

POLITECHNIKA ŚLĄSKA W GLIWICACH
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA

ROZPRAWA DOKTORSKA

TEMAT ROZPRAWY:
NOSNOŚĆ I ODKSZTAŁCALNOŚĆ SKRĘPOWANYCH ŻELBETEM
ŚCIAN Z ABK ŚCINANYCH MONOTONICZNIE

AUTOR:
mgr inż. TOMASZ GAŚSIOROWSKI

PROMOTOR:
Dr hab. inż. RADOSŁAW JASIŃSKI, prof. PŚ

GLIWICE, 2023

ZAŁĄCZNIK NR 1
WYNIKI BADAŃ MATERIAŁOWYCH I TOWARZYSZĄCYCH

DO ROZPRAWY DOKTORSKIEJ PT:

**NOŚNOŚĆ I ODKSZTAŁCALNOŚĆ SKRĘPOWANYCH ŻELBETEM
ŚCIAN Z ABK ŚCINANYCH MONOTONICZNIE**

Spis treści:

1. Informacje ogólne	3
2. Badania elementów murowych	3
3. Wyniki badań zaprawy.....	5
4. Analiza parametrów betonu	10
4.1. Badania beton nadproży	10
4.2. Badanie betonu elementów krępujących	11

1. Informacje ogólne

W trakcie badań zrealizowano również badania użytych materiałów, z których zostały wykonane modele badawcze. Badania objęły: elementy murowe, zaprawę, beton nadproży oraz beton elementów krępujących.

2. Badania elementów murowych

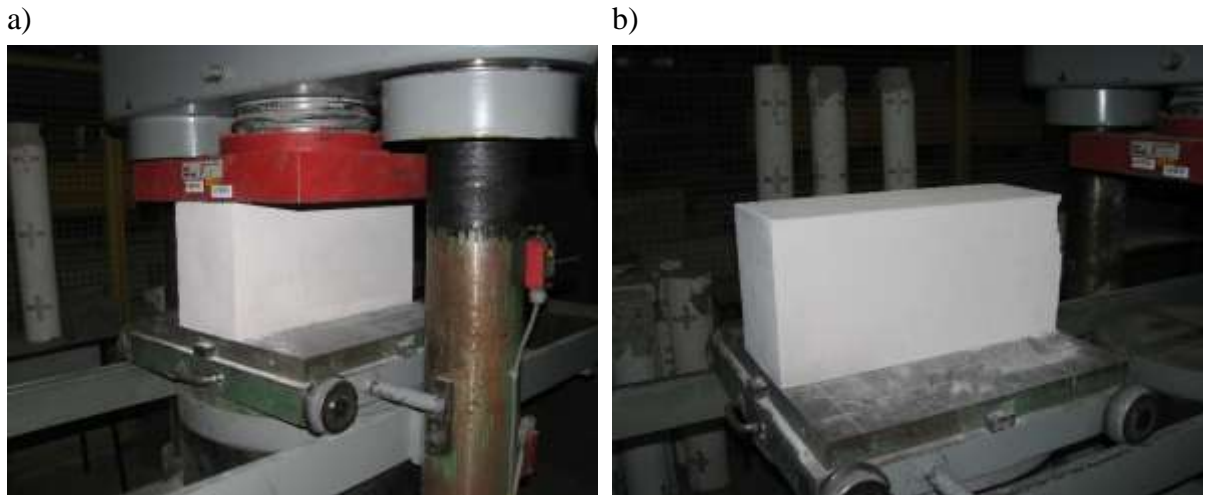
W przypadku każdej z serii dostarczono partię bloczków z której pobrano 6 losowych elementów, które następnie zbadano zgodnie z normą PN-EN 772-1:2011E: *Metody badań elementów murowych. Część 1 Określenie wytrzymałości na ściskanie*.

Wyniki badań elementów murowych przedstawiono w tablicy Z1.1, w której uwzględniono wynik uzyskane z każdej z badanych próbek jak również wytrzymałość średnią i współczynnik zmienności każdej z badanych serii.

