

STABILIZACJA GEORUSZTEM HEKSAGONALNYM PODŁOŻA POD TRASĘ NARCIARSKĄ NA SKŁADOWISKU

Eugeniusz Koda¹, Piotr Osiński¹, Agnieszka Kiersnowska¹,
Jacek Kawalec²

¹Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

²Politechnika Śląska, Gliwice

Streszczenie. W artykule przedstawiono przykład zastosowania i analizy stateczności skarpy wzmocnionej georuszem heksagonalnym (tzw. georuszem trójosiowym) wbudowanym w narożu składowiska odpadów Radiowo, w projektowanej narciarskiej trasie zjazdowej. Konstrukcja żeber w georusztach heksagonalnych oparta jest na strukturze trójkąta równobocznego, dzięki czemu dochodzi do bardziej równomiernego rozkładu obciążeń na podłoże niż w przypadku często używanych georusztów jednoosiowych oraz dwuosiowych. Struktura heksagonalna georusztu zapewnia również dużą wytrzymałość i sztywność we wszystkich kierunkach oraz stabilizację podbudowy konstrukcji drogi. Obliczenia stateczności składowiska przeprowadzono z zastosowaniem klasycznej metody analiz stosowanej w geotechnice (metoda Bishops), z wykorzystaniem parametrów geotechnicznych odpadów określonych na potrzeby projektu ukształtowania bryły rekultywowanego składowiska odpadów Radiowo.

Słowa kluczowe: georuszt heksagonalny, stabilizacja, grunt antropogeniczny, rekultywacja składowisk

WSTĘP

Bezpieczeństwo geotechniczne składowisk odpadów związane jest z procesem odkształcania masy odpadów, co bezpośrednio wpływa na stateczność ogólną skarp oraz stateczność warstw przykrycia powierzchni składowiska odpadów. Przy analizie stateczności i odkształceń bryły składowiska wyróżnia się stateczność wewnętrzną oraz zewnętrzną, a także stateczność warstw przykrycia powierzchni [Jessberger (red.) 1993,

Adres do korespondencji – Corresponding author: Agnieszka Kiersnowska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: agnieszka_kiersnowska@sggw.pl

© Copyright by Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2016

Christensen i in. 1994, Koda 2011]. Stateczność zewnętrzna zależy od odkształceniowych i wytrzymałościowych właściwości odpadów, dotyczy systemu przykrycia składowiska. Stateczność wewnętrzna odnosi się do odpadów, które nie są wbudowane w rejonie skarp.

Odkształcalność odpadów komunalnych jest procesem złożonym, który zależy zarówno od czynników mechanicznych wynikających z obciążenia nadległymi warstwami i sprzętem pracującym na składowisku, jak i czynników fizykochemicznych i biologicznych [Jessberger i Kockel 1991, Manassero i in. 1996, Koda 2011]. Do najważniejszych czynników, które wpływają na odkształcalność odpadów, można zaliczyć: miąższość i skład morfologiczny odpadów, historię stanu naprężenia związaną z technologią składowania i zagęszczania odpadów, gęstość po zagęszczeniu, zróżnicowanie składu odpadów pod względem ich uziarnienia, zawartość w odpadach składników ulegających rozkładowi, poziom odcieków w składowisku, czas, jaki upłynął od składowania odpadów, oraz czynniki środowiskowe, tj. wilgotność, temperaturę w złożu, emisję biogazu [Koda 2011]. Wyżej wymienione czynniki znacznie wpływają na osiadanie składowiska, a także mogą prowadzić do osuwisk. Aby zapobiec takim procesom, coraz częściej stosuje się konstrukcje z użyciem materiałów geosyntetycznych.

