

O zagrożeniach związanych z projektowaniem kolumn DSM w gruntach organicznych

tekst: dr inż. PIOTR KANTY, Menard Polska Sp. z o.o.; dr inż. JAROSŁAW RYBAK, mgr inż. DAMIAN STEFANIUK, Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

W artykule zaprezentowano aktualne uwarunkowania dotyczące projektowania wzmocnień i posadowień w technologii Deep Soil Mixing (DSM), wyniki badań laboratoryjnych prób cementogruntu uformowanych w warunkach laboratoryjnych z zaczynu cementowego i torfu oraz konsekwencje stosowania tworzyw o niskich parametrach wytrzymałościowych i odkształceniowych. Badania na próbkach sześciennych pozwoliły na wyznaczenie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie oraz modułu odkształcenia. Wyniki późniejszych analiz numerycznych uzyskano z wykorzystaniem programu metody elementów skończonych Z_Soil i danych z badań laboratoryjnych. Wykonane obliczenia stanowią poważne ostrzeżenie i praktyczną podstawę do wnioskowania o ograniczonej możliwości skutecznej modyfikacji gruntów organicznych z wykorzystaniem technologii DSM.

1. Wgłębne mieszanie gruntu – zalety i możliwe zagrożenia

Technologie wgłębne mieszania gruntu ze spoiwami mineralnymi są ciągle rozwijane i znajdują szerokie pole zastosowań w geotechnice, obok tradycyjnego wzmocnienia podłoża w posadowieniu obiektów budowlanych, gdzie kolumny ze wzmocnionego gruntu mogą stanowić quasi-pale przenoszące obciążenia na głębsze warstwy podłoża, bloki wzmocnionego gruntu pracujące jak pogłębiony fundament bezpośredni lub nawet tylko jako „sztywne wtrącenia” redukujące ścisłość podłoża pod fundamentem bezpośrednim. Liderami technologii DSM są kraje, w których rozwijano techniki wgłębne mieszania (Japonia, Szwecja, Stany Zjednoczone). W literaturze światowej dostępne są liczne opracowania i raporty (przykładowo [1]) z badań cementogrunto- w, w tym na bazie gruntów organicznych. Doświadczenia krajowe ograniczają się zasadniczo do badań realizowanych w ośrodku gdańskim (w torfach) [3], bydgoskim (w gytiach) [2, 5] i ostatnio również na Politechnice Wrocławskiej.

W Polsce w ramach stosowania technologii DSM realizowane są najczęściej wzmocnienia podłoża pod obiektami budowlanymi w technologii na mokro (DSM wet). Liczne doświadczenia i badania liderów tej technologii były publikowane w kraju [6] i za granicą [7]. Wariant wgłębne mieszania na sucho (DSM dry), popularny w Skandynawii, obecnie nie jest powszechnie oferowany na rynku polskim. W technologii na mokro najczęściej osiąga się wartości wytrzymałości na ściskanie tworzywa kolumn w zakresie f_c od 1,0 do 6,0 MPa. W mieszaniu na sucho

dążymy do tego, aby uzyskać produkt np. o $S_u = 90$ kPa (co jest znaczącą różnicą ilościową i wręcz jakościową). Należy podkreślić, że wykonując wgłębne mieszanie na sucho, wykorzystuje się wodę, która jest w gruncie, i to ona jest wykorzystywana w procesie wiązania cementu i gruntu. Dlatego też mieszanie typu dry może być w ostateczności stosowane do gruntów organicznych, w których wilgotności są bardzo wysokie. W technologii mokrej cement jest podawany razem z wodą w postaci zaczynu, a liczne negatywne doświadczenia pokazują, że nie nadaje się do realizacji w jednorodnych gruntach organicznych.

Technologie te różnią się zatem sposobem dozowania cementu (spoiwa) do gruntu, a produkty powstałe w wyniku mieszania w obu technologiach są zupełnie różne. Zasadniczo, technologie DSM wet stosuje się jedynie w przypadku niewielkich przewarstwień organiki, które umożliwiają wymieszanie ze szkieletem mineralnym. Również w takim przypadku zachowanie jednorodności materiału ze względu na ograniczony transport pionowy w obrębie kolumny może być bardzo trudne. Projektując wgłębne mieszanie gruntu w takiej sytuacji, nasuwa się wiele pytań, m.in. jaką maksymalną miąższość może mieć przewarstwienie, jakie można uzyskać wytrzymałości z wymieszania gruntu organicznego z zaczynem, jaka jest trwałość cementogruntu na bazie organiki.

