

Kolumny piaskowe w otoczce geosyntetycznej Prezentacja nowego opisu matematycznego systemu GEC poprzez studium najważniejszych parametrów

Prof. dr hab. inż. Zygmunt Meyer¹, dr inż. Janusz Sobolewski², mgr inż. Andrzej Łopatka³

¹Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

²HUESKER Synthetic GmbH

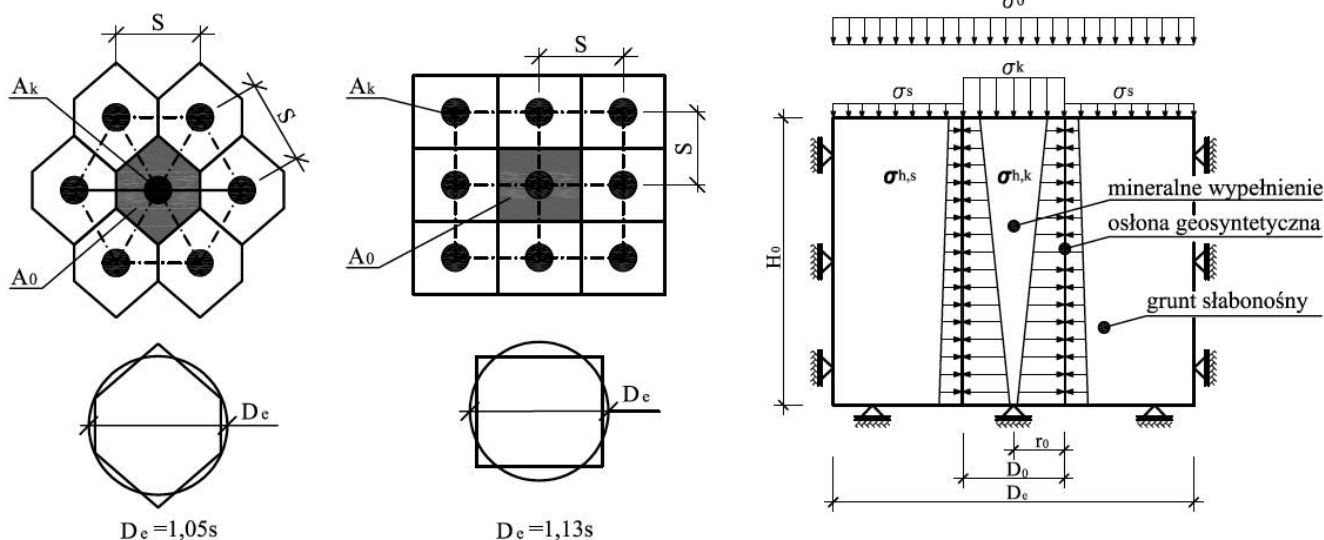
³Przedsiębiorstwo Realizacyjne INORA Sp. z o.o.

Wzmocnienie za pomocą różnego rodzaju kolumn jest jedną z częściej stosowanych metod wzmocnienia podłoża w sytuacji jego niewystarczającej nośności bądź zbyt małej sztywności. Efekt wzmocnienia w tym przypadku uzyskuje się, doprowadzając do odciążenia gruntu słabego. Zjawisko to jest skutkiem wprowadzenia w słabe podłoże sztywnych, opartych na nośnej warstwie kolumn, co przy jednoczesnej instalacji zbrojenia nadpalowego prowadzi do redystrybucji naprężenia w poziomie ich głowic. W efekcie kolumna przejmuje znacznie większą część obciążenia niż otaczający ją grunt słaby [5].

Kolumna GEC (*Geosynthetic Encased Column*) jest smukłą kolumną piaskową, w której zabezpieczenie przed zniszczeniem wewnętrznym polegającym na spęczeniu materiału mineralnego uzyskuje się za pomocą otaczającego kolumnę geosyntetyku o określonej sztywności na rozciąganie. System kolumn GEC jest systemem „samoregulującym” się, co oznacza, że grunt słabonośny osiadzie dokładnie tyle, na ile pozwoli mu kolumna i przeniesie obciążenie o wartości odpowiadającej temu osiadaniu. Pierwsze wdrożenie technologii kolumn GEC

miało miejsce w 1993 roku. Pomimo tego, że jest to stosunkowo młoda technologia, w ciągu ostatnich lat wykonano szereg wzmocnień, w których system ten sprawdził się w bardzo trudnych warunkach. Wyjątkowość tych realizacji polegała na charakterze gruntów słabych, (fabryka Airbusa 320 w Hamburgu) oraz na ich miąższości (autostrada A-2 Łągów – Jordanowo, $H_{\max} = 28$ m) [6].

