# Kolumny piaskowe w otoczce geosyntetycznej. Prezentacja pracy systemu GEC poprzez studium najważniejszych parametrów

### Mgr inż. Andrzej Łopatka Przedsiębiorstwo Realizacyjne INORA Sp. z o.o.

Obecnie często wykorzystuje się inwestycyjnie tereny dotychczas pomijane ze względu na problemy techniczne. Najczęściej spotykanymi sytuacjami są takie, gdzie zastane warunki gruntowe nie pozwalają w prosty sposób wykonać realizacji ze względu na niewystarczającą nośność bądź zbyt małą sztywność podłoża. W takich sytuacjach projektant ma na ogół do wyboru dwie ścieżki postępowania: może zdecydować się na posadowienie pośrednie bądź na posadowienie bezpośrednie po uprzednim wykonaniu wzmocnienia podłoża lub wymiany gruntu słabego.

Zagadnienie wzmocnienia podłoża ze względu na mnogość dostępnych sposobów oraz technologii jest zagadnieniem bardzo obszernym. Wzmocnienie gruntu można wykonywać prowadząc do zmiany tj. do poprawy jego dotychczasowych parametrów wytrzymałościowych poprzez zmianę jego stanu (odwodnienie, dogęszczenie) bądź za pomocą różnego rodzaju zabiegów petryfikacyjnych (zeskalenie). Kolejną grupą metod są metody polegające na wykonaniu zbrojenia gruntu, w wyniku którego uzyskuje się pewnego rodzaju kompozyt o wystarczających właściwościach mechanicznych do planowanej inwestycji. Jedną z częściej stosowanych metod są różnego rodzaju kolum-



Rys. 1. Pogrążanie rury obsadowej *1* – stożek gubiony, *2* – klapa zamykana

ny. Efekt wzmocnienia podłoża 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.

Jednym z coraz bardziej popularnych rodzajów kolumn są kolumny w tzw. systemie GEC (*Geosynthetic Encased Column*). Kolumna GEC jest smukłą kolumną piaskową, w której zabezpieczenie przed zniszczeniem wewnętrznym uzyskuje się za pomocą otaczającego kolumnę geosyntetyku wykazującego obwodową sztywność na rozciąganie.

Efekt wzmocnienia geosyntetycznego sprawia, że kolumny można instalować w gruntach bardzo słabych ( $c_u < 15$ kPa) oraz w gruntach o miąższościach nieosiągalnych dotychczas dla "klasycznych" kolumn kamiennych (autostrada A2 Łagów – Jordanowo, kolumny o długości 28 m [6]). Dodatkową, niewątpliwą zaletą systemu GEC jest zachowanie powierzchni chłonnej kolumny, czyli efektu drenażu pionowego poprzez skrócenie drogi filtracji. Biorąc pod uwagę, że kolumny instaluje się w siatce zapewniającej wskaźnik wymiany gruntu na poziomie  $\alpha_s = (10 \div 20)\%$ , osiąga się radykalne skrócenie czasu konsolidacji podłoża. System ten był stosowany z powodzeniem na bardzo dużych budowach w bardzo trudnych warunkach gruntowych np. podczas przygotowania podłoża na terenie zalewowym rzeki Łaby w Hamburgu na potrzeby budowy fabryki Airbusa 380 [3].

Celem artykułu jest przedstawienie pracy systemu kolumn GEC poprzez ukazanie wpływu najważniejszych czynników na efektywność wykonanego wzmocnienia oraz na bezpieczeństwo pojedynczej kolumny.



Rys. 2. Instalacja koszulki geosyntetycznej 1 – przycinanie geosyntetyku, 2 – zszywanie koszulki



Rys. 3. Zasyp materiałem mineralnym



Rys. 4. Gotowa kolumna po podciągnięciu rury obsadowej

#### MODEL OBLICZENIOWY

Model obliczeniowy, według którego przeprowadzono obliczenia, był przedstawiony w najnowszych zaleceniach EBGEO wydanych przez Niemieckie Stowarzyszenie Geotechniczne [1].

Ze względu na cel oraz ramy artykułu nie zawarto w nim szczegółowego opisu toku obliczeniowego, a jedynie opis



Rys. 5. Schemat komórki jednostkowej GEC [1]

najistotniejszych elementów pozwalających zrozumieć pracę systemu GEC. Szczegółowy opis modelu wraz z algorytmem obliczeń przedstawiono w polskiej wersji językowej w publikacji [6]. Model obliczeniowy opiera się na koncepcji tzw. komórki jednostkowej, której geometria 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 koła o ekwiwalentnej powierzchni  $A_E$ . Komórka jednostkowa stanowi więc układ pojedynczej kolumny wraz z otaczającym ją gruntem słabym, (rys. 5).

