

Opracowanie nowej szybkiej metody badania beleczek betonowych w celu lepszej oceny potencjalnej reaktywności alkalicznej kruszywa

Development of a new short-term concrete prism test method (SCPT) to improve predictability for potential alkali reactivity of aggregates

Alkan Hafçı^{1*}, Lutfullah Turanlı²

¹Construction Materials Laboratory, Turkish Standard Institution, 06100 Ankara, Turkey

²Department of Civil Engineering, Yildirim Beyazıt University, 06760 Ankara, Turkey

*Corresponding author: Alkan Hafçı, e-mail: ahafci@tse.org.tr

Streszczenie

Przeprowadzone badania mają na celu opracowanie nowej metody, która w sposób wiarygodny i przyspieszony umożliwiłaby przewidywanie potencjalnej reaktywności kruszyw z wodorotlenkami sodu i potasu, ponieważ dostępne metody badawcze, zarówno długotrwałe, jak i przyspieszone, nie są pozbawione wad. Należą do nich długi czas trwania badania w metodzie badania beleczek betonowych oraz złe wyniki przyspieszonego badania beleczek zaprawy. Nowa metoda nazwana krótkotrwałym badaniem beleczek betonowych [SCPT] została opracowana wraz z analizą stopnia korelacji zaprojektowanych nowych metod, z dostępnymi metodami badawczymi. W tym celu zbadano 32 rodzaje kruszyw, których właściwości eksploatacyjne można obserwować. Badania porównawcze szybką metodą badania beleczek betonowych obejmują beleczki betonowe o wymiarach 50 mm x 50 mm x 200 mm, maksymalny wymiar kruszywa wynosi 16 mm, temperatura przechowywania 60°C i roztwór korozyjny ma skład: 0,35N NaOH + 1% CaCl₂ oraz czas trwania tylko 28 dni.

Słowa kluczowe: reakcja wodorotlenków sodu i potasu z-kruszywem, krótko trwające badania beleczek betonowych, środki odladzające oparte na chlorkach, korelacja

Summary

This experimental study basically aims to come up with a new method [SCPT], which would be a reliable accelerated performance for predicting potential alkali reactivity of aggregates, because available test methods whether long or accelerated, have some drawbacks such as long test duration in the CPT [concrete prism test] and false tests results in the AMBT [accelerated mortar bar test]. The new method called as short-term concrete prism test [SCPT] has been designed with analysing the degree of correlation between the designed new methods and available test method by examining 32 types of aggregate, whose field performances can be observable. Common specifications of the SCPT includes 50 mm x 50 mm x 200 mm concrete prisms, 16 mm maximum aggregate size, storage temperature at 60°C and soak solution with 0.35N NaOH + 1% CaCl₂ and takes only 28 days.

Keywords: alkali-aggregate reaction, short-term concrete prism test, chloride based de-icers, correlation

1. Wprowadzenie

Beton składający się głównie z kruszywa, wody i spoiwa wiążącego, zwykle cementu lub innego alternatywnego spoiwa, z udziałem na przykład wapna, gipsu, pyłu krzemionkowego, żuźla wielkopiecowego, lub popiołów lotnych, są najważniejszymi składnikami w pracach budowlanych. Między składnikami betonu mogą zachodzić skomplikowane reakcje, na przykład niekorzystne reagowanie

1. Introduction

Concrete consisting mainly of aggregate, water and binding material: cement or another alternative binder such as lime, gypsum, silica fume, furnace slag, fly ash is the most critical material for construction works. Complicated reactions can occur between concrete constituents, such as the alkali-aggregate reaction (1, 2). It may be defined as a reaction between various constituents

wodorotlenków sodu i potasu z krzemionką w kruszywie (1, 2). Można ją określić jako reakcję różnych składników kruszywa w betonie z wodorotlenkami sodu i potasu z matrycy cementowej, które mogą także pochodzić z innych źródeł. Wyróżnia się trzy rodzaje reakcji kruszywa: (i) reakcja wodorotlenków sodu i potasu z krzemionką [RWK]; (ii) reakcja tych wodorotlenków z węglanem wapnia [RWWW]; (iii) i ich reakcja z krzemianami (3).

Reakcja wodorotlenków sodu i potasu z krzemionką, najczęściej występująca, jest procesem chemicznym zachodzącym w betonie w wyniku reakcji aktywnej krzemionki w kruszywach z jonami w fazie ciekłej w porach betonu, przede wszystkim w formie wodorotlenków, pochodzącymi głównie z cementu (4). W wyniku tej reakcji powstaje żel alkaliczno-krzemionkowy, pęczniejący poprzez wchłanianie wody. Może on generować naprężenia rozciągające, które potencjalnie mogą prowadzić do poważnych uszkodzeń konstrukcji betonowych. Wystarczy odkształcenie rzędu 0,04-0,05%, aby wywołać pęknięcia w konstrukcji betonowej, ponieważ wytrzymałość betonu na rozciąganie stanowi 7-11% jego wytrzymałości na ściskanie. Reakcja wodorotlenków sodu i potasu, występujących w fazie ciekłej w porach betonu z wapieniami dolomitycznymi jest częstą reakcją chemiczną tych wapieni. Reakcja wodorotlenków sodu i potasu z krzemianami jest opisywana jako reakcja skał, do których należą: szarogłaz, filit lub argillit (3,5).

Istnieje wiele metod badawczych do oznaczania reaktywności kruszyw z wodorotlenkami sodu i potasu. Do oceny tej reaktywności stosuje się obecnie badania petrograficzne, metody chemiczne, metody beleczek z zaprawy, metody obróbki w autoklawie, a w końcu metody badania beleczek betonowych. Metody badań beleczek z zaprawy, do których należą ASTM C1260, ASTM C227, kanadyjskie CSA A23.2-25A, RILEM AAR-2, wymagają 16 dni, podczas gdy metody badania beleczek betonowych, zdefiniowane w ASTM reakcji C1293, RILEM AAR 4.1 wymagają miesięcy, a nawet lat, czyli bardzo długiego okresu. Laboratoryjne metody wykrywania reakcji wodorotlenków sodu i potasu z kruszywami obejmują następujące cele: (i) określenie, czy rodzaj kruszywa jest potencjalnie reaktywny, (ii) określenie reaktywności matrycy cementowej z kruszywem w betonie. Ważne znaczenie ma także wyjaśnienie czy kruszywo zapewnia powolną/opóźnioną rozszerzalność, gdy zachodzi ta reakcja. (iii) określenie maksymalnej rozszerzalności betonu w czasie, w odniesieniu do określonych warunków środowiskowych i proporcji mieszanki (12,13).

2. Znaczenie badań

W porównaniu z 20.-tygodniową metodą badania beleczek betonowych [BBB], zastosowana nowa metoda zostanie wykonana w znacznie krótszym czasie – 28 dni. W przeciwieństwie do metody przyspieszonego badania beleczek zaprawy [PBBZ], będzie ona wolna od kruszenia i obróbki kruszywa, jak również wmywania wodorotlenków sodu i potasu z badanych próbek, zazwyczaj spotykanych w metodach badania beleczek. Badania porównawcze przeprowadzone z zastosowaniem 32 rodzajów kruszyw dowiodły, że wyniki 28.-dniowej rozszerzalności nową metodą mogą wyka-

of aggregates in concrete and alkali originating from cement or other sources. Three types of the alkali-aggregate reaction are noted: (i) alkali-silica reaction [ASR]; (ii) alkali-carbonate reaction [ACR]; (iii) alkali-silicate (3).

ASR, in its most common form, is a chemical process emerging in concrete through the reaction between reactive silica in concrete aggregates and dissolved hydroxyl ions in the concrete pores, mostly from cement (4). This reaction causes the formation of a gel, which expands by absorbing water. It can generate tensile stress, that has the potential to cause serious deterioration in concrete structures. Expansion ratio of as much as 0.04-0.05% is enough to provoke cracking in concrete structure because tensile strength of concrete is 7-11%, of its compressive strength. ACR is a chemical reaction occurring between dolomitic limestones and alkali metal hydroxides in the pore solution of concrete. Alkali-silicate reaction is defined as a reaction of rocks such as greywacke, filite or argillite with alkali metal hydroxides in concrete pore solution (3, 5).

There are many test methods for testing aggregates in terms of alkali reactivity. Petrographic examination, chemical methods, mortar bar methods, autoclave methods, concrete prism methods are nowadays applied for assessing AAR. Mortar bar methods such as ASTM C1260, ASTM C227, Canadian CSA A23.2-25A, RILEM AAR-2, take 16 days while concrete prism test methods such as ASTM C1293, RILEM AAR 4.1 take very long time periods: months or even years. Laboratory methods for the detection of AAR include the following objectives; (i) to determine whether the aggregate type is a potential reactive, (ii) to determine the reactivity of the cement-aggregate combination in concrete and whether the aggregate has a slow / late expansion type as the reactivity is triggered, (iii) to determine the maximum expansion of concrete over time, regarding as certain environmental conditions and mixing ratios (12, 13).

2. Research Significance

Compared with the 20 week-concrete prism test method, the new method will be completed in a much shorter period of 28 days. Unlike the accelerated mortar-bar test method [AMBT], it will be free from aggressive crushing and manipulation of the aggregates, as well as alkali leaching from test specimens, observed generally in CPT methods. The comparative study performed by using 32 types of aggregate has proved that the 28-day expansion results of the new method, can show a high degree of correlation with 20-week expansion results of CPT method. These results infer the viability of the new method as an alternative reliable method for evaluating AAR.

3. Materials

3.1. Aggregates

Eight types of aggregates, numbered as $G_{(1-8)}$ and known well as potentially reactive or suspicious, were examined to perform the

zywać duży stopień korelacji z wynikami 20.-tygodniowej rozszerzalności, metodą badania rozszerzalności próbek betonowych. Wyniki te wskazują na możliwość zastosowania nowej metody jako alternatywnej, niezawodnej metody oceny reaktywności kruszywa.

