

Przemysław Pudlik
Cement Ożarów S.A.

Maciej Nowak
Cement Ożarów S.A.

Zastosowanie cementu portlandzkiego i cementów z nieklinkierowymi składnikami głównymi w mostowych betonach sprężanych.

Streszczenie

Wpisując się w ideę zrównoważonego rozwoju i redukcji emisji gazów cieplarnianych zasadnym jest stosowanie cementów z dodatkami nieklinkierowymi w obiektach inwestycji drogowo-mostowych. Wzrost inwestycji infrastrukturalnych w Polsce wpływa bezpośrednio na zwiększone zapotrzebowanie na betony mostowe, które charakteryzują się wysokimi zużyciem cementu, a stosowanie cementów z dodatkami realnie wpływa na ograniczenie emisji CO₂.

Proces sprężania w inżynierii lądowej rozumiany jest jako wprowadzenie do elementu wstępnego układu sił wewnętrznych, który przeciwdziała niebezpiecznemu układowi sił od obciążeń zewnętrznych powodujący odkształcenia i rysy. Prościej rzecz ujmując, dzięki wyeliminowaniu naprężeń rozciągających w żelbetowym przekroju, jesteśmy w stanie osiągnąć wyższą nośność bez zmiany geometrii elementu. Warunkiem koniecznym przeprowadzenia procesu sprężenia jest osiągnięcie odpowiednio wysokiej wartości wytrzymałości na ściskanie konstrukcji betonowej. Z m.in. tego też powodu jedynym zalecanym do tego typu zastosowań cementem był cement portlandzki, który charakteryzuje się bardzo dynamicznym przyrostem wytrzymałości na ściskanie w czasie. Rozwój w ostatniej dekadzie technologii produkcji cementu, a także chemii budowlanej umożliwił w tego typu zastosowaniach wykorzystanie cementów z nieklinkierowymi składnikami głównymi. Zastosowanie tych cementów pozwala nie tylko na produkcję betonów o tożsamy lub lepszych parametrach, jak w przypadku cementów z grupy CEM I, ale pozwala na znaczne zmniejszenie śladu węglowego konstrukcji betonowej.

Zagadnieniem referatu jest analiza możliwości zastąpienia cementu portlandzkiego, cementami zawierającymi nieklinkierowe składniki główne w mostowych betonach sprężanych. W badaniu poddano analizie parametry mieszanek betonowych, a także wyniki wytrzymałościowe oraz trwałościowe betonów, porównując je z dotychczas stosowanymi rozwiązaniami na cementach z grupy CEM I. Projekt ponadto zawiera badania modułu sprężystości, ocenę rozkładu porów w mieszance betonowej (AVA, SAM) oraz charakterystyki napowietrzenia w stwardniałym betonie wg. PN-EN 480-11.

Eksperyment zawiera ocenę wpływu rodzaju cementu i występującego w nim nieklinkierowego składnika głównego (wapień, mielony granulowany żużel

wielkopiecowy) na osiągnięte parametry reologiczne mieszanki betonowej oraz parametry wytrzymałościowe, trwałościowe betonu.

Abstract

In line with the idea of sustainable development and reduction of greenhouse gas emissions, it is reasonable to use cements with non-clinker additives in the objects of road and bridge investments. The increase in infrastructure investments in Poland has a direct impact on the increased demand for bridge concretes, which are characterized by high cement consumption, and the use of cement with additives has a real impact on the reduction of CO₂ emissions.

In civil engineering, the process of compression is understood as the introduction of an initial internal force system to an element that counteracts a dangerous force system from external loads, causing deformation and cracks. Simply put, by eliminating tensile stress in the reinforced concrete section, we can achieve higher load-bearing capacity without changing the element's geometry. A necessary condition for the compression process is to achieve a sufficiently high value of compressive strength of the concrete structure. For this reason, among others, the only cement recommended for this type of application was Portland cement, which is characterized by a very dynamic increase in compressive strength over time. The development of cement production technology and construction chemistry over the last decade has enabled the use of cements with non-clinker main components in such applications. Using these cements allows not only for the production of concrete with identical or better parameters than those of CEM I group cements, but also for a significant reduction in the carbon footprint of the concrete structure.

The topic of the paper is an analysis of the possibility of replacing Portland cement with cements containing non-clinker main components in prestressed concrete bridges. The study analyzed the parameters of concrete mixtures, as well as the strength and durability results of concrete, comparing them with the previously used solutions on CEM I group cements. The project also includes studies of the elasticity module, evaluation of the distribution of pores in the concrete mixture (AVA, SAM), and the characteristics of aeration in hardened concrete according to PN-EN 480-11.

The experiment assesses the impact of the type of cement and the non-clinker main component (limestone, ground granulated blast furnace slag) on the rheological parameters of the concrete mixture and the strength and durability parameters of the concrete.

