

Projektowanie kolumn piaskowych w osłonie geosyntetycznej GEC z uwzględnieniem samowzmocnienia podłoża po instalacji kolumn metodą przemieszczeniową

Design of a sand column in a geosynthetic cover GEC taking into account the self-reinforcement of the subsoil after the installation of the column using the displacement method

dr inż. Andrzej Łopatka (ORCID 0000-0002-9533-5836), Przedsiębiorstwo Realizacyjne INORA Sp. z o.o.

DOI 10.5604/01.3001.0053.6970

Streszczenie: Artykuł przedstawia przykład obliczeniowy obrazujący wpływ uwzględnienia samowzmocnienia gruntu słabonośnego po instalacji kolumn metodą przemieszczeniową na pracę systemu GEC. Przykład bazuje na wynikach z badań prowadzonych w ramach projektu „Opracowanie nowatorskiej metody prognozowania parametrów gruntu dla celów budowlanych” (UDA-RPSL.01.02.00-24-0626/17-00) dofinansowanego w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014–2020 ze środków E.F.R.R.

Słowa kluczowe: kolumny piaskowe w osłonie geosyntetycznej, kolumny GEC, kolumny Ringtrac, samowzmocnienie, osłona geosyntetyczna, EBGEO.

Abstract: The article presents a design example showing the effect of self-strengthening of weak soil after the installation of columns using displacement method on the behaviour of the GEC system. The example is based on the results of research work on the change of soft soil parameters „Development of an innovative method of forecasting of soil parameters for construction purposes” (UDA-RPSL.01.02.00-24-0626/17-00) co-financed under the Regional Operational Program of the Silesian Voivodeship for 2014-2020 from the funds of E.F.R.R.

Keywords: sand columns in geosynthetic cover, GEC column, Ringtrac column, self-reinforced, geosynthetic cover, EBGEO.

1. Wprowadzenie

Presja inwestycyjna ostatnich lat wymusza zagospodarowywanie miejsc dotychczas pomijanych ze względu na występujące na nich problemy natury geotechnicznej. W obszarach tych częstokroć stosuje się wzmocnienia za pomocą różnego rodzaju kolumn, w tym coraz częściej za pomocą kolumn piaskowych w osłonie geosyntetycznej GEC (*Geosynthetic Encased Column*). Wymiarowanie kolumn odbywa się na podstawie cech fizyko mechanicznych warstwy słabej określonych w stanie in situ, a więc w stanie naturalnym przed rozpoczęciem inwestycji. Podejście to w pewnych sytuacjach skutkuje nieekonomicznym rozwiązaniem, ponieważ jest pomijany wpływ samowzmocnienia się gruntu słabonośnego bezpośrednio po instalacji kolumn metodą przemieszczeniową, a więc jeszcze przed przyłożeniem obciążenia zewnętrznego.

2. Zarys problemu

Obszary o skomplikowanej budowie geologicznej wymuszają częstokroć doprowadzenie do częściowego odciążenia warstw słabych za pomocą różnego rodzaju kolumn opartych na warstwie nośnej. Istnieje wiele rodzajów kolumn wzmacniających. Poszczególne typy różnią się rodzajem materiału, z jakiego są wykonane, techniką instalacji oraz nośnością, a czynniki te określają projektantowi ścieżkę wymiarowania kolumn. W ostatnich latach coraz częściej wykonuje się wzmocnienia za pomocą kolumn GEC. System ten charakteryzuje się pewnymi osiadaniami głowicy, co w konsekwencji prowadzi do obciążenia warstwy słabonośnej, a więc do sytuacji, w której warstwa wzmacniana uczestniczy w procesie przekazywania obciążeń i wpływa na nośność kolumny GEC. Projektowanie systemu wzmacniającego przebiega na podstawie własności podłoża w stanie in situ, tymczasem przeprowadzone badania wykazały, że metoda przemieszczeniowa

prowadzi do zmiany parametrów (do wzmocnienia podłoża). W metodzie przemieszczeniowej kolumnę tworzy się, wypierając grunt słaby na boki bez jego uprzedniego wybierania. Metoda przemieszczeniowa charakteryzuje się krótkim czasem wykonania oraz nie wymaga wywozu i składowania gruntu uprzednio wybranego, zatem taki sposób instalacji jest najbardziej pożądanym i najczęściej stosowanym. Samowzmocnienie warstwy słabej po instalacji kolumn metodą przemieszczeniową jest wynikiem rozepchnięcia gruntu na boki, tzn. redukcji porowatości. Obecnie efekt samowzmocnienia nie jest ujmowany w procesie projektowym, chociaż w wielu publikacjach postuluje się konieczność określenia własności wzmacnianych warstw „nienośnych” osiągniętych po instalacji kolumn [1].