3. Materiały

3.1. Kruszywa

W celu przeprowadzenia wstępnych doświadczeń zbadano osiem rodzajów kruszyw, oznaczonych jako $G_{(1-8)}$ i znanych jako potencjalnie reaktywne lub mogące wykazywać reaktywność. W pierwszej kolejności z kruszywami tymi przeprowadzono badania za pomocą siedmiu nowych metod, a następnie wybrano najlepsze z nich według stopnia ich korelacji z metodami normowymi. W drugim etapie doświadczeń wprowadzono niezbędne poprawki do wybranych metod, w celu uzyskania lepszej korelacji. W końcu, dwie nowe metody zostały zastosowane w przypadku dodatkowych 24 rodzajów kruszyw oznaczonych numerami $NG_{(8-32)}$, aby zakończyć badania nowej metody. W tabelicy 1 podano opis petrograficzny stosowanych kruszyw oraz wyniki badań ich właściwości mechanicznych i fizycznych.

3.2. Cement

Do przygotowania beleczek z zaprawy lub z betonu użyto dwóch rodzajów cementu CEM I 42,5 R według EN 197-1. Metody badawcze związane z normami RILEM stosowane w niniejszych badaniach przewidują wartość ekwiwalentu sodowego w przedziale $Na_2O_{eq} = 0,9-1,3\%$. Cementy zostały dobrane zgodnie z tym wymaganiem. W tabelicy 2 podano składy chemiczne tych cementów z wyliczonym równoważnikiem sodowym.

3.3. Sole odladzające oparte na wodorotlenku sodu i chlorkach

Wodorotlenek sodu [NaOH] jest najważniejszym materiałem chemicznym stosowanym w roztworach korozyjnych, używanych do tych badań. Zapewnia zawartość alkaliów w betonie do 1,25% Na_2O_{eq} , zgodnie z normami badawczymi dla reakcji kruszyw z wodorotlenkami sodu i potasu (16). Ponadto w roztworach zastosowano trzy rodzaje dodatków odladzających w postaci następujących chlorków: sodu [NaCl], wapnia [$CaCl_2$] i magnezu [$MgCl_2$]. NaCl jest jednym z powszechnych środków odladzających, stosowanych zazwyczaj w celu zapobiegania zamarzaniu wody, które może wystąpić na nawierzchniach drogowych. Jest to faza stała, bezbarwna i krystaliczna. $CaCl_2$ jest jednym z jonowych środków odladzających w postaci stałej, w temperaturze pokojowej. Jest produktem ubocznym metody Solvay'a. $MgCl_2$ otrzymuje się z naturalnych solanek (17).

4. Ogólne zasady nowych metod

4.1. Skład mieszanek w próbkach do badań

1 m³ betonu użytego w badaniach składa się z 1658 kg kruszywa [746 kg kruszywa drobnego, 912 kg kruszywa grubego], 440 kg cementu i 220 kg wody.

preliminary experimental study. To begin with, seven new developed methods were applied on these aggregates and then the best ones of these methods were selected according to their degree of correlation, with the standard test methods. After that, the second stage of the experimental study was started by making necessary improvements in the selected methods to obtain better correlation. Finally, designed two new methods were applied on additional 24 types of aggregate numbered as $NG_{(8-32)}$, to finalize the study for a new method. Table 1 provides information about petrographic identification, origin, and results of mechanical and physical tests for all used aggregates.

3.2. Cement

Two cements of CEM I 42.5 R according to EN 197-1 were used, to prepare mortar bars or concrete prism. The test methods of related the RILEM standards practised in this experimental study stipulate alkali equivalent as $Na_2O_{eq}=0.9-1.3\%$, so the cements were selected in accordance with this requirement. Table 2 shows chemical compositions of these cements with calculated alkali equivalent from the formula $\%Na_2O + 0.658\% K_2O$.

3.3. Sodium hydroxide and chloride based de-icer salts

Sodium hydroxide [NaOH] is the most important chemical material used in the soak solutions, prepared for this study. It provides the alkali content of concrete to reach up to 1.25% Na_2O_e according to the test standards for AAR (16). Moreover, three types of chloride-based de-icer, sodium chloride [NaCl], calcium chloride [$CaCl_2$], and magnesium chloride [$MgCl_2$] were used in the solutions. NaCl is one of most common de-icers used usually in preventing freezing which may occur on highway. It is solid, pure, colourless and crystalline. $CaCl_2$ is one of the ionic de-icers in solid form, at room temperature. It can be produced directly from limestone in addition to the Solvay method. $MgCl_2$ is an inorganic compound. It is obtained from natural brines (17).

4. General principles of the new methods

4.1. Mix design of test specimens

The mix proportions of 1 m³ of concrete used in the experiments were as follows: 1658 kg of aggregate [746 kg of fine aggregate and 912 kg of coarse aggregate], 440 kg of cement and 220 kg of water.

4.2. Size distribution of aggregates

In this experimental study, the maximum size of aggregate was specified as 16 mm, unlike in standard RILEMAAR-4 CPT method [22.4 mm]. Researchers have shown that limiting the maximum size of aggregate from 22.4 mm to 16 mm does not cause any significant impact on size of surface area exposed the reaction as much as grinding coarse aggregate to sand sized particles (18). In addition to reducing the maximum size of aggregate, proportions of fine and coarse aggregates were modified as 55% coarse and

Tablica 1 / Table 1

BADANIA KRUSZYW

TESTS OF AGGREGATES

Group Name Nazwa grupy	Petrographic identification Identyfikacja petrograficzna	Mechanical and physical properties / Właściwości mechaniczne i fizyczne				
		ρ_a -	ρ_{rd} -	ρ_{ssd} -	WA ₂₄ , %	LA, %
G1	Siliceous sandstone / Piaskowiec krzemionkowy	2.67/2.68	2.61/2.62	2.66/2.66	2.0/1.1	22.5
G2	Granite / Granit	2.74/2.73	2.67/2.68	2.71/2.70	1.9/0.8	18.7
G3	Polygenic sandstone / Piaskowiec poligeniczny	2.67/2.68	2.61/2.62	2.65/2.66	1.6/0.9	20.8
G4	Siliceous river sandstone / Piaskowiec krzemionkowy, rzeczny	2.67/2.66	2.61/2.59	2.65/2.65	2.7/1.6	19.9
G5	Siliceous river sandstone / Piaskowiec krzemionkowy, rzeczny	2.67/2.68	2.61/2.60	2.65/2.65	2.5/1.4	20.2
G6	Recrystallized limestone / Przekryształizowany wapień	2.66/2.65	2.59/2.60	2.64/2.62	2.2/1.2	23.4
G7	Siliceous river sandstone / Piaskowiec krzemionkowy, rzeczny	2.68/2.67	2.60/2.61	2.65/2.64	2.3/1.2	20.6
G8	Meta sandstone / Piaskowiec metamorficzny	2.69/2.67	2.61/2.63	2.67/2.66	2.2/1.0	19.4
NG9	River sandstone / Piaskowiec rzeczny	2.69/2.67	2.62/2.62	2.67/2.64	1.6/0.8	21.6
NG10	Perlite / Perlit	2.43/2.40	2.31/2.30	2.42/2.41	1.8/2.7	41.2
NG11	Calcurudite / Kalcyrudyt	2.70/2.68	2.63/2.61	2.68/2.66	1.6/0.9	29.3
NG12	Dolomite / Dolomit	2.72/2.70	2.64/2.66	2.67/2.67	1.1/0.6	22.7
NG13	Sandstone / Piaskowiec	2.70/2.73	2.63/2.64	2.69/2.70	2.8/1.6	21.1
NG14	River sandstone / Piaskowiec rzeczny	2.66/2.65	2.59/2.60	2.64/2.64	3.5/1.7	20.6
NG15	Sandy limestone / Wapień piaskowy	2.65/2.66	2.58/2.60	2.63/2.64	3.5/1.7	20.6
NG16	Meta sandstone / Piaskowiec metamorficzny	2.71/2.72	2.62/2.66	2.69/2.69	1.4/0.7	23.4
NG17	Sparite / Sparyt	2.72/2.72	2.65/2.64	2.68/2.68	1.4/0.6	22.0
NG18	Siliceous sand / Piasek krzemionkowy	2.69/2.68	2.62/2.62	2.67/2.65	1.6/1.0	22.9
NG19	Marble / Marmur	2.67/2.68	2.62/2.63	2.65/2.65	1.1/0.6	26.5
NG20	Granite / Granit	2.72/2.70	2.67/2.67	2.69/2.69	1.0/0.4	20.3
NG21	Basalt / Bazalt	2.82/2.81	2.78/2.79	2.80/2.80	0.5/0.1	16.7
NG22	Granite / Granit	2.71/2.70	2.66/2.66	2.69/2.68	1.3/0.5	21.6
NG23	River sandstone , Piaskowiec rzeczny	2.67/2.68	2.57/2.58	2.65/2.66	1.8/0.6	19.7
NG24	Olivine basalt / Bazalt oliwinowy	2.85/2.84	2.80/2.81	2.82/2.82	0.4/0.1	15.3
NG25	Calcitic dolomite / Dolomit kalcytowy	2.71/2.70	2.65/2.65	2.68/2.68	1.5/0.5	23.7
NG26	Limestone / Wapień	2.71/2.70	2.65/2.66	2.69/2.68	1.4/0.6	24.5
NG27	Marble / Marmur	2.66/2.67	2.62/2.63	2.64/2.64	1.2/0.7	25.0
NG28	Quartz / Kwarc	2.68/2.66	2.64/2.63	2.67/2.65	2.2/0.8	17.9
NG29	Recrystallized Limestone / Wapień przekryształizowany	2.72/2.71	2.66/2.67	2.69/2.70	0.9/0.4	23.9
NG30	Basalt / Bazalt	2.89/2.88	2.82/2.83	2.83/2.84	0.3/0.1	14.1
NG31	Dacitic Tuff / Tuf dacytowy	2.38/2.36	2.26/2.25	2.35/2.36	2.9/3.4	51.8
NG32	River Sandstone / Piaskowiec rzeczny	2.65/2.64	2.60/2.59	2.64/2.63	2.0/0.9	21.0

Note / Uwagi:

FA - fine aggregate / kruszywo drobne,

CA - coarse aggregate / kruszywo grube,

 ρ_a - apparent particle density / gęstość objętościowa ziaren, ρ_{rd} - oven-dried particle density / gęstość ziaren wysuszonych w suszarce, ρ_{ssd} - saturated and surface-dried particle density / gęstość ziaren nasyconych i powierzchniowo wysuszonych,WA₂₄ - water absorption capacity after immersion for 24 h / nasiąkliwość po 24 godzinach zanurzenia w wodzie,

LA - the Los Angeles coefficient for fragmentation / współczynnik Los Angeles [wskaźnik rozkruszenia]

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	Na ₂ O _{eq}
Type I / Rodzaj I	64.05	20.31	5.38	3.02	1.45	3.31	0.64	0.89	0.013	1.23
Type II / Rodzaj I	63.48	20.48	5.87	3.24	1.58	3.09	0.51	0.65	0.015	0.94

4.2. Skład ziarnowy kruszywa

W opisywanych w pracy doświadczeniach maksymalny wymiar kruszywa ustalono na 16 mm, inaczej niż 22,4 mm w standardowej metodzie RILEM AAR-4 [BBB]. Autorzy badań wykazali, że ograniczenie maksymalnego wymiaru kruszywa z 22,4 mm do 16 mm nie ma tak znacznego wpływu na wielkość powierzchni reakcyjnej, jak rozdrobnienie kruszywa grubego, do wielkości ziarna piasku (18). Oprócz zmniejszenia maksymalnego wymiaru kruszywa zmieniono proporcje kruszywa drobnego i grubego stosując 55% grubego i 45% drobnego, zamiast 60% kruszywa grubego i 40% kruszywa drobnego, zgodnie z przedziałem podanym w RILEM AAR-4.

4.3. Temperatura stosowana w badaniach

Temperatura 80°C jest powszechnie stosowana w metodach przyspieszonych badań beleczek z zaprawy w celu przyspieszenia przebiegu reakcji. Z wielu badań wynika, że tak wysoka temperatura nie odzwierciedla rzeczywistych warunków środowiska, więc może zwiększyć możliwość uzyskania fałszywie ujemnych lub pozytywnych wyników badań (19, 20). Dlatego temperatura 60°C jest bardziej uzasadniona dla środowiska dojrzewania próbek niż 80°C, jeśli weźmie się pod uwagę okres badania i rzeczywiste warunki środowiska. 60°C nie jest temperaturą, która nie może występować w naturze, ponieważ konstrukcja betonowa może być poddana tej temperaturze w niektórych regionach, na przykład w okolicy równika. Temperatura 60°C może przyspieszyć reakcję w stopniu wystarczającym do zakończenia przyspieszonego badania, w rozsądnym czasie. W wielu badaniach stwierdzono, że temperatura ta nie ma dużego wpływu na proces hydratacji (20). Z drugiej strony, temperatura 60°C może powodować niestabilność faz siarczanowo-glinianowych i akumulację nadmiaru siarczanów w roztworze w porach betonu. Jednakże te niepożądane siarczany mogą nie stanowić ważnego problemu, ponieważ wystarczająca ilość zasad jest związana z dodatkiem NaOH i solami chlorków stosowanymi w roztworach nasączających, przygotowanych do opracowania nowych metod. W skrócie, temperatura ta może zapewnić krótki okres badania bez zakłócania głównej reakcji i produktów mieszanek betonowych.

4.4. Wymiary próbek do badań

Są dwie główne zalety stosowania mniejszych beleczek betonowych o wymiarach 50 mm x 50 mm x 200 mm zamiast beleczek o wymiarach 75 mm x 75 mm x 300 mm, zalecanych w standardowej metodzie badania belek betonowych,

45% fine instead of 60% coarse and 40% fine, according to the specified interval in RILEM AAR-4.

4.3. Test temperature

A temperature of 80°C is commonly used in AMBT methods, to accelerate the reaction. Many studies have revealed that such a high temperature does not reflect the real environment conditions, so it may raise the possibility of false negative/positive test results (19, 20). Therefore, a temperature of 60°C is more reasonable for storage environment than 80°C, if the test and real environment conditions are considered. 60°C is not a temperature that cannot be seen in nature because the concrete structure can be subjected to this temperature in some places, for example, in equatorial area. A temperature of 60°C can accelerate the reaction in a sufficient degree, to complete the AAR test in a reasonable time. Many investigations have claimed that this temperature has not an important negative effect on the hydration products (20). On the other hand, temperature of 60°C may cause instability of calcium sulfo-aluminates and surplus sulphate accumulation in pore solution. However, this undesirable sulphate may not be seen as a significant problem because sufficient alkalis are provided by NaOH and chloride based salts, used in the soak solutions prepared for designing new methods. In short, this temperature can provide short test period without disrupting the main process of the reaction and the hydration products within the cement matrix.

4.4. Dimension of test specimens

There are two main advantages for preference of 50 mm x 50 mm x 200 mm narrowed concrete prisms instead of 75 mm x 75 mm x 300 mm used in the standard CPT method, which are those (i) the preparation of test specimens is more practical and (ii) all sizes of 50 mm x 50 mm x 200 mm concrete prisms are 1.5 times smaller, so the correlation study between new developed test methods and



Rys. 1. Wymiary próbek

Fig. 1. Dimensions of test specimens

a mianowicie (i) przygotowanie próbek do badań jest łatwiejsze oraz (ii) wszystkie wymiary beleczek betonowych 50 mm x 50 mm x 200 mm są 1,5-krotnie mniejsze, więc badanie korelacji między nowo opracowanymi metodami badań a normową metodą badania belek betonowych, może być bardziej racjonalne. Przykładowe wymiary próbek stosowanych w niniejszej pracy pokazano na rysunku 1.

5. Doświadczenia

Ogólnie zakres tych badań doświadczalnych jest podzielony na dwie części: wstępne i końcowe doświadczenia. Wstępne doświadczenia polegają na: (i) wyborze kruszyw do badań, (ii) przygotowaniu roztworów korozyjnych o zmiennej zawartości składników, (iii) przeprowadzeniu normowych metod badawczych: szybkiej metody badania beleczek z zaprawy i metody badania beleczek betonowych, (iv) oraz objęciu tych kruszyw opracowanymi metodami doświadczalnymi. Opis wszystkich badań podano w tabelicy 3. W nowych metodach zastosowano: różne roztwory korozyjne, w tym NaOH i chlorki stosowane w środkach odladzających w różnych proporcjach, małe beleczki betonowe 50 mm x 50 mm x 200 mm oraz zmodyfikowany skład ziarnowy kruszywa. We wstępnych doświadczeniach zastosowano różne roztwory korozyjne, przedstawione w tabelicy 3. Celem było zaprojektowanie najlepszej metody doświadczalnej, która dawałaby doskonałą korelację ze standardowymi metodami badawczymi. Po zakończeniu badań wstępnych dla wszystkich 32 rodzajów kruszyw, zastosowano również dwie nowe metody opracowane przez dokonanie niezbędnych poprawek w najlepszych spośród metod próbnych. Wszystkie próbki przygotowane do doświadczeń opisano, wraz z ich numerami i wymiarami:

1. 96 beleczek zaprawy o wymiarach 25 mm x 25 mm x 285 mm, do przyspieszonego badania beleczek z zaprawy
2. 96 beleczek betonowych o wymiarach 75 mm x 75 mm x 300 mm, do badania belek betonowych
3. 252 beleczek betonowych o wymiarach 50 mm x 50 mm x 200 mm, do nowo opracowanych metod.

6. Graniczne wydłużenia i metoda analizy danych dotyczących tych wyników

Graniczne wydłużenia w dostępnych metodach badawczych dotyczących reaktywności kruszywa wynoszą 0,2% w RILEM AAR-2 [PBBZ] dla 14 dni i 0,04% w RILEM AAR-4.1 [BBB] po 20 tygodniach – 0,03% dla 15 tygodni. W związku z tym granicę rozszerzalności dla nowych metod określono na poziomie 0,04%, tak jak w metodzie BBB.

Analiza regresji i obliczanie współczynnika korelacji R^2 są podstawowymi metodami analizy danych uzyskanych w doświadczeniach. We wstępnych doświadczeniach, porównanie danych uzyskanych nowymi metodami z danymi z BBB wymaga stworzenia mapy odwzorowania, w celu ustalenia korelacji między nimi. Odwzorowanie powstaje przez dopasowanie wskaźników roz-

the CPT method, may be more rational. Examples for dimensions of the specimens used in this study are given in Fig. 1.

5. Process of experimental study

The general framework of this experimental study was divided into two parts; preliminary and later experimental studies. The processes of the preliminary experimental study are (i) to select test aggregates, (ii) to prepare soak solutions with changing content, and (iii) to perform standard test methods; AMBT and CPT (iv) finally, to apply new developed test methods on these aggregates. The processes of all the studies are summarized in Table 3. These new methods were developed using different soak solution including NaOH and chloride-based deicers in variable ratios, narrowed concrete prisms 50 mm x 50 mm x 200 mm and modified size distribution of aggregate, within a specified grade interval of available test methods. In the preliminary experimental study, the different soak solutions in Table 3 were prepared to design the most appropriate test method that would provide an excellent correlation with standard test methods. After completion of the preliminary study, two new methods developed by making necessary arrangements in the preliminary better methods, were also applied to all 32 types of aggregates. All samples prepared for this experimental study are given as follows, with their numbers and dimensions:

1. 96 mortar bars of dimensions: 25 mm x 25 mm x 285 mm, for AMBT
2. 96 concrete prisms of dimensions: 75 mm x 75 mm x 300 mm, for CPT
3. 252 concrete prisms of dimensions: 50 mm x 50 mm x 200 mm, for the newly designed methods.

6. Expansion limits and method for analysis of expansion results data

The expansion limits in available test methods for reactivity of aggregate are 0.2% in RILEM AAR-2 AMBT for 14 days and 0.04% in RILEM AAR-4.1 CPT for 20 weeks [0.03% for 15 weeks]. Accordingly, the expansion limit for the new methods is specified as 0.04%, like in the CPT.