Znając pole powierzchni przekroju poprzecznego kolumny  $A_s$  oraz pole przekroju poprzecznego pojedynczej komórki  $A_E$ , określa się procentowy udział kolumn na powierzchni wzmacnianego podłoża za pomocą tzw. wskaźnika wymiany gruntu:

$$\alpha_s = \frac{A_s}{A_E} \tag{1}$$

Efektywność wzmocnienia za pomocą kolumn GEC przy założonej wartości  $\alpha_s$  określa się współczynnikiem redystrybucji naprężenia *E*. Parametr ten rozdziela naprężenie całkowite na część przypadającą na kolumnę  $\sigma_{v,s}$  oraz na otaczający ją grunt  $\sigma_{v,s}$  według zależności:

$$\sigma_{\nu,B} = \frac{\sigma_0(1-E)}{1-a_\nu} \tag{2}$$

$$\sigma_{\nu,S} = \frac{\sigma_0 \cdot E}{a_s} \tag{3}$$

Fizykalnie wyraża on część obciążenia całkowitego jaką przenosi kolumna:

$$E = \frac{\sigma_{v,S} \cdot A_S}{\sigma_0 \cdot A_E} \tag{4}$$

Obliczone wartości naprężenia w pojedynczej komórce spełniają zatem warunek:

$$(A_E - A_S) \cdot \sigma_{v,B} + A_S \cdot \sigma_{v,S} = A_E \cdot \sigma_0 \tag{5}$$

Efekt odciążenia gruntu słabego jest zatem tym większy, im większa jest wartość współczynnika *E*. Wyznaczenie poprawnej jego wartości jest zadaniem pracochłonnym ze względu na konieczność wykonania szeregu iteracji, aż do spełnienia warunku:

$$S_s \approx S_B$$
 (6)

gdzie:

s<sub>s</sub> - osiadania głowicy kolumny,

s<sub>B</sub>- osiadania gruntu słabego otaczającego kolumnę.

Dokładny tok postępowania podczas obliczania osiadań przedstawiono w publikacjach [1, 4, 5, 6]. W tym miejscu należy podkreślić, że wyniki obliczeń osiadań komórki jednostkowej są zależne m.in. od założeń poczynionych przy ustalaniu promienia zainstalowanej kolumny *r<sub>s</sub>*. Kolumny GEC można instalować za pomocą rury obsadowej zamkniętej na dnie metodą przemieszczeniową ("na rozpych"), gdy przy podciąganiu rury obsadowej klapy w dnie zostają otwarte (rys. 1). Alternatywną metodą instalacji kolumn jest metoda z usuwaniem urobku, "z podwiertem", wykorzystująca rury obsadowe z dnem otwartym. Wybór konkretnej metody instalacji jest uzależniony od warunków gruntowych oraz sytuacyjnych (zabudowa, instalacje itp.). Sposób instalacji kolumny istotnie wpływa na jej pracę w słabym podłożu.

Po instalacji kolumny metodą przemieszczeniową, bezpośrednio po podciągnięciu rury obsadowej, może zachodzić zjawisko zaciskania, tj. zmniejszenia się średnicy początkowej, (średnica kolumny może być mniejsza od średnicy wewnętrznej rury obsadowej). Zakłada się, że kolumna przyjmuje promień  $r_s$  mniejszy o 1 ÷ 2 cm od promienia wewnętrznego rury obsadowej zakłada się, że kolumna przyjmuje promień  $r_s$  folgo rury obsadowej zakłada się, że kolumna przyjmuje promieniowi zewnętrznemu rury obsadowej  $r_z$ . Metoda instalacji może zatem przyczynić się do rozpoczęcia pracy geosyntetyku jeszcze przed przyłożeniem obciążenia zewnętrznego na podłoże. Na rys. 6 schematycznie przedstawiono proces zmian średnicy kolumny.

Proces "pęcznienia" kolumny, będący reakcją na przyłożone obciążenie, w sposób istotny zależy od obwodowej sztywności osłony geosyntetycznej  $J_k$  rozumianej jako stosunek zmobilizowanej siły rozciągającej do jednostkowego wydłużenia  $\varepsilon_{ac}$ :

$$J_{k} = \frac{R_{B,k,\varepsilon}}{\varepsilon_{or}}$$
(7)

gdzie:

- $R_{B,k,c}$  wytrzymałość na rozciąganie osłony geosyntetycznej ze względu na dopuszczalne jej wydłużenie  $\varepsilon_{er}$ ,
- ε<sub>gr</sub> dopuszczalna wartość wydłużenia obwodowego opaski geosyntetycznej ze względu na stan graniczny użytkowalności.

