

Analiza zmian parametrów mechanicznych gruntów budujących nasypy przy uwzględnieniu efektu dogęszczenia

Dr inż. Łukasz Aleksander Kumor¹, prof. dr hab. inż. Zygmunt Meyer²

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

²Zachodniopomorski Uniwersytet Techniczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury

Wraz z wzrostem kubatury wykonywanych robót ziemnych pojawiły się nowe problemy techniczne związane zarówno z projektowaniem, jak i osiągnięciem docelowych parametrów geotechnicznych gruntów [1, 2]. Podstawową budowlą ziemną jest nasyp budowlany, w którym zasadniczą kwestią przy jego formowaniu jest:

- dobór odpowiedniego materiału zasypowego,
- zaprojektowanie wartości parametrów mechanicznych zapewniających bezpieczną pracę budowli ziemnej ze względu na stateczność i odkształcalność,
- realizacja budowli ziemnej zgodnie ze sztuką inżynierską,
- kontrola *in-situ* uzyskanych parametrów geotechnicznych w odniesieniu do wartości zaprojektowanych.

W technologii budowy wielowarstwowych nasypów budowlanych zakłada się stosowanie podstawowych zasad technicznych:

- nasyp należy wykonywać metodą warstwową, gdzie grubość pojedynczej warstwy zasypowej powinna być dostosowana do sprzętu zagęszczającego, umożliwiającego uzyskanie odpowiednich parametrów gruntu,
- wbudowanie kolejnej warstwy zasypowej nasypu powinno nastąpić po uprzednim osiągnięciu projektowanych wartości parametrów mechanicznych warstwy poprzedniej.

Z zasad tych wynika prawidłowość, że formowanie nasypów typu *sandwich* należy wykonywać sukcesywnie warstwami. Każda kolejna warstwa nasypu może być formowana dopiero wtedy, gdy będą osiągnięte zaprojektowane parametry mechaniczne warstwy niższej (spągowej). Przeprowadzone badania analityczne i terenowe wskazują, że zagęszczenie warstw głębszych gruntu zasypowego zwiększa się również w trakcie wykonywania warstw formowanych wyżej [1, 2]. W związku z tym efekt końcowy zagęszczenia nasypu należy, projektując technologię, uwzględniać łącznie z wpływem dogęszczenia poszczególnych warstw. Badania poligonowe [1] dowodzą, że właściwe jest stwierdzenie w przypadku budowy nasypów z kruszywa mineralnego, że *nie ma geotechnicznej konieczności zagęszczenia*

każdej nowo wbudowywanej warstwy materiału, do uzyskania pełnej wartości zaprojektowanej miary zagęszczenia, bowiem każda następna wbudowywana warstwa dogęszcza ułożoną wcześniej warstwę spągową materiału zasypowego.

CHARAKTERYSTYKA POLIGONU DOŚWIADCZALNEGO

Poligon doświadczalny stanowił nasyp ziemny pod projektowany obiekt – silos na klinkier o pojemności odpowiadającej masie składowanego materiału 200 tys. ton, który był realizowany na terenie cementowni. Wykop pod silos powstał w wyniku rozbiórki starych fundamentów pieców obrotowych, do poziomu gruntu rodzimego. Po zakończeniu prac rozbiórkowych w miejscu lokalizowanego silosu powstało wyrobisko osiągające miejscami głębokość – 9,0 m p.p.t., które przeznaczono do wypełnienia. Wykonano w nim nasyp budowlany, który stanowił podłoże gruntowe nowo projektowanego silosu. W planie silos miał kształt walca o średnicy około $D = 70$ m oraz wysokość $H = 37$ m. Posadowienie płaszcza silosu zaprojektowano jako pośrednie w postaci pali wierconych, które były wy-



Rys. 1. Widok poligonu doświadczalnego w kierunku maksymalnej głębokości wyrobiska

konywane z poziomu nasypu ziemnego od rzędnej – 1,0 m p.p.t. Płytę denną silosu zaprojektowano w technologii monolitycznej żelbetowej posadowionej bezpośrednio na nasypie budowlanym. Nasyp stanowił jednocześnie poligon badawczy w skali 1:1. Wymiary geometryczne wykopu – rys. 1, pod projektowany nasyp wynosiły:

- średnica $D \approx 70,0$ m,
- głębokość/wysokość $H_1 = -10,0$ m, $H_2 = -4,0$ m,
- objętość $V = 16\,500$ m³.