Wstęp

Zgodnie Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 1 sierpnia 2019 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie, czytamy w § 164., że „Do wykonania betonu sprężonego w elementach obiektu inżynierskiego stosuje się CEM I”. Zapis uniemożliwiał stosowanie cementów z innych grup niż cement portlandzki, co nie wpisuje się politykę zielonego ładu Unii Europejskiej. 24 czerwca 2022 r. zostało wydane nowe Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie przepisów techniczno-budowlanych dotyczących dróg publicznych, w § 3. jest napisane „Jeżeli w przepisach rozporządzenia nie określono warunku lub określono go w sposób ogólny, drogę projektuje się, buduje, przebudowuje lub użytkuje zgodnie z zasadami wiedzy technicznej zawartej w szczególności:

- 1) we wzorcach i standardach rekomendowanych przez ministra właściwego do spraw transportu na podstawie przepisów o drogach publicznych;
- 2) w Polskich Normach.”.

Oraz § 105. „Drogowy obiekt inżynierski projektuje się w taki sposób, aby w przewidywanym okresie użytkowania była zapewniona trwałość elementów jego konstrukcji.”

Następstwem zmian w Rozporządzeniu były rozpoczęcie prac, konsultacji środowisk budowlanych nad aktualizacją dokumentów Wzorcowych Warunków Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych M-13.01.00 v04 Beton Konstrukcyjny w Drogowych Obiektach Inżynierskich, w których widniał zapis „Do wykonania betonu sprężonego w elementach drogowego obiektu inżynierskiego stosuje się CEM I”. Konsekwencją prac było wydanie aktualizacji dokumentu M-13.01.00 v05 dnia 02.01.2025, w którym zapis został zamieniony na „Do wykonania betonu sprężonego w elementach drogowego obiektu inżynierskiego stosuje się cement CEM I lub CEM II/A. Za zgodą Inżyniera/ Inspektora Nadzoru możliwe jest również zastosowanie cementu CEM II/B lub CEM III pod warunkiem udokumentowania przez Wykonawcę wcześniejszych, krajowych pozytywnych zastosowań. Cementy należy stosować zgodnie z zakresem dopuszczenia wg. tab. F2 normy PN-B-06265, uwzględniającym klasy ekspozycji zawarte w wymaganiach Zamawiającego.”.

Tempo prac związanych z wykonaniem elementów sprężanych jest zależne od czasu, w którym dokonamy sprężenia betonu, tak więc zasadnym jest wymaganie w tego typu betonach stosowania cementów o wysokiej klasie wytrzymałości i wysokiej dynamice narastania wytrzymałości wczesnej. Aktualny stan wiedzy oraz praktyka inżynierska pokazują, że możliwe jest stosowanie z powodzeniem cementów z dodatkami mineralnymi, a takie rozwiązanie nie dość, że nie będzie odbiegać od wymaganych standardów, to będzie je przewyższać w innych aspektach, które do tej pory często nie były rozpatrywane podczas specyfikowania wymagań odnośnie składu i właściwości betonów sprężanych.

Na rozwój wytrzymałości wczesnych betonów, wpływ ma szereg różnych czynników, a do kluczowych z nich należą, rodzaj i klasa cementu, stosunek wodno-cementowy, rodzaj stosowanych domieszek chemicznych, temperatura i warunki dojrzewania betonu. Ponadto wykorzystanie cementów powszechnego użytku oraz cementów

specjalnych, w których składzie znajdują się inne niż klinkier portlandzki składniki główne, powoduje w różnym stopniu obniżenie ciepła hydratacji i zmianę dynamiki narastania wytrzymałości betonu. Wszystko to prowadzi do ograniczenia mikrospektań struktury wynikających z procesów termicznych betonu wpływających na wieloletnią trwałość konstrukcji. Opisane zjawisko nabiera znaczenia w przypadku betonów masywnych oraz prac prowadzonych w okresach wiosenno-letnich przy panujących względnie wysokich temperaturach otoczenia.

Tabela 1. Parametry cementów

	CEM I 42,5	CEM I 52,5	CEM I 42,5 NA	CEM I 52,5 NA	CEM II/A-S 52,5	CEM II/A-V 42,5	CEM II/A-S 42,5	CEM II/B-V 42,5	CEM II/B-S 42,5	CEM III/A 42,5N- LH/HSR/NA
Wytrzymałość 2 dniowa [MPa]	27,10	38,60	24,20	33,20	29,70	25,10	22,80	25,40	20,10	14,10
Wytrzymałość 28 dniowa [MPa]	55,90	67,10	56,40	64,00	63,90	54,40	55,90	55,50	54,90	53,50

Tabela 1. przedstawia uśrednione parametry właściwości mechanicznych cementów dostępnych na Polski rynku. Analizując cementy należących do danych klas wytrzymałości, w przypadku tych z grupy portlandzkich wieloskładnikowych jednoznacznie można stwierdzić, że różnice względem portlandzkich są nieznaczne. Jedynie swoimi parametrami odbiegają cementy hutnicze, szczególnie jeśli chodzi o dynamikę narastania wytrzymałości w pierwszych dobach dojrzewania betonu.

