

Wpływ zawartości frakcji pyłowej na parametry zagęszczalności ρ_{ds} i w_{opt} oraz na parametry kształtu krzywej zagęszczalności IC i SC w badaniu Proctora

Dr Marek Adam Patakiwicz – „GEOTOR” Firma Usług Geotechnicznych

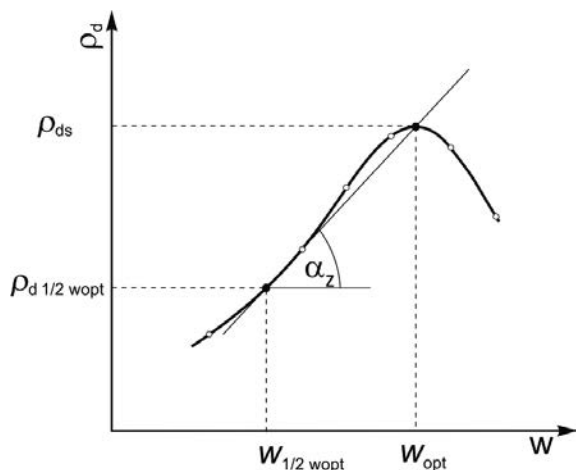
Dr inż. Ryszard Chmielewski – Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji

Podstawowym wynikiem badania Proctora [7] jest krzywa zagęszczalności gruntu, na podstawie której odczytywane są klasyczne parametry zagęszczalności gruntu: maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego ρ_{ds} oraz wilgotność optymalna w_{opt} . Uziarnienie gruntu – traktowane także jako zawartość poszczególnych frakcji, w tym frakcji pyłowej (f_{π}) i ilowej (f_i) – jest czynnikiem o znaczeniu podstawowym, determinującym zdolność gruntów do zagęszczania, rzutującym na ocenę przydatności danego geomateriału do budowy nasypów o wymaganych parametrach zagęszczenia i nośności.

Parametrami uziarnienia najczęściej stosowanymi w praktyce inżynierskiej umożliwiającymi ocenę zdolności gruntów do zagęszczania są: wskaźnik jednorodności uziarnienia C_u i sto-

sowany pomocniczo wskaźnik krzywizny uziarnienia C_c . Przyjmuje się, że grunt jest dobrze uziarniony (łatwo zagęszczalny, a tym samym przydatny do budowy nasypów), jeżeli $C_c = 1 \div 3$, a $C_u > 4$ (dla żwirów) lub $C_u > 6$ (dla piasków) [1, 2, 4]. Według normy [13] grunty o wskaźniku $C_u > 3$ traktuje się jako grunty przydatne do wbudowania w nasyp, natomiast grunty o mniejszych wartościach C_u mogą być stosowane warunkowo, po uzyskaniu pozytywnych wyników skutecznego zagęszczania na poletku doświadczalnym.

Oceniając przydatność gruntów do zagęszczania wskazane jest uwzględnienie parametrów bezpośrednio opisujących kształt krzywej zagęszczalności i charakteryzujących przebieg zagęszczania metodą Proctora [10]. Takim parametrem jest



Rys. 1. Interpretacja wskaźnika zagęszczalności IC na krzywej zagęszczalności

wskaźnik zagęszczalności IC [8, 9], gdzie kształt krzywej zagęszczalności traktowany jest jako indywidualna charakterystyka zdolności gruntu do zagęszczenia.

Wskaźnik zagęszczalności IC [8, 9] definiowany jest jako tangens kąta nachylenia linii poprowadzonej przez punkt pomiarowy leżący na krzywej zagęszczalności przy wilgotności równej 1/2 wilgotności optymalnej ($\rho_{d\ 1/2\ wopt}$, $w_{1/2\ wopt}$) oraz przez punkt określający parametry zagęszczalności gruntu (ρ_{ds} , w_{opt}) (rys. 1).

Wskaźnik IC jest wielkością niemianowaną, obliczaną według wzoru:

$$IC = \frac{\rho_{ds} - \rho_{d\ 1/2\ wopt}}{w_{opt} - w_{1/2\ wopt}} \cdot 100 \quad (1)$$

gdzie:

- $\rho_{d\ 1/2\ wopt}$ – gęstość objętościowa szkieletu gruntowego odczytana z wykresu zależności $\rho_d = f(w)$ przy wilgotności równej 1/2 wilgotności optymalnej,
- $w_{1/2\ wopt}$ – wilgotność równa 1/2 wilgotności optymalnej,
- ρ_{ds} – maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego oznaczana metodą normalną Proctora,
- w_{opt} – oznacza wilgotność optymalną; wilgotności we wzorze podawane są w postaci bezwymiarowej (ułamek dziesiętny).

Na podstawie wielkości wskaźnika IC możliwa jest klasyfikacja gruntów pod względem ich zagęszczalności (tabl. 1).

Innym wskaźnikiem związanym z krzywą zagęszczalności jest zdolność gruntu do zagęszczania SC (susceptibility to com-

Tabl. 1. Klasyfikacja gruntów niespoistych pod względem zagęszczalności na podstawie wartości wskaźnika IC [8, 9]

Kategoria zagęszczalności gruntu	Wskaźnik IC	Pochylenie krzywej zagęszczalności α_z
Grunty niezagęszczalne i źle zagęszczalne	$< 0,6$	$< 30^\circ$
Grunty trudno zagęszczalne	$0,6 \div 0,8$	$30^\circ \div 40^\circ$
Grunty zagęszczalne	$0,8 \div 1,2$	$40^\circ \div 50^\circ$
Grunty bardzo dobrze zagęszczalne	$> 1,2$	$> 50^\circ$

paction). Parametr SC obecnie [3, 5, 6] definiowany jest jako tangens kąta nachylenia linii regresji uśredniającej przebieg punktów pomiarowych (ρ_d , w) położonych po „suchej” stronie krzywej zagęszczalności w badaniu Proctora. Według tych założeń tangens kąta nachylenia linii regresji może być obliczany przy minimum trzech punktach pomiarowych [5]. Wartości ρ_d podawane są w g/cm³, natomiast wilgotności gruntu w poszczególnych punktach pomiarowych przedstawiane są jako wartości niemianowane w postaci ułamka dziesiętnego. Definiując ten parametr nie określono różnic wilgotności pomiędzy poszczególnymi punktami pomiarowymi oraz minimalnych różnic wilgotności punktów pomiarowych w stosunku do wilgotności optymalnej. Według badań [6] wartość wskaźnika SC zależy od rodzaju gruntu i rośnie wraz ze wzrostem zawartości w