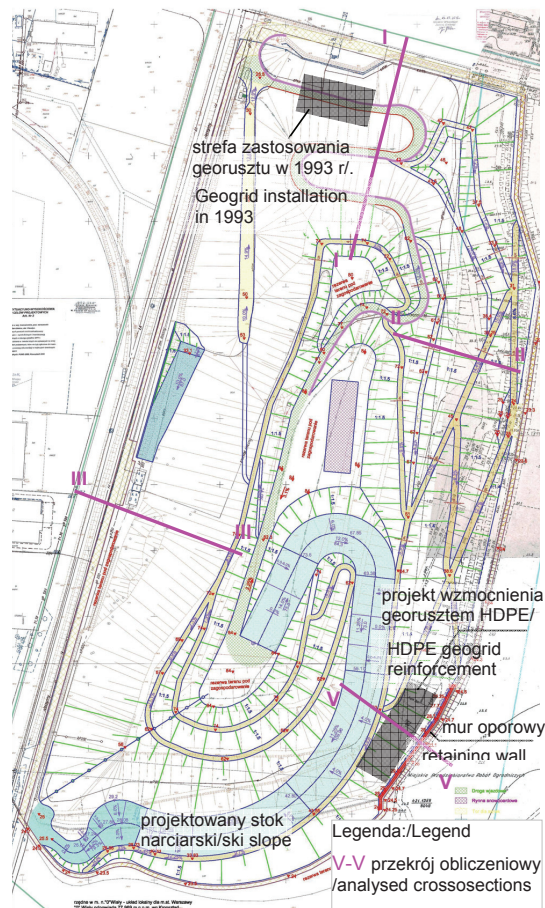
Celem przeprowadzonych badań było dokonanie oceny ogólnego stanu bezpieczeństwa składowiska odpadów Radiowo w trakcie eksploatacji i późniejszego użytkowania po jego zamknięciu. Obliczenia numeryczne przeprowadzono w programie GEO-SLOPE za pomocą klasycznej metody Bishopa, uwzględniając wzmocnienie w rejonie muru południowo-wschodniego bryły składowiska odpadów georusztem heksagonalnym PP nad konstrukcją oporową.

MATERIAŁY I METODY

W końcu 2016 roku planowane jest zamknięcie składowiska odpadów Radiowo i przystosowanie bryły składowiska do zagospodarowania jako stoku narciarskiego. W celu zmiany ukształtowania bryły składowiska oraz jego rekultywacji z kierunku ukształtowania jako stoku narciarskiego konieczne było wykonanie konstrukcji oporowej w południowo-wschodnim narożu składowiska (rys. 1) oraz wzmocnienie skarpy nad tą konstrukcją przy użyciu georusztu heksagonalnego. Zastosowanie georusztu heksagonalnego było uwarunkowane lokalizacją zagrożonej strefy w rejonie naroża składowiska oraz uzyskaniem stabilizacji podłoża pod realizowaną narciarską trasę zjazdową.

Użycie georusztów heksagonalnych do funkcji stabilizacji gruntu staje się coraz bardziej powszechne. Materiały te znalazły zastosowanie w wielu inwestycjach komunikacyjnych, jak: infrastruktura drogowa, trasy kolejowe, a także na platformach roboczych w konstrukcjach posadzek przemysłowych, parkingach [Gołos 2014].

Współpraca georusztu heksagonalnego z gruntem wynika z „zazębiania się” i klinowania kruszywa w oczkach georusztu. Ziarna gruntu przechodzą przez oczka georusztu, częściowo w nie wnikają i ulegają zaklinowaniu w przestrzeniach między żebrami. Wytrzymałość i sztywność żeber uniemożliwia przemieszczenie się ośrodka gruntowego na boki. Zaklinowanie kruszywa (gruntu) zabezpiecza przed dużymi deformacjami pionowymi i prowadzi do uzyskania dużych wartości modułu sprężystości kruszywa, co daje efekt wzro-



Rys. 1. Plan zagospodarowania składowiska ze wskazaniem lokalizacji wbudowania georusztów i muru oporowego [Koda i in. 2012]

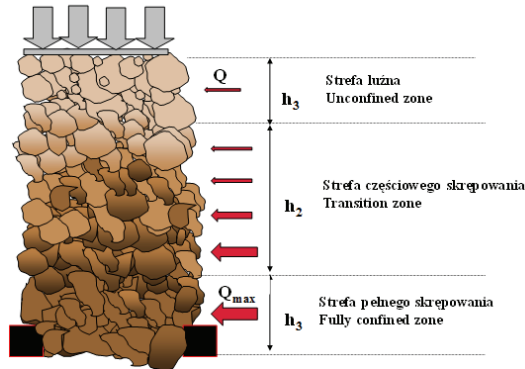
Fig. 1. Development plan for the site indicating the location incorporation geogrids and retaining wall [Koda et a. 2012]

stu nośności całej warstwy gruntu stabilizowanego georusztem [Judycki 2005]. Zwiększona odporność na przemieszczanie się kruszywa, będąca wynikiem skrępowania bocznego w oczkach georusztu, jest cechą charakterystyczną dla georusztów heksagonalnych.

