

Jan GASZYŃSKI, Monika GWÓŹDŹ
Politechnika Krakowska

DEFORMACJA PODŁOŻA WZMOCNIONEGO KOLUMNAMI Z KRUSZYWA Z ZASTOSOWANIEM GEOSYNTETYKÓW

Streszczenie. W pracy przedstawiono problem modelowania podłoża gruntowego, w którym zostały wykonane kolumny z kruszywa współpracujące z geosyntetykami. Podjęto próbę określenia deformacji i nośności tak wzmocnionego podłoża gruntowego z wykorzystaniem MES.

DEFORMATION OF THE LAYERED SOIL REINFORCED BY STONE COLUMNS WITH GEOSYNTHETIC

Summary. The efficiency of bearing stone columns in reducing the settlement of a foundation system is examined in this paper. The foundation system is assumed to consist of a large number of stone columns of equal length. They are installed in a weak soil layer and supporting a tight mat. The analysis examines the influence of the weak soil properties with geosynthetic material and columns on the settlement soil.

1. Wstęp

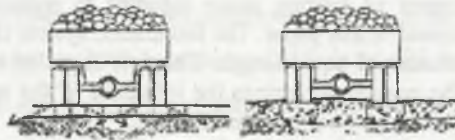
Przedmiotem rozważań w przedstawianej pracy jest zagadnienie wzmocnienia podłoża gruntowego. Prezentowane opracowanie jest kontynuacją rozważań na temat nośności i deformacji uwarstwionego podłoża gruntowego [7]. Szczególną uwagę poświęcono tutaj ocenie wpływu współpracy kolumn z kruszywa kamiennego i geotekstylia na zachowanie się podłoża z słabonośnymi przewarstwieniami.

Zainteresowanie tą problematyką związane jest bezpośrednio z dynamicznym rozwojem tworzyw polimerycznych, a co za tym idzie, z wszechstronnymi zastosowaniami geosyntetyków w budownictwie wodnym i lądowym oraz z potrzebą przystosowania słabych technicznie gruntów pod nowe inwestycje.



Rys. 1. Problemy związane z przenoszeniem obciążeń
Fig. 1. Problems connected with load transfer

Charakterystyczną i unikalną cechą tych tworzyw jest połączenie w jednym materiale właściwości hydraulicznych mineralnego filtru lub drenażu z dużą wytrzymałością na rozciąganie, niespotykaną dotychczas w przyrodzie. Ta właśnie cecha, bardziej niż inne, zdecydowała o szerokim zastosowaniu geowłókniny w technice budowlanej (rys. 1 i rys. 2). Jak w każdej dziedzinie inżynierskiej, posiadanie odpowiedniego poziomu wiedzy z zakresu właściwego zastosowania danych produktów oraz materiałów jest nieodzowne w celu osiągnięcia optymalnego rozwiązania inżynierskiego z uwzględnieniem aspektów ekonomicznych. Stąd wynika potrzeba opracowania skutecznego modelu obliczeniowego.



Rys. 2. Różnice w schemacie przenoszenia obciążeń zewnętrznych od ruchu kołowego w przypadku zastosowania geosyntetyków
Fig. 2. Differences in the diagram of external load of traffic origin transfer in the case of geosynthetics application

Szeroka gama produktów z geosyntetyków począwszy od geodżianin, geotkanin, geowłóknin, poprzez georuszty, geosiatki, geomaty, geodreny, a na geomembranach i geopiankach kończąc, zdobyła szerokie zastosowanie w budownictwie na całym świecie. Przykładem wykorzystania geowłókniny i georusztu może być projekt zrealizowany w miejscowości Red Lake – prowincja Kanady, Ontario – gdzie wybudowano nowe pasy startowe dla samolotów w służbie straży przeciwpożarowej, na terenach charakteryzujących się gruntem technicznie słabym [8]. Zdecydowano się tam na użycie geowłókniny igłowanej i georusztu w celu bezpośredniego wzmocnienia gruntu w podłożu, co przyniosło oczekiwany skutek [14].

