

Czynniki kształtujące właściwości reologiczne oraz ślad węglowy mieszanek betonowych do pali wierconych



mgr inż. **ARTUR PASZKOWSKI**, mgr inż. **KAMIL ŚLUSARCZYK**,
Cement Ożarów SA;
inż. **DANIEL KOŹŁOWSKI**, mgr inż. **PAWEŁ JĘDRZEJAK**,
MC-Bauchemie Sp. z o.o.

Współczesne projektowanie betonu oprócz doboru odpowiedniego składu, determinującego jakość i użyteczność wyrobu, powinno również kształtować jego cechy środowiskowe. Odpowiednie proporcje składników oraz nowoczesne rozwiązania materiałowe pozwalają kreować w szerokim spektrum właściwości mieszanki betonowej i betonu stwardniałego, stwarzając również możliwość znacznej redukcji śladu węglowego.

1. Wprowadzenie

Pale wiercone to elementy konstrukcyjne najczęściej stosowane w budownictwie głębokiego fundamentowania. Elementy te są objęte zakresem normy PN-EN 1536 [1], a do ich wykonania wykorzystuje się tzw. metodę kontraktor, polegającą na wbudowaniu mieszanki betonowej przez rurę wlewową. Mieszanka układana jest pod cieczą stabilizującą lub w wodzie.

Ze względu na brak możliwości zagęszczenia znanymi powszechnie sposobami tego typu mieszanka charakteryzuje się bardzo dobrą urabialnością, czyli zdolnością do:

- samozagęszczania pod własnym ciężarem,
- wypełniania wszystkich wolnych przestrzeni w wykopie,
- pokonywania i dokładnego otaczania wszystkich przeszkód (np. zbrojenia).

Duża płynność mieszanki zwiększa ryzyko bleedingu oraz segregacji. Dodatkowo na świeżo ułożoną mieszankę betonową znajdującą się w dolnych warstwach elementu działa parcie pochodzące z górnych warstw mieszanki betonowej, które zwiększa ciśnienie wody, powodując jej migrację do przepuszczalnych

warstw gruntu, tym samym w znaczny sposób zmieniając jej właściwości reologiczne. Stabilność, czyli jej odporność na wyżej wymienione czynniki, jest więc równie ważną własnością mieszanki kontraktorowej co jej urabialność, a końcowa jej jakość będzie efektem kompromisu pomiędzy tymi dwiema sprzecznymi własnościami.

Do opisu wspomnianych cech mieszanki w warunkach budowy wykorzystywane są proste i praktyczne metody badań. Testy te, jak np. badanie konsystencji metodą opadu stożka czy też metodą stolika rozplływowego, nie nadążają jednak za rozwojem technologii, nie rozróżniają parametrów reologicznych mieszanek i przez to są niewystarczające do prawidłowego opisu dosyć skomplikowanych, jak się okazuje, cech mieszanki betonowej. Na przykład różne mieszanki (różne składy, pochodzenie i rodzaj surowców) o stożku 220 mm (pomijając czułość metody) mogą zachowywać się zupełnie inaczej pod względem urabialności i stabilności, co czasem jesteśmy w stanie lepiej ocenić intuicyjnie i organoleptycznie niż przez wartość wspomnianego pomiaru.

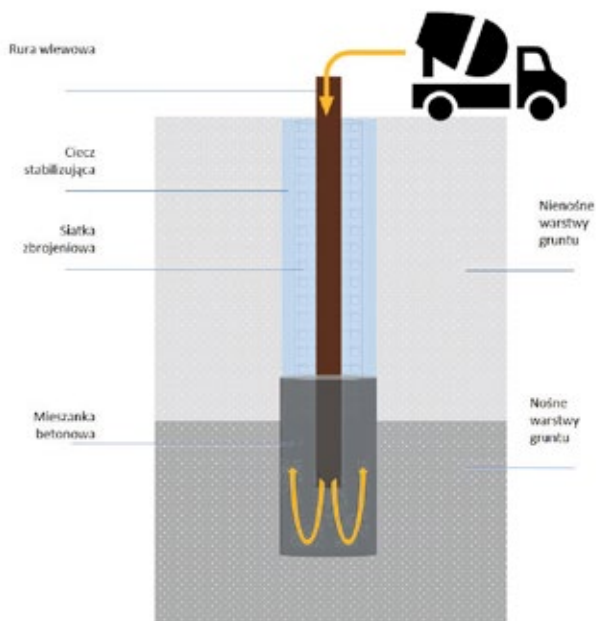
Zapewnienie odpowiedniego poziomu właściwości mieszanki betonowej, ale również ich prawidłowa specyfikacja, wybór metod badawczych i ocena właściwości mogą sprawić pewną trudność. Oprócz zapewnienia odpowiednich cech mieszanki betonowej, podczas projektowania betonu należy również uwzględnić szereg innych czynników, tj. wymagania dotyczące składników oraz właściwości stwardniałego betonu, dostępność surowców, ekonomię rozwiązania, warunki i możliwości produkcyjne, transport, warunki atmosferyczne, w jakich przewidywane jest betonowanie.