Aktualnie najbardziej popularnym i akceptowanym modelem obliczeniowym kolumn piaskowych w otoczce geosyntetycznej jest model niemiecki (Reithel oraz Kempfert) przedstawiony w zaleceniach EBGeo [4] dotyczących wymiarowania konstrukcji z gruntu zbrojonego. Model ten zaprezentowano poprzez ukazanie wpływu najważniejszych czynników na pracę systemu GEC w publikacji [5]. W pracy tej stwierdzono, że spośród parametrów materiałowych kolumny największy wpływ ma sztywność osłony geosyntetycznej, natomiast spośród parametrów gruntu słabonośnego – jego moduł ścisłości. W publikacji [1] przedstawiono nową, alternatywną propozycję opisu matematycznego systemu GEC, w którym to przeciwnie do



Rys. 1. Siatka wzmocnienia oraz przekrój przez komórkę jednostkową

S – rozstaw osiowy kolumn [m], A_k – pole powierzchni przekroju poprzecznego kolumny [m²], A_0 – pole przekroju poprzecznego pojedynczej komórki [m²], D_0 – średnica kolumny [m], D_e – średnica komórki jednostkowej [m], H_0 – miąższość warstwy słabej [m], σ_0 – obciążenie zewnętrzne [Pa], σ_s – napężenie przekazane na grunt słaby [Pa], σ_k – napężenie przekazane na kolumnę [Pa]

modelu prezentowanego w [4] założono, że w kolumnie nie dochodzi do ścięcia gruntu, a nacisk gruntu we wnętrzu kolumny jest parciem spoczynkowym. Ponadto w pracy do opisu relacji obciążenie - osiadanie gruntu słabego przyjęto weryfikowany na obiektach w naturze nieliniowy model Meyera [2]. Uwzględniono w nim usztywnianie się gruntu wraz ze zmianą porowatości. Model ten umożliwia również oszacowanie wzrostu modułu ściśliwości gruntu słabego po instalacji kolumn metodą przemieszczeniową, a przed przyłożeniem obciążenia zewnętrznego. Ponadto w prezentowanym modelu założono, że podłoże będące oparciem dla wykonanej kolumny jest podatne, a osiadania w warstwie nośnej można wyznaczyć za pomocą zmodyfikowanego wzoru na osiadanie płyty statycznej [3]. Pozwoliło to zatem wprowadzić drugą składową osiadania kolumny GEC.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie nowego opisu matematycznego systemu GEC poprzez ukazanie wpływu najważniejszych czynników na efektywność wykonanego wzmocnienia oraz na bezpieczeństwo pojedynczej kolumny.

MODEL OBLICZENIOWY

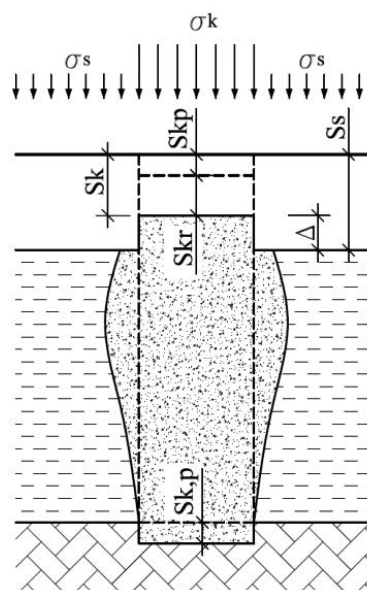
Przedstawiony w pracy [1] model opiera się na koncepcji komórki jednostkowej, którą stanowi osiowo symetryczny układ pojedynczej kolumny wraz z otaczającym ją gruntem słabym. Geometria komórki wynika z przyjętej przez projektanta siatki wzmocnienia gruntu. Ustalając rodzaj siatki wzmocnienia (kwadratowy bądź w formie trójkąta równobocznego) oraz rozstaw pomiędzy kolumnami, sprowadza się pole wzmacnianego przez kolumnę terenu do zastępczego koła posiadającego jednakowe pole powierzchni. Zależności geometryczne między przyjętą siatką wzmocnienia i komórką jednostkową przedstawiono na rys. 1.