Rozszerzenie możliwości stosowania o cementy z dodatkami mineralnymi wpisuje się w długofalową strategię Unii Europejskiej dotyczącej głębokiej przebudowy gospodarki państw członkowskich, celem osiągnięcia pełnej neutralności klimatycznej do 2050 r., poprzez działania na rzecz zrównoważonego rozwoju (ograniczenie zużycia nieodnawialnych surowców naturalnych), gospodarki w obiegu zamkniętym (rozwój przemysłu bezodpadowego) oraz przede wszystkim ochrony środowiska (ograniczenie emisji CO₂).

Plan badań

W ramach programu badawczego zbadano parametry mieszanek betonowych i wartości wytrzymałościowe, trwałościowe betonów wykonanych na cementach CEM II/A-LL 42,5 R, CEM II/B-S 42,5 R-NA, CEM II/A-S 52,5 R oraz porównano je z wynikami badań na cementie referencyjnym CEM I 42,5 R. Klasa projektowana betonu to C50/60. Badania zostały przeprowadzone w identycznych warunkach w laboratorium działu Doradztwa Technicznego, a producentem cementów wykorzystanym w projekcie był Cement Ożarów S.A..

W tabeli 2 przedstawiono parametry mechaniczne i fizyczne cementów wykorzystanych w projekcie.

Tabela 2 Parametry mechaniczne i fizyczne cementów

Parametry Fizyczne Cementu	CEM I 42,5 R	CEM II/A-LL 42,5 R	CEM II/B-S 42,5 R-NA	CEM II/A-S 52,5R
Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach [MPa]	24,3	24,2	23,5	32,2
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]	55,2	58,0	58,1	63,6
Początek czasu wiązania [min]	245	160	265	225
Koniec czasu wiązania [min]	280	210	305	255
Właściwa ilość wody [%]	26,3	28,4	30,5	30,0
Powierzchnia właściwa [cm ² /g]	3705	5352	4505	4688

W tabeli 3 przedstawiono skład receptury. Zawartość domieszek chemicznych zostały tak dobrane, aby parametry mieszanki betonowej (zawartość powietrza) znacząco nie odbiegały między sobą.

Tabela 3 Skład recepturowy

Składnik	Ilość [kg/m ³]
Cement	430
Piasek 0/2	630
Grys wapienny 2/8	479
Grys wapienny 8/16	665
Woda	145
Superplastifikator	3,44
Plastyfikator	1,29
Napowietrzacz	1,2-1,33

Wyniki badań

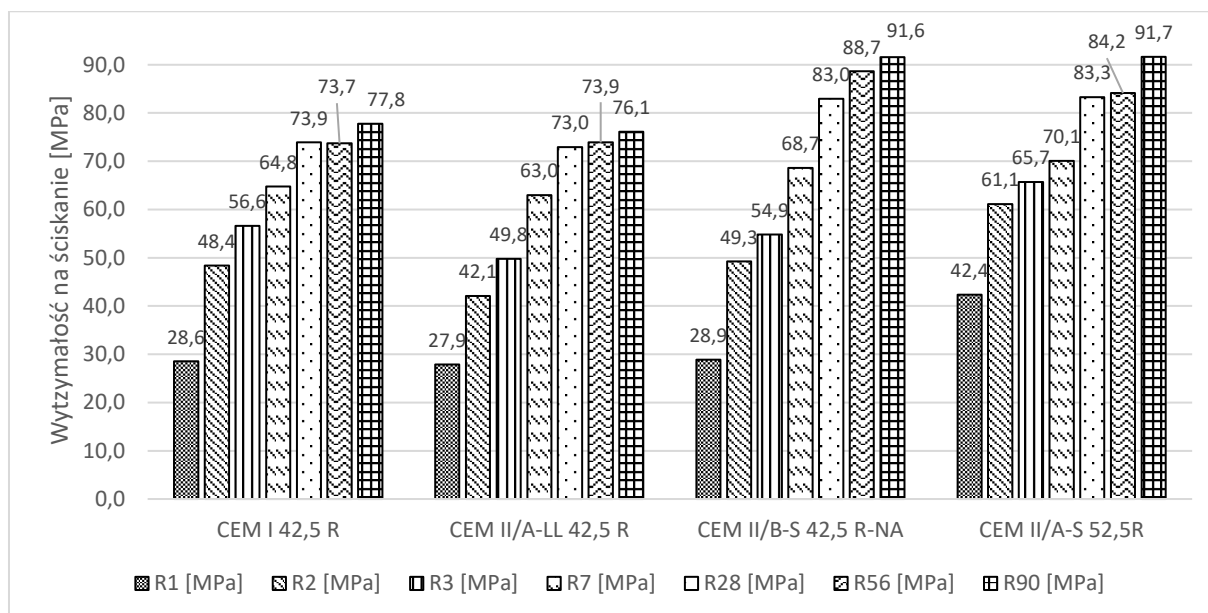
Badanie konsystencji mieszanki betonowej wykonano zgodnie z [5], natomiast zawartość powietrza na podstawie [4]. Parametry przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4 Parametry mieszanki betonowej

