

# TECHNOLOGIA DSM DRY

## badania i projektowanie



**Piotr Prokopowicz**  
ORCID: 0000-0002-9813-8002  
Wydział Budownictwa Lądowego  
i Wodnego  
Politechnika Wroclawska



**Klaudia Łużyńska**  
ORCID: 0000-0001-5147-4626  
Wydział Budownictwa Lądowego  
i Wodnego  
Politechnika Wroclawska



**Klaudia Jendrysik**  
ORCID: 0000-0002-6699-2423  
Wydział Budownictwa Lądowego  
i Wodnego  
Politechnika Wroclawska



**Grzegorz Nowak**  
ORCID: 0000-0003-4813-5396  
Wydział Budownictwa Lądowego  
i Wodnego  
Politechnika Wroclawska

W artykule przybliżono technologię *Deep Soil Mixing Dry*, przedstawiono wyniki programu badawczego przeprowadzonego na Politechnice Wrocławskiej we współpracy z firmą Menard Polska, a także podano wskazówki do wykonania podobnych badań w przyszłości oraz projektowania wzmocnienia podłoża.

Ze względu na ograniczoną dostępność terenów inwestycyjnych o zadowalających parametrach gruntowych oraz rosnący popyt na kolejne elementy infrastruktury konieczne stało się wykorzystywanie metod wzmocniania podłoża. Okazuje się, że są one znacznie tańsze od konwencjonalnej wymiany gruntów i przynoszą zadowalający rezultat w postaci podniesienia parametrów mechanicznych występujących na danym obszarze gruntów słabonośnych. Jedną z tych metod jest wgłębne mieszanie gruntu z czynnikiem wiążącym – *Deep Soil Mixing* – może być nim cement, wapno, popioły lotne i inne spoiwa hydrauliczne. W Polsce dotychczas najczęściej stosowany jest wariant hydraulicznego podawania zaczynu cementowego w podłoże i mechaniczne mieszanie z rodzimym gruntem za pomocą specjalnie skonstruowanych urządzeń. Wgłębne mieszanie na mokro ma jednak ograniczone zastosowanie w gruntach o bardzo wysokiej wilgotności naturalnej, w których z pomocą przychodzi technologia DSM Dry. Polega ona na mechanicznym i pneumatycznym transporcie suchego spoiwa hydraulicznego do warstwy wzmocnianej. Jest to jednak technologia innowacyjna i brakuje solidnych podstaw teoretycznych do jej powszechnego stosowania. W celu stworzenia bazy wiedzy do przyszłych realizacji wdrożono projekt badawczy, o którym mowa w tym artykule.

Podczas badań zauważono wrażliwość wykonywanych próbek na stopień wymieszania oraz ich zagęszczenia w formie. Dlatego kluczowym aspektem zapewniającym uzyskanie założonych parametrów jest precyzyjna kontrola i, w miarę potrzeb, kalibracja parametrów produkcyjnych określonych na etapie projektu, podczas wykonawstwa. Należą do nich prędkość obrotowa maszyny, prędkość liniowa penetracji, ciśnienie powietrza podczas wtlaczania spoiwa oraz liczba padli. Wskaźnikiem, który pozwala na oszacowanie poprawności uzyskanych efektów, jest BRN (ang. blade rotation number), który na podstawie rzeczywistych parametrów produkcyjnych określa jakość wykonanego wzmocnienia – i w większości obecnie wykonywanych realizacji DSM jest obowiązkowym do zbadania wskaźnikiem produkcyjnym.

### Opis badań

Celem badań było wyznaczenie wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie oraz modułu sprężystości cementogruntu mieszanego na sucho z dużą zawartością części organicznej. Do badania użyto gruntu o wilgotności naturalnej od 37% do 56% oraz zawartości części organicznych w przedziale 5,80–8,28%, która była wyznaczana metodą wyżarzania. Spoiwem był cement CEM III/32,5, który był dodawany w różnych ilościach od 120 kg/m<sup>3</sup> do 230 kg/m<sup>3</sup>. Materiał mieszany był za pomocą mieszadła elektrycznego. Tak