Przykładem wagi wstępnego samowzmocnienia gruntu może być budowa autostrady A-2 oddanej do użytkowania w 2012 roku. Na odcinku Łągów – Jordanowo zalegała niecka gruntów organicznych o głębokości 28 m, którą wzmocniono instalowanymi przemieszczeniowo kolumnami GEC [2]. Prowadzony kompleksowy monitoring systemu wzmacniającego wykazał mniejsze niż prognozowano osiadania terenu oraz mniejsze wyłężenie kolumn. Osiadania prognozowane w projekcie wynosiły 2,33 m, natomiast wartości zarejestrowane na budowie wynosiły jedynie 1,05 m. Ponadto przewidywano, że siły obwodowe w osłonie geosyntetycznej wyniosą 122 kN/m, natomiast wartości rzeczywiste wynosiły 75 kN/m [3]. Podobne wnioski można wysunąć z analizy monitoringu wzmocnienia na niemieckiej, kolejowej obwodnicy miasta Sande. W tym przypadku za pomocą systemu instalowanych przemieszczeniowo kolumn Ringtrac® GEC wzmocniono podłoże projektowanego nasypu kolejowego, w którym zalegała warstwa torfów o miąższości do 15 m. Zarejestrowana maksymalna wartość osiadań wynosiła 0,8 m, podczas gdy na etapie projektu przewidywano 1,5 m. Co więcej, na przedmiotowej budowie rejestrowano poziomy ciśnienia wody w podłożu. Pomiarzy wykazały, że przemieszczeniowa instalacja kolumn wywołała nadwyżki ciśnienia mieszczące się w zakresie $\Delta u = 60\text{--}100$ kN/m². Odpowiada to obciążeniom wywołanym przez nasyp o wysokości 3–5 m [4]. Można więc wysnuć wniosek, że w obu przypadkach znaczne przeszacowanie osiadań na etapie projektowym było wynikiem pominięcia wstępnego samowzmocnienia gruntu słabonośnego po instalacji kolumn oraz jego dalszego wzmacniania się na skutek zwiększania się średnic kolumn pod obciążeniem zewnętrznym. Uwzględnienie tych czynników w procesie projektowym pozwoliłoby opracować bardziej ekonomiczne rozwiązanie.

W niniejszym artykule przedstawiono przykład obliczeniowy obrazujący wpływ uwzględnienia samowzmocnienia gruntu na pracę kolumn GEC Ringtrac®.

3. Przykład obliczeniowy

Celem ilustracji wpływu samowzmocnienia podłoża na pracę systemu GEC wykonano przykład, w którym zastosowano

dwa uzyskane w badaniach modelowych zestawy parametrów gruntu. Zestawy te opracowano podczas badań wykonanych na stanowisku modelowym w małej skali z odzwierciedlającymi warunkami gruntowo-wodnymi przy różnych gęstościach pokrycia terenu kolumnami instalowanymi metodą przemieszczeniową. Badania te wykonywane były w ramach projektu „Opracowanie nowatorskiej metody prognozowania parametrów gruntu dla celów budowlanych” współfinansowanego w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego.

