prowadził Haagsma [17] polegały one przede wszystkim na określeniu wpływu kształtu powierzchni docisku (wymiarów prostokąta) na wytrzymałość na docisk.

4.10. Knauff (1969)

Pod koniec lat 60. ubiegłego wieku w Polsce Knauff w ramach swojej pracy doktorskiej [18] wykonał badania docisku na pryzmach z betonu o wytrzymałości około 20, 30 i 40 MPa. W badaniach wstępnych zostało określone, że wysokość (wzdłuż osi działania siły) próbki przestaje mieć znaczący wpływ na wytrzymałość na docisk, gdy jest równa lub większa od wymiaru poprzecznego elementu. W samych badaniach głównych zdecydowano się na badanie próbek o wysokości większej niż dwukrotny wymiar poprzeczny elementu badanego. W badaniach prowadzono również analizę wpływu kształtu powierzchni docisku, mimośrodowo obciążenia oraz zastosowanego zbrojenia na wytrzymałość na docisk. Dla elementów niezbrojonych zaproponowano wzór (5) na wytrzymałość na docisk, w którym f_{sp} oznacza wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupaniu.

$$q = \left(\sqrt{49 - 31 \left(R - \frac{1}{R} \right) \frac{f_{sp}}{f_c}} - 6 \right) f_c \quad (6)$$

4.11. Hyland i Chen (1970)

Eksperymenty dotyczące wpływu otworu na nośność na docisk prowadzili Hyland i Chen [19] Porównawczo w swoich pracach przebadali kilka walców bez otworów.

4.12. Niyogi (1973-1974)

W pierwszej połowie lat 70. jedno z największych badań dotyczących miejscowego ściskania wykonał Niyogi [20, 21]. Analizował on wpływ kształtu próbki i powierzchni

docisku, sposób podparcia próbek, wpływ mieszanki betonowej i wytrzymałości betonu, a także wpływ rozmiaru. Zauważył on, że wraz z mimośrodowo obciążenia maleje wytrzymałość dla tej samej powierzchni docisku. Zaobserwował również fakt, że wraz ze wzrostem wytrzymałości betonu na ściskanie wytrzymałość na docisk wzrasta wolniej niż liniowo. Ważnym wnioskiem było stwierdzenie, że wytrzymałość na docisk dla danego R maleje ze wzrostem wielkości próbki.

4.13. Wurm i Daschner (1977)

Wurm i Daschner [22] w ramach prowadzonych przez siebie eksperymentów dotyczących docisku elementów zbrojonych wykonali kilkanaście elementów niezbrojonych.

4.14. Williams (1979)

Williams [23] przeprowadził badania na pryzmach i kostkach z betonu o wytrzymałościach na ściskanie pomiędzy 20 i 75 MPa. Sprawdzał on wpływ stosunku wysokości próbki do szerokości, a także wpływ mimośrodu obciążenia, kształtu powierzchni docisku i w miejscu przyłożenia obciążenia tarcia na spodzie próbki. Próbkę o stosunku $h/d < 1$ mają zdecydowanie większą wytrzymałość na docisk niż próbki wyższe. W tej pracy można znaleźć bardzo dużą liczbę wyników badań innych autorów. Autorzy tego artykułu w swojej bazie wykorzystali dane znajdujące się w tej pracy. Część próbek badanych przez Williamsa została poddana obciążeniu dociskowemu z dodatkowym obciążeniem stycznym do docisku. Na podstawie dostępnych wyników z uwzględnieniem docisku pasmowego i na powierzchni o różnych kształtach zaproponował wzór (7) do obliczenia wytrzymałości na docisk. We wzorze tym, w stosunku R , jako powierzchnię, na którą rozchodziło się obciążenie, brano pole powierzchni figury, której środek leżał na linii działania siły przechodzącej przez środek ciężkości powierzchni docisku i która była podobna do powierzchni docisku. Podał on również zależność do obliczania wytrzymałości na docisk na podstawie wytrzymałości betonu na rozciąganie. Zauważył także, że elementy o stosunku h/d wynoszącym co najmniej 1,5 nie wykazują różnic w wytrzymałości na docisk przy zastosowaniu różnych materiałów do podparcia. Kolejną obserwacją był fakt, że dla próbek, w których następuje zniszczenie na skutek rozłupania, korzystne jest uwzględnianie zależności (8), w której używa się wytrzymałości betonu na rozłupanie f_{sp} .