Wobec braku jednoznacznych standardów technicznych określających możliwy zakres stosowania technologii DSM wet w odniesieniu do gruntów organicznych zachodzi konieczność opierania się na doświadczeniu firm wykonawczych, które jednak ze względów komercyjnych (i częściowo wizerunkowych,

gdy wyniki były niezadowalające) nie są zainteresowane ich publikacją. W sytuacji, gdy większość badań tworzyw gruntowo-cementowych pochowana jest w archiwach firm wykonawczych, niniejszy artykuł stanowi próbę choćby częściowej odpowiedzi na postawione wcześniej pytania. Prezentuje wyniki badań laboratoryjnych wykonanych na Politechnice Wrocławskiej na zlecenie i przy współudziale firmy Menard Polska oraz założenia i wyniki prostych analiz numerycznych w odniesieniu do posadowienia obiektu mostowego w złożonych warunkach geotechnicznych. Artykuł ze względu na sposób przygotowywania próbek cementogruntu dotyczy wgłębnego mieszania w technologii DSM wet.

2. Badania laboratoryjne na Politechnice Wrocławskiej

Badania laboratoryjne miały na celu ustalenie wytrzymałości na ściskanie i modułu odkształcenia określonych na podstawie obciążenia osiowego próbek sześciennych $15 \times 15 \times 15$ cm dla różnych czasów od uformowania. Badano również wytrzymałość na rozciąganie oraz sztywność próbek (mierzoną wartością modułu w różnych fazach obciążenia). Należy podkreślić, że cementogrunt wymieszany w laboratorium jest zawsze bardziej jednorodny od otrzymanego w warunkach *in situ* i pobieranego czerpakiem. Dobrym wskaźnikiem tej jednorodności jest ciężar próbek – w ramach każdego zarobu próbnego ważono próbki jeszcze w formach przed ich związaniem i otrzymywano różnice w granicach kilku gramów na ok. 4,5-kilogramową próbkę sześcienną. Również badania z pracy dyplomowej Zajączkowskiego [4] prowadzone na próbkach cementogruntów z domieszkami popiołów lotnych jednoznacznie potwierdzają znaczną zmienność parametrów próbek pobieranych *in situ* w relacji do dużej jednorodności podobnych mieszanek komponowanych w warunkach laboratoryjnych. Łącznie wykonano dotychczas ponad 100 badań na ściskanie oraz kilkanaście badań na rozciąganie. Statystycznie istotna liczba przebadanych próbek, długi czas obserwacji, prowadzenie badań w złożonych cyklach obciążenia oraz możliwość ciągłej rejestracji obciążeń i deformacji w kierunku osiowym i poprzecznym pozwoliły na rozpatrywanie wielu zależności, z czego w niniejszym artykule przedstawiono trzy wybrane, tj. przyrost wytrzymałości na ściskanie w czasie, sztywność cementogruntów w relacji do wytrzymałości oraz wytrzymałość na rozciąganie.

2.1. Dane materiałów wykorzystanych do wykonania próbnych zarobów

Do testów wykorzystano finalnie dwa rodzaje gruntów organicznych oraz dwa rodzaje cementów o parametrach wyspecyfikowanych poniżej, choć pierwotnie planowano wykorzystać trzy materiały: namuł gliniasty Or 1 oraz dwa torfy różnego pochodzenia, oznaczone odpowiednio Or 2 i Or 3. Ze względu na twardoplastyczny stan namułu i trudność w jego wymieszaniu zrezygnowano z zastosowania tego materiału w badaniach. Grunt z pewnością łatwiej miesza się w warunkach laboratoryjnych (możliwość rozdrobnienia) niż *in situ*, tak więc można wnioskować, że próba wgłębnego mieszania tego gruntu w warunkach polowych nie powiodłaby się. Grunt Or 2 to torf o wyznaczonej gęstości objętościowej $1,2 \text{ g/cm}^3$ oraz zawartości części organicznych ok. 45%. Torf ten został pobrany z głębokości 3,0–3,5 m p.p.t. Torf Or 3 charakteryzował się gęstością objętościową $1,0 \text{ g/cm}^3$ oraz ok. 40-procentową zawartością części orga-

nicznych. Został pobrany z głębokości 1,5–2,0 m p.p.t. Jego wilgotność wyznaczona *in situ* wynosiła 950%!

Spoiwem hydraulicznym do wykonania próbek cementogruntu były dwa rodzaje cementu: CEM II B-S 32.5 R-NA oraz CEM IIIA 32.5 N/LH/HSR/NA. Oba cementy charakteryzują się wytrzymałością po 28 dniach wynoszącą ok. 50 MPa. Różnice uwidaczniają się w tempie wzrostu wytrzymałości, cement CEM II osiąga wytrzymałość ok. 18,5 MPa już po dwóch dniach, natomiast cement CEM IIIA – ok. 22,0 MPa dopiero po siedmiu dniach [10]. Wcześniejsze doświadczenia autorów z badań cementogruntów wskazywały na ich porównywalną przydatność do formowania tworzywa DSM w gruntach mineralnych (piaskach, pyłach, glinach). Sześciennie próbki cementogruntu o wymiarach $15 \times 15 \times 15$ cm były przygotowywane przez wymieszanie gruntów organicznych z zaczynem o gęstości $1,5 \text{ g/cm}^3$. Cement dozowano w ściśle wyliczonych ilościach, tak by finalnie otrzymać 300 lub 400 kg/m^3 cementogruntu. Należy podkreślić, że taka ilość cementu jest relatywnie duża jak dla wgłębnego mieszania, najczęściej *in situ* stosuje się ilości osiągnące maksymalnie do 300 kg/m^3 .