Efekt zazębiania się kruszywa w oczkach georusztu powoduje skrępowanie ziaren i zmienia się wraz z odległością od płaszczyzny geosyntetyku (rys. 2).

Wyróżnia się 3 strefy wpływu o zróżnicowanych cechach [Kawalec 2012]:

- strefę pełnego skrępowania, w której dochodzi do zupełnego zaklinowania ziaren, a wzajemne przemieszczanie się ziaren praktycznie nie występuje,
- strefę częściowego skrępowania, gdzie skrępowanie ziaren jest mniejsze, a zdolność przemieszczania się ziaren między sobą zmienia się nieliniowo od zera (u dołu strefy) do wartości maksymalnej (górna część strefy),

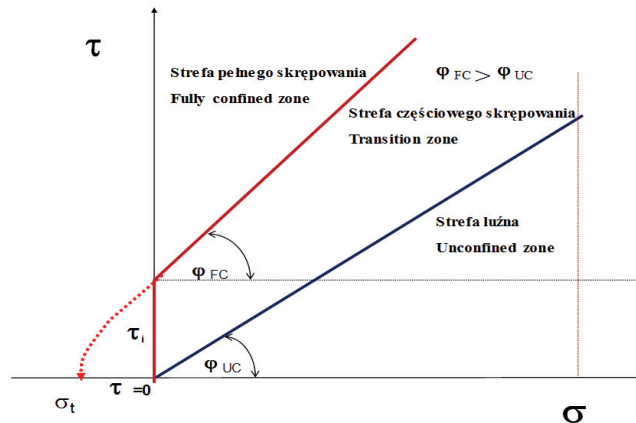


Rys. 2. Podział stref skrepowania ziaren gruntu nad georusztem [Kawalec 2012]

Fig. 2. Embarrassment zones of soil grains within the hexagonal grid [Kawalec 2012]

- strefę luźną, gdzie wpływ zazębiana się ziaren w płaszczyźnie georusztu praktycznie nie występuje, a przemieszczanie ziaren względem siebie jest maksymalne.

Grubość poszczególnych stref skrepowania decyduje o efektywności stabilizacji podłoża. Grubości stref są charakterystyczne dla konkretnego typu georusztu oraz rodzaju i uziarnienia zastosowanego kruszywa (gruntu). Materiał gruntowy ulokowany w tych strefach charakteryzuje się również zmiennymi parametrami wytrzymałościowymi. Wynika to z faktu, iż na kruszywo w poszczególnych strefach oddziałują zmienne wartości naprężenia od żeber georusztu oraz od gruntu znajdującego się powyżej kolejnych stref. Wzrost wytrzymałości na ścinanie, szczególnie w strefie pełnego skrepowania, wywołany jest przede wszystkim wzrostem kąta tarcia wewnętrznego ośrodka gruntowego. Zależności wytrzymałości na ścinanie od wielkości naprężenia dla poszczególnych stref skrepowania według warunku Coulomba-Mohra zaprezentowano na rysunku 3.



Rys. 3. Wytrzymałość na ścinanie w poszczególnych strefach skrepowania według Coulomba-Mohra