Wytrzymałość opaski na rozciąganie ze względu na jej dopuszczalne wydłużenie wyznacza się dla projektowanego czasu obciążenia, korzystając z izochron, czyli doświadczalnie ustalonych krzywych obrazujących zależność siła – wydłużenie dla różnych czasów obciążenia do momentu zerwania:

$$R_{B,k,\varepsilon} = \frac{R_{B,k0} \cdot \beta}{A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5} \tag{8}$$

gdzie:

- R<sub>B,k0</sub> charakterystyczna, ustalana laboratoryjnie, wytrzymałość na rozciąganie materiału opaski wyznaczona według EN ISO 10319 przy poziomie ufności 95%,
- σ stopień wytężenia materiału odpowiadający jego dopuszczalnemu wydłużeniu ε<sub>or</sub> (ustalany na podstawie izochron),
- A<sub>2</sub> współczynnik redukcyjny uwzględniający zmniejszenie wytrzymałości materiału poprzez uszkodzenia podczas instalacji według EN ISO 10722,
- $A_3$  współczynnik redukcyjny uwzględniający zmniejszenie wytrzymałości na połączeniach według EN ISO 10321 (dla opasek bezszwowych, tkanych obwodowo  $A_3 = 1,0$ ),
- 14 współczynnik redukcyjny uwzględniający zmniejszenie wytrzymałości z tytułu agresywnego działania środowiska według EN 13241,
- A<sub>5</sub> współczynnik redukcyjny uwzględniający zmniejszenie wytrzymałości wynikające ze zmęczenia materiałowego od obciążeń cyklicznych lub dynamicznych według EBGEO 2010.

W opisanym modelu na podstawie obliczeń iteracyjnych uzyskuje się:

- rozkład naprężenia w komórce jednostkowej: σ<sub>v,s</sub> na głowicy kolumy oraz σ<sub>v,B</sub> w stropie gruntu słabego,
- wartość osiadań komórki jednostkowej  $s = s_s = s_{B}$ ,
- wartość siły rozciągającej opaskę geosyntetyczną  $E_k$  dla SGU oraz  $E_d$  dla SGN,
- wartość wydłużenia obwodowego opaski geosyntetycznej ε.

Poprzez odpowiedni algorytm uwzględnia się zarówno stan graniczny nośności (STR według [2]), jak i stan graniczny



- $r_s$  promień kolumny bezpośrednio po jej instalacji
- $\Delta r_s$  obliczony przyrost promienia kolumny (reakcja na obciążenie zewnętrzne)
  - $r_w$  promień wewnętrzny rury obsadowej
  - r<sub>z</sub> promień zewnętrzny rury obsadowej

użytkowania według [2]. Podczas wymiarowania kolumny ze względu na pierwszy stan graniczny nośności należy spełnić następujący warunek do wstępnie dobranego w obliczeniach statycznych geosyntetyku o module  $J_{k}$ :

$$E_d \le R_{B,d} \tag{9}$$

- gdzie:
- $E_{d}$  obliczeniowa wartość siły obwodowej w opasce (wyznaczona dla stanu STR według EC7),
- $R_{B,d}$  obliczeniowa wartość wytrzymałości opaski na rozciąganie w STR według EC7.

Obliczeniową wartość wytrzymałości geosyntetyku wyznacza się, uwzględniając projektowany czas pracy i określone warunki gruntowo-wodne według zależności:

$$R_{B,d} = \frac{R_{B,k0} \cdot \eta_m}{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot \gamma_M} \cdot \left(1 + \frac{s_s}{H}\right)$$
(10)

gdzie:

- R<sub>B,0</sub> charakterystyczna, ustalana laboratoryjnie wytrzymałość na rozciąganie materiału opaski wyznaczona według EN ISO 10319 przy poziomie ufności 95%,
- $h_m$  współczynnik kalibracyjny, (według [1]  $h_m$  = 1,1 dla STR),
- 4, współczynnik redukcyjny uwzględniający zmniejszenie wytrzymałości z tytułu pełzania materiału według EN ISO 13431,
- $\gamma_{M}$  współczynnik bezpieczeństwa materiałowego, przyjmowany dla rozpatrywanego stanu obciążenia budowli:
  - stan podstawowy:  $\gamma_M = 1,40$ ,
  - stan tymczasowy:  $\gamma_M = 1,30$ ,
  - stan wyjątkowy:  $\gamma_M = 1,20$ ,
  - skrócenie kolumny (osiadania kolumny),
- $\tilde{H}$  pierwotna długość kolumny.

Drugi czynnik w powyższym wzorze jest członem uwzględniającym sfałdowanie opaski w wyniku skrócenia się kolumny o wartość  $s_s$ . Wpływ skrócenia kolumny na wzrost wytrzymałości obwodowej opaski pominięto w EBGEO [1]. Poprawkę tę przyjęto z publikacji [5], uznając ją za racjonalną, ponieważ prowadzi do bardziej ekonomicznego wykorzystania materiału geosyntetycznego.