Znając wartości A_k oraz A_0 określa się procentowy udział kolumn na powierzchni wzmacnianego podłoża za pomocą tzw. wskaźnika wymiany gruntu:

$$\alpha = \frac{A_k}{A_0} \quad (1)$$

W prezentowanym modelu osiadania kolumny s_k mają dwa źródła. Są to osiadania spowodowane pęcznieniem kolumny s_{kr} oraz osiadania spowodowane zagłębieniem podstawy kolumny w gruncie nośnym s_{kp} . Osiadania komórki jednostkowej przedstawiono schematycznie na rys. 2.

Osiadanie kolumny spowodowane jej zagłębieniem w gruncie nośnym oblicza się przy założeniu, że nie występują siły tarcia pomiędzy kolumną i otaczającym ją gruntem. Założenie to pozwala sprowadzić obciążenie przekazane na głowicę kolumny do jej podstawy. Osiadania spowodowane pęcznieniem kolumny oblicza się, zakładając, że proces pęcznienia następuje



Rys. 2. Schemat osiadania komórki jednostkowej
 s_s – osiadanie gruntu słabego (pomiędzy kolumnami), Δ – strzałka ugięcia w przestrzeni między kolumnami (przy założeniu stałej jej wartości)

przy stałej objętości kolumny czyli przy braku zagęszczenia wypełnienia mineralnego. Oznacza to, że przyrost średnicy kolumny musi być skompensowany jej skróceniem.

Efektywność wykonanego wzmocnienia, a więc stopień odciążenia gruntu słabego, określa się współczynnikiem redystrybucji naprężenia, wyrażającym część obciążenia całkowitego przenoszoną przez kolumnę:

$$E = \frac{\sigma_k A_k}{\sigma_0 A_0} = \frac{N_k}{N_0}$$

gdzie:

N_k – obciążenie przypadające na kolumnę [N],

N_0 – obciążenie przypadające na całą komórkę jednostkową [N].

Znając wartość współczynnika E można obliczyć naprężenie na powierzchni komórki jednostkowej. Wyznaczone wartości muszą spełniać warunek:

$$\sigma_0 A_0 = (A_0 - A_k) \sigma_s + A_k \sigma_k \quad (3)$$

Bezpieczeństwo kolumny określa się, porównując maksymalną wartość siły obwodowej występującej w osłonie geosyntetycznej z odpowiednio wyznaczoną wytrzymałością długoterminową materiału. Ocenie podlega również odkształcenie osłony, które musi być poniżej poziomu dopuszczalnego. Wartości sił obwodowych oraz odkształcenia osłony geosyntetycznej poza parametrami materiałowymi kolumny i gruntu wynikają z wartości naprężeń σ_k oraz σ_s na powierzchni wzmacnianego terenu. Określenie pracy systemu GEC sprowadza się zatem do wyznaczenia wartości współczynnika redystrybucji naprężenia E . Znając ten parametr, można ocenić efektywność wzmocnienia oraz bezpieczeństwo pojedynczej kolumny, obliczając:

- obciążenie gruntu słabego: σ_s [kN/m²];
- obciążenie głowicy kolumny: σ_k [kN/m²];
- osiadanie powierzchni wzmocnionego terenu: S_s oraz S_k [m];
- maksymalną wartość siły obwodowej w geosyntetyku: $F_{ob,i}$ [kN/m];
- maksymalną wartość odkształcenia geosyntetyku: $\varepsilon_{ob,i}$ [%];

Wyznaczenie wartości współczynnika E nastręcza pewne trudności, ponieważ wymaga przeprowadzenia obliczeń iteracyjnych. Przyjmuje się, że przyjęta wartość współczynnika redystrybucji naprężenia jest poprawna, gdy w wyniku obliczeń będzie spełniony warunek:

$$S_{k,r} + S_{k,p} = S_s - \Delta \quad (4)$$

Określenie pracy systemu GEC sprowadza się zatem do rozwiązania w sposób iteracyjny dla $E \in (0,1)$ równania:

$$\sum_{i=1}^n H_{0,i} \frac{r_0 \sigma_{h,i} (2J + r_0 \sigma_{h,i})}{(J + r_0 \sigma_{h,i})^2} + \frac{\sigma_0 E}{\alpha E_p} \frac{D_0 z_0}{D_0 + z_0} =$$

$$= n'_0 H_0 \left[1 - \left(1 + \frac{\kappa - 1}{n'_0} \frac{\sigma_0 (1 - E)}{M'_0 (1 - a)} \right)^{\frac{-1}{\kappa - 1}} \right] - \Delta \quad (5)$$

gdzie:

$H_{0,i}$ – grubość wydzielonych z kolumny plastrów [m],

n – liczba wydzielonych z kolumny plastrów,

$\sigma_{h,i}$ – naprężenie poziome wewnątrz kolumny w plastrze i [kN/m²],

J – sztywność powłoki geosyntetycznej na rozciąganie [kN/m],

z_0 – głębokość aktywna w gruncie stanowiącym oparcie kolumny [m],

n'_0 – porowatość gruntu słabego po instalacji kolumn [-],

M'_0 – moduł ściśliwości nieobciążonego gruntu słabego po instalacji kolumn [kPa],

κ – wykładnik dla gruntów organicznych o wartości w zakresie $1,5 \div 2,0$ (wyznaczany na podstawie badań edometrycznych).

Naprężenie $\sigma_{h,i}$ oblicza się następująco:

$$\sigma_{h,i} = \left(\frac{\sigma_0 E}{a} + \gamma_k z_i \right) \frac{v_k}{1 - v_k} - \left(\frac{\sigma_0 (1 - E)}{1 - a} + \gamma_s z_i \right) \frac{v_s}{1 - v_s} \quad (6)$$

gdzie:

γ_k – ciężar objętościowy materiału mineralnego wypełniającego kolumnę [kN/m³],

γ_s – ciężar objętościowy gruntu słabego [kN/m³],

v_k – współczynnik Poissona materiału mineralnego wypełniającego kolumnę [-]

v_s – współczynnik Poissona gruntu słabego [-].

Głębokość aktywna w gruncie stanowiącym oparcie kolumny wyrażona jest zależnością:

$$z_0 = \frac{1}{2 \cdot \tan \phi} \cdot \frac{1}{\ln \left(\frac{E_p}{\sigma_k} \right)} \cdot \frac{\sigma_k}{\gamma} \quad (7)$$

gdzie:

ϕ – kąt tarcia wewnętrznej warstwy nośnej [°],

γ – ciężar objętościowy warstwy nośnej [kN/m³],

E_p – moduł odkształcenia gruntu nośnego [MPa].

Siły obwodowe:

$$F_{ob,i} = r_0 \cdot \sigma_{h,i} \quad (8)$$

Odkształcenie powłoki geosyntetycznej:

$$\varepsilon_{ob,i} = \frac{F_{ob,i}}{J} \quad (9)$$

Kolumny GEC można instalować w podłożu metodą przemieszczeniową lub wiertniczą. Wybór konkretnej metody instalacji jest uzależniony od warunków gruntowych oraz terenowych. W przypadku zastosowania metody przemieszczeniowej instalacja kolumn bez zmiany objętości (bez wypiętrzenia terenu) doprowadzi do zmniejszenia porowatości, a przez to do usztywnienia gruntu jeszcze przed przyłożeniem obciążenia zewnętrznego. Porowatość gruntu po instalacji kolumn metodą przemieszczeniową można zapisać następująco:

$$n'_0 = n_0 - \alpha \quad (10)$$

gdzie:

n_0 – porowatość gruntu słabego przed instalacją kolumn [-],

natomiast wartość sztywności gruntu słabego po instalacji kolumn, a przed przyłożeniem obciążenia zewnętrznego:

$$M'_0 = M_0 \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{n_0} \right)^{-\kappa} \quad (11)$$

gdzie:

M_0 – moduł ściśliwości nieobciążonego gruntu słabego przed instalacją kolumn [kPa].

Instalacja kolumn metodą wiertniczą nie powoduje zmiany porowatości i sztywności gruntu, zatem $n'_0 = n_0$ oraz $M'_0 = M_0$.