Fig. 3. Shear strength in different embarrasment zones according to Coulomb-Mohr

Przeanalizowano przykład wzmocnienia skarpy rekultywowanego składowiska odpadów Radiowo celem uzyskania kształtu bryły umożliwiającej zagospodarowanie porekultuwacyjne jako stoku narciarskiego. Do stabilizacji skarpy w południowo-wschodnim narożu składowiska nad murem oporowym zastosowano georuszt heksagonalny, który składa się z sześcioboków utworzonych przez oczka o kształcie trójkąta równobocznego. Georuszt heksagonalny produkowany jest w procesie wytłaczania i perforacji układu otworów w sztywnej płycie polimerowej, a następnie w procesie kontrolowanego rozciągania (w trzech kierunkach) w określonej temperaturze [Kawalec 2015]. W wyniku rozciągania łańcuchy cząsteczkowe polimeru zostają zorientowane w kierunku rozciągania, co zwiększa wytrzymałość, sztywność i odporność na pełzanie tego materiału. Polipropylen (PP) to polimer stosowany w procesie wytwarzania georusztu heksagonalnego. Polipropylen jest termoplastem o budowie częściowo krystalicznej, należy do grupy polimerów konstrukcyjnych mających wszechstronne zastosowanie ze względu na dobre właściwości mechaniczne, dużą odporność chemiczną, termiczną i korozję naprężeniową [Żuchowska 1995, Pielichowski i Puszyński 1998, Saechtling 2000].

W tabeli 1 przedstawiono dane techniczne georusztu heksagonalnego deklarowane przez producenta. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, iż do niedawna georuszty identyfikowane były jedynie z pełnieniem funkcji zbrojenia w gruncie w takich konstrukcjach, jak: strome skarpy, przyczółki mostowe czy mury oporowe. W tego typu budowlach geotechnicznych głównymi parametrami sprawdzanymi dla geosyntetyku są: wytrzymałość długoterminowa na rozciąganie, doraźna wytrzymałość i odkształcalność na rozciąganie, a także wytrzymałość na rozciąganie przy 2- i 5-procentowym odkształceniu. Z chwilą pojawienia się georusztów heksagonalnych, ze względu na pełnienie innej funkcji we współpracy z gruntem (stabilizacja), określono dodatkowo parametry: sztywność radialną przy małych odkształceniach (0,5 i 2%), współczynnik izotropii sztywności, efektywność węzła oraz wymiar sześcioboku [EOTA 2012].

Tabela 1. Dane techniczne georusztu deklarowane przez producenta
Table 1. Specifications of geogrid declared by the manufacturers

Parametr Parameter	Jednostka Unit	Deklarowana wielkość Declared value	Tolerancja Tolerance
Masa powierzchniowa Mass per unit area	kg·m ⁻²	0,205	-0,035
Rozmiar sześcioboku Hexagon Pitch	mm	80	±4
Efektywność węzła Junction efficiency	%	100	-10
Sztywność radialna, odkształcenie 0,5% Radial Secant Stiffness at 0.5% strain	kN·m ⁻¹	360	-75
Sztywność radialna, odkształcenie 2% Radial Secant Stiffness at 2% strain	kN·m ⁻¹	250	-65
Współczynnik izotropii sztywności Radialm Secant Stiffness Ratio	-	0,8	-0,15

Sztywność radialna jest to wartość naprężenia uzyskanego przy małych odkształceniach, którą wyznacza się we wszystkich kierunkach naprężeń. Wartość sztywności radialnej podaje się jako minimalną wartość ze wszystkich pomierzonych wartości

w zakresie od 0 do 360°. Współczynnik izotropii sztywności określany jest jako zdolność do uzyskania zbliżonych wartości sztywności we wszystkich kierunkach badania i wyznaczany jest jako iloraz wartości minimalnej i maksymalnej sztywności dla określonej liczby wykonanych pomiarów. Efektywność węzła określana jest jako stosunek sił przenoszonych przez pojedyncze żebro do siły przenoszonej przez węzeł georusztu, a jej wartość wyrażana jest w procentach. Rozmiar sześcioboku w georuszcie określany jest jako suma dwóch sąsiednich wysokości trójkątów tworzących jego oczko [EOTA 2012, Kawalec 2014, Gołoś 2015].

Parametry geotechniczne odpadów do obliczeń stateczności przyjęto na podstawie wyników próbných obciążeń, sondowań statycznych CPT i WST oraz analizy wstecznej osuwisk zinwentaryzowanych w przeszłości na składowisku. Gęstość objętościową odpadów przyjęto na podstawie pomiarów w wykopach badawczych oraz po uwzględnieniu masy dowożonych odpadów balastowych. Przyjęte do obliczeń parametry geotechniczne zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry geotechniczne do analizy stateczności składowiska Radiowo [Koda 2011]
Table 2. Geotechnical parameters for stability analyses of the landfill slopes [Koda 2011]