Dodatkowo w dobie dzisiejszych wyzwań klimatycznych związanych z ograniczaniem emisji gazów cieplarnianych standardem podczas projektowania betonów powinna stać się optymalizacja opracowywanych rozwiązań pod kątem zrównoważonego rozwoju i cech środowiskowych wyrobów, ze szczególnym naciskiem na ich ślad węglowy.

2. Charakterystyka betonów do pali wierconych

2.1. Właściwości reologiczne mieszanki betonowej

Urabialność i stabilność mieszanki betonowej są ściśle związane z jej właściwościami reologicznymi, tj. granicą płynięcia oraz lepkością plastyczną. Granica płynięcia to naprężenie, które należy osiągnąć, aby zainicjować przepływ betonu.



Ryc. 1. Wbudowanie betonu kontraktorowego przez rurę wlewową

Lepkość plastyczna jest miarą oporu tego przepływu i zależy od oddziaływania na siebie cząstek oraz sił tarcia występujących pomiędzy zaczynem i kruszywem. Wraz ze wzrostem granicy płynięcia z reguły wzrasta również stabilność mieszanki i maleje jej zdolność do płynięcia, samozagęszczania i samopoziomowania [3]. Istnieją jednak sposoby, aby w pewnych zakresach zwiększać płynność mieszanki, nie zmieniając lub poprawiając jej stabilność.

Stabilność betonu jest definiowana jako zdolność do zatrzymywania wody (filtracja i bleeding) i odporność na segregację statyczną [3]. Filtracja, bleeding i segregacja betonu odbywa się podczas jego tężenia. Jest to szczególnie istotne w przypadku betonu o dłuższym czasie wiązania, z długim czasem utrzymywania urabialności oraz podczas wylewania dużych elementów na dużych głębokościach.

Stabilność betonu może bezpośrednio wpływać na jakość i zwartość elementu, ale także pośrednio na mechanizmy płynięcia betonu. W przypadku, kiedy właściwości reologiczne zostaną zmienione (na skutek utraty wody) przed końcem „wędrówki” betonu, zaburzy to jego mechanizm przepływu, w skrajnych przypadkach powodując zator i zatrzymanie płynięcia.

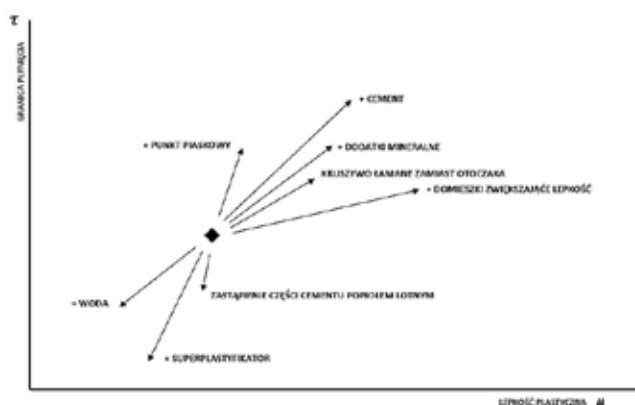
Istnieją dwa mechanizmy utraty wody ze świeżego betonu: filtracja i bleeding. W praktyce zawsze następuje utrata wody ze świeżego betonu i prawdopodobnie wynika to z połączenia obu mechanizmów. Biorąc pod uwagę, że segregacji nie można całkowicie wyeliminować, konieczne jest zrozumienie obu mechanizmów w celu ograniczenia tych zjawisk już na etapie projektowania składu mieszanki.

Bleeding świeżego betonu jest specjalną formą segregacji, która następuje po zatrzymaniu płynięcia mieszanki betonowej. Różnice w ciężarze właściwym składników mieszanki betonowej powodują zwiększenie ciśnienia wody w świeżym betonie, które po przekroczeniu ciśnienia hydrostatycznego prowadzi do pionowego gradientu hydraulicznego wywołującego ruch wody w zaczynie w kierunku powierzchni betonu. Przepływ wody, jego wielkość i częstotliwość zmieniają się w zależności od różnych czynników [3]. Stopień, w jakim bleeding wystąpi w głębokich fundamentach, również zależy od wielu czynników, w tym m.in. od zawartości wody w stosunku do cząstek drobnych, od rozkładu cząstek kruszywa w stosie okruszowym, wydajności domieszek w czasie, całkowitej wysokości betonu i czasu tężenia betonu.

Ze zjawiskiem filtracji mamy do czynienia, kiedy świeży beton w głębokich fundamentach podlega dużym ciśnieniom związanym z parciem mieszanki betonowej z wyższych poziomów, które z kolei prowadzą do wysokiego ciśnienia wody w porach świeżego betonu, rosnącego wraz z głębokością. Ciśnienie wody w porach mieszanki może być znacznie wyższe niż ciśnienie wody w otaczającej beton ziemi. Powstający wówczas gradient hydrauliczny prowadzi do wypływu wody z betonu, co może skutkować „usztwieniem” betonu.

Filtracja może być istotna np. w bardzo głębokich fundamentach, gdzie po zakończeniu betonowania na skutek utraty wody w miejscach przepuszczalnych warstw gleby beton, „usztwinią” się, spowoduje problemy w umieszczeniu w nim siatki / kolumny zbrojeniowej.

