

Piotr KANTY¹
Natalia PASIERB²

PRÓBNE OBCIĄŻENIA KOLUMN DSM STANOWIĄCYCH WZMOCNIENIE PODŁOŻA POD OBIEKTAMI MOSTOWYMI

1. Wstęp

Wgłębne mieszanie gruntu może przybierać różne formy. Jedną z najpopularniejszych z nich jest wykonywanie kolumn DSM na mokro. Formowanie takich kolumn odbywa się poprzez mieszanie gruntu z jednoczesną iniekcją zaczynu cementowego. Technologia wgłębego mieszania gruntu na mokro DSM WET jest szczególnie popularna w Polsce. Większość aplikacji tej technologii to wzmocnienia gruntów pod obiektami mostowymi. Pierwsze Polskie realizacje są datowane na 1999 r. [1] tak, więc można by sądzić, że aspekty projektowania, realizacji oraz kontroli jakości tych kolumn są jasno zdefiniowane. Zdaniem autorów tak nie jest. Aspekty projektowe są poruszane w najnowszych publikacjach, np. [2, 3, 4]. Aspekty realizacyjne częściowo przedstawione w [5] jednocześnie pozostają know-how specjalistycznych firm geotechnicznych. W nierniejszym artykule skupiono się na ostatniej kwestii, czyli kontroli jakości. Szczególną uwagę poświęcono jednemu z czasami stosowanego sposobów sprawdzania jakości takich kolumn czyli próbnym obciążeniami statycznym.

2. Cele stosowania kolumn DSM a badania odbiorowe

Na przestrzeni lat stosowania technologii DSM w Polsce widać wyraźny trend do wykonywania kolumn, o co raz większej średnicy. O ile na początku aplikacji tej metody popularna średnica wynosiła 0,6 m to obecnie realizuje się projekty z kolumnami o średnicy 1,5, a nawet 2,5 m. Tutaj nasuwa się pytanie czy projektowanie, realizacja i kontrola jakości długich kolumn o małej (0,6 m) średnicy powinno być takie same jak dla krótkich kolumn o średnicy 1,5 m? Zdaniem autorów zdecydowanie nie, nawet jeżeli w obu przypadkach kolumny stanowią wzmocnienie podłoża pod obiektami mostowymi. Wartą uwagi definicję pozwalającą rozróżnić te dwa przypadki podano w [6]: „W większości przypadków, aby sklasyfikować wzmocnienie gruntu jako wzmocnienie kolumnami sztywnymi, ich smukłość powinna być wyższa niż 10/1, a współczynnik zastąpienia powinien wynosić nie więcej niż 10% wzmacnianej powierzchni”. Poniżej pokrótce opisano oba przypadki.

¹ dr inż., Menard Polska Sp. z o.o.

² mgr inż., Menard Polska Sp. z o.o.

2.1. Kolumny sztywne

Termin „kolumny sztywne” lub „sztywne inkluzje” oznacza, że sztywność osiowa uformowanego lub wprowadzonego w grunt elementu jest wielokrotnie większa niż sztywność otaczającego gruntu. Takie elementy podlegają prawidłom projektowania opisanym np. w [6]. Należy zwrócić uwagę, że nie są to elementy palowe, tylko elementy przenoszące część obciążeń jednocześnie pozwalając na przeniesienie pozostałej części obciążeń przez grunt między nimi.

Kolumny DSM mogą pracować jako kolumny sztywne. Można wyróżnić dwa zasadnicze cele stosowanie kolumn sztywnych – zwiększenie nośności układu oraz zmniejszenie osiadań. W ramach kontroli jakości w czasie realizacji prac wyróżnia się [6] m.in.: badania cementogruntu ze świeżo uformowanej kolumny lub pobranego wierceniem rdzeniowym oraz kontrolę parametrów mieszania. W ramach kontroli po realizacji prac sprawdza się geometrię dostępnych części kolumny oraz wykonuje się próbne obciążenie. Celem próbnego obciążenia, (jeżeli kolumny wykonano w ramach ograniczenia osiadań przy spełnionym warunku nośności podłoża) jest określenie charakterystyki obciążenie – osiadanie. Jeżeli kolumny DSM wykonano jako sztywne dla spełnienia warunku nośności, to próbne obciążenie powinno mieć na celu określenie nośności takiej kolumny.

2.2. Modyfikacja parametrów gruntu

Drugą grupę stanowią realizacje gdzie wykonuje się wzmocnienie stanowiące tak naprawdę modyfikację parametrów podłoża gruntowego. W przypadku wykonywania kolumn dużych średnic lub wzmocnień podłoża wykonywanych w tzw. blokach (kolumny nachodzące na siebie w układach rusztowych) filozofia projektowania, wykonawstwa i kontroli jakości jest inna. Skupiając się na kontroli – oczywiście w każdym przypadku jest badany materiał kolumny czy to ze świeżo uformowanej kolumny czy to z rdzenia oraz analizuje parametry mieszania. We wzmocnieniach układami kolumn (tzw. blokowych) nie jest możliwe wykonanie próbnego obciążenia więc się go nie wykonuje. Natomiast kwestią sporną pozostaje obciążanie pojedynczych kolumn o dużych średnicach (kolumn krępych). Wydaje się, że tak jak z reguły nie wykonuje się próbnym obciążen samego gruntu, tak nie powinno się wykonywać obciążeń gruntu ze zmodyfikowanymi parametrami. Jednakże podobieństwo do kolumn sztywnych kieruje niektórych projektantów do specyfikowania próbnym obciążen kolumn DSM dużych średnic. W tym miejscu należy zapytać, jaki jest cel wzmocnienia podłoża, bo jeżeli mówimy o ograniczeniu osiadań to badania odbiorowe powinny to odzwierciedlać – może powinno się wymagać nie tylko szacowania wytrzymałości materiału a jeszcze jego odkształcalności cementogruntu? Natomiast nie powinno się wymagać szacowania nośności.