Przykład obliczeniowy wykonano dla:

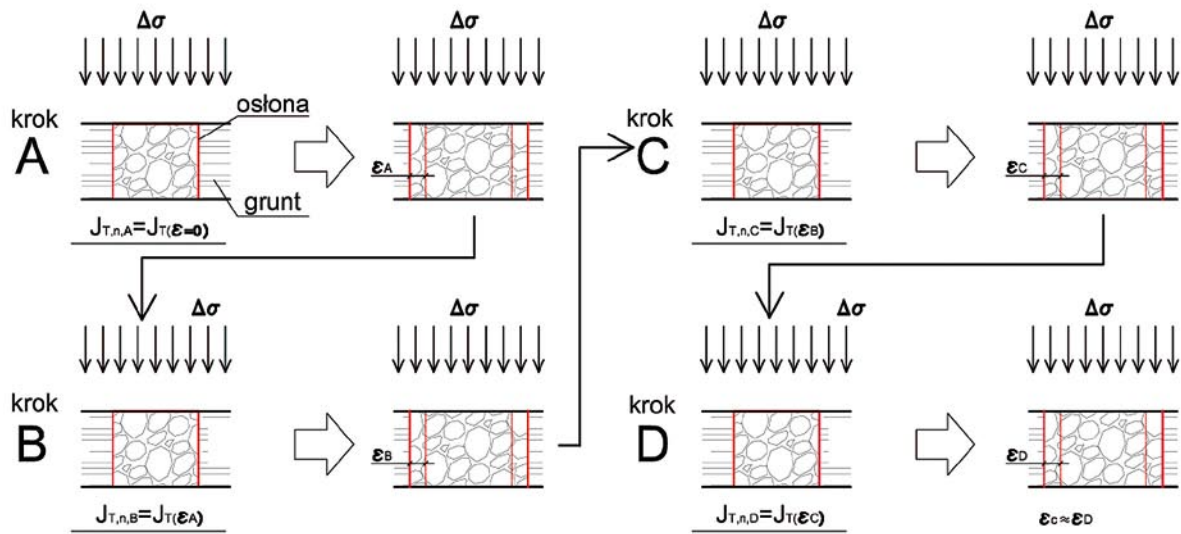
- A: parametrów w stanie in situ – przed instalacją kolumn (przy wskaźniku wymiany gruntu wyrażającego udział kolumn w powierzchni wzmacnianego terenu $\alpha = 0,0$),
- B: parametrów uzyskanych bezpośrednio po instalacji kolumn metodą przemieszczeniową (a jeszcze przed przyłożeniem obciążenia zewnętrznego) dla $\alpha = 0,2$.

Obliczenia dotyczące efektywności wzmocnienia, osiadań terenu oraz bezpieczeństwa kolumny dadzą różne rezultaty przy zastosowaniu różnych opisów matematycznych systemu. Dotychczas powstało niewiele modeli służących analizie zachowania się systemu GEC. Prognozowana praca kolumn jest inna przy zastosowaniu każdego z nich. Różnice wynikają przede wszystkim z przyjętych założeń dotyczących pracy poszczególnych ośrodków (osłona, grunt słabonośny oraz mineralne wypełnienie). Wśród obecnie funkcjonujących modeli można wymienić:

- model Pulko–Majes–Logar [5] zakłada sprężysto-plastyczne zachowanie się kolumny oraz liniową sprężystość gruntu słabonośnego;
- model Murugesan–Rajagopal całkowicie pomija współpracę gruntu słabonośnego z kolumną. Model zakłada, że całkowite obciążenie zewnętrzne jest przenoszone przez kolumnę [6];
- model Raithel–Kempfert, model ten zakłada nieliniową sprężystość gruntu słabego, liniową sprężystość osłony geosyntetycznej oraz sztywno plastyczne zachowanie się mineralnego wypełnienia [7, 8];
- model Meyer–Łopatka, zakładający nieliniową sprężystość gruntu słabego, liniową sprężystość osłony geosyntetycznej, wpływ podatności warstwy nośnej na osiadania głowicy kolumny oraz wpływ samowzmocnienia gruntu jako skutek instalacji kolumn metodą przemieszczeniową [9, 10].