Segregacja z kolei to proces, który zachodzi w betonach z względnie niską granicą płynności na skutek opadania dużych i stosunkowo ciężkich ziaren kruszywa na dół poprzez lżejszą część zaczynu. Prowadzi to do nierównomiernego rozłożenia się cząstek w betonie.



Ryc. 2. Niektóre z czynników kształtujących właściwości reologiczne mieszanki betonowych [2, 24, doświadczenia własne]

Istnieje wiele metod badań stabilności mieszanki betonowej, m.in. [4–10].

Na właściwości reologiczne betonu wpływ mają wszystkie składniki mieszanki betonowej, ich ilość i proporcje, m.in. ilość, rodzaj, uziarnienie / rozdrobnienie cementu, dodatki mineralne, kruszywa, ich kształt oraz wielkości ziaren, stosunek woda / cement oraz rodzaje i dawki domieszek chemicznych. Popiół lotny krzemionkowy jest generalnie bardzo ważnym narzędziem służącym do sterowania właściwościami reologicznymi mieszanki betonowej. Domieszka zwiększająca lepkość mieszanki wraz ze zwiększeniem dozowania superplastyfikatora, aby zniwelować efekt działania stabilizatora, powoduje podwyższenie lepkości przy jednoczesnej poprawie płynności. Cementy o większej powierzchni właściwej również poprawiają stabilność mieszanki, a w niektórych przypadkach także jej urabialność.

2.2. Ślad węglowy betonów

Intensyfikowanie działań zapobiegających negatywnym zmianom klimatu dotyczy dziś każdego obszaru życia i działalności człowieka. Działania te to m.in. ambitne plany ograniczające emisję gazów cieplarnianych (CO_{2eq}).

Beton jest najpowszechniej stosowanym, tuż po wodzie, materiałem. Ilość wyprodukowanego betonu wynosi dziś tyle, co masa wszystkich innych razem wziętych materiałów wyprodukowanych przez człowieka [11]. Ceną popularności tego unikatowego materiału jest wysoka całkowita skumulowana emisja CO_2 , widoczna w przedmiotowych „statystycznych słupkach”, pomimo że beton sam w sobie jest materiałem budowlanym o stosunkowo niskim wskaźniku emisyjności – według [12] jest to 132 kg CO_{2eq}/t (co daje ok. 310 kg CO_{2eq}/m^3 ; dane dotyczą zakresu A1–A3 według EN 15804). Tak więc to nie tyle sam materiał, co skala jego stosowania mocno determinuje działania mające na celu ograniczenie w nim emisji CO_{2eq} .

Jednym z popularniejszych markerów emisji gazów cieplarnianych materiałów jest ślad węglowy, zdefiniowany w [13] jako „suma emitowanych i pochłanianych przez produkt gazów cieplarnianych, wyrażana ekwiwalentem CO_2 i bazująca na ocenie cyklu życia”. Ekwiwalent oznacza, że symbol CO_{2eq} reprezentuje nie tylko emisję CO_2 , ale również emisję innych gazów cieplarnianych odniesionych odpowiednio do emisji CO_2 . Ocena cyklu życia wiąże się z identyfikacją obszarów podczas całego cyklu życia betonu, w których dochodzi do emisji (bądź pochłaniania) CO_{2eq} . Dla betonu te obszary to m.in. wydobywanie, przygotowanie oraz transport surowców do betoniarni, produkcja

mieszanki betonowej, transport na plac budowy, etap użytkowania (i związana z nim sekwestracja CO₂ w procesie karbonatyzacji), rozbiórka i recykling. Próbując zredukować emisję CO_{2eq} betonu, powinniśmy zająć się obszarem, który w największym stopniu decyduje o jej wielkości – ilością i rodzajem zastosowanego cementu. Jednym ze sposobów optymalizacji rozwiązań recepturowych pod kątem cech środowiskowych betonu może być zastosowanie cementu o niskim śladzie węglowym. Najbardziej emisyjny proces podczas produkcji cementu, odpowiadający za 63% emisji CO₂ w cementowni (na podstawie danych SPC), to rozkład termiczny węgla wapnia CaCO₃, podstawowego surowca do produkcji klinkieru. Głównym działaniem determinującym niskoemisyjność cementów jest więc ograniczenie klinkieru w składzie cementu i zastąpienie go innym, nieklinkierowym składnikiem głównym (np. żużlem wielkopieczowym, popiołem lotnym czy kamieniem wapiennym).

Drugim sposobem na ograniczenie śladu węglowego betonu jest redukcja ilości cementu w 1 m³ betonu. Redukcja cementu z równoczesnym uzyskaniem odpowiednich parametrów reologicznych, wytrzymałościowych i trwałościowych betonu jest możliwa w przypadku odpowiedniego zastosowania aktywnych dodatków mineralnych, redukcji ilości wody za pomocą domieszek chemicznych czy zastosowania cementów o wysokich parametrach.

Oczywiście największy efekt zapewni połączenie obu opisanych sposobów – takie działanie jest jednak możliwe tylko wówczas, kiedy użyty cement ma niski ślad węglowy, zachowując przy tym doskonałe parametry, pozytywnie wpływające na wyspecyfikowane właściwości betonu i mieszanki betonowej.

