

Analiza badań kompozytu gruntowo-cementowego formowanego innowacyjnym systemem w głębkiego mieszania gruntu

Analysis of research on a soil-cement composite formed with an innovative system of deep soil mixing

mgr inż. Małgorzata Jończyk-Szostek, dr inż. Piotr Kanty, mgr inż. Jakub Saloni, mgr inż. Karolina Trybocka, Menard Sp. z o.o., dr inż. Jarosław Rybak (ORCID: 0000-0002-7267-1044), Politechnika Wrocławska

DOI 10.5604/01.3001.0053.8514

Streszczenie: W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych próbek pozyskanych z zarobów próbnych oraz z kolumn cementowo-gruntowych wykonanych na poletku badawczym w ramach realizowanego projektu badawczo-rozwojowego. We wprowadzeniu przedstawiono motywację badań oraz cele, jakie przyświecały układowi programu badawczego. Przedstawiono ogólnie uwarunkowania geotechniczne, założoną wstępnie metodologię pobierania próbek kompozytu gruntowo-cementowego i finalnie metodologię badań wytrzymałościowych. W badaniach prowadzonych z pomiarem ścieżki naprężenia wyznaczano wytrzymałość i sztywność tworzywa. Wyniki badań zarobów próbnych i próbek walcowych pozyskanych z gotowego kompozytu gruntowo-cementowego na placu budowy zostały przedstawione w formie wykresów i poddane krytycznej dyskusji na tle dotychczasowych badań próbnych zarobów przygotowanych w warunkach laboratoryjnych. Pozwoliło to na ich ocenę jakościową i ilościową oraz sformułowanie wniosków i wytycznych zawartych w podsumowaniu.

Słowa kluczowe: w głębne mieszanie gruntu (DSM), mieszanie gruntu, wzmocnienie podłoża.

Abstract: This paper presents the results of laboratory testing of samples produced in the lab (as reference samples) and obtained from cement-soil columns made on the building site as part of the research and development project. The introduction presents the motivation of the research and the goals that guided the layout of the research program. General geotechnical conditions, initially assumed methodology of soil-cement composite sampling and finally the methodology of strength tests were presented. In tests conducted with the measurement of the strain-stress path, the strength and stiffness of the material were determined. The research results concerning all kinds of samples were presented in the form of graphs and subjected to critical discussion. The test results were presented in the form of graphs and subjected to a critical discussion against the background of former Authors' experience and reference samples from composites prepared in laboratory conditions. This allowed for their qualitative and quantitative assessment and the formulation of conclusions and guidelines juxtaposed in the summary.

Keywords: deep soil mixing (DSM), soil mixing, ground improvement.

1. Wprowadzenie

Technologie w głębkiego mieszania gruntu [1, 2] umożliwiają modyfikację parametrów słabego podłoża gruntowego na potrzeby realizowanych zadań inżynierskich [3, 4] lub ochrony środowiska [5–7]. Wzmocnienie wymaga wprowadzenia do pierwotnej struktury gruntu spoiwa hydraulicznego, np.: wapna [8–10], cementu [11–16], popiołów lotnych [17–20] lub kombinacji różnych rodzajów spoiw i aktywatorów [21–23]. Specyficznym rodzajem w głębkiego mieszania jest produkcja podsadzki hydraulicznej z odpadów składowanych na powierzchni terenu [24, 25]. Obecnie wiodącymi technologiami mieszania gruntu są kolumny DSM

(*Deep Soil Mixing*) oraz stabilizacja masowa wykonywana na mokro lub na sucho [26–28]. Problemami, które wciąż są przedmiotem badań, ze względu na różnorodność kombinacji badanych gruntów, spoiw i technologii mieszania, są zagadnienia związane z kontrolą jakości produktu finalnego, czyli kompozytu [29–32] oraz dalszymi zastosowaniami mierzonych lub zakładanych parametrów w modelach numerycznych [33–36].

Równocześnie wymóg ciągłego postępu technologicznego w aspekcie technik mieszania i stosowanych spoiw sprawia, że coraz większą popularnością cieszą się opatentowane technologie niekonwencjonalne typu: Trenchmix, Springsol i inne które są intensywnie rozwijane i skupiają wokół siebie badania

naukowe oraz prace badawczo-rozwojowe prowadzone przez firmy geotechniczne. Wcześniejsze doświadczenia autorów publikowane w [26, 28–32] stanowią bazę do realizowanego aktualnie programu badawczego. Obecnie kierunki badawcze ogniskują się na promowaniu zrównoważonego rozwoju, rozumianego jako ograniczenie emisyjności przy zapewnieniu wymaganego efektu wzmocnienia podłoża i niezawodności realizowanego rozwiązania projektowego.

2. Wprowadzenie do realizowanego programu badawczego

W artykule zaprezentowano szeroko zakreślony projekt badawczy technologii wglębnego mieszania gruntu, prowadzony przez firmę Menard Sp. z o.o., współfinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu „Operacyjny Inteligentny Rozwój 2014-2022”. Projekt „Budowa i walidacja innowacyjnego systemu do mieszania gruntu w wielu technologiach” zakłada opracowanie innowacyjnego mobilnego systemu do mieszania wglębnego gruntu. W zakresie innowacyjnych rozwiązań opracowywane są urządzenia technologiczne podnoszące efektywność robót, między innymi takie, jak: maszt wielofunkcyjny montowany do koparki, cementowóz, narzędzie typu Springsol oraz system monitoringu parametrów pracy w trakcie mieszania gruntu w technologii solidyfikacji.

Opracowanie innowacyjnego systemu wglębnego mieszania gruntu, który przełamuje bariery aplikacji technologii w bardziej wymagających warunkach terenu budowy jest zadaniem wieloetapowym, wymagającym pracy wielu specjalistów z dziedzin: konstrukcji maszyn, mechaniki, automatyki, geotechniki i innych. W artykule przedstawiono wycinek szerokiego procesu badawczo-rozwojowego obejmującego:

- wstępne koncepcje modyfikacji technologii,
- analizy możliwości modyfikacji sprzętowych w zakresie narzędzi mieszających, transportu spoiwa hydraulicznego, mobilności urządzeń mieszających,
- szczegółowe projekty badawcze realizowane w warunkach terenowych w skali naturalnej ze zróżnicowanymi sposobami poboru próbek do badań laboratoryjnych,
- wykonanie kolumn DSM o zróżnicowanych parametrach technologicznych monitorowanych w procesie realizacji, z poborem próbek (stosowanie do założonej technologii i czasu pobrania próbek,
- rozłożone w czasie procedury laboratoryjne pozwalające na walidację i finalną ocenę parametrów wzmocnionego podłoża gruntowego w oparciu o badania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie oraz edometrycznego modułu ściśliwości oraz, w ograniczonym zakresie, badania w aparacie trójosiowego ściskania.

Szeroki program prac polowych obejmował zagadnienia geotechniczne oraz elementy systemu kontroli jakości, na który składały się rozbudowany system rejestrujący parametry

produkcji takie, jak: czas mieszania, lokalizację mieszadła, zagłębienie mieszadła, ciśnienie wiercenia, prędkość obrotową, wydatek oraz parametry tłoczonego zaczynu. W niniejszej pracy przedstawiono wyłącznie wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych wraz z wnioskami dotyczącymi parametrów wytrzymałościowych oraz odkształceniowych wzmocnionego gruntu.

2.1. Wstępne analizy literaturowe i dotychczasowe doświadczenia

Zagadnienia związane z wglębnym mieszaniem gruntu w technologii DSM i szerzej modyfikacją podłoża gruntowego przez jego mechaniczne lub hydrauliczne (w technologii jet-grouting) wymieszanie z czynnikiem wiążącym są obecnie jednym z wiodących tematów badawczych realizowanych w skali globalnej [6–10]. Większość prowadzonych projektów badawczych ogniskuje się jednak na lokalnych aspektach technologii, jakimi są dobór spoiwa do rodzaju podłoża w miejscu badań (np. w lessach powszechnie występujących w Chinach [7], lub w podłożu organicznym powszechnie występującym na terenach przybrzeżnych i w dolinach rzek) [2, 25, 26, 30].

