

Wpływ zagęszczenia górnej warstwy nasypu drogowego na dogęszczenie warstw zalegających poniżej

Dr inż. Łukasz Aleksander Kumor¹⁾, mgr inż. Monika Skorupińska²⁾

¹⁾Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

²⁾SKORBUD Zygmunt Skorupiński i wspólnicy Spółka Jawna z siedzibą w Bydgoszczy

Rozwój współczesnych miast i budowa infrastruktury towarzyszącej tylko w ograniczonym zakresie umożliwiają wybór dogodnej lokalizacji dla nowych budynków z uwzględnieniem korzystnych warunków gruntowych. Konstruktorzy i geotechnicy zmuszeni są przygotowywać podłoże do nowych wymagań

geotechnicznych. Dotyczy to komercyjnie atrakcyjnych działek znajdujących się zazwyczaj w miejscach, które są „trudne” pod względem geologiczno-inżynierskim. Wymusza to poszukiwanie nowych technologii i metod [1, 6], a także zmianę sposobu myślenia wśród inżynierów, którzy muszą sprostać interdyscyplinar-

nemu charakterowi swojej specjalności. Dodatkową trudnością, w rozwiązywaniu współczesnych problemów inżynierii geotechnicznej jest coraz bardziej agresywna optymalizacja kosztów.

Autorzy pracy, którzy analizowali problem [2, 3] wielowarstwowego nasypu (*sandwich*) będącego w rzeczywistości formacją oddzielnie ułożonych kilku warstw gruntu w nasypie budowlanym, zaproponowali następującą tezę:

„W celu uzyskania wymaganych parametrów geotechnicznych podczas budowy nasypu z gruntu niespoistego nie jest konieczne, aby zagęszczanie każdej nowo wbudowanej warstwy odpowiadało maksymalnej wymaganej wartości liczbowej odbiorowego parametru zagęszczenia, ponieważ każda nowa warstwa dodana powyżej powoduje zagęszczenie niższej, spągowej warstwy.”

W artykule przedstawiono zakres wykonywanych dalszych badań nad problemem [4, 5] obejmujących następujące prace:

- dobór i wdrożenie metod badawczych, a także identyfikacja parametrów brzegowych,
- wybór materiałów nasypowych, określenie technologii formowania nasypu,
- opis wymaganych parametrów geotechnicznych z badań terenowych, istotnych w praktycznych rozwiązaniach,
- analizę parametrów materiału zastosowanego do formowania nasypu budowlanego określonych z bezpośrednich i pośrednich pomiarów,
- analizę wyników badań geotechnicznych kolejno wbudowanych warstw spągowych,
- analizę, prezentację i podsumowanie wniosków geotechnicznych, wynikających z analizy wyników wykonanych prób i analizy matematycznej,
- preferencję i warunki zastosowania sprawdzonej technologii warstwowego zagęszczania materiału gruntowego do prac ziemnych proponowanej do praktycznego wykorzystania w geoinżynierii.

Prowadzone badania analityczne i weryfikacja terenowa wskazują, że warstwa wbudowana w nasyp jest dodatkowo zagęszczana w wyniku zagęszczenia każdej kolejnej nadbudowanej warstwy [1]. Z punktu widzenia praktyki wykonawczej ważne jest rozważenie, na etapie projektowania i formowania nasypów, znacznego i korzystnego efektu dodatkowego wzmocnienia podczas zagęszczania warstw już ukształtowanego nasypu [5]. Na podstawie wyników badań terenowych przedstawiono w artykule rezultaty potwierdzające rzeczywisty wpływ dodatkowego zagęszczania dolnych warstw nasypu wraz z matematyczną analizą istotności osiągnięcia efektu dogęszczenia.