Takimi unikatowymi parametrami zarówno mechanicznymi, jak i reologicznymi charakteryzują się cementy z dodatkiem żużla wielkopieczowego produkowane w Cement Ożarów SA. Produkcja tych cementów odbywa się przy zastosowaniu wysokiej jakości surowców, odpowiednio aktywowanych podczas procesu mielenia w efektywnych młynach misowo-rolowych, w których materiał jest ścierany i dodatkowo (w odróżnieniu od młyna kulowego) zginiatany.

2.3. Wymagania normowe dla mieszanek betonowych do pali wierconych

Wymagania dotyczące betonów palowych wykonanych według normy PN-EN 1536 są zawarte w załączniku D normy [14]. Norma stawia ogólne wymagania i zalecenia odnośnie do surowców oraz wymienia cechy mieszanki betonowej, jakie powinny być uwzględnione w specyfikacji technicznej oraz projekcie, m.in. wysoką odporność na segregację, odpowiednią plastyczność i dobrą spoiistość, odpowiednią zdolność do rozptywu oraz zagęszczania pod wpływem własnego ciężaru.

Tylko dla niektórych właściwości norma podaje bezpośrednie wymagania (tab. 1).

Tab. 1. Wymagania dla betonu układanego w cieczy stabilizującej za pomocą rury wlewowej [14]

| | |
|------------------------------|----------|
| Średnica rozptywu wg [18] | 600 mm |
| Opad stożka wg [17] | 200 mm |
| Zawartość cementu: | ≥ 375 kg |
| Zawartość frakcji ≤ 0,125 mm | ≥ 400 kg |

Wszelkie cechy mieszanki betonowej związane z jej stabilnością są podane w sposób pośredni – przez wymagania dotyczące składu

betonu. Tak więc pomimo licznych możliwości pozwalających zapewnić odpowiednie właściwości mieszanki betonowej, sposoby ich spełnienia są częściowo narzucone przez wymaganą ilość cementu (co najmniej 375 kg/m³) i wymaganą ilość frakcji drobnych. Ograniczenia co do składu powodują dosyć szablonowe podejście do projektowania, a efektem mogą być często nieekologiczne, nieekonomiczne, a czasem źle technologicznie rozwiązania. W niektórych krajach UE wprowadzono odpowiednie rozszerzenia w postaci formalnie wiążących specyfikacji technicznych, w których to m.in. zwiększono zakres możliwych rozwiązań materiałowych [15, 16].

3. Część badawcza

3.1. Cel, założenia oraz program badań

Celem części badawczej było sprawdzenie wpływu rodzaju cementu (jego składu i właściwości, m.in. uziarnienia), proporcji składu spoiwa (cement / popiół lotny) oraz domieszki zwiększającej lepkość na właściwości reologiczne mieszanki betonowej i właściwości stwardniałego betonu przeznaczonego do pali wierconych betonowanych w warunkach mokrych.

Oprócz właściwości mieszanki betonowej oraz betonu sprawdzono wpływ składu jakościowego i ilościowego betonu na jego ślad węglowy. Zaprojektowano dziewięć mieszanek betonowych, wykorzystując trzy rodzaje cementu. Testy mieszanki betonowej dotyczyły konsystencji badanej metodą opadu stożka [17], metodą stolika rozptywowego [18] oraz metodą rozptywu stożka [19]. Stabilność mieszanki wyrażaną przez filtrację badano za pomocą prasy Bauera [9] według wskaźnika VSI [4].

Stwardniały beton poddano badaniom wytrzymałości na ściskanie według [20] po 7, 28, 56 i 90 dniach, nasiąkliwości według [21] po 28 dniach, głębokości penetracji wody według [22] po 28 dniach.

Sprawdzona została również przydatność metod określenia konsystencji dla mieszanek wbudowywanych przez rurę wlewową.

Ślad węglowy obliczono, opierając się na analizie cyklu życia betonu według PN-EN 15804. Na potrzeby artykułu obliczenia objęły zakres A1–A3 (*from gradle to gate*), pomijając takie etapy cyklu życia betonu, jak transport na budowę, użytkowanie, karbonatyzacja czy recykling betonu. Do wyliczeń wykorzystano narzędzia [23] oraz źródła własne. Założenia, jakimi posługiwano się w wyliczeniach, to m.in. transport cementu – 200 km, transport popiołu lotnego krzemionkowego – 100 km, transport piasku – 20 km, transport kruszywa – 100 km, transport domieszek – 300 km. Wskaźnik emisyjności dla popiołu lotnego i żużla wielkopieczowego przyjęto na podstawie alokacji ekonomicznej.

3.2. Projektowanie składów mieszanek betonowych

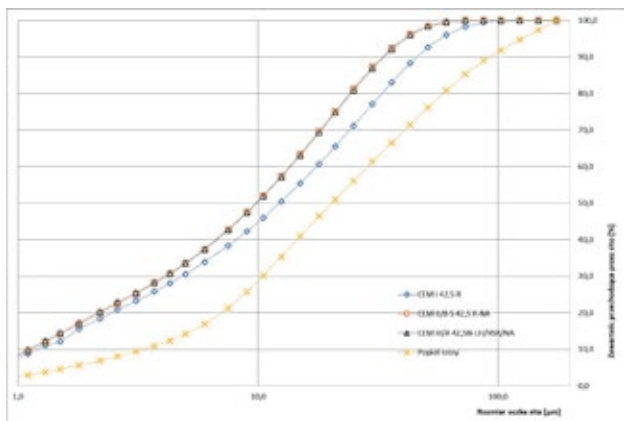
Do zaprojektowania mieszanek betonowych użyto cementów z oferty Cement Ożarów SA: CEM I 42,5 R, CEM II/B-S 42,5 R-NA oraz CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA.