2.2. Laboratoryjne testy jednoosiowego ściskania i rozciągania

Badania zostały przeprowadzone przy stałym przemieszczeniu z prędkością $0,01 \text{ mm/s}$, w kontrolowanej temperaturze $20 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$. Badania wytrzymałości sześciennych prób cementogruntowych na jednoosiowe ściskanie przeprowadzono zgodnie z normą [8] w przedstawionej na rycinie 1 prasie mechanicznej Proeti, współpracującej z jednostką, która rejestrowała:

- czas od rozpoczęcia badania,
- siłę osiową obciążającą próbkę,
- przemieszczenie osiowe tłoka prasy (skrótowanie próbki w kierunku osiowym),
- deformacje boczne na osiach poziomych próbki (w pierwszej fazie spisywane poklatkowo – ryc. 1a).

Dane były na bieżąco przesyłane do komputera PC wyposażonego w program automatycznej rejestracji wyników badań. Dla każdej serii przeprowadzono badania, zadając jedną z następujących trzech ścieżek obciążenia:

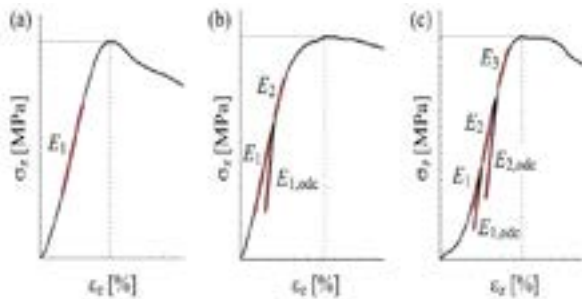
- 1/3 próbek – badanie standardowe bez odciążenia,
- 1/3 próbek – badanie z jednym odciążeniem dla $\sigma_z \approx 0,5 \times \sigma_{z,\text{max}}$,
- 1/3 próbek – badanie z dwoma odciążeniami dla $\sigma_z \approx 1/3 \times \sigma_{z,\text{max}}$ i $\sigma_z \approx 2/3 \times \sigma_{z,\text{max}}$.



Ryc. 1. Próbka sześcienna cementogruntu w maszynie wytrzymałościowej. Wykorzystanie czujników analogowych (a) i cyfrowych (b) do pomiarów deformacji bocznej

Moduł odkształcenia został wyznaczony jako moduł średni dla w przybliżeniu prostoliniowego fragmentu krzywej naprężenie – odkształcenie przez liniową interpolację dla różnych zakresów tej krzywej. Liniowej interpolacji dokonano metodą najmniejszych kwadratów w programie Wolfram Mathematica. Moduły odkształcenia wyznaczono w zależności od liczby odciążeń w następujący sposób:

- badanie bez odciążenia – moduł odkształcenia E_1 (ryc. 2a),
- badanie z jednym odciążeniem – moduł odkształcenia E_1 dla krzywej przed odciążeniem, moduł z krzywej obciążenie – odciążenie $E_{1,odc}$ oraz moduł odkształcenia E_2 dla krzywej za fragmentem odciążenia (ryc. 2b),
- badanie z dwoma odciążeniami – moduł odkształcenia E_1 dla krzywej przed pierwszym odciążeniem, moduł z pierwszej krzywej odciążenia $E_{1,odc}$, moduł odkształcenia E_2 dla krzywej między dwoma fragmentami odciążenia, moduł z drugiej krzywej odciążenia $E_{2,odc}$ oraz moduł odkształcenia E_3 dla krzywej za drugim odciążeniem (ryc. 2c).



Ryc. 2. Oznaczenia modułów wyznaczonych dla: (a) schematu bez odciążenia, (b) schematu z jednym odciążeniem oraz (c) schematu z dwoma odciążeniami

Badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu prób cementogruntowych wykonano podobnie jak przy ścisnaniu na próbach sześciennych 15 × 15 × 15 cm.