Wszystkie aktualnie istniejące modele obliczeniowe kolumn GEC zakładają sztywność sieczną osłony geosyntetycznej obowiązującą w określonym przedziale odkształceń. Prawidłowe określenie jej wartości wymaga uprzedniego zaprognozowania spodziewanego zakresu odkształcenia materiału. W przypadku osłon kolumn GEC zagadnienie to jest praktycznie niewykonalne. Wynika to z dwóch powodów:

- system kolumn GEC jest systemem „samoregulującym” się – grunt słabonośny osiędzie dokładnie tyle na ile pozwoli mu kolumna i przeniesie obciążenie o wartości odpowiadającej temu osiadowaniu. Wyłężenie osłony geosyntetycznej wynika



Rys. 1. Schemat iteracyjnego określenia sztywności osłony w plastrze obliczeniowym kolumny GEC

z rozkładu obciążenia zewnętrznego na powierzchni komórki jednostkowej a rozkład ten początkowo jest niezany;

- wyciężenie osłony geosyntetycznej, a więc i jej odkształcenie wynika z rozkładu naprężeń poziomych w układzie grunt/kolumna i jest zmienne wraz z głębokością.

Te dwa czynniki wskazują, że zasadne jest modelowanie kolumn GEC, zakładając sztywność styczną, gdyż tylko w ten sposób można wykonać dokładne prognozy rozwoju odkształceń osłony w poszczególnych strefach kolumny podczas obciążania systemu nośnego. Przykład obliczeniowy wykonano za pomocą zmodyfikowanego modelu EBGeo [8]. Modyfikacja polega na zmianie opisu osłony geosyntetycznej z materiału o sztywności siecznej na materiał o sztywności stycznej, właściwej dla osiągniętego odkształcenia. Jest to o tyle istotne, że spośród parametrów materiałowych kolumny GEC czynnikiem, który ma największy wpływ na jej pracę, jest sztywność osłony geosyntetycznej. Wartość tego parametru przekłada się na sztywność osiową kolumny, istotnie wpływając na rozkład obciążenia na powierzchni terenu oraz na jego osiadania [10, 11].

Ponieważ stan naprężeń zmienia się wraz z głębokością, zachowanie niezbędnej dokładności obliczeń wymaga podziału komórki jednostkowej na cienkie poziome warstwy obliczeniowe, (plastry). Dla każdego wydzielonego plastra wyznacza się indywidualnie stan naprężeń i odkształceń w poszczególnych ośrodkach, a wynikowe osiadanie jest sumą skrótów wszystkich plastrów obliczeniowych. Oznacza to, że w danym kroku obciążenia każdemu plasterowi zostanie przypisana indywidualna wartość sztywności uzależnionej od odkształceń osłony. Problematyczne wydaje się jednak uprzednie określenie odkształcenia osłony w analizowanym plastrze. Praktycznie można to wykonać, stosując metodę iteracyjną, która polega na kilkukrotnym przeliczeniu układu, zakładając różne wartości odkształcenia osłony, przy czym w pierwszym kroku obciążenia przyjmuje się

sztywność dla $\epsilon = 0$. Za poprawny stan ustalony (a zarazem stan początkowy dla kolejnego kroku obciążenia) przyjmuje się stan, dla którego wynikowe odkształcenia materiału są zbliżone do odkształceń, dla których określono sztywność osłony. Praktyka wykazuje, że zastosowanie czterech iteracji w obrębie analizowanego kroku obciążenia i dla analizowanego plastra obliczeniowego jest wystarczające do uzyskania satysfakcjonującej dokładności.

Do opisu sztywności w analizowanym przykładzie zastosowano materiał dla izochrony wykreślonej dla 120 lat pracy materiału opisany funkcją $\beta(\epsilon)$:

$$\beta(\epsilon) = -0,0271\epsilon^4 + 0,3417\epsilon^3 - 0,6556\epsilon^2 + 4,9056\epsilon \quad (1)$$

Sztywność styczną materiału uzyskano przez różniczkowanie krzywej rozciągania:

$$J_T = \frac{\partial f}{\partial \epsilon} \quad (2)$$

gdzie krzywa rozciągania $f(\epsilon)$:

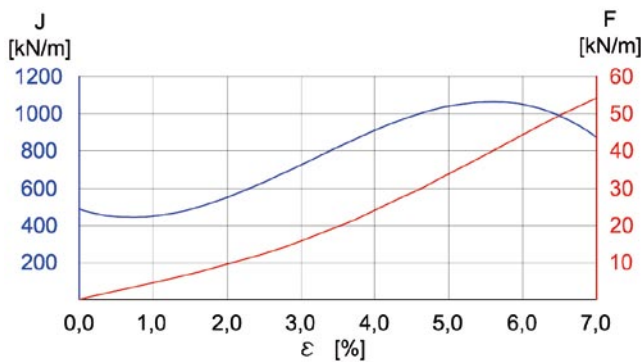
$$f(\epsilon) = R_{B,ko} \beta(\epsilon) \quad (3)$$

gdzie:

$R_{B,ko}$ – krótkoterminowa charakterystyczna wytrzymałość osłony na rozciąganie [kN/m].