Popiół lotny krzemionkowy charakteryzował się udziałem niespalonego węgla na poziomie 4,4%. W celu modyfikacji właściwości mieszanek betonowych użyto domieszek firmy MC-Bauchemie: superplastyfikatora na bazie eterów polikarboksylowych MC-PowerFlow 5695 oraz domieszki modyfikującej lepkość / zwiększającej wiązliwość wody – Centrament Stabi M15. Kruszywo stanowiła mieszanka kruszyw naturalnych zwirowych, frakcji 0/2 2–8 i 8–16.

Mieszanki betonowe były projektowane do zastosowania ich do układanych w wodzie i / lub cieczy stabilizującej. Skład części

Tab. 2. Normowe dopuszczalne zawartości składników głównych (% zawartości w stosunku do sumy składników głównych i drugorzędnych)

| | Klinkier [%] | Żużle wielkopiecowy [%] |
|--------------------------|--------------|-------------------------|
| CEM I 42,5 R | 95–100 | – |
| CEM II/B-S 42,5 R-NA | 65–79 | 21–35 |
| CEM III/A 42,5 LH/HSR/NA | 35–64 | 36–65 |

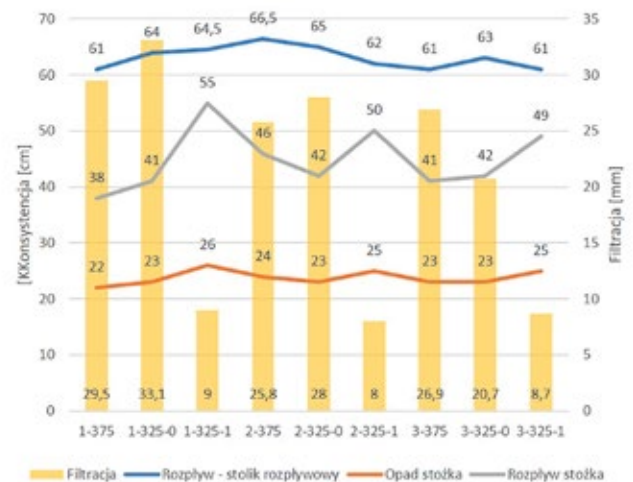


Ryc. 3. Krzywe uziarnienia spoiw użytych w badaniach

mieszanek betonowych uwzględnia wymagania normowe [14], a w niektórych z nich zastąpiono część cementu dodatkiem popiołu lotnego, wykorzystując zasady opisane w [15]. Do części mieszanek dodawano domieszkę modyfikującą lepkość. Ilość wody, stos okruszowy, ilość frakcji < 0,125 mm był we wszystkich mieszankach na stałym poziomie. Starano się uzyskać rozptyw na stoliku rozptywowym w granicach 600–650 mm. Konsystencję regulowano ilością superplastyfikatora.

3.3. Analiza i omówienie wyników badań

Wyniki (ryc. 4) wskazują, że największy wpływ na ograniczenie zjawiska filtracji wody w mieszance betonowej ma użycie domieszki zwiększającej lepkość. Mieszanki zawierające Centrament Stabi M15 wykazują najwyższą odporność na filtrację wody, ale również charak-



Ryc. 4. Wyniki konsystencji mierzonej różnymi metodami oraz wyniki filtracji wody

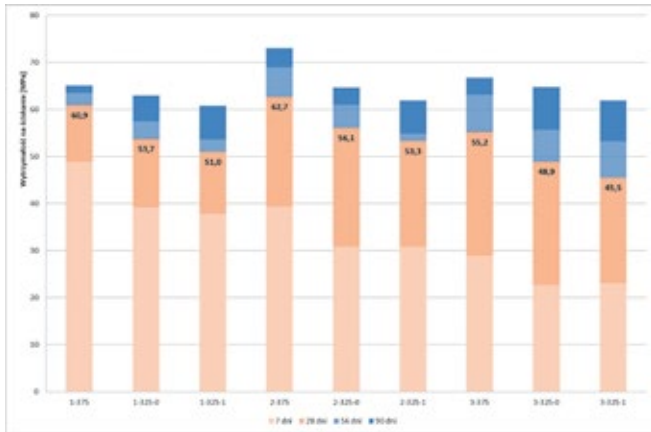
teryzują się największymi rozptywami stożka. Cementy z dodatkiem żużla CEM II/B-S 42,5 R-NAS oraz CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA ze względu na większe rozwinięcie powierzchni powodują zmniejszenie filtracji wody oraz, co ciekawe, obniżają zapotrzebowanie na superplastyfikator. Większy udział popiołu lotnego krzemionkowego powoduje obniżenie lepkości mieszanki, co przekłada się na nieznaczny wzrost filtracji wody i mniejsze użycie superplastyfikatora.