3. Dyskusja wyników badań laboratoryjnych

3.1. Przyrost wytrzymałości w czasie

Według normy [9], do oszacowania wytrzymałości betonu w czasie można skorzystać z zależności:

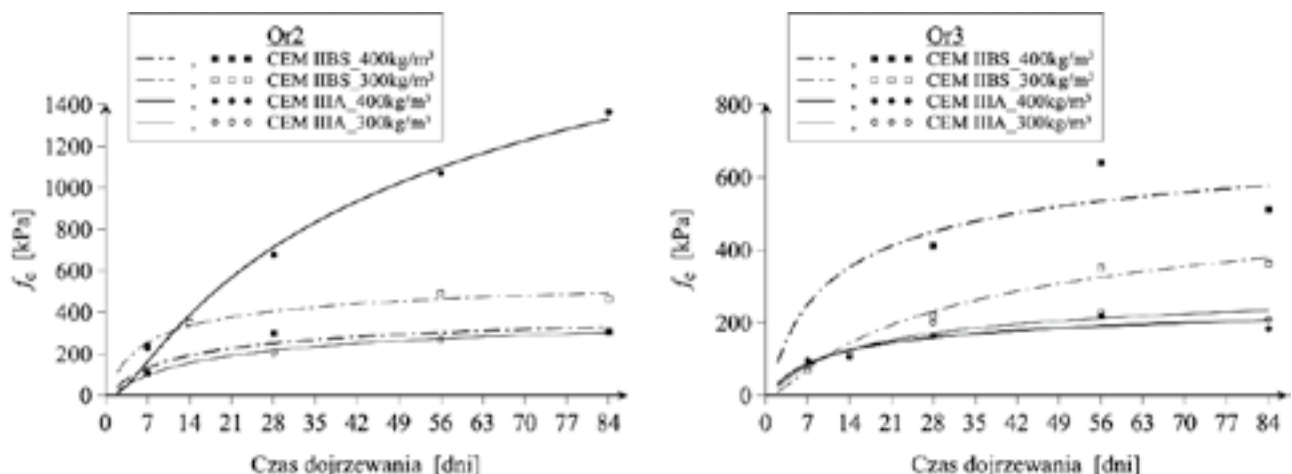
$$f_{cm}(t,s) = f_{cm1} \cdot \exp \left[s \cdot \left[1 - \left(\frac{28 \cdot \text{day}}{t} \right)^{0.5} \right] \right], \quad (1)$$

gdzie t oznacza czas, f_{cm1} – wytrzymałość betonu po 28 dniach dojrzewania, natomiast s to współczynnik zależny od rodzaju cementu i jego szybkości wiązania (dla betonu 0,20–0,38). W niniejszym artykule skorzystano z powyższej zależności (1) do interpolacji parametrów wytrzymałościowych cementogruntu w czasie. Parametry s oraz f_{cm1} przyjęto jako niewiadome, które następnie wyszukano metodą najmniejszych kwadratów dla poszczególnej serii próbek.

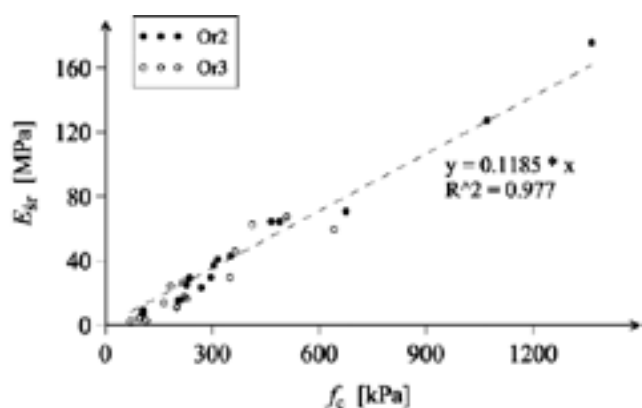
Rycina 3 przedstawia wartość f_c poszczególnych serii dla różnych odcinków czasowych, uzupełniony o funkcję (2) uzyskaną z najlepszego dopasowania (linia ciągła) do badań laboratoryjnych. Analizując wyniki przedstawione na rycinie 3, można wstępnie wyciągnąć następujące wnioski, które wymagają jednak krytycznej analizy:

- w większości przypadków poziom osiągniętych wytrzymałości nie przekracza 500 kPa i jest uzyskiwany dopiero po upływie 56 dni.
- z reguły notuje się spadek wytrzymałości w okresie od 56. do 84. dnia dojrzewania,
- nie można stwierdzić, który cement pozwolił uzyskać wyższe wytrzymałości,
- paradoksalnie, tylko w połowie przypadków większa zawartość cementu dała wyższe wytrzymałości.