Tablica Z1.1. Wyniki badań wytrzymałości elementów ściennych

Partia elementów murowych	Seria ścian skrępowanych	Wytrzymałość na ściskanie, N/mm ²	Współczynnik zmienności, %	Wytrzymałość średnia, N/mm ²
1	HOS-C-AAC (ściany bez otworów)	3,34	9,99	3,66
		3,56		
		3,96		
		3,71		
		4,16		
		3,20		
2	HAS-C1-AAC (ściany z otworem)	3,18	10,06%	3,53
		4,11		
		3,25		
		3,33		
		3,76		
		3,56		
3	HAS-C2-AAC (ściany z otworem)	3,91	7,88%	3,57
		3,21		
		3,62		
		3,77		
		3,25		
		3,64		
			Średnio:	3,59

Na rys. Z1.1. przedstawiono widok przykładowych elementów murowych w chwili badania i po wykonaniu badania.



Rys. Z1.1. Badanie wytrzymałości na ściskanie: a) próbka w maszynie wytrzymałościowej, b) widok elementu po wykonaniu badań

Wytrzymałości elementów murowych zostały przeliczone w celu uzyskania wytrzymałość na ściskanie zgodnie z normą *PN-EN 772-1:2011E: Metody badań elementów murowych. Część 1 Określenie wytrzymałości na ściskanie* i jej załącznikiem A. Następnie uwzględniono ekwiwalentną wytrzymałość ze względu na sezonowania próbek, która była równa wytrzymałości z badań przy współczynniku przeliczeniowym równym $\eta = 1,0$.

Z uwagi na rozmiary i kształt próbek, został określony współczynnika δ . W dalszej kolejności zgodnie z krajowym załącznikiem normy *PN-EN 771-4:2012 Wymagania dotyczące elementów murowych. Część 4: Elementy murowe z autoklawizowanego betonu komórkowego* przeprowadzono klasyfikację zbadanych elementów. Wyniki zestawiono w tablicy Z1.2.

Tablica Z1.2. Uzyskana klasa wytrzymałości i wytrzymałość znormalizowana

Wymiary elementu, mm	Wytrzymałość średnia f_B , N/mm ²	Współczynnik przeliczeniowy ze względu na sezonowanie próbek η	Współczynnik kształtu δ	Znormalizowana wytrzymałość na ściskanie $f_b = \eta\delta f_B$ N/mm ²	Klasa wytrzymałości na ściskanie
180x240x500	3,59	1,0	1,27	4,56	4,6

Wykonane badania pozwoliły zakwalifikować elementy murowe do klasy wytrzymałości 4,5.

3. Wyniki badań zaprawy

Badania zaprawy dotyczyły każdego wykonanego modelu. Z przygotowanej zaprawy wykonano 3 próbki w kształcie beleczek. Badania wykonano na podstawie normy PN-EN 1015-11:2001/A1 *Metody badań zapraw do murów. Część 11: Określenie wytrzymałości na zginanie i ściszenie stwardniałej zaprawy*. Widok próbek badawczych przedstawiono na – rys. Z1.2.



Rys. Z1.2. Próbkki zaprawy po uformowaniu

Zgodnie z normą PN-EN 1015-11:2001/A1 forma została umieszczona na 5 dni w komorze wilgotnościowej w której panowała temperatura $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ oraz wilgotności względnej $95\%\pm 5\%$. Po rozformowaniu próbki przetrzymywano jeszcze 2 dni w komorze w temperaturze $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej $65\%\pm 5\%$. Przygotowane do badań próbki przedstawiono na rys. Z1.3.



Rys. Z1.3. Próbkki „beleczki” przed badaniami

Na podstawie normy PN-EN 1015-11:2001 wykonano próbę zginania – rys. Z1.4a. oraz ściskania wg załącznika A1 do PN-EN 1015-11:2001) – rys. Z1.4b. Wytrzymałości określono na podstawie następujących zależności:

– wytrzymałość na ściskanie: (1)

$$f_{m,i} = \frac{F_c}{1600} \text{ N/mm}^2,$$

w której:

f_c – wartość siły niszczącej wyrażona w niutonach, N.

– wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu:

$$f_{mt,i} = 1,5 \frac{Fl}{bd^2} \text{ N/mm}^2, \quad (2)$$

w której:

F – wartość siły niszczącej wyrażona w niutonach N,

b, d – wymiaru przekroju poprzecznego próbki w mm,

l – osiowy rozstaw podpór $l = 100$ mm.