Na podstawie otrzymanych wyników możemy stwierdzić brak zależności pomiędzy wynikami badań konsystencji określonej różnymi metodami, co dobrze obrazują wartości konsystencji dla receptur 1-325-0 i 1-325-1. Zupełnie różne mieszanki ze względu na różną lepkość plastyczną inaczej zachowujące się podczas działania na nie sił zewnętrznych (grawitacyjnych i wywołanych opadaniem stożka rozptywowego) w efekcie dają ten sam wynik rozptywu na stoliku – 640 i 645 mm – i zupełnie różny wynik rozptywu stożka – 410 i 550 mm. Ponadto wysoko urabialne mieszanki do pali przy silnie działających superplastyfikatorach bardziej wykazują tendencję do „rozptywu” niż do „opadu”.

Na podstawie wyników przedstawionych na rycinach 5 i 6 możemy stwierdzić, że zastosowanie cementów z dodatkiem żużla wielkopiecowego wpływa korzystnie na wszystkie badane właściwości stwardniałego betonu. Zgodnie z przewidywaniami dodatek popiołu lotnego

Tab. 3. Składy oraz charakterystyka składu mieszanek betonowych

| Oznaczenie receptury | CEM I 42,5 R | | | CEM II/B-S 42,5 R-NA | | | CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA | | |
|-----------------------------------|--------------|---------|---------|----------------------|---------|---------|----------------------------|---------|---------|
| | 1-375 | 1-325-0 | 1-325-1 | 2-375 | 2-325-0 | 2-325-1 | 3-375 | 3-325-0 | 3-325-1 |
| Cement | 375 | 325 | 325 | 375 | 325 | 325 | 375 | 325 | 325 |
| Popiół lotny | 25 | 75 | 75 | 25 | 75 | 75 | 25 | 75 | 75 |
| Woda | 186 | 186 | 186 | 186 | 186 | 186 | 186 | 186 | 186 |
| Piasek 0/2 | 733 | 724 | 724 | 728 | 720 | 720 | 726 | 718 | 718 |
| Żwir 2/8 | 489 | 483 | 483 | 486 | 480 | 480 | 484 | 479 | 479 |
| Żwir 8/16 | 524 | 517 | 517 | 520 | 514 | 514 | 519 | 513 | 513 |
| MC-PowerFlow 5695 | 2,8 | 2,6 | 3,7 | 2,3 | 1,9 | 2,9 | 1,9 | 1,8 | 2,8 |
| Centrament Stabi M15 | – | – | 1,3 | – | – | 1,3 | – | – | 1,3 |
| Punkt piaskowy [% m] | 42,0 | 42,0 | 42,0 | 42,0 | 42,0 | 42,0 | 42,0 | 42,0 | 42,0 |
| Zawartość frakcji < 0,125 mm [kg] | 421 | 421 | 421 | 421 | 421 | 421 | 421 | 421 | 421 |
| w/c | 0,5 | 0,57 | 0,57 | 0,5 | 0,57 | 0,57 | 0,5 | 0,57 | 0,57 |
| w/(kx0,4PL) | 0,48 | 0,52 | 0,52 | 0,48 | 0,52 | 0,52 | 0,48 | 0,52 | 0,52 |
| w/(kx0,7PL) | 0,47 | 0,49 | 0,49 | 0,47 | 0,49 | 0,49 | 0,47 | 0,49 | 0,49 |

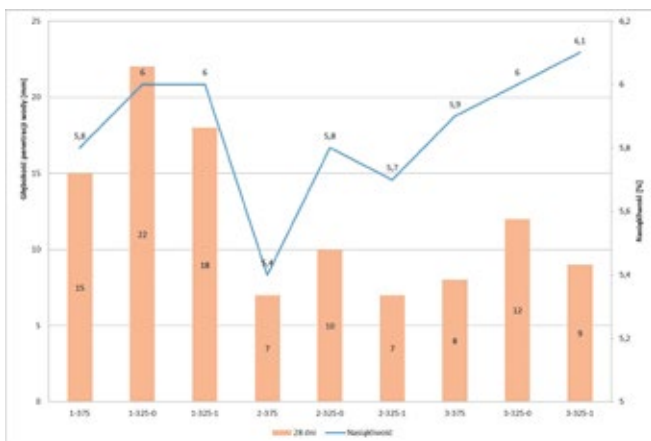


Ryc. 5. Wytrzymałość na ściskanie badanych betonów

krzemionkowego oraz zastosowanie cementów z grupy CEM II i CEM III powoduje zmianę dynamiki narastania wytrzymałości betonów. Betony, w których w stosunku do betonu referencyjnego (1-375) zastąpiono część cementu CEM I 42,5 R popiołem lotnym krzemionkowym (1-325-0 i 1-325-1), wykazują niższe wartości wytrzymałości na ściskanie po 7 i 28 dniach, ale na skutek reakcji pucolanowych ta różnica zmniejsza się w znacznym stopniu po 56 i 90 dniach. Zastąpienie CEM I 42,5 R cementem CEM II/B-S 42,5 R-NA powoduje poprawę wytrzymałości na ściskanie, a wraz z upływem czasu dojrzewania próbek różnica wytrzymałości zwiększa się na korzyść CEM II/B-S 42,5 R-NA. Zastąpienie CEM I 42,5 R cementem hutniczym CEM III/A 42,5-LH/HSR/NA powoduje obniżenie wytrzymałości do 28 dnia dojrzewania, wyrównanie tych wytrzymałości po upływie 56 dni dojrzewania oraz lekką ich poprawę w okresie dojrzewania wynoszącym 90 dni. Zastosowanie domieszki Centrament Stabi M15 obniża wytrzymałość na ściskanie betonów, co może być spowodowane większą lepkością mieszanek, wpływającą na zwiększoną zawartość powietrza spowodowaną gorszym odpowietrzaniem podczas formowania.