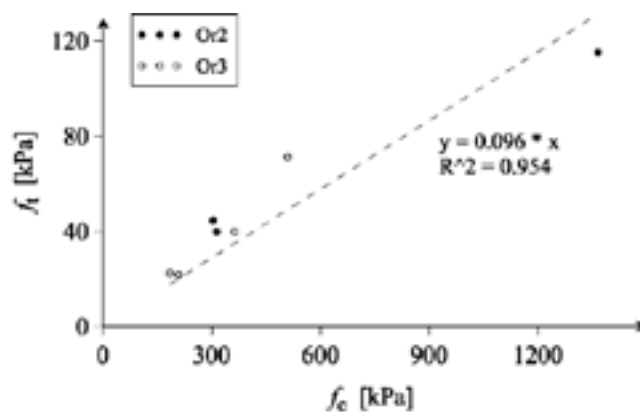
Niska wytrzymałość cementogruntoformowanych w torfach jest potwierdzeniem wcześniej publikowanych badań Leśniewskiej [3]. Długi czas potrzebny na osiągnięcie maksymalnej wytrzymałości wskazuje na konieczność przemyślenia planu kontroli jakości materiału formowanych kolumn. Badanie przeprowadzone po 28 dniach może być niemiernodajne (wyniki mogą być znacznie zaniżone). Bardzo niepokojące są zarazem obserwowane spadki wytrzymałości części próbek badanych po trzech miesiącach. Wskazują one na degradację wytrzymałości tworzywa cementowo-organicznego mimo braku oddziaływania zewnętrznych czynników korozyjnych. Próbkę przechowywano w środowisku wilgotnym bez dostępu kwasów humusowych, co miałyby miejsce w przypadku kolumny uformowanej w nawodnionych torfach. Brak korelacji wytrzymałości z rodzajem cementu i, co gorsza, brak jednoznacznego powiązania wytrzymałości z ilością domieszanego



Ryc. 3. Przyrost wytrzymałości na jednoosiowe ścisnienie w czasie dla serii z gruntem Or 2 (z lewej) oraz Or 3 (z prawej)



Ryc. 4. Zależność modułu odkształcenia od wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie wyznaczone dla analizowanych próbek cementogrunтів



Ryc. 5. Zależność wytrzymałości na rozciąganie przy rozluptywaniu od wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie analizowanych próbek cementogrunтів w torfach

zaczynu cementowego pokazują, że w ramach każdej serii badań decydujący wpływ na wyniki ma grunt wykorzystany do kolejnych zarobów. O ile wyniki badań dla poszczególnych zarobów są zbliżone (nawet przy niekorzystnej tendencji do utraty wytrzymałości już po trzech miesiącach), o tyle rozbieżności w składzie gruntów pobieranych *in situ* z pozornie jednolitej warstwy i ze zbliżonej głębokości są znaczące.

3.2. Związek sztywności i wytrzymałości cementogrunтів

Moduł odkształcenia (E_{sr}) wyznaczono jak średnią z modułów E_1 , E_2 i E_3 . Jego wartość dla danej serii i poszczególnych odcinków czasowych przedstawiono na rycinie 4 w zależności od wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. Widać, że zależność ta jest praktycznie liniowa i nieuwarunkowana od czasu dojrzewania próbki, użytego cementu oraz rodzaju gruntu organicznego użytego w pracy.

Oznacza to również, że obserwowany w podrozdziale 3.1 możliwy spadek wytrzymałości związany jest z jednoczesnym spadkiem sztywności próbki. Otrzymana relacja wytrzymałości na ściskanie do średnich modułów odkształcenia może być aproksymowana prostą. Prosta ta wykazuje dobre dopasowanie niezależnie od rodzaju gruntu organicznego. Według równania tej prostej, relacja f_c vs E_{sr} będzie przyjmować następującą postać (2):

$$E_{sr} = 118.5 \cdot f_c \approx 120 \cdot f_t \text{ [MPa]} \quad (2)$$

Należy pamiętać, że relacja ta jest słuszna dla zbadanej grupy gruntów organicznych i cementów. Generalnie zaś może dać pogląd o rzędzie wielkości takich modułów w przypadku mieszania gruntów organicznych (torfów). Uzyskane wyniki należy uznać za zbliżone z doświadczeniami innych autorów (zarówno w mieszaniu gruntów na mokro, jak i na sucho). Powyższa relacja może być przyjmowana do projektowania elementów o zakładanej wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie mniejszej niż 1 MPa. Taką wartość modułu odkształcenia przyjmowano na potrzeby w analiz numerycznych przedstawionych w rozdziale 4.

3.3. Związek wytrzymałość na rozciąganie i wytrzymałości na ściskanie

Wytrzymałość na rozciąganie wyznaczono dla czasu dojrzewania 56 dni, tj. dla czasu spodziewanego zakończenia procesu dojrzewania tworzywa gruntowo-cementowego. Rycina 5 przedstawia zależność wytrzymałości na rozciąganie przy

rozluptywaniu w zależności od wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (również dla czasu dojrzewania 56 dni).

