

Beton samozagęszczalny jako alternatywa dla tradycyjnej technologii wykonywania fundamentów w budownictwie indywidualnym

1. Beton samozagęszczalny

1.1. Geneza i rozwój technologii

Rozpatrując beton samozagęszczalny w kategoriach geopolitycznych, palmę pierwszeństwa opracowania koncepcji tego kompozytu należy przyznać Japonii. Wskazanie błędów wykonawczych jako podstawowej przyczyny niedostatecznej trwałości konstrukcji betonowych oraz brak perspektyw szybkiej poprawy *status quo* legły u podstaw zapotrzebowania na nowe rozwiązanie materiałowe (Okamura 1986). Zespół naukowców z Uniwersytetu w Tokio skupił się na przeniesieniu odpowiedzialności za poprawne zagęszczenie mieszanki betonowej z ekip wykonawczych na inherentne właściwości betonu. Choć prototyp nowego kompozytu opracowano w 1988 r. pod nazwą „High Performance Concrete”, już wkrótce (z racji analogii do równoległe rozwijanej koncepcji betonu wysokowartościowego – HPC) autorzy sprecyzowali jego właściwości pod określeniem „Self-Compacting Concrete”.

Idea betonu samozagęszczalnego sprowadza się do uzyskania mieszanki o wysokiej płynności, przy zachowaniu niezbędnej odporności na zjawiska segregacji (sedymentacja ziaren kruszywa grubego, oddzielanie wody). Odkrywanie kolejnych możliwości jednoczesnego spełnienia tych dwóch postulatów wpłynęło na dynamiczny rozwój metod projektowania składu, metod badawczych i – przede wszystkim – zastosowań SCC. Dziś, obserwując kolejne rozwiązania, coraz rzadziej znajdziemy w nich oryginalne założenia „japońskiej szkoły” mieszanek samozagęszczalnych, tzw. powder type SCC.

1.2. Agilia™ – koncepcja

Przykładem jednego z nowych kierunków rozwoju betonu samozagęszczalnego jest gama produktów o nazwie Agilia™. W zależności od zastosowania, obejmuje ona dedykowane rodzaje betonu:

- Agilia™ Fundamenty – ławy, stopy fundamentowe
- Agilia™ Pozioma – stropy, podłogi
- Agilia™ Pionowa – ściany, słupy i kolumny.

Do opisu właściwości reologicznych mieszanki betonowej powszechnie wykorzystuje się model Bingham:

$$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma}$$

w którym:

τ jest naprężeniem stycznym w [Pa]

τ_0 jest granicą płynięcia w [Pa]

η_{pl} jest lepkością plastyczną w [Pa•s]

$\dot{\gamma}$ jest prędkością ($d\gamma/dt$) odkształcenia postacowego.

Przy opracowaniu koncepcji Agilia™ skupiono się na doborze optymalnej relacji wartości granicy płynięcia i lepkości mieszanki betonowej, w zależności od specyfiki formowania elementów konstrukcyjnych.

Stąd odmiany Agilia™ – Fundamenty/Pionowa/Pozioma – charakteryzują się indywidualnie dobranymi wartościami tych parametrów.

Formalnie właściwości takich mieszanek można opisać klasami konsystencji (SF) i lepkości (VS, VF). Koncepcja Agilia™ jest zatem zgodna z wymaganiami [7]. Niemniej ta prosta charakterystyka nie oddaje w pełni możliwości materiału.

Istotą Agilia™ jest bowiem wykorzystanie dwóch podstawowych narzędzi: modelu gęstości upakowania suchych składników oraz zastosowania najnowszych osiągnięć w dziedzinie domieszek do betonu. Minimalizacja zawartości próżni (jam) w kompozycji spoiwa i kruszywa powoduje, że określona ilość zaczynu może zostać wykorzystana do zwiększenia odległości między ziarnami. Gwarantuje to doskonałe wypełnienie skomplikowanych przekrojów oraz dokładne otulenie zbrojenia bez zjawisk segregacji i blokowania przepływu. Natomiast właściwości reologiczne samego zaczynu wynikają już z doboru odpowiedniej domieszki upłynniającej. Tutaj największego znaczenia nabiera parametr lepkości plastycznej, decydujący o prędkości przemieszczania się mieszanki betonowej. Do oceny lepkości specjaliści z firmy Lafarge opracowali metodę O-lejka (fot.1).

2. Przykład realizacji

2.1. Cel

Głównym celem opisywanej realizacji było zastosowanie betonu samozagęszczalnego jako alternatywy dla sektora budownictwa indywidualnego.

Beton samozagęszczalny utożsamiany jest ze specjalnymi zastosowaniami, gdzie jego właściwości wykorzystuje się przede wszystkim przy formowaniu elementów o skomplikowanym kształcie i/lub wysokich wymaganiach, odnośnie jakości powierzchni (beton architektoniczny). Inwestorzy kochają więc technologię SCC z wyższymi kosztami realizacji.

Istotnie, cena jednostki objętości betonu samozagęszczalnego jest wyższa od betonu zwykłego, co najczęściej wynika ze zwiększonej zawartości cementu oraz zastosowania zaawansowanych technologicznie domieszek. Przy wyborze danej technologii należałoby jednak każdorazowo uwzględnić całkowite koszty. Inherentne właściwości samego materiału wpływają przecież na koszty związane z wykonaniem danego elementu.

W przypadku typowego elementu budownictwa indywidualnego, jakim są fundamenty, beton samozagęszczalny może oznaczać oszczędności, wynikające z:

- skrócenia czasu formowania elementu
- redukcji ilości pracowników niezbędnych do wykonania elementu
- redukcji czasu (zmiana pozycji) lub wręcz eliminacji pracy pompy do betonu.

Niniejsza praca stanowi próbę porównania całko-



Fot. 1 O-lejek (O-funnel) do badania czasu wypływu mieszanek gamy Agilia™ Beton



Fot. 2. Widok wykopu pod ławę fundamentową

witych kosztów wykonania fundamentów w technologiach: tradycyjnej i betonu samozagęszczalnego.

2.2. Założenia

Jako technologię „tradycyjną” przyjęto wykorzystanie mieszanki o konsystencji S3, podawanej do wykopu lub deskowania pompą i zagęszczanej wibratorami pogrążalnymi (butafkami). Właściwości betonu odniesienia wyspecyfikowano jak następuje:

- klasa wytrzymałości na ściskanie: C20/25
- klasy ekspozycji: XC2
- klasa konsystencji m.b.: S3
- klasa zawartości chlorków: Cl 0,20.

Założono, że beton w technologii tradycyjnej wykonany jest przy użyciu cementu CEM II/B-V 32,5R, piasku 0/2, kruszywa grubego (żwir) 2/16, wody wodociągowej oraz domieszki upłynniającej.

Na podstawie analizy doświadczeń Lafarge w dostawie betonu towarowego na krajowe budowy, dla realizacji opisywanego elementu (ławy fundamentowej) przyjęto:

- zespół 3 pracowników wykonawcy (kierowanie końcówki przewodu pompy, zagęszczenie mieszanki wibratorami pogrążalnymi, zatarcie powierzchni)
- pracę pompy w czasie ok. 1 h.

Alternatywę stanowi natomiast beton samozagęszczalny Agilia™ Fundamenty.

2.3. Opis obiektu

Jako obiekt referencyjny sektora budownictwa indywidualnego wybrano realizację ławy fundamentowej w domu jednorodzinnym (prywatny inwestor). Inwestycja zlokalizowana jest w Polichnie, w woj. łódzkim.

Posadowienie zaprojektowano jako bezpośrednie, w postaci ław fundamentowych o wymiarach:

- pod ścianami zewnętrznymi nośnymi o szerokości 70 cm i wysokości 30 cm
- pod ścianami zewnętrznymi samonośnymi o szerokości 50 cm i wysokości 30 cm
- pod ścianami wewnętrznymi nośnymi ławy o szerokości 90 cm i wysokości 30 cm
- pod trzonami kominowymi dopasowano do liczby przewodów kominowych.

Ponieważ mieszankę Agilia™ Fundamenty rozpatruje się w kategorii praktycznej alternatywy, jako kryterium wyboru obiektu referencyjnego określono brak specjalnych zabiegów przygotowawczych na budowie. Jak widać na załączonych zdjęciach (fot. 2 i 3), wytypowany obiekt doskonale spełnił te warunki: brak deskowania (wykop), brak stabilizacji położenia zbrojenia czy wody opadowej w wykopie.

2.4. Produkcja, dostawa i wbudowanie mieszanki betonowej

Łączna dostawa objęła 12,0 m³ betonu Agilia™ Fundamenty.

Mieszankę wyprodukowano w wytwórni Lafarge w Piotrkowie Trybunalskim, zgodnie ze standardową procedurą. Po potwierdzeniu założonych właściwości po załadunku (tabela 1), mieszankę betonową przetransportowano betonomieszkarkami – 2 ładunki po 6,0 m³ – na plac budowy. Czas od załadunku



Fot. 3. Szczegół wykopu i zbrojenia ławy fundamentowej

do osiągnięcia gotowości do rozładunku wyniósł 70 minut.

Przed rozładunkiem ponownie zbadano właściwości mieszanki Agilia™ Fundamenty (tabela 1). Mieszanka podawana była do wykopu bezpośrednio z betonomieszkarki, za pośrednictwem układu rynien. Łączny czas, od początku rozładunku do momentu wypełnienia całości fundamentu i samowypoziomowania powierzchni mieszanki, nie przekroczył 30 minut.

Ekipa wykonawcza składała się z jednego pracownika, odpowiedzialnego za wizualną kontrolę poziomu mieszanki betonowej w formowanym elemencie.

2.5. Właściwości betonu

W tabeli 2 przedstawiono właściwości stwardniałego betonu Agilia™ Fundamenty. Wszystkie badania przeprowadzono w Laboratorium Lafarge.

W przypadku Agilia™ Fundamenty istotną kwestią jest rozwój wytrzymałości na ściskanie w czasie dojrzewania. Przy zachowaniu konsystencji mieszanki w czasie min. 1,5 h, rozwiązanie to powinno gwarantować możliwość rozpoczęcia prac wykończeniowych (ruch pieszy) po 1 dniu, a dalszych prac murowych (obciążanie fundamentu) nie później niż po 2 dniach od wbudowania.

Wyniki badań potwierdzają przyjęte założenia oraz powtarzalność właściwości betonu, produkowa-



Fot. 4. Mieszanka Agilia™ Fundamenty wypełniająca wykop pod ławę fundamentową

Fot. 5. Powierzchnia mieszanki betonowej Agilia™ Fundamenty po samowypoziomowaniu



Tabela 1. Zestawienie właściwości mieszanki betonowej Agilia™ Fundamenty

Właściwość	Metoda badania	Jednostka	Miejsce i czas badania	
			Wytwórnia 5'	Budowa 70'
Rozplływ	PN-EN 12350-8	Mm	660	680
Czas wyptywu	O-lejek	S	6,4	6,2
Zawartość powietrza	PN-EN 12350-7	% obj.	2,0	2,0

Tabela 2. Właściwości betonu Agilia™ Fundamenty

Właściwość	Metoda badania	Jednostka	Wynik badania		
			Badania wstępne	Produkcja	
Wytrzymałość na ściskanie	Po 1 dniu	PN-EN 12390-3	N/mm ²	4,7	4,5
	Po 2 dniach			12,3	11,9
	Po 7 dniach			23,4	21,5
	Po 28 dniach			33,6	33,0
Przepuszczalność wody	PN-B-06250	-	Stopień W8	Stopień W8	

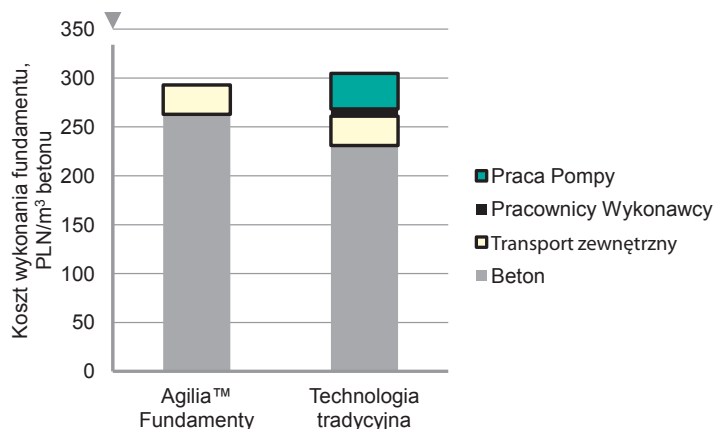
Tabela 3. Podstawowe założenia analizy kosztów

Wielkość	Jednostka	Agilia™ Fundamenty	Beton zwykły
Liczba pracowników wykonawcy	-	1	3
Czas pracy pracowników	H	0,5	2 x 3 = 6,0
Czas pracy pompy	H	-	1,0
Koszt pracy jednego pracownika	PLN/h	15	
Koszt pracy pompy	PLN/h	285	
Koszt dojazdu pompy	PLN	150	

Tabela 4. Skumulowane koszty wykonania fundamentu

Rodzaj kosztów	Jednostka	Agilia™ Fundamenty	Beton zwykły
Koszt betonu	PLN/m ³	263	231
Koszt transportu zewnętrznego		30	30
Koszt pracy pracowników wykonawcy		0,6	7,5
Koszt dojazdu i pracy pompy		-	36,3
Łączny koszt		293,6	304,8

Rys. 1. Porównanie kosztów wykonania ławy fundamentowej w przeliczeniu na 1 m³ betonu



nego w skali przemysłowej, w stosunku do badań wstępnych, wykonanych zgodnie z [6].

2.6. Analiza kosztów

W analizie wykorzystano następujące dane, służące porównaniu kosztów wykonania fundamentu przy użyciu technologii tradycyjnej oraz Agilia™ Fundamenty (tabela 3).

Koszt realizacji fundamentu, w przeliczeniu na 1 m³ betonu, określono w następujący sposób – tabela 4.

Różnica kosztów wykonania ławy fundamentowej, przy ilości 12 m³ betonu, wyniosła zatem ~135 PLN na korzyść technologii SCC.

Wnioski

Przeprowadzona symulacja kosztów, związanych z wyborem technologii formowania fundamentów, pozwala sformułować następujące wnioski:

- Zastosowanie betonu samozagęszczalnego nie musi oznaczać wzrostu kosztów wykonania elementu, a wręcz może je ograniczyć.
- Omówiona realizacja pokazuje praktyczne możliwości mieszanki Agilia™ Fundamenty, w zakresie swobodnego płynięcia na duże odległości (6 m w każdą stronę), bez konieczności wykorzystania pompy do betonu czy zwiększania liczby pracowników wykonawcy.
- Agilia™, jako specjalny rodzaj betonu SCC, stanowi gwarancję jakości elementu, niezależniąc się od potencjalnych błędów przy zagęszczaniu mieszanki i otuleniu zbrojenia.
- Jednocześnie planuje się wykonanie podobnej symulacji kosztów dla rozwiązania w postaci betonu samozagęszczalnego Agilia™ zbrojonego włóknem polimerowym. Pozwoliłoby to na eliminację kolejnych kosztów realizacji fundamentów, związanych z zastosowaniem tradycyjnego zbrojenia.

Marek Jarzębowski

mgr inż. Mariusz Rechnio

Lafarge Kruszywa i Beton Sp. z o.o.

mgr inż. Robert Walkowiak

Chryso Polska Sp. z o.o.

Literatura

- 1 A. Łapko, B.A. Jensen, Podstawy projektowania i algorytmy obliczeń konstrukcji żelbetonowych, Arkady, Warszawa 2008
- 2 E. Motak, Fundamenty bezpośrednie, Arkady, Warszawa 1988
- 3 M. Niedostatkiewicz, Budownictwo ogólne. Przykłady obliczeń, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1999
- 4 Z. Orłowski, Podstawy technologii betonowego budownictwa monolitycznego, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010
- 5 R. Piętkowski, Fundamentowanie, Budownictwo i Architektura, Warszawa 1956
- 6 W. Starosolski, Konstrukcje żelbetowe, Arkady, Warszawa 1996
- 7 W. Żenczykowski, Budownictwo ogólne, t. 2/1, Arkady, Warszawa 1990
- 8 PN-EN 206-1:2003 + Ap1:2004 + A1/2005 + A2:2006 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- 9 PN-EN 206-9:2010 Beton. Część 9: Dodatkowe zasady dotyczące betonu samozagęszczalnego (SCC).