CHARAKTERYSTYKA OBSZARU BADAWCZEGO

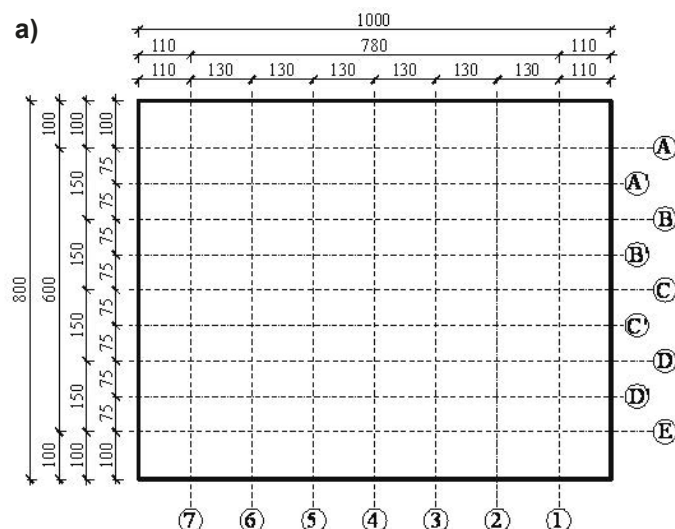
W przypadku konieczności przygotowania szczegółowej metodyki i pełnego programu badań formowania nasypu budowlanego należy wykonać odpowiednie badanie geotechniczne podłoża, określając właściwości materiałów i cechy fizyko-mechaniczne materiału nasypowego [2, 5, 6].

Analizując wyniki badań wstępnych [1], zidentyfikowano główne czynniki określające zakres i metodę identyfikacji, wynikające z przyjętego programu badań, w tym:

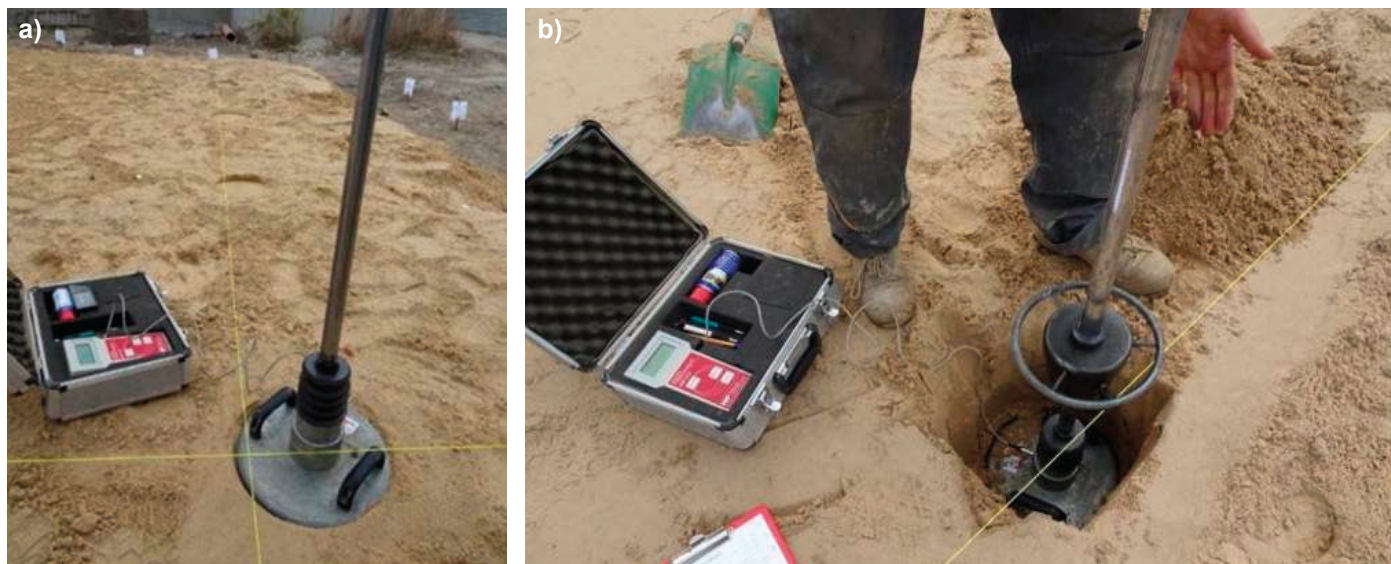
- wytyczne geotechniczne odnośnie do materiału i warunków brzegowych obiektu zaprojektowanego na nasypie,
- kryteria oceny i projektowane wymagane wartości parametrów mechanicznych nasypu,
- dobór naturalnego lub zaprojektowanie składu granulometrycznego właściwego kruszywa do budowy nasypu,
- przygotowywanie indywidualnej właściwej technologii wykonywania kolejno wbudowanych warstw nasypu,
- dostęp do zaawansowanych technologii i metod badań parametrów mechanicznych w warunkach *in-situ*,
- możliwie krótki czas wykonania i łatwość prowadzenia na bieżąco stałej kontroli jakości wykonywanych prac geotechnicznych.