WPŁYW METODY INSTALACJI KOLUMNY

Na potrzeby niniejszego artykułu w pierwszej kolejności wykonano obliczenia obrazujące wpływ metody instalacji

Tabl. 1. Dane do przykładu obliczeniowego przedstawiającego pracę systemu GEC

Ogólne						Grunt słabonośny					Kolumna			Oparcie kolumny		
α [–]	D_0 [m]	H_0 [m]	n [–]	H_i [m]	Δ [m]	γ_s [kN/m ³]	n_0 [–]	M_0 [kPa]	κ [–]	v_s [–]	γ_k [kN/m ³]	v_k [–]	J [kN/m]	ϕ [°]	γ [kN/m ³]	E_p [MPa]
0,15	0,8	10	50	0,2	0	11	0,66	560	1,7	0,26	19	0,21	2000	31	18	40

kolumny GEC na jej pracę. Obliczenia wykonano dla danych przedstawionych w tabl. 1.

Obliczenia wykonano przy obciążeniu σ_0 w zakresie 0 ÷ 200 kPa, różnicując metodę instalacji kolumny. Wyniki z przeprowadzonych obliczeń przedstawiono na rys. 3.

Wykresy przedstawione na rys. 3 wykazują, że metoda instalacji kolumny wpływa znacząco na jej pracę. Usztywnienie gruntu będące skutkiem zmniejszenia jego porowatości po instalacji kolumny metodą przemieszczeniową skutkuje mniejszym osiadaniami (rys. 3a). Zwiększenie początkowej wartości modułu ściśliwości umożliwia również przekazanie większego naprężenia na grunt słaby. Zobrazowano to na rys. 3b, na którym wartości współczynnika redystrybucji naprężenia w metodzie przemieszczeniowej układają się poniżej wartości odpowiadającym metodzie wiertniczej. Oznacza to, że kolumna przejmuje mniejszą część siły całkowitej przypadającej na komórkę jednostkową. Potwierdza się zatem wniosek, że wraz z usztywnianiem się podłoża system dąży do wyrównania naprężenia na powierzchni terenu. Zjawisko to przedstawiono na rys. 3c obrazującym relację $\sigma_k - \sigma_s$.

Przedstawiony przykład obliczeniowy obrazujący pracę kolumny GEC sporządzono, szukając wartości współczynnika re-

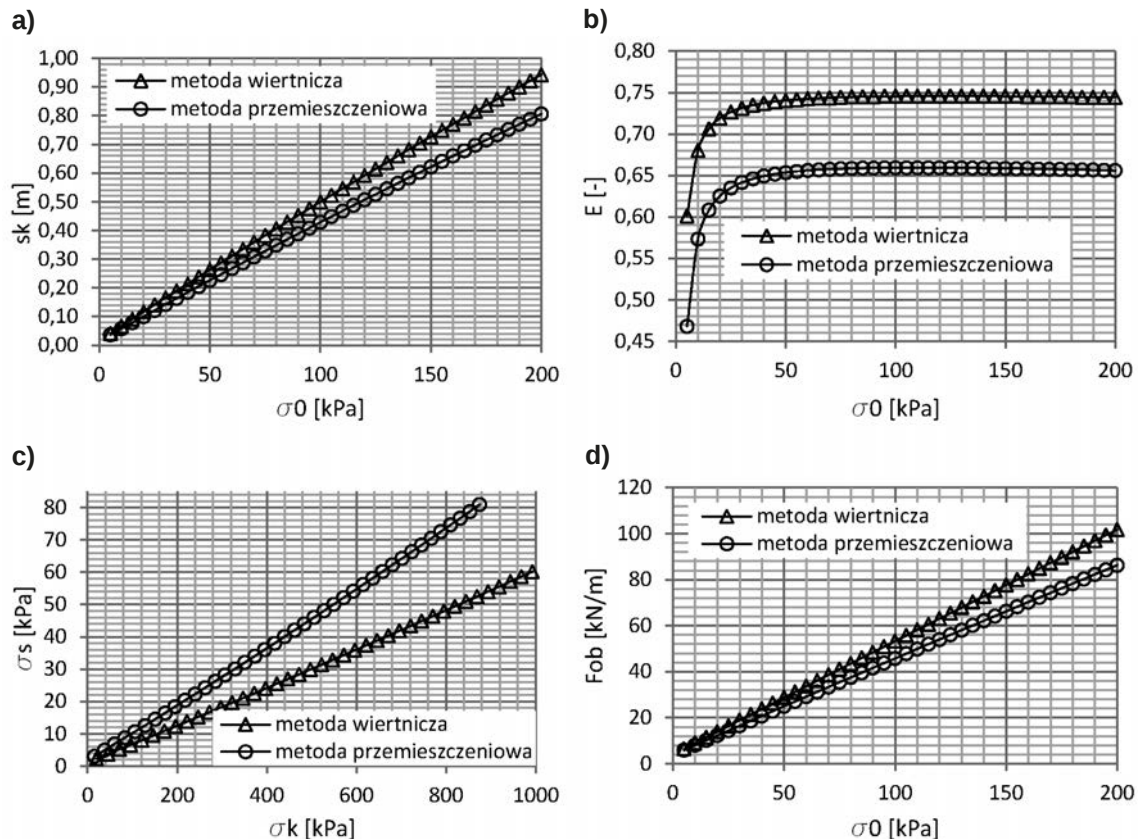
dystrybucji naprężenia, dla którego jest spełniona zależność (4). W równaniu tym zakłada się, że osiadanie głowicy kolumny jest spowodowane dwoma czynnikami: pęcznieniem i zagłębieniem jej podstawy w grunt nośny. Jednakże prezentowany model można również przekształcić do przypadku ogólnego, przydatnego podczas analiz wzmocnienia za pomocą kolumn o dużej sztywności, których skrócenie jest pomijalnie małe i nie wpływa znacząco na osiadania. W takim przypadku w równaniu (4) oraz (5) należy pominąć część wyrażającą osiadania kolumny spowodowane jej pęcznieniem. Wartość współczynnika redystrybucji naprężenia będzie zatem poprawna, gdy w wyniku obliczeń iteracyjnych dla $E \in (0,1)$ będzie spełniony warunek:

$$s_{k,p} = s_s - \Delta \quad (12)$$

co można zapisać:

$$\frac{\sigma_0 E}{\alpha E_p} \frac{D_0 z_0}{D_0 + z_0} = n'_0 H_0 \left[1 - \left(1 + \frac{\kappa - 1}{n'_0} \frac{\sigma_0 (1 - E)}{M'_0 (1 - a)} \right)^{\frac{-1}{\kappa - 1}} \right] - \Delta \quad (13)$$

Rozwiązując równanie (11), można znaleźć poszukiwaną wartość obciążenia zewnętrznego przekazanego na kolumnę, która jest zależna również od sposobu instalacji kolumny. Uwzględnienie w równaniu (11) nierównomiernego osiadania



Rys. 3. Wpływ metody instalacji kolumny GEC na jej pracę

powierzchni wzmocnianego terenu ($\Delta > 0$) będzie skutkowało dociążeniem gruntu przy jednoczesnym odciążeniu kolumny. Wartość parametru Δ powinna być wyznaczona podczas wymiarowania zbrojenia nadpalowego.

WPLYW PARAMETRÓW MATERIAŁOWYCH KOLUMNY

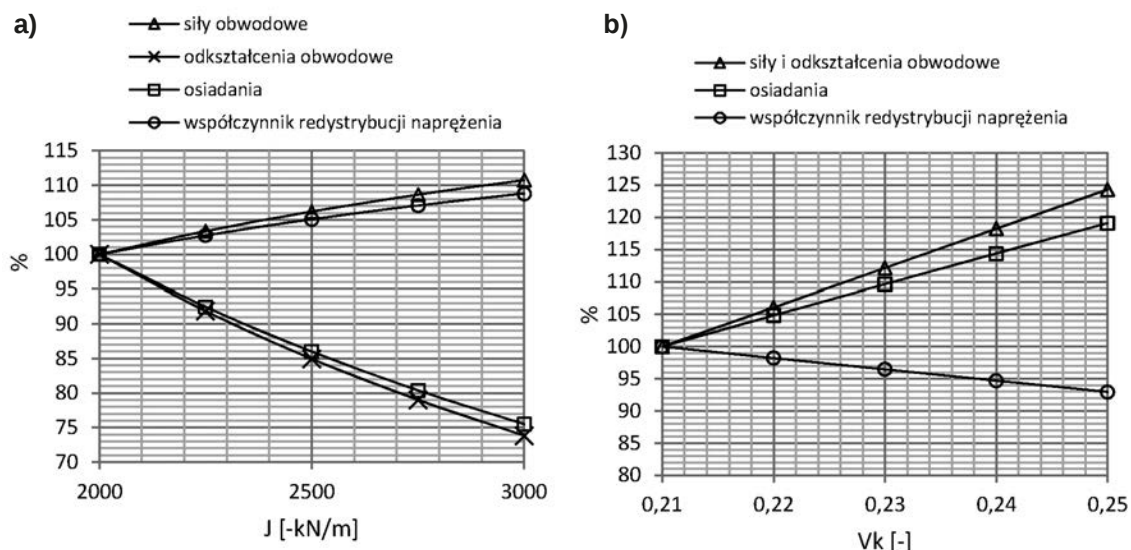
W celu przedstawienia wpływu parametrów materiałowych kolumny na pracę systemu GEC wykonano obliczenia, w których w kolejnych krokach zmieniano wartości odpowiednich parametrów. Uzyskane wyniki były odnoszone do otrzymanych w modelu „bazowym” wykonanym dla danych przedstawionych w tabl. 1, (dla wiertniczej metody instalacji oraz dla $\sigma_0 = 100$ kPa). Wyniki dla modelu „bazowego” przedstawiono w tabl. 2.