3. Badania odbiorowe wzmocnienia podłoża kolumnami DSM

W powyższym punkcie wspomniano o najważniejszych metodach kontroli jakości wykonania kolumn DSM. Poniżej opisano te sposoby jednocześnie prezentując wyniki uzyskane na jednej z bieżących realizacji Menard Polska.

3.1. Wytrzymałość na ściskanie materiału kolumn

Badanie wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe cementogruntu jest najczęściej specyfikowanym wymaganiem odbiorowym. W Polskiej praktyce najczęściej materiał pobiera

się ze świeżo wykonanej kolumny (tzw. wypływki). Czasami zdarza się, że materiał jest pobierany ze zdefiniowanej głębokości za pomocą specjalnych próbników. Przykłady takich próbników w trakcie użytkowania pokazano na rys. 1 (jeden z nich jest montowany do padła mieszającego drugi należy wprowadzić w grunt np. za pomocą koparki). Ciekawe propozycje są zaprezentowane w wytycznych austriackich [7].



Rysunek 1. Próbniki do pobieranie cementogruntu z kolumn DSM

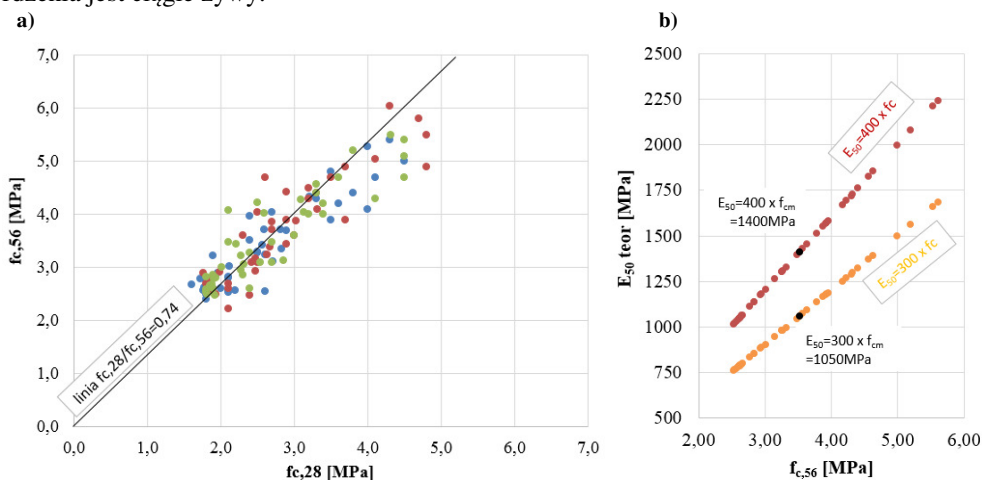
Pobrany materiał standardowo układa się w formach sześciennych $15 \times 15 \times 15$ cm. Brakuje dokumentów które precyzowałyby sposób przygotowanie tych próbek oraz przechowywania. W mostownictwie teoretycznie można stosować podejście analogiczne do betonów gdzie część próbek przechowuje się w warunkach budowy a część w laboratorium. Jakkolwiek trzeba pamiętać że cementogrunt to o wiele słabszy materiał od betonu który dojrzewa w stałych warunkach (w gruncie) więc warunki atmosferyczne nie powinny wpływać na jego właściwości. Krajowe doświadczenia autorów nieniejszego artykułu są podobne do spostrzeżeń zawartych w [8]. Okazuje się że dwa różne laboratoria badające ten sam materiał (organoleptycznie taki sam) mogą uzyskiwać zasadniczo różne wyniki. W obu laboratoriach występuje zgodność wyników badania dla poszczególnych próbek w serii, dlatego różnic należy upatrywać w sposobie przygotowania i przechowywania próbek, ewentualnie metodologii badania.

Badania cementogrunty wykonuje się na prasach dedykowanych do ściskania elementów betonowych. W sprawozdaniu podaje się najczęściej siłę niszczącą, wymiary próbki oraz gęstość objętościową. Wnikliwy projektant znający wartość wytrzymałości na ściskanie z testu jednoosiowego może za pomocą korelacji (np. $E_{50}=380 * f_{cm}$) obliczyć średni moduł kolumny. Propozycję korelacji podano w [4]. Zwraca się tutaj uwagę, że oprócz moduły E_{50} można określać moduł E_{ur} którego wartość będzie znacząco wyższa [3].

Poniżej (na rys. 2a) przedstawiono wyniki badań materiału z wypływki z jednej z bieżących realizacji Menard Polska. Na inwestycji wykonano kolumny DSM pod piętnastoma obiektami mostowymi. Wszystkie kolumny miały średnicę 1,2 m. Podłoże budowały w większości piaski drobne do grubych (60% wzmocnianego gruntu) oraz gliny piaszczyste (ok. 30%). Zużycie cementu CEM II B-V wynosiło od 230 do 280 kg/m^3 . Łącznie na rys. 2a i 2b przedstawiono wyniki badań 135 próbek ściskanych po 28 dniach od daty wykonania kolumny oraz tylu samo ściskanych po 56 dniach od daty realizacji wzmocnienia. Oszacowany za pomocą korelacji moduł $E_{50}=300 - 400 f_{cm}$ wynosi 1050 – 1400 MPa (rys. 2b).