W ramach stanu granicznego użytkowalności należy przeprowadzić dowód nie przekroczenia wartości dopuszczalnej wydłużenia obwodowego opaski geosyntetycznej oraz nie przekroczenia osiadań eksploatacyjnych projektowanego obiektu.

Warunek nie przekroczenia dopuszczalnej wartości wydłużenia obwodowego polega na wykazaniu, że:

$$\varepsilon \le \varepsilon_{gr}$$
 (11)

Wartość wydłużenia granicznego może być różna w poszczególnych wyrobach. Dla produktów wykonanych z poliestru (PES) wartość dopuszczalną określa się na poziomie  $\varepsilon_{gr} = 6\%$ , dla poliwynylu alkoholu (PVA)  $\varepsilon_{gr} = 4\%$ . Materiały wykonane z aramidu (AR)  $\varepsilon_{gr} = 2\%$ .

W praktyce warunek (11) sprowadza się do wykazania, że wartość charakterystyczna siły obwodowej występującej w opasce jest mniejsza lub równa wytrzymałości opaski ze względu na jej dopuszczalne wydłużenie.

$$E_k \le R_{B,k,\varepsilon} \tag{12}$$

Kolejny warunek SLS dotyczy nie przekroczenia dopuszczalnej wartości osiadań obiektu w okresie jego eksploatacji:

$$s_{eksp} \le s_{dop} \tag{13}$$

gdzie:

 $s_{eksp}$  – prognozowane osiadania eksploatacyjne (pobudowlane),

 $s_{dop}$  – dopuszczalna wartość osiadań.

Ze względu na często restrykcyjne ograniczenia dotyczące dopuszczalnej wartości osiadań oraz mając na uwadze fakt, że grunty wymagające wzmocnienia charakteryzują się na ogół znaczną ściśliwością, zazwyczaj nie dopuszcza się jakichkolwiek osiadań natury konsolidacyjnej w okresie eksploatacji obiektu. Efekt ten uzyskuje się wprowadzając na etapie budowy tzw. wstępne obciążenie, czyli generując podczas budowy obciążenie będące ekwiwalentem obciążenia użytkowego występującego podczas eksploatacji. W szczególnych przypadkach można również stosować zabiegi przeciążające polegające na wprowadzeniu obciążenia o większej wartości niż na etapie eksploatacji. Wyeliminowanie osiadań konsolidacyjnych w okresie budowlanym oznacza, że osiadaniami eksploatacyjnymi będą jedynie osiadania wtórne, wynikające z pełzania szkieletu gruntowego.

Zastosowanie wzmocnienia w systemie kolumn GEC prowadzi do znacznej redukcji osiadań wtórnych:

$$s_{cr} = R_{GEC} \cdot \frac{\sigma_{v,B}}{\sigma_{v,B,p}} \cdot c_{\alpha} \cdot (H-s) \cdot \log\left(\frac{t}{t_0}\right)$$
(14)

gdzie:

- $R_{GEC}$  współczynnik redukcyjny, (ustalany na podstawie monitoringu obiektów zrealizowanych w technologii GEC na poziomie  $R_{GEC}$  = 0,25),
- $\sigma_{v,B}$  naprężenie przypadające na grunt słaby w okresie eksploatacji,
- $\sigma_{v,B,p}$  naprężenie prekonsolidujące grunt słaby (w trakcie przeciążenia),
- $a^{2}$  współczynnik pełzania gruntu słabego,
- czas użytkowania obiektu (czas, w którym rozpatrujemy osiadania wtórne),
- t<sub>0</sub> czas prowadzonego przeciążenia.

Z zależności tej wynika, że wartość osiadań wtórnych można redukować, dobierając w odpowiedni sposób wartość obciążenia prekonsolidującego oraz czas jego trwania.

#### STUDIUM PARAMETRYCZNE – OPIS ORAZ WYNIKI

Na potrzeby artykułu w pierwszej kolejności wykonano obliczenia dla modelu "bazowego" stworzonego na podstawie następujących danych:

1) Układ kolumn

- instalacja kolumn na planie trójkąta równobocznego,
- wykonanie kolumn: metoda przemieszczeniowa,
- promień opaski geosyntetycznej:  $r_{geo} = r_w = 0,4$  m,
- wskaźnik wymiany gruntu:  $\alpha_s = 20\%$ ,
- zmiana średnicy kolumny po podciągnięciu rury obsadowej:  $\Delta r = 0$  cm, (gdzie  $\Delta r = r_s - r_{geo}$ , według rys. 6).
- 2) Warunki gruntowe:
  - miąższość warstwy słabej (początkowa długość kolumny): H = 10 m,
  - parametry warstwy słabej (wartości charakterystyczne x<sub>k</sub>):
    - ciężar objętościowy:  $\gamma_B = 14 \text{ kN/m}^3$
    - efektywny kąt tarcia wewnętrznego:  $\phi'_B = 15^\circ$ ,
    - spójność efektywna:  $c'_{B} = 5$  kPa,

- edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej:  $M_{_{0,B,ref}} = 500$  kPa dla referencyjnego naprężenia  $\sigma_{_{ref}} = 100$  kPa,
- wykładnik Ohde'go dla sztywności: *m* = 1,0,
- współczynnik Poissona: v = 0,32.
- 3) Kolumna
- parametry materiału mineralnego wypełniającego kolumnę:
  - ciężar objętościowy:  $\gamma_s = 19 \text{ kN/m}^3$
  - efektywny kąt tarcia wewnętrznego:  $\phi'_s = 32^\circ$ .
- obwodowa sztywność na rozciąganie geosyntetyku:  $J_{\nu} = 1500 \text{ kN/m}.$
- 4) Obciążenie powierzchni komórki jednostkowej:  $\sigma_0 = 200$  kPa.

Ponadto założono, że poziom wody gruntowej znajduje się w poziomie terenu oraz, że nośne podłoże będące oparciem dla kolumn jest całkowicie sztywne, co powoduje, że wyznaczone osiadania dotyczą jedynie strefy gruntu słabego. Obliczenia prowadzono dla charakterystycznych wartości parametrów materiałowych i oddziaływań (SLS) przy podziale analizowanej warstwy gruntu (H = 10 m) na plastry o grubości 0,2 m. Oznacza to, że wszystkie obliczenia wykonano każdorazowo dla 50 plastrów.

Wyniki z tak stworzonego modelu (tabl. 1) były poziomem odniesienia do kolejnych obliczeń wykonanych w celu zobrazowania wpływu poszczególnych czynników na pracę systemu GEC.

Tabl. 1. Wyniki do modelu bazowego

$E_k$ [kN/m]	ε [%]	E [-]	<i>s</i> [m]	$\sigma_{v,s}$ [kPa]	$\sigma_{v,B}$ [kPa]
106,62 1)	7,11	0,933	1,09	933,00	16,75

 $^{\rm 1)}$ rozpatrując podstawowy stan obciążenia i traktując obciążenia jako stałe, wartość obliczeniowa wynosi:  $E_d=143,49~\rm kN/m$ 

#### gdzie:

- $E_{\boldsymbol{k}}~-$ wartość charakterystyczna siły rozciągającej opaskę geosyntetyczną,
- $\epsilon$  odkształcenie jednostkowe opaski geosyntetycznej na obwodzie,
- E współczynnik redystrybucji naprężenia,
- s osiadania komórki jednostkowej,
- $\sigma_{v,s}$  naprężenie od obciążenia zewnętrznego na głowicy kolumny,

 $\sigma_{v,B}^{}$  – naprężenie od obciążenia zewnętrznego na stropie gruntu słabego.

W dalszych obliczeniach zmieniano wprowadzane parametry według schematu przedstawionego w tabl. 2:

Otrzymane wyniki przedstawiono w formie wykresów, w których reakcja na zmianę parametru była odnoszona procentowo do wyników otrzymanych z modelu "bazowego" (tabl. 1), w którym wartości parametrów wynoszą zawsze 100%. Dodatkowo wartości rzeczywiste zestawiono w postaci tabelarycznej (tabl. 3).

W tabl. 2 aktywacja początkowa określa stopień początkowego zaciśnięcia lub poszerzenia kolumny będący efektem instalacji jej w różny sposób, przy czym:

- w metodzie przemieszczeniowej:  $\Delta_r \leq 0$ ,
- metoda z usuwaniem urobku:  $\Delta_r \ge 0$ .

Wybór metody instalacji według [1] różnicuje nie tylko stopień aktywacji początkowej geosyntetyku, ale także rozkład parcia spoczynkowego od ciężaru gruntu słabego na ściankach kolumny (w metodzie przemieszczeniowej przyjmuje się  $K_0 = 1,0$  natomiast w metodzie z usuwaniem urobku  $K_0 = 1 - \sin \phi'$ ). Jest to przyczyną odmiennej pracy kolumn zainstalowanych różnymi metodami nawet przy założeniu  $r_s = r_{geo}$ . Wyniki z analiz pracy kolumny instalowanej "z podwiertem" mogą być w tym przypadku odniesione do modelu "bazowego" (instalacja przemieszczeniowa), ponieważ dla tak "słabych" parametrów gruntu otaczającego kolumnę występuje podobny rozkład parcia na ściankach kolumny, który nie wpływa istotnie na otrzymywane wyniki. Rozbieżność przy różnych metodach instalacji oraz  $\Delta_r = 0$  nie przekracza 1,8% w osiadaniach oraz 0,4% w siłach i odkształceniach geosyntetyku.