W przykładzie zastosowano materiał o krótkoterminowej charakterystycznej wytrzymałości na rozciąganie $R_{B,ko} = 100$ kN/m. Wykres funkcji (7) i (8) przedstawiono na rysunku 2.

W przykładzie analizowano pracę kolumn o długości 13 m instalowanych przemieszczeniowo w rozstawie zapewniającym wskaźnik wymiany gruntu $\alpha = 0,2$. Obliczenia wykonano dwukrotnie – dla parametrów gruntu słabonośnego w stanie in situ oraz przyjmując parametry uzyskane po „wzmocnieniu”, tzn. po instalacji kolumn metodą przemieszczeniową. W przyjętym modelu obliczeniowym sztywność gruntu



Rys. 2. Krzywa rozciągania (zależność $F-\epsilon$) oraz sztywność osłony geosyntetycznej, (zależność $EA_T-\epsilon$)

słabonośnego jest funkcją naprężenia. Na podstawie przebiegu krzywej ściśliwości określa się referencyjny moduł ściśliwości $M_{0,ref}$ dla naprężenia referencyjnego oraz tzw. wykładnik Ohdego m . Schemat określenia powyższych parametrów przedstawiono na rysunku 3a natomiast przebieg odpowiednich prostych uzyskanych z badań modelowych – na rysunku 3b.

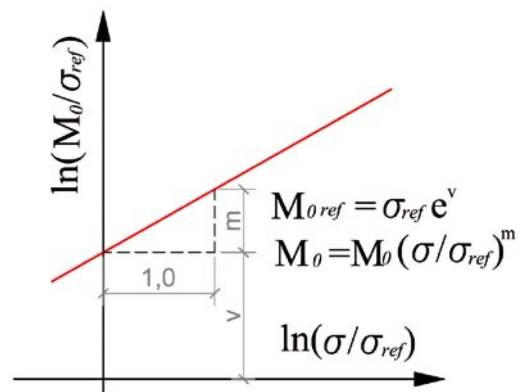
Parametry warstw gruntowych przedstawiono w tabeli 1. Założono obciążenie zewnętrzne o wartości 200 kN/m². Obliczenia wykonano, dzieląc komórkę jednostkową na 186 elementarnych plastrów, wyznaczając dla każdego z nich osiągnięte odkształcenie osłony geosyntetycznej. Aby przedstawić proces rozwoju odkształceń osłony, obliczenia wykonano, przykładając obciążenie zewnętrzne w dziesięciu krokach – każdorazowo po 20 kN/m².

4. Podsumowanie

Wzmocnienie gruntu poprzez instalację kolumn metodą przemieszczeniową prowadzi do zredukowania odkształceń osłony geosyntetycznej we wszystkich strefach kolumny (rys. 5, tab. 2). Ponadto zmniejszeniu ulega wartość współczynnika redystrybucji naprężenia. Współczynnik ten wyraża część obciążenia zewnętrznego przenoszoną przez kolumnę. Spadek współczynnika E przekłada się na odciążenie kolumny z równoległym wzrostem przekazywanego na grunt słabonośny. Zmniejszenie osiadań w modelu uwzględniającym wzmocnienie gruntu można również zauważyć w tabeli 2.