Rodzaj cementu	Konsystencja – opad stożka [mm]	Zawartość powietrza [%]
CEM I 42,5 R - referencja	190	5,7
CEM II/A-S 52,5 R	200	6,3
CEM II/A-LL 42,5 R	210	5,7
CEM II/B-S 42,5 R-NA	190	5,3

Konsystencja wszystkich mieszanek była na bardzo podobnym poziomie. Nieznacznie wyższą konsystencją w stosunku do mieszanki wykonanej na cemencie referencyjnym odznaczyły się cementy CEM II/A-LL 42,5 R oraz CEM II/A-S 52,5 R. Zawartość powietrza w badanych mieszankach przewyższała minimalną wartość podaną w normie [1] wynoszącą minimum 4,5% dla podanego układu kruszywowego. W przypadku mieszanki z wykorzystaniem cementu CEM II/A-LL 42,5 R nie zauważono problemów z nadmiernym napowietrzaniem mieszanki spowodowaniem użycia wapienia, który to problem poruszany jest często w ogólnodostępnych badaniach.

Dla każdego rozwiązania cementowego wykonano badanie wytrzymałości na ściskanie według [7]. Badanie przeprowadzono po 1, 2, 3, 7, 28, 56 i 90 dniach dojrzewania [8]. Wyniki zobrazowano na rysunku 1.



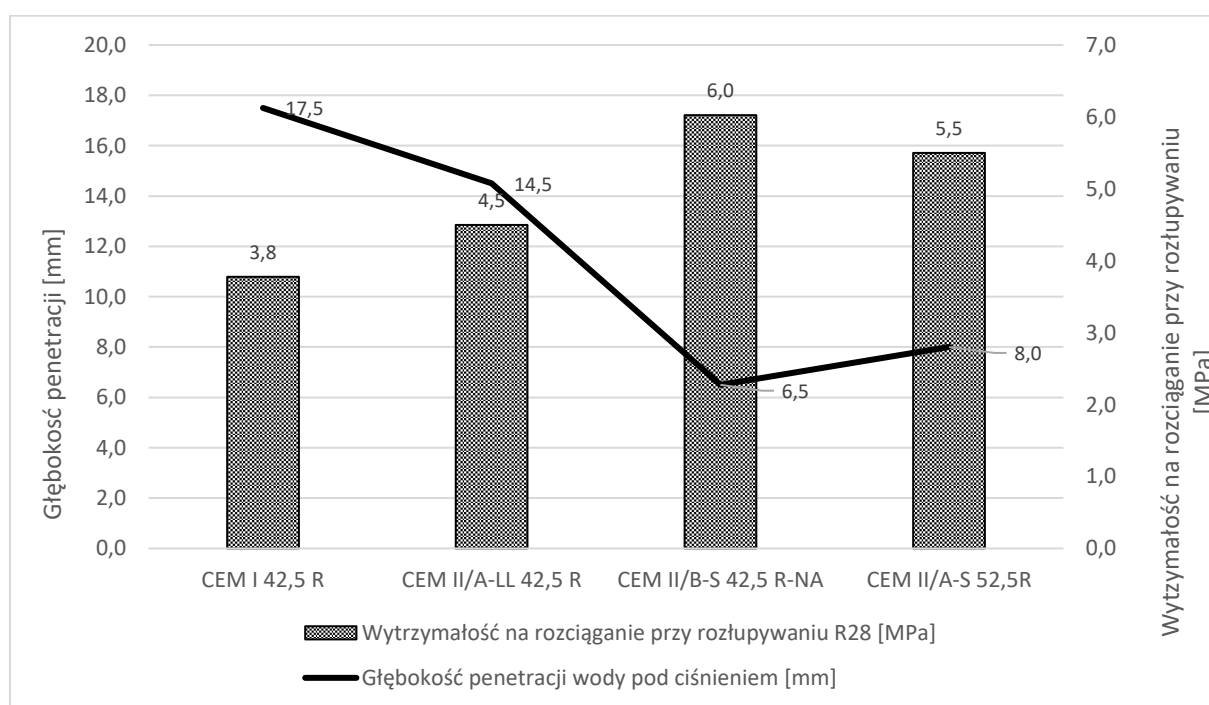
Rysunek 1 Wytrzymałość na ściskanie.

Wytrzymałości 1-dniowe dla betonów wykonanych na cementach klas 42,5 były na bardzo zbliżonym poziomie. Odminną sytuację można zauważyć w przypadku próbek 2-dniowych, gdzie próbki wykonane na CEM II/A-LL 42,5 R odznaczyły się najniższą wytrzymałością w tej klasie cementów (różnica w stosunku do referencji to 6,3 MPa). Próbką 2-dniową dla CEM II/B-S 42,5 R-NA posiadała kolejny raz bardzo zbliżoną wytrzymałość w stosunku do referencji. Zgnioty wykonane po trzech dniach dojrzewania wykazały najwyższą wytrzymałość na CEM I 42,5 R, nieznacznie gorszy wynik posiadały próbki z wykorzystaniem CEM II/B-S 42,5 R-NA, natomiast próbki wykonane na CEM II/A-LL 42,5 R wykazały najniższą wytrzymałość (różnica w stosunku do referencji to 6,8 MPa). W przypadku próbek 7-dniowych i cementów klas 42,5 prym wiedzie CEM II/B-S 42,5 R-NA i wytrzymałością wynoszącą 68,7 MPa, nieznacznie gorszy wynik w stosunku do referencji posiadały próbki z wykorzystaniem CEM II/A-LL 42,5 R. Wyniki 28-dniowe pokazały bezkonkurencyjność cementu CEM II/B-S 42,5 R-NA w klasie cementów 42,5. Próbkę wykonaną na CEM I 42,5 R posiadały 9,1 MPa niższą wytrzymałość w stosunku do cementu portlandzkiego żużlowego.

