# Jak należy porównywać efektywność zastosowania georusztów wykorzystywanych do stabilizacji ziaren kruszywa niezwiązanych chemicznie? Część 2.

### Dr inż. Jacek Kawalec

Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Budownictwa, Tensar International s.r.o., Český Těšin, Czechy Cliff D. Hall – Consultant, Chester, Wielka Brytania

Niniejszy artykuł jest kontynuacją części pierwszej (opublikowanej w numerze 1/2015 Inżynierii Morskiej i Geotechniki), w której podjęto polemikę z artykułem "Badanie geosiatek dwui trójosiowych. Czy można porównywać między sobą geosiatki o różnych kształtach żeber i oczek?" autorstwa dr. Nigela E. Wrigley z firmy NewGrids, opublikowanym w numerze 4/2014 Inżynierii Morskiej i Geotechniki. W części pierwszej usystematyzowano terminologię z zakresu georusztów, omówiono wymagania formalno-prawne ich zastosowań, przybliżono nową funkcję "stabilizacji", która ma zastosowanie w przypadku współpracy georusztów z warstwami niezwiązanego chemicznie kruszywa oraz przedstawiono pierwsze krytyczne uwagi dotyczące celowości wprowadzania do praktyki nowego testu wskaźnikowego do badania georusztu w celu określenia jego quazi wieloosiowej sztywności oraz naprężenia membranowego czyli obciażenia skrepowania.

Niniejsza, druga część stanowi dyskusję nad pojęciem "obciążenie skrępowania". Przedstawiono również metody badań porównujących efektywność działania georusztów w konstrukcjach.

# OBCIĄŻENIE SKRĘPOWANIA – RZECZYWISTOŚĆ CZY HIPOTEZA?

Obciążenie skrępowania opisano za pomocą schematu przedstawionego na rys. 1, który posłuży do dyskusji nad hipotezą, że istnieje jednostka obciążenia skrępowania przekazywana przez georuszt pod naprężeniem.

Analizując rys. 1a, koło przekazuje obciążenie na pewną powierzchnię nawierzchni opisane siłą i powierzchnią kontaktu. Ciśnienie w oponie ma wpływ na powierzchnię kontaktu. Ciśnienie pod oponą pneumatyczną ma swój indywidualny rozkład i nie jest obciążeniem rozłożonym równomiernie. Rozważania te są ważne dla inżynierów zajmujących się projektowaniem nawierzchni, szczególnie w przypadku analiz mechaniczno-empirycznych. Przekazywane obciążenie jest złożone i taki też jest jego rozkład. W większości proponowanych rozwiązań zakłada się liniowy rozkład obciążeń, poprzez zagęszczony materiał nasypowy. Należy postawić pytanie: czy w rzeczywistości przebieg rozkładu obciążenia w warstwach kruszywa jest dokładnie



Rys. 1. Schemat do opisu obciążenia skrępowania [6]

taki, jak narysowane linie (rys. 1a)? Czy schemat ten opisuje prawidłowo rozkład obciążenia i czy są to wielkości wektorowe (posiadające wartość i kierunek)? Umownie, schematy te przedstawiają rozkład naprężenia pionowego i są pewnym uproszczeniem "cebuli" naprężenia według Boussinesqa w przypadku pionowego rozkładu naprężenia pod obciążeniem.

Rozkład naprężeń w strefie kontaktowej przedstawiono na rys. 1b, uwzględniając wielokierunkowe promieniowe naprężenie ścinające S generowane przez nacisk koła. Na rys. 1b pokazano rozkład naprężenia od koła pojazdu na granicy kontaktu oznaczającej poziom ułożenia georusztu. Nie jest jasne, jakie znaczenie dla tego rozkładu ma przedstawienie obszaru obciążonego oponą. Na granicy kontaktu, czyli w poziomie georusztu, reakcja na składowa pionowa napreżenia jest przedstawiona w postaci składowych poziomych naprężenia rozchodzących się radialnie od środka obciążenia, które w tym przypadku oddziałuje jako ścinające w głąb zagęszczonego materiału nasypowego. Naprężenie ścinające zmniejsza się promieniowo, co jest charakterystyczne dla "cebuli" naprężenia według Boussinesqa. Na krawędzi śladu rozkładu obciążenia, poza którą nie ma naprężenia pionowego spowodowanego naciskiem koła, naprężenie ścinające spada do zera. Nie ma siły ścinania S na obwodzie śladu rozkładu obciążenia, ponieważ jest ona pochłaniana przez oddziaływanie z georusztem wewnątrz śladu rozkładu obciążenia.