Czynniki te określają zakres niezbędnych badań i metodę wykonywania robót ziemnych oraz warunkują technikę wykonywania nasypów wielowarstwowych bez uprzedniego zagęszczenia nowo wybudowanej warstwy. Gwarantują także uzyskanie w sposób racjonalny maksymalnego stopnia zagęszczenia, to jest stanu wymaganego z punktu widzenia celu projektu.

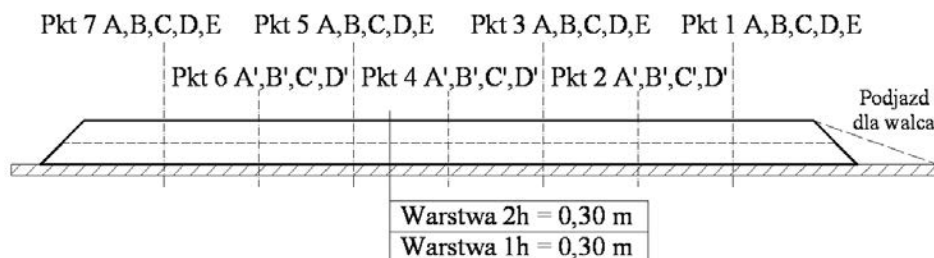
Na podstawie wyników własnych studiów [1, 2, 3, 4] i ogólnych wytycznych Eurokodu 7 [5, 7, 8, 9, 10, 11] przyjęto założenie, że w przypadku stosowania zasypowego materiału równoziarnistego ($C_u < 5$) o wskaźniku jednorodności według Hazena $C_u = 3,9$, to jest żwiru i piasku, pożądana wartość liczbowa



Rys. 1. Przykładowe poletko doświadczalne – przygotowanie:
a) szkic układu (wymiały wyrażone w cm); b) zdjęcie podziału



Rys. 2. Przykładowe poletko badawcze – prace i pomiary w toku:
a) etap pierwszej warstwy; b) etap drugiej warstwy



Rys. 3. Przekrój podłużny przez nasyp testowy wraz z zaznaczeniem poszczególnych warstw

modułu dynamicznego odkształcenia E_{vd} , powinna oscylować wokół wartości $E_{vd} \approx 35$ MPa.

Na poligonie testowym przygotowano poletko eksperymentalne (rys. 1 i 2) w celu określenia wskaźników technologicznych, to jest wymaganej minimalnej liczby przejazdów maszyny zagęszczającej – n , mających wpływ na przyspieszenie prac związanych z zagęszczaniem oraz oczekiwanym obniżeniem kosztów eksploatacji sprzętu i pracy osób, przy utrzymaniu wymaganej jakości geotechnicznej nowego nasypu.

Nasyp doświadczalny (rys. 3) podzielono na kilka warstw (maksymalna miąższość $h = 30$ cm), które zagęszczono odpowiednio do wymaganej wartości liczbowej modułu dynamicznego odkształcenia E_{vd} . W każdej formowanej warstwie przeprowadzono minimum $N = 20$ testów oznaczenia modułu dynamicznego odkształcenia, w odległości $l = 1,5$ m od przedniego stanowiska badawczego.