METODYKA I PROGRAM BADAŃ

Materiał zasypowy

Do podstawowych kryteriów, którymi kierowano się przy wyborze materiału zasypowego zaliczono:

- właściwości granulometryczne kruszywa – parametry C_u i C_c ,
- jakość kruszywa i jego niezmiennosc uziarnienia – parametr p_{ds} ,
- możliwości ciągłego dostarczenia kruszywa o stałej wilgotności – parametr $w_n \approx w_{opt}$,
- metody standardowe kontroli miar zagęszczenia materiału polowe i laboratoryjne,
- możliwość zastosowania weryfikujących metod pośrednich w odniesieniu do metod bezpośrednich laboratoryjnych,
- miejsce i głębokość wbudowania kruszywa – kwestia przemarzania gruntu w okresie realizacji,
- warunki pracy kruszywa w nasypie – odporność na korozję chemiczną i mechaniczną oraz trwałość,
- dostępność kruszywa – możliwości technologiczne producenta,
- sprawna technologia formowania nasypu – rodzaj sprzętu do zagęszczenia,
- kryteria ekonomiczne – istotne dla inwestora.

Wykorzystując przepisy normowe [3 ÷ 10], spośród dostępnych żwirowni w rejonie poligonu doświadczalnego wybrano do analizy laboratoryjnej grunty naturalne pochodzące z 6 wyrobisk komercyjnych. Ze względu na fakt bliskości wytwórni kruszyw Kruszywa Wapienne, do badań przeznaczono także materiał „sztuczny”. Jako materiał zasypowy do wykonania nasypu wybrano grunt nr 8. Parametry analizowanych materiałów zestawiono w tabl. 1.

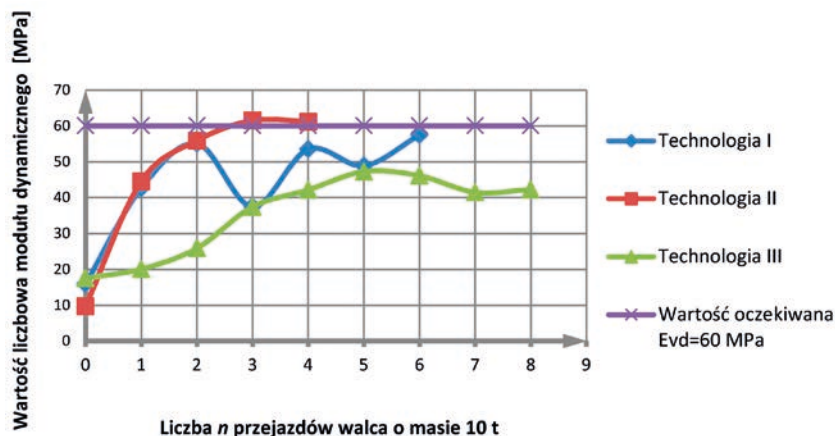
Technologia wykonania nasypu

Na podstawie warunków brzegowych i zasad technicznych formowania nasypów przyjęto następujące założenia do wykonania budowli ziemnej:

- warstwowa budowa nasypu, przy grubości pojedynczej warstwy $h = 0,3$ m,
- materiał zasypowy kruszywo frakcji $0 \div 31,5$ mm – niesort wapienny (II),
- zagęszczenie mechaniczne walcem gładkim o masie 10 ton każdej warstwy tą samą liczbą przejazdów – jedna technologia zagęszczania,
- badanie kontrolne parametrów mechanicznych w każdej warstwie, jedno badanie przypadające na powierzchnię 500 m²,
- odbiorowe parametry mechaniczne przyjęto $E_1 \geq 60$ MPa i $E_2 \geq 120$ MPa przy $I_0 \leq 2,5$ przy $I_s \geq 1,0$,
- badanie miar zagęszczenia nasypu metodami pośrednimi polowymi oraz metodami bezpośrednimi polowymi w odniesieniu do metod laboratoryjnych bezpośrednich,
- możliwość wykonywania metodą warstwową typu *sandwich*, realizacji nasypu przy założeniu nie osiągnięcia wymaganych parametrów na warstwie zagęszczanej – założenie, że warstwa kolejna dogęści warstwę poprzednią (spagową) do wymaganych wartości parametrów,
- analiza zmian zagęszczenia parametrów mechanicznych stropu warstwy zasypowej od jednej i dwóch warstw nadległych.