Próbki wykonane na CEM II/A-LL 42,5 R posiadały nieznacznie niższą wytrzymałość w stosunku do betonu referencyjnego. Wytrzymałości długoterminowe 56 i 90-dniowe pokazują atuty cementów z nieklinkierowymi składnikami głównymi o charakterze hydraulicznym lub pucolanowym. Wzrost wytrzymałości próbek wykonanych na cemencie CEM II/B-S 42,5 R-NA w stosunku do referencji to 15 MPa po 56-dniach oraz 13,8 MPa po 90-dniach dojrzewania. Długoterminowe próbki betonowe na cemencie CEM II/A-LL 42,5 R wykazały bardzo zbliżone wytrzymałości w stosunku do betonu referencyjnego.

Wytrzymałości próbek wykonanych na cemencie CEM II/A-S 52,5 R w stopniu znacznym przewyższyły wytrzymałości uzyskane na pozostałych cementach, szczególnie jeśli chodzi o wytrzymałości początkowe 1,2 i 3 dniowe. Różnica względem betonu referencyjnego to 13,8 MPa po 1 dniu, 12,7 MPa po 2-dniach oraz 9,1 MPa po 3-dniach dojrzewania betonu.

Dla każdego rozwiązania cementowego wykonano badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu według [10] oraz głębokość penetracji wody pod ciśnieniem według [11]. Wyniki zobrazowano na rysunku 2.



Rysunek 2 Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz głębokość penetracji wody pod ciśnieniem

Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu pokazują znaczną przewagę wszystkich testowanych cementów w porównaniu do referencji. Wzrost w porównaniu do CEM I 42,5 R dla CEM II/B-S 42,5 R-NA to ponad 57%, dla CEM II/A-S 52,5 R to ponad 44% natomiast dla CEM II/A-LL 42,5 R to ponad 18%.

Niższą głębokość penetracji wody pod ciśnieniem osiągnięto dla cementów, w których składzie znajdują się nie klinkierowe składniki główne.

Dla każdego rozwiązania cementowego wykonano badanie modułów siecznych sprężystości przy ściskaniu betonów według [9]. Badania zostało wykonane po 3, 7 i 28 dniach dojrzewania próbek. Parametry przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5 Moduły sieczne sprężystości przy ściskaniu betonu

Badanie modułu sprężystości	CEM I 42,5 R	CEM II/A-LL 42,5 R	CEM II/B-S 42,5 R-NA	CEM II/A-S 52,5R
Moduł Sprężystości 3 dni				
Początkowy sieczny moduł sprężystości przy ściskaniu $E_{c,0}$ [GPa]	38,2	37,3	40,9	44,8
Stabilizowany sieczny moduł sprężystości przy ściskaniu $E_{c,s}$ [GPa]	43,1	44,1	46,0	50,6
Wytrzymałość betonu na ściskanie oznaczona po badaniu siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu [MPa]	37,1	53,3	43,3	51,1
Wytrzymałość próbki towarzyszącej [MPa]	39,1	55,6	43,5	53,0
Moduł Sprężystości 7 dni				
Początkowy sieczny moduł sprężystości przy ściskaniu $E_{c,0}$ [GPa]	43,7	44,5	45,6	47,5
Stabilizowany sieczny moduł sprężystości przy ściskaniu $E_{c,s}$ [GPa]	45,1	47,9	50,0	51,7
Wytrzymałość betonu na ściskanie oznaczona po badaniu siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu [MPa]	43,2	59,3	52,2	54,0
Wytrzymałość próbki towarzyszącej [MPa]	46,0	58,0	53,1	59,0
Moduł Sprężystości 28 dni				
Początkowy sieczny moduł sprężystości przy ściskaniu $E_{c,0}$ [GPa]	45,0	47,8	48,0	48,7
	47,2	50,4	51,8	53,1

Stabilizowany sieczny moduł sprężystości przy ściskaniu $E_{c,s}$ [GPa]				
Wytrzymałość betonu na ściskanie oznaczona po badaniu siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu [MPa]	51,8	65,9	63,1	65,5
Wytrzymałość próbki towarzyszącej [MPa]	56,4	64,6	62,4	69,9
Powietrze przy module sprężystości [%]	6,2	5,8	6,2	5,4

Zgodnie z tablicą 3.1 zawartą w normie PN-EN 1992-1-1 przyjmowana przez projektantów wartość modułu sprężystości dla klasy betonu C50/60 wykonanego na kruszywie kwarcytowym wynosi 37 GPa. Dla kruszyw wapiennych wartość modułu jest niższa względem kwarcytowych o 10%. Powyższe kryterium 37 GPa dla betonu klasy C50/60 zostało osiągnięte w przedstawionych badaniach już po 3 dniach dojrzewania chociaż receptura opierała się na kruszywie wapiennym.