Przeciwstawia się mu wielokierunkowe obciążenie skrępowania *C* wewnątrz georusztu. Czy jest tak w rzeczywistości? Czy istnieje siła odśrodkowa działająca na obwód kołowego śladu rozkładu obciążenia? Warto rozważyć model, przedstawiony na rys. 1, sugerujący, że w rzeczywistości istnieje siła skrępowania działająca na obwodzie śladu rozłożonego nacisku od koła.

Na rys. 2a, obrazującym rozkład naprężenia, widać przekroje ilustrujące dystrybucję pionowego nacisku opony pneumatycznej na powierzchnię. Ma on kształt paraboliczny, gdy koło jest w spoczynku. Dlatego opona wywiera nacisk inny niż w klasycznym przypadku obciążenia podłoża sztywną płytą czy stopą fundamentową. W rozważaniach rozkładu naprężenia pionowego teoria Boussinesqa nie ma zatem bezpośredniego zastosowania, choć istnieje rozkład naprężenia pod obciążeniem z "cebulami" naprężenia według Boussinesqa. Dlatego też nie tylko teoretyczne "cebule" naprężenia rzeczywiście należałoby dopasować do formy wywieranego obciążenia, ale również trzeba zwrócić uwagę na to, że zagęszczony materiał ziarnisty jest anizotropowy, co powoduje, że w różnych kierunkach promieniowych jego właściwości mechaniczne będą różnić się, zależnie od grubości warstwy.

Na rys. 2b zwrócono uwagę na poziom granicy kontaktu, gdzie georuszt i podłoże przekazują swoje reakcje na przyłożone naprężenie. Przedstawione są dwa sektory radialne, których różnica stanowi ilustrację powyższych zmian zmiennej przestrzennej. Promień wzdłuż sektora jest dyskretyzowany, podzielony na małe elementy, które mogłyby lub idealnie byłyby poszczególnymi oczkami georusztu. Przy takim uszczegółowieniu jakość skrępowania bocznego skutkuje kolejnym poziomem złożoności w ocenie funkcji stabilizacji.

Na rys. 2b przedstawiono inne właściwości stabilizacji, takie jak przedstawienie regularnego koła, które jest aktywowane na granicy kontaktu. Wspomniana wyżej zmienność w zagęsz-





Rys. 2. Teoretyczny rozkład nacisku (a), reakcje na poziome naprężenie (b)

czonym materiale ziarnistym i jego oddziaływania z georusztem wymagają, aby promień był również zmienny. Dlatego też na rys. 2b przedstawiono nie okrąg, ale kształt nieregularny ze środkiem na osi obciążenia.

Na rys. 2b przedstawiono dwa sektory (żółty i zielony), w których pokazano zdyskretyzowaną reakcję na poziome naprężenia. Te dwa sektory są ilustrowane różniącymi się rozkładami naprężenia poziomego i różniącymi się przedziałami (żółte szersze niż zielone). To, że przedział każdego sektora jest zmienny, oznacza, że płaski kształt tych naprężeń jest nieregularny i przypuszczalnie nigdy nie kołowy. Wniosek ten pokrywa się z wynikami różnych analizowanych modeli matematycznych.

Na rys. 3a zobrazowano dyskretne modelowanie elementów, gdzie poszczególne cząstki materiału są modelowane pod działaniem toczącego się koła [3]. Górny obraz przedstawia scenariusz matematyczny, a dolny skumulowane przemieszczenie pionowe cząstek materiału ziarnistego pod toczącym się kołem w przypadku niestabilizowanego (po lewej) i stabilizowanego (po prawej) podłoża. Model w obszarze pod kołem opisuje rozkład, gdy przyłożono naprężenie pionowe i wystąpił ruch cząstki. Spektrum kolorów kodowania zmienia się od ciemnoniebieskiego (brak przemieszczenia pionowego) do głębokiej czerwieni (największe przemieszczenie pionowe).

Pewnym potwierdzeniem złożoności problemu stabilizacji jest wyraźnie widoczny brak rozkładu stożkowego w chwili reprezentowanej przez przedstawiony moment obliczeń. W układzie jest bowiem zbyt wiele niejednorodności.

Na rys. 3b przedstawiono chwilowy rozkład sił w żebrach. Brak jest jednorodności geometrycznej, takiej jak ślad kołowy. Z wewnętrznych złożoności reakcji georusztu wynika, że



Rys. 3. Modelowanie elementów dyskretnych [4] (a), rozkład sił w żebrach georusztu (czerwone – rozciąganie, niebieskie – ściskanie), [4] (b), analiza numeryczna – badanie sztywności geometrii przy wymuszonym skręcaniu, [3, 4] (c)

występuje zarówno rozciąganie (maksymalne 0,3 kN/m), jak i ściskanie (maksymalne 0,1 kN/m). Na tej podstawie można stwierdzić, że "siła skrępowania" działa na obwód kołowego rozkładu naprężenia.