$$q = 0.78 R^{0.441} f_c \quad (7)$$

$$q = 6.92 R^{0.47} f_{sp} \quad (8)$$

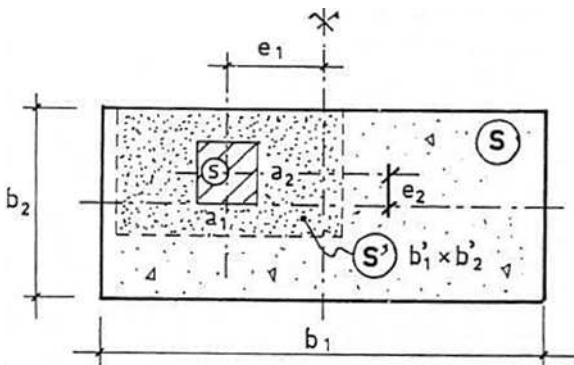
4.15. Trinh (1985)

Trinh [24] w swoich eksperymentach badał zachowanie się elementów poddanych obciążeniu dociskowemu. Elementy wykonane były z dwóch rodzajów betonu zwykłego o wytrzymałościach 35 i 48 MPa oraz

z betonów lekkich. We wnioskach ze swoich badań stwierdził, że wytrzymałość na docisk dla betonów lekkich jest mniejsza niż dla betonu zwykłego. Dla betonu zwykłego zaproponował zależność (8) do obliczania wytrzymałości na docisk. Rysunek 1 pochodzi z jego pracy [24] i przedstawia oznaczenia wielkości użytych we wzorze (9).

$$q = \left[1 + \left(3 - \frac{4}{3} \left(\frac{a_1}{b_1} + \frac{a_2}{b_2} \right) \right) \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{4}{3} \frac{a_1}{b_1} \right) \left(1 - \frac{4}{3} \frac{a_2}{b_2} \right)} \right] f_c \quad (9)$$

4.16. Roberts (1990)



Rys. 1. Opis użytych wielkości do wzoru Trinh [24]

W ramach bardzo dużego projektu dotyczącego stref zakotwień prowadzonego na Uniwersytecie Teksasu w Austin, obszerne badania docisku w strefach zakotwień elementów zbrojonych prowadziła Roberts [25].

Tabela 2. Zestawienie elementów

Autor	Kształt próbek	Kształt docisku	R [-]	f_c [-]	Ilość $h/d \geq 1,0$	Ilość $h/d \geq 1,5$
Shelson [9]	pryzma	kwadrat	1,4-13,6	6-63	11	11
Au i Baird [10]	kostka	kwadrat	2-16	23-55	41	0
Middendorf [4]	walec, pryzma	koło, kwadrat	1,3-28,4	2-40	25	25
Zieliński i Rowe [11]	kostka, pryzma	kwadrat	2-39	30-58	7	4
Ciesielski i Ziobroń [12]	walec	koło	2,9 i 7,1	22	2	0
Muguruma i Okamoto [13]	pryzma, kostka	kwadrat	1,8-100	27-45	17	8
Badora i Putko [14]	kostka	kwadrat	2-16	25	3	0
Hawkins [15]	kostka	kwadrat	2,2-36	18-45	22	0
Haagsma [17]	pryzma, kostka	kwadrat	2,8-25	25-26	3	0
Knauff [18]	pryzma	kwadrat	4-144	14-38	44	44
Hyland i Chen [19]	kostka	kwadrat	9 i 16	27-44	6	0
Niyogi [20, 21]	pryzma, kostka	kwadrat	1,7-64	10-51	73	40
Wurm i Daschner [22]	pryzma	kwadrat	1,4-9	30	8	8
Williams [23]	pryzma, kostka	kwadrat	1,5-234	18-67	64	14
Trinh [24]	walec, pryzma	koło, kwadrat	2,6-10,2	35 i 48	12	6
Cai i Xue [26]	pryzma	kwadrat	3,3-12,5	75	9	9
Tarig, Burley i Rigden [27]	pryzma	kwadrat	16	49	1	1
Bonetti [28]	walec, pryzma, kostka	koło, kwadrat, sześciokąt	1,65-16	28-75	82	78

Swoje badania wykonała na elementach z betonu o wytrzymałości około 45 MPa.