METODOLOGIA I PLAN BADAŃ

Materiał nasypowy

Podstawowymi kryteriami wyboru materiału są:

- parametry C_U i wskaźnik krzywizny uziarnienia – C_C , charakteryzujące właściwości granulometryczne i ocenę zdolności stosowanego gruntu do zagęszczenia,

- parametr ρ_{ds} – określanie jakości kruszywa i regularności uziarnienia,
- parametr $w_n \approx w_{opt}$ – możliwość utrzymywania stałej wilgotności gruntu w warstwie wbudowywanej,
- standardowe metody kontroli wielkości wskaźników zagęszczenia, np. E_{vd} , ρ_{ds} , w_n , w_{opt} ,
- właściwości fizyczne stosowanego materiału związane z procesem przemarzania,
- dostępność gruntu o dobrej i powtarzalnej jakości,
- efektywna technologia budowy nasypu – wybór odpowiedniego rodzaju sprzętu stosowanego do zagęszczania oraz systemu kontroli bieżącej parametrów pracy,
- czynnik ekonomiczny – niski koszt, kluczowy dla inwestora.

Przeprowadzono wstępne, kwalifikujące badania laboratoryjne przydatności gruntów obejmujące analizę granulometryczną oraz badanie metodą Proctora. Wyniki uzyskanych parametrów fizycznych przedstawiono w tabl. 1.

Tabl. 1. Wyniki przeprowadzonych badań

Lp.	Parametry i cechy fizyczne							
	C_U [–]	C_C [–]	k_{10} [10 ⁻⁴ m/s]	d_{10} [mm]	d_{30} [mm]	d_{60} [mm]	ρ_{ds} [Mg/m ³]	w_{opt} [%]
1.	3,90	0,80	3,70	0,179	0,320	0,690	1,868	10,87

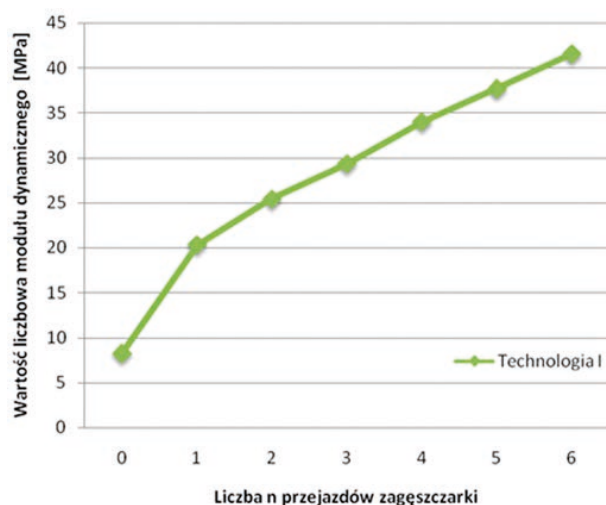
Według PN-EN 1997-2:2009 grunty gruboziarniste dzielą się na źle uziarnione ($C_u \leq 6$) oraz dobrze uziarnione ($6 \leq C_u \leq 15$). Piaski są źle uziarnione, jeśli $C_u \leq 3$ i dobrze uziarnione, jeśli $C_u > 6$.

Biorąc pod uwagę pozytywne wyniki geotechnicznej przydatności gruntu i możliwość dostarczenia pożądanej objętości o regularnym rozkładzie wielkości ziaren, materiał nasypowy ze złoża został zatwierdzony przez Inwestora i wykorzystany do budowy nasypu testowego, a następnie nasypu głównego.

Realizacja budowy nasypu ziemnego

Ostateczny projekt wykonawczy nasypu zrealizowano na przygotowanym poletku doświadczalnym, po uwzględnieniu przyjętych warunków brzegowych i zgodnie z doświadczeniami własnymi [2, 3 i 4] oraz zasadami formowania nasypu [5]:

- warstwowa konstrukcja nasypu budowlanego (*sandwich*) z grubością pojedynczej warstwy nasypowej $h = 0,3$ m,
- materiał nasypowy – kruszywo, frakcja $0 \div 4$ mm,
- zagęszczanie mechaniczne przy użyciu zagęszczarki płytowej o masie 500 kg,
- weryfikacja parametrów mechanicznych, w każdej warstwie co najmniej 1 test na 1000 m^2 ,
- odbiorowe parametry zagęszczenia nasypu przyjęto w następujący sposób:
 - $I_s \geq 0,95$; w strefie od 1,0 do 2,0 m,
 - $I_s \geq 0,97$; w strefie od 0,2 do 1,0 m,
 - $I_s \geq 1,00$; w strefie od 0,0 do 0,2 m,
- badanie miar zagęszczenia nasypu przy użyciu metod terenowych w odniesieniu do skalibrowanych bezpośrednich metod laboratoryjnych i pośrednich metod terenowych,
- możliwość budowy nasypu metodą warstwową, tzn. nieosiągnięcie pełnej wymaganej wartości parametru w zagęszczanej warstwie – dolna warstwa osiąga wymagany parametr po zagęszczeniu następnej warstwy.



Rys. 4. Wzrost wartości modułu dynamicznego, w technologii zagęszczenia nr I, gładkiego walca o masie 500 kg

Przykłady wyników badania wzrostu wartości modułu dynamicznego odkształcenia E_{vd} , w zależności od liczby przejazdów zagęszczarki wibracyjnej – n , według wybranej technologii, kolejne przejazdy wyłącznie dynamiczne [1, 2], przedstawiono na rys. 4.

Właściwą wilgotność wbudowywanego kruszywa określono przy użyciu metody *Proctora* i wyniosła $w_{opt} \approx 11,00\%$. Gdy grunt wykazywał zbyt niską wilgotność w , dodawano do niego odpowiednią objętość wody w celu uzyskania wartości wilgotności bliskiej optymalnej w_{opt} .

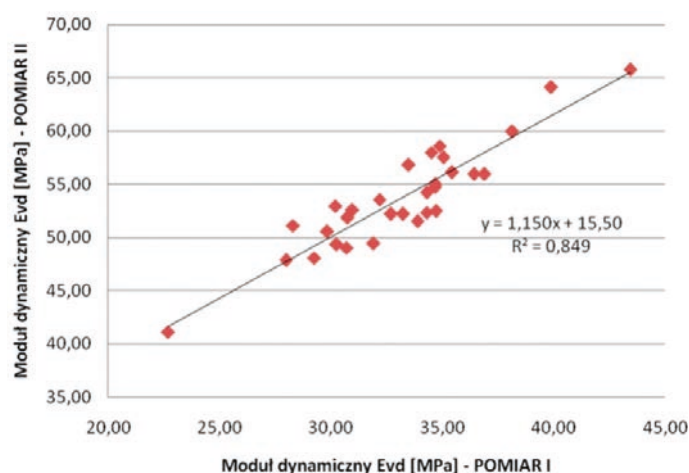
WYNIKI I ANALIZY BADAŃ TERENOWYCH

Na podstawie wyników bezpośrednich pomiarów stanu zagęszczenia przeprowadzono analizę statystyczną badanych końcowych związków fizycznych. Celem tej analizy była weryfikacja i poszukiwanie sformalizowanych relacji w stosunku do sformułowanej hipotezy badawczej, tzn. osiągnięcie wyznaczonych parametrów mechanicznych zagęszczenia wielowarstwowego nasypu jest możliwe bez konieczności maksymalnego zagęszczenia każdej warstwy do projektowo wyznaczonej minimalnej wartości E_{vd} .

Analiza statystyczna obejmowała:

- określenie minimalnej liczebności próby – n_{min} ,
- badanie struktury populacji (wartość średnia, wariancja i odchylenie standardowe),
- określenie rodzaju funkcji,
- określenie maksymalnego błędu obliczeniowego,
- przeprowadzanie badań istotności otrzymanych wartości średnich,
- przeprowadzanie testów współczynnika korelacji – r .

Wyniki badania modułu dynamicznego odkształcenia E_{vd} w warstwie przed i po zagęszczeniu przedstawiono na rys. 5, określając również związek matematyczny między modułem dynamicznym przed i po zagęszczeniu, a także współczynnik korelacji.