Rodzaj warstwy Type of layer	γ [kN·m ⁻³]	φ° [°]	c' [kPa]
Odpady świeże (uśrednione) New waste (averaged)	11,0	22	25
Odpady stare (uśrednione) Old waste (averaged)	14,0	22	26
Podłoże gruntowe Subsoil	18,5	31	0
Podłoże gruntowe (namuły) Subsoil (muds)	17,5	20	10

WYNIKI I OMÓWIENIE

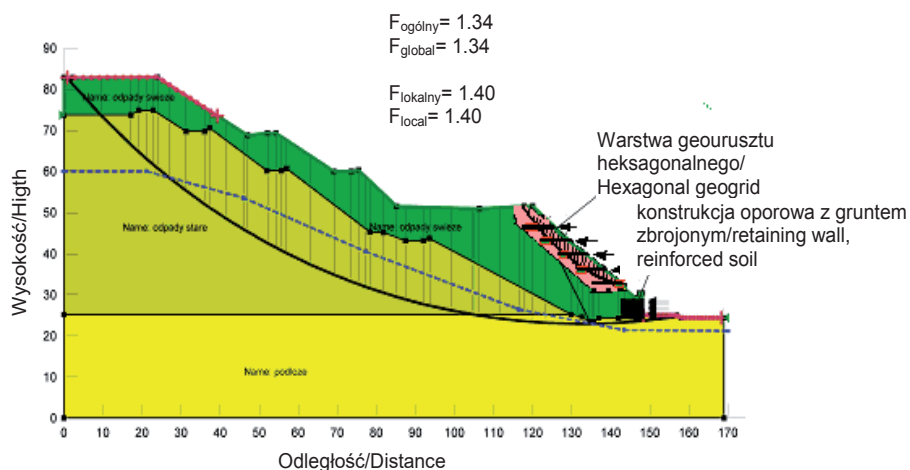
W celu wyznaczenia parametrów geotechnicznych odpadów wbudowanych w skarpe składowiska wzmocnioną georusztem i określenia warunków geotechnicznych podłoża składowiska przeprowadzono szereg badań geotechnicznych niezbędnych do analizy stateczności i opracowania projektu budowlanego [Koda i in. 2012]. Ponadto do wyznaczenia przydatności odpadów pod wykonanie projektowanej trasy narciarskiej wykonane zostały badania ich stanu zagęszczenia. Badania te stanowiły sondowania WST przeprowadzone sondą wkręcaną do głębokości maksymalnej 5 m lub do napotkania przeszkody. W sumie na całym składowisku wykonano kilkaset sondowań. Uzyskane wyniki kontrolnych badań zagęszczenia odpadów wskazały na zróżnicowany stan zagęszczania zdeponowanych odpadów, a lokalnie stwierdzono również warstwy odpadów w stanie luźnym. W wyniku wykonanych badań i analiz zalecono zastosowanie wzmocnień poziomych skarpy w postaci georusztu w południowo-wschodnim narożu składowiska, w jego wyższych partiach, nad konstrukcją oporową. Wykonane obliczenia stateczności miały na celu sprawdzenie ogólnego stanu bezpieczeństwa składowiska w trakcie eksploatacji i późniejszego użytkowania po zamknięciu. Geometrię skarpy w wytypowanym przekroju obliczeniowym przyjęto na podstawie danych z mapy sytuacyjno-wysokościowej i dodatkowych pomiarów geodezyjnych. Wytypowany przekrój przechodzi przez łuk stoku narciarskiego w miejscu, gdzie dodatkowo zaprojektowano konstrukcję oporową z gruntem zbrojonym geotkaniną [Koda i in. 2015]. Ponadto w celu stabilizacji materiału

odpadowego wbudowanego bezpośrednio pod trasą zjazdową zastosowano wyżej opisaną warstwę georusztu heksagonalnego. Dla tak zaprojektowanej i realizowanej skarpy (rys. 4) wykonane zostały obliczenia stateczności.