Zestawienie wyników badań zaprawy przedstawiono w tabelicy Z1.3.

a)



c)



Rys. Z1.4. Badania wytrzymałości na rozciąganie oraz ściskanie badanej zaprawy: a) badanie na zginanie, b) badania na ściskanie

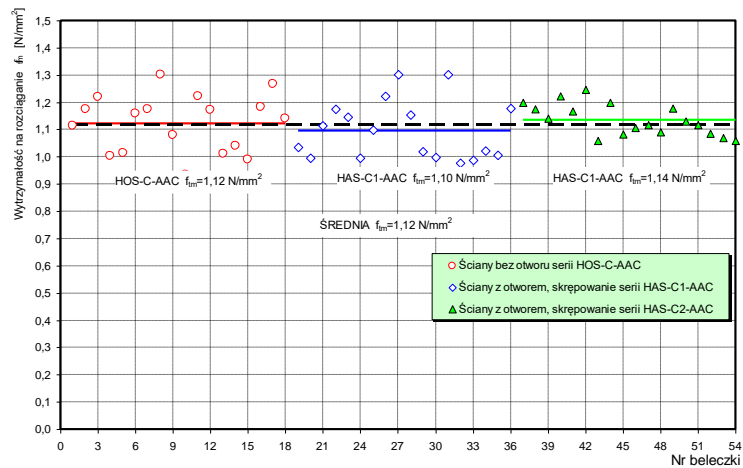
Tablica Z1.3. Wyniki badań próbek prostokątnych – „beleczek” zaprawy

Model	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu				Wytrzymałość na ściskanie				
	Nr próbki	$f_{m,i}$ [N/mm ²]	$f_{m,mv}$ N/mm ²	s N/mm ²	Nr próbki	$f_{m,i}$ N/mm ²		$f_{m,mv}$ N/mm ²	s N/mm ²
						½ „beleczek”	„belecza”		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HOS-C-AAC-010/1	1	1,116	1,17	0,208	1	6,41	6,426	6,28	0,208
	2	1,174			2	6,444			
		3			1,221	3	5,763		
	4				6,325				
	5				6,363	6,375			
	6				6,388				
HOS-C-AAC-010/2	4	1,003	1,06	0,255	7	6,319	6,331	6,04	0,255
	5	1,015			8	6,344			
		6			1,160	9	6,019		
	10				5,888				
	11				5,769	5,847			
	12				5,925				
HOS-C-AAC-075/1	7	1,174	1,19	0,134	13	5,975	5,944	6,09	0,134
	8	1,301			14	5,913			
		9			1,080	15	6,094		
	16				6,144				
	17				6,244	6,206			
	18				6,169				
HOS-C-AAC-075/2	10	0,935	1,11	0,198	19	6,406	6,425	6,21	0,198
	11	1,223			20	6,444			
		12			1,172	21	6,169		
	22				6,175				
	23				6,031	6,034			
	24				6,038				
HOS-C-AAC-10/1	13	1,013	1,01	0,077	25	6,113	6,109	6,02	0,077
	14	1,041			26	6,106			
		15			0,989	27	5,975		
	28				6,013				
	29				5,950	5,963			
	30				5,975				
HOS-C-AAC-10/2	16	1,184	1,20	0,206	31	6,531	6,503	6,28	0,206
	17	1,268			32	6,475			
		18			1,141	33	6,238		
	34				6,244				
	35				6,094	6,097			
	36				6,100				
HAS-CI-AAC-010/1	19	1,034	1,05	0,060	37	5,906	5,878	5,93	0,131
	20	0,996			38	5,850			
		21			1,113	39	6,244		
	40				5,906				
	41				5,825	5,828			
	42				5,831				
HAS-CI-AAC-010/2	22	1,174	1,11	0,096	43	6,113	6,141	6,01	0,157
		23			1,146	44			
	45				6,031	6,059			
	46	6,088							