Geotekstylia mają także zastosowanie w budownictwie kolejowym – można tutaj przytoczyć rozwiązania projektowe dróg kolejowych w Indiach, gdzie trasy przebiegają po podłożu gliniasto-iłowym, co sprawiało, że głównym problemem było przenikanie części pylastych do strefy tłuczniwa kamiennego, a to z kolei powodowało osiadanie warstwy podtrzymującej pokłady kolejowe wraz z szynami [9]. W celu wzmocnienia podłoża zastosowano tam geotkaniny o dużej wytrzymałości na rozciąganie.

Inne rodzaje geosyntetyków wykorzystywane są przy konstrukcji powłok powierzchniowych i wykładzin dennych składowisk odpadów, a także przy wzmocnianiu ścian oporowych i przy wszelkiego rodzaju odwodnieniach [14].

Niniejsze opracowanie bazuje na przykładzie poprowadzenia trasy komunikacyjnej na słabym podłożu, które wzmocnione zostanie kolumnami z kruszywa z zastosowaniem geosyntetyków.

2. Sformułowanie zadania

Celem prezentowanej pracy jest analiza deformacji oraz wartości nośności podłoża gruntowego pod obciążeniem kołowym. Omawiane zadanie wywodzi się z problemów geotechniki komunikacyjnej, zajmującej się między innymi budową liniowych obiektów ziemnych. Do rozwiązania podjętego zagadnienia przyjęto model płaski. Jest to przykład drogi ekspresowej na podłożu z przewarstwieniami gruntu słabego.

Przez pojęcie słabego podłoża rozumie się podłoże zbudowane z jednej lub więcej warstw gruntów charakteryzujących się dużą odkształcalnością, małą wytrzymałością lub niskim stopniem konsolidacji.

Zastosowanie dla takich warunków gruntowych kolumn żwirowo-kamiennych, poprzez wprowadzenie do gruntu materiału gruboziarnistego o wysokich parametrach wytrzymałościowych i charakteryzującego się dużym współczynnikiem przepuszczalności, ma za zadanie przyspieszenie procesu konsolidacji oraz zwiększenie nośności podłoża. Dołączenie do proponowanego rozwiązania geosyntetyków, które charakteryzują się dużą wytrzymałością na rozciąganie, ma na celu zapewnienie jeszcze lepszej współpracy w przenoszeniu obciążeń pomiędzy podłożem z kolumnami żwirowo-kamiennymi i nasypem na geowłókninie.

Zadaniem niniejszego opracowania jest próba podania w prostej formie praktycznych zaleceń i metod, które mogą być użyte do szybkiego zamodelowania elementów

wzmacniających ten ośrodek, a także otrzymanie istotnych informacji na temat rzeczywistej nośności takiego gruntu, wielkości jego odkształceń i deformacji.

3. Model i algorytm rozwiązania zadania

Podstawowe założenia dla przyjętego modelu obliczeniowego rozwiązano na gruncie mechaniki continuum przyjmując sprężysto-plastyczne właściwości materiałów. Do rozwiązania zagadnień brzegowych wykorzystano program Z_SOIL, który jest systemem analizy obliczeniowej bazującym na metodzie elementów skończonych (MES), ukierunkowanym na rozwiązywanie różnorodnych praktycznych problemów projektowych i wykonawczych szeroko pojętej geotechniki, a w szczególności zagadnień: fundamentowania, ziemnych i betonowych budowli hydrotechnicznych, budownictwa drogowego i mostowego, górnictwa podziemnego i odkrywkowego.

Kryterium wyjściowym przy projektowaniu dróg z zastosowaniem geotekstyliów jest wytrzymałość podłoża gruntowego na ścinanie. Określając parametry geotechniczne gruntu wykorzystano przybliżoną metodę określania wytrzymałości podłoża gruntowego na ścinanie, bazując na prostym teście [1] (tab.1.)