Regression analysis and calculation of the correlation coefficient R^2 are fundamental ways of analyzing the data obtained from the experimental studies. In the preliminary experimental study, comparing the pilot new methods data with the CPT data needs to create a time mapping to establish a correlation between them. The mapping is created by matching the expansion rates after 28 days for PNMs, to those after 20 weeks for CPT. Regression analysis is an analysis method used to measure the relationship between two or more variables (21). The adaptation of this model to this experimental study is as follow: the linear regression line has a formula which is $Y_i = aX_i + b$, where X is expansion in PNMs, Y is expansion of CPT, while 'a' and 'b' are variable coefficients according to test data. In order to decide the best appropriate test

Tablica 3 / Table 3

PROGRAM BADAWCZY

EXPERIMENTAL PROGRAM

Test method / Metoda badania	Test period Okres bada- nia	Soak Solution Roztwór korozyjny	Sample dimensions Wymiary próbki, mm	Storage temp. Temperatura przechowywania	Cement	Abb. / Akronim
Preliminary Experimental Study						
RILEM AAR-2/ AMBT	14 days / dni	1N NaOH	25x25x285	80°C	Type I / Typ I	AMBT
RILEM AAR-4.1/CPT	20 weeks / tygodni	No Solution 100%RH	75x75x300	60°C	Type I / Typ I	CPT
New Method-1 Nowa metoda-1	28 days / dni	0.3N NaOH 1% NaCl 1% CaCl ₂	50x50x200	60°C 20°C *	Type I / Typ I	PNM1
New Method-2 Nowa metoda-3	28 days / dni	0.3N NaOH 1% NaCl 1% CaCl ₂	50x50x200	60°C	Type I / Typ I	PNM2
New Method-3 Nowa metoda-3	28 days / dni	0.3N NaOH 2% NaCl	50x50x200	60°C	Type I / Typ I	PNM3
New Method-4 Nowa metoda-4	28 days / dni	0.3N NaOH 2% CaCl ₂	50x50x200	60°C	Type I / Typ I	PNM4
New Method-5 Nowa metoda-5	28 days / dni	0.3N NaOH 2% MgCl ₂	50x50x200	60°C	Type I / Typ I	PNM5
New Method-6 Nowa metoda-6	28 days / dni	0.35N NaOH 1% CaCl ₂	50x50x200	60°C	Type I / Typ I	PNM6
New Method-7 Nowa metoda-7	28 days / dni	0.35N NaOH 2% CaCl ₂	50x50x200	60°C	Type I / Typ I	PNM7
Latter Experimental Study						
Designed New Method-1 Nowa zaprojektowana metoda-1	28 days / dni	0.35N NaOH 1.25% CaCl ₂	50x50x200	60°C	Type I / Typ I	DNM1
Designed New Method-2 Nowa zaprojektowana metoda-2	28 days / dni	0.35N NaOH 1% CaCl ₂	50x50x200	60°C	Type II / Typ II	DNM2

*Note: Samples were stored at 60°C but the length measurement was done at 20°C / Uwaga: Próbki przechowywano w temperaturze 60°C, ale pomiaru długości dokonano w temperaturze 20 °C.

szerzalności w ciągu 28 dni dla badanych metod, do wskaźników rozszerzalności w ciągu 20 tygodni dla BBB. Analiza regresji jest metodą analizy stosowaną do pomiaru związku między dwiema lub większą liczbą zmiennych (21). Dostosowanie tego modelu do tych doświadczeń jest następująca: linia regresji liniowej ma wzór, który ma postać $Y_i = aX_i + b$, gdzie X jest wydłużeniem próbek w badanej nowej metodzie, a Y jest wydłużeniem próbek zmierzonym w metodzie BBB, a 'a' i 'b' są zmiennymi współczynnikami, zgodnie z danymi doświadczalnymi. W celu podjęcia decyzji o wyborze najlepszej metody badawczej należy dążyć do uzyskania idealnego równania ($Y = 0$ czyli $a=1$; $b=0$ i $R^2 = |1|$). Główne kryterium oceny zostało określone jako wartość „a” najbliższa 1, do zaprojektowania idealnej metody. Drugorzędne to wartość R^2 najbliższa 1 i wartość b najbliższa 0.

6.1. Analiza danych dotyczących wyników wydłużenia z wstępnych doświadczeń

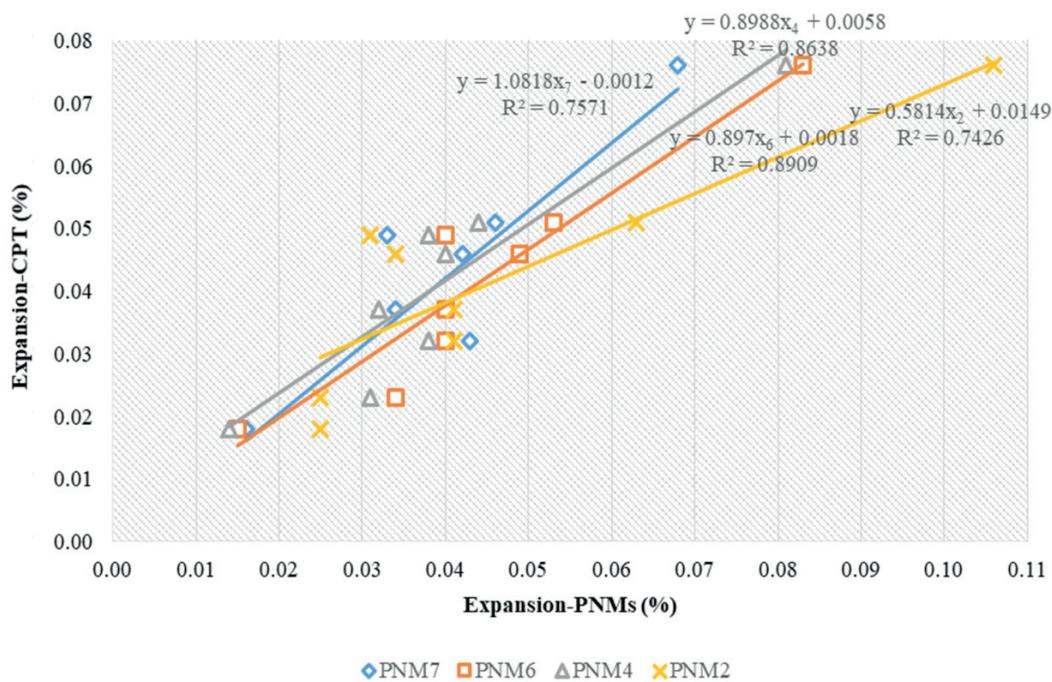
Analiza regresji pozwala na wybór najlepszych nowych metod poprzez ustalenie korelacji pomiędzy danymi dotyczącymi wydłużenia zanotowanego dla tych metod po 28 dniach badania a danymi dotyczącymi BBB dla 20 tygodni. W jej wyniku ustalono, że najlepszymi metodami są PNM6, PNM4, PNM7, PNM2.

method, the ideal equation ($Y_i = X_i$ that is $a=1$; $b=0$ and $R^2 = |1|$) should be tried to be achieved. The primary evaluation criteria has been specified as value of “a” closest to 1 to design ideal method. The secondary ones are value of R^2 closest to 1 and that of b closest to 0.

6.1. Analysis of expansion results data of preliminary experimental study

The regression analysis enables to decide the best ones of PNMs by establishing correlation between PNMs data for 28 days and CPT data for 20 weeks. As a result of its, PNM6, PNM4, PNM7, PNM2 are determined as the best ones.

The correlation parameters shown in Fig. 2 reveal that PNM6 with equation of $Y = 0.8970 X_6 + 0.0018$ with can be evaluated as the best one because it gives better correlation coefficient $R^2 = 0.8909$, while it is 0.7571 in PNM7 with equation of $1.0818 X_7 - 0.0012$. It can be said that PNM7 has better “a” coefficient but R^2 is more critical than “a” coefficient in views of analysing last test results, unlike in previously analysed test results. In conclusion, the best method in this preliminary study can be specified as PNM6.



Method Metoda	Regression line equation $Y=aX+b$ Równanie linii regresji ($Y=aX+b$)	Correlation coefficient R^2 Współczynnik korelacji (R^2)
PNM7	$Y=1.0818 X_7-0.0012$	0.7571
PNM6	$Y=0.8970 X_6+0.0018$	0.8909
PNM4	$Y=0.8988X_4+0.0058$	0.8638
PNM2	$Y=0.5814X_2+0.0149$	0.7426

Rys. 2. Analiza regresji dla danych o najlepszych PNMS i CPT*

Fig. 2. Regression analysis for data of best PNMS and CPT.

Parametry korelacji [rys. 2] wykazują, że PNM6, którego równanie ma postać $Y=0,8970 X_6+0,0018$ można ocenić jako najlepszą, ponieważ daje ona lepszy współczynnik korelacji $R^2=0,8909$, natomiast dla PNM7 R^2 wynosi 0,7571 przy równaniu $1,0818 X_7-0,0012$. Można powiedzieć, że PNM7 ma lepszy współczynnik „a”, ale R^2 jest ważniejszy niż współczynnik „a” z punktu widzenia analizy ostatnich wyników badań, w przeciwieństwie do wcześniejszej analizy wyników badań. Podsumowując, najlepszą metodą w tym wstępnym badaniu można określić metodę PNM6.

6.2. Ostateczna specyfikacja opracowanych nowych metod

Na podstawie analizy wstępnych danych doświadczalnych można stwierdzić, że PNM6 jest najlepszą z opracowanych metod. Nie można jednak powiedzieć, że dane PNM6 zapewniają doskonałą korelację z danymi BBB. PNM6 daje na ogół nieco większe wskaźniki rozszerzalności dla wszystkich kruszyw, z wyjątkiem kruszyw G2 i G5, dlatego konieczne jest wprowadzenie niewielkiej zmiany warunków doświadczeń.

Zgodnie z wynikami wstępnych doświadczeń i przeglądem literatury, NaOH może powodować duże wahania rozszerzalności, dlatego lepszym rozwiązaniem jest, utrzymywanie stałego stężenia

6.2. Finalized specifications for developed new methods

Based on the analysis of preliminary experimental study, the data show that PNM6 is the best of PNMs. Nevertheless, it cannot be said that PNM6 data provide excellent correlation with CPT data. PNM6 generally gives a slightly higher expansion rates for all aggregates except for G2 and G5 aggregates, so it is necessary to make a little correction on excessive test condition.