Rys. 4. Stabilizacja skarpy składowiska nad konstrukcją oporową georusztem heksagonalnym
Fig. 4. Hexagonal geogrid stabilization of slope above the retaining structure

Do analizy stateczności wykorzystano metodę Bishopa przy zastosowaniu programu GEO-SLOPE. Zastosowana metoda analizy zakłada potencjalną utratę stateczności wzdłuż cylindrycznej powierzchni poślizgu i uwzględnia wzajemne oddziaływania międzypaskowe, co odpowiada specyficie odpadów składających się m.in. z elementów stanowiących rodzaj „zbrojenia” wewnętrznego. W analizowanym przekroju obliczeniowym (rys. 5) konstrukcja zabezpieczająca skarpy składała się z muru oporowego (długości ponad 100 m i wysokości prawie 6 m) i gruntu zbrojonego geotkaniną oraz wzmocnienia



Rys. 5. Analiza stateczności skarpy składowiska z uwzględnieniem zastosowanych wzmocnień [Koda i Szczypior 2016]

Fig. 5. Analysis of the slope stability in the cross section passing the applied reinforcements [Koda and Szczypior 2016]

georusztem heksagonalnym. Stateczność lokalna skarpy w rejonie zabezpieczenia murem oporowym z prefabrykatów betonowych i wzmocnienia skarpy georusztem wynosi $F_{\text{lokalny}} = 1,40$, natomiast wartość współczynnika ogólnego – $F_{\text{ogólny}} = 1,34$ (rys. 5). Dla składowisk odpadów wartość $F_{\text{min}} = 1,3$ przyjmuje się jako bezpieczną dla zachowania stabilności skarp [Jessberger (red.) 1993, Koda 2011].

PODSUMOWANIE

Analiza wytypowanego przekroju pozwoliła stwierdzić, iż głównym czynnikiem odpowiadającym za poprawę warunków stateczności skarpy jest konstrukcja oporowa, na którą składa się mur wykonany z betonowych prefabrykatów i gruntu zbrojonego geotkaniną. Zastosowanie georusztu heksagonalnego miało na celu wzmocnienie skarpy nad konstrukcją oporową oraz stabilizację podłoża pod realizowaną trasę narciarską.

Elementem analizy stateczności skarp składowiska jest odpowiedni dobór parametrów geotechnicznych. Określenie parametrów geotechnicznych odpadów może być przeprowadzone z wykorzystaniem technik badań stosowanych w geotechnice oraz badań modelowych i analizy wstecznej. Wyniki sondowań kontrolnych składowanych odpadów wskazują na zróżnicowany stan zagęszczenia. Lokalnie stwierdzono warstwy odpadów w stanie luźnym. Wynika to prawdopodobnie ze zróżnicowania rodzajów i stanu wbudowywanych odpadów, w tym ich uziarnienia.

Analiza stateczności skarp składowiska wskazuje na wystarczający zapas bezpieczeństwa geotechnicznego. Geometria skarpy w pozostałych analizowanych przekrojach nie ulegnie zmianie, obecnie prowadzony jest na nich monitoring przemieszczeń. Porównanie bieżących wyników analizy stateczności z obliczeniami z lat ubiegłych wykazuje, że wartość współczynnika stateczności w rozpatrywanych przekrojach obliczeniowych wzrosła. W przekroju obliczeniowym w strefie analizowanego zabezpieczenia skarpy uzyskano wartość współczynnika stateczności lokalnej $F_{\text{lokalny}} = 1,40$, natomiast współczynnik stateczności ogólnej wyniósł $F_{\text{ogólny}} = 1,34$. W związku z uzyskanymi wartościami skarpe należy uznać za bezpieczną pod względem geotechnicznym.

PIŚMIENNICTWO

- Christensen, T.H., Cossu, R., Stegmann, R., ed. (1994). Landfilling of waste: Barriers. E&FN SPON, London.
- EOTA TR 41 (2012). Non-reinforcing hexagonal geogrid for the stabilization of unbound granular layers by way of interlock with the aggregate. European Organization for Technical Approvals, Brussel.
- Gołos, M. (2014). Georuszty heksagonalne Tensar TriAx w funkcji stabilizacji. *Geoinżynieria: Drogi, Mosty, Tunele*, 2, 60–61.
- Gołos, M. (2015). Georuszty heksagonalne stosowane do stabilizacji warstw kruszywa niezwiązanego w nawierzchniach drogowych. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, marzec-kwiecień, 58–60.