Zastosowanie cementów z dodatkiem żużla wielkopieczowego powoduje obniżenie głębokości penetracji wody. Należy jednak zaznaczyć, że szczelność wszystkich badanych betonów (wyrażona głębokością penetracji wody) jest bardzo wysoka. Betony na bazie CEM II/B-S 42,5 R-NA charakteryzują się najniższą nasiąkliwością.

Zgodnie z przypuszczeniami najmniejsze wartości śladu węglowego (ryc. 7) uzyskały betony, w których zastosowano cementy niskoemisyjne oraz obniżono ich zawartość w 1 m³. Zastępując CEM I 42,5 R cementem CEM II/B-S 42,5 R-NA, zredukowano o 22% emisję CO_{2eq}, a dodatkowo zastępując część cementu



Ryc. 6. Wyniki badań trwałościowych po 28 dni dojrzewania



Ryc. 7. Ślad węglowy badanych betonów oraz jego kształtowanie na skutek zmian proporcji i rodzaju spoiwa

krzemionkowym popiołem lotnym, CO_{2eq}, zredukowano o kolejne 5%, do poziomu 27% (87 kg CO_{2eq}/m³). Zastępując CEM I 42,5 R cementem CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA, obniżono emisję CO_{2eq} o 35%, przy dodatkowym zastąpieniu części cementu popiołem lotnym redukcja CO_{2eq} wyniosła 39% (123 kg CO_{2eq}/m³). Należy zwrócić uwagę, że betony te uzyskały bardzo wysokie parametry zarówno w zakresie właściwości mieszanki betonowej, jak i właściwości stwardniałego betonu.

4. Podsumowanie i wnioski

1. Kluczowe właściwości charakteryzujące mieszankę betonową przeznaczoną do wykonania pali wierconych metodą kontraktor to jej szeroko rozumiana urabialność i – w przeciwieństwie do betonów zwykłych – również stabilność, rozumiana jako zdolność do zatrzymywania wody (filtracja i bleeding) i odporność na segregację. Istnieje wiele sposobów modyfikacji tych właściwości, a wpływ niektórych z nich został opisany w niniejszej pracy.

2. Zastosowanie cementów portlandzkiego żużlowego CEM II/B-S 42,5 R-NA i hutniczego CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA (produkcji Cement Ożarów SA) ze względu na większe rozwinięcie powierzchni powoduje zmniejszenie filtracji wody, najprawdopodobniej na skutek zwiększenia oddziaływań pomiędzy cząsteczkami i związanym z tym zwiększeniem lepkości mieszanki betonowej. Ponadto mieszanki na bazie wymienionych spoiw charakteryzują się lepszą urabialnością, obniżając zapotrzebowanie na superplastyfikator, co możemy tłumaczyć wysoką różnorodnością ziaren cementu.

3. Domieszka stabilizująca Centrament Stabi M15 w połączeniu z efektywnym superplastyfikatorem jest bardzo dobrym narzędziem do sterowania właściwościami reologicznymi mieszanki betonowej. Odpowiednie użycie wspomnianych domieszek pozwala podnieść lepkość i tym samym zwiększyć stabilność, zachowując bardzo wysoką płynność mieszanki betonowej.

4. Jedną ze skutecznych metod obniżania śladu węglowego betonów jest zastosowanie cementów o obniżonej emisji CO_{2eq} . Dodatkowa redukcja CO_{2eq} jest możliwa w przypadku użycia cementów charakteryzującymi się wysokimi parametrami umożliwiającymi obniżenie ich zawartości w 1 m³ betonu przy zachowaniu wymaganych właściwości betonów. Należy zwrócić uwagę, że składniki główne cementu, takie jak żużel wielkopiecowy, ze względu na swój hydrauliczny charakter będą stwarzały optymalne możliwości wykorzystania popiołu lotnego krzemionkowego i tym samym redukcji wskaźnika emisji CO_{2eq} .

5. Zastosowanie popiołu lotnego krzemionkowego powoduje obniżenie lepkości mieszanki betonowej oraz poprawia jej urabialność. Przy odpowiednich modyfikacjach recepturowych jest możliwe użycie popiołów lotnych krzemionkowych w większych niż przewiduje norma ilościach, poprawiając przy tym większość parametrów zarówno mieszanki betonowej, jak i stwardniałego betonu. Dla przykładu można tu przywołać jeszcze raz powyższe wyniki badań. Betony 2-325-0 (CEM II/B-S 42,5 R-NA 325 kg i popiół 75 kg) i 3-325-0 (CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA 325 kg i popiół 75 kg) osiągnęły ten sam poziom wytrzymałości na ściskanie i ten sam poziom parametrów trwałościowych co beton odniesienia (1-375 – CEM I 42,5 R, 375 kg i 25 kg popiołu), posiadając przy tym lepszą stabilność, lepszą płynność, charakteryzując się zdecydowanie niższym śladem węglowym, będąc tańsze w produkcji. Mimo to stosowanie takich betonów wiąże się z pewnymi formalnymi przeszkodami w postaci ograniczeń w zakresie składu mieszanek betonowych (załącznik D normy PN-EN 206+A1).

6. Zastosowanie cementów żużlowych powoduje poprawę właściwości trwałościowych betonu, jak w przypadku głębokości penetracji wody i nasiąkliwości (dla betonów na bazie CEM II/B-S 42,5 R-NA). Faktem również jest, że betony na bazie cementów z żużlem wielkopiecowym są bardziej odporne na korozję wywołaną wieloma czynnikami środowiskowymi, m.in. agresją chemiczną (często występującą w środowisku ekspozycji pali) czy korozję wywołaną destrukcyjnym działaniem alkaliów. Wyższa odporność betonów jest spowodowana obecnością posiadającego właściwości hydrauliczne żużla wielkopiecowego, który ogranicza zawartość podatnych na korozję chemiczną faz i składników występujących w betonie oraz dodatkowo uszczelnia strukturę betonu, tworząc ją mniej dostępną dla agresywnych mediów.

7. Aby zapewnić projekt i produkcję mieszanki betonowej do pali wierconych o prawidłowych właściwościach, w pierwszej kolejności należy skupić się na poprawnej specyfikacji właściwości mieszanki. Spośród powszechnie stosowanych metod do badania konsystencji mieszanki betonowej przeznaczonej do wykonania pali metodą kontraktor najlepszą z nich wydaje się metoda rozptywu stożka [17]. Wymagane właściwości i metody badań dla mieszanek powinny być różne i zależne od specyfiki danych robót palowych, dlatego też ogólne zalecenia normowe w tym zakresie są często niewystarczające, ale również często nakładają niepotrzebne ograniczenia.

Literatura

- [1] PN-EN 1536+A1:2015-08 Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Pale wiercone.
- [2] Gołaszewski J., Szwabowski J.: *Technologia betonu samozagęszczalnego*. Polski Cement. Kraków 2010.
- [3] EFFC/DFI Concrete Task Group: *Guide to Tremie Concrete for Deep Foundations*, second edition, 2018.
- [4] ASTM C1611 / C1611M-18 *Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete*.
- [5] ASTM C1610/C1610M *Standard Test Method for Static Segregation of Self-Consolidating Concrete Using Column Technique*.
- [6] AASHTO R81 *Standard Practice for Static Segregation of Hardened Self-Consolidating Concrete (SCC) Cylinders*.
- [7] PN-EN 12350-11 *Badania mieszanki betonowej*. Cz. 11. Beton samozagęszczalny. Badanie segregacji sitowej.
- [8] PN EN 480- 4 *Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Metody badań. Oznaczanie ilości wody wydzielającej się samoczynnie z mieszanki betonowej*.
- [9] Badanie filtracji wody metodą prasy Bauera.
- [10] CRD C61-89A *Test method for determining the resistance of freshly-mixed concrete to washing out in water*. US Army Experiment Station, Handbook for Concrete, Vicksburg, Mississippi, 1989, p. 3.
- [11] Elhacham E. et al.: *Global Human-Made Mass Exceeds All Living Biomass*. „Nature” 2020, Vol. 588, pp. 442–444.
- [12] *Greenhouse Gas Reporting: Conversion Factors 2021* (online). UK, Department for Business, Energy & Industrial Strategy, 2 June 2021, last updated 24 January 2022. Dostępny w Internecie: <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2021> (dostęp 16 lutego 2022).
- [13] ISO 14067:2018 *Greenhouse gases – Carbon footprint of products. Requirements and guidelines for quantification*.
- [14] PN-EN 206+A1:2016-12 *Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*.
- [15] DIN 1045-2:2008-08 *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 2. Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1*.
- [16] CEN/TR 16639:2014 *Use of k-value concept, equivalent concrete performance concept and equivalent performance of combinations concept*.
- [17] PN-EN 12350-2 *Badania mieszanki betonowej*. Cz. 2. Badanie konsystencji metodą opadu stożka.
- [18] PN-EN 12350-5 *Badania mieszanki betonowej*. Cz. 5. Badanie konsystencji metodą stolika rozptywowego.
- [19] PN-EN 12350-8 *Badania mieszanki betonowej*. Cz. 8. Beton samozagęszczalny. Badanie metodą rozptywu stożka.
- [20] PN-EN 12390-3 *Badania betonu*. Cz. 3. Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
- [21] PN-88/B-06250 *Beton zwykły*.
- [22] PN-EN 12390-8 *Badania betonu*. Cz. 8. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem.
- [23] GCCA's Industry EPD Tool for Cement and Concrete.
- [24] Szwabowski J., Śliwiński J.: *Betony samozagęszczalne*. „Budownictwo Technologie Architektura” 2003, nr 2, s. 42–45.