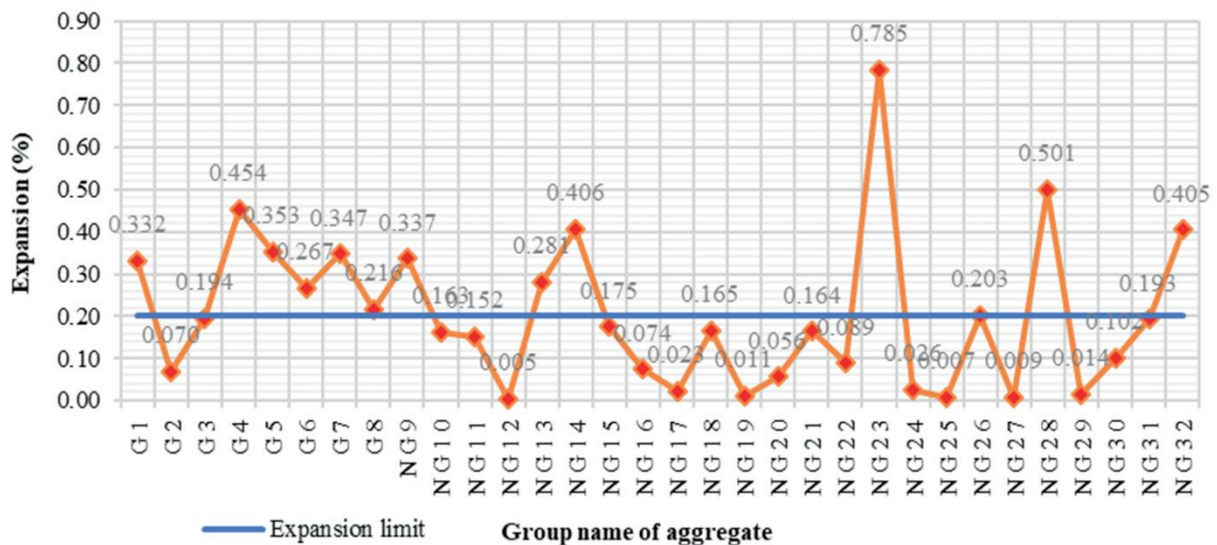
According to the results of this preliminary experimental study and the literature review, NaOH may cause great fluctuation in expansion percent, so it is a better way to make the ratio of NaOH stable, like in PNM6 as 0.35 N. On the other hand, the effect of $CaCl_2$ are so diverse from other chloride-based de-icers. If the percent of $CaCl_2$ is increased from 1 to 2 like in PNM7, the expansion rates of some aggregates, such as G1, G4, G5, G6 and G7 showing higher reactivity in CPT method, decrease in striking rate. On the contrary, the increase in $CaCl_2$ cause slightly higher expansion in non-reactive aggregates such as G2, G3, and G8. Therefore, the general evaluation on all test results proposes that $CaCl_2$ percent should be increased to 1.25% in one of developed new test methods, to examine the effect of $CaCl_2$ on AAR expansion at a different rate.

In one of new test methods to be developed, using a cement type having lower alkali content may be useful to observe the effect of cement type on potential alkali reactivity of aggregates in Turkey.

* Uwaga Redakcji: korelacja bardzo słaba

Test method / Metoda badania	Test period Okres badania	Soak Solution Roztwór korozyjny	Sample dimensions Wymiary próbki, mm	Storage temp. Temperatura badania	Cement	Abb. / Akronim
Developed New Method-1 Nowo opracowana metoda 1	28 days	0.35N NaOH 1.25% CaCl ₂	50x50x200	60 °C	I	DNM1
Developed New Method-2 Nowo opracowana metoda 2	28 days	0.35N NaOH 1% CaCl ₂	50x50x200	60 °C	II	DNM2

Reactivity for AMBT



Rys. 3. 14-dniowe wydłużenie próbek badanych metodą AMBT

Fig. 3. 14-day expansions of all aggregates for AMBT

NaOH, tak jak w PNM6 - 0,35 N. Z drugiej strony, efekt działania CaCl₂ jest zupełnie inny niż pozostałych środków odladzających, złożonych z chlorków. W przypadku zwiększenia procentowego udziału CaCl₂ z 1 do 2 jak w PNM7, szybkość rozszerzalności niektórych kruszyw, na przykład G1, G4, G5, G6 i G7 wykazujących większą reaktywność w BBB, maleje raptownie. Przeciwnie, wzrost stężenia CaCl₂ powoduje nieco większą rozszerzalność w przypadku reaktywnych kruszyw, np. G2, G3 i G8. W związku z tym, w ogólnej ocenie wszystkich wyników badań proponuje się zwiększenie zawartości CaCl₂ do 1,25%, w jednej z opracowanych nowych metod, w celu zbadania wpływu CaCl₂ na rozszerzalność spowodowaną reakcją wodorotlenków sodu i potasu z krzemionką.

W jednej z nowych metod badawczych, które mają być opracowane, zastosowanie cementu o mniejszej zawartości alkaliów może być przydatne do obserwacji wpływu rodzaju cementu na potencjalną reaktywność alkaliczną kruszyw w Turcji.

Tablica 2 podaje wartość obliczonego ekwiwalentu Na₂O_e dla cementu I o większej zawartości alkaliów i II, o ich mniejszej zawartości. Po zakończeniu wstępnych doświadczeń, szczegóły dwóch opracowanych metod badawczych zestawiono w tablicy 4.

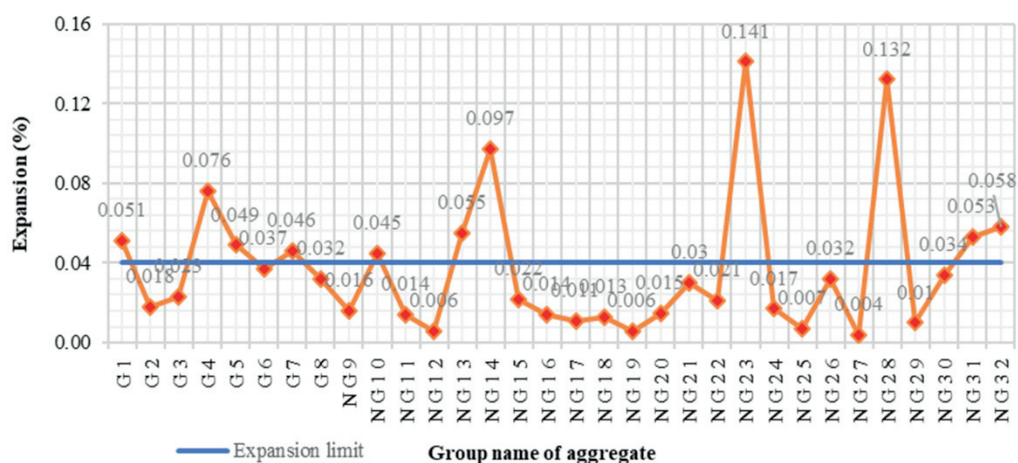
Table 2 gives chemical composition of calculated Na₂O_e equivalent of Type I, having higher alkali content and Type II having lower alkali content. After completion of the preliminary experimental study, specifications of two new-developed test methods have been summarized as in Table 4.

6.3. Analysis of expansion results data of experimental study

In this part of the experimental study, a group of 32 types of aggregate were tested with DNM1 and DNM2 in addition to AMBT and CPT. Data of expansion rates obtained from CPT method was a fundamental decisive indicator to determine reactivity of aggregates, so the regression analysis will be made with CPT data for finalizing the new method. In addition, data from AMBT will be used to determine whether there is a linear relation between finalized version of developed new methods and AMBT.

Expansion rates in Fig. 3 imply that G1, G4, G5, G6, G7, G8, NG9, NG13, NG14, NG23, NG26, NG28, and NG32 are potentially reactive aggregates and G3, NG10, NG11, NG15, NG18, NG21, and NG31 are suspicious aggregates for alkali reactivity according

Reactivity for CPT



Rys. 4. 20-tygodniowe wydłużenie próbek badanych metodą CPT

Fig. 4. 20-weeks expansion of all aggregates for CPT

6.3. Analiza danych dotyczących wydłużenia z późniejszych doświadczeń

W tej części doświadczeń, zastosowano standardowe metody PBBZ i BBB, oraz nowo opracowane metody DNM1 i DNM2 do zbadania 32 rodzaje grup kruszyw. Dane dotyczące szybkości rozszerzania się próbek uzyskane metodą BBB, są podstawowym wskaźnikiem określającym reaktywność kruszyw. Dlatego też analiza regresji zostanie przeprowadzona dla danych BBB, w celu sfinalizowania nowej metody. Ponadto dane z PBBZ zostaną wykorzystane do ustalenia czy istnieje liniowa zależność ostatecznej wersji, opracowanych nowych metod a PBBZ.

Wskaźniki wydłużenia na rysunku 3 wykazują, że G1, G4, G5, G6, G7, G8, NG9, NG13, NG14, NG23, NG26, NG28 i NG32 są potencjalnie reaktywnymi kruszywami, a G3, NG10, NG11, NG15, NG18, NG21 i NG31 są kruszywami mogącymi wykazywać reaktywność, zgodnie z PBBZ. Pozostałe kruszywa są uważane za składniki nieszkodliwe.

Z drugiej strony, dane BBB na rysunku 4 wykazują, że G1, G4, G5, G7, NG10, NG13, NG14, NG23, NG28, NG31 i NG32 są potencjalnie reaktywnymi kruszywami, podczas gdy pozostałe nie są reaktywne. Ponadto kruszywo G6 można określić jako kruszywo reaktywne, ponieważ przekracza ono granicę rozszerzalności – 0,030%, w ciągu 15 tygodni.

Kruszywo NG10 daje sprzeczne wyniki, ponieważ daje wyniki fałszywie ujemne, co oznacza brak reaktywności lub możliwość reaktywności w przypadku PBBZ, ale reaktywność w przypadku BBB. Podobnie jak w przypadku kruszywa NG10, metoda PBBZ zastosowana w przypadku NG31 daje wyniki fałszywie ujemne, ponieważ kruszywo NG31 wykazuje rozszerzalność 0,193% w PBBZ po 14 dniach, podczas gdy w BBB rozszerza się o 0,053%. Przyczyną podobnego zachowania NG10 i NG31 mogą być podobne właściwości petrograficzne i zbliżony skład mineralogiczny. Ponadto są kruszywa dające fałszywie pozytywne wyniki, które są reaktywne w badaniu PBBZ, lecz niereaktywne

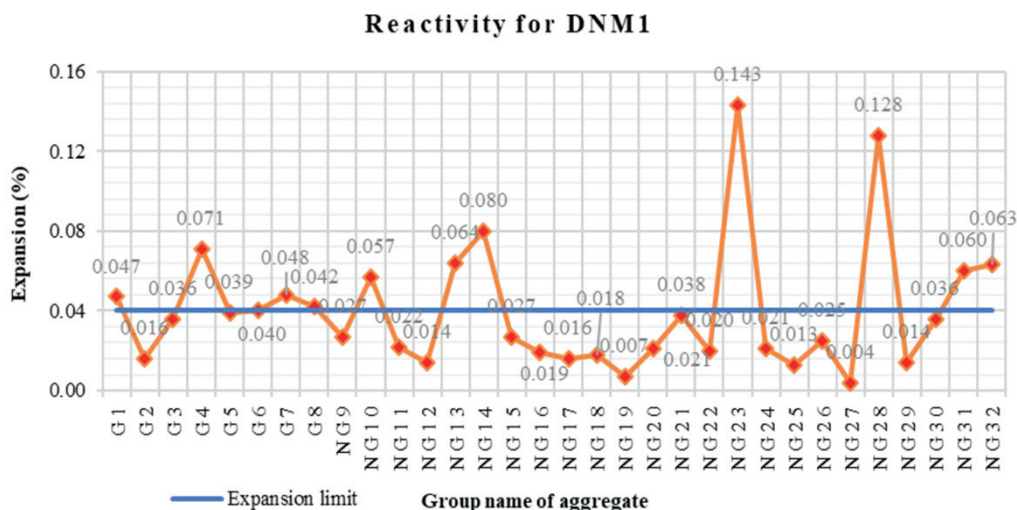
to the AMBT. Other aggregates are observed as non-deleterious materials.

On the other hand, CPT data in Fig. 4 indicates that G1, G4, G5, G7, NG10, NG13, NG14, NG23, NG28, NG31, and NG32 are potentially reactive aggregates, while the others are not reactive. Moreover, G6 aggregate may be defined as a reactive aggregate because it exceeds the expansion limit of 0.030% for 15 weeks.

NG10 aggregate gives a contradictory result because NG10 aggregate gives false negative results that means non-reactive or suspicious for AMBT, but reactive in CPT. Like in NG10 aggregate, AMBT method applied on NG31 indicates false negative results because NG31 aggregate shows 0.193% expansion in AMBT for 14 days while it expands 0.053% in CPT. The reason for this similar behaviour between NG10 and NG31 may be having similar petrographic properties and mineralogical composition. Moreover, there are aggregates giving false positive results, that means reactive in AMBT but non-reactive in CPT. For example, G8 aggregate shows 0.216% expansion for 14 days over the limit in AMBT but 0.032% expansion for 20 weeks under the limit in CPT. Like in G8 aggregate, NG9 [0.337% expansion in AMBT and 0.016% in CPT], NG26 [0.203% expansion in AMBT and 0.032% in CPT] are other examples to the aggregates giving false positive results. Common characteristic of these aggregates is to be originated from river or stream basin.

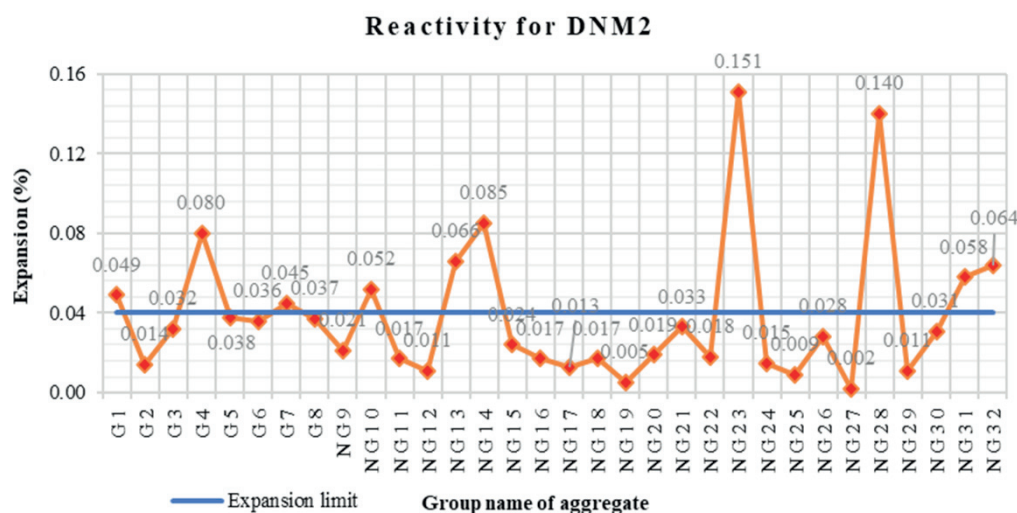
The primary criteria for DNMs is the correspondence of CPT with data, but the expansion limit is set to 0.04% for 28 days as in CPT for 20 weeks. According to the results obtained from DNM1 applied on all aggregates [Fig. 5], G1, G4, G6, NG9, NG10, NG13, NG14, NG23, NG28, NG31, and NG32 are observed as reactive or deleterious materials.

Figure 6 shows that G1, G4, G7, NG10, NG13, NG14, NG23, NG28, NG31, and NG32 tested by DNM2 method are observed as potentially reactive for alkali reactivity. Comparing DNM1 and DNM2, they are compatible with each other, except the data ob-



Rys. 5. 28-dniowe wydłużenie próbek badanych metodą DNM1

Fig. 5. 28-day expansions of all aggregates for DNM1



Rys. 6. 28-dniowe wydłużenie próbek badanych metodą DNM2

Fig. 6. 28-day expansions of all aggregates for DNM2

w BBB. Na przykład, kruszywo G8 wykazuje rozszerzalność 0,216% po 14 dniach powyżej granicy w przypadku PBBZ, ale 0,032% po 20 tygodniach, poniżej granicy w BBB. Podobnie jak w przypadku kruszywa G8, NG9 – rozszerzalność w pomiarach PBBZ i 0,016% w BBB, NG26 wykazuje 0,203% rozszerzalności w PBBZ i 0,032% w BBB. Są one kolejnymi przykładami kruszyw dających wyniki fałszywie pozytywne. Wspólną cechą tych kruszyw jest pochodzenie z dorzecza rzeki lub strumienia.

Podstawowym kryterium dla nowych metod [DNM] jest zgodność BBB z danymi, pomimo, że granica wydłużenia jest ustalona na 0,04% dla 28 dni, tak jak w BBB po 20 tygodniach. Zgodnie z wynikami uzyskanymi metodą DNM1 dla wszystkich kruszyw [rys. 5], jako reaktywne określono kruszywa G1, G4, G6, NG9, NG10, NG13, NG14, NG23, NG28, NG31 i NG32.

Rysunek 6 pokazuje, że G1, G4, G7, NG10, NG13, NG14, NG23, NG28, NG31, i NG32 badane metodą DNM2 wykazują potencjal-

ained from G6 and G7 aggregates because their reactivity shows different behaviours in these new methods.

7. Final decision for the new method

Regression analysis on DNMs and CPT data clarified whether DNMs can provide good correlation and which method is the best, in addition to the preliminary evaluation mentioned in the previous part. Figure 7 shows correlation parameters obtained by regression analysis on DNMs data and CPT data, for all aggregates. Coefficients of "a" for the line equations of DNMs are nearly identical to "1", but it is slightly better [$a=0.9545$] in DNM2. Moreover, DNM2 provides better correlation coefficient $R^2 = 0.9778$ than that of DNM1 [$R^2 = 0.9639$]. Although DNM2 is better in terms of these parameters, the values are very close to each other. On the other hand, "b" coefficient of line equation for DNM2 is equal to 0.0005 and is almost value of the ideal equation [$b=0$]. Consequently,

ną reaktywność. Porównanie metod DNM1 i DNM2 pokazało, że są one zgodne, z wyjątkiem danych uzyskanych dla kruszyw G6 i G7. Reaktywność tych ostatnich wykazuje odmienne zachowania w tych nowych metodach.

7. Ostateczna decyzja dotycząca nowej metody

Analiza regresji dla danych DNM i BBB wyjaśni, czy DNM mogą zapewnić dobrą korelację i która metoda jest najlepsza, jako dodatek do wstępnej oceny, wspomnianej w poprzednim punkcie. Na rysunku 7 przedstawiono parametry korelacji uzyskane w wyniku analizy regresji na danych z DNM i BBB, dla wszystkich kruszyw. Współczynniki „a” dla równań liniowych DNM są niemal identyczne z „1”, ale w DNM2 jest nieco lepiej, bo $a=0,9545$. Ponadto, DNM2 zapewnia lepszy współczynnik korelacji, wynoszący $R^2=0,9778$ niż DNM1 [$R^2=0,9639$]. Chociaż metoda DNM2 jest lepsza z uwagi na te parametry, wartości te są bardzo zbliżone do siebie. Z drugiej strony, współczynnik „b” równania liniowego dla DNM2 równy $b=0,0005$, jest bliski wartości równania idealnego [$b=0$]. W związku z tym DNM2 można uznać za najlepszą metodę do oceny reaktywności kruszyw z wodorotlenkami sodu i potasu, biorąc pod uwagę analizę regresji przeprowadzoną w celu porównania ostatnich danych dotyczących DNM i BBB. Ostatecznie opracowana nowa metoda badawcza została nazwana „**krótkoterminowym badaniem beleczek betonowych w celu oceny kruszywa pod kątem potencjalnej reaktywności alkalicznej [SCPT]**”.

Z drugiej strony, Latifee i Rangaraju (20) opracowali nową metodę, nazwaną badaniem miniaturowych beleczek betonowych [BMBB] i porównali wyniki tej metody z BBB [ASTM C 1293] trwającym 1 rok. Zaproponowana w niniejszej pracy metoda SCPT ma pewne ważne zalety w porównaniu z BMBB. Trwa ona 28 dni, podczas gdy BMBB 56 dni. Analiza regresji dla BMBB i BBB z wykorzystaniem równania liniowego i współczynnika korelacji wykazała, że $Y=1,276X_1-0,0091$ i $R^2=0,968$ (20). Oznacza to, że SCPT ma lepsze parametry korelacji niż BMBB, z uwagi na wartości $a=0,9545$, $b=0,0002$ i $R^2=0,9778$.

8. Podsumowanie, wnioski i ograniczenia

8.1. Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych doświadczeń dowodzą, że w celu poprawy oceny potencjalnej reaktywności kruszyw z wodorotlenkami sodu i potasu możliwe jest opracowanie nowej, alternatywnej w stosunku do standardowych metod badawczych, metody. We wstępnych doświadczeniach oceniano działanie siedmiu różnych nowych metod stosując 8 rodzajów kruszyw, w celu zapewnienia najlepszej korelacji z danymi BBB. Następnie dwie nowe metody, oprócz tych siedmiu metod, zastosowano w przypadku nowych 24 rodzajów kruszyw, których łącznie było 32, modyfikując najlepsze metody wstępne, w celu poprawy korelacji. W wyniku tych badań opracowano nową metodę uwzględniającą stopień korelacji i zatytułowaną „**krótkoterminowa metoda badawcza beleczek betonowych w celu oceny kruszywa pod kątem potencjalnej reaktywności**

DNM2 can be accepted the best method to detect aggregates for alkali reactivity as considering the regression analysis made to compare last data of DNMs and CPT. Finally, this developed new test has been entitled as “**short-term concrete prism test method to assess aggregates for potential alkali reactivity [SCPT]**”.

On the other hand, Latifee and Rangaraju have designed a new method named as miniature concrete prism test [MCPT] and compared the results of this method with CPT [ASTM C 1293] taking 1 years. SCPT has some critical advantages if compared it with MCPT. It lasts for 28 days while MCPT takes 56 days. The regression analysis for MCPT and CPT with the line equation and correlation coefficient are found as $Y=1.276X_1-0.0091$ and ($R^2=0.968$) (20). That means SCPT has better correlation parameters than MCPT, in view of the values of $a=0.9545$, $b=0.0002$ and $R^2=0.9778$.

8. Summary, conclusions and limitations

8.1. Summary

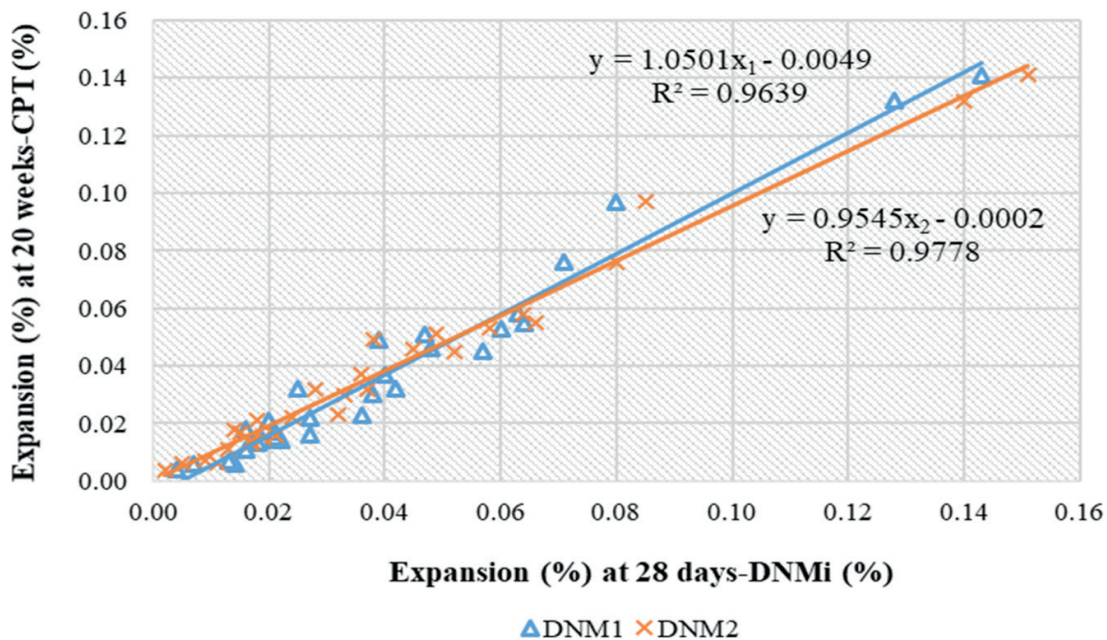
The results of this experimental study prove that establishing an alternative new method to available standard test methods may be possible to improve predictability for potential alkali-reactivity of aggregates. In preliminary experimental study, performances of seven different new methods were evaluated on 8 types of aggregates to provide best correlation with CPT data. After that, two new methods in addition to seven methods were applied on new 24 types of aggregates [totally 32] by modifying best preliminary methods to improve correlation. As a result of these studies, a new method has been finalized as considering the degree of correlation and entitled as “short-term concrete prism test method to assess aggregates for potential alkali reactivity [SCPT]”. Comparison of SCPT versus CPT data of expansion rates gives the best linear equation that is Y (CPT data) = $0.9545X$ (SCPT data) + 0.0002 . The conditions of the finalized new method are given as below:

- Test period: 28 days.
- Soak solution: 0.35N NaOH+ 1% CaCl₂.
- Storage temperature: 60 °C.
- Expansion limit: 0.04%.
- Dimension of test mould: 50 mm x 50 mm x 200 mm concrete prism.
- Water/cement ratio: 0.50.
- Maximum aggregate size: 16 mm.
- Aggregate proportion: nearly 72% of total concrete weight (45% fine, 55% coarse).
- Alkali equivalent (Na₂Oe eq.) of cement: 0.90-0.95%.

8.2. Conclusions

Based on the results obtained from this experimental study, the conclusions can be mentioned as follows:

1. SCPT method has been regulated to provide a good correlation with CPT method because it represents the most similar expo-



Method Metoda	Regression line equation $Y=aX+b$ Równanie linii regresji $Y=aX+b$	Correlation coefficient R^2 Współczynnik korelacji R^2
DNM1	$Y=1.0501X_1-0.0049$	0.9639
DNM2	$Y=0.9545X_2-0.0002$	0.9778

Rys. 7. Analiza regresji dla danych z metod DNMS i CPT

Fig. 7. Regression analysis for data of DNMS and CPT

alkalicznej SCPT[®]. Porównanie danych SCPT i BBB daje najlepsze równanie liniowe, które, na podstawie pomiarów BBB, wynosiło $BBB = 0,9545(SCPT) + 0,0002$. Warunki nowo opracowanej metody są następujące:

- okres badania: 28 dni,
- roztwór korozyjny: 0,35N NaOH+ 1% CaCl₂,
- temperatura dojrzewania: 60 °C,
- granica wydłużenia: 0,04%,
- wymiary beleczek betonowych: 50 mm x 50 mm x 200 mm,
- stosunek wodno-cementowy: 0,50,
- maksymalny rozmiar ziarna: 16 mm,
- udział kruszywa: blisko 72% całkowitej masy betonu, 45% drobne, 55% grube,
- zawartość alkaliów Na₂Oe cementu: 0,90-0,95%.

8.2. Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników doświadczalnych można sformułować następujące wnioski:

1. Metoda SCTB została ustalona w celu zapewnienia dobrej korelacji z metodą BBB, ponieważ zapewnia najbardziej podobne warunki ekspozycji, które można zaobserwować w terenie. Warunki metody SCTB mogą zapewnić pewne korzyści w związku z wyeliminowaniem problemów występujących w standardowych metodach PBBZ i BBB. Po pierwsze, badanie metodą

sure conditions that can be seen in the field. The specifications of SCPT method can provide some advantages, to eliminate problems experienced in the standard AMBT and the CPT method. Firstly, SCPT takes 28 days unlike long-term CPT methods, taking months even years. Secondly, the excessive exposure conditions in AMBT are alleviated thanks to the soak solution consisting of 0.35N NaOH+ 1% CaCl₂, instead of 1N NaOH and lower storage temperature [60°C]. Moreover, alkali leaching experienced in the CPT methods can be prevented by SCPT due to storage of samples in a soak solution. Thirdly, preparation of concrete mix is easier by of 50 mm x 50 mm x 200 mm narrowed concrete prisms, instead of 75 mm x 75 mm x 300 mm. Moreover, 16 mm maximum size of coarse aggregate instead of 22.4 mm and modified size distribution can increase workability of concrete. Lastly, SCPT examines fine and coarse aggregate together, so excessive crushing of aggregates in the mortar bar test can be precluded.

2. AMBT may give false negative/positive test results for some aggregates. On the other hand, SCPT data shows excellent compatibility with CPT data on determining reactivity of the test aggregates. Except G5 aggregate, all aggregates tested by both SCPT and CPT methods shows similar degree of reactivity. G5 aggregate tested by SCPT expands in 0.038% that is slightly lower than 0.04% expansion limit, while it is observed as potentially reactive material if tested by CPT. However, this expansion rate can be acceptable within usual margin of error

SCPT zajmuje 28 dni, w przeciwieństwie do długotrwałych metod BBB, które zajmują miesiące, a nawet lata. Po drugie, nadmierne surowe warunki ekspozycji w PBBZ zostały złagodzone, dzięki zastosowaniu roztworu korozyjnego składającego się z 0,35N NaOH+ 1% CaCl₂ zamiast 1N NaOH oraz niższej temperatury przechowywania wynoszącej 60°C. Ponadto, wymywanie alkaliczne, które występuje w metodach BBB, może być wyeliminowane w SCPT, dzięki przechowywaniu próbek w roztworze korozyjnym. Po trzecie, przygotowanie mieszanki betonowej jest łatwiejsze, dzięki zastosowaniu małych beleczek betonowych o wymiarach 50 mm x 50 mm x 200 mm zamiast 75 mm x 75 mm x 300 mm. Ponadto, maksymalny wymiar kruszywa grubego 16 mm zamiast 22,4 mm i zmodyfikowany rozkład wymiarów może zwiększyć urabialność betonu. Wreszcie, w metodzie SCPT bada się kruszywo drobne i grube razem, dzięki czemu można wykluczyć nadmierne kruszenie kruszywa, w badaniu beleczek zaprawy.

2. PBBZ może dawać fałszywie ujemne/pozytywne wyniki badań, w przypadku niektórych kruszyw. Z drugiej strony, dane SCPT wykazują doskonałą zgodność z danymi BBB w zakresie określania reaktywności badanych kruszyw. Z wyjątkiem kruszywa G5, wszystkie kruszywa badane metodami SCPT i BBB wykazują podobny stopień reaktywności. Beton z kruszywem G5 badany metodą SCPT ulega wydłużeniu o 0,038%, co jest wartością nieco mniejszą od granicy wydłużenia wynoszącej 0,04%, natomiast badanie metodą BBB wykazuje, że jest to materiał potencjalnie reaktywny. Jednakże, ten współczynnik rozszerzalności może być akceptowalny w ramach zwykłego marginesu błędu, wynikającego z niepewności pomiaru w badaniach doświadczalnych. W ten sposób, dzięki opracowanej nowej metodzie [SCPT], usunęło **również dodatkową wadę dostępnych metod badawczych**.
3. Chlorek sodu [NaCl] został uznany za najbardziej skuteczny środek odladzający ze wszystkich chlorków, który przyspiesza reagowanie kruszywa z alkaliom w betonie. Próbkę belek betonowych poddanych działaniu roztworu nasączającego z chlorkiem wapnia [CaCl₂], zamiast NaCl, wykazują mniejszą rozszerzalność w porównaniu z próbkami poddanymi działaniu roztworu odladzającego NaCl. Ponadto stwierdzono, że chlorek magnezu [MgCl₂] nie przyczynia się w takim stopniu jak inne chlorki, do reakcji kruszywa z wodorotlenkami sodu i potasu.
4. Próbkę beleczek betonowych badane według opracowanych nowych metod badawczych rozszerzają się gwałtownie, zwłaszcza po 14 dniach, jeśli roztwór nasączający w tych metodach składa się z wodorotlenku sodu i chlorku wapnia. Ponadto, jedyną różnicą pomiędzy PNM6 [0,35N NaOH+ 1% CaCl₂] a PNM7 [0,35N NaOH+ 2% CaCl₂] jest procentowa zawartość CaCl₂ w roztworach nasączających. Wskaźniki rozszerzalności dla PNM6 i PNM7 wykazują wyraźnie, że zwiększenie stosunku CaCl₂ powoduje szybkie zmniejszenie aktywności kruszyw reaktywnych, natomiast powoduje wzrost aktywności kruszyw niereaktywnych.
5. Można stwierdzić, że z wyjątkiem nasiąkliwości WA₂₄, pozostałe właściwości mechaniczne i fizyczne badanych kruszyw

from uncertainty of measurement in the experiment studies. In this manner, an additional drawback of the available test methods has been also eliminated thanks to the developed new method [SCPT].

3. Sodium chloride [NaCl] has been determined to be the most effective chloride-based de-icers on alkali aggregate reaction in concrete because of accelerating the reaction. Concrete prism specimens exposed to a soak solution with calcium chloride [CaCl₂] instead of NaCl shows less expansion, in comparison to specimens exposed to NaCl de-icer solution. Moreover, it is observed that magnesium chloride [MgCl₂] does not contribute to alkali aggregate reaction, as much as other chlorides.
4. The concrete prism specimens tested in the developed new test methods expand in a sharp increase after especially 14 days if soak solution of mentioned methods consist of sodium hydroxide with CaCl₂. Furthermore, only difference between PNM6 [0.35N NaOH+ 1% CaCl₂] and PNM7 [0.35N NaOH+ 2% CaCl₂] is the percent of CaCl₂ in their soak solutions. The expansion rates for PNM6 and PNM7 show clearly that increasing CaCl₂ ratio causes striking decrease in reactive aggregates while it causes increase in non-reactive aggregates.
5. Except water absorption [WA₂₄], other parameters of mechanical and physical properties of test aggregates cannot be said to have a consistent effect on AAR expansion. Water absorption may be seen as one of possible factor affecting AAR process, due to its relation to the porosity ratio affecting the resistance of aggregates to chemical reaction.

8.3. Limitations

The main aim of this experimental study was to overcome drawbacks of standard AAR test methods. Although SCPT can be considered to have minimized these drawbacks, it has a few limitations as below:

1. CaCl₂, which is the fundamental material of the soak solution prepared for SCPT, may react with some constituents and cause formation of unexpected products due to the unclear factors of the role of calcium in the AAR mechanism. Therefore, it may be necessary to make detailed petrographical examination on the aggregates and investigate behaviour of the constituents of these aggregates when they react with calcium hydroxide.
2. SCPT is an accelerated concrete prism test method by increasing exposure conditions of the standard CPT methods. Concrete prism samples with some type of aggregates may expand slowly, so expansion process of these samples cannot be observed during the 28-day test period. That's why false results can be given by SCPT.

nie mają wyraźnego wpływu na rozszerzalność, z powodu reakcji kruszyw z wodorotlenkami sodu i potasu. Nasiąkliwość może być postrzegana jako jeden z możliwych czynników wpływających na ten proces, ze względu na jej związek z porowatością, mającą wpływ na odporność kruszywa na reakcję z wodorotlenkami.

8.3. Ograniczenia

Głównym celem doświadczeń jest przewyciężenie wad standardowych metod badawczych reaktywności kruszyw. Chociaż można uznać, że metoda SCPT zmniejszyła te wady, ma jednak kilka ograniczeń, a mianowicie:

1. CaCl_2 , który jest podstawowym materiałem roztworu korozyjnego, używanego w metodzie SCPT, może reagować z niektórymi składnikami betonu i powodować powstawanie nieoczekiwanych produktów, ze względu na niejasne czynniki dotyczące roli wapnia w mechanizmie korozji kruszywa. W związku z tym konieczne może być wykonanie szczegółowych badań petrograficznych kruszywa i zbadanie zachowania się składników tego kruszywa w reakcji z wodorotlenkiem wapnia.

SCPT jest przyspieszoną metodą badania beleczek betonowych, przez zwiększenie agresywności warunków ekspozycji standardowych metod badania beleczek betonowych. Próbkę beleczek betonowych z niektórymi rodzajami kruszyw mogą rozszerzać się powoli, dlatego nie można obserwować procesu rozszerzania się tych próbek podczas 28.-dniowego okresu badania. Dlatego właśnie SCPT może dawać fałszywe wyniki.

Literatura / References

1. T.R. Naik, Sustainability of Concrete Construction. ASCE J., **13**(2), 1084 (2008).
2. J. Ingham, Geomaterials under the Microscope. Manson Publishing Ltd, 2010.
3. R.N. Swamy, Alkali aggregate reaction – the bogeyman of concrete. American Concrete Institute Special Report **144**, Mehta, P.K. (Ed.), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, (1994).
4. M.D.A. Thomas, B. Fournier, K.J. Folliard, Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book (FHWA-HIF-13-019). Office of Pavement Technology Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington DC, 2013.
5. D.W. Hobbs, Alkali-Silica Reaction in Concrete. Thomas Telford Ltd, London, 1988.
6. ASTM C1293, Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction, Annual Book of ASTM Standards, 2018.
7. ASTM C227, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations, Annual Book of ASTM Standards, 2018.
8. CAN/CSA-A23.2-14A. Procedure for Length Change Due to Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Prisms, Canadian Standards Association, 2014
9. RILEM AAR-2, Detection of potential alkali-reactivity – accelerated mortar-bar test method for aggregates, Materials & Structure, 2015
10. ASTM C1260, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregate (Mortar – Bar Method), Annual Book of ASTM Standards, 2014.
11. RILEM: AAR-4.1—Detection of Potential Alkali-Reactivity—60 °C Test Method for Aggregate Combinations Using Concrete Prisms, Materials & Structure, 2015.
12. Ö. Andiç-Çakır, Investigation of Test Methods on Alkali Aggregate Reaction. PhD Thesis. Ege University, İzmir, Turkey (2007).
13. J.A. Farny, S.H. Kosmatka, Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate Reactions in Concrete. Concrete Information, Portland Cement Association, 1997.
14. ASTM 150, Standard Specification for Portland Cement, Annual Book of ASTM Standards, 2020.
15. EN 197-1, Cement Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements, 2011
16. Hafci, L. Turanlı, F. Bektas. Effect of ASR expansion on mechanical properties of concrete, Cem. Wapno Beton, **26**(1), 12-23 (2021).
17. P. Desai, Alkali Silica reaction under the influence of chloride based deicers. MS Thesis. Clemson University, South Carolina, USA, 2010.
18. K. Ramyar, A. Topal, Ö. Andiç, Effects of aggregate size and angularity on alkali-silica reaction. Cem. Concr. Res. **35**(11), 2165-2169 (2005).
19. S. Han, M. Fang, Alkali-aggregate reaction under high temperature, high pressure and high alkali content. J. of Nanjing. Inst. Chem. Techn. **2**, 1-10(1984).
20. E. Latifee, P.R. Rangaraju, Miniature Concrete Prism Test: Rapid Test Method for Evaluating the Alkali-Silica Reactivity of Aggregates. J. Mater. Civ.Eng, **27**(7) 04014215. (2015).
21. B. Foley, What is Regression Analysis and Why Should I Use It. <https://www.surveygizmo.com/resources/blog/regression-analysis>. Retrieved on 3/1/2021.