Podczas prezentacji wyników skupiono się na analizie zmienności:

- wskaźnika redystrybucji naprężenia *E* będącego miarą stopnia odciążenia gruntu słabego (przy pewnej stałej wartości α<sub>s</sub>);
- charakterystycznej wartości siły obwodowej E<sub>k</sub> oraz odpowiadającemu jej odkształceniu geosyntetyku ε o założonej sztywności J<sub>k</sub>; parametry te są wskaźnikiem wytężenia opaski geosyntetycznej;

– osiadań komórki jednostkowej s ( $s = s_{s} = s_{R}$ ).

Wyniki z przeprowadzonej analizy przedstawiono na wykresach (rys. 7).

## ANALIZA WYNIKÓW I WNIOSKI

Wykresy przedstawiające reakcję na przyrost sztywności oraz spójności gruntu słabego przedstawione na rys. 7a i b wykazują, że przyrost  $M_{0,B,ref}$  i  $c'_B$  powoduje spadek wartości współczynnika redystrybucji naprężenia *E*. Szczególnie uwidacznia się wrażliwość systemu na zmianę sztywności gruntu słabego  $M_{0,B,ref}$ . Skutkuje to odciążeniem kolumny i dociążeniem gruntu słabego. Naturalną tego konsekwencją jest spadek sił rozciągających w geosyntetyku  $E_k$  oraz jego odkształcenia  $\varepsilon$ . Zachowanie takie

Tabl. 2. Badane parametry systemu

		Podłoże gruntowe		Geosyntetyk	Wskaźnik wymiany	Aktywacja początkowa
Parametr		$c_{\scriptscriptstyle B}'$ [kPa]	M <sub>0,B, ref</sub> [MPa]	J <sub>k</sub> [kN/m]	α <sub>s</sub> [%]	$\Delta r^{2)}$
Zakres	15 ÷ 20	5 ÷ 14	0,5 ÷ 2,5	1500 ÷ 3500	10 ÷ 20	-2,0 / +2,0
Przyrost	1,0	1,0	0,5	500	2,5	0,5

<sup>2)</sup>  $\Delta r = r_s - r_{geo}$ , według rys. 6



Rys. 7. Wyniki z przeprowadzonej analizy parametrycznej modelu GEC

jest łatwe do przewidzenia, ponieważ wraz z wzmacnianiem się gruntu, grunt otaczający kolumnę przejmuje coraz to większą część obciążenia przypadającego na komórkę jednostkową i jednocześnie daje większe wsparcie kolumnie na jej obwodzie.

O ile wpływ zmian wartości  $M_{0,B}$  oraz  $c'_B$  nie wymaga komentarza, o tyle zastanawiać może reakcja na przyrost wartości kąta tarcia wewnętrznego gruntu słabego  $\phi'_B$  (rys. 7c). Przeciwnie do poprzednich charakterystyk, przyrost wartości  $\phi'_B$  (postępujące wzmacnianie się gruntu słabego) powoduje wzrost wartości parametru *E*, zwiększając tym samym obciążenie kolumny i tym samym wartość sił w geosyntetyku. Zachowanie takie jest zastanawiające, ponieważ sprawia wrażenie, że grunt mocniejszy wymaga większego wzmocnienia (odciążenia). Wytłumaczeniem tego jest fakt, że w modelu przyjęto nieliniową charakterystykę sztywności gruntu słabego, uzależniając wartość  $M_{0,B}$  od poziomu naprężenia według zależności:

Tabl. 3. Wyniki przeprowadzonej analizy kolumn GEC – wartości rzeczywiste

		$E_k$ [kN/m]	ε [%]	E [-]	<i>s</i> [m]	$\sigma_{v,s}$ [kPa]	$\sigma_{v,B}$ [kPa]
schemat bazowy		106,62	7,11	0,933	1,09	933,00	16,75
φ' <sub>B</sub> [°]	16	107,48	7,17	0,936	1,10	936,00	16,00
	17	108,50	7,23	0,940	1,11	940,00	15,00
	18	109,11	7,27	0,942	1,12	942,00	14,50
	19	109,90	7,33	0,945	1,13	945,00	13,75
	20	110,47	7,36	0,947	1,13	947,00	13,25
	6	103,99	6,93	0,922	1,07	922,00	19,50
	7	101,57	6,77	0,912	1,05	912,00	22,00
	8	99,38	6,63	0,903	1,03	903,00	24,25
	9	97,21	6,48	0,894	1,01	894,00	26,50
C' <sub>P</sub>	10	95,06	6,34	0,885	0,99	885,00	28,75
[kPa]	11	93,12	6,21	0,877	0,98	877,00	30,75
	12	91,20	6,08	0,869	0,96	869,00	32,75
	13	89,30	5,95	0,861	0,94	861,00	34,75
	14	87,60	5,84	0,854	0,93	854,00	36,50
	15	85,92	5,73	0,847	0,91	847,00	38,25
M <sub>0.B, ref</sub> [MPa]	1000	91,20	6,08	0,869	0,84	869,00	32,75
	1500	78,03	5,20	0,814	0,67	814,00	46,50
	2000	67,50	4,50	0,770	0,55	770,00	57,50
	2500	59,14	3,94	0,735	0,47	735,00	66,25
	2000	110,53	5,53	0,949	0,90	949,00	12,75
J [kN/m]	2500	112,76	4,51	0,958	0,76	958,00	10,50
	3000	114,45	3,81	0,965	0,66	965,00	8,75
	3500	115,65	3,30	0,970	0,58	970,00	7,50
α <sub>s</sub> [%]	10	198,89	13,26	0,865	1,79	1730,00	30,00
	12,5	163,71	10,91	0,891	1,55	1425,60	24,91
	15	138,97	9,26	0,909	1,36	1212,00	21,41
	17,5	120,58	8,04	0,922	1,22	1053,72	18,91
Δ <i>r</i> [cm]	-2,0	94,23	6,28	0,883	1,69	883,00	29,25
	-1,5	97,48	6,50	0,896	1,55	896,00	26,00
	-1,0	100,70	6,71	0,909	1,40	909,00	22,75
	-0,5	103,68	6,91	0,921	1,25	921,00	19,75
	0 3)	106,66	7,11	0,933	1,11	933,00	16,75
	0,5	109,38	7,29	0,944	0,95	944,00	14,00
	1,0	112,06	7,47	0,955	0,79	955,00	11,25
	1,5	114,71	7,65	0,966	0,62	966,00	8,50
	2,0	117,14	7,81	0,976	0,45	976,00	6,00

<sup>3)</sup> Dane jak dla modelu bazowego z metodą instalacji kolumny "z podwiertem"

$$M_{0,B} = M_{0,B,ref} \cdot \left(\frac{\sigma^* + c'_{B} \cdot ctg\phi'_{B}}{\sigma_{ref}}\right)^m$$
(15)

gdzie:

 $\sigma^*$  – średnia wartość naprężenia w warstwie słabej,  $\sigma_{ref}$  – poziom referencyjny naprężenia dla M<sub>0.B.ref</sub>,

m – wykładnik Ohde'go.

Z wzoru (15) wynika, że wraz z wzrostem wartości kąta tarcia wewnętrznego maleje wytrzymałość gruntu na rozciąganie  $c'_B \operatorname{ctg} \phi'_B$ , a w konsekwencji również  $M_{0,B'}$  Jest to powodem nie łatwego do przewidzenia zachowania się modelu na przyrost  $\phi'_B$ oraz ponownie potwierdza się wrażliwość systemu na zmianę sztywności gruntu słabego. W tym miejscu należy zaznaczyć, że wartość kąta tarcia wewnętrznego gruntu słabego ma jednak stosunkowo mały wpływ na otrzymywane wyniki. Analizowany w artykule zakres wartości  $\phi'_B$  obejmuje większość z zakresu wartości uzyskiwanych dla gruntów wymagających wzmocnienia, a różnice w otrzymanych wynikach nie przekraczają 4% dla sił obwodowych, odkształceń oraz osiadań i 2% dla współczynnika redystrybucji naprężenia *E*.

Istotnym elementem systemu GEC jest opaska geosyntetyczna, mająca obwodową sztywność na rozciąganie  $J_k$ . Reakcję na zmianę wartości  $J_k$  przedstawiono na rys. 7d. Z wykresu wynika, że wraz z wzrostem  $J_k$  kolumna przejmuje coraz to większe obciążenie (wzrost *E*). Towarzyszy temu niewielki przyrost sił obwodowych oraz znaczące zmniejszenie odkształceń geosyntetycznej osłony. Skutkuje to bardzo wyraźnym zmniejszeniem osiadań strefy wzmocnionej. Zachowanie jest łatwe do przewidzenia i wskazuje, że wraz ze zwiększeniem obwodowej sztywności otoczki geosyntetycznej uzyskuje się większą osiową sztywność pojedynczej kolumny, co prowadzi do jej większego obciążenia.

Wzrost wartości współczynnika wymiany gruntu  $\alpha_s$  (powierzchni wymiany) powoduje, że współczynnik *E* wzrasta (rys. 7e), dając wrażenie, że kolumna przejmuje coraz to większe obciążenie, odciążając tym samym grunt. W rzeczywistości jednak, zarówno naprężenie przypadające na kolumnę, jak i na otaczający ją grunt, maleje, co przedstawiają dodatkowo naniesione na wykres krzywe  $\sigma_{v,S}$  oraz  $\sigma_{v,B}$ . Wynika to z faktu, że rozkład naprężenia wynika nie tylko z samego współczynnika redystrybucji, ale również z wartości parametru  $\alpha_s$ . Z zależności (2) oraz (3) wynika, że obciążenie kolumny wzrasta wraz z wzrostem wartości współczynnika redystrybucji naprężenia *E* oraz wraz ze spadkiem wartości wskaźnika wymiany gruntu  $\alpha_s$ . Analogicznie, te same czynniki powodują odciążenie gruntu otaczającego kolumne.