Tablica 1

Przybliżona metoda określania wytrzymałości gruntu na ścinanie

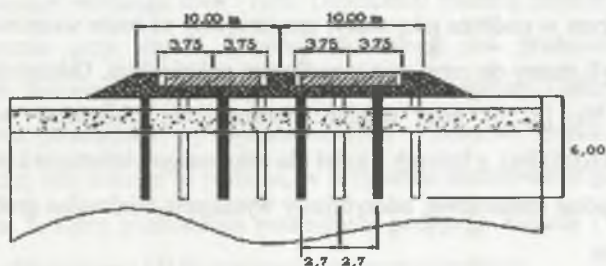
Lp.	stan podłoża	Opis badania	Szacowana wytrzymałość gruntu na ścinanie τ [kPa]	Kalifornijski wskaźnik nośności gruntu cbr [%]
1.	Bardzo miękki	grunt daje się łatwo spenetrować przy użyciu pięści do około 10 – 15 cm	13,5	0,5
2.	Miękki	grunt daje się łatwo spenetrować przy użyciu kciuka do około 10 – 15 cm	13,5 – 27,5	0,5 – 1,0
3.	Półmiękki	grunt możliwy do spenetrowania kciukiem przy użyciu siły do około 10 – 15 cm	27,5 – 48,2	1,0 – 1,8
4.	Lekko twardy	grunt niemożliwy do spenetrowania przy użyciu kciuka, jakkolwiek pozostaje małe wgłębienie	48,2 – 96,5	1,8 – 3,5
5.	Twardy	powierzchnia gruntu daje się zadrapać paznokciem	96,5 – 193,0	3,5 – 7,0
6.	Bardzo twardy	grunt nie daje się zadrapać	193,0 – 386,0	7,0 – 14,0

Korzystając z wymienionej metody, ma się na uwadze fakt, iż większość gruntów ma niższą wytrzymałość w stanie podwyższonej wilgotności lub pełnego nasycenia wodą. Dlatego przy modelowaniu każdorazowo należy zwracać uwagę na warunki wilgotnościowe badanego gruntu w różnych porach roku.

Kolejnym parametrem mającym wpływ na projektowanie powierzchni drogowych na słabych gruntach, przy użyciu geotekstyliów, jest obciążenie kołowe. Od tego parametru uzależnia się dobór geotekstyliów. Jedną z bardziej popularnych jest metoda zalecana przez Amerykański Instytut Drogowy [5,6] i adaptowana przez niektórych producentów geosyntetyków. Metoda ta polega na ustaleniu niezbędnej zredukowanej grubości nawierzchni zwirowej, z uwzględnieniem użycia geotekstyliów w podłożu, przy zadanym obciążeniu drogowym. W metodzie tej, dla ustalonej przeciętnej wytrzymałości gruntu na ścinanie τ [kPa], dobieramy odpowiadający warunkom projektowym współczynnik nośności gruntu N_c , a wielkość naprężeń obliczamy z następującej zależności:

$$P = \tau \cdot N_c \quad (1)$$

Mając wartość P , odczytujemy z wykresów [5] pożądaną grubość nawierzchni zwirowej po zagęszczeniu – \bar{Z} , w zależności od danego obciążenia drogowego. Parametry mechaniczne i hydrauliczne geotekstyliów dobieramy w zależności od pełnionej funkcji w konstrukcji drogowej [wg 12]. Geometria obszaru przyjętego do obliczeń wynika z przedstawionych założeń (rys.3).



Rys. 3. Geometria i schemat rozmieszczenia kolumn w podłożu z warstwą słabą o miąższości 1,80 m na głębokości 0,90 m oraz nasypu o wysokości 0,90 m i szerokości 20,00 m

Fig. 3. Geometry and diagram of columns' distribution in the soil with a weak layer, 1.80 m thick, at the depth of 0.90 m and the embankment 0.90 m high and 20.0 m wide

Kolumny z kruszywa kamienno–zwirowego zostały ułożone w siatce trójkątnej o rozstawie w osiach $2b$, przy średnicy kolumny d oraz długości kolumny L . Do rozważań obliczeniowych przyjęto schemat "połówkowy" (rys. 4 - połowę kolumny oraz obszaru do niej przyległego, dla kolumny ze skrajnego pasa założonej siatki).