4.17. Cai i Xue (1996)

W Korei Cai i Xue [26] prowadzili eksperymenty na elementach pryzmatycznych z betonu wysokowartościowego o wytrzymałości kostkowej na ściskanie wynoszącej 88,2 MPa. Wykonali oni próbki zbrojone i niezbrojone. Na podstawie badań stwierdzili, że zależności podane dla betonów zwykłych zawyżają wartości wytrzymałości dla betonów wysokiej wytrzymałości.

4.18. Tarig, Burley i Rigden (1996)

Zespół Tarig, Burley i Rigden [27] analizował wpływ zastosowania strzemion na nośność na docisk. W ramach tych eksperymentów przebadali próbkę niezbrojoną.

4.19. Bonetti (2005)

Bonetti w badaniach do swojej pracy magisterskiej [28] sporządził bardzo dużą liczbę elementów niezbrojonych poddanych dociskowi. Badane elementy wykonane były z betonów o różnych wytrzymałościach z przedziału 28 MPa do 75 MPa. Głównymi analizowanymi czynnikami były:

- kształt powierzchni docisku i kształt poprzecznego przekroju elementu;
- stosunek R;
- stosunek wysokości elementu do jego wymiaru poprzecznego h/d ;
- zastosowanie betonu lekkiego;
- zastosowanie betonu wysokiej wytrzymałości (około 55 MPa i 75 MPa);

Tabela 3. Zestawienie wyników analizy dla elementów o $h/d \geq 1,0$ dla próbek o $R > 1,1$

Przedział R	1,1-2,3	1,1-3	1,1-4,1	1,1-6,1	1,1-9,0	1,1-16,0	wszystkie
Liczba próbek	44	76	180	220	270	353	430
a	0,83	0,82	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
b	0,35	0,38	0,47	0,47	0,48	0,49	0,52
Średni stosunek $q_{teo(10)}/q_{exp}$	0,94	0,96	0,96	0,96	0,97	0,98	1,00
Średni błąd względny dla wzoru (10)	0,16	0,15	0,18	0,17	0,17	0,17	0,19
c	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
d	0,56	0,4	0,61	0,6	0,54	0,56	0,6
e	0,92	0,94	0,89	0,89	0,91	0,9	0,88
Średni stosunek $q_{teo(11)}/q_{exp}$	0,96	0,95	0,95	0,95	0,96	0,96	0,97
Średni błąd względny dla wzoru (11)	0,15	0,14	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Średni stosunek q_{EC2}/q_{exp}	1,24	1,29	1,23	1,24	1,25	1,18	1,05
Średni błąd względny obliczeń wg EC2	0,27	0,31	0,29	0,30	0,30	0,28	0,33

• obecność otworu kablowego.
Główne wnioski odnośnie wytrzymałości na docisk wynikające z badań są następujące:

- wytrzymałość na docisk może być przeszacowywana przez wzór używany w normie europejskiej i amerykańskiej. Jest to najbardziej widoczne dla próbek o $R \leq 6$;
- występuje niewielka różnica wytrzymałości na docisk przy zastosowaniu kwadratowej i okrągłej powierzchni docisku dla tego samego R ;
- dla elementów o $h/d < 1,5$ można zaobserwować redukcję wytrzymałości na docisk;
- wraz ze wzrostem wytrzymałości betonu na ściskanie stosunek q/f_c maleje i jest to bardziej widoczne dla elementów o $R > 6$.