Tabl. 1. Wyniki badań laboratoryjnych analizowanych materiałów zasypowych

Lp.	Nazwa handlowa materiału	Parametry i cechy fizyczne							
		C_u [–]	C_c [–]	k_{10} [10 ⁻⁴ m/s]	d_{10} [mm]	d_{30} [mm]	d_{60} [mm]	p_{ds} [t/m ³]	w_{opt} [%]
1	Wojdał VII	3,22	1,24	0,25	0,18	0,36	0,58	1,787	4,95
2	Wojdał VIII	2,65	1,33	0,29	0,19	0,36	0,51	1,785	4,93
3	Wojdał X	2,30	1,57	0,39	0,22	0,43	0,52	1,701	4,90
4	Smogorzewo	2,57	0,40	0,02	0,07	0,07	0,18	1,603	9,81
5	Łabiszyn I	2,71	0,96	20,5	1,60	2,10	4,10	1,872	4,23
6	Łabiszyn II	2,71	0,96	0,77	0,31	0,50	0,84	1,872	4,23
7	Niesort wapienny (I)	62,1	1,20	5,7	0,22	1,89	13,8	1,884	4,56
8	Niesort wapienny (II)	21,6	1,30	28	0,48	2,57	10,5	1,949	6,17



Rys. 2. Przyrost modułu dynamicznego w zależności od technologii zagęszczenia

Tabl. 2. Badanie zmian zagęszczenia od rodzaju i liczby przejazdów walca o masie 10 t

Numer badania	Liczba przejazdów walca	E_{vd}	E_1	E_2	I_0	I_s
	[n]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]
1	6	57,40	40,91	140,63	3,44	< 1,0
2	4	61,14	52,22	140,63	2,69	≈ 1,0
3	8	42,21	36,89	93,75	2,54	< 1,0

Przed przystąpieniem do realizacji nasypu wykonano badania sprawdzające *in-situ* z wykorzystaniem płyty dynamicznej HMP-LFG, w celu ustalenia technologii zagęszczania materiału zasypowego. Na podstawie badań wybrano jako stałą technologię nr 2 do realizacji zadania – tabl. 2, rys. 2.

WYNIKI I ANALIZA BADAŃ POLOWYCH

Badania na poligonie doświadczalnym podzielono na trzy etapy, co było spowodowane nieregularnym kształtem poligonu doświadczalnego. Razem wykonano 356 sztuk badań terenowych.

W tabl. 3 przedstawiono przykładowe wyniki badań terenowych.

Zmiana wartości parametrów zagęszczenia

Wyniki badań przedstawiono w ujęciu analizy matematycznej. Wykorzystano analizę regresji w postaci prostej regresji zmian wartości liczbowej – spągowej warstwy zasypowej, pierwotnego modułu odkształcenia E_1 , wtórnego modułu odkształcenia E_2 oraz wskaźnika odkształcenia I_0 po dogęszczeniu jedną nadległą warstwą zasypową, (rys. 3 ÷ 5).

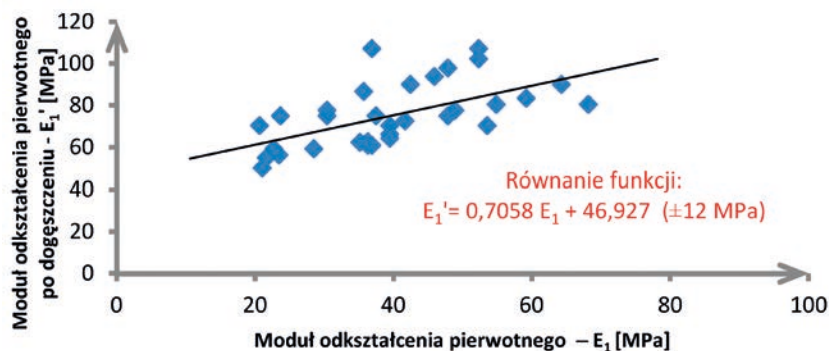
PODSUMOWANIE

Na podstawie wykonanych badań poligonowych w skali rzeczywistej i analiz sformułowano następujące wnioski:

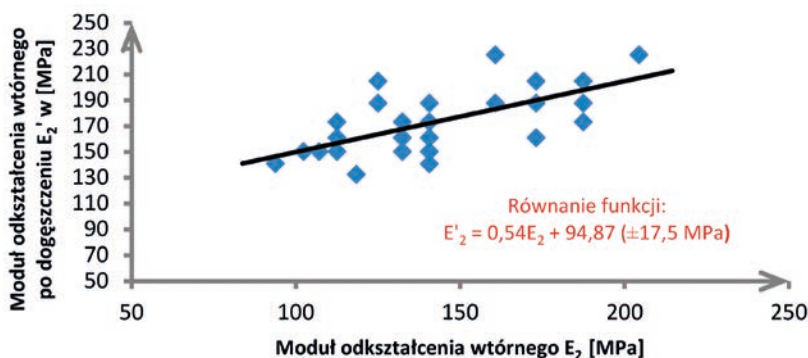
- ze względów praktycznych istotny jest przede wszystkim wpływ jednej nadległej warstwy zasypowej o grubości 30 cm na dogęszczenie warstwy spągowej,
- korzystne i geotechnicznie uzasadnione jest wykonywanie nasypów warstwowych w technologii dogęszczenia warstwy spągowej kolejną warstwą zasypową kruszywa,
- zagęszczenie kruszywa w warstwie spągowej do parametrów: $E_{1,min} \geq 31,14$ MPa, $E_{2,min} \geq 63,37$ MPa i $I_{0,min} \leq 4,0$, po dogęszczeniu pierwszą nadległą warstwą zasypową pozwala uzyskać parametry geotechnicznie wymagane, to jest: $E_1 \geq 60,0$ MPa, $E_2 \geq 120,0$ MPa i $I_0 \leq 2,5$, czyli $I_s = 1,0$,