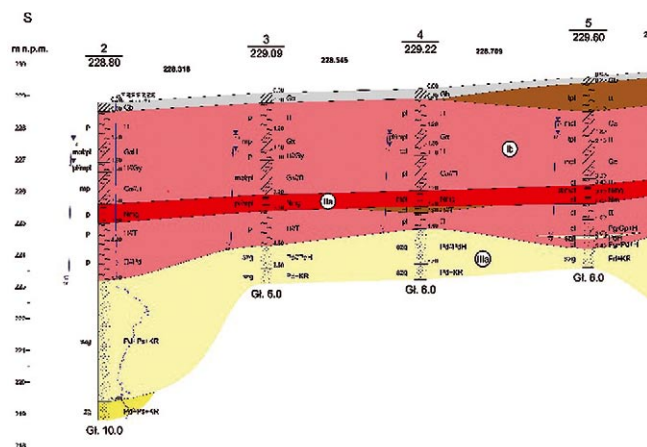
Firma Menard prowadzi prace badawczo-rozwojowe związane z technologiami wglębnego mieszania gruntu od wielu lat. Dotychczasowe doświadczenia oparte były na rozszerzonych programach kontroli jakości realizowanych na kontraktach, gdzie stosowano kolumny DSM lub różne metody solidyfikacji na sucho lub na mokro [28–33]. Takie badania pozwalają na gromadzenie bazy wiedzy i doświadczeń, mają jednak zazwyczaj ograniczony zakres i ze względu na zróżnicowanie warunków geotechnicznych nie pozwalają na wyciąganie bardziej ogólnych wniosków, nie mówiąc już o formułowaniu precyzyjnych wytycznych do realizacji kolejnych zadań inwestycyjnych. Pozyskanie środków z NCBiR pozwoliło na zaplanowanie badań w „typowych” warunkach stosowania DSM w wariantach znaczącej modyfikacji technologii stanowiącej istotną innowację lub w wariantach kalibrowania technologii pod kątem inicjalnych warunków geotechnicznych i wymagań stawianych realizowanym kolumnom.

2.2. Warunki geotechniczne w miejscu realizacji kolumn próbnych

Wybór terenu, na którym realizowano kolumny próbne, nie był przypadkowy. Podstawowym mankamentem technologii wglębnego mieszania jest ryzyko uzyskania kompozytu o niskiej wytrzymałości i sztywności. Takie ryzyko występuje zwłaszcza wtedy, gdy mieszanemu poddane są grunty spoiste (drobnoziarniste) zawierające części organiczne (czyli namuły) lub torfy. W przedmiotowej lokalizacji, do głębokości ok. 6 m, występują pyły, gliny i namuły w zróżnicowanych stanach (od twaroplastycznego do miękkoplastycznego). Szczegółowe badania laboratoryjne potwierdziły zawartość części organicznych również w warstwach definiowanych jako pyły i gliny pylaste. Badania zawartości

części organicznych [37] wskazały na udział części organicznych od 2,81 do 38,73%, co klasyfikuje badany grunt jako niskoorganiczny (2–6%), przez organiczny (6–20%) do wysokoorganicznego (powyżej 20%) wg PN-EN ISO 14688-2:2006 [38].

Zalegające niżej piaski drobne w stanie średniozagęszczonym, mimo możliwych w partii stropowej zanieczyszczeń częściami organicznymi, są gruntami o znacznie lepszych parametrach geotechnicznych i nie niosą ryzyk znaczących osiadań pod obciążeniem. Typowy przekrój geotechniczny w miejscu prowadzonych badań (lokalizacji elementów wzmocnionego podłoża) przedstawia rysunek 1 z dokumentacji geotechnicznej [37].



Rys. 1. Typowy przekrój geotechniczny w lokalizacji kolumn próbnych [37]

Podstawowe informacje o gruntach zalegających w podłożu uzyskane z badań polowych i laboratoryjnych zestawiono w tabeli 1. Podane nazewnictwo gruntów według opracowania [37] jest w starej konwencji polskich norm i nie jest zgodne z PN-EN ISO. Bezpośrednie przełożenie na nomenklaturę [38], na potrzeby niniejszego artykułu nie jest możliwe ze względu na brak dostępu do informacji o szczegółowym rozkładzie poszczególnych frakcji dla wszystkich gruntów.

Dla przedmiotowego programu badawczego istotna była informacja, że praktycznie na całej powierzchni działki, w obrębie której będą testowane technologie, występują w miarę

jednorodne warunki gruntowe i to pozwoli na niezależną ocenę wpływu modyfikacji technologii na podstawie wyników niezaburzonych zmiennością kompozytu wynikającą z cech podłoża (gruntu). Należy podkreślić, że rozpoznanie podłoża wykonano w standardzie nietypowym dla badań realizowanych pod standardowe inwestycje budowlane. Poza wierceniami badawczymi i sondowaniami statycznymi pobrano próby gruntu, które poddano następnie badaniom edometrycznym, wyznaczono zawartość części organicznych w próbach z różnej głębokości (12 oznaczeń) oraz określono efektywne wielkości kąta tarcia wewnętrznego i spójności w aparacie bezpośredniego ścinania. Badania edometryczne były następnie planowane dla kompozytu uzyskanego w procesie wgłębno mieszania, co pozwoliło po ich wykonaniu na oszacowanie skali wzmocnienia podłoża. Również efektywne parametry geotechniczne (kąt tarcia wewnętrznego i spójność) kompozytu zaplanowano do wyznaczenia w badaniach w aparacie trójosiowego ściskania (co również zrealizowano).

2.3. Realizacja kolumn próbnych

Program badawczy ma na celu budowę i przetestowanie innowacyjnego urządzenia do wykonywania kolumn grunto-cementowych. Modyfikacje (kalibracja) sposobu wykonania kolumn ma również na celu dobór odpowiednich parametrów technologicznych, takich jak: dobór gęstości wtłaczanego zaczynu cementowego, stosowane ciśnienie iniekcji i sam proces podawania spoiwa hydraulicznego do podłoża z uwzględnieniem skuteczności wymieszania. W ramach realizowanego programu badawczego wykonywano kolumny metodą „na mokro” (tj. podając zaczyn cementowy) i metodą „na sucho” podając sam cement. Dodatkowo kolumny wykonywane „na mokro”, których materiał jest przedmiotem niniejszego opracowania, były wykonywane w wariancie wspomagania strumieniem powietrza (i bez) oraz w wariancie podwyższonego ciśnienia iniekcji. W niniejszym opracowaniu wszystkie uzyskane wyniki zestawiono zbiorczo, ponieważ celem było określenie zależności sztywności tworzywa od wytrzymałości uzyskiwanej w teście jednoosiowego ściskania. Taka informacja jest kluczowa dla modelowania numerycznego tworzywa grunto-cementowego w modelu sprężystym

Tabela 1. Podstawowe informacje o gruntach zalegających w podłożu według [37]

Rodzaj gruntu	Głębokość występowania	Gęstość	Stopień plastyczności/zagęszczenia	Spójność gruntu c	Kąt tarcia wewnętrznego φ	Moduł E
	m	g/cm ³	I_L/I_p	kPa	° (deg)	MPa
Ia – π, π//Gπ+H, GπH, Gπ//π	0,00-1,00	2,08	0,10	8,9	31,7	–
Ib – π, π+KR, π//Gπ+H, π//Pd	1,00-3,00, 4,00-6,00	1,96	0,42-0,81	1,22	17,7	1,80-7,69
IIa – Nmg, Nmg//Gy, Nm, Nm/πH	3,00-4,00	1,60	0,36	15,7	17,3	2,7
IIb- Torf	4,00-5,00	–	–	–	–	–
IIIa – Pd+H, Pd+H//πp, Pd//πH, Pd//PdH	6,00-9,00	1,90	0,78	–	31,2	34,9
IIIb – Pd+Ps+KR, KR+Pd+Ps	9,00-10,00	2,00	0,78	–	35,9	79,6

w powszechnie stosowanych programach Metody Elementów Skończonych (MES).

Ważnym elementem realizacji kolumn próbnych był dobór spoiwa hydraulicznego, spełniającego w maksymalnym stopniu kryteria zrównoważonego rozwoju przy zagwarantowaniu docelowych parametrów materiałowych uzyskanego kompozytu. W drodze wstępnych analiz zdecydowano o wyborze cementu portlandzkiego wieloskładnikowego z dodatkiem popiołów lotnych krzemionkowych CEM II B-V. O wyborze zdecydował fakt, że znaczącym dodatkiem do tego cementu są popioły lotne krzemionkowe, które stanowią przetworzony odpad poprodukcyjny. W ramach recyklingu są one wykorzystywane powtórnie w procesie technologicznym wytwarzania mieszanki cementowej.

Na polisku badawczym stosowano następujące urządzenia:

- podwozie koparki (rys. 2a),
- uniwersalny maszt Scandinavian Pile Driving (SPD) (rys. 2a),
- osprzęt do realizacji klasycznej formy DSM (rys. 2a), do realizacji kolumn o modyfikowanej średnicy i osprzęt do stabilizacji masowej (rys. 2b).



Rys. 2. Urządzenie do głębokiego mieszania podczas realizacji prac: a) z masztem SPD i padłem DSM, b) z osprzętem do stabilizacji masowej

Należy podkreślić, że cel polegający na wykonaniu kolumn do głębokości 6 m (w obrębie gruntów słabych) został osiągnięty dla wszystkich testowanych wariantów technologii. Dalsze rozważania skoncentrowane są na efektach wykonanych prac przy zachowaniu stałej ilości cementu w objętości kompozytu i, jak podano wyżej, jednakowych parametrach tworzywa (gruntu) poddanego solidyfikacji (wzmocnieniu w obrębie zbliżonych parametrów geotechnicznych).

2.4. Metody przygotowania prób do badań laboratoryjnych

Przygotowanie standardowych próbek z zarobów próbnych w warunkach laboratoryjnych polega na mechanicznym wymieszaniu gruntu pobranego z warstw podłoża ze spoiwem hydraulicznym i wodą zarobową. W przedmiotowym przypadku dokonano podziału na dwa przedziały głębokości (do 3 m i w warstwie 3–6 m) różniące się zasadniczo zawartością części organicznych, która wpływa znacząco na jakość uzyskanego kompozytu. Zaroby próbne można formować w dowolny sposób, najczęściej wykonuje się

próbki sześciennie (przykładowe próbki pokazano na rysunku 3), ale można też formować próbki walcowe. W przedmiotowym przypadku, w związku z koniecznością maksymalnego ujednoczenia procedury badawczej dla próbek laboratoryjnych i dla próbek pobieranych metodą „pipe in pipe” na placu budowy, wykonano próbki walcowe.

Wstępne rozważania mające na celu maksymalną obiektywizację otrzymanych wyników wskazały na konieczność poboru próbek walcowych o stosownej smukłości ($H/D = 2$) otrzymywanych z całego profilu kolumny metodą „pipe in pipe”, czyli przez zatopienie rury PCV w świeżym tworzywie kolumny (po cyklach iniekcji i mieszania, ale przed stwardnieniem kompozytu gruntowo-cementowego). Przykład poboru takiego ciągłego rdzenia w rurze PCV pokazują rysunki 4a–4c.



Rys. 3. Przykładowe próbki referencyjne przygotowane w warunkach laboratoryjnych



Rys. 4. Pobieranie próbek walcowych: a) pogrążanie rury do poboru próbek „pipe in pipe”, b) rura osadzona w świeżej kolumnie, c) rdzenie pobrane metodą „pipe in pipe”, d) rdzenie pobrane metodą wiercenia

Opcjonalnie dopuszczono możliwość poboru prób rdzeniowych (rys. 4d) po uzyskaniu przez kompozyt stosowanej wytrzymałości pozwalającej na uzyskanie ciągłych rdzeni. Przykładowe rdzenie pokazują rysunki 5 i 6. Warto zauważyć, że tam, gdzie nie nastąpiło dokładne wymieszanie ze spoiwem, nie ma możliwości pobrania rdzenia pozwalającego na wykonanie badań w standardzie normowym (rys. 5). Nie dyskwalifikuje to możliwości wykonania badań, lecz konieczne jest stosowanie specjalnych przeliczników dla krępych próbek. Rdzenie z kolumn „dobrze wymieszanych” też są spękane, ale te spękania wynikają głównie z wpływów dynamicznych przy wierceniu. Przy wytrzymałości tworzywa poniżej 1 MPa nawet minimalny ruch narzędzia może powodować złamanie rdzenia.



Rys. 5. Rdzeń odwiercony z gotowej kolumny (w gruncie) – widoczna mnogość spękań i ryzyko konieczności wycinania próbek „nie-normowych”



Rys. 6. Rdzeń odwiercony z gotowej kolumny (w gruncie) – nieliczne spękania

2.5. Procedury laboratoryjne stosowane do badania kompozytu

Badania laboratoryjne obejmowały 3 typy: ściskanie próbek walcowych w maszynie wytrzymałościowej, badania edometryczne, badania trójosiowe. W niniejszym opracowaniu skoncentrowano się na wynikach badań wytrzymałościowych uzyskiwanych dla kompozytów realizowanych w warunkach projektowanych modyfikacji technologii realizacji kolumn. Wyniki te odniesiono do badań zarobów próbných przygotowanych w reżymie laboratoryjnym. Takie zestawienie badań, poza walorami analizy ilościowej, pozwala na opracowanie wytycznych do projektowania kolumn na bazie zarobów próbných z wymaganym współczynnikiem bezpieczeństwa dla tworzywa kolumn. W niniejszej pracy przedstawione zostaną wyłącznie wyniki badań jednoosiowych z kontrolowaną ścieżką naprężenia we wszystkich wariantach badanych modyfikacji technologii.

3. Metodyka badań laboratoryjnych

Wszystkie wyniki badań podane w kolejnych rozdziałach pochodzą z certyfikowanego laboratorium, które sporządziło „raport z badań” [39] i zostały oparte na metodyce [40] i normie [41]. Na potrzeby niniejszego artykułu przedstawione zostaną

dalej wyniki badań w jednoosiowym ścisaniu z rejestracją ścieżki naprężenia, które pozwalają na określenie wytrzymałości na ściskanie, sztywności mierzonej modułem odkształcenia (w autorskiej procedurze laboratorium) oraz pomiar odkształcenia w chwili zniszczenia. Takie zdefiniowanie przedmiotu badań jest szczególnie użyteczne, gdy potrzebne są parametry do budowy modelu numerycznego wzmocnionego podłoża (np. w szeroko stosowanych obecnie programach metody elementów skończonych MES). Należy podkreślić, że aktualnie prowadzone badania są rozwinięciem wcześniejszych projektów badawczych i stosowane techniki badawcze były wybierane również pod kątem możliwości dyskusji uzyskanych wyników w świetle badań mających charakter już archiwalny.

3.1. Uwagi ogólne do zastosowanych sposobów przygotowania i poboru próbek

Próby z zarobów próbných charakteryzują się najwyższym, możliwym do uzyskania, stopniem wymieszania i, na podstawie dotychczasowych doświadczeń, można stwierdzić, że wyniki badań tak przygotowanych próbek stanowią „górne oszacowanie” parametrów możliwych do uzyskania w warunkach terenowych.

Należy zauważyć, że metoda „pipe in pipe” do pobierania próbek walcowych bezpośrednio z kolumny, jest metodą o potwierdzonej atrakcyjności. Ta technika pobierania próbek, która jest praktycznie niezawodna w gruntach niespoistych poddanych mieszanemu z zaczynem (w piaskach) może być (o dziwo) zawodna w gruntach spoistych, gdzie bryła niewymieszanego gruntu o średnicy przekraczającej średnicę rury wewnętrznej może zablokować przesuw i wywołać efekt podobny do znanego z formowania pali Franki (gdzie opór pogrążania rury zaślepionej jest mniejszy niż opór przesuwu tworzywa wewnątrz rury). Z praktycznej perspektywy można porównać to do pracy „szlamówki” w badaniach geotechnicznych. O ile postęp w drobnych gruntach niespoistych jest praktycznie zawsze możliwy, o tyle po wejściu w grunty spoiste następuje zatkanie i konieczność przejścia na inne narzędzie wiertnicze. Dla zapewnienia kompletu planowanych próbek w przypadkach, gdy rura „pipe in pipe” nie została skutecznie wypełniona podczas pogrążania, pobrano w sąsiedztwie próby metodą odwiertów rdzeniowych. Już to pozwoliło na sformułowanie pierwszego wniosku (jeszcze przed badaniami), że planując badania, należy mieć na uwadze, że wierceniem można pobrać próby już związane i zatem nie należy oferować badań kontrolnych tworzyw na bazie gruntów spoistych o czasie pielegnacji krótszym niż 28 dni. Dodatkowo należy mieć na uwadze, że badania wykonuje się na tych fragmentach rdzeni, które są ciągłe i można je przyciąć do wymaganej wysokości. W warunkach kontraktowych, mogłoby to budzić zastrzeżenia nadzoru, bo takie ciągłe fragmenty mają oczywiście lepszą wytrzymałość niż te pokruszone w procesie wiercenia. Należy jednak pamiętać, że średnice kolumn są zazwyczaj o rząd wielkości większe od średnicy odwiercanych rdzeni i drobne inkluzje dające znaczący defekt w obrębie rdzenia o średnicy

10 cm nie stanowią o wytrzymałości kolumny o średnicy kilkudziesięciu centymetrów (czasem ponad 1 m).

W dalszych punktach przedstawione zostaną wyniki badań w aspekcie czasu wiązania, ilości spoiwa, sposobu mieszania i parametrów podawania iniektu.

3.2. Ściskanie w maszynie wytrzymałościowej

Badania kompozytów gruntowo-cementowych wymagają pewnych korekt i modyfikacji w relacji do standardowych procedur normowych przygotowanych i powszechnie stosowanych do badania betonów. Ze względu na znacznie mniejsze wytrzymałości (zwłaszcza gdy iniekcji i zeskaleniu podlega grunt spoisty i/lub organiczny) i osiągnięcie maksymalnej wytrzymałości przy znacznie większych odkształceniach można stosować większe prędkości ściskania (stanowiące kompromis pomiędzy prędkościami stosowanymi dla betonów a tymi stosowanymi dla gruntów). W większym stopniu, na wyznaczone moduły odkształcenia, waży również „błąd ułożenia”, czyli tzw. „bedding error”, który można wyeliminować przez wstępne ściśnięcie próbki z ustalonym zakresem naprężenia. Taka procedura jest jednak kłopotliwa, gdyż nie wiadomo, jakiej wytrzymałości się finalnie spodziewać. Bardzo racjonalne wydaje się wyznaczanie modułu odkształcenia jako pochylone zależności odkształcenie-obciążenie w przedziale wokół połowy wytrzymałości próbki. W badaniach prowadzonych w laboratoriach AGH stosowano przedział $0,30-0,70 R_c$, zbliżony do przedziałów stosowanych we wcześniejszych projektach badawczych firmy Menard realizowanych we współpracy z Politechniką Wrocławską. Praktycznie odpowiada to (z dobrym przybliżeniem) wielkości modułu siecznego E_{50} . Zdjęcia próbek (sześciennych) w badaniach w maszynie wytrzymałościowej z kontrolą ścieżki naprężenia (z laboratorium PWr.) przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Badania z kontrolą ścieżki naprężenia – próbka sześcienna

3.3. Badania próbek walcowych

Próbki walcowe o średnicy ok. 10 cm, badane w Krakowie, pozyskiwano metodą „pipe in pipe” i ewentualnie z odwiertów rdzeniowych. Jak wspomniano wcześniej, specyfika próbek pobieranych z kolumn DSM polega na konieczności selekcji i wyboru ciągłych fragmentów rdzenia. Zasadniczo badano próbki

o założonej smukłości. Jeżeli próbki były niższe niż to wymagane, w nielicznych przypadkach, stosowano odpowiednie przeliczniki dla wyznaczonej wytrzymałości tworzywa.

3.4. Badania próbek sześciennych (ze stabilizacji masowej)

Wybór metody poboru próbek gruntowo-cementowych z formowanych kolumn ma istotne znaczenie dla reprezentatywności badań. W warunkach polowych, w czasie realizacji kontraktów, pobór materiału do badań wykonywany jest zazwyczaj z poziomu terenu przez pobranie tzw. „wylewki”, czyli nadmiaru urobku wypchanego podczas iniekcji podłoża i mieszania zaczynu cementowego z gruntem. Zaletą próbek sześciennych jest większa ilość materiału w próbce i mniejsze ryzyko wystąpienia inkluzji wpływającej drastycznie na jej wytrzymałość. Sporym mankamentem jest jednak odmienny rodzaj pracy i mechanizm zniszczenia niemożliwy do porównania przykładowo z badaniami trójosiowymi wykonywanymi na próbkach walcowych.

4. Wyniki badań laboratoryjnych

Na potrzeby niniejszego artykułu przedstawione niżej zostaną wyniki badań w jednoosiowym ścisaniu. Wytrzymałość na ściskanie dla cementogruntów została wyznaczona zgodnie z normą PN-EN ISO 17892-7:2018 „Rozpoznanie i badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 7: Ściskanie jednoosiowe”, która jest polską wersją normy [41]. Do badań wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie wykorzystano prasę hydrauliczną z automatyczną rejestracją siły i przemieszczeń. Prędkość przesuwu płyt prasy wytrzymałościowej wynosiła 0,6 mm przemieszczenia osiowego na minutę (czas badania jednej próbki wyniósł od 5 do 15 min).

4.1. Wyniki badania zarobów próbnych

Próbki referencyjne do badań w aparacie jednoosiowego ściskania opracowano w czterech wariantach. Te warianty opierały się na zmienności rodzaju i stanu gruntu (a precyzyjniej zawartości części organicznych w podłożu na głębokości z przedziału 1 do 3 m i 3 do 6 m. Zróżnicowano również gęstość zaczynu cementowego stosowanego do iniekcji, co w praktyce oznaczało zmianę ilości wody w zaczynie, bowiem we wszystkich badaniach ilość zastosowanego cementu na jeden metr sześcienny geokompozytu była stała. Wydzielono 4 typy próbek o parametrach opisanych niżej:

- typ I – grunt z głębokości 1–3 m + zaczyn cementowy o gęstości 1500 kg/m^3 ,
- typ II – grunt z głębokości 3–6 m + zaczyn cementowy o gęstości 1500 kg/m^3 ,
- typ III – grunt z głębokości 1–3 m + zaczyn cementowy o gęstości 1400 kg/m^3 ,
- typ IV – grunt z głębokości 3–6 m + zaczyn cementowy o gęstości 1400 kg/m^3 .

Dodatkowo duża liczba przygotowanych próbek pozwoliła na przeprowadzenie badań po różnych czasach wiązania, w zakresie zarówno charakterystycznym dla badań kompozytów cementowych (3, 7, 14, 28 dni), jak i dla nietypowego czasu 56 dni, który sugerowany jest jednak na bazie wcześniejszych doświadczeń autorów w kontroli niestandardowych kompozytów cementowych. Uśrednione wartości z badań referencyjnych podano w tabeli 2. Autorzy mają świadomość, że dodatkową wartość poznawczą miałyby badania po dłuższym czasie (np. 90 dni). Każdy wynik zestawiony w tabeli 2 to średnia z 4 wyników z 4 badanych próbek.

Tabela 2. Uśrednione wyniki dla próbek typu I

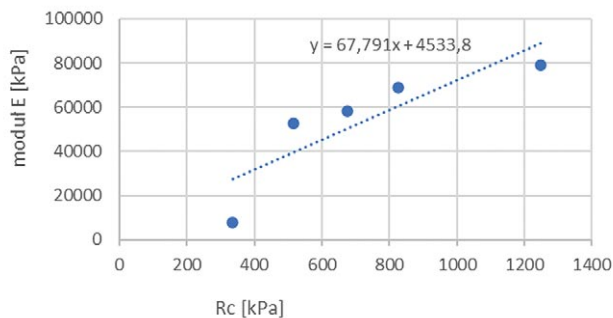
Czas wiązania	Gęstość	Wytrzymałość na ściskanie R_c	Deformacja przy zniszczeniu ϵ	Moduł E
dni	g/cm ³	kPa	%	MPa
3	1,740	335,52	2,8	7,721
7	1,724	516,66	2,0	52,886
14	1,775	674,20	2,1	58,131
28	1,683	825,67	2,3	68,926
56	1,510	1249,45	1,9	79,153

Uzyskane wyniki nie są zaskakujące, gdyż można było się spodziewać zmniejszenia gęstości (na skutek wysychania), wzrostu wytrzymałości na ściskanie i modułu sprężystości oraz prawdopodobnego zmniejszenia odkształcenia krytycznego (co zwykle odpowiada wzrostowi sztywności). Na ogół potwierdzają one poprzednie doświadczenia autorów [30, 32] oraz informacje podane w literaturze [13,17, 24]. Ta wstępna część programu badań potwierdziła również, że w przypadku niestandardowych kompozytów gruntowo-cementowych, czas badań może być istotnym czynnikiem prawidłowej oceny trwałości parametrów termicznych badanego materiału [29, 31]. Zwykle odwoływanie się do norm przeznaczonych dla kompozytów betonowych i ograniczanie czasu utwardzania do 28 dni może prowadzić do wysoce nietrafnych wniosków (pomimo prawidłowych wyników). Naprawdę wartościowe informacje i wnioski z badań uzyskuje się, wychodząc poza schematy normowe.

Odwołując się ponownie do poprzednich doświadczeń autorów, istotne jest sprawdzenie zależności pomiędzy modułem sprężystości a wytrzymałością materiału na ściskanie. Informacje te są kluczowe dla modelowania numerycznego kompozytów gruntowo-cementowych w przypadku braku odpowiednich badań sztywności (co niestety jest powszechną praktyką w budownictwie). Z wyników podanych na rysunku 8 możemy z dużym przybliżeniem wyprowadzić najprostszą funkcję liniową opisującą tę zależność:

$$E = 68 \times R_c + 4,53 \text{ [MPa]}, \text{ (przy } R^2 = 0,74) \quad (1)$$

Warto zauważyć, że na dopasowanie linii trendu mają znaczący wpływ wyniki badań po 3 dniach. Te wyniki nie zostały usunięte dla wskazania konieczności poświęcenia dłuższego,



Rys. 8. Zależność pomiędzy modułem a wytrzymałością na ściskanie

niż w przypadku betonów, czasu na pielęgnację próbek do badań laboratoryjnych cementogrunty.

Rezultaty badań dla kolejno analizowanych typów II, III oraz IV, są zestawione w tabelach 3, 4 i 5 i w podanych pod tabelami zależnościach (2), (3) i (4) opisujących relację między wytrzymałością a sztywnością geokompozytów. Należy jeszcze raz podkreślić, że prezentowane wartości są wartościami uśrednionymi z 4 próbek przebadanych w każdym przedziale czasowym. Można więc podejrzewać pewne wyraźnie widoczne tendencje. Trendy rzeczywiście potwierdzają zdrowy rozsądek i ocenę inżynierską, ale duża liczba wartości odstających (niefiltrowanych) przynosi nieoczekiwane rezultaty. Autorzy opracowania mogliby usunąć wyniki, które nie pasują do teorii, ale wydaje się, że ostrożność wynikająca ze świadomości ewentualnych rozbieżności w wynikach testów, ma większą wartość (biorąc pod uwagę kompozyty gruntowo-cementowe i ich niezawodność) niż samo potwierdzenie dobrze znanych faktów. Zwłaszcza gdy

Tabela 3. Uśrednione wyniki dla próbek typu II

Czas wiązania	Gęstość	Wytrzymałość na ściskanie R_c	Deformacja przy zniszczeniu ϵ	Moduł E
dni	g/cm ³	kPa	%	MPa
3	1,840	256,01	2,0	27,584
7	1,782	355,71	1,6	10,761
14	1,796	285,14	1,5	29,323
28	1,725	385,16	2,7	12,89
56	1,534	995,46	1,2	116,987

$$E = 135 \times R_c + 22,02 \text{ [MPa]}, \text{ (przy } R^2=0,88) \quad (2)$$

Tabela 4. Uśrednione wyniki dla próbek typu III

Czas wiązania	Gęstość	Wytrzymałość na ściskanie R_c	Deformacja przy zniszczeniu ϵ	Moduł E
dni	g/cm ³	kPa	%	MPa
3	1,720	158,43	4,3	7,131
7	1,724	133,45	5,6	7,117
14	1,764	154,74	2,6	7,030
28	1,674	215,22	4,9	6,560
56	1,474	407,57	4,6	9,193

$$E = 8 \times R_c + 5,69 \text{ [MPa]}, \text{ (przy } R^2=0,78) \quad (3)$$

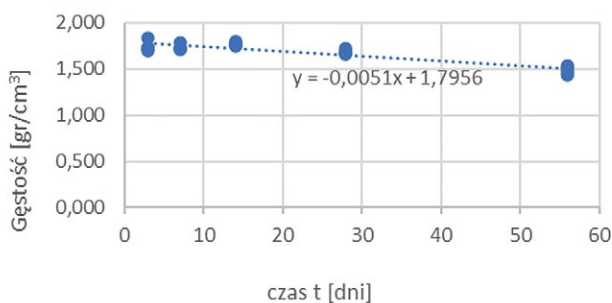
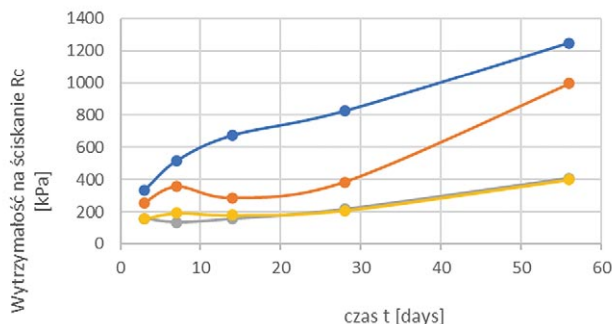
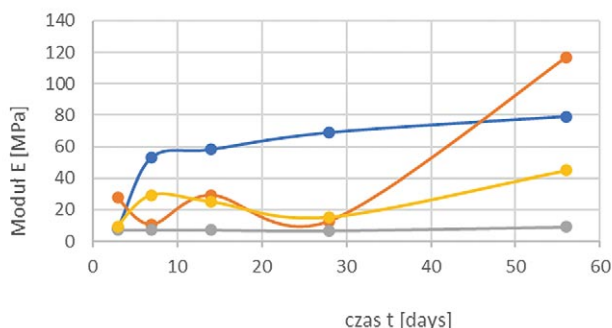
Tabela 5. Uśrednione wyniki dla próbek typu IV

Czas wiązania	Gęstość	Wytrzymałość na ściskanie R_c	Deformacja przy zniszczeniu ϵ	Moduł E
dni	g/cm ³	kPa	%	MPa
3	1,698	155,59	2,6	9,377
7	1,714	192,03	1,6	29,424
14	1,743	179,63	2,3	25,155
28	1,658	208,71	3,9	15,182
56	1,430	398,85	2,5	44,846

$$E = 118 \times R_c - 2,03 \text{ [MPa]}, \text{ (przy } R^2 = 0,72) \quad (4)$$

rozumiemy, że próbki laboratoryjne były mieszane w bardziej kontrolowany sposób niż materiał w kolumnie wytwarzanej in situ. Dlatego uważa się, że produkcja laboratoryjna (z zapewnioną homogenizacją) i testowanie próbnych kompozytów oznacza „górne oszacowanie” wytrzymałości na ściskanie i modułu sprężystości.

Na podstawie rysunków 9, 10 i 11 można zauważyć, że wszystkie zmierzone wartości są silnie zależne od czasu. Jak widać, istotnym problemem jest optymalny czas pielęgnacji próbek przed realizacją badań wytrzymałościowych. Gęstość kompozytu na rysunku 9 zmniejsza się powoli w drugim miesiącu wiązania. Zmiany wytrzymałości na ściskanie (rys. 10) i modułu sprężystości (rys. 11) wydają się być znacznie bardziej znaczące i dowodzą konieczności wydłużenia czasu pielęgnacji próbek DSM do dwóch, a nawet trzech miesięcy, aby uzyskać wiarygodne informacje o docelowych parametrach geokompozytów. Na rysunkach 10 i 11 nie podano linii trendu, aby nie wprowadzać w błąd. Można zauważyć,


Rys. 9. Ewolucja rejestrowanych gęstości badanych próbek w kolejnych fazach testów – widoczny wpływ wysychania

Rys. 10. Wytrzymałość próbek kompozytów R_c rosnąca w czasie

Rys. 11. Moduł sztywności E rosnący w czasie (z dużą zmiennością)

że zwiększające się w czasie wartości R_c i E należy nadal traktować z ostrożnością ze względu na rosnące jednocześnie odchylenie standardowe zebranych wyników.

Przedstawione wyżej wyniki badań stanowiły tło referencyjne dla wszystkich testowanych na poletku badawczym modyfikacji technologii.

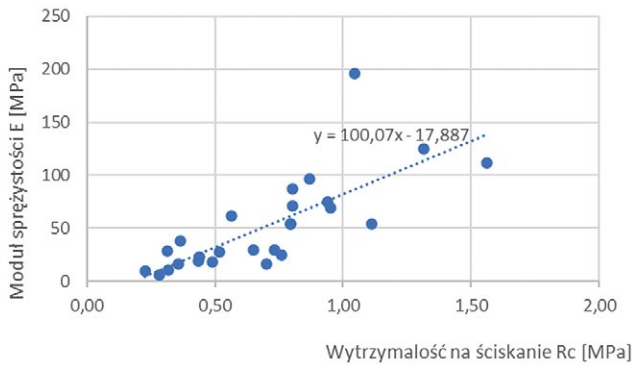
4.2. Wyniki badania próbek walcowych (cylindrycznych) pobranych in situ

Zdecydowana większość przedstawionych poniżej wyników dotyczy próbek cylindrycznych uzyskanych z sondowania „rura w rurze” i odpowiadają one czasowi pielęgnacji równemu 28 dni. Niektóre próbki zostały wyekstrahowane przez „wiercenie rdzeniowe” i również praktycznie natychmiast przetestowane (co koresponduje również z czasem pielęgnacji 28 dni). Wszystkie próbki wymieniono w tabeli 5, zestawiając ze sobą uśrednione wartości wszystkich próbek cylindrycznych pobranych (lub wyciętych) z kolumn in situ. Wartości uśrednione oznaczają, że przedstawiona w tabeli 5 wielkość jest średnią dla kilku prób walcowych wyekstrahowanych metodą „pipe in pipe” (lub wyciętych) z danej kolumny. Oznacza to uśrednienie, dla danego sposobu realizacji kolumny, próbek z głębokości 0–3 m o mniejszej zawartości części organicznych i tych z głębokości 3–6 m, które zawierały więcej części organicznych. Zabieg taki zastosowano na potrzeby niniejszego opracowania, dla oszacowania globalnej zależności wytrzymałość – sztywność, na potrzeby modelowania numerycznego kompozytów gruntowo-cementowych.

Zależność modułu sprężystości od wytrzymałości na ściskanie ustalono konsekwentnie dla wszystkich wyników podanych w tabeli 6 i podanych we wzorze (5). Autorzy postanowili jedynie wykluczyć dwie ewidentne wartości odstające: próbki o nazwach 9 i 12, ponieważ uzyskane wartości wydawały się zupełnie nierealne dla kompozytu DSM w gruncie spoiwym (glieniastym). Zależność sztywności dla szerokiej gamy technologii produkcji kolumn przy praktycznie stałej ilości stosowanego spoiwa hydraulicznego pokazuje rysunek 12.

Z analizy wszystkich próbek, przy świadomości dużej zmienności mierzonych wartości, można wydobyć następującą zależność:

$$E = 100 \times R_c - 17,9 \text{ [MPa]} \quad (5)$$



Rys. 12. Moduł sztywności E w funkcji wytrzymałości na ściskanie (przybliżenie liniowe)

Warto podkreślić, że zależność modułu sprężystości i wytrzymałości na ściskanie podana we wzorze (5) jest zgodna z doświadczeniami poprzednich autorów [29, 30], a także z ustaleniami innych badaczy, np.:

$$E \approx 143 \times R_c \text{ [MPa]} \text{ w publikacji [15],}$$

$$E \approx 120 \times R_c \text{ [MPa]} \text{ w publikacji [17].}$$

4.3. Wyniki badania próbek sześciennych (z wylewki)

Materiał zebrany in situ, tworzący próbki sześciennie, pobrano z pulpy gruntowo-cementowej wydobywanej z podłoża w trakcie cykli mieszania. Co jest dominującym wrażeniem, to fakt, że przedstawione wyniki niosą ze sobą bardzo ważny wniosek – wszelkie działania wspomagające procedurę mieszania, jak np. wstrzykiwanie powietrza w trakcie mieszania, mogą skutkować obniżeniem końcowej jakości otrzymanego geokompozytu. Oczywiście jest, że wszelkiego rodzaju „pęcherzyki powietrza” i/lub puste przestrzenie spowodują większą porowatość produktu końcowego, a w konsekwencji niższą gęstość, wytrzymałość R_c i sztywność E . Przedstawione wyniki czterech serii próbek (uśrednione) dowodzą, że spadek może sięgać nawet 50% wartości pierwotnej (bez powietrza). Oczywiście z niemal tego samego powodu większa gęstość zawiesiny cementowej (zaczyn) daje lepsze wyniki (bo nadmiarowa woda również generuje zwiększoną porowatość). Wyniki badań próbek pobranych z tzw. solidyfikacji, czyli stabilizacji masowej wykonywanej narzędziem mieszającym na ramieniu koparki podano (po uśrednieniu wyników uzyskanych) w tabeli 7, a zależność między modułem a wytrzymałością na ściskanie we wzorze (6).

Informacje z tabeli 6 podano również na rysunku 13. Warto to zwizualizować, ponieważ zakres spadku parametrów spowodowany wspomaganie mieszania strumieniem powietrza jest znaczny. Istotna jest również różnica spowodowana gęstością zaczynu cementowego. Stosunkowo niewielki wzrost gęstości zaczynu cementowego daje znacznie lepsze efekty.

Można zauważyć, że te próbki pobrane z operacji mieszania innym narzędziem, ale przy zachowaniu identycznego składu zaprojektowanego geokompozytu, znacznie różnią się od poprzednich zarówno pod względem nośności, jak

Tabela 6. Uśrednione wartości z próbek pobieranych in situ z przedziału głębokości 0–6 m

Numer próbki	Gęstość	Wytrzymałość na ściskanie R_c	Deformacja przy zniszczeniu ϵ	Moduł E
	g/cm ³	kPa	%	MPa
1	1,547	491,32	2,70%	18,571
2	1,444	796,96	2,80%	54,026
3	1,658	565,76	3,20%	61,36
4	1,628	226,44	3,00%	9,193
5	1,407	941,14	4,20%	74,91
6	1,447	949,72	2,70%	69,351
7	1,508	730,91	3,70%	29,729
8	1,631	359,22	3,10%	16,204
9	1,631	2746,1	2,40%	1050,901
10	1,536	802,55	2,40%	87,131
11	1,424	317,04	3,60%	10,958
12	1,712	3006,62	1,60%	2115,93
13	1,474	1315,14	1,60%	124,869
14	1,509	518,64	3,00%	27,207
15	1,432	702,72	3,20%	15,983
16	1,603	760,64	3,40%	24,394
17	1,393	868,24	1,90%	96,733
18	1,671	1563,24	3,00%	111,525
19	1,444	796,96	2,80%	54,026
20	1,552	315,06	1,90%	28,258
21	1,697	281,36	5,00%	5,464
22	1,307	440,26	2,10%	23,321
23	1,606	804,4	2,60%	71,167
24	1,347	649,52	2,70%	29,878
25	1,641	1045,67	2,70%	196,195
26	1,512	436,46	2,80%	19,493
27	1,67	364,09	3,70%	38,004
28	1,53	1112,81	2,60%	53,951

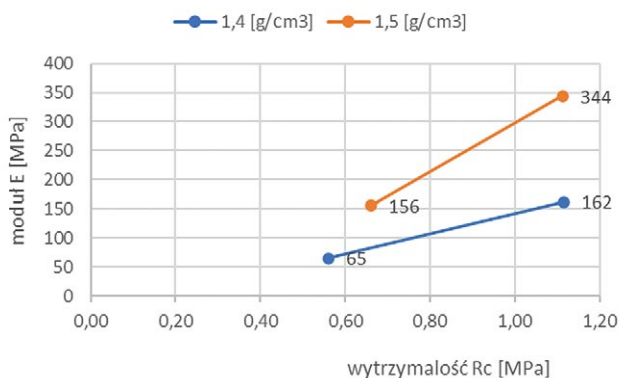
Tabela 7. Uśrednione wartości wyników badań próbek sześciennych

Numer próbki	Gęstość	Wytrzymałość na ściskanie R_c	Deformacja przy zniszczeniu ϵ	Moduł E
	g/cm ³	kPa	%	MPa
Solid 1.4	1,424	1116,354	1,20%	161,791
Solid 1.4 +powietrze	1,380	560,559	1,30%	65,209
Solid 1.4	1,429	1112,970	0,80%	343,852
Solid 1.4 +powietrze	1,298	660,505	1,30%	155,771
$E = 293 \times R_c - 71,2 \text{ [MPa]}$				

i głównie sztywności. Najbardziej konsternująca jest wysoka sztywność geokompozytu w porównaniu z wytrzymałością na ściskanie wyprowadzona ze wzoru (6), która jest wynikiem liniowej linii trendu na rysunku 11.

5. Wnioski z przeprowadzonych badań

Upredzając wnioski, można podać, że w sensie analizy jakościowej uzyskiwane wyniki potwierdzały zasadniczo intuicje inżynierskie.



Rys. 13. Znaczący przyrost wytrzymałości i sztywności przy rezygnacji ze wspomagania mieszania powietrzem

- Nadmierne rozcieńczanie zaczynu cementowego wodą zarobową (zwiększanie w/c) może ułatwiać pogrążanie narzędzia mieszającego i przyspieszać realizację robót. Prowadzi jednak finalnie do zwiększonej porowatości tworzywa gruntowo-cementowego.
- Zastosowanie sprężonego powietrza również ułatwia pogrążanie narzędzia mieszającego i przyspiesza realizację robót. Tu jest pole do dalszych analiz, bowiem ograniczenie popychu pneumatycznego tylko do pierwszego cyklu mieszania może pozwolić na usunięcie nadmiaru powietrza (potencjalnych porów) w kolejnych cyklach mieszania.
- Należy mieć na uwadze, że zwiększona porowatość musi prowadzić do zmniejszenia sztywności uzyskanego kompozytu (mniejsze moduły). Również maleje wytrzymałość na ściskanie. W przypadku kompozytów mieszanych „na mokro” nie ma możliwości ich „zagęszczenia” przed procesem wiązania.
- Zróżnicowane wyniki wytrzymałości i sztywności próbek z różnych poziomów realizacji wglębnego mieszania wskazują na brak homogenizacji parametrów uzyskiwanego kompozytu w obrębie kolumny. Każde słabsze przewarstwienie (np. przez zwiększoną zawartość części organicznych) znajduje odzwierciedlenie w wynikach próbek cementogruntu (rdzeni) pobranych z tej głębokości. O ocenie niezawodności kolumny decyduje wtedy relacja między miąższością słabego przewarstwienia a średnicą kolumny. Na podstawie obserwowanych mechanizmów zniszczenia próbek walcowych w badaniach trójosiowych można założyć, że kolumny o dużych średnicach mają znacznie większą tolerancję na słabe przewarstwienia lub ewentualne inkluzje (niewymieszane bryły gruntu w obrębie kolumny). Ryzyko ułożenia stref osłabionych na potencjalnych powierzchniach zniszczenia jest bowiem mniejsze.
- Zważywszy na fakt badania jedynie całych (niepokruszonych podczas pobierania) fragmentów rdzeni, można mieć wątpliwości co do ich reprezentatywności dla całego przekroju kolumny. Ten problem jest często podnoszony w rozmowach z nadzorem budowy, który słusznie poniekąd kwestionuje proste przeniesienie wyników badań kawałków rdzeni na całą kolumnę. Z drugiej strony, chaotyczne (losowe) rozłożenie stref bardziej wzmocnionych zmniejsza prawdopodobieństwo, że strefy słabsze ułożą się na powierzchni zniszczenia. Próbkę

referencyjne z zarobów próbnych są wymieszane bardzo dokładnie i przypominają te z kolumn formowanych w technologiach iniekcyjnych, np. jet-grouting. Zaletą kolumn DSM jest jednak gwarantowana średnica (czasem powiększona w relacji do wymiaru narzędzia mieszającego), która zapewnia wytrzymałość kolumny mimo braku idealnego wymieszania. Należy mieć również na uwadze fakt, że sam proces poboru próbek w przypadku metody rdzeniowej, której towarzyszy wysokie ciśnienie wody podczas wierzenia, wiąże się z ryzykiem uszkodzenia rdzeni i naruszeniem ich ciągłości oraz struktury.

- Z uwagi na wykonywanie testów w gruntach o niskiej zawartości frakcji piaskowej oraz zawartość części organicznych w gruncie oraz z uwagi na innowacyjność systemu, który obecnie jest testowany rozrzut wyników jest duży. Jak wzmiankowano wyżej, nawet uzyskanie lokalnie niskiego (czasem niezadowolającego z perspektywy nadzoru budowy) wyniku wytrzymałości tworzywa kolumny nie powinno być jednak dyskwalifikujące dla całej kolumny. Ostatecznie o jakości robót powinno decydować zachowanie kolumny w próbnym obciążeniu statycznym, którego sposób przeprowadzenia najlepiej koresponduje z docelowym schematem pracy kolumny. Nie oznacza to oczywiście konieczności prowadzenia badań nośności w zakresie korespondującym z procedurami przewidzianymi dla pali fundamentowych, ale warto przewidzieć taką możliwość na okoliczność uzyskania niezadowolających badań tworzywa kolumny.

6. Podsumowanie

Prezentowane badania, ze względu na dużą liczbę zebranych danych, skupiają się wyłącznie na wytrzymałości na ściskanie i module sprężystości kompozytu gruntowo-cementowego w celu zebrania wiarygodnych danych do modelowania numerycznego, traktując kompozyt jako bryłę sprężystą. Bardziej wyrafinowane modele konstytutywne uwzględniające plastyczność wymagają zgromadzenia innych danych, m.in. efektywnej wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności oraz modułu edometrycznego gruntu ulepszonego. Mając to na uwadze, próbki gruntu z terenu badań poddano badaniom edometrycznym oraz wyznaczono efektywne wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności w aparacie bezpośredniego ścinania. Prowadzone są badania edometryczne kompozytu otrzymanego w procesie głębokiego mieszania, co pozwala oszacować skalę ulepszenia gruntu w podłożu. Efektywne parametry geotechniczne (kąta tarcia wewnętrznego i kohezja) kompozytu zostały przebadane w aparacie trójosiowego ściskania, co w zamierzeniu autorów ma dostarczyć cennych danych do walidacji modeli konstytutywnych, sprężysto-plastycznych.

Przedstawione wyniki pokazują tylko ogólne trendy i uogólnioną zmienność wyników ze względu na czynniki technologiczne (wydajność mieszania, ilość cementu, różne środki przyspieszające proces mieszania, które obniżają końcową jakość produktu). Przedstawiono bazę wyników jako wartości

uśrednione, przeznaczone do rozbicia na osobne wektory (analiza wielowymiarowa) w celu wyznaczenia zmiennych losowych i ich parametrów (wartości średnie i odchylenia standardowe). W związku z tym planowana jest bardziej wyrafinowana analiza wrażliwości w celu ustalenia podstawowych zmiennych w procesie mieszania oraz zwiększenia wydajności i jakości, co jest celem pomysłodawców badań.

Finansowanie

Nazwa projektu: Projekt nr POIR.01.01.01-00-1084/19-00 pn. Budowa i walidacja innowacyjnego systemu do mieszania gruntu w wielu technologiach w ramach I osi priorytetowej „Wsparcie prowadzenia prac B+R przez przedsiębiorstwa”, Działania 1.1: Projekty B+R przedsiębiorstw, Poddziałania 1.1.1: Badania przemysłowe i prace rozwojowe realizowane przez przedsiębiorstwa, w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020.



BIBLIOGRAFIA

- Terashi M., Theme lecture: Deep mixing method – Brief state of the art. Proceedings of the 14th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, 6–12 September 1997, A. A. Balkema/Rotterdam/Brookfield/1999, 4/1997, str. 2475–2478
- Design Guide: Soft Soil Stabilisation: EuroSoilStab: Development of Design and Construction Methods to Stabilise Soft Organic Soils, IHS BRE Press, ISBN-1860815995, 2010
- Topolnicki M., Posłajko M., Krążelewski J., Żółtowski K., Topolewicz K., Posadowienie obiektów mostowych na podłożu wzmocnionym metodą wgłębnego mieszania gruntu na mokro (DSM), *Mosty* 5/2018, str. 24–30
- Topolnicki M., Posadowienie obiektów mostowych na podłożu wzmocnionym metodą wgłębnego mieszania gruntu na mokro (DSM), *Inżynieria i Budownictwo* 1/2018, str. 3–16
- Duszyński R., Duszyńska A., Cantré S., New experiences in dike construction with soil-ash composites and fine-grained dredged materials, *Studia Geotechnica et Mechanica* 39(4)2017, str. 17–24, <https://doi.org/10.1515/sgem-2017-0033>
- Polańska B., Madej Ł., Przesłony przeciwfiltracyjne. Jak skutecznie wykonać barierę o niskiej wodoprzepuszczalności? *GDMT geoinżynieria drogi mosty tunele* 1/2020, str. 20–26
- Xia W.-Y., Du Y.-J., Li F.-S., Li C.-P., Yan X.-L., Arulrajah A., Wang F., Song D.-J., In-situ solidification/stabilization of heavy metals contaminated site soil using a dry jet mixing method and new hydroxyapatite based binder, *Journal of Hazardous Materials* 369, 2019, str. 353–361, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.02.031>
- Prakash K. G., Krishnamoorthy A., Effectiveness of Stone and Deep Mixing Lime Columns on Stability of Embankments Constructed on Soft Consolidating Soil. *Geotechnical and Geological Engineering* 41(1)2023, str. 533–552, <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02269-5>
- Muhmed A., Mohamed M., Khan A., The Impact of Moisture and Clay Content on the Unconfined Compressive Strength of Lime Treated Highly Reactive Clays, *Geotechnical and Geological Engineering* 40(12)2022, str. 5869–5893, <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02255-x>
- Lindh P., Lemenkova P., Shear bond and compressive strength of clay stabilised with lime/cement jet grouting and deep mixing: A case of Norvik, Nynäshamn. *Nonlinear Engineering* 11(1)2022, str. 693–710, <https://doi.org/10.1515/nleng-2022-0269>
- Leśniewska A., Wytrzymałościowe i technologiczne aspekty wzmocnienia gruntu metodą wgłębnego mieszania na mokro, praca doktorska, Gdańsk, 2007
- Rychlewski P., Nowoczesne materiały i technologie wzmocnienia gruntu, *Materiały Budowlane* 2/2019, str. 38–39, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816306006>
- Jendryś K., Kiecana M., Szabowicz H., Preliminary results of dry Deep Soil Mixing soil-cement composite testing, *MATEC Web of Conferences* 2018, 251, 01025, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201825101025>
- Dou H., Wang Y., Strength of deep mixed soft clay with cement. 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ARC 2019, Taipei, 14–18 October 2019, 2020
- Karpisz I., Pyda J., Cichy L., Sobala D., Study of the effect of cement amount on the soil-cement sample strength, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 365, 2018, str. 042061, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/4/042061>
- Tatsuoka F., Kohata Y., Uchida K., Imai K., Deformation and Strength Characteristics of Cement-Treated Soils in Trans-Tokyo Bay Highway Project, Grouting and Deep Mixing: Proceedings of IS-Tokyo 96 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems 1996, str. 453–459, Tokyo, Japan
- Karpisz I., Jaworski K., Study of compressive strength evolution in soil cement samples with fly-ash admixtures, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 365, 2018, str. 032049, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/3/032049>
- Jamsawang P., Adulyamet B., Voottipruex P., Jongpradist P., Likitlersuang S., Tantayopin K., The free swell potential of expansive clays stabilized with the shallow bottom ash mixing method, *Engineering Geology* 315, 2023, str. 107027, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107027>
- Arulrajah A., Yaghoobi M., Disfani M.M., Horpibulsuk S., Bo M.W., Leong M., Evaluation of fly ash- and slag-based geopolymers for the improvement of a soft marine clay by deep soil mixing, *Soils and Foundations* 58(6)2018, str. 1358–1370, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.07.005>
- Mypati V. N. K., Saride S., Feasibility of Alkali-Activated Low-Calcium Fly Ash as a Binder for Deep Soil Mixing, *Journal of Materials in Civil Engineering* 34(1)2022, str. 04021410, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004047](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004047)
- Paniagua P., Ritter S., Moseid M., Okkenhaug G., Bioashes and steel slag as alternative binders in ground improvement of quick clays, *Geotechnical Special Publication 2023-March (GSP 339)*, str. 25–34, <https://doi.org/10.1061/9780784484661.003>
- Sharma J. K., Grover K. S., Tak D., Experimental Study of Engineering Properties of Kota Stone Slurry Powder and Fly Ash Mixed Expansive Soil, *Lecture Notes in Civil Engineering* 134, 2021, str. 201–216, https://doi.org/10.1007/978-981-33-6370-0_19
- Toksöz Hozatlıoğlu D., Yılmaz, I., Shallow mixing and column performances of lime, fly ash and gypsum on the stabilization of swelling soils. *Engineering Geology* 280, 2021, str. 105931, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105931>
- Ermolovich E. A., Ivannikov A. L., Khayrutdinov M. M., Kongar-Syuryun C. B., Tyulyaeva Y. S., Creation of a Nanomodified Backfill Based on the Waste from Enrichment of Water-Soluble Ores, *Materials* 15, 2022, str. 3689, <https://doi.org/10.3390/ma15103689>
- Nowak G., Stabilizacja masowa jako wzmocnienie gruntów organicznych, cz. I. *Magazyn Autostrady* 5/2019, str. 76–79
- Nowak G., Stabilizacja masowa jako wzmocnienie gruntów organicznych, cz. II. *Magazyn Autostrady* 6–7/2019, str. 57–60
- Forsman J., Jyrävä H., Lahtinen P., Niemelin T., Hyvönen I., Mass stabilization manual, http://projektit.ramboll.fi/massastabilointi/materials/mass_stabilization_manual_2015.pdf
- Jończyk M., Jendryś K., Kanty P., Stabilizacja masowa jako nowoczesna metoda wzmocnienia podłoża, *Materiały Budowlane* 2/2020, str. 14–16
- Kanty P., Aspekty projektowania kolumn DSM pod obiektami mostowymi, *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne* 1–2/2017, str. 68–73
- Kanty P., Rybak, J., Stefaniuk, D., O zagrożeniach związanych z projektowaniem kolumn DSM w gruntach organicznych, *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne* 3–4/2017, str. 70–75
- Kiecana M., Kanty P., Łużyńska K., Optimal control time evaluation for “dry DSM” soil-cement composites, *MATEC Web of Conferences* 251, 2018, str. 01023, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201825101023>
- Chaumery J. L., Kanty P., Reitmeier T., Remarks on wet deep soil mixing quality control. XVI Danube – European Conference on Geotechnical Engineering, 07–09 June 2018, Skopje, R. Macedonia, Paper 39, 2018
- Jendryś K., Pachnicz M., Dudziński P., Parameters of the constitutive model of geomaterials formed with the use of DSM dry technology, *E3S Web Conf.* 97, 2019, str. 02028, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199702028>
- Prokopowicz P., Łużyńska K., Jendryś K., Nowak G., Technologia DSM DRY badania i projektowanie, *Builder* 12/2019, str. 6–9
- Sakai T., Nakano M., Attempt to reproduce the mechanical behavior of cement-treated soil using elasto-plastic model considering soil skeleton structure, *Soils and Foundations* 61(5)2021, str. 1464–1474, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.06.011>
- Prokopowicz P., Wytrzymałość próbek cementogruntu 5/2019, str. 112–115
- Geotechnical opinion for the determination of soil and water conditions on plots No. 723/1 and 727/1 in Bolechowice, Prepared by: GeoVis Wincenty Solecki, ul. Zakątek 1, 32-082 Więgowice, November 2021
- PN-EN ISO 14688-2:2006: Badania geotechniczne – Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów – Część 2: Zasady klasyfikowania
- Determination of strength and deformation parameters of cement-soils. Tests of uniaxial compressive strength and oedometric compressibility modulus. Elaboration: Dr. Eng. Łukasz Ostrowski. Science and Mining Traditions Foundation with its seat Faculty of Civil Engineering and Resources Management AGH University of Science and Technology st. Staszica, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, November 30, 2022
- Quality Assurance of Foundations Improved by the Deep Mixing Method, Federal Highway Administration, Washington, DC
- EN ISO 17892-7:2018: Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 7: Unconfined compression test (ISO 17892-7:2017)