Tabela 1. Parametry gruntu słabonośnego i mineralnego wypełnienia kolumny

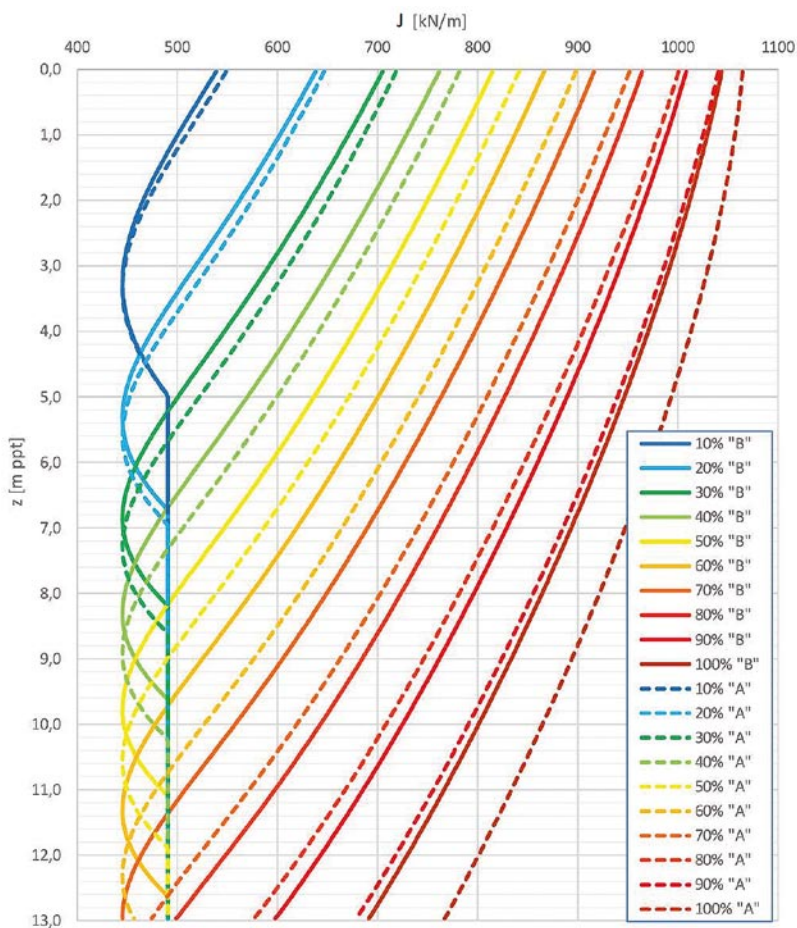
| | Grunt słabonośny | | | | | | | Wypełnienie kolumny | |
|--------------------------------|--------------------------------|-------------|---------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-----------|---------|--------------------------------|-------------|
| | γ' [kN/m ³] | Φ' [°] | c' [kN/m ²] | $M_{0,ref}$ [kN/m ²] | σ_{ref} [kN/m ²] | ν [-] | m [-] | γ' [kN/m ³] | Φ' [°] |
| Zestaw A in situ a=0 | 12 | 18 | 6,6 | 611 | 100 | 0,4 | 0,65 | 19 | 32 |
| Zestaw B po instalacji a = 0,2 | | 13 | 9,3 | 639 | | | 0,57 | | |



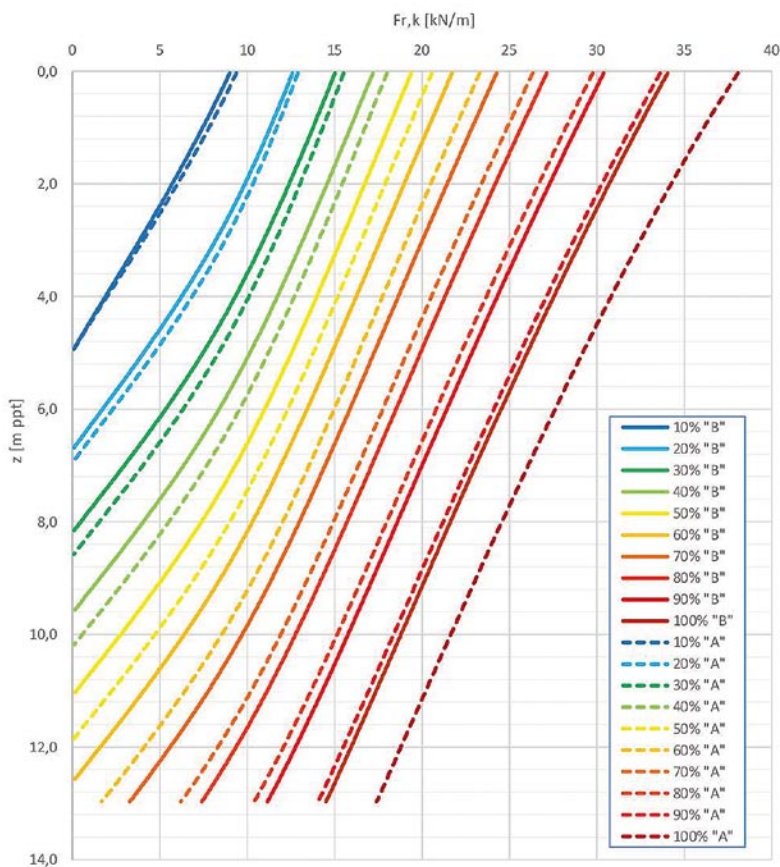
Rys. 3. Schemat określenia parametrów gruntu słabonośnego (a) oraz relacja $\ln(E_{oeed}/100)-\ln(\sigma/100)$ dla przeprowadzonych badań (b)