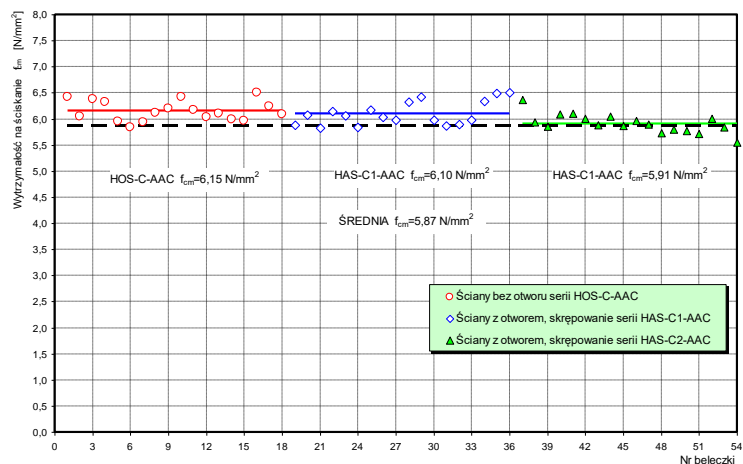
	24	0,996			47	5,806	5,838		
					48	5,869			
HAS-CI-AAC-075/1	25	1,099	1,21	0,102	49	6,169	6,172	6,06	0,100
					50	6,175			
	26	1,223			51	6,031	6,034		
					52	6,038			
	27	1,301			53	5,988	5,978		
		54	5,969						
HAS-CI-AAC-075/2	28	1,153	1,06	0,084	55	6,338	6,331	6,24	0,237
					56	6,325			
	29	1,020			57	6,394	6,425		
					58	6,456			
	30	0,998			59	6,031	5,975		
		60	5,919						
HAS-CI-AAC-10/1	31	1,301	1,09	0,184	61	5,881	5,866	5,91	0,057
					62	5,850			
	32	0,977			63	5,694	5,891		
					64	6,088			
	33	0,987			65	5,919	5,975		
		66	6,031						
HAS-CI-AAC-10/2	34	1,022	1,07	0,096	67	6,238	6,344	6,45	0,092
					68	6,450			
	35	1,005			69	6,338	6,497		
					70	6,656			
	36	1,179			71	6,544	6,509		
		72	6,475						
HAS-C2-AAC-010/1	37	1,200	1,17	0,029	73	6,406	6,363	6,05	0,272
					74	6,319			
	38	1,174			75	5,975	5,941		
					76	5,906			
	39	1,141			77	5,844	5,853		
		78	5,863						
HAS-C2-AAC-010/2	40	1,223	1,21	0,041	79	6,156	6,094	6,07	0,057
					80	6,031			
	41	1,167			81	6,113	6,109		
					82	6,106			
	42	1,247			83	5,975	6,003		
		84	6,031						
HAS-C2-AAC-075/1	43	1,059	1,11	0,074	85	5,906	5,878	5,93	0,099
					86	5,850			
	44	1,198			87	6,113	6,044		
					88	5,975			
	45	1,083			89	5,906	5,866		
		90	5,825						
HAS-C2-AAC-075/2	46	1,106	1,10	0,014	91	6,013	5,966	5,86	0,124
					92	5,919			
	47	1,118			93	5,969	5,897		
					94	5,825			
	48	1,090			95	5,713	5,725		
		96	5,738						
HAS-C2-AAC-10/1	49	1,177	1,14	0,031	97	5,781	5,797	5,76	0,042
					98	5,813			
	50	1,130			99	5,763	5,775		

					100	5,788						
	51	1,118			101	5,713	5,716					
					102	5,719						
HAS-C2-AAC-10/2	52	1,085	1,07	0,013	103	5,988		6,009				
							104		6,031			
	53	1,069			105	5,831	5,834					
								106	5,838			
										5,544	5,80	0,235
	54	1,059			107	5,613						
					108	5,475						
					108	5,475						

Wyznaczona średnia wytrzymałość na zginanie wszystkich przebadanych próbek wynosiła $f_{tm} = 1,12 \text{ N/mm}^2$, przy odchyleniu standardowym oraz współczynniku zmienności wynoszącym $s = 0,056 \text{ N/mm}^2$ i $v = 5,0 \%$ – rys. Z1.5. Średnia dla wytrzymałość na ściskanie wynosiła $f_m = 5,87 \text{ N/mm}^2$, przy odchyleniu standardowym oraz współczynniku zmienności $s = 0,152 \text{ N/mm}^2$ i $v = 2,6 \%$ – rys. Z1.6. Na podstawie wykonanych badań, zastosowaną zaprawę można zakwalifikować do klasy M5.



Rys. Z1.5. Wyników badań zaprawy dla rozciągania przy zginaniu



Rys. Z1.6. Wyniki badań zaprawy dla ściskania

4. Analiza parametrów betonu

Z uwagi na fakt, że wszystkie nadproża zarówno typu N11 i N12 zostały zrealizowane z jednego zarobu Z każdej partii betonu uzyskano 6 próbek kostkowych o wymiarach 150x150x150 mm do wyznaczenia wytrzymałość $f_{c,cube}$ jak również 6 próbek walcowych o wymiarach $\phi 150 \times 300$ mm służących do wyznaczenia moduł sprężystości betonu oraz wytrzymałości f_c .