5. Analiza określająca najbardziej odpowiednie wzory do wyznaczenia wytrzymałości na docisk betonu niezbrojonego

5.1. Zbiór uwzględnionych badań

W zbiorze uwzględnionych do analizy próbek znajdują się elementy przebadane przez badaczy wymienionych w punkcie 4, które spełniają następujące założenia:

- są niezbrojone;
- ich powierzchnia docisku jest kwadratowa lub okrągła bądź sześciokątna;
- obciążenia działają w osi próbki, tzn. mimośród siły wynosi 0;
- nie są wykonane z betonu lekkiego;
- stosunek h/d wynosi co najmniej 1,0;
- ich wysokość wynosi co najmniej 150 mm.

W celu obserwacji wpływu stosunku h/d dokonano dwuczęściowej analizy. W pierwszej części uwzględniono próbki, których stosunek $h/d \geq 1,0$, a w drugiej $h/d \geq 1,5$. Pozwala to na zobrazowanie wpływu tego stosunku. W przypadku gdy wyniki z danych badań były

dostępne jako średnia z kilku elementów, uwzględniane są one jako jedna próbka.

5.2. Zestawienie elementów

Zestawienie próbek uwzględnionych w analizie przedstawia tabela 2. Łącznie przeanalizowano 430 próbek, których stosunek $h/d \geq 1,0$ i 248 próbek, których $h/d \geq 1,5$. Wśród tych zbiorów elementów, próbek o wytrzymałości f_c większej niż 60 MPa było po 32.

5.3. Założenia analizy obliczeniowej

Analizę obliczeniową przeprowadzono w celu uzyskania najbardziej odpowiedniego wzoru na wytrzymałość na docisk. Kryterium, którym się kierowano, było uzyskanie jak najmniejszego średniego względnego błędu dla wzoru. Założono, że wzór powinien mieć postać (10) lub (11). Wzór (10) jest wzorem bardzo podobnym do wzoru (3) używanego w polskich normach. Natomiast wzór (11) dodatkowo uwzględnia wpływ wytrzymałości betonu na ściskanie, tzn. uwzględnia fakt, że betony o wyższej wytrzymałości na ściskanie mogą mieć proporcjonalnie mniejszą wytrzymałość na docisk. W tym wzorze wartość wytrzymałości na ściskanie należy podawać w MPa, a uzyskany wynik będzie również w MPa. Założono, że wartości a , c i e muszą znajdować się w przedziale od 0,80 do 1,00, a wartości b i d w przedziale od 0,2 do 0,7. W celu określenia odpowiednich wartości przeprowadzono obliczenia zwiększając każdą z wartości o 0.01 w danych przedziałach.

$$q = a \cdot R^b f_c \quad (10)$$

$$q = c \cdot R^d f_c^e \quad (11)$$

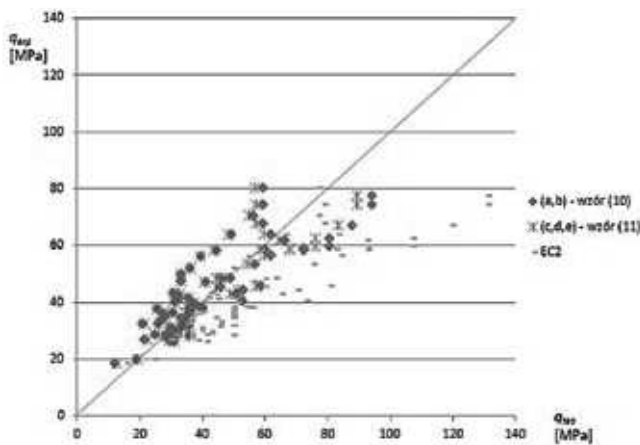
Ze względu na różne sposoby określania wytrzymałości betonu na ściskanie w poszczególnych badaniach,

Tabela 4. Zestawienie wyników analizy dla elementów o $h/d \geq 1,0$ dla próbek w kolejnych przedziałach R