Otoczeniem współpracującym z tą kolumną jest półprzestrzeń, jednak do obliczeń przyjęto tak jak w klasycznym modelu MES, ograniczone wymiary masywu gruntowego, poprzez wycięcie z tej półprzestrzeni dostatecznie rozległego obszaru, tak aby założona idealizacja warunków brzegowych na powierzchni nie zaburzyła rozkładu naprężeń i przemieszczeń w

sąsiedztwie kolumny. Generalnie struktura przyjętego do obliczeń modelu jest trójstrefowa, a składa się na nią:

- a) podłoże gruntowe,
- b) kolumna żwirowo–kamienna,
- c) strefa kontaktowa,

z zastosowaniem geosyntetyków, mających za zadanie polepszenie współpracy kolumn z podłożem i nasypem przenoszącym obciążenia zewnętrzne.

Jedną z zasadniczych cech zaproponowanego modelu jest opis mechanicznego zachowania się materiałów poszczególnych stref. Założono, że są to ośrodki sprężysto–plastyczne, z zastosowaniem kryterium Druckera–Pragera.

4. Przykład obliczeniowy

W rozpatrywanym podłożu wyodrębniono dwie warstwy geotechniczne, których właściwości są reprezentowane przez parametry fizyczne i mechaniczne.

Kwalifikując grunt w podłożu jako słaby, przyjmujemy na bazie wcześniejszych obliczeń $\tau = 36$ [kPa], – czyli mamy do czynienia z podłożem półmiękkim. Odczytując współczynnik nośności gruntu N_c [5, 6] przy użyciu geotekstyliów, obliczamy poziom naprężeń $P = 36,0 \times 6,0 = 216,0$ [kPa], z których z kolei dla założonego obciążenia kołowego 16 ton na oś, czyli 8 ton na półoś dwukołową, odczytujemy wymaganą minimalną grubość nawierzchni żwirowej $Z \cong 30$ cm.

Elementy siatki o wymiarach:

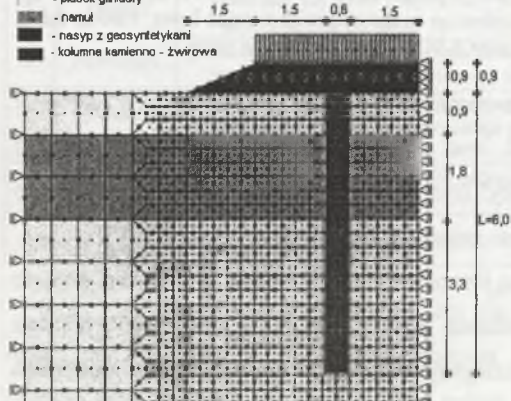
30x30cm; 60x90cm; oraz elementy przejściowe

– płasek gliniasty

– namul

– nasyp z geosyntetykami

– kolumna kamienno–żwirowa



Tablica 2

Parametry geotechniczne modelowanego podłoża gruntowego

Nr	PARAMETRY GEOTECHNICZNE				
	γ [kN/m ³]	E [kPa]	n [-]	c [kPa]	φ [°]
1	18,00	20000	0,32	17	17
2	20,00	150000	0,32	5	40
3	14,00	15000	0,30	10	6
4	19,00	100000	0,32	5	30

Rys. 4. Schemat obliczeniowy

Fig. 4. Computing diagram

Rozważane jest tutaj podłoże uwarstwione zawierające słabą warstwę usytuowaną między warstwami z gruntu nośnego, zalegającą na głębokości 0,90 m, o miąższości 1,80 m. Wymiary kolumn ułożonych w siatce charakteryzują następujące liczby: długość $L = 6,0$ m, średnica $d = 2r = 0,6$ m. Rozstaw kolumn przyjęto $b = 2,7$ m. Przy zastosowanej siatce trójkątnej i rozstawie osiowym kolumn $2b = 5,40$ m każda kolumna wzmacnia podłoże na powierzchni $5,4 \times 5,4 = 29,16$ m².