4.1. Badania beton nadproży

Próbki betonu zbadano po 28 dniach dojrzewania na 6 próbkach kostkowych zgodnie z normą PN-EN 12390-3:2002 „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania”. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie betonu użytego do wykonania nadproży przedstawiono w tablicy Z1.4.

Tablica Z1.4. Wyniki badania wytrzymałości betonu nadproży ($f_{c,cube}$)

Typ nadproża	$f_{c,cube,i}$ N/mm ²	Średnia wytrzymałość na ściskanie $f_{c,cube,m}$ N/mm ²	Odchylenie standardowe N/mm ²	współczynnik zmienności v [%]
N11	26,4	27,1	1,92	7,1%
	25,5			
	30,9			
	26,7			
	26,4			
	26,5			
N12	24,2	24,1	0,78	3,2%
	23,8			
	23,7			
	25,1			
	25,0			
	23,1			

W przypadku modułu sprężystości dla betonu jak również zależność σ - ϵ próbki zbadano po okresie dojrzewania 28 dni na podstawie zaleceń Instrukcji ITB nr 194 „Wytyczne badania cech mechanicznych betonu na próbkach wykonanych w formach”. Przy próbkach określono maksymalną wartość naprężeń $f_{c,i}$ i sieczny moduł sprężystości dla przedziału naprężeń 0,05 N/mm² – 0,33 $f_{c,i}$. W tablicy Z1.5 przedstawiono wyniki badań .

Tablica Z1.5. Wyniki badania siecznego modułu sprężystości betonu nadproży (E_c) dla przedziału naprężeń $0,05 \text{ N/mm}^2 \div 0,33f_{c,i}$ oraz wytrzymałości na ściskanie (f_c)

Typ nadproża	Moduł sprężystości				Wytrzymałość na ściskanie			
	$E_{c,i}$ N/mm ²	$E_{c,m}$ N/mm ²	Odchylenie standardowe N/mm ²	Współczynnik zmienności [%]	$f_{c,i}$ N/mm ²	$f_{c,m}$ N/mm ²	Odchylenie standardowe N/mm ²	Współczynnik zmienności [%]
N11	22142	23684	1211	5,11%	21,8	22,7	2,1	9,04%
	22598				21,4			
	23987				26,9			
	24127				22,3			
	23698				21,6			
	25551				22,5			
N12	22621	23296	1385	5,95%	20,9	19,5	3,2	16,2%
	21487				20,9			
	25361				19,4			
	24154				21,1			
	22457				21,5			
	23697				13,2			

4.2. Badanie betonu elementów krępujących

Podobnie jak w przypadku betonu nadproży, badania betonu elementów krępujących przeprowadzono po okresie dojrzewania betonu na próbkach kostkowych i walcowych. Wybki badań zestawiono w tablicach Z1.6 oraz Z1.7.

Tablica Z1.6. Wyniki badania wytrzymałości betonu elementów krępujących ($f_{c,cube}$)

Seria elementów	Fragment elementów skrupowania	$f_{c,cube,i}$ N/mm ²	Średnia wytrzymałość na ściskanie $f_{c,cube,m}$ N/mm ²	Odchylenie standardowe N/mm ²	współczynnik zmienności [%]
HOS-C-AAC	dolny fragment rdzeni	24,5	25,0	1,15	4,6%
		23,4			
		24,2			
		25,1			
		26,4			
	26,1				
	górnny fragment rdzeni i górnny rygiel	25,2	25,2	0,29	1,2%
		25,1			
		24,9			
		25,1			
24,9					
25,7					
HAS-C1-AAC	dolny fragment rdzeni	25,4	24,8	0,69	2,8%
		24,1			
		24,6			
		25,9			
		24,3			
	24,7				
	górnny fragment rdzeni i górnny rygiel	25,9	25,6	1,09	4,3%
		25,5			
		23,9			
		24,9			
26,1					