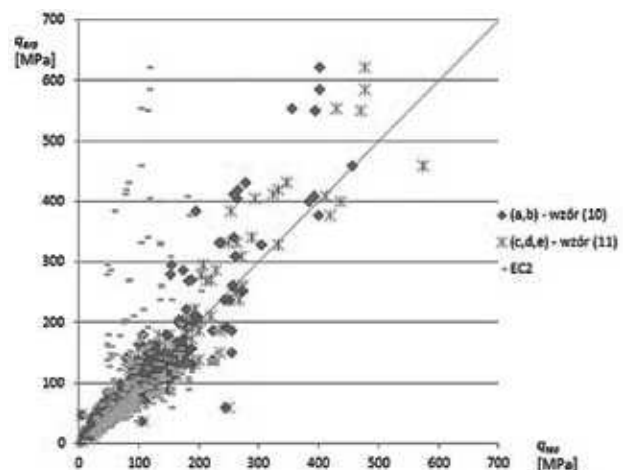
Przedział R	1,1-2,3	2,3-3	3,0-4,1	4,1-6,1	6,1-9,0	9,0-16,0	>16,0
Liczba próbek	44	32	104	40	50	83	77
a	0,83	0,95	0,97	0,99	0,87	0,81	0,8
b	0,35	0,23	0,37	0,33	0,45	0,5	0,56
Średni stosunek $q_{teo(10)}/q_{exp}$	0,94	0,98	0,97	0,95	1,00	0,98	1,02
Średni błąd względny dla wzoru (10)	0,16	0,14	0,19	0,15	0,15	0,18	0,19
c	0,99	0,99	0,99	0,99	0,97	0,98	0,94
d	0,56	0,65	0,69	0,62	0,66	0,69	0,69
e	0,92	0,86	0,86	0,86	0,83	0,8	0,8
Średni stosunek $q_{teo(11)}/q_{exp}$	0,96	0,95	0,97	0,93	0,97	0,99	1,02
Średni błąd względny dla wzoru (11)	0,15	0,12	0,17	0,14	0,14	0,15	0,15
Średni stosunek q_{EC2}/q_{exp}	1,24	1,36	1,19	1,27	1,27	0,97	0,47
Średni błąd względny obliczeń wg EC2	0,27	0,37	0,28	0,30	0,30	0,21	0,57

Tabela 5. Zestawienie wyników analizy dla elementów o $h/d \geq 1,5$ dla próbek o $R > 1,1$

Przedział R	1,1-2,3	1,1-3	1,1-4,1	1,1-6,1	1,1-9,0	1,1-16,0	wszystkie
Liczba próbek	26	43	118	135	158	207	248
a	0,82	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
b	0,29	0,35	0,44	0,43	0,42	0,46	0,5
Średni stosunek $q_{teo(10)}/q_{exp}$	1,00	1,00	0,96	0,96	0,95	0,97	0,98
Średni błąd względny dla wzoru (10)	0,10	0,11	0,17	0,17	0,16	0,18	0,21
c	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
d	0,50	0,51	0,64	0,55	0,52	0,55	0,62
e	0,90	0,90	0,87	0,89	0,90	0,89	0,86
Średni stosunek $q_{teo(11)}/q_{exp}$	0,95	0,97	0,96	0,94	0,96	0,95	0,96
Średni błąd względny dla wzoru (11)	0,09	0,08	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15
Średni stosunek q_{EC2}/q_{exp}	1,38	1,41	1,29	1,31	1,32	1,23	1,18
Średni błąd względny obliczeń wg EC2	0,39	0,42	0,34	0,36	0,37	0,34	0,28