Reakcję na zmianę parametru  $\Delta r$  przedstawiono na rys. 7f, gdzie punkt "0" na osi poziomej oznacza granice pomiędzy początkowym zaciśnięciem oraz poszerzeniem kolumny, czyli rozgranicza metody instalacji kolumny. Z wykresu wynika, że przyrost parametru  $\Delta r$  odzwierciedlający coraz to większy stopień aktywacji geosyntetyku powoduje dociążenie kolumny (oraz odciążenie gruntu słabego), towarzyszy temu bardzo wyraźne zmniejszenie osiadań. Wytłumaczeniem tego jest fakt, że w sytuacji znacznego zmniejszenia początkowej średnicy kolumny w pewnym początkowym etapie przykładania obciążenia zewnętrznego kolumna jest bardziej podatna na skrócenie, ponieważ luźny geosyntetyk nie może dać żadnego wsparcia kolumnie (geosyntetyk włącza się do współpracy przy  $r_s \ge r_{eep}$ ). Przedstawione na rys. 7f zależności są ważne jedynie w przypadku analizy gruntów bardzo słabych, które charakteryzują się podobnym rozkładem parcia spoczynkowego na ściankach kolumny w obu metodach jej instalacji.

Podsumowując przeprowadzoną analizę, należy stwierdzić, że spośród parametrów gruntu otaczającego kolumnę największy wpływ na pracę systemu ma sztywność gruntu. Jasno wykazują to przedstawione wykresy reakcji na przyrost  $M_{0,R,ref}$  oraz pośrednio  $\phi'_B$  i  $c'_B$ . Dodatkowym potwierdzeniem tego faktu są charakterystyki zmian pozostałych parametrów mających wpływ na ściśliwość gruntu w przedstawionym modelu ( $\gamma_{R}, \sigma_{ref}, m$ ), których ze względu na ograniczone ramy artykułu nie przedstawiono. W ogólności można stwierdzić, że wraz z usztywnianiem się podłoża system dąży do wyrównania naprężeń na powierzchni komórki jednostkowej. Grunt otaczający kolumnę przenosi coraz to większą, a kolumna coraz mniejszą część obciążenia. Towarzszyszy temu wyraźna redukcja osiadania. Można zatem wyciągnąć wniosek, że poprawną analizę posadowienia w systemie GEC można wykonać jedynie przy prawidłowym określeniu wartości M<sub>0,B,ref</sub>

Z pośród parametrów materiałowych kolumny najistotniej na pracę systemu wpływa sztywność obwodowa geosyntetyku. Zmiana wartości  $J_{\mu}$  skutkuje wyraźną zmianą sztywności osiowej całej kolumny, co uwidacznia się różnym rozkładem obciążenia na powierzchni komórki jednostkowej oraz różną wartością osiadań. Oznacza to, że projektant dobierając odpowiedni materiał okrywający kolumnę, ma możliwość sterowania podatnością wzmacnianego podłoża. Efekt ten może mieć szczególne znaczenie w przypadku projektowania pod kątem łagodzenia efektów progowych, które występują na granicy ośrodków o różnej sztywności, np przy połączeniu nasypu z obiektem inżynierskim. Dobór odpowiedniej sztywności osiowej pojedynczej kolumny może być również warty rozpatrzenia podczas projektowania samej warstwy transmisyjnej, ponieważ wytyczne [1] uzależniają sposób wymiarowania zbrojenia nadpalowego od wartości stosunku modułu podatności kolumny oraz otaczającego ją gruntu.

#### LITERATURA

1. DGGT.: Recomendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements – EBGEO, Ernst & Sohn, 2011.

 2. PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7 – Projektowanie geotechniczne – Część 1: Zasady ogólne.

3. Raithel M., Küster V., Lindmark A.: Geotextile – Encased Columns – a foundation system for earth structures, illustrated by a dyke project for a works extension in Hamburg. Nordic Geotechnical Meeting NGM 2004, Ystad, Sweden.

4. Raithel M.: Zum Trag- und Verformungsverhalten von geokunststoffummantelten Sandsäulen. Schriftenreihe Geotechnik, Heft 6, Universität Kassel 1999.

5. Sobolewski J., Raithel M., Küster V, Friedl G.: A2 Highway Embankment in Poland founded geotextile encased columns (GEC) – case history report with monitoring data. 5<sup>th</sup> European Geosynthetics Congress, Valencia 2012.

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.