Rys. 5. Zależność modułu dynamicznego odkształcenia E_{vd} w warstwie przed i po zagęszczeniu

Tabl. 2. Parametry statystyczne eksperymentu wykorzystane do analizy

Lp.	Nazwa parametru	Symbol	Wartość parametru E_{vd} POMIAR I (przed dogęszczeniem)	Wartość parametru E_{vd} POMIAR II (po dogęszczeniu)
1	Średnia arytmetyczna	$\bar{x}$	33,19 MPa	53,70 MPa
2	Odchylenie standardowe	$\hat{s}$	3,92	4,90
3	Wariancja	$\hat{s}^2$	15,41	24,02
4	Współczynnik korelacji	r	0,92	

W tabl. 2. przedstawiono charakterystyczne wartości wyników pomiarów modułu dynamicznego odkształcenia E_{vd} w warstwie nasypowej o grubości $h = 30$ cm, przed jej zagęszczeniem (pomiar I) oraz po jej dogęszczeniu przez kolejną nadbudowaną nową warstwę (pomiar II).

W dalszych badaniach skoncentrowano się na danych wynikających z jakościowych wymogów geotechnicznych:

- przyjęto, że wartość oczekiwana parametru zagęszczenia to projektowana $E_{vd} = 30$ MPa,
- wartość dopuszczalnego błędu w pomiarach $\Delta = \pm 2,0$ MPa,
- poziom współczynnika ufności $\alpha = 0,95$.

Zgodnie z zaleceniami polskich norm [8, 9] i Eurokodu 7 [7, 10, 11] w poszczególnych warstwach nasypu zaprojektowano wymaganą wartość wskaźnika zagęszczenia I_s . Na potrzeby kontroli jakości robót i oceny stanu zagęszczenia nasypu określono korelację pomiędzy wskaźnikiem zagęszczenia I_s a modułem dynamicznego odkształcenia E_{vd} . Weryfikację korelacji pomiędzy parametrami zagęszczenia warstwy przed i po wykonaniu dodatkowego dogęszczenia określono przez zastosowanie następującej funkcji liniowej [3]:

$$y = 1,150 x + 15,50 \quad (1)$$

gdzie:

$y - E_{vd}$ moduł dynamiczny odkształcenia warstwy końcowej, po dodatkowym zagęszczeniu,

$x - E_{vd}$ moduł dynamiczny odkształcenia warstwy początkowej, przed dogęszczeniem.

Funkcja empiryczna (1) umożliwia określenie wymaganej minimalnej wartości modułu dynamicznego odkształcenia E_{vd} warstwy przed dodatkowym zagęszczaniem w taki sposób, aby zapewnić spełnienie wymaganego warunku uzyskania referencyjnej wartości parametru stanu zagęszczenia, poprzez wykonanie i dogęszczenie warstwami następnymi, wbudowywanymi wyżej.

Zgodnie z krajowymi normami i przepisami Eurokodu 7 [5, 7, 8, 9, 10, 11] podłoże należy zagęszczać do wartości wynoszącej co najmniej $I_s = 0,95$, co odpowiada wartości $E_{vd} = 15$ MPa. Aby spełnić warunek empirycznej funkcji liniowej opisanej wzorem (1) w kolejnych warstwach nasypu, to jest uzyskanie wymaganego wskaźnika zagęszczenia $I_s > 0,97$, gwarantowana wartość modułu dynamicznego odkształcenia przed dodatkowym dogęszczeniem nie powinna być mniejsza niż $E_{vd} > 30$ MPa.

UWAGI KOŃCOWE

Budowa nasypów wielowarstwowych z rodzimych gruntów mineralnych jest bardzo złożonym i wieloetapowym procesem geotechnicznym. Wpływ na to ma wiele czynników zależnych od rodzaju wbudowanego gruntu, wyboru technologii zagęszczania i właściwych decyzji bezpośredniego wykonawcy.