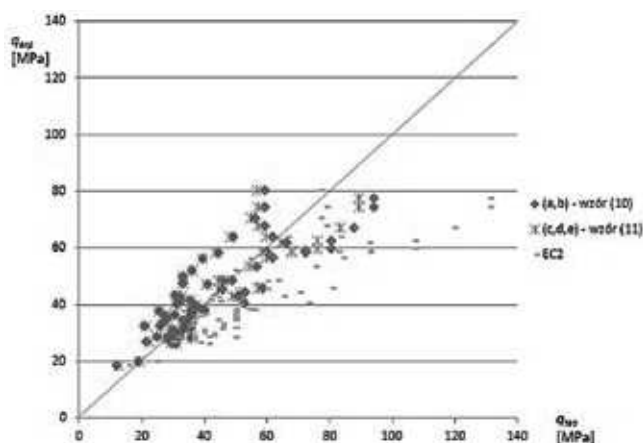
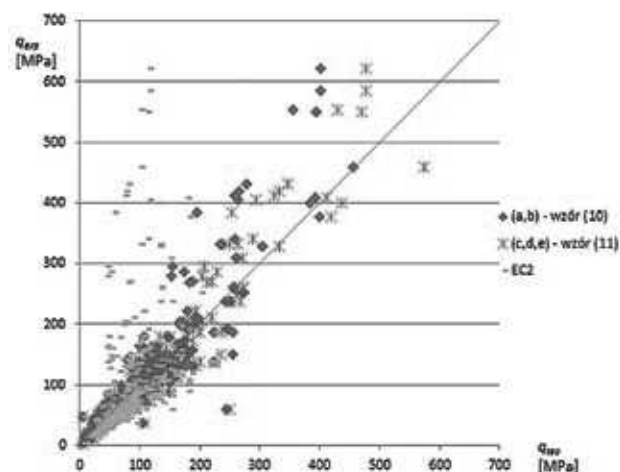
Rys. 2. Wykres wyników analizy dla przedziału R (1,1–3,0) dla próbek o $h/d \geq 1,0$



Rys. 3. Wykres wyników analizy dla wszystkich próbek o $h/d \geq 1,0$

Tabela 6. Zestawienie wyników analizy dla elementów o $h/d \geq 1,5$ dla próbek w kolejnych przedziałach R

Przedział R	1,1-2,3	2,3-3	3,0-4,1	4,1-6,1	6,1-9,0	9,0-16,0	>16,0
Liczba próbek	26	17	75	17	23	49	41
a	0,82	0,8	0,99	0,82	0,98	0,8	0,8
b	0,29	0,39	0,33	0,38	0,31	0,5	0,59
Średni stosunek $q_{teo(10)}/q_{exp}$	1,00	1,03	0,96	0,96	0,93	0,94	1,01
Średni błąd względny dla wzoru (10)	0,10	0,10	0,19	0,11	0,13	0,20	0,14
c	0,99	0,99	0,99	0,95	0,98	0,98	0,80
d	0,50	0,68	0,69	0,69	0,58	0,69	0,69
e	0,90	0,85	0,85	0,82	0,84	0,80	0,86
Średni stosunek $q_{teo(11)}/q_{exp}$	0,95	1,00	0,96	0,99	0,95	0,97	0,99
Średni błąd względny dla wzoru (11)	0,09	0,06	0,17	0,07	0,11	0,15	0,11
Średni stosunek q_{EC2}/q_{exp}	1,38	1,45	1,22	1,46	1,41	0,93	0,97
Średni błąd względny obliczeń wg EC2	0,39	0,44	0,30	0,48	0,43	0,23	0,21


Rys. 4. Wykres wyników analizy dla przedziału R (1,1–3,0) dla próbek o $h/d \geq 1,5$

Rys. 5. Wykres wyników analizy dla wszystkich próbek o $h/d \geq 1,5$

założono, że jeżeli wytrzymałość betonu na ściskanie była badana na elementach o stosunku $h/d = 1,0$, to wartość tej wytrzymałości mnożono przez 0,85, w celu uzyskania przybliżonej wytrzymałości na walcach o $h/d = 2,0$.

Wyniki porównano z wartościami uzyskanymi według zaleceń normy EC2.

5.4. Wyniki obliczeń dla elementów o $h/d \geq 1,0$

Tabela 3 przedstawia wyniki obliczeń dla przedziałów, w których ograniczenie wartości R z jednej strony wynosi 1,1, a z drugiej jest określone kolejnymi wartościami. Z kolei tabela 4 prezentuje rezultaty w kolejnych następujących po sobie przedziałach.