przygotowany zarób układano w czterech warstwach w znormalizowanych sześciennych formach o wymiarze boku 15 cm [1], każdą z warstw zagęszczano pod wpływem nacisku o wartości 18 kPa. Po odpowiednim czasie dojrzenia w znormalizowanych warunkach próbki były niszczone w maszynie do jednoosiowego ściskania w laboratorium Politechniki Wrocławskiej. Dla każdej zawartości cementu uzyskano po dwie próbki o czasie dojrzenia: 7, 28, 56 dni. Dodatkowo wykonano badania dla jednej próbki 14- i 84-dniowej dla każdego zarobu. W efekcie uzyskano wykres naprężenie – odkształcenie dla każdej próbki (rys. 1.).

Ze względu na nieliniowość widoczną w początkowej fazie moduł sprężystości materiału wyznaczono w inny sposób niż w przypadku próbek betonowych. Dla badanego cementogruntu określano moduł sprężystości E50 w zakresie wartości sigma od 40% do 60% jako linię regresji – zaznaczoną na rysunku 1. kolorem czerwonym.

### Projektowanie i kontrola jakości

Ze względu na zróżnicowanie gruntów organicznych pod względem stopnia rozkładu i zawartości części organicznych przed przystąpieniem do etapu projektowego należy wykonać badania określające parametry fizyczno-chemiczne gruntu w celu doboru odpowiedniego spoiwa, oraz określające parametry mechaniczne kompozytu cemen-

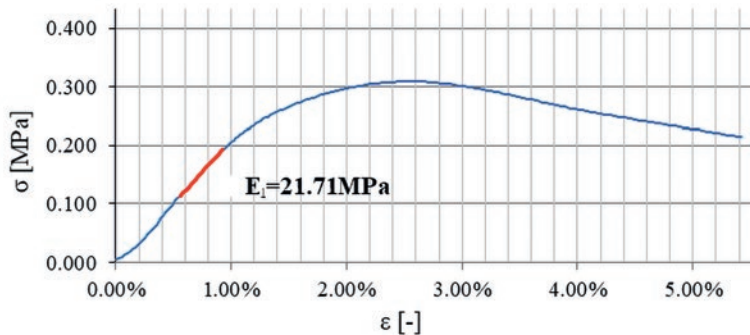
towo-gruntowego dla oszacowania jego ilości potrzebnej do spełnienia założeń. Przeprowadzone badania miały określić parametry kompozytu cementowo-gruntowego stanowiące dane wejściowe na etapie projektu wzmocnienia podłoża oraz obserwację ich zmian w czasie w celu określenia optymalnego czasu kontroli jakości wbudowanego materiału [5]. W teście jednoosiowego ściskania zbadano ponad 150 próbek, po upływie od 7 dni do 84 dni pielęgnacji. Na podstawie tego badania określono przyrost wytrzymałości na ściskanie oraz modułu sprężystości w czasie w zależności od zawartości spoiwa [3, 7]. Zawartość spoiwa mieściła się w przedziale od 120 kg/m<sup>3</sup> do 230 kg/m<sup>3</sup>.

Przyrost badanych parametrów mechanicznych ma zmienną charakterystykę – w zależności od zawartości cementu. Dla próbek o zawartości poniżej 180 kg/m<sup>3</sup> po 28 dniach dojrzewania nie zaobserwowano przyrostu wytrzymałości i modułu sprężystości w czasie. Dla próbek o zawartości spoiwa powyżej 200 kg/m<sup>3</sup> znaczący przyrost wytrzymałości i modułu sprężystości nastąpił pomiędzy 56. i 84. dniem dojrzewania. Ma to kluczowe znaczenie dla planowania kontroli jakości w czasie.

### Analiza wsteczna parametrów mechanicznych

Programy numeryczne służące do modelowania zagadnień geotechnicznych wymagają od użytkownika wprowadzenia różnych parametrów danego materiału. Po wykonaniu zarobów próbnych i badaniach na jednoosiowe ściskanie otrzymujemy wytrzymałość materiału, odkształcenie oraz moduł sprężystości. Projektant nie posiada żadnych informacji na temat spójności, kąta tarcia wewnętrznego czy współczynnika Poissona. Są to parametry, na których bazują podstawowe hipotezy wytrzymałościowe. Sprawa komplikuje się jeszcze bardziej, jeśli do obliczeń używane są bardziej złożone modele. Jedną z możliwości uzyskania potrzebnych parametrów [2] jest posłużenie się analizą wsteczną. Przykładową kalibrację parametrów cementogrunty wykonano w programie ZSoil 2018.

Spośród wykonanych próbek wybrano jedną, reprezentatywną, dla której wykonano model numeryczny. Cechowała się ona zawartością cementu 171 kg/m<sup>3</sup> i masą 5,56 kg. Ilość części organicznej wynosiła 5,80%, natomiast wilgotność sięgała 50,06%. Moduł odkształcenia określono na poziomie 16,52 MPa. W modelu numerycznym starano się odwzorować ścieżkę naprężenie – odkształcenie, którą uzyskano w badaniu laboratoryjnym. Chcąc uzyskać lepsze dopasowanie modelu numerycznego, skorygowano występujący bedding error (błąd ułożenia próbki) [4]. W programie zamodelowano sześcian o wymiarze 0,15 m x 0,15 m x 0,15 m. Na kolej-



Rys. 1. Wykres zależności naprężenie – odkształcenie dla przykładowej próbki



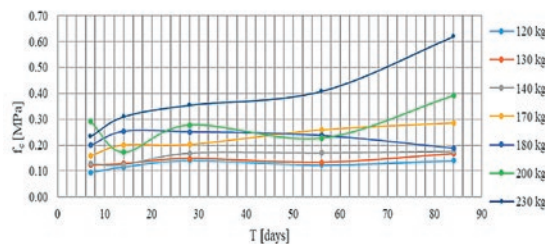
Rys. 2. Przygotowanie zarobu



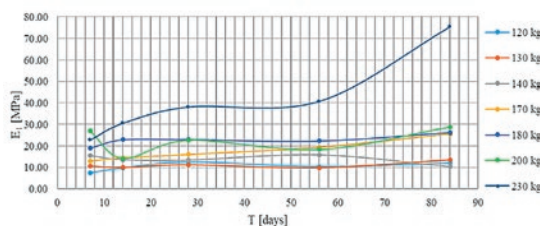
Rys. 3. Przykładowy mechanizm zniszczenia



Rys. 4. Próbką w maszynie wytrzymałościowej



Rys. 5. Zależność wytrzymałości na ściskanie od czasu



Rys. 6. Zależność modułu sprężystości od czasu

nym etapie podzielono każdy z boków na 11 elementów. Zdecydowano się na taką liczbę, ponieważ przeprowadzona wcześniej analiza różnych siatek pokazała, że wykresy zależności naprężenie – odkształcenie dla modelowanej kostki zaczynają się zbiegać już przy podziale boku na 9 elementów. Kolejnym punktem modelowania było założenie warunków brzegowych zadania. Zablokowa-

no wszystkie trzy stopnie swobody na dolnej i górnej powierzchni sześcianu. Chcąc odwzorować proces badania laboratoryjnego, zadano liniowe przemieszczenie górnej podpory. Było to możliwe, ponieważ z maszyny do jednoosiowego ściskania uzyskano czas trwania ściskania oraz przemieszczenie. Materiał modelowano zgodnie z hipotezą Coulomba-Mohra, jest ona bazą wyjścio-

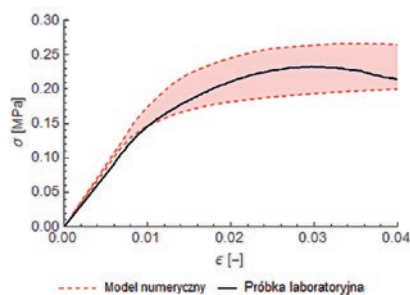
wą dla bardziej złożonych modeli, dlatego to na niej się skupiono. W analizie numerycznej rozpatrywano różne warianty – zmieniając spójność, współczynnik Poissona oraz kąt tarcia wewnętrzznego. Wartości te mieściły się w granicach pokazanych w tabeli 1. Wynikiem analizy jest następujący wykres na rysunku 9.

Jak widać na rysunku 9., wynik próby laboratoryjnej mieści się w wykonanej za pomocą modelu numerycznego obwiedni. Należy jednak pamiętać, że dobrane parametry mogą posłużyć jedynie za dolne i górne oszacowanie, ponieważ w programie ZSoil założono jednorodny materiał, co nie jest możliwe do uzyskania nawet w warunkach laboratoryjnych. Z powodu zastosowania idealnie sprężysto-plastycznej hipotezy Coulomba-Mohra nie uzyskano charakterystycznego wzmocnienia materiału. W celu dokładniejszego odwzorowania zachowania się próbki należałoby przeanalizować bardziej złożone hipotezy wytrzymałościowe. Może okazać się konieczne skalibrowanie nowego modelu, przeznaczonego dla cementogruntów mieszanych na sucho.

### Case study

Wartości otrzymane poprzez analizę wsteczną parametrów mechanicznych cementogruntu zostały wykorzystane do zaprojektowania wzmocnienia podłoża pod halę magazynową. Z opisu warunków geotechnicznych wynika uwarstwienie gruntów pokazane w tabeli 2.

Newralgicznym punktem była warstwa organiczna, w której stwierdzono wysoką wilgotność naturalną. Ze względu na nawodnienie warstwy zdecydowano się na wykonanie wzmocnienia w technologii stabilizacji masowej na sucho, która oprócz poprawienia parametrów wytrzymałościowych gruntu pozwala na chwilowe osuszenie gruntu, co umożliwia zastosowanie zagęszczania dynamicznego. Stabilizacja Masowa jest jedną z pochodnych technologii DSM, polega na objętościowym, a nie punktowym wgłębnym mieszaniu gruntu, co pozwala tworzyć ciągle poziomy wzmocnionego gruntu. W prezentowanym przypadku Stabilizacja Masowa zo-



Rys. 9. Wykres zależności naprężenie – odkształcenie

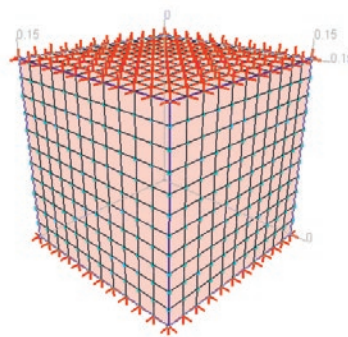
stała użyta jako wzmocnienie warstwy gruntu organicznego o:

- miąższości od 4,5 m do 5,5;
- efektywnym module odkształcenia wynoszącym 2 MPa;
- efektywnym kącie tarcia wewnętrzного równym 1;
- efektywnej spójności gruntu – 1 kPa.

Tworzywo gruntowo-cementowe powstałe po wymieszaniu gruntu słabonośnego ze spoiwem zostało zamodelowane jako warstwa o parametrach wytrzymałościowych zgodnych z tabelą 1., dla wartości początkowych, o module odkształcalności równym 16,25 MPa. Ponad wzmocnionym gruntem została wykonana podbudowa, która jest poddana działaniu zmiennego obciążenia. Szerokość przekroju, który został zamodelowany, wynosi 30 m, a głębokość 22 m. Obciążenie działające na całej szerokości przekroju wynosi 12,5 kN/m, dodatkowo w środku przekroju zostało dołożone obciążenie o wartości 48 kN/m działające od 10 do 20 metra. Dla takiego modelu, wraz ze wszystkimi fazami przejściowymi, zostały wykonane

Tabela 1 Parametry materiału użyte w modelu numerycznym

Parametr	Wartość początkowa	Wartość końcowa
C [kPa]	31	34
$\Phi$ [°]	26	29
$\nu$ [-]	0,30	0,49



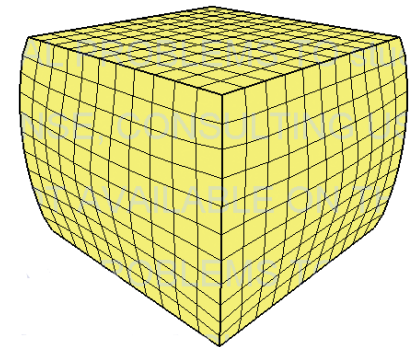
Rys. 7. Model próbki cementogruntu

obliczenia numeryczne w programie GEO5 MES, model numeryczny został podzielony na siatkę trójkątów o długości krawędzi 1 8m. Celem było sprawdzenie osiadania gruntu po wzmocnieniu podłoża. Wykonano także model, w którym pozostawiono grunt bez wzmocnienia jako model kontrolny.

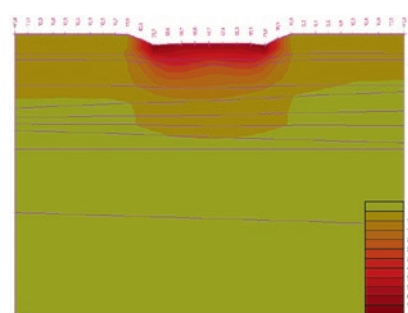
Jak widać na rys. 10., osiadanie gruntu bez wzmocnienia jest znacznie większe niż dla modelu ze wzmocnieniem gruntu – rys. 11. W sytuacji gdy nie zastosowano wzmocnienia gruntu, osiadanie osiągnęło wartość maksymalną, wynoszącą 75,8 mm, przy 19% obciążenia, dalsze obliczenia nie były przeprowadzane ze względu na zniszczenie modelu obliczeniowego. Wartość osiadania gruntu na powierzchni w modelu, dla którego zastosowano wzmocnienie gruntu, wyniosła maksymalnie 7,7 mm przy 100% obciążenia. Zastosowanie tak prostego porównania pokazuje, w jak dużym stopniu na poprawę nośności podłoża może wpłynąć wzmocnienie gruntu poprzez mieszanie go z cementem na sucho. Należy jednak mieć też na uwadze, że na parametry mechaniczne

Tabela 2 Warstwy gruntu w obszarze posadowienia obiektu

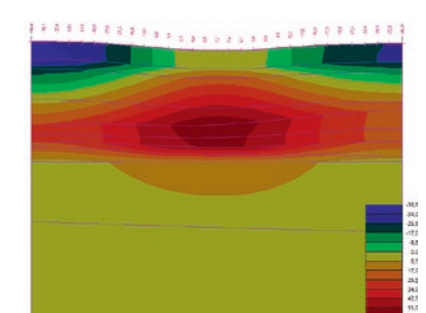
Nr	Nazwa	Miaższość
1	Nasyt niebudowlany	1,0 m
2	Torf	4,5-5,0 m
3	Pył piaszczysty	4,0 m
4	Gлина piaszczysta	12,0 m



Rys. 8. Przykład zdeformowanej siatki



Rys. 10. Mapa osiadań na podłożu bez wzmocnienia (jednostka – milimetry)



Rys. 11. Mapa osiadań na podłożu po wzmocnieniu (jednostka – milimetry)

gruntu wpływa wiele czynników [6], dlatego zawsze po wykonaniu takiego wzmocnienia powinno się przeprowadzać badania pozwalające ocenić rzeczywistą nośność uzyskanego kompozytu.

### Wnioski końcowe

Przedstawione badania dowiodły, że dodanie spoiwa do gruntu o dużej zawartości substancji organicznej poprawia jego własności i jest skuteczne. Przykładowo wytrzymałości na ścislenie dla próbek 28-dniowych są na poziomie 0,15–0,35 MPa, a moduł sprężystości mieści się w przedziale 10–40 MPa. Rząd otrzymanych wyników wytrzymałości na ścislenie i modułu sprężystości odpowiada wymaganiom projektowym w zakresie posadowienia np. obiektów mostowych, lekkich obiektów kubaturowych. Jeśli chodzi o analizę zależności przyrostu wytrzymałości w czasie, widoczna jest ona dopiero przy zastosowaniu dużej ilości spoiwa (powyżej 200 kg/m<sup>3</sup>). Może się zatem okazać, że poprawa własności mechanicznych jest wynikiem absorpcji wody, a efekt ten można uzyskać poprzez dodanie innego, tańszego spoiwa, np. wapna.

Przed przystąpieniem do projektowania konieczne jest dokładne rozpoznanie warunków gruntowych w celu określenia zawartości części organicznych (zaleca się poniżej 5%) oraz wilgotności naturalnej, której wartość powinna osiągać minimum 60%. Pomimo tego, że badany grunt nie spełniał tych wymagań, uzyskano poprawę parametrów wytrzymałościowych. Nie analizowano zasadności mieszania na sucho w takim gruncie pod względem ekonomicznym, ale jakościowo przyniosła efekty. Dodatkowo, przystępując do projektowania wzmocnienia, należy pamiętać o degradacji kompozytu wy-

wolanej organiką, jednak zastosowany cement hutniczy CEM III ogranicza ten proces. Wyznaczeniu innych parametrów materiału niż te, które można uzyskać bezpośrednio w próbie jednoosiowego ścislenia, może posłużyć analiza wsteczna, której przykład pokazano w powyższym artykule.

Podsumowując: materiał użyty w badaniu był bardzo dobrze wymieszany, przez co uzyskane wyniki mogą posłużyć jedynie za górne oszacowanie. Mnogość dostępnych na rynku spoiw oraz zmienność gruntów spotykanych na placach budów powoduje, że każdy przypadek należy rozpatrywać indywidualnie, a w przypadku pracy z gruntem o dużej zawartości części organicznych należy mieć na uwadze konieczność wykonania dodatkowych badań w zakresie wytrzymałości i trwałości cementogruntu. ■

DOI: 10.5604/01.3001.0013.5789

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA  
Prokopowicz Piotr, Łużyńska Klaudia, Jendrysik Klaudia, Nowak Grzegorz, 2019,  
Technologia DSM Dry badania i projektowanie,  
Builder 269 (12).  
DOI: 10.5604/01.3001.0013.5789

### Bibliografia

- [1] Design Guide: Soft Soil Stabilisation: EuroSoilStab. „Development of Design and Construction Methods to Stabilise Soft Organic Soils”, 2010.
- [2] K. Jendrysik, M. Pachnicz, P. Dudziński, „Parameters of the constitutive model of geomaterials formed with the use of DSM dry technology”, E3S Web of Conferences, 97, art. 02028, s. 1-10, 2019.
- [3] P. Kanty, M. Kiecana, P. Prokopowicz, „Some remarks on statistic approach to strength testing of soil-cement composites”, E3S Web of Conferences, 97, art. 04045, s. 1-9, 2019.
- [4] P. Kanty, J. Rybak, D. Stefaniuk, „Some remarks on practical aspects of laboratory testing of deep soil mixing composites achieved in organic soils”. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 245, art. 022018, s. 1-10, 2017.

- [5] M. Kiecana, P. Kanty, K. Łużyńska, „Optimal control time evaluation for "dry DSM" soil-cement composites”. MATEC Web of Conferences . 251 art. 01023, s. 1-8. 2018.
- [6] G. Nowak, „An analysis of soil-cement composite compaction and its effect on material strength”. Construction - the formation of living environment : XXII International Scientific Conference on Advanced Civil Engineering, Tashkent, 18-21.04.2019, Izdatel'stvo MISI-MGSU Moscow, cop. 2019. s. 259-261.
- [7] P. Prokopowicz, „Strength testing of soil-cement composites used for improving mechanical properties of organic soil”. Construction - the formation of living environment : XXII International Scientific Conference on Advanced Civil Engineering, Tashkent, 18-21.04.2019, Izdatel'stvo MISI-MGSU Moscow, cop. 2019. s. 268-270.

**Streszczenie:** W artykule celem autorów jest przybliżenie odbiorcom technologii Deep Soil Mixing Dry, przedstawienie wyników programu badawczego przeprowadzonego na Politechnice Wrocławskiej we współpracy z firmą Menard Polska, a także podanie wskazówek do wykonania podobnych badań w przyszłości oraz projektowania wzmocnienia podłoża.

**Słowa kluczowe:** Wzmocnienie podłoża, grunt organiczny, cementogrunt, grunt słabonośny

**Abstract:** DSM Dry technology – research and design. In this article, the authors have focused on making readers familiar with DSM Dry technology, introducing some results of a laboratory test program carried out at Wrocław University of Science and Technology in cooperation with Menard Poland company, on a larger scale. They also were pleased to give out some tips for future similar investigations or soil improvement designs.

**Keywords:** Soil improvement, organic soil, soil – cement composite, weak soil

REKLAMA