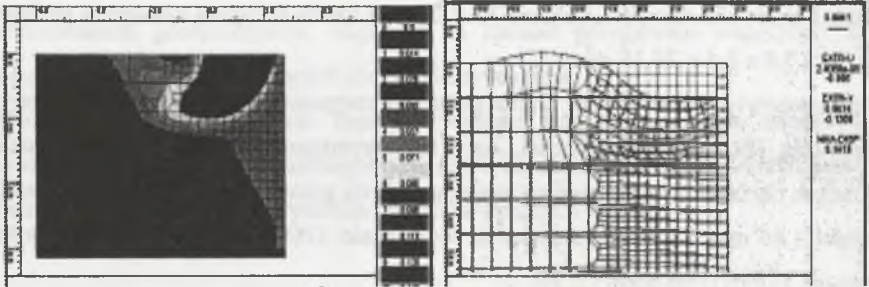
Nасыp stanowi warstwa żwiru. Dobór materiału zasypowego zazwyczaj uzależniony jest od warunków lokalnych (dostępności, ceny itp.) wymaganej jakości oraz od charakteru wywieranych obciążeń. Do niniejszego projektu podłoża gruntowego zastosowano geotkaninę o grubości 1,00 mm i o wytrzymałości na rozciąganie 1360 [N] oraz o wytrzymałości na rozdzieranie 545 [N] [wg norm [2, 3]].

Pokazana na rys. 4 siatka składa się z elementów o różnych wymiarach: 30x30 cm, 60x90 cm oraz elementów przejściowych. W rezultacie czego cały model obliczeniowy składa się z 1119 elementów, w tym 76 elementów kontaktowych i 17 (truss elements) – kotew modelujących geowłókninę. Obciążenie zadano dwoma funkcjami, jako (Initial State) obciążenie od ciężaru własnego oraz (Time Dependent) rosnącą funkcję czasu. Rezultatem takiego rozwiązania przy użyciu opisanej technologii jest przenoszenie obciążeń na poszerzony trzon kolumny oraz współpraca geotkaniny, kolumny i ośrodka gruntowego, a przez to poprawa parametrów wytrzymałościowych – nośności gruntu. Uzyskane wyniki świadczą o istotnej roli kolumn w podłożu, w przypadku zastosowania geowłókniny, co jest widoczne na rys. 5, który przedstawia rozwiązanie podjętego zadania i jego porównanie z wcześniejszymi obliczeniami [7] (rozwiązanie bez geosyntetyków).

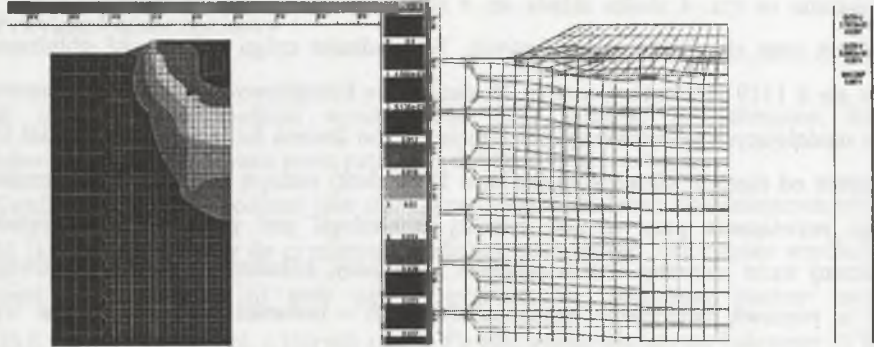
Widoczne jest wyraźne ograniczenie strefy dużych odkształceń w otoczeniu kolumny i jej współpraca z ośrodkiem gruntowym poprzez działanie geowłókniny, przy przenoszeniu przez nią obciążeń zewnętrznych. Nośność podłoża dla przyjętego modelu wzrosła w porównaniu do wcześniejszych obliczeń z 110 kPa na 285 kPa, czyli o około 1,5 razy. Dla strefy kontaktowej zróżnicowano parametry w podstawie i na poboczniczy kolumny. Zostały one przyjęte zgodnie z sugestią zawartą w normie dla obliczania tarcia na ścianę oporową oraz w [4], jako pośrednie między wartościami dla materiału kolumny i gruntu, równe 2/3 wartości kąta tarcia dla strefy otaczającej kolumnę i analogicznie wartość kohezji. Uwzględnienie w obliczeniach kolumn kamiennych wpływa na dwa elementy, a mianowicie na zwiększenie nośności podłoża oraz na ograniczenie wartości przemieszczeń (wypieranie gruntu).