Na rys. 3c pokazano przykład numerycznej analizy strukturalnej georusztu pod wpływem wymuszonego skręcania.

Wracając do rys. 2 i koncepcyjnych idei stabilizacji, uwzględniamy to, czego możemy nauczyć się z zaawansowanego modelowania matematycznego. Każdy dyskretyzowany element jest elementem składowym sumy siły ścinającej przekazywanej od podłoża *S*, a strukturą rozciąganą jest georuszt *T*. Gdy poszczególne naprężenia i ich powierzchnie scałkuje się w danym obszarze, wówczas całkowita siła stabilizująca w obszarze będzie wyznaczona jako (Sy + Gy) lub (Tg + Tg). Dalsze sumowanie może być wykonane, jeśli efektu stabilizacji poszukuje się w postaci całkowitej wartości wyrażonej jako siła stabilizacji. Należy jednak zwrócić uwagę na trzy ważne punkty:

Strefa skrępowania ma kształt nieregularny, a nie kołowy (ponieważ każdy obszar ma swoją własną reakcję przy podpieraniu nacisku koła).

Nie ma "obciążenia skrępowania" zewnętrznego w przypadku tego modelu. Reakcja na obciążenie występuje całkowicie w obrębie śladu rozkładu obciążenia. Jest mało prawdopodobne, aby "obciążenie skrępowania" miało wyraz fizyczny.

Pomiar "obciążenia skrępowania" w badaniu na rozerwanie geomembrany nie ma związku ze stabilizacją za pomocą georusztów, a więc badanie to, jego zakres i potencjał jest ograniczony do wprowadzenia testu wskaźnikowego.



Rys. 4. Porównanie efektywności georusztów trójosiowych i dwuosiowych (a), wymagana grubość warstwy posypki (b) [5]

Odpowiadając sobie na pytanie, czy na podstawie proponowanego badania "naprężenia membranowego" można porównywać georuszty – można, ale wynik nie ma żadnego znaczenia praktycznego dla projektantów i autorów specyfikacji technicznych, którzy są zainteresowani porównaniem efektywności geosyntetyków we współpracy z warstwą kruszywa w celu optymalizacji rozwiązań projektowych.

Pozostaje pytanie, czy jest w ogóle potrzebne kolejne badanie wskaźnikowe? Jako badanie do użytku kierowników produkcji, w fabryce, przy istniejących systemach zapewnienia jakości, jest mało prawdopodobne, aby odgrywało ono jakąś ważną rolę.

# PORÓWNANIE EFEKTYWNOŚCI GEORUSZTÓW

Zamiast porównywania pojedynczych cech georusztów, w takim czy innym badaniu laboratoryjnym, w praktyce są potrzebne badania obciążenia nawierzchni ruchem w pełnej skali, w których są uzyskiwane dane o efektywności poszczególnych georusztów pod obciążeniem nawierzchni ruchem. Wyniki takich badań w pełnej skali pozwalają na opracowanie dla konkretnego georusztu współczynnika stabilizacji uwzględnianego w metodach projektowania (np. według ASTM).

W [5] przedstawiono wyniki badań obciążenia nawierzchni ruchem w pełnej skali, wykonane w 2013 roku w Laboratorium Badawczym Transportu w Wielkiej Brytanii. Efektywność georusztu Tensar TriAx TX 160 porównano z wyrobem, który jest promowany często jako jego "równoważnik", to jest BOSTD E'grid 30/30. Wspomniane georuszty były odpowiednio: Tensar TriAx TX 160 – trójosiowy, a BOSTD E'grid 30/30 – dwuosiowy. Efektywność georusztów określono jako odkształcenie po standardowych przejściach osi kół (patrz rys. 4a), [5].

W przypadku typowej podbudowy granicą porównania efektywności pod bezpośrednim obciążeniem nawierzchni ruchem jest koleina 40 mm, która odpowiada odkształceniu 26 mm w śladzie koła. Liczba ESAL przy przyjęciu kryterium odkształcenia 26 mm wynosi 990 dla TX 160 oraz 530 dla E'grid 30/30. Stosunek korzyści ruchu (*TBR ang. Traffic Benefit Ratio*) jest równy 1,87 [5].

Stąd oczywisty wniosek, że wszystkie georuszty działają, ale niekoniecznie mają taką samą efektywność w konstrukcji. W omawianym przypadku georuszt dwuosiowy wykazał się blisko dwukrotnie gorszą efektywnością w konstrukcji, choć prawdopodobnie w badaniu "naprężenia membranowego" tej różnicy nie udałoby się wykazać.