Wyniki zawartości powietrza w mieszance betonowej i parametry pozwalające ocenić strukturę napowietrzenia w zależności od metody, przedstawiono w tabeli 6

Tabela 6 Struktura napowietrzenia - metody badań

Parametry napowietrzenia		CEM I 42,5 R	CEM II/A-LL 42,5 R	CEM II/B-S 42,5 R-NA	CEM II/A-S 52,5R
Porozymetr	Zawartość Powietrza [%]	5,7%	5,7%	5,3%	6,3%
Super Air Meter	Liczba SAM	0,52	0,41	0,56	0,54
Air Void Analyzer	Całkowita zawartość powietrza [%]	3,8%	4,3%	4,5%	3,9%
	Rozmieszczenie porów L [mm]	0,231	0,243	0,217	0,205
	Zawartość powietrza A300 [%]	2,0%	2,1%	2,5%	2,3%
PN-EN 480-11	Całkowita zawartość powietrza [%]	4,9%	6,0%	4,6%	4,9%
	Rozmieszczenie porów L [mm]	0,140	0,145	0,155	0,130
	Zawartość powietrza A300 [%]	2,3%	2,2%	2,5%	2,4%

Wynik liczny SAM oraz wskaźnik rozmieszczenia porów ze zglądów w naszych badaniach nie potwierdziły zależności uzyskanych w badaniach [12] i [13].

Porównując strukturę rozmieszczenia pomiędzy badaniem AVA, a oznaczeniem charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie zauważalna jest różnica w parametrach. Badanie przeprowadzone metodą AVA pokazuje niższe wartości powietrza całkowitego, natomiast zbliżone wartości powietrza poniżej 300µm i wyższy wskaźnika rozmieszczenia porów L w porównaniu do metody według PN-EN 480-11.

Dla każdego rozwiązania cementowego wykonano badanie odporności betonu na działanie mrozu według [1]. Wyniki przedstawiono w tabeli 7.

Tabela 7 Mrozoodporność zwykła F200

Badanie mrozoodporności	CEM I 42,5 R	CEM II/A-LL 42,5 R	CEM II/B-S 42,5 R-NA	CEM II/A-S 52,5R
Ocena wizualna próbki po zamrażaniu-odmrażaniu	nie wykazuje pęknięć	nie wykazuje pęknięć	nie wykazuje pęknięć	nie wykazuje pęknięć
Średni spadek wytrzymałości [%]	2,17%	-2,59%	2,78%	-2,57%
Średni ubytek masy [%]	0,06%	0,06%	0,03%	0,03%
Średnia wytrzymałość na ściskanie próbek mrożonych [MPa]	79,47	76,23	90,88	90,90
Średnia wytrzymałość na ściskanie próbek porównawczych [MPa]	81,23	74,30	93,48	88,63
Masa próbek przed mrożeniem średnia [kg]	2,396	2,381	2,392	2,391
Masa próbek po mrożeniu średnia [kg]	2,395	2,379	2,391	2,390

Zgodnie z wytycznymi normy [1] stopień mrozoodporności betonu określony jest prawidłowo, jeżeli nie wykazuje pęknięć, łączny ubytek masy betonu nie przekracza 5% oraz spadek wytrzymałości na ściskanie, w stosunku do próbek porównawczych nie przekracza 20%.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

Wytrzymałość na ściskanie

- 1-dniowa wytrzymałość na ściskanie betonów, w których wykorzystano cementy z nieklinkierowymi składnikami głównymi posiadały wyższą lub bardzo zbliżoną wartość w porównaniu do betonu z użyciem CEM I 42,5 R.

Wyniki 2 i 3-dniowe dla betonów z cementem CEM II/A-LL 42,5 R były niższe od betonów z cementem CEM I 42,5 R odpowiednio o 13,1% i 12,1%

Wyniki 2 i 3-dniowe dla betonów z cementem CEM II/B-S 42,5 R-NA były na bardzo zbliżonym poziomie względem betonu referencyjnego.

Wyniki 2 i 3-dniowe dla betonów z cementem CEM II/A-S 52,5 R znacznie przewyższały betony z cementem referencyjnym odpowiednio o 26,2% i 16,1%.

Wyniki 7-dniowe dla betonów z cementem CEM II/A-LL 42,5 R były na bardzo zbliżonym poziomie względem betonu referencyjnego.

Wyniki 7-dniowe dla betonów z cementem CEM II/B-S 42,5 R-NA były wyższe od betonu z cementem referencyjnym o 6,0%

Wyniki 7-dniowe dla betonów z cementem CEM II/A-S 52,5 R były wyższe od betonu z cementem referencyjnym o 8,2%

Wyniki 28-dniowe dla betonów z cementem CEM II/A-LL 42,5 R były na bardzo zbliżonym poziomie względem betonu referencyjnego.