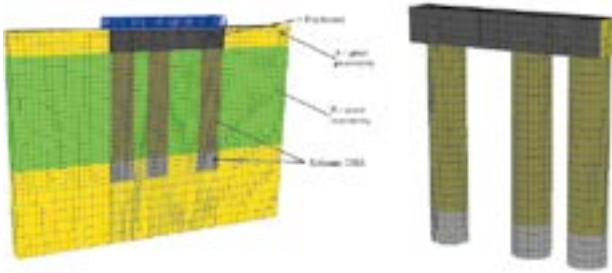
Uzyskane w trakcie badań wyniki nie reprezentują znacznej liczby prób w teście na rozciąganie. Niemniej jednak uzyskana wartość relacji f_c do f_t jest spójna z wcześniejszymi doświadczeniami autorów w badaniach stabilizacji drogowych. Uogólniając, można założyć, że wytrzymałość na rozciąganie cementogrunтів f_t wynosi ok. 10% wytrzymałości na ściskanie f_c . W trakcie projektowania bezpiecznie i rozsądnie będzie przyjąć jednak wartość f_t równą zero.

Należy oczywiście pamiętać, że cementogrunt, zwłaszcza ten uzyskany w warunkach *in situ*, nigdy nie będzie tak jednorodny i wytrzymały jak zaroby przygotowane w warunkach laboratoryjnych. Pewnym pocieszeniem może być fakt, że w kolumnach DSM o dużych średnicach można liczyć na uśrednienie wartości parametrów wytrzymałościowych na ewentualnych powierzchniach zniszczenia. Potwierdzenie tej intuicji wymagałoby jednak obszernych badań na próbach rdzeniowych.

4. Obliczenia numeryczne

Model numeryczny przedstawiony na rycinie 6 zbudowano na bazie danych zaczerpniętych z typowego projektu dwuprzęsłowego wiaduktu autostradowego. Wykorzystując symetrię układu, zamodelowano wycinek fundamentu przyczółka wraz z trzema kolumnami DSM o średnicy 1,0 m. Fundament o wysokości 1 m i szerokości 6 m obciążono powierzchniowo odpowiednią częścią obciążeń pionowych. Modele wykonano w kilku wariantach różniących się miąższością warstwy słabej (organicznej). Wynosiła ona od 0 do 6 m. Spąg gruntów organicznych zawsze występował na głębokości 5 m pod poziomem spodu fundamentu. Poniżej tego poziomu w każdym wariantcie występuje warstwa nośna – piaszczysta, w której zakotwiony jest ostatni metr kolumny DSM.

Na rycinie 7 pokazano model numeryczny dla wariantu, gdzie miąższość gruntów piaszczystych (A) wynosi 1 m, a miąższość gruntów organicznych (B) – 5 m. W obliczeniach zastosowano model materiałowy HSS (Hardening Soil Small) dla gruntu organicznego i piaszczystego oraz model liniowo-sprężysty dla fundamentu i materiału kolumny DSM. Parametry piasków przyjęto na bazie kalkulatora zawartego w programie Z_Soil. Są to parametry typowe dla zagęszczonych piasków średnich. Parametry gruntów organicznych oszacowano za pomocą tego



Ryc. 6. Widok części modelu 3D dla wariantu o proporcji grunt organiczny – grunt piaszczysty wynoszącej 5:1

samego kalkulatora, dysponując wynikami badań edometrycznych oraz badaniami właściwości fizycznych. Jeżeli chodzi o parametry kolumn DSM, to ich moduł sprężystości przyjęto w obrębie miąższości gruntów organicznych równy 24 MPa ($120 \times 0,2$ MPa) oraz wynoszący 1140 MPa ($380 \times 3,0$ MPa) dla kolumny formowanej w piaskach. Zakładając formowanie kolumny metodą DSM na mokro, pominięto ewentualny transport pionowy tworzywa kolumny i występowanie stref o uśrednionych parametrach.

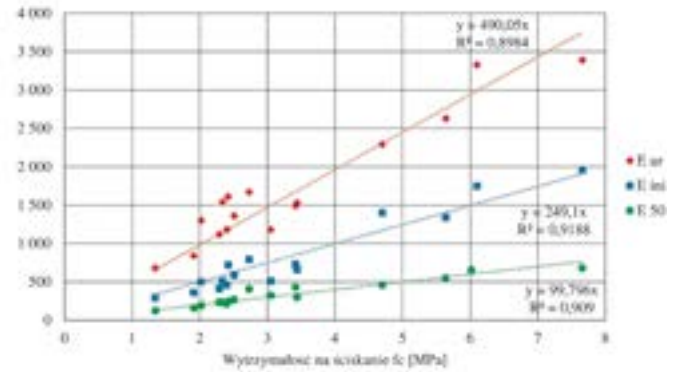
Wyniki analiz numerycznych przedstawiono w tabeli 1. Zaprezentowano osiadania maksymalne na poziomie spodu fundamentu oraz maksymalne naprężenia w kolumnach DSM (osobno w rejonie gruntów organicznych i osobno w rejonie piasków). W analizach pominięto problem rozdziału obciążeń na grunt oraz kolumny.

Tab. 1. Wyniki obliczeń numerycznych

Grunt piaszczysty A [m]	Grunt organiczny B [m]	Kolumny DSM w gr. A σ_{max} [kPa]	Kolumny DSM w gr. B σ_{max} [kPa]	S_{max} [mm]
0,0	6,0	-	913	214
1,0	5,0	805	865	210
2,0	4,0	952	861	173
3,0	3,0	963	852	134
4,0	2,0	870	815	91
5,0	1,0	746	781	48
5,5	0,5	714	716	26
6,0	0,0	618	-	3

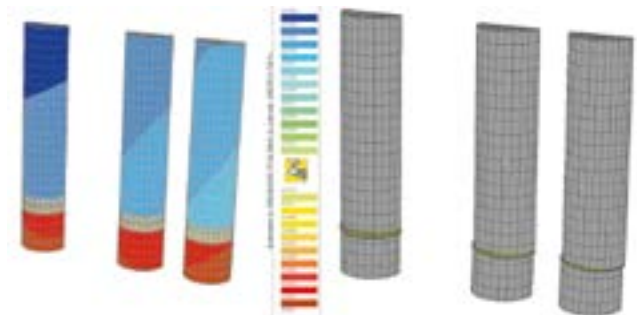
Wyniki obliczeń pokazują, że uzyskane wartości osiadań są praktycznie w każdym przypadku zbyt wysokie dla projektowanego obiektu mostowego. Wyjątek stanowi układ bez gruntów organicznych oraz, być może, model, gdzie ich miąższość wynosi 0,5 m. Dodatkowo praktycznie w każdym przypadku zostały lokalnie osiągnięte naprężenia przekraczające wytrzymałość na ściskanie cementoorganiki. Na rycinie 8 pokazano mapę przemieszczeń pionowych w materiale kolumn DSM oraz przeskalowany obraz deformacji tych kolumn pod pełnym obciążeniem dla przypadku A = 5,5 i B = 0,5. Można zauważyć, że całość kolumn DSM z poziomu powyżej stropu gruntów organicznych przemieszcza się jako prawie sztywna bryła, osiadania mają miejsce jedynie w warstwie gruntów organicznych. W tym miejscu należy podkreślić, że ze względu na zastosowanie modelu liniowo-sprężystego dla materiału kolumn DSM sztywność tych kolumn w obrębie warstwy słabej jest zawyżona. Maksymalne naprężenia w DSM w obrębie gruntów organicznych są wyższe niż wytrzymałość na ściskanie określona w badaniach laboratoryjnych.

Opisana (uproszczona) analiza numeryczna dotyczy tylko jednego rodzaju gruntów słabych z dużą zawartością części or-



Ryc. 7. Relacja wytrzymałości jednoosiowej do modułów odkształcenia cementogruntu

ganicznych. Obejmuje też zaledwie jeden rodzaj gruntów piaszczystych, których sztywność zapewne nie jest tak znacząca, jak sztywność gruntów słabych. W analizach użyto kilka możliwych kombinacji geometrycznych. Niemniej jednak wskazuje ona jasno na fakt, że projektowanie kolumn DSM w podłożu organicznym może wiązać się ze znacznym ryzykiem, a osiągnięte osiadania mogą być zbyt duże. W trakcie mieszania *in situ* materiał organiczny otoczony warstwami piasków zapewne miesza się na pewnych obszarach. Jednakże jest to niezbadane i trudno na etapie projektowania zakładać takie wymieszanie. W przypadku projektowania kolumn DSM przechodzących przez małą soczewkę gruntów organicznych zaleca się każdorazowo wykonanie wierceń rdzeniowych, sprawdzających stopień wymieszania materiałów i ich wytrzymałość.



Ryc. 8. Mapy osiadań oraz obraz deformacji dla modelu A = 5,5, B = 0,5

5. Wnioski z przeprowadzonych badań

Technologię kolumn DSM wykonywanych na mokro zaleca się stosować głównie do redukcji osiadań w sytuacjach, kiedy nośność podłoża jest zapewniona. Najczęściej trudno o taką sytuację, gdy w podłożu zalegają grunty organiczne. Z tego względu wgłębne mieszanie gruntów w technologii mokrej (DSM wet) ogólnie nie nadaje się zatem do realizacji w gruntach organicznych. Należy jednak zwrócić uwagę, że badania przeprowadzono w gruntach o zawartości części organicznych 40–45%. Inaczej (korzystniej) mogą zachowywać się grunty o zawartości części organicznych na poziomie kilku procent. W zależności od zawartości gruntów organicznych powstały cementogrunty może charakteryzować się znacząco różnymi parametrami mechanicznymi i odkształceniowymi. Dlatego autorzy zalecają, aby każdorazowo kiedy grunt jest klasyfikowany jako organiczny, wykonywać próbné zaroby, pozwalające oszacować jego zachowanie w czasie.

Z wykonanych badań laboratoryjnych oraz analiz numerycznych wyciągnięto m.in. następujące wnioski:

- uzyskane po 56 dniach maksymalne wartości wytrzymałości nie są stabilne w czasie – obserwowano osłabienie wytrzymałości i sztywności po upływie trzech miesięcy w relacji do prób 56-dniowych,
- w większości przypadków mieszania torfów z zawartością cementów 300/400 kg/m³ poziom osiągniętych wytrzymałości nie przekraczał 500 kPa;
- nawet jeżeli wykona się zaroby próbne gruntów organicznych i cementu oraz oszacuje moduły odkształcenia (sprężystości), to może się okazać, że nie jest możliwe racjonalne zaprojektowanie kolumn DSM w takich warunkach;
- ewentualna degradacja wytrzymałości stawia pod znakiem zapytania wiarygodność badań zarobów próbnych w aspekcie długotrwałej pracy kolumn DSM pod konstrukcją, dlatego jeżeli podejmuje się ryzyko mieszania przewarstwień gruntów organicznych, to zawsze należy radykalnie zaostrzyć wymogi odbiorowe, wykonać wiercenia rdzeniowe w takich kolumnach i oszacować ewentualne osłabienia związane z korozją tworzywa kolumny w czasie.

Literatura

- [1] Bruce M.E.C., Berg R.R., Collin J.G., Filz G.M., Terashi M., Yang D.S.: *Deep Mixing for Embankment and Foundation Support*. Federal Highway Administration Design Manual, 2013.
- [2] Kumor Ł.: *Badania gytii stabilizowanej metodą mechanicznego mieszania na sucho*. „Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budownictwo” 2006, t. 9, s. 97–106.
- [3] Leśniewska A.: *Wytrzymałościowe i technologiczne aspekty wzmocnienia gruntu metodą wgłębnego mieszania na mokro*. Praca doktorska, Politechnika Gdańska, 2007.
- [4] Stefaniuk D., Zajączkowski P., Rybak J.: *Methodology of Axial Testing of Cement-fly Ash-soil Samples*. *Stroitel'stvo-formirovanie srede žiznedeatel'nosti*. Moskwa, 27–29 aprila 2016. Sbornik materialov. NIU MGSU. Moskva 2016, s. 1091–1094.
- [5] Topoliński S.: *Wytrzymałość stabilizowanej cementem gytii wapiennej na jednoosiowe ściskanie*. Materiały konferencji *Problemy geotechniczne i środowiskowe z uwzględnieniem podłoży ekspansywnych*. Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Katedra Geotechniki. Wydawnictwa Uczelniane UTP. Bydgoszcz 2009, s. 617–623.
- [6] Topolnicki M.: *Projektowanie i wykonawstwo posadowienia wiaduktów autostradowych na podłożu wzmocnionym metodą wgłębnego mieszania gruntu (DSM)*. Materiały V Ogólnopolskiej Konferencji Mostowców. Wisła 2008.
- [7] Topolnicki M.: *Geotechnical Design and Performance of Road and Railway Viaducts Supported on DSM Columns – a Summary of Practice*. International Conference on Deep Mixing. San Francisco, 2–5 June 2015.
- [8] ASTM (D 3148-02) *Standard Test Method for Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens in Uniaxial Compression*.
- [9] PN-EN 1992-2 Cz. 2. *Mosty z betonu. Obliczanie i reguły konstrukcyjne*.
- [10] Deklaracje właściwości użytkowych cementów Góraźdze Cement SA CEM II/B-S 32.5R-NA oraz CEM IIIA 32.5 N/LH/HSR/NA, lipiec 2016.



Perfekcja wykonania



- > Jesteśmy wiarygodnym partnerem oferującym kompleksowe rozwiązania z zakresu **wzmocnienia gruntu i oczyszczania terenów zanieczyszczonych**
- > Mocne podstawy inwestycji to efekt naszych prac
- > Motorem napędowym naszego rozwoju jest ciągle udoskonalanie stosowanych przez nas technologii
- > Gwarantujemy to, co w budownictwie jest najważniejsze – **jakość, niezawodność i terminowość**
- > Naszym celem jest realizacja każdej inwestycji w wydajny i ekonomiczny dla Klienta sposób



Spotkaj nas w Warszawie, Poznaniu, Krakowie i Trojmieście

Poznaj nas:
www.menard.pl