Otrzymane wyniki przedstawiono w formie wykresów (rys. 4), w których reakcję na zmianę parametru odnoszono procentowo do wyników otrzymanych w modelu „bazowym”, w którym wielkości parametrów wynoszą zawsze 100%.

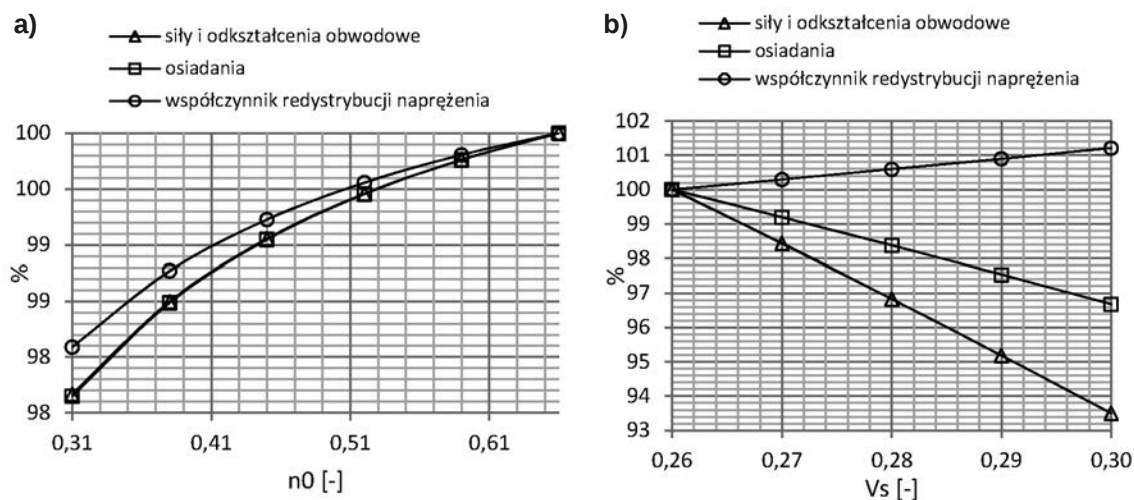
Tabl. 2. Wyniki dla modelu „bazowego”

$F_{ob,i,max}$ [kN/m]	ε_{max} [m]	$s_k = s_s$ [m]	E [-]
53,34	2,67	0,50	0,75

Wykres przedstawiający reakcję systemu na zmianę sztywności osłony geosyntetycznej (rys. 4a) wykazuje, że parametr ten ma bardzo istotne znaczenie w pracy kolumn. Z wykresu wynika, że wraz z wzrostem sztywności geosyntetyku kolumna przejmuje coraz to większe obciążenie (wzrost E). Towarzyszy temu znaczące zmniejszenie odkształceń osłony, niewielki przyrost sił obwodowych oraz wyraźne zmniejszenie osiadania komórki jednostkowej. Takie zachowanie wskazuje, że wraz ze zwiększeniem sztywności osłony geosyntetycznej uzyskuje się większą sztywność osiową kolumny. Kolejnym badanym parametrem jest współczynnik Poissona materiału wypełniającego kolumnę (rys. 4b). Wzrost jego wartości skutkuje znacznym przyrostem sił i odkształceń obwodowych wyrażających postęp pęcznienia kolumny. Takie zmiany obwodowe przekładać się muszą na wzrost osiadania systemu, co również jest zauważalne



Rys. 4 Wpływ parametrów materiałowych kolumny GEC na pracę systemu



Rys. 5. Wpływ parametrów gruntu słabonośnego na pracę systemu GEC

na wykresie. Spadek współczynnika redystrybucji naprężenia z wzrostem v_k oznacza dociążenie gruntu otaczającego kolumnę.