- Jessberger, H.L., Kockel, R. (1991). Mechanical Properties of Waste Materials. Conferenze di geotecnica di Torino La Ingegneria geotecnica nella savaguarida e recupero del terriotrio. Torino, 315–322.
- Jessberger, H.L., Kockel, R. (1993). Determination and assessment of the mechanical properties of waste materials. Proceedings of the Conference. Geotechnics Related to the Environmental, Waste Disposal by Landfill, Bolton, 313–322.
- Jessberger, H.L., ed. (1993). Geotechnics of Landfill Design and Remedial Works – Technical Recommendation GLR. Ernst & Sohn, Berlin.
- Judycki, J. (2005). Rola geosiatek Tensor przy wzmocnieniu słabych podłoży gruntowych pod nawierzchniami ulepszonymi. Magazyn Autostrady, 1–2, 44–49.
- Kawalec, J. (2012). Możliwości wykorzystania georusztów dla celów racjonalizacji kosztów budowy i utrzymania infrastruktury kolejowej. Zeszyty Naukowo-Techniczne SIKT RP, Oddział w Krakowie, Kraków, 191–202.
- Kawalec, J. (2014). Zastosowanie georusztów do stabilizacji podtorza w rejonie skrzyżowań. Przegląd Komunikacyjny, 7, 5–8.
- Kawalec, J. (2015). Jak należy porównywać efektywność zastosowania georusztów wykorzystywanych do stabilizacji ziaren kruszywa niezwiązanych chemicznie? Inżynieria Morska i Geotechnika, 1, 33–39.
- Koda, E. (2011). Stateczność rekultywowanych składowisk odpadów i migracja zanieczyszczeń przy wykorzystaniu metody obserwacyjnej. Rozprawy Naukowe i Monografie, 384. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Koda, E., Szczypior, J. (2016). Nadzór geotechniczny nad rekultywacją składowiska opadów w Radiowie. Sprawozdanie za okres I VI 2016. Geoteko, Warszawa.
- Koda, E., Fołtyn, P., Laskowski, M. (2012). Projekt budowlany zamienny rekultywacji składowiska odsiewów balastowych Radiowo z kierunkiem rekultywacji jako stok narciarski – Etap I. Geoteko, Warszawa.
- Koda, E., Miszkowska, A., Osiński, P., Pitera, P. (2015). Analiza stateczności skarpy składowiska wzmocnionej konstrukcją oporową z gruntem zbrojonym. Wybrane zagadnienia konstrukcji i materiałów budowlanych oraz geotechniki. Red. A. Podhorecki. Wydawnictwo Uczelniane UTP w Bydgoszczy, Bydgoszcz, 245–252.
- Monaserro, M., Van Impe, W.F., Bouazza, A. (1996). Waste disposal and containment. Proceedings of the 2nd International Congress on Enviromental Geotechnics, Osaka, 3, 1425–1475.
- Pielichowski, J., Puszyński, A. (1998). Technologia tworzyw sztucznych. WNT, Warszawa.
- Saechtling, H. (2000). Tworzywa sztuczne – poradnik. WNT, Warszawa.
- Żuchowska, D. (1995). Polimery konstrukcyjne. Wprowadzenie do technologii stosowania. WNT, Warszawa.

STABILIZATION BY HEXAGONAL GEOGRID OF SKI SLOPE'S SUBSOIL ON THE LANDFILL

Abstract. The paper present the assessment of geotechnical parameters and stability analyses of a landfill slope reinforced with hexagonal geogrid (triaxial geogrid). The structure of ribs in hexagonal geogrids is based on equilateral triangle shape, what assures the equilibrium of stress distribution, different to commonly used single or double axial geogrids. The structure of hexagonal geogrids provides high strength and stiffness in all directions and stabilizes the ski slope subsoil. The numerical stability analyses were conducted using classic limit equilibrium method (Bishop method).

Key words: hexagonal geogrid, stabilization, anthropogenic soils, landfills

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 31.08.2016

Cytowanie: Koda, E., Osiński, P., Kiersnowska, A., Kawalec, J. (2016). Stabilizacja georusztem heksagonalnym podłoża pod trasę narciarską na składowisku. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 15 (4), 185–194.