Wyniki 28-dniowe dla betonów z cementem CEM II/B-S 42,5 R-NA były wyższe od betonu z cementem referencyjnym o 12,3%

Wyniki 28-dniowe dla betonów z cementem CEM II/A-S 52,5 R były wyższe od betonu z cementem referencyjnym o 12,7%

Wyniki 56 i 90-dniowe dla betonów z cementem CEM II/A-LL 42,5 R były na bardzo zbliżonym poziomie względem betonu referencyjnego.

Wyniki 56 i 90-dniowe dla betonów z cementem CEM II/B-S 42,5 R-NA znacznie przewyższały betony z cementem referencyjnym odpowiednio o 20,3% i 17,7%.

Wyniki 56 i 90-dniowe dla betonów z cementem CEM II/A-S 52,5 R znacznie przewyższały betony z cementem referencyjnym odpowiednio o 14,2% i 17,8%.

Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu

- Badanie pokazało wyższość betonów z zastosowaniem cementów z nieklinkierowymi składnikami głównymi. Wynik dla cementu CEM II/A-LL 42,5 o 18,4%, CEM II/B-S 42,5 R-NA o 57,9% i CEM II/A-S 52,5 R o 44,7% wyżej względem betonu referencyjnego.

Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem

- Wyniki pokazują niższe wartości dla CEM II/A-LL 42,5 R o 17,1%, CEM II/B-S 42,5 R-NA o 62,9%, CEM II/A-S 52,5 R o 54,3% względem betonu referencyjnego.

Sieczne moduły sprężystości przy ściskaniu betonów

- W przypadku badań wykonanych po 3 dniach dojrzewania, najwyższe wartości modułów zostały osiągnięte dla cementu CEM II/A-S 52,5 R. Różnica względem betonu na CEM I 42,5 R wynosi 17,3% dla początkowego oraz 17,4% dla stabilizowanego siecznego modułu sprężystości. Natomiast dla betonu na cemencie CEM II/B-S 42,5 R-NA różnica ta wynosiła już tylko 7,1% dla początkowego oraz 6,7% dla stabilizowanego siecznego modułu sprężystości. Beton wykonany na CEM II/A-LL 42,5 R wykazał bardzo zbliżone wartości modułów do wykonanego na cemencie CEM I 42,5 R.

W przypadku badań wykonanych po 7 dniach dojrzewania, najwyższe wartości modułów zostały osiągnięte dla cementu CEM II/A-S 52,5 R. Różnica względem betonu na CEM I 42,5 R wynosi 8,7% dla początkowego oraz 14,6% dla stabilizowanego siecznego modułu sprężystości. Natomiast dla betonu na cemencie CEM II/B-S 42,5 R-NA różnica ta wynosiła 4,3% dla początkowego oraz 10,9% dla stabilizowanego siecznego modułu sprężystości. Różnica dla beton wykonanego na CEM II/A-LL 42,5 R wynosiła 0,8 % dla początkowego oraz 6,2% dla stabilizowanego siecznego modułu sprężystości.

W przypadku badań wykonanych po 28 dniach dojrzewania, najwyższe wartości modułów zostały osiągnięte dla cementu CEM II/A-S 52,5 R. Różnica względem betonu na CEM I 42,5 R wynosi 8,2% dla początkowego oraz 12,5% dla stabilizowanego siecznego modułu sprężystości. Natomiast dla betonu na cemencie CEM II/B-S 42,5 R-NA różnica ta wynosiła 6,7% dla początkowego oraz 9,7% dla stabilizowanego siecznego modułu sprężystości. Różnica dla beton wykonanego na CEM II/A-LL 42,5 R wynosiła 6,2 % dla początkowego oraz 6,8% dla stabilizowanego siecznego modułu sprężystości.

Struktura napowietrzenia

- uzyskane parametry liczby SAM oraz rozmieszczenia porów z badania zglądów, nie potwierdziły zależności przedstawionej w [12] i [13],
- lepszym rozkładem porów charakteryzowały się próbki w badaniu przeprowadzonym na stwardniałym betonie,
- zawartość mikroporów poniżej 300 μm w badaniu AVA oraz wg. PN-EN 480-11 w badanych betonach była na zbliżonym poziomie,
- wskaźnik rozmieszczenia porów L w badaniu AVA oraz wg. PN-EN 480-11 w badanych betonach była na zbliżonym poziomie,

Mrozoodporność zwykła

W otrzymanych wynikach w każdym z przypadków zaobserwowano minimalny ubytek masy wartości te nie przekraczały wartości 0,06%. Średni spadek wytrzymałości zaobserwowano na cementach CEM I 42,5 R i CEM II/B-S 42,5 R-NA

wynosząco odpowiednio 2,17 % i 2,78 % , a na cementach CEM II/A-LL 42,5 R i CEM II/A-S 52,5 R zaobserwowana przyrost wytrzymałości odpowiednio 2,59 % i 2,57 %.