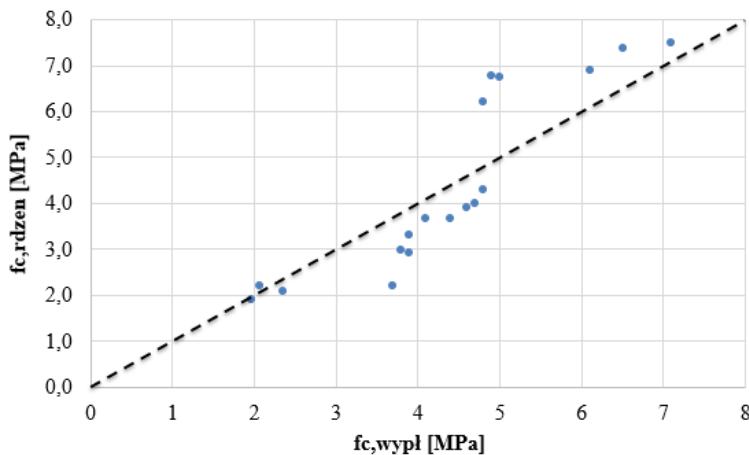
Wartości wytrzymałości oraz ich przyrost w czasie należy uznać za typowy. Wyniki zaprezentowano aby zwrócić uwagę na poziom wartości modułu E_{50} .

Badanie materiału wypływającego z kolumny jest najłatwiejsze i najtańsze, natomiast wielokrotnie pojawia się pytanie czy najlepsze z technicznego punktu widzenia. Temat porównanie wytrzymałości uzyskanej z materiału wydobywającego się z kolumny oraz rdzenia jest ciągle żywy.



Rysunek 2. a) Relacja wytrzymałości określonej po 28 i 56 dniach, **b)** szacowanie modułu E_{50}

Oba materiały dojrzewają w różnych warunkach co z pewnością ma wpływ na poziom wytrzymałości, z drugiej strony ciężko jest określić wpływ samego wiercenia rdzeniowego na cementogrunt (ew. powstanie mikropęknięć obniżających wytrzymałość). Zagadnienie będzie przedmiotem odrębnego artykułu autora. Niemniej jednak na rysunku 3 porównano wytrzymałość na ściskanie otrzymaną z badania rdzenia do wytrzymałość z tzw. wypływu po 56 dniach (seria 18 próbek rdzeniowych i 18 kostek). Wytrzymałość z cylindrycznego rdzenia 2:1 przeliczonno na wytrzymałość kostkową tak aby wyeliminować wpływ kształtu próbki na wyniki.



Rysunek 3. Relacja wytrzymałości określonej z próbek rdzeniowych do wytrzymałości tzw. wypływu

Generalnie można powiedzieć, że z obu serii badań otrzymano podobne wyniki. Część próbek rdzeniowych wykazało wyższą wytrzymałość niż kostkowe, a część odwrotnie.

Niemniej jednak nie oznacza to że nie warto wykonywać wierceń rdzeniowych – pozwalają one na określenie jednorodności cementogruntu po głębokości kolumny, a badanie modułów E_{50} lub E_{ur} takich próbek może dostarczyć wiarygodnych informacji o odkształcalności całej kolumny. Informacja ta jest szczególnie istotna zwłaszcza w gruntach uwarstwionych.

3.2. Próbne obciążenia kolumn DSM

W odniesieniu do próbnych obciążeń należy rozróżnić trzy sytuacje projektowe, w których kolumny DSM występują jako pojedyncze:

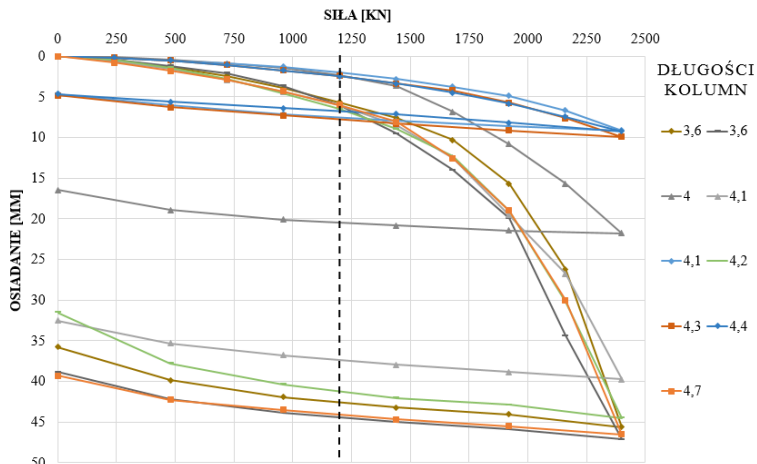
- 1) Kolumny DSM zaprojektowano jako kolumny sztywne – test próbnego obciążenia jest wymagany do wartości 1,25 lub 1,50 N. Gdzie N to suma obciążenia charakterystycznego oraz podwojonej wartości tarcia negatywnego [1].
- 2) Kolumny DSM nie są kolumnami sztywnymi mamy do czynienia ze szczególnym przypadkiem (silnie obciążony fundament o małych rozmiarach, schemat kompozytowy o niskim wskaźniku wzmocnienia) [9]. W tej sytuacji test należy wykonać do wartości 1,20 – 1,50 obciążenia charakterystycznego.
- 3) Kolumny DSM nie są kolumnami sztywnymi i nie mamy do czynienia ze szczególnym przypadkiem – wtenczas zdaniem autorów nie trzeba wykonywać próbnego obciążenia.