Wyniki badań terenowych i ich analiza wskazują, że podczas formowania nasypów budowlanych można korzystać z określonych związków empirycznych (wzór 1). W praktyce empiryczna zależność oznacza, że nie ma uzasadnienia do twierdzenia, że każda nowo wbudowana warstwa gruntu niespoistego o określonej grubości powinna osiągnąć 100% miary zaprojektowanego zagęszczenia, np.: modułu odkształcenia pierwotnego E_1 , modułu odkształcenia wtórnego E_2 lub wskaźnika odkształcenia I_s , modułu dynamicznego odkształcenia E_{vd} . W tych warunkach praktyczna weryfikacja prawidłowości budowy nasypu ziemnego staje się prostsza i jednoznaczna w ocenie rzeczywistego zagęszczenia końcowego nasypu wielowarstwowego.

Wyniki i wnioski z przedstawionych badań terenowych umożliwiają określenie istotnych uogólnień geotechnicznych dotyczących kształtowania podobnych nasypów:

- istnieje istotny wpływ zagęszczania kolejnej warstwy nasypu na dodatkowe zagęszczenie wbudowanych wcześniej warstw, niezależnie od użytego materiału [1, 2, 3, 4],
- praktycznym rozwiązaniem, nie tylko pod względem kosztów, jest budowa wysokich nasypów przy użyciu kontrolowanego efektu dodatkowego zagęszczania warstw spągowych,
- w praktyce głównym warunkiem jest wcześniejsze określenie korelacji pomiędzy parametrami zagęszczenia, np.: $I_s = f(E_{vd})$, $E_{vd} = f(E_{vd0})$ przy odpowiednio wysokim znaczeniu statystycznym w warunkach pola badawczego,
- budowa nasypów wielowarstwowych jest możliwa bez konieczności zagęszczania każdej wbudowanej niższej warstwy do 100% wartości parametru odbiorowego wymaganego przez projekt geotechniczny, to jest modułu odkształcenia wtórnego E_2 lub wskaźnika odkształcenia I_s w kolejno formowanych warstwach zasypowych.

LITERATURA

1. Kumor Ł. A.: Analiza wpływu zagęszczania kolejnych warstw zasypowych na stan nasypu budowlanego; Rozprawa doktorska; Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska UTP Bydgoszcz, 2014.
2. Kumor Ł. A., Kumor M. K.: Changes in mechanical parameters of soil, considering the effect of additional compaction of embankment; Proceedings of 6th Transport Research Arena; April 18-21, 2016, Warsaw, 10741.
3. Kumor Ł. A., Kumor M. K., Kopka M.: Geotechnical parameters of soil, considering the effect of additional compaction of embankment; Elsevier Procedia Engineering 189 (2017), 291-297.
4. Kumor Ł. A., Meyer Z.: Analiza zmian parametrów mechanicznych gruntów budujących nasypy przy uwzględnieniu efektu dogęszczenia; Inżynieria Morska i Geotechnika 2016; p-ISSN: 0867-4299.

5. Sulewska M. J.: Analysis of quality control results of load capacity of embankments using load plates. [W:] Soil parameters from in situ and laboratory tests. 4th International Workshop. Wyd. Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, 2010, 535-543.
6. Zadroga B.: Methodology of determination of geotechnical parameters for non-cohesive soils based on dynamic and static penetration test. [W:] Soil parameters from in situ and laboratory tests. 4th International Workshop. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, 2010, 543-551.
7. Eurokod 7 (EC 7, EN 1997-1-2): Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne. Część 2: Rozpoznawanie i badanie podłoża gruntowego.
8. PN-88/B-04481. Grunty budowlane. Badanie próbek gruntów.
9. PN-B-06050:1999. Geotechnika. Roboty ziemne. Wymagania ogólne.
10. PN-EN ISO 14688-1:2006. Badania geotechniczne. Oznaczenia i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Oznaczanie i opis, z poprawkami.
11. PN-EN ISO 14688-2:2006. Badania geotechniczne. Oznaczenia i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania, z poprawkami.