Podsumowanie

Otrzymane wyniki wytrzymałościowe betonów z cementami zawierającymi w swoim składzie inne składniki główne niż klinkier, nie odbiegają od betonu na cemencie portlandzkim, a nawet je przewyższają. Częstym wymogiem specyfikacji technicznych jest osiągnięcie 80% wytrzymałości charakterystycznej betonu podczas procesu sprężania. Przedstawiony eksperyment wskazuje iż warunek ten został spełniony po trzech dniach dojrzewania w warunkach laboratoryjnych.

Otrzymane wyniki siecznych modułów sprężystości betonu dla porównywanych cementów z nieklinkierowymi składnikami głównymi przewyższyły wyniki dla betonu z cementem CEM I 42,5 R. Bezpośrednią tego przyczyną m.in. były wyższe powierzchnie właściwe cementów, obecność granulowanego żużla wielkopieczowego oraz popiołu lotnego krzemionkowego, które dzięki swoim korzystnym właściwościom pucolanowym oraz hydraulicznym wpłynęły na ilościowy wzrost fazy C-S-H w betonach. Składniki te wraz z drobno zmieloną skałą wapienną pełnią także rolę mikrokruszywa, który przyczynia się do poprawy parametrów matrycy. Synergia tych dwóch zależności wpłynęła pozytywnie na strefę kontaktową kruszywo zaczyn powodując wzrost parametrów wytrzymałościowych. Zależność ta potwierdzona została w [15]

Stopień mrozoodporności zwykłej wykonany po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania został spełniony dla wszystkich z badanych betonów i nie odbiegał od referencji.

Przedstawione wyniki badań jednoznacznie wskazują słuszność wprowadzonych w styczniu 2025 r. zmian w Wzorcowych Warunków Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych M-13.01.00 v05. dopuszczających cementy z grup CEM II/A, CEM II/B lub CEM III w betonie sprężonym w elementach drogowego obiektu inżynierskiego. Archaiczne wymaganie dotyczące stosowania tylko i wyłącznie cementu CEM I wprowadza niepotrzebne ograniczenia w projektowaniu i wykonywaniu betonu, które wpływają negatywnie na aspekty środowiskowe i ekonomiczne, ale również w wielu przypadkach na aspekty techniczne i technologiczne w wykonywaniu i użytkowaniu tych obiektów.

Aktualny poziom wiedzy technologicznej oraz dostępne narzędzia pozwalające modyfikować właściwości betonu, w połączeniu z obecnie dostępnymi metodami badań i urządzeniami pomiarowymi, umożliwiają projektowanie składu, w taki sposób, aby uzyskać oczekiwaną odpowiedź parametrów reologicznych mieszanki betonowej oraz wytrzymałości i trwałości samego betonu. Wszystko to oraz doświadczenia branży budowlanej, w przypadku omawianych betonów sprężanych, pozwalają na znaczne rozszerzenie możliwości stosowania o cementy portlandzkie wieloskładnikowe oraz cementy hutnicze i wskazują, że odpowiedni dobór rodzaju cementu jest dostosowany do Warunków Wykonania Robót.

Literatura:

- [1] PN-B-06265:2022-08 Beton. Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność. Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08
- [2] PN-EN 206+A2:2021-08 Beton. Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność
- [3] PN-EN 480-11:2008 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Metody badań. Część 11: Oznaczenie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie
- [4] PN-EN 12350-7:2019-08 Badania mieszanki betonowej. Część 7: Zawartość powietrza. Metody ciśnieniowe
- [5] PN-EN 12350-2:2019-07 Badania mieszanki betonowej. Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka
- [6] Procedura badawcza GDDKiA PB/0/18 Pory
- [7] PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
- [8] PN-EN 12390-2:2019-07 Badania betonu. Część 2: Wykonanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych
- [9] PN-EN 12390-13:2021-12 Badania betonu. Część 13: Wyznaczanie siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu (metoda A)
- [10] PN-EN 12390-6:2024-04 Badania betonu. Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań
- [11] PN-EN 12390-8:2019-08 Badania betonu. Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem
- [12] M. T. Ley , D.Welchel, J. Peery, J. LeFlore: „Determining the air-void distribution in fresh concrete with the Sequential Air Method“. Construction and Building Materials, 150, 2017, 723-737
- [13] H. Hall ,” Implementation of the sequential air method in laboratory and field studies“ Bachelor of Science in Architectural Engineering, Oklahoma State University, Stillwater, OK 2015
- [14] PN-EN 1992-1-1 Eurokod 2 - Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne oraz reguły dla budynków, mostów i konstrukcji inżynierskich
- [15] W. Kurdowski, B. Trybalska: „Skład fazowy zaczynu cementowego, a właściwości betonu”. W: Dni Betonu: tradycja i nowoczesność, Wisła 11–13 października 2004
- [16] A. Ajdukiewicz, J. Mames „Konstrukcje z betonu sprężonego” Wyd. Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2008
- [17] M. Knauff, M. Niedośpiał „Betonowe konstrukcje sprężone w budownictwie ogólnym” Wyd. PWN 2021,