Dodatkowo należy wspomnieć, że zagraniczne wytyczne (np. [5, 7, 8, 9]) nie wspominają o próbnych obciążeniach jako sposobie kontroli jakości kolumn DSM. Większość bieżących realizacji wzmocnienia podłoża pod obiektami mostowymi można zaliczyć do 3 sytuacji. Ponadto należy podkreślić że w większości przypadków test wykonujemy w celu określenia sztywności. Nie jest to sztywność kolumny (tą możemy oszacować z badania cementogruntu), ani nie jest to sztywność układu kolumna – grunt w konfiguracji w jakiej będzie pracował pod konstrukcją. Dlatego wyniki próbnego obciążenia mogą posłużyć do kalibracji parametrów gruntu lub elementów kontaktowych, aby następnie te zmodyfikowane parametry użyć w modelu całego podłoża. W ten sposób można określić wypadkową (zastępczą) sztywność podłoża.

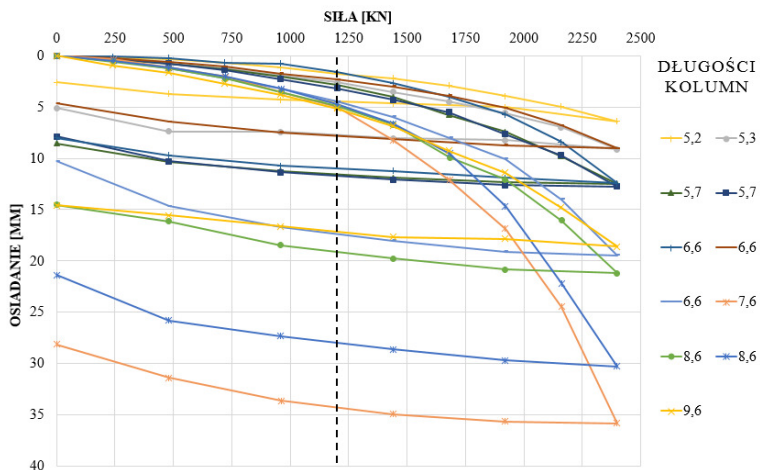
Zdaniem autorów próbne obciążenie powinno się wykonywać tylko w szczególnych przypadkach opisanych powyżej, a jego interpretacja powinna należeć to projektanta wzmocnienia podłoża któremu posłuży do weryfikacji modelu obliczeniowego.

Poniżej przedstawiono wyniki 20 próbnych obciążeń z realizacji wspomnianej w powyższym punkcie. Kolumny o średnicy 1,2 m i długościach 3,6 – 9,6 m obciążono maksymalną siłą 2400 kN. Wyniki zaprezentowane osobno dla kolumn o stosunku $L/D < 4$ (rys. 4) oraz dla kolumn o $L/D > 4$ (rys. 5). Próbne obciążenia wykonano od 38 do 63 dni po realizacji kolumn. Obciążenie podczas testu przekazywano poprzez płytę stalową o średnicy równej 1,2 m.

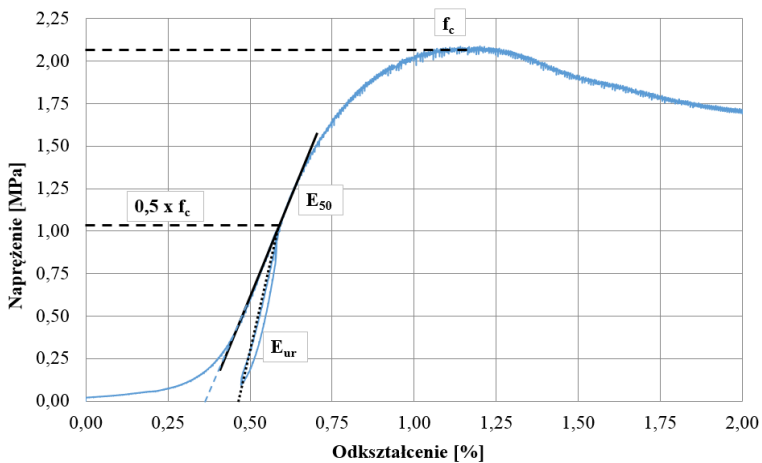
Można zauważyć, że zależność siła – osiadanie jest liniowa do wartości 50% siły maksymalnej czyli ok. 1200 kN (1,05 MPa naprężeń w kolumnie). Przy takim poziomie naprężeń w kolumnach ich sztywność wynosi między 600MN/m, a 200MN/m. Wyniki te są podobne do zaprezentowanych w [9]. Analizując omawiane krzywe odnosi się wrażenie że sztywność w zakresie wartości obciążeń charakterystycznych jest zadawajalące, natomiast w zależności od wyniku testu wartości osiadań przy dużym przeciążeniu mogą być uznane za znaczące. Należy tutaj pamiętać że to wyniki testu statycznego, a w rzeczywistości część obciążeń jest przenoszonych przez grunt. Zdaniem autorów kluczowe jest utrzymanie reżimu osiadań w zakresie naprężeń charakterystycznych natomiast dalsza zachowanie kolumny można wykorzystać do oszacowania poziomu bezpieczeństwa.



Rysunek 4. Krzywe obciążenie – osiadanie z testu statycznego kolumn 3,6 - 4,7m



Rysunek 5. Krzywe obciążenie – osiadanie z testu statycznego kolumn 5,2 - 9,6m



Rysunek 6. Relacja naprężenie – odkształcenie podczas badania laboratoryjnego

Co ciekawe analiza relacji naprężenie – odkształcenie z badań laboratoryjnych próbek cemen togruntu może doprowadzić do podobnych wniosków. Na rysunku 6 pokazano taką relację dla jednej z próbek badanych w warunkach laboratoryjnych. Początkowe odkształcenie do poziomu 0,35% wynikają z szacowania odkształcenia na bazie pomiaru wysokości próbki a nie zastosowaniu ekstensometru. Pomijając ten odcinek od poziomu odkształceń 0,35% do ok. 0,6% czyli naprężeń w zakresie 0,3 MPa do 1,5MPa relacja σ – ϵ jest liniowa. Powyżej tego poziomu sztywność materiału spada. W teście próbnego obciążenia efekt ten jest zapewne potęgowany przemieszczeniem kolumny względem gruntu. Aby dokładnie rozdzielić te dwa wpływy sugeruje się wykonać analizy numeryczne odwzorowujące test statyczny. Taką analizę zaprezentowano w pkt. 4.