Efekt samowzmocnienia gruntu poprzez instalację kolumn metodą przemieszczeniową można przekuć na realne korzyści ekonomiczne poprzez redukcję liczby kolumn wzmocniających. Dla analizowanego przykładu – uwzględniając samowzmocnienie gruntu – można osiągnąć identyczne odkształcenie osłony i osiadanie terenu jak w modelu dla parametrów gruntu w stanie in situ ($\epsilon_{max} = 5,39\%$, $s = 1,08$ m), przy zredukowanym wskaźniku wymiany gruntu do poziomu 18,6%. Oznacza to, że w przypadku wzmocnienia terenu o powierzchni 1 ha za pomocą kolumn GEC o typowej średnicy 0,8 m uwzględnienie samowzmocnienia gruntu doprowadzi do redukcji ok. 300 sztuk kolumn wzmocniających.

Rys. 4. Sztywność osłony geosyntetycznej na głębokości kolumny przy zastosowaniu parametrów gruntu słabonośnego w stanie *in situ* (zestaw A) oraz po wzmocnieniu (zestaw B)



Rys. 5. Odkształcenia osłony geosyntetycznej na głębokości kolumny przy zastosowaniu parametrów gruntu słabonośnego w stanie *in situ* (zestaw A) oraz po wzmocnieniu (zestaw B)



Rys. 6. Siły obwodowe w osłonie geosyntetycznej na głębokości kolumny przy zastosowaniu parametrów gruntu słabonośnego w stanie *in situ* (zestaw A) oraz po wzmocnieniu (zestaw B)