WPLYW PARAMETRÓW GRUNTU SŁABONOŚNEGO

Spośród parametrów gruntu słabego przedstawiono wpływ zmiany początkowej wartości porowatości gruntu oraz współczynnika Poissona. Nie badano modułu ściśliwości gruntu nieobciążonego, ponieważ pośrednio wpływ jego zmiany na pracę systemu zobrazowano w części przedstawiającej pracę kolumn instalowanych w różny sposób. Wyniki z analiz badanych parametrów przedstawiono na rys. 5.

Wykres przedstawiający reakcję systemu na zmianę porowatości początkowej gruntu słabonośnego (rys. 5a) wykazuje, że wzrost początkowej wartości n_0 powoduje wzrost osiadania, sił i odkształceń obwodowych oraz współczynnika redystrybucji. Zachowanie to jest zgodne z oczekiwaniami, ponieważ zastosowany w opisie systemu nieliniowy model osiadania gruntu słabego uzależnia jego ściśliwość od zmian porowatości. Im większa zatem porowatość, tym mniejsze usztywnienie gruntu, co wyraża się koniecznością przejścia większego obciążenia przez kolumnę (wzrost E). Wzrost wartości współczynnika Poissona powoduje z kolei spadek osiadania oraz sił i odkształceń obwodowych okrywy geosyntetycznej, a zatem mniejszym pęcznieniem kolumny (rys. 5b). Spowodowane jest to wzrostem parcia gruntu słabego na ścianki kolumny towarzyszącym wzrostowi v_s .

WNIOSKI

1. Przeprowadzona analiza oparta na nowych opisach matematycznych kolumn GEC wykazała, że spośród parametrów materiałowych kolumny największy wpływ na pracę systemu ma sztywność osłony geosyntetycznej. Wartość tego parametru przekłada się na sztywność osiową kolumny, znacząco wpływając na rozkład obciążenia na powierzchni wzmacnianego terenu oraz na osiadanie. Najważniejszym parametrem gruntu otaczającego ko-

lumnę jest jego sztywność. Wzrost modułu ściśliwości gruntu oraz spadek sztywności geosyntetycznej osłony prowadzą do większego wyrównania naprężenia na powierzchni wzmacnianego terenu.

2. Prezentowany model obliczeniowy ujmując wpływ sposobu wykonania kolumny na rozkład obciążenia na powierzchni terenu, a tym samym na bezpieczeństwo kolumny. Możliwość modyfikacji modelu poprzez pominięcie części osiadania spowodowanego skróceniem kolumny powoduje, że model ten może być również przydatny podczas analiz wzmocnienia za pomocą kolumn sztywnych.
3. Osiadanie kolumny GEC zależy przede wszystkim od jej spęcznienia, (w modelu „bazowym” osiadanie z tego tytułu stanowiło 98%). Aby poprawnie określić wartość $s_{k,r}$, należy dokładnie rozpoznać parcie w mineralnym wypełnieniu kolumny co umożliwi również bardziej dokładną ocenę bezpieczeństwa kolumny.

LITERATURA

1. Meyer Z., Łopatka A.: Kolumny piaskowe w otocze geosyntetycznej. Propozycja nowego opisu matematycznego systemu GEC. Inżynieria Morska i Geotechnika 3/2014.
2. Meyer Z.: Advances in modeling of peat consolidation. Vol. 3. Technical University of Szczecin. Szczecin 2000.
3. Meyer Z., Żarkiewicz K.: Wykorzystanie wzoru na osiadanie płyty statycznej do określenia naprężenia pod podstawą kolumny betonowej. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 1/2014.
4. DGGT.: Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements – EBGeo. Ernst & Sohn, 2011.
5. Łopatka A.: Kolumny piaskowe w otocze geosyntetycznej. Prezentacja pracy systemu GEC poprzez studium najważniejszych parametrów. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 6/2013.
6. Sobolewski J., Raithel M., Küster V., Friedl G.: Nasyp autostrady A2 posadowiony na kolumnach z piasku w opaskach geosyntetycznych. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 4/2012.