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki analizy dla przedziału

R (1,1–3,0). Porównano na nim wyniki uzyskane za pomocą wzorów (10), (11) i założeń EC2. Rysunek 3 przedstawia wyniki dla wszystkich próbek.

5.5. Wyniki obliczeń dla elementów o $\eta/\delta \geq 1,5$

Tabela 5 przedstawia wyniki obliczeń dla przedziałów, w których ograniczenie wartości R z jednej strony wynosi 1,1, a z drugiej jest określone kolejnymi wartościami. W tabelicy 6 zaprezentowano rezultaty w kolejnych następujących po sobie przedziałach.

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki analizy dla przedziału R (1,1 – 3,0). Porównano na nim wyniki uzyskane za pomocą wzorów (10), (11) i założeń EC2. Rysunek 5 przedstawia wyniki dla wszystkich próbek.

6. Analiza wyników

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że:

- istnieje możliwość określenia dokładniejszych wzorów do obliczania elementów poddanych dociskowi. Dla propozycji wzorów (10) i (11) średni stosunek wartości określonej tymi wzorami i wartości rzeczywistej wytrzymałości mieścił się w granicy 0,93–1,03 w zależności od wielkości przedziału R ;
- wytrzymałości na docisk podawane na podstawie EC2 są zdecydowanie zawyżone zwłaszcza dla $R \leq 3,0$ (patrz: rys. 2 i 4 oraz tab. 3, 4, 5 i 6);
- ze wzrostem wytrzymałości betonu na ściskanie wytrzymałość na docisk betonu dla danego R maleje (patrz: wzór (11));
- uzyskane wzory dla próbek o $h/d \geq 1,5$ wprowadzają mniejsze wartości współczynników b i d , które odpowiadają za wpływ powierzchni rozdziału. Z tego wynika, że wraz ze wzrostem stosunku h/d należy stosować potęgę coraz niższego stopnia;
- w bazie znajduje się niewielka liczba wyników dla elementów z betonu o wytrzymałości powyżej 60 MPa. Świadczy to o małej liczbie badań w zakresie docisku dla betonów wysokiej wytrzymałości. Badania te są szczególnie istotne i konieczne z uwagi na to, że w obecnych czasach betony wysokowartościowe są coraz częściej używane w budownictwie, zwłaszcza w konstrukcjach sprężonych, a najczęściej w konstrukcjach mostowych.

7. Podsumowanie

W artykule wykazano przede wszystkim konieczność poprawienia wzorów normowych dla elementów poddanych dociskowi. Jest to szczególnie istotne dla elementów o $R \leq 3$. Wzory uzyskane na podstawie analizy próbek o $h/d \geq 1,0$ i porównane ze wzorami dla próbek $h/d \geq 1,5$ pokazują, że korzystne jest prowadzenie badań na próbkach o stosunku $h/d \geq 1,5$. Autorzy uważają konieczność prowadzenia dalszych badań na elementach próbnych, a w szczególności na betonach o wytrzymałości na ściskanie powyżej 60 MPa. Jest to szczególnie istotne, z uwagi na fakt, że w obecnych czasach betony wysokowartościowe są coraz częściej używane w budownictwie, zwłaszcza w konstrukcjach sprężonych, a co za tym idzie mostowych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bauschinger J., *Versuche mit Quadern aus Natursteinen*, Laboratorium Mechaniczne i Techniczne, Uniwersytet Monachium, T. 6, s. 13, 1876
- [2] BA 1960 Régles pour le calcul et l'exécution des constructions en béton armé, 1960.
- [3] Komendant A. E., *Prestressed Concrete Structures*, 1st Ed. McGraw-Hill, Nowy Jork, s. 172-173, 1952
- [4] Middendorf K. H., Practical Aspects of End Zone Bearing of Post-