3.3. Parametry mieszania

O jakości wymieszania gruntu ze spoiwem można wnioskować obserwując: jednorodność góry kolumny, jednorodność rdzenia wywierconego w kolumnie oraz parametry mieszania. Jeżeli chodzi o parametry mieszania to norma [5] wskazuje na dwie grupy: parametry konstrukcyjne oraz parametry wykonawcze. Najlepiej żeby były one rejestrowane w sposób ciągły w trakcie wykonywania prac. Norma ta wskazuje też na rolę wskaźnika wymieszania (BRN – blade rotation number). Pomimo swojej prostoty ten parametr wydaje się niedoceniony w praktyce kontroli jakości w naszym kraju. Proponowane wartości tego parametru podano w [4]. Zdaniem autorów oszacowanie optymalnych wartości BRN dla różnych rodzajów gruntów wymaga większej liczby badań naukowych skupionych na tym aspekcie. Przy aplikacji BRN do kontroli jakości należy zwrócić uwagę na jego nieznaczące wady / ograniczenia opisane w [10].

3.4. Inne rodzaje testów

W dokumentacjach projektowych występują sporadycznie zapisy sugerujące wykonanie badań ciągłości takich kolumn (tzw. PIT, SIT lub PET). Zlecenie wykonywani takich badań jest technicznym błędem i nigdy nie powinno mieć miejsca. Kolumna cementogrunтова DSM jest najczęściej niejednorodna w swojej strukturze, co uniemożliwia prawidłowe wykonania wspomnianych badań (dedykowanych zdecydowanie do pali). Na świecie można spotkać projekty, na których liczba badań znacząco wykracza poza praktykę stosowaną w Polsce. Przykładami badań stosowanych do określenia sztywności mogą być badania presjometryczne lub geofizyczne (np. tomografia sejsmiczna) [11].

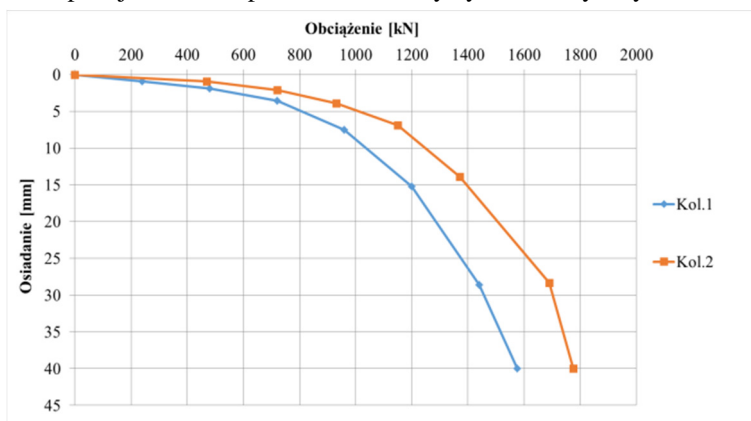
4. Badania własne i analizy numeryczne

4.1. Opis kolumn testowych

W ramach testów wykonano dwie kolumny o średnicy 1,2 m. Ich długość wynosiła 5,5 m. Kolumny były oddalone od siebie o niecałe 10 m. Podłoże gruntove w którym wykonano badane kolumny DSM budowały przede wszystkim piaski gliniaste i pyły ($q_c=2,5$ MPa) o miąższości dochodzącej do 5,5 m oraz piaski średnie i grube ($q_c=20$ MPa) poniżej.

4.2. Próbné obciążenie

Podczas testów kolumny obciążano do uzyskania przemieszczeń równych około 40mm. Badania przeprowadzono 5 tygodni po wykonaniu kolumn. Krzywe obciążenie-przemieszczenie uzyskane podczas testów pokazano na rysunku 7. W dalszej części opracowania rzeczywiste wykresy sprowadzono do jednej, średniej zależności obciążenie-osiadanie. Takie podejście ułatwi porównanie z krzywymi numerycznymi.



Rysunek 7. Krzywe obciążenie-przemieszczenie otrzymane z próbných obciążení kolumn DSM

4.3. Próbkí rdzeniowe

Po przeprowadzeniu testów, z badanych kolumn pobrano rdzenie z całej ich długości, które posłużyły do wykonania badań wytrzymałości na ściskanie cementogruntu oraz określenia modułów sprężystości materiału. Wyniki wytrzymałości na ściskanie f_{cm} oraz modułów E_{ur} oraz E_{50} sprowadzone do próbek walcowych przedstawiono w Tabeli 1. Badaniom podlegało 16 próbek, w tabeli pokazano wartości minimalnych, średnich i maksymalnych wartości wytrzymałości, modułu E_{50} oraz E_{ur} . Moduł E_{ur} określono na bazie nachylenia krzywej σ - ϵ podczas trzech cyklił odciążenie – obciążenie na poziomie naprężeń 0,8–1,0 MPa. Dla trzech próbek nie zbadano modułu E_{ur} ponieważ ich wytrzymałość była niższa niż poziom, na którym wykonywano odciążenie.