Tabl. 3. Przykładowe wyniki terenowych badań zmian parametrów mechanicznych

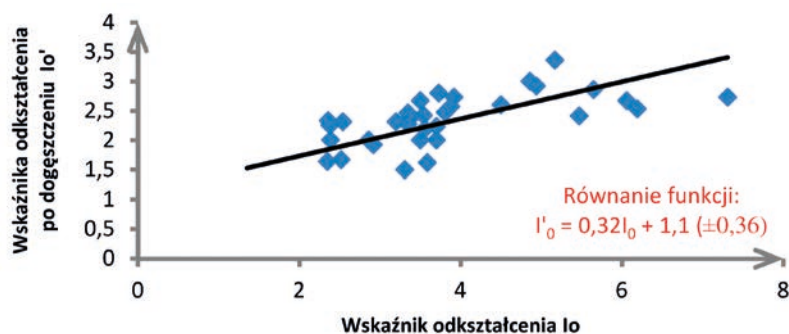
Lp.	Numer warstwy	Poziom warstwy	Wyniki badań – pierwotne				Wyniki badań po dogęszczeniu (kolejnej warstwy)			
		h	E_1	E_2	I_0	E_{vd}	E_1	E_2	I_0	E_{vd}
		[m]	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]
1	XIX	5,70/-3,60	36,29	187,5	5,17	77,67	60,81	204,6	3,36	44,33
2	XX	6,00/-3,30	23,68	173,1	7,31	47,07	75,00	204,6	2,73	57,30
3	XXI	6,30/-3,00	30,41	112,5	3,70	41,10	75,00	150,0	2,00	74,10
4	XXII	6,60/-2,70	30,41	112,5	3,70	42,87	77,59	173,1	2,23	83,02



Rys. 3. Zmiany wartości modułu pierwotnego po dogęszczeniu jedną warstwą zasypową



Rys. 4. Zmiany wartości modułu wtórnego po dogęszczeniu jedną warstwą zasypową



Rys. 5. Zmiany wartości wskaźnika odkształcenia po dogęszczeniu jedną warstwą zasypową

- należy zatem stwierdzić, że istnieje możliwość wykonywania warstwowych nasypów budowlanych bez konieczności zagęszczania każdej podkładowej warstwy zasypowej do 100% projektowanego zagęszczenia, ze względu na fakt dogęszczania tej warstwy spągowej kolejną nadbudowywaną warstwą zasypową,
- każda wbudowywana i zagęszczona warstwa materiału zasypowego o grubości 30 cm zwiększa dogęszczenie ułożonego wcześniej gruntu w nasypie,
- istnieje wpływ wbudowywanej warstwy materiału o grubości 30 cm na co najmniej dwie niżej wykonane warstwy zasypowe nasypu budowlanego,
- praktycznie jest możliwe osiągnięcie docelowych zaprojektowanych wartości parametrów mechanicznych przy

warstwowej budowie nasypu bez konieczności zagęszczania każdej niżej zlokalizowanej warstwy zasypowej do zaprojektowanej maksymalnej wartości.

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 M. K., Farmas J., Kumor Ł. A.: Wybrane związki korelacyjne parametrów zagęszczenia określone metodami VSS i LFG. III Problemowa Konferencja Geotechniki. Współpraca budowl z podłożem gruntowym. Białystok 2013, 271-281.
3. PN-88/B-04481. Grunty budowlane. Badanie próbek gruntów.

4. PN-B-02479:1998. Geotechnika. Dokumentowanie geotechniczne. Zasady ogólne.
5. PN-B-02481:1998. Geotechnika. Terminologia podstawowa, symbole literowe i jednostki miar.
6. PN-B-06050:1999. Geotechnika. Roboty ziemne. Wymagania ogólne.
7. PN-B-04452:2002. Geotechnika. Badania polowe.
8. PN-EN 1097-3:2000. Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie gęstości nasypowej i jamistości.
9. PN-EN ISO 14688-1:2006. Badania geotechniczne. Oznaczenia i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Oznaczanie i opis.
10. PN-EN ISO 14688-2:2006. Badania geotechniczne. Oznaczenia i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania.