

# **Wpływ właściwości reologicznych samozagęszczalnych mieszanek betonowych na wywierane przez nie parcie**

INFLUENCE THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SCC ON THE  
FORMWORK PRESSURE

## **Streszczenie**

W artykule wykazano, że dynamiczna granica płynięcia mieszanki betonu samozagęszczalnego może służyć do szacowania wywieranego przez mieszankę parcia na deskowanie. Zmniejszenie parcia mieszanki, które następuje wraz z upływem czasu, dobrze określa różnica pomiędzy statyczną i dynamiczną granicą płynięcia. Obydwa parametry wykazują bardzo dobrą korelację z parametrami wyznaczonymi w teście rozplywu mieszanki betonowej, który jest standardowym testem wykonywanym w warunkach budowy. Daje to możliwość szacowania obciążenia deskowania mieszanką na podstawie jej klasy rozplywu.

## **Abstract**

This paper presents that dynamic yield stress of SCC can be used to predict formwork pressure. Reduction of formwork pressure during the time is well defined by the difference between static and dynamic yield stress. These laboratory identified parameters indicate a very good correlation with standard SCC technical tests which are usually used on building site. It allows to predict SCC formwork pressure on site by define its properties and adjust casting speed to designed formwork strength.

## 1. Wstęp

Skład i składniki mieszanki betonu samozagęszczalnego dobierane są przede wszystkim ze względu na zapewnienie odpowiednich wielkości właściwości reologicznych – granicy płynięcia i lepkości plastycznej. Zapewnić one mają mieszance zdolność do szczelnego wypełnienia formy, otulenia zbrojenia oraz zagęszczenia się pod ciężarem własnym, z jednoczesnym zachowaniem jednorodnej struktury (brak segregacji) [1, 2, 3].

Podstawy reologicznego ujęcia problemu urabialności i jej projektowania szczegółowo omówiono w [4, 5, 6]. W dużym uproszczeniu, projektując skład samozagęszczalnej mieszanki betonowej należy dążyć do zapewnienia możliwie niskiej granicy płynięcia, czyli możliwie dużej średnicy rozplywu. Drugim ważnym kryterium, które musi być brane pod uwagę to lepkość mieszanki. Jej wielkość wynika z kompromisu pomiędzy zapewnieniem odpowiedniej zdolności do odpowietrzenia i mobilności (odwrotność lepkości), a stabilnością mieszanki. Praktycznie rzecz biorąc, nie możemy dążyć do minimalizowania czasu rozplywu  $T_{500}$ , ale musimy go tak dobrać, aby zapewnić odpowiednią lepkość, która zapewni stabilną mieszankę. By to ocenić można korzystać z amerykańskiej metody VSI (Visual stability index) według ACI 237R-07, bądź badając odporność mieszanki na segregację według PN-EN 12350-11. Pierwsza z wymienionych metod nie wymaga specjalistycznego sprzętu oprócz stożka i płyty do rozplywu. Polega na wizualnej ocenie mieszanki po teście rozplywu (fot. 1) według kryteriów zawartych w tabeli 1. Jest to metoda prosta, choć ocena stabilności mieszanki jest subiektywna i zależna od doświadczenia wykonującego badanie.

Tabela 1. Wskaźnik wizualnej stabilności VSI oceny mieszanek samozagęszczalnych wg ACI 237R-07

VSI	Ocena mieszanki	Kryteria
0	Bardzo stabilna	Brak oznak segregacji i wycieku zaczynu
1	Stabilna	Brak oznak segregacji, słaby wyciek zaczynu
2	Niestabilna	Niewielka segregacja, silny wyciek zaczynu, słaby wyciek zaprawy (otoczka do 10 mm)
3	Bardzo niestabilna	Wyraźna segregacja, stos kruszywa w centrum rozplywu, duży wyciek zaprawy (ponad 10 mm), silny wyciek zaczynu



Fot. 1. Przykład mieszanki stabilnej VSI0 i rozsegregowanej VSI3

Impulsem do opracowania mieszanek betonu samozagęszczalnego było dążenie do poprawy jakości betonu poprzez zminimalizowanie wpływu czynnika ludzkiego na proces zagęszczania, poprawy warunków pracy poprzez wyeliminowanie wibracji i hałasu oraz zmniejszenia pracochłonności i energochłonności robót betonowych. Pionierami w tej dziedzinie byli Japończycy oraz Szwedzi, którzy w wyniku prac badawczych nad reologią bardzo płynnych mieszanek i stosowaniu efektywnych superplastyfikatorów uzyskali pod koniec lat 80. ubiegłego wieku beton samozagęszczalny. Zalety i możliwe do uzyskania korzyści ze stosowania betonu samozagęszczalnego potwierdza znacząca liczba jego zastosowań. Jednak blisko 30 lat stosowania tej technologii nie sprawia jeszcze, że jest to technologia bezproblemowa.

Beton samozagęszczalny jest bardzo wrażliwy na zmiany właściwości składników, składu, procedur i warunków technologicznych. Wymaga to bardzo elastycznego podejścia obsługi węzłów betoniarskich, która powinna potrafić modyfikować skład by uzyskać założone właściwości. Mieszanka samozagęszczalna charakteryzuje się bardzo wysoką płynnością, co ogólnie jest jej zaletą, ale w przypadku projektowania deskowań stanowi problem wynikający ze zwiększonego parcia na deskowania.

W przypadku deskowań poziomych stosowanie betonu samozagęszczalnego nie wpływa zasadniczo na ich konstrukcję. Należy jednak zaznaczyć, że wykonywanie elementów o nachyleniu większym niż 5% może wymuszać stosowanie zamkniętych form. W takich przypadkach, jak również gdy wykonywane są konstrukcje o skomplikowanych kształtach, niezbędne może być wykonanie w deskowaniach otworów umożliwiających swobodne usunięcie powietrza z deskowania i mieszanki. Deskowania pionowe projektuje się przede wszystkim ze względu na parcie boczne mieszanki betonowej. Zależy ono od właściwości reologicznych i ciężaru mieszanki, wysokości betonowanego elementu, metody i szybkości układania mieszanki, nachylenia i sztywności deskowania, gładkości powierzchni deskowania, a w przypadku betonów zagęszczanych wibracyjnie również od głębokości wibracji [7]. Typowe stosowane w budownictwie deskowania pionowe projektowane są na parcie boczne mieszanki betonowej wynoszące od 40÷80 kN/m<sup>2</sup>, a wytrzymałość na zrywanie ściągów wynosi 90÷160 kN. Jest to całkowicie wystarczające ze względu na wymogi prędkości układania i zagęszczania tradycyjnych mieszanek. Mieszanka samozagęszczalna charakteryzuje się jednak bardzo wysoką płynnością, co skutkuje możliwością wystąpienia bardzo dużego jej parcia na deskowania. Wysokie parcie na deskowania powoduje ograniczenie prędkości betonowania oraz może wymuszać wysokość jednorazowo wykonywanych elementów konstrukcji. Wymusza również konieczność wzmocnienia konstrukcji deskowań. Obecnie zakłada się zwykle, że w przypadku stosowania mieszanki samozagęszczalnej deskowania najlepiej projektować przy założeniu pełnego parcia hydrostatycznego [8, 9, 10, 11, 12, 13]. W pracy [14] wykazano przy tym, że przy betonowaniu ścian o wysokości 2,80 i 3,30 m w deskowaniach ramowych z prędkością 2÷2,5 m/h parcie na deskowania może przyjmować wartości nawet ponad 90 kN/m<sup>2</sup> przy siłach w ściągach na poziomie 180 kN. Pokazuje to, że przy betonowaniu elementów pionowych, zwłaszcza wysokich, konieczne jest stosowanie wzmocnionych deskowań, a także zwiększenia liczby podpór i ściągów (w tym ostatnim przypadku konieczne jest stosowanie deskowań systemowych o mniejszych elementach).

Jeśli betonowanie prowadzone jest przez pompowanie mieszanki od dołu, deskowania wymagają wzmocnienia ze względu na lokalny wzrost parcia ponad parcie hydrostatyczne. Trzeba przy tym uwzględnić, że wznowianie procesu betonowania pompowego także może generować dodatkowy, znaczny nieraz wzrost parcia na deskowanie. W takim przypadku również odległość pomiędzy miejscami umieszczenia zaworów należy

przyjmować kierując się wytrzymałością deskowań. Jednocześnie istnieją prace według których [15] parcie na deskowanie wywierane przez mieszankę samozagęszczalną może być wyraźnie mniejsze od hydrostatycznego. Podobne założenie przyjęto w normie DIN 18218:2010-01, wg której mieszanka samozagęszczalna wywiera parcie na deskowanie mniejsze od hydrostatycznego przy betonowaniu z prędkością znacznie mniejszą niż 2 m/h. Wielkość parcia jest związana z właściwościami reologicznymi mieszanki i ich zmianami w czasie oraz z szybkością układania mieszanki. Spostrzeżenie to otwiera możliwość optymalizacji konstrukcji deskowań i ekonomicznego wykorzystania potencjału zarówno ludzkiego, jak i sprzętowego.

## 2. Metodyka badań

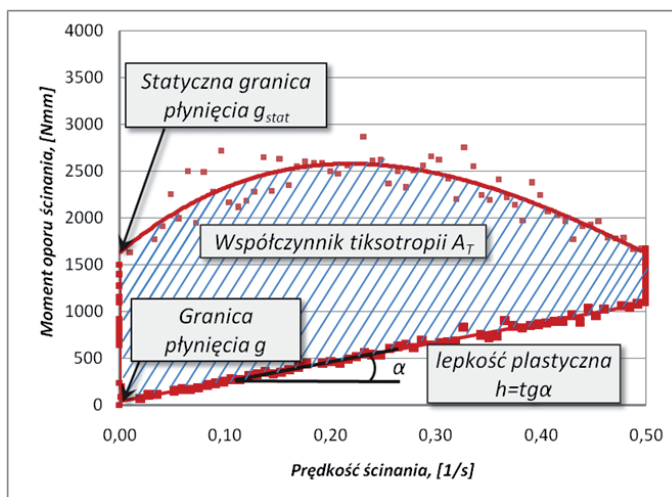
W celu określenia zależności zachodzących pomiędzy właściwościami reologicznymi mieszanek a parciem przez nie wywieranym, wykonano łącznie 36 modeli słupów  $0,2 \times 0,2 \times 1,2$  m i 6 modeli ścian o wymiarach  $0,25 \times 1,0 \times 1,0$  m. Słupy i ściany betonowane były samozagęszczalnymi mieszankami betonowymi, które wybrano z grupy 60 mieszanek badanych we wcześniejszych etapach badań. Wybrano mieszanki o znacząco różnych właściwościach reologicznych. Były to mieszanki wykonane z użyciem trzech rodzajów cementów portlandzkiego CEM I 42,5 R, hutniczego CEM III/A 42,5N - HSR/NA i wieloskładnikowego CEM V/A (S-V)32,5 R - LH. Zastosowano trzy rodzaje superplastyfikatorów, które według badań przeprowadzonych na zaprawach wykazywały efekt tiksotropowego sztywnienia o różnym nasileniu. Zarówno w przypadku mieszanek o  $w/c=0,3$  i  $0,4$  stała była zawartość zaczynu cementowego –  $350 \text{ dm}^3 / \text{m}^3$ . Stos okruszowy tworzył piasek w ilości  $884 \text{ kg/m}^3$  i żwir frakcji 2–8 w ilości  $780 \text{ kg/m}^3$ .

### 2.1. Metodyka badań właściwości reologicznych

Parametry reologiczne określają zdolność mieszanki do samo zagęszczenia, determinować mogą również wywierane przez mieszankę parcie i jego zmiany. Rysunek 2 przedstawia przykładową, otrzymaną w wyniku pomiaru reologicznego krzywą płynięcia mieszanki betonowej, która wykazuje właściwości tiksotropowe. Na jej podstawie możemy określić nie tylko granicę płynięcia  $g$  i lepkość plastyczną  $h$ , ale również statyczną granicę płynięcia  $g_{\text{stat}}$  i współczynnik tiksotropii  $A_T$ . Zwłaszcza te dwa ostatnie charakteryzujące zdolność do budowy przez mieszankę quasi sztywnej struktury mogą być pomocne w ocenie redukcji parcia mieszanki na deskowanie.

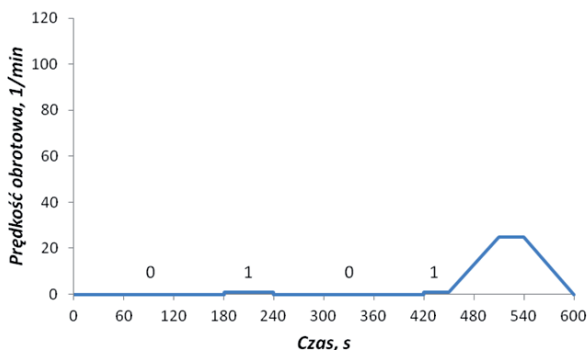
Współczynnik tiksotropii oznacza pole pomiędzy krzywą płynięcia przy rosnącej i malejącej prędkości ścinania wyznaczoną reometrycznym testem urabialności.

Statyczna granica płynięcia  $g_{\text{stat}}$  to największa wartość momentu oporu ścinania jakie notujemy w chwili gdy mieszanka zostaje obciążana. Obciążenie w reometrach rotacyjnych realizowane jest poprzez obrót naczynia z mieszanką betonową, w której zanurzona jest nieruchoma sonda sprzężona z momentometrem.



Rys. 1. Opór ścinania mieszanki w zależności od prędkości ścinania dla mieszanek wykazujących właściwości tiksotropowe

Pomiary reologiczne przeprowadzone według procedur przedstawionych na rysunku 2 i 3 pozwalają uzyskać pełną charakterystykę zmian właściwości reologicznych mieszanki w czasie, oddających jej zachowanie podczas układania w deskowaniu.

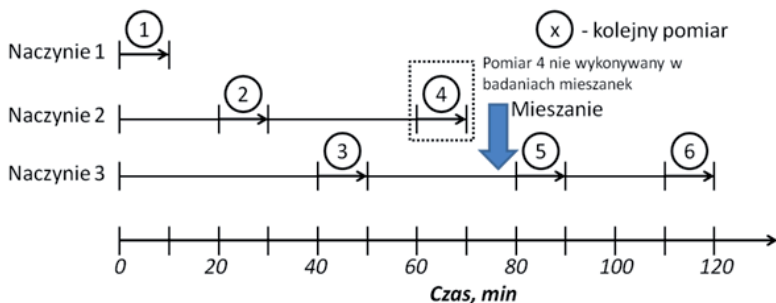


Rys. 2. Procedura pomiarowa reometru XL



Fot. 2. Reometr XL

Badania właściwości reologicznych i test rozplywu mieszanek były wykonywane bezpośrednio po wymieszaniu (nr 1 na rys. 3), jednocześnie umieszczano mieszankę w naczyniach pomiarowych i w odpowiednio przygotowanych stożkach Abramsa – te próbki (nr 2 i 3) badano po 20 i 40 minucie od chwili zmieszania. Po 80 minucie mieszanka



Rys. 3. Sekwencja pomiarów zmian właściwości reologicznych mieszanek samozagęszczalnych w czasie.

była ponownie mieszana i badana testem rozplywu i testem reometrycznym (nr 5). Po tym pozostawiano ją na 20 minut spoczynku w naczyniu reometru i w stożku by w 120 minucie ponownie zbadać (nr 6). W przypadku gdy mieszanka charakteryzuje się zdolnością do budowy sztywnej struktury, która może wyraźnie redukować parcie wywierane przez mieszankę, to wskaźnik tiksotropii  $A_T$  i statyczna granica płynięcia  $g_{stat}$  będą w 20 i 40 minucie wyraźnie większe od tych wyznaczonych bezpośrednio po wymieszaniu. Do określenia efektu sztywnienia mieszanki pozostawionej w spoczynku nie jest konieczny skomplikowany i kosztowny sprzęt w postaci reometru (fot. 2). Można wykorzystać tutaj metodę polegającą na badaniu rozplywu mieszanki pozostawionej w stożku Abramsa na założony czas, w przypadku prezentowanych badań na 20 i 40 minut (fot. 3). Mieszanka o wyraźnej tendencji do sztywnienia po np. 20 minutach spoczynku będzie zachowywała kształt stożka. Jeżeli po ponownym wymieszaniu, będzie się charakteryzowała rozplywem zbliżonym do początkowego, to za sztywnienie będą odpowiedzialne efekty tiksotropowe, które są ze swej natury odwracalne. Jeżeli sytuacja będzie odwrotna to sztywnienie mieszanki będzie związane z utratą urabialności. Oczywiście z punktu widzenia wielkości redukcji parcia na deskowanie nie jest zasadniczo ważną kwestią, który z efektów przeważa, wszak chcemy by efekt redukcji w ogóle nastąpił, ale rozpoznanie źródła tego efektu jest istotne z punktu widzenia jego stabilności. Jeżeli za sztywnienie będą odpowiedzialne efekty tiksotropowe, to musimy się liczyć ze skokowym wzrostem parcia jakie może nastąpić po upłynięciu mieszanki wywołanym kolejnymi etapami



Fot. 3. Badanie efektu sztywnienia za pomocą testu rozplywu; po lewej rozplyw bezpośrednio po zakończeniu mieszania, w środku rozplyw (opad stożka) po 20 min w spoczynku, po prawej rozplyw po ponownym zmieszaniu



betonowania. Sztywnienie wywołane utratą urabialności czy samym procesem samozagęszczenia mieszanki w deskowaniu jest nie wrażliwe na powyższe efekty.

Wyniki badań uzyskane wyżej opisanymi metodami zestawiono z obciążeniami wywieranymi przez mieszanki na ściany deskowań, o metodyce których poniżej.

## 2.2. Metodyka badań parcia

Parcie wywierane przez mieszankę na ściany deskowania słupa (fot. 4) i ściany (fot. 5) mierzone i rejestrowane było w czasie rzeczywistym, jak przez tensometryczne czujniki parcia czujników parcia. Zarówno w deskowaniu słupa i ściany zamontowano 6 czujników parcia (na przeciwległych ścianach po 3). Odmienna była ich wysokość względem spodu deskowania zdeterminowana przez konstrukcję paneli deskowaniowych. Parcie w przypadku słupów określono dla rzędnych 135, 375 i 750 mm, dla ścian 135, 450 i 750 mm licząc od spodu elementów.

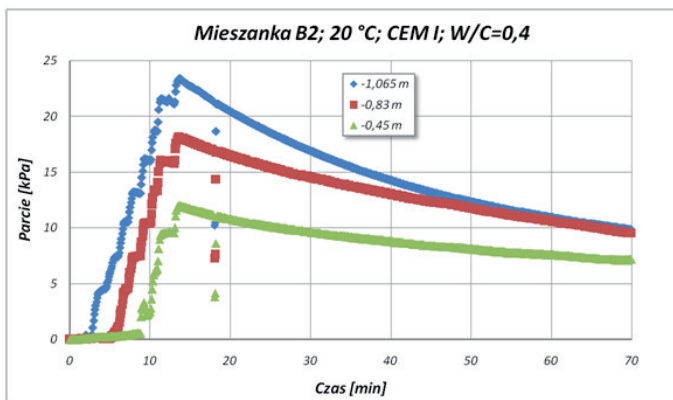
Słupy w liczbie 36 były wypełniane 18 mieszankami z dwoma prędkościami 1,0 i 7,0 m/h. Ściany w ilości 6 betonowano 3 mieszankami również z prędkościami 1,0 i 7,0 m/h. Przykładowy wykres zmian parcia w czasie mieszanki o  $w/c = 0,4$  dla betonowania z prędkością 7 m/h przedstawia rysunek 4. Z wykresów parcia odczytywano wartości parcia w momentach właściwych chwilom, w których określone były właściwości reologiczne.



Fot. 4. Forma do badania parcia mieszanki samozagęszczalnej na deskowanie słupa, widoczne umieszczenie czujników ciśnienia



Fot. 5. Forma do badania parcia mieszanki samozagęszczalnej na deskowanie – model ściany



Rys. 4. Parcie mieszanki na deskowanie słupa 0,2x0,2x1,2 m w zależności od czasu; słup betonowany z prędkością 7 m/h

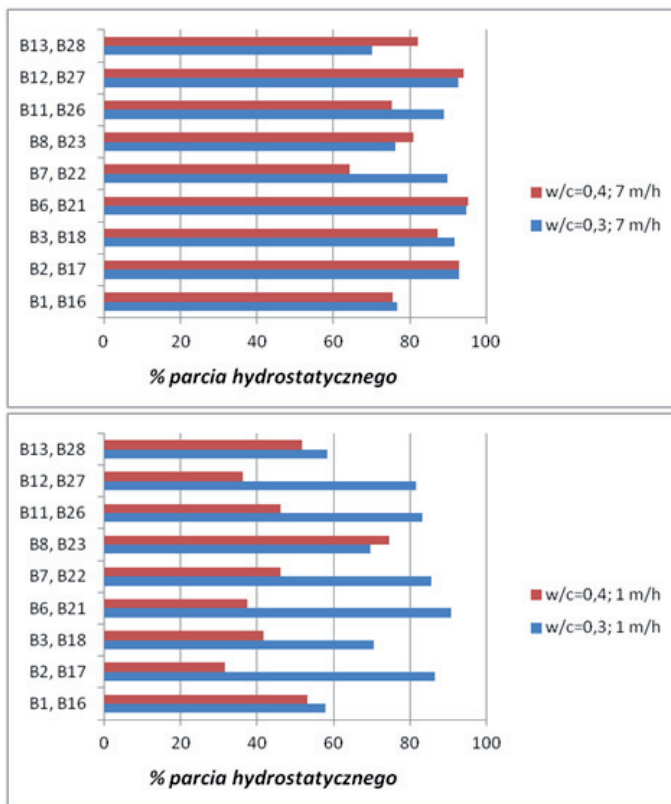
### 3. Wyniki badań i ich omówienie

Parcie na deskowania słupa o wys. 1,2 m z reguły wzrasta liniowo wraz ze wzrostem wysokości słupa mieszanki, jednocześnie jego wielkość zmienia się w stosunkowo szerokim zakresie (rys. 5), jest to spowodowane znaczącymi różnicami w wielkościach parametrów reologicznych badanych mieszanek.

Parcie zależy od prędkości betonowania oraz od właściwości reologicznych mieszanki, jest przy tym zawsze największe na dole deskowania. Znacznie mniejsze parcie na deskowania uzyskano betonując wolno. Parcie na deskowania słupa przy prędkości betonowania 1 m/h waha się w przedziale od 32 do 91% parcia hydrostatycznego, wynosząc średnio 61,5%, natomiast w przy prędkości betonowania 7 m/h w przedziale od 64 do 95%, wynosząc średnio 84% parcia hydrostatycznego. Zwraca uwagę, że przy wolnym betonowaniu tylko w jednym przypadku uzyskano parcie na deskowania większe niż 90% parcia hydrostatycznego.

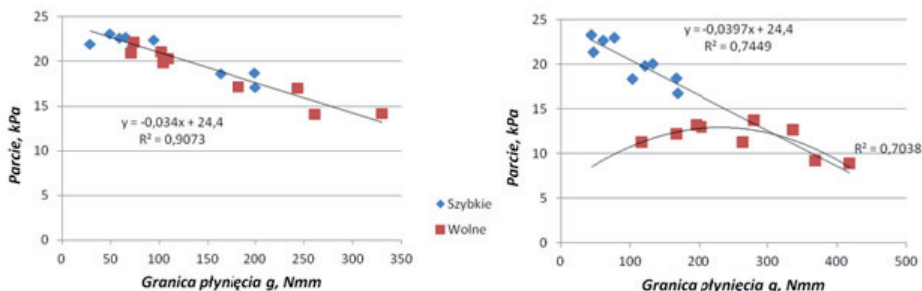
Rysunek 6 przedstawia zależność parcia na deskowania słupa po zakończeniu betonowania na wysokość 1,2 m od granicy płynięcia mieszanki. Niezależnie od prędkości betonowania parcie na deskowanie jest tym mniejsze, im mniejsza jest granica płynięcia. Nie stwierdzono wyraźnego wpływu lepkości plastycznej na parcie mieszanek. W przypadku mieszanek samozagęszczalnych o  $w/c = 0,3$  lepkość plastyczna wynosi od 2800 do 5400 Nmms, średnio 3700 Nmms. Ten poziom lepkości sprawia, że mieszanki o  $w/c$  w teście VSI nie wykazują segregacji i wydzielania wody. Na te negatywne efekty narażone są mieszanki o  $w/c = 0,4$ , których lepkość plastyczna zawiera się w granicach 1000 do 1600 Nmms, średnio 1190 Nmms. Z segregacją i wypieraniem na powierzchnię wody należy wiązać nietypowe zachowanie mieszanki, w kontekście parcia przy betonowaniu szybkim, wielkości parcia przy betonowaniu wolnym. Widoczne jest, że jeśli granica płynięcia jest mniejsza niż 250 Nmm, parcie na deskowania zamiast spodziewanego wzrostu, maleje. Jest ono wtedy znacząco mniejsze od parcia na deskowania mieszanek o podobnej granicy płynięcia  $g$ , lecz niższym  $w/c$ . W tym przypadku zachodząca segregacja i wypieranie wody przyczynia się do utworzenia zwartej, spójnej struktury mieszanki w dolnej części elementu i zmniejszenia w tej części parcia. Efekt ten ujawnia się wyraźniej przy betonowaniu wolnym – znacznie





Rys. 5. Wielkość parcia na deskowania słupa o wys. 1,2 m przy prędkości betonowania 1 i 7 m/h jako % parcia hydrostatycznego dla badanych mieszanek

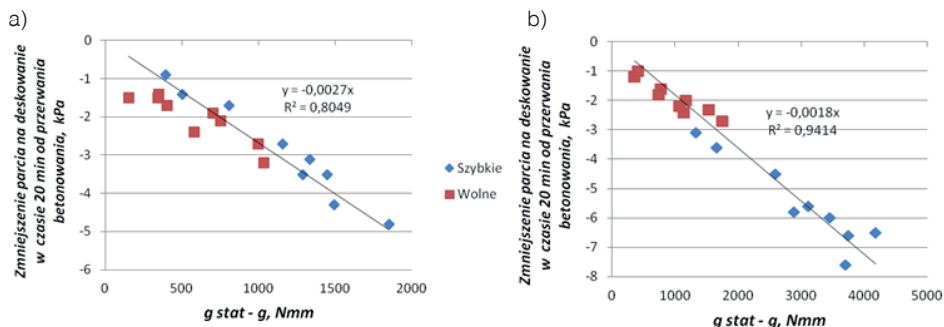
dłuższy jest czas, w którym ten proces może zachodzić. Należy zaznaczyć, że zjawisko to, korzystne z punktu widzenia parcia na deskowania nie jest pożądane ze względu na właściwości mechaniczne betonu oraz wygląd i właściwości powierzchni elementu.



Rys. 6. Zależność parcia na deskowania słupa po zakończeniu betonowania na wysokość 1,2 m od granicy płynięcia g mieszanki; po lewej w/c = 0,3, po prawej w/c=0,4, prędkość betonowania 7 m/h (szybkie) i 1 m/h (wolne)

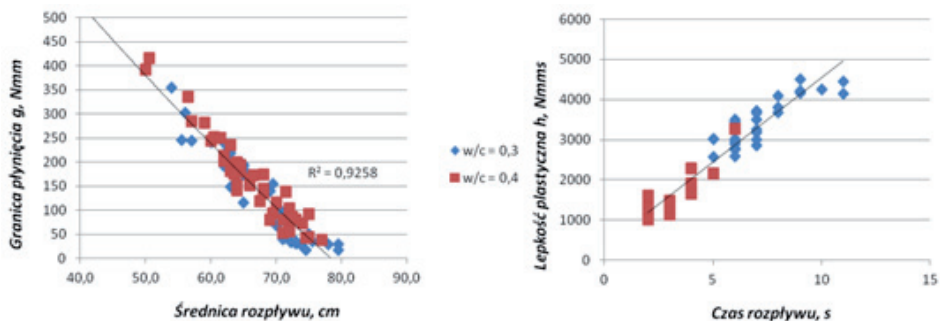
Parcie na deskowania po zakończeniu betonowania mieszkanką samozagęszczalną wyraźnie zmniejsza się w czasie 20 min. Efekt ten występuje dla wszystkich badanych mieszanek. Stwierdzono silną zależność zmniejszania parcia na deskowania od wzrostu granicy płynięcia  $g$  mieszanki pozostawionej w spoczynku, wyrażonego jako różnica wartości statycznej granicy płynięcia  $g_{stat}$  i granicy płynięcia  $g$  pomierzonych w momencie odpowiadającemu zakończeniu betonowania + 20 min (rys. 7). Określone zmniejszenie parcia na deskowania mieszanek o  $w/c=0,3$ , zachodzi przy mniejszej różnicy  $g_{stat} - g$ , można sądzić że przyczyną tego jest większa lepkość mieszanek o niższym  $w/c$ .

Wskaźnik tiksotropii  $A_t$  również może być użyty do szacowania redukcji parcia, ale różnica  $g_{stat} - g$  wykazuje wyższą współzależność ze zmniejszeniem parcia.



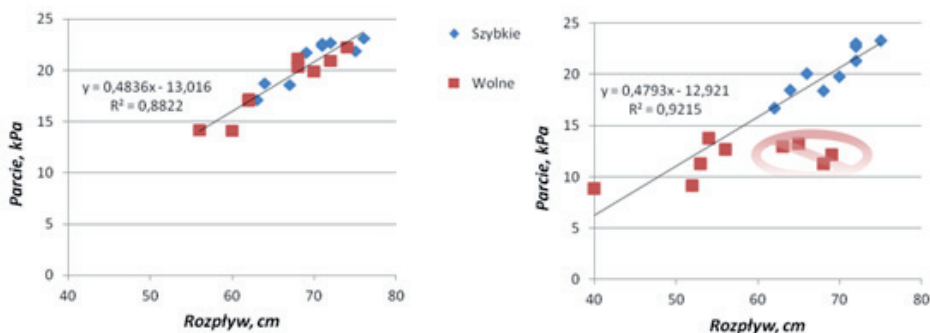
Rys. 7. Redukcja parcia na deskowania słupa w ciągu 20 minut od zakończenia betonowania od statycznej i dynamicznej granicy płynięcia  $g$  mieszanki. (a) Stosunek  $w/c = 0,3$ , (b)  $w/c=0,4$ , prędkość betonowania 7 m/h (szybkie) i 1 m/h (wolne)

Szeroko udokumentowana jest w literaturze zgodność średnicy rozplýwu i granicy płynięcia. Mieszanki o dużej średnicy rozplýwu charakteryzują się mniejszą granicą płynięcia. Lepkość plastyczna dobrze odpowiada czasowi rozplýwu  $T_{500}$ , im mniejsza lepkość tym czas krótszy. Uzyskana w badaniach korelacja pomiędzy granicą płynięcia  $g$  i lepkością plastyczną mieszanki określonymi za pomocą reometru Viskomat XL a rozplýwem i czasem rozplýwu mieszanki określonym za pomocą testu rozplýwu jest przedstawiona na rysunku 8.



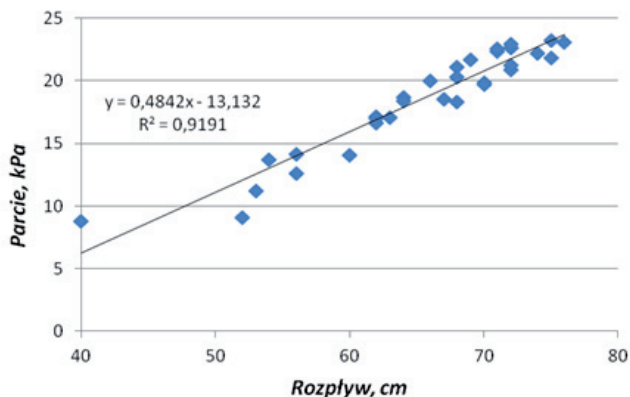
Rys. 8. Korelacja pomiędzy granicą płynięcia  $g$  i lepkością plastyczną mieszanki określonymi za rozplýwem i czasem rozplýwu mieszanki

Współczynnik korelacji  $R^2$  o wartości większej niż 0,9 pozwala wiązać parcie wywierane przez mieszanki z ich średnicami rozplywu. Na rysunku 9 prezentowane są uzyskane zależności. Zwraca uwagę, że po pominięciu mieszanek, w których w trakcie układania mieszanki stwierdzono silną sedymentację, funkcje opisujące zależność parcia na deskowania od rozplywu dla mieszanek o  $w/c = 0,3$  i  $0,4$  są analogiczne.



Rys. 9. Zależność parcia na deskowania słupa po zakończeniu betonowania na wysokość 1,2 m od rozplywu mieszanki; po lewej stosunek  $w/c = 0,3$ , mieszanki o czasie rozplywu  $\gg 2$ ; po prawej stosunek  $w/c = 0,4$ , mieszanki o czasie rozplywu  $\leq 2$  s

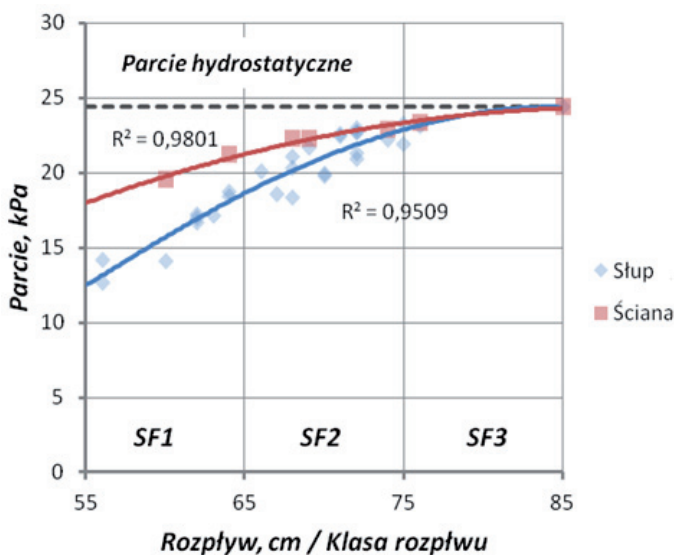
Na rysunku 10 przedstawiono zależność ogólną parcia mieszanek samozagęszczalnych na deskowania słupa o wys. 1,2 w zależności od średnicy rozplywu w momencie zakończenia betonowania. W zależności tej pominięto mieszanki wykazujące silny efekt sedymentacji. Zależność ta charakteryzuje się bardzo dobrym współczynnikiem determinacji  $R^2$ , co pozwala na wykorzystywanie jej do prognozowania parcia na deskowania.



Rys. 10. Zależność parcia na deskowania słupa po zakończeniu betonowania na wysokość 1,2 m od rozplywu mieszanki, stosunek  $w/c = 0,3$  i  $0,4$ ; betonowanie z prędkością 1 m/h – 7 m/h

Wyniki przedstawione wyżej dotyczą słupów, badania obciążeń deskowań przy betonowaniu ścian prowadzą do podobnych wniosków, ale z ich analizy wynika konieczność uwzględnienia modułu powierzchniowego betonowanego elementu przy predykcji

parcia na podstawie średnic rozplywu mieszanki. Moduł powierzchniowy jest rozumiany jako stosunek pola powierzchni deskowania elementu do jego objętości. Na rysunku 11 przedstawiono zbiorcze wyniki badań parcia na deskowania słupa i ściany o wys. 1,2 m, przy betonowaniu wykonywanym z wolną lub szybką prędkością. Wartość rozplywu odnosi się do momentu zakończenia betonowania, który natomiast zależy od prędkości betonowania (ok. 20 i 80 min dla betonowania odpowiednio szybkiego i wolnego). Przedstawione wykresy wykazują zależność parcia od średnicy rozplywu mieszanki oraz rodzaju betonowanego elementu. Wpływ rodzaju elementu jest uwzględniony przez moduł powierzchniowy elementu powierzchniowego betonowanych elementów próbnych. Dla stosowanych w badaniach elementów próbnych słupa i ściany moduł powierzchniowy wynosi odpowiednio:  $20 \text{ m}^{-1}$  oraz  $8 \text{ m}^{-1}$ . Badania wymagają potwierdzenia na większej populacji prób, ale jest widoczne, że deskowanie o mniejszym module powierzchniowym jest bardziej obciążone mieszanką. Efekt ten jest bardzo wyraźny dla klas rozplywu SF 1 i SF 2. W przypadku mieszanek SF 3, ( $R=76-85 \text{ cm}$ ) wpływ modułu powierzchniowego można uznać za pomijalny.



Rys. 11. Zależność parcia na deskowania od właściwości reologicznych mieszanki samozagęszczalnej, betonowanie słupa (moduł powierzchniowy  $20 \text{ m}^{-1}$ ), ściany (moduł powierzchniowy  $8 \text{ m}^{-1}$ ), rozplyw mierzony w momencie zakończenia betonowania na wys. 1,2 m

## 4. Wnioski

Parcie badanych mieszanek betonu samozagęszczalnego na ściany deskowania jest mniejsze niż parcie obliczone z warunku hydrostatycznego. Granica płynięcia może służyć do określania obciążeń wywieranych na ściany deskowania. Mieszanki o niższej granicy płynięcia wywierają większe parcie. Granica płynięcia wykazuje bardzo dobrą korelację ze średnicą rozplywu mieszanki, która jest wyznaczana w teście rozplywu przeprowadzonym według PN-EN 12350-8. To daje możliwość przewidywania parcia w zależności

od klasy rozplywu mieszanki. Parcie będzie większe im większa będzie średnica rozplywu. Zmniejszenie parcia na deskowania jest wynikiem zmian urabialności mieszanki zachodzących w czasie, a będących wynikiem samozagęszczenia, utraty urabialności i sztywnienia tiksotropowego. Mieszankę należy układać z prędkością dostosowaną do zmian właściwości reologicznych, unikając sytuacji w której układanie kolejnych warstw mogłoby zaburzyć uzyskaną w czasie stabilność warstw wcześniej ułożonych (preferowane jest więc układanie z zasobników). Czynniki wpływającymi na zmiany urabialności mieszanki samozagęszczalnej są: właściwości i rodzaj cementu, właściwości i rodzaj superplastyfikatora, stosunek w/c, ilość zaczynu (zaprawy), obecność i ilość dodatków mineralnych, obecność i ilość domieszek chemicznych oraz temperatura. Z uwagi na mnogość dostępnych na rynku cementów i domieszek trudno stawiać jednoznaczne uogólnienia. Przy wykonywaniu kosztownych konstrukcji z betonu samozagęszczalnego warto zainwestować w rozszerzony program badań mieszanek, tak by uzyskać możliwie wiarygodne informacje na temat parcia przez nie wywieranego. Poniesione dodatkowe koszty mogą przynieść oszczędności związane z bezproblemowym przebiegiem procesów związanych z wykonywaniem konstrukcji monolitycznych.

**Badania zostały współfinansowane z projektu nr 0842/B/T02/2011/40 ze środków NCN w Krakowie oraz w ramach projektu „DoktorIS – Program stypendialny na rzecz innowacyjnego Śląska” współfinansowanego przez UE w ramach EFS. Badania zostały wykonane we współpracy z HARSCO Infrastructure Polska Sp. z o.o.**

## Literatura

- [1] Skarendahl A. Billberg P. 2006. Casting of self compacting concrete. RILEM Report 35. RILEM Publication S.A.R.L., str. 42.
- [2] De Schutter G., Bartos P.J.M., Domone P., Gibbs J. 2008. Self compacting concrete. Whittles Publishing, Dunbeath, str. 312.
- [3] Szwabowski J., Gołaszewski J. 2010. Technologia betonu samozagęszczalnego. Kraków Stowarzyszenie Producentów Cementu,
- [4] Tattersall G.H., Banfill P.F.G. 1983 The rheology of Fresh Concrete. PitmanBooks Limited, Boston.
- [5] Szwabowski J. 1987 Urabialność mieszanki betonowej w ujęciu reologicznym. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice
- [6] Szwabowski J. 1999. Reologia mieszanek na spoiwach cementowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- [7] Martinek Wł., „Deskowania,” in XVII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Ustroń, 2002.
- [8] Billberg P., “Form pressure generated by self-compacting concrete,” in 3rd International RILEM Symposium “Self-Compacting Concrete, Proceedings, Reykjavic, Iceland, 17-20 August 2003, pp. 271–280.
- [9] Beitzel M., Beitzel H., and Muller H.S., “Fresh Concrete Pressure on SCC on a Vertical Formwork,” in The Third North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Chicago, November 2008.
- [10] Kwon S.H. and Shah S.P., “Prediction Model For SCC Formwork Pressure,” in The Third North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Chicago, 2008, p. 10.
- [11] Wallevik O., Oosterheld S., and Mueller F.V., “The Influence of Workability Loss and Thixotropy on Formwork Pressure in SCC Containing Stabilizers,” in The Third North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Chicago, 2008, p. 6 CD
- [12] Lange D.A. et al., “Modeling formwork pressure of SCC,” in *Third North American Conference on Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, Chicago, November 2008.

- [13] Liu Y-S., Lange D.A. and Henschen J., "Modeling formwork pressure of SCC.," in *Design, Performance and Use of Self Compacting Concrete (SCC'2009-China)*, RILEM Pro065, 2009, pp. 56–63.
- [14] Gołaszewski J. and Drewniok M., "Dobór deskowań systemowych do wykonania konstrukcji z betonu samozagęszczzonego," *Inżynieria i Budownictwo*, no. 1, pp. 23–26, 2010
- [15] Khayat K.H.(eds), „SCC Formwork pressure, Task 1: Capturing existing knowledge on formwork pressure exerted by SCC,” The National Ready-Mix Concrete Research Foundation and American Concrete Institute, February 13, 2007