Tablica 1. Wyniki wytrzymałości na ściskanie rdzeni cementogruntu wywierconych z kolumn

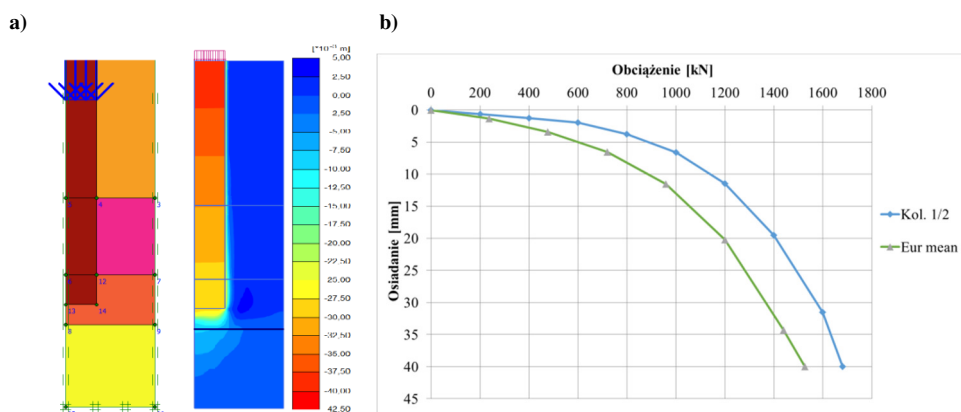
Wartość	f_c MPa	E_{ur} MPa	E_{50} MPa
min	0,64	296	51
mean	1,12	491	203
max	1,80	862	598

4.4. Analizy numeryczne

W celu przeprowadzenia analizy parametrów kontaktowych oraz modułów cementogruntu, przygotowano model osiowosymetryczny kolumny DSM w programie Plaxis (rys. 8a). Układ warstw geologicznych oraz parametry gruntów określono na podstawie otworu geologicznego oraz sondowania CPT wykonanych między badanymi kolumnami. Ośrodek gruntowy scharakteryzowano za pomocą modelu HSs (Hardening Soil Small Strain), natomiast cementogrunt jako model linowo sprężysty. Estymację parametrów modelu

wykonano na bazie korelacji dostępnych w literaturze dysponując wynikami badań CPT oraz odwiertami określającymi rodzaj gruntu. Autorzy nie zmieniali wyznaczonych pierwotnie parametrów gruntu – nie zastosowano analizy wstecznej tak jak się typowo wykonuje. Celem analiz nie było uzyskanie zbieżności krzywych modelowych i uzyskanych z testów a sprawdzenie wpływu kluczowych parametrów modeli materiałowych.

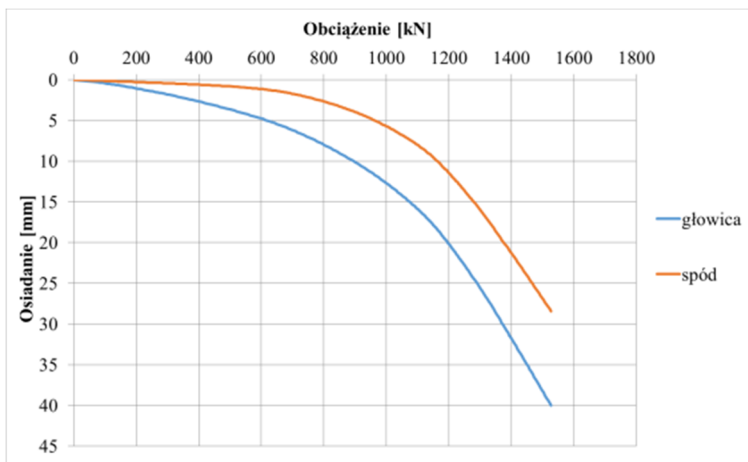
W modelu wyjściowym do dalszych analiz, wysokość modułu $E_{ur, sr}$ cementogruntu przyjęto jako średnią wartość $E_{ur, sr}$ badanych próbek określonego na podstawie badań wytrzymałości na ściskanie. Kształt otrzymanej analizy numerycznej zależności obciążenie-osiadanie (krzywa opisana jako $E_{ur, sr}$) odpowiada wykresom uzyskanym podczas próbnych obciążeń (krzywa Kol.1/2) (rys. 8b). Największa rozbieżność między krzywą zamodelowaną, a rzeczywistymi występuje przy oddziaływaniu małych obciążeń (inny kąt nachylenie początkowego odcinka prostego). Wysoki moduł dla małych odkształceń w początkowym stadium obciążania zostało zaobserwowane także podczas innych analiz [2].



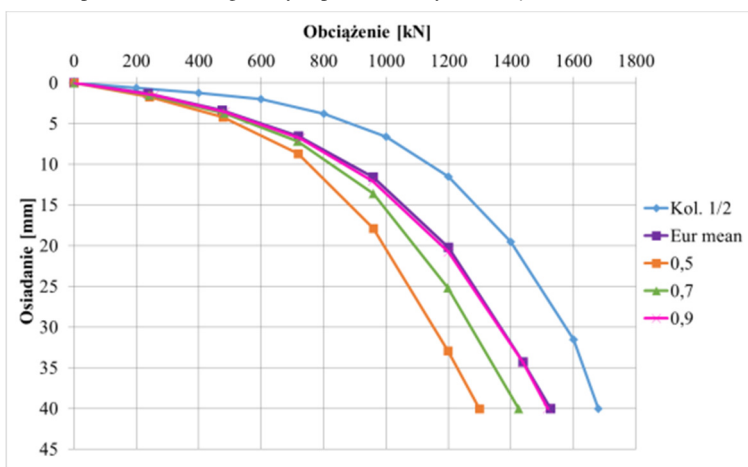
Rysunek 8. a) Podgląd modelu wyjściowego, b) Zależność obciążenie-osiadanie dla $E_{ur, mean}$ oraz wyników rzeczywistych

Zgodnie z przeprowadzoną symulacją, w czasie badania podstawa kolumny przemieściła się o ok. 28,5 mm przy założonym osiadaaniu głowicy kolumny równym 40,0 mm (rys. 9). Oznacza to że wartość skrócenie kolumny wyniosła ponad 25% osiadań pomierzonych na głowicy. Należy zwrócić uwagę na sposób kształtowania się krzywych w zakresie obciążenia 0–600 kN. W obu przypadkach, w tym przedziale wykres jest w przybliżeniu funkcją liniową, a wraz ze wzrostem obciążeń różnice wartości między poszczególnymi krzywymi znacznie rosną. Dla obciążenia 600 kN przemieszczenie głowicy jest ponad czterokrotnie większe niż podstawy kolumny. W kolejnym etapie obliczeń sprawdzono jak zmiana parametrów kontaktowych kolumna-grunt wpłynie na uzyskiwane wyniki. Symulacje przeprowadzono dla interfejsu równego 0,5, 0,7 oraz 0,9. Otrzymane zależności przemieszczenia od obciążenia przedstawiono na rysunku 10.

Przy parametrze kontaktowym równym 0,9 nie są widoczne znaczne różnice w kształcie oraz przebiegu uzyskanej krzywej względem wykresu pierwotnego. Wraz z obniżeniem parametru kontaktowego, maleje wartość uzyskanych wyników, jednak kształt wykresu pozostaje analogiczny. W porównaniu do wykresu bazowego, przy parametrze kontaktowym równym 0,5, analogiczne przemieszczenie uzyskano przy oddziaływaniu obciążenia około 15% mniejszego. W przypadku kontaktu wynoszącego 0,7, różnica ta wynosi około 6,5%. Zdaniem autorów powyższe wyniki wykazują, że definiowanie parametrów kontaktowych mniejszych od 1,0 przy tego rodzaju analizie jest zbędne. Autorzy będą prowadzić dalsze analizy w tej kwestii.



Rysunek 9. Zależność przemieszczenia głowicy i spodu kolumny od obciążenia;



Rysunek 10. Krzywe obciążenie-przemieszczenie dla różnych parametrów kontaktowych

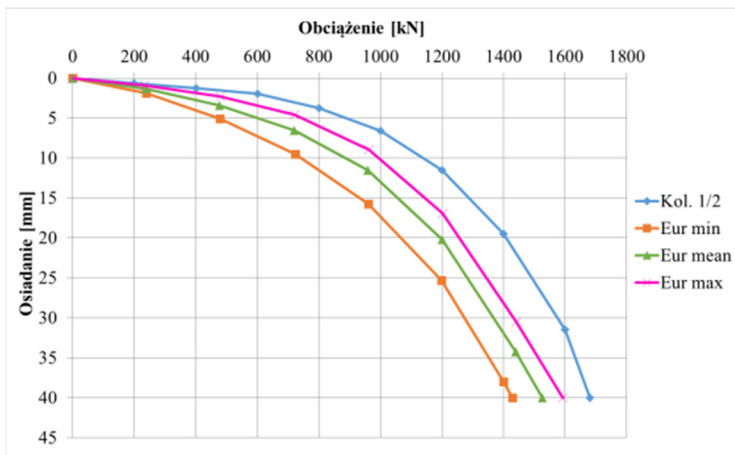
W dalszej części obliczeń sprawdzono w jaki sposób kształtują się wykresy przy zmianie modułu E cementogruntu na wartości minimalne, średnie oraz maksymalne modułu E_{50} (rys. 12) oraz E_{ur} uzyskane z badań wytrzymałości na ściskanie (rys. 11).

W obu przypadkach rozbieżności między wartościami minimalnymi oraz maksymalnymi były znaczące, co uwidacznia się także na wykresach uzyskanych z analizy numerycznej. Dla modułu E_{ur} maksymalna wartość parametru była prawie trzykrotnie większa od minimalnej. Kształt krzywych dla każdej wartości jest analogiczny, a różnica w uzyskanych wynikach między $E_{ur \max}$ a $E_{ur \min}$ wynosi około 12%. Większe dysproporcje można zauważyć dla różnych wartości modułu E_{50} . Należy mieć na uwadze, że minimalna wartość tego modułu była dwanaście razy mniejsza od maksymalnej. Kształty krzywych dla $E_{50 \text{ mean}}$ oraz $E_{50 \max}$ są analogiczne, natomiast dla $E_{50 \min}$ widoczna jest bardzo niska sztywność zarówno w przypadku małych jak i dużych obciążeń. Średnia różnica między wartością maksymalną i minimalną sięga aż 65%.

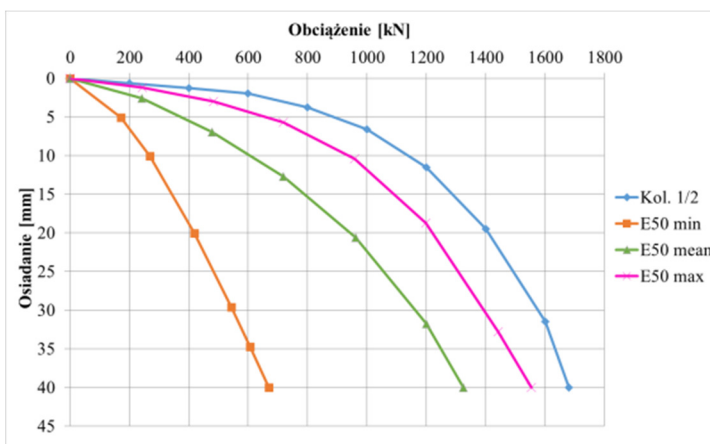
Znaczne dysproporcje między wartościami zarówno f_c jak i modułów E_{50} oraz E_{ur} materiału, a co za tym idzie uzyskanie różnych zależności obciążenie-osiadanie świadczą o wysokiej niejednorodności badanego cementogruntu. Zdaniem autorów wykonana analiza

potwierdza potrzebę zwracania dużej uwagi na przygotowywanie badań oraz testów próbnych, a także konieczność przeprowadzania rozbudowanej kontroli jakości wykonanych kolumn.

Najistotniejszym spostrzeżeniem jest fakt, że najlepszą zgodność między krzywą numeryczną a krzywą z testów statycznych uzyskano po zdefiniowaniu w modelu materiałowym wartości średniej E_{ur} , a nie E_{50} jak to się zwykle praktykuje.



Rysunek 11. Krzywe obciążenie-przemieszczenie dla różnych wartości E_{ur}



Rysunek 12. Krzywe obciążenie-przemieszczenie dla różnych wartości E_{50}

5. Podsumowanie

W artykule poruszono kilka szczegółów dotyczących badań jakości kolumn DSM wykonywanych na mokro. Autorzy opisali pokrótce dostępne metody sprawdzania jakości kolumn DSM skupiając się na badaniach sztywności (w teście statycznym in situ oraz na próbkach w laboratorium). Wykonana analiza parametrów kontaktowych wykazała, że najbardziej zbliżone wyniki do badań rzeczywistych otrzymano przy braku interfejsu na powierzchni kolumna-grunt oraz zdefiniowaniu modułu E_{ur} cementogruntu. Zdaniem autorów szczegółowe rozpoznanie geologiczne, wyniki badań cementogruntu z pomiarem odkształceń oraz dostępne oprogramowanie mogą posłużyć do przygotowania modelu osiowosymetrycznego kolumny oraz symulacji próbnego obciążenia. Uzyskane w ten sposób

wyniki są wiarygodne oraz nie odbiegają znacząco od rzeczywistego zachowania się kolumny w czasie próbnego obciążenia. Dzięki temu możliwe jest wyeliminowanie wykonywania testów statycznych (próbnych obciążeń) in situ, co przekłada się również pozytywnie na aspekty finansowe oraz czasowe realizacji. Jednocześnie autorzy zalecają analizę również innych, mniej znanych w kraju parametrów, takich jak wskaźnik wymieszania BRN. Praktyka taka umożliwi uzyskanie informacji o jakości całej kolumny, a nie tylko jej przypowierzchniowej części.

Literatura

- [1] TOPOLNICKI M., Projektowanie i wykonawstwo posadowienia wiaduktów autostradowych na podłożu wzmocnionym metodą wglębnego mieszania gruntu (DSM). V Ogólnopolska Konferencja Mostowców. 2008. Wisła.
- [2] TOPOLNICKI M., Geotechnical design and performance of road and railway viaducts supported on DSM columns – a summary of practice. International Conference on Deep Mixing, June 2–5, 2015, San Francisco.
- [3] KANTY P., Aspekty projektowanie kolumn DSM pod obiektami mostowymi. Wrocławskie Dni Mostowe 2016. Wrocław 2016.
- [4] TOPOLNICKI M., Dobra praktyka stosowania i projektowania wglębnego mieszania gruntu na mokro (DSM). XXXII Warsztaty pracy projektanta konstrukcji. Wisła 2017.
- [5] PN-EN 14679:2005, Wykonawstw specjalnych robót geotechnicznych – Wglębne mieszanie gruntu.
- [6] Wytoczne wzmocniania podłoża gruntowego kolumnami sztywnymi. Projektowanie. Wykonawstwo. Kontrola, Opracowanie IBDiM, Warszawa. 2017 (w opracowaniu).
- [7] ADAM D. I INNI, Qualitätssicherung für Bodenvermörtelung. Österreichische bautechnik vereinigung. 2012.
- [8] PERERA ASR I INNI, State of practice report UK stabilization / solidification. Treatment and remediation – part VI: Quality assurance and Quality control. The International Conference on Stabilisation/Solidification Treatment and Remediation, 2005, Cambridge, UK pp. 459–468.
- [9] MARY ELLEN C. I INNI, Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation Support. 2013.
- [10] FILZ G., BRUCE D., Innovation and Collaboration in Deep Mixing. Konferencja Grouting 2017 (GSP 289).
- [11] BRUCE D.A. i inni, Deep Mixing: QA/QC and Verification Methods. Grouting Sol Improvement, Geosystems Including Reinforcement. Proceedings of the 4th International Conference on Ground Improvement Geosystems. Finnish Geotechnical Society, Helsinki, Finland, 2000, pp. 11–22.

TRIAL LOAD TESTS OF DEEP SOIL MIXING COLUMNS STRENGTHENING THE SOIL UNDER BRIDGES

Summary

In the paper a few points about quality tests of wet soil mixing columns were mentioned. Currently many soils are strengthened by soil mixing columns of large diameter. In this case trial load test of single column is not always a proper quality check method. The paper contains results of several trial load tests, results of uniaxial strength tests and numerical simulation

of trial load test. Based on all this data the conclusion was made that a proper material laboratory tests (with strain measurements) and numerical analysis can lead to the same conclusion as a results of trial load tests. Additionally the Authors recommend to pay more attention to execution parameters of soil mixing columns like BRN.