W celu dokonania kwantyfikacji wpływu TBR na trwałość zagęszczonej warstwy podsypki można wykonać obliczenia, używając metody empirycznej AASTHO (1993) [1]. Można obliczyć zwiększoną grubość kruszywa wymaganą przy E'grid 30/30, w stosunku do tej wymaganej przy TX 160, w celu uzyskania takiej samej trwałości konstrukcji. Wyniki przedstawiono na rys. 4b. W przypadku georusztu dwuosiowego niezbędna jest dodatkowa miąższość warstwy podsypki, w tym przypadku 13%. W przypadku Tensar MSL i 300 mm warstwy stabilizowanej mechanicznie odpowiadająca jej grubość dla E'Grid 3030 wynosi 340 mm (rys. 4b) w sytuacji tego samego docelowego ruchu.

#### Tabl. 1. Parametry, którymi należy opisać georuszt według [2].

Nr	Charakterystyka wyrobu	Metoda testowania	Jednostka miary parametru
(1)	(2)	(3)	(4)
1	Sztywność radialna przy odkształceniu 0,5%	TR 041 B.1	kN/m
2	Współczynnik izotropii sztywności	TR 041 B.1	-
3	Efektywność węzła	TR 041 B.2	%
4	Wymiar	TR 041 B.4	mm

Ma to również konsekwencje finansowe związane z realiami rynkowymi i kosztami instalacji. Kosztorysowe wartości, zebrane w październiku 2015 roku w celu wykonania wykopu głębokości 40 mm wraz z odwozem i składowaniem gruntu, a następnie dowozu i wbudowania 40 mm warstwy kruszywa z zagęszczeniem, wahają się w granicach  $7 \div 10$  PLN za metr kwadratowy w planie. Dlatego, jeśli chodzi o różnicę ceny produktu, geosiatka BOSTD E'grid 30/30 musiałaby być tańsza o minimum 7 PLN, aby zmiana produktów w celu uzyskania identycznego pod względem trwałości rozwiązania miała sens. W wycenie nie uwzględniono kosztów opracowania i zatwierdzenia ewentualnego projektu zamiennego.

Postawiono pytanie [6]: "Czy można porównywać georuszty różnych postaci?" Odpowiedź jest twierdząca, pod warunkiem, że robi się to, porównując ich efektywność w warstwie poddanej obciążeniu ruchem. Czy można dojść do tej samej oceny jedynie na podstawie nowego badania wskaźnikowego? Wydaje się, że zdecydowanie nie.

## PRAWIDŁOWE SPECYFIKOWANIE GEORUSZTÓW W FUNKCJI STABILIZACJI

Funkcję stabilizacji georusztem warstw kruszyw niezwiązanych opisano w Raporcie Technicznym nr 41 z 2012 roku Europejskiej Organizacji Aprobat Technicznych [2]. W tabl. 1 podano parametry, którymi należy opisać georuszty zgodnie z tym dokumentem.

Przytoczony raport techniczny [2] jest równocześnie podstawą do oznakowania wyrobu znakiem CE za zgodność z Europejskim Dokumentem Oceny.

### PODSUMOWANIE

Fakt, że w EU funkcja stabilizacji ma już swoją ugruntowaną pozycję, opisaną parametrami georusztów związanymi z funkcją, pozwala zakończyć rozważania nad celowością wprowadzania nowego badania.

#### LITERATURA

1. AASTHO (1993). Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC, USA.

2. EOTA TR41, "Non-reinforcing hexagonal geogrid for the stabilization of unbound granular layers by way of interlock with the aggregate", European Organization of Technical Approvals, 2012.

3. Jas H., Stahl M., te Kamp L., Konietzky H., Oliver T.: Discrete element simulation: modeling and analysis of a geogrid stabilized sub-base loaded with a moving wheel. Proc. Of the XVI ECSMGE Geotechnical engineering for Infrastructure and Development, 2015 ISBN 978-0-7277-6067-8, 3935-3940.

4. Jas H., Stahl M., te Kamp L., Konietzky H., Oliver T.: Discrete element simulation of geogrid stabilized sub-base: Modeling, simulation and analysis of geogrid stabilized sub-base while loaded with a moving wheel with special

emphasis on the differences in mechanism of BX-biaxial and TX-multi axial geogrids. Proc. of Geosynthetic 2015, Portland USA.

5. Tensar International Bulletin. Comparison of trafficking performance: Tensar TriAx<sup>®</sup> TX160 geogrid and E'Grid®3030 IB/TRL8/TX160vEG3030 issue date 18.06.2014.

6. Wrigley N. Y., Zheng H., Yuan S. P.: The Confinement Effect of Different Geogrids–3: The Development of an Index Test for the Omniaxial Testing of the Tensile Properties of Geogrids, Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering: 2163-2172.