PORÓWNANIE WIELKOŚCI PRZEMIESZCZEŃ I DEFORMACJI

A. PODŁOŻA BEZ GEOWŁÓKNINY



B. PODŁOŻA Z GEOWŁÓKNINĄ



Rys. 5. Zestawienie wyników obliczeń deformacji podłoża gruntowego
Fig. 5. Results of soil deformation calculations

5. Wnioski

Uzyskane w pracy wyniki wskazują na możliwość rozwiązania ważnego zadania inżynierskiego z wykorzystaniem trójstrefowego modelu materiałowego oraz MES. Na rys. 5. przedstawiono rezultaty rozwiązania zadań deformacji podłoża obciążonego nasypem i wzmocnionego kolumnami z kruszywa z zastosowaniem geowłókniny w zestawieniu z rozwiązaniem przedstawionym we wcześniejszych rozważaniach [7], gdzie nie uwzględniono obciążenia nasypem i zastosowania geosyntetyków. Zadanie opisane w pracy charakteryzuje się lepszą współpracą elementów konstrukcyjnych z ośrodkiem gruntowym. Wykonanie kolumn stwarza także możliwość przeniesienia przez to podłoże większych obciążeń (około 1,5 razy), czego wyrazem są wyniki z przeprowadzonych obliczeń. Kolejnym krokiem będzie

uwzględnienie wpływu procesu konsolidacji na przebieg deformacji podłoża gruntowego. Rozwiązanie tego zadania wymaga zastosowania modelu konsolidacji ośrodka porowatego.

LITERATURA

1. Amoco Fabrics and Fibres Co.: Geotextile Manual. Atlanta GA, USA 1994.
2. ASTM D 4632 – 91: Test Method for Grab Breaking Load and Elongation of Geotextile.
3. ASTM D 4533 – 91: Test Method for Index Trapezoid Tearing Strength of Geotextile.
4. Bzówka J.: Obliczeniowy model pala wykonanego techniką wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej (jet-grouting). Praca doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 2002.
5. FHWA TS-78-205 – Guidelines for Use of Fabrics in Construction and Maintenance of Low Volume Roads (Steward J.R. Williamson & Mohny) USDA Forest Service, Federal Highway Administration Report, 1978.
6. FHWA TS-86-203 – Geotextile Engineering Manual (Christopher R.B., Holtz R.D.). Federal Highway Administration Report, Prepared by STS Consultants Ltd., Northbrook IL., USA, 1985
7. Gaszyński J., Gwóźdź M.: Deformacja uwarstwionego podłoża gruntowego wzmocnionego kolumnami z kruszywa, XLVIII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB Krynica 2002, t. 3.
8. Geotechnical Fabrics Report: Geosynthetic Clay Liners. Part 5, Short Course, 1997.
9. Ghoshal A., Som N.: Geotextiles and Geomembranes in India – State of Usage and Economic Evaluation, Journ. Geotextiles and Geomembranes, 1993, N° 12.
10. Gryczmański M.: Metody analizy nośności i osiadania podłoża wzmocnionego kolumnami kamiennymi, Inżynieria Morska i Geotechnika, 1993, nr 5.
11. Jagdish T.S., Shigenori H., Madhirna R.M.: Analysis soft ground reinforced by non-homogeneous granular pile-mat system. Lowland Technology International, IALT, 2, 2. 2000.
12. M 288-96: Standard Specification. Geotextile Specification for Highway Applications. American Association of State Highway and Transportation Officials, USA, 1996.
13. Poroshasb H.B., Meyerhof G.G.: Analysis of Behavior of Stone Columns and Lime Columns, Computers and Geotechnics, Vol.20 No 1. 1997.

14. Wesolowski A., Krzywosz Z., Brandyk T.: Geosyntetyki w konstrukcjach inżynierskich, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2000.

Recenzent: Prof. zw. dr hab. inż. Zygmunt MEYER

Abstract

The efficiency of bearing stone columns in reducing the settlement of a foundation system is examined in this paper. The foundation system is assumed to consist of a large number of stone columns of equal length. They are installed in a weak soil layer and supporting a tight mat. The analysis examines the influence of the weak soil properties with geosynthetic material and columns on the settlement soil.