- Tensioning Tendons, *PCI Journal*, T. 8, nr 4, s. 57-62, 1963
- [5] PN-B-03264:2002, *Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie*, PKN, Warszawa, 2002
- [6] PN-EN 1992-1-1:2008, *Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1. Reguły ogólne i reguły dla budynków*, PKN, Warszawa 2008
- [7] Model code 2010, Final draft, Vol. 2. Bulletin 66. FIB, Lausanne 2012
- [8] PN-EN 1992-2:2010, *Eurokod 2, Projektowanie konstrukcji z betonu, Część 2: Mosty z betonu, Obliczenia i reguły konstrukcyjne*, PKN, Warszawa 2010
- [9] Shelton W., Bearing capacity of concrete, *ACI Journal*, T. 29, nr 5, s. 405-414, 1957, Proceedings T. 54, 1958
- [10] Au T., Baird D. L., Bearing Capacity of Concrete Blocks, *ACI Journal, Proceedings*, 56(9), 869-879, 1960
- [11] Zieliński J. L., Rowe R. E., Projektowanie strefy zakotwień elementów kablobetonowych w świetle doświadczeń, *Archiwum Inżynierii Lądowej*, T. IX, z. 1/1963 s. 3-51, 1963
- [12] Ciesielski J., Ziobroń W., Wytrzymałość na docisk w strefie zakotwień konstrukcji kablobetonowych, X Konferencja Krynicka, s. 133-136, Krynica, 1964
- [13] Muguruma H., Okamoto S., Study on bearing capacity of concrete, Proceedings of the Eighth Japan Congress on testing materials – nonmetallic materials, 1965
- [14] Badora T., Putko H., Wytrzymałość na docisk miejscowy betonów wysokich marek na kruszywie „Knurów”, *Inżynieria i budownictwo*, 10/1967, s. 401-406, 1967
- [15] Hawkins N. M., The bearing strength of concrete loaded through rigid plates, *Magazine of Concrete Research*, V.20, nr 63, s. 31-40, 1968
- [16] Hawkins N. M., The bearing strength of concrete loaded through flexible plates, *Magazine of Concrete Research*, V.20, nr 62, s. 95-102, 1968
- [17] Haagsma T., *De bezwijkbelasting van ongewapende betonprisma's onderworpen aan geconcentreerde drukkkrachten* (Nośność elementów niezbrojonych poddanych skoncentrowanym obciążenieniom ścisakającym), Stevin Laboratory, Technische Hogeschool Delft, 1969
- [18] Knauff M., *Obliczanie elementów z betonu ze względu na docisk*, praca doktorska, Politechnika Warszawska, 1969
- [19] Hyland M. W., Chen W. F., Bearing capacity of concrete blocks, *ACI Journal, Proceedings*, 67(3), s. 288-246, 1970
- [20] Niyogi S. K., Bearing strength of concrete – geometric variations, *Proceedings of the ASCE, Journal of Structural Division*, 99(ST7), s. 1471-1490, 1973
- [21] Niyogi S. K., Concrete bearing strength – support, mix, size effect, *Proceedings of the ASCE, Journal of Structural Division*, 100(ST8), s. 1685-1702, 1974
- [22] Wurm P., Daschner F., Versuche uber Teilflaechenbelastung von Normalbeton, *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, H. 286, 1977
- [23] Williams A., *The bearing capacity of concrete loaded over a limited area*, Technical Report 526, Cement and Concrete Association, 1979
- [24] Trinh J., Résistance du béton aux forces concentrées, *Annales No. 439, Série: Béton* 234, 1985
- [25] Roberts C., *Behavior and Design of the Local Anchorage Zone in Post-Tensioned Concrete*, praca magisterska, University of Texas at Austin, 1990
- [26] Cai S.-H., Xue L.-H., Bearing strength of high strength concrete blocks, International Symposium on The Utilization of High Strength High Performance Concrete, pp. 1243-1250, 1996
- [27] Tarig A., Burley E., Rigden ST., Bearing capacity of plain and reinforced concrete loaded over a limited area, *ACI Structural Journal*, 95(3), s. 330-342, 1998
- [28] Bonetti R. A., *Ultimate Strength of the Local Zone in Load Transfer Tests*, praca magisterska, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005