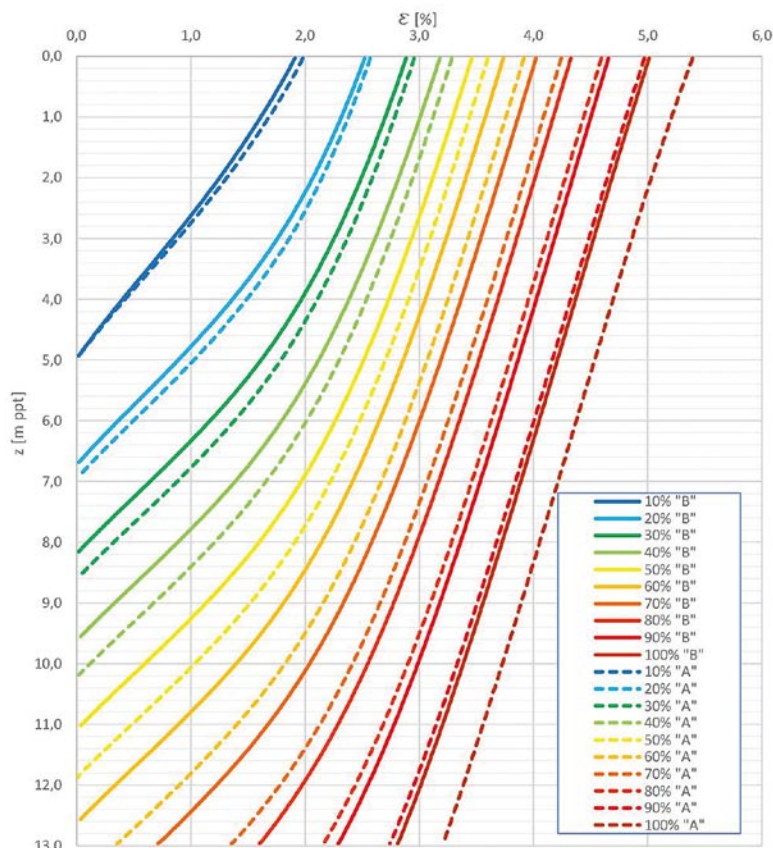


Tabela 2. Wyniki obliczeń

| Obciążenie zewnętrzne [kN/m ²] | Współczynnik redystrybucji naprężenia E [-] | | Osiadanie s[m] | | Odształcenie maksymalne ε _{max} [%] | |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------|-------------------|-------------|----------------------------------------------|-------------|
| | po instalacji „B” | in situ „A” | po instalacji „B” | in situ „A” | po instalacji „B” | in situ „A” |
| 20 | 0,999 | 0,999 | 0,004 | 0,021 | 1,91 | 1,98 |
| 40 | 0,829 | 0,838 | 0,008 | 0,032 | 2,52 | 2,57 |
| 60 | 0,758 | 0,771 | 0,161 | 0,204 | 2,88 | 2,95 |
| 80 | 0,722 | 0,738 | 0,307 | 0,365 | 3,18 | 3,28 |
| 100 | 0,702 | 0,719 | 0,445 | 0,513 | 3,46 | 3,60 |
| 120 | 0,690 | 0,709 | 0,573 | 0,649 | 3,74 | 3,92 |
| 140 | 0,684 | 0,704 | 0,693 | 0,771 | 4,02 | 4,24 |
| 160 | 0,681 | 0,704 | 0,802 | 0,881 | 4,33 | 4,59 |
| 180 | 0,682 | 0,704 | 0,901 | 0,982 | 4,66 | 4,97 |
| 200 | 0,683 | 0,705 | 0,995 | 1,080 | 5,01 | 5,39 |

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kłosiński B., Gajewska B., Rozwój metod wzmocnienia podłoża gruntowego, Seminarium IBDiM i PZWFS Wzmocnianie podłoża i fundamentów, Warszawa, 2011
- [2] Sobolewski J., Wzmocnienie podłoża słabonośnego dla posadowienia budowli ziemnych, Międzynarodowe Seminarium w WOIB Budowle ziemne jako obiekty na terenach zalewowych, Poznań, 2013
- [3] Sobolewski J., Raithel M., Volker K., Georg F., Nasyp autostrady A2 posadowiony na kolumnach z piasku w opaskach geosyntetycznych, Inżynieria Morska i Geotechnika 4/2012, str. 504-514
- [4] Heine-Seela J., Taetz S., Geotechnische Herausforderungen bei der Planung und Realisierung der Bahnumfahrung Sande, GeoForum, Huesker, 2019
- [5] Pulko B., Majes B., Logar J., Geosynthetic – encased stone columns: Analytical calculation model, Geotextiles and Geomembranes 29(1)2011, str. 29–39
- [6] Murugesan S., Rajagopal K., Studies on the Behaviour of Single and group of Geosynthetic Encased Columns, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering, tom 136, 2010, str. 129–139
- [7] Reithel M., Zum trag ung Verformungsverhalten von geokunststoffummantelten Sandsaulen, Schriftenreihe Geotechnik, Universitat Gh Kassel, Heft 6, Kassel, 1999
- [8] Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcement – EBGE0, Monachium: Ernst & Sohn, 2010
- [9] Łopatka A., Analiza mechanizmu współpracy kolumny piaskowej w osłonie geosyntetycznej z gruntem, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, 2016
- [10] Meyer Z., Sobolewski J., Łopatka A., Kolumny piaskowe w otoczce geosyntetycznej. Prezentacja nowego opisu matematycznego systemu GEC poprzez studium najważniejszych parametrów, XVII Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Inżynierii Geotechnicznej, Łódź, 2015
- [11] Łopatka A., Kolumny piaskowe w otoczce geosyntetycznej. Prezentacja pracy systemu GEC poprzez studium najważniejszych parametrów, Inżynieria Morska i Geotechnika 6/2013