		27,1			
HAS-C2-AAC	dolny fragment rdzeni	24,1	24,8	0,69	2,8%
		25,2			
		23,9			
		25,6			
		25,3			
		24,8			
	górnny fragment rdzeni biegnących wzdłuż otworu okiennego	25,3	25,1	0,52	2,1%
		24,8			
		24,3			
		24,9			
		25,8			
	25,3				
	górnny fragment rdzeni i górnny rygiel	23,6	24,6	0,78	3,2%
		24,3			
		25,1			
		25,8			
		24,3			
		24,2			
		25,0	0,79	3,2%	

Tablica Z1.7. Wyniki badania siecznego modułu sprężystości betonu nadproży (E_c) dla przedziału naprężeń $0,05 \text{ N/mm}^2 \div 0,33f_{c,i}$ oraz wytrzymałości na ściskanie (f_c)

Seria elementów	Fragment elementów skrupowania	Moduł sprężystości				Wytrzymałość na ściskanie			
		$E_{c,i}$ N/mm ²	$E_{c,m}$ N/mm ²	Odchylenie standardowe N/mm ²	Współczynnik zmienności [%]	$f_{c,i}$ N/mm ²	$f_{c,m}$ N/mm ²	Odchylenie standardowe N/mm ²	Współczynnik zmienności [%]
HOS-C-AAC	dolny fragment rdzeni	29848	29987	318	1,1%	19,7	20,1	0,94	4,7%
		29454							
		29898							
		30227							
		30277							
		30216							
	górnny fragment rdzeni i górnny rygiel	30127	30022	169	0,6%	20,3	20,3	0,24	1,2%
		29973							
		30144							
		29876							
		29791							
		30224							
HAS-C1-AAC	dolny fragment rdzeni	30178	29939	221	0,7%	20,5	20,0	0,56	2,8%
		29709							
		30066							
		30085							
		29631							
		29965							
	górnny fragment rdzeni i górnny rygiel	30133	30079	275	0,9%	20,9	20,6	0,89	4,3%
		30017							
		29589							
		30081							
		30388							
		30268							
HAS-C2-AAC	dolny fragment rdzeni	29774	29901	304	1,0%	19,4	20,0	0,56	2,8%
		29870							
		29470							
		30401							
		29993							
		29894							
	górnny fragment rdzeni	30057	30020	128	0,4%	20,4	20,2	0,42	2,1%
		29830							
		29924							

górnym fragmencie rdzenia i górnym ryglem	30176	29893	127	0,4%	20,1	19,8	0,63	3,2%			
	30123				20,8						
	30009				20,4						
	29674				19,0						
	29924				19,6						
	29844				20,2						
	29980				20,8						
	29892				19,6						
	30042				19,5						
	29977				225				0,7%		20,1

W celu wykazania ewentualnej różnicy pomiędzy partiami betonu dla elementów krępujących wykonano analizę statystyczną (Volk W.: *Statystyka dla inżynierów*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1973 r.), która polegała na sprawdzeniu istotności różnicy partii betonu. Zakładając równość wariancji badanych serii, na podstawie wzoru (3) obliczono wartość statystyki:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{n_1 s_{01}^2 + n_2 s_{02}^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}, \quad (3)$$

We wzorze tym oznaczono:

\bar{x}_i - wartości średnie w poszczególnych grupach,

n_i - liczebność grup,

s_{01}, s_{02} - odchylenie standardowe wartości średniej w danej grupie

W przypadku wytrzymałości betonu na ściskanie $f_{c,cube}$ i 10 stopni swobody wartości statystyk wynosiły: $t = 0,377$ seria HOS-C-AAC, $t = 1,271$ seria HAS-C1-AAC oraz $t = 0,651$ seria HAS-C2-AAC i nie przekraczały wartości maksymalnej równej $t_{0,05,10} = 2,228$.

Na tej podstawie stwierdzono, że nie ma podstawy do odrzucenia hipotezy, która mówi o równości średnich wytrzymałości na ściskanie betonu.

W analogiczny sposób analizowano uzyskane wartości modułów sprężystości E . Wyliczone parametry statystyk wynosiły odpowiednio $t = 0,222$ seria HOS-C-AAC, $t = 0,890$ seria HAS-C1-AAC oraz $t = 0,809$ serii HAS-C2-AAC i były mniejsze od uzyskanej wartości maksymalnej $t_{0,05,6} = 2,228$.

Na tej podstawie stwierdzono, że nie ma podstawy do odrzucenia hipotezy, która mówi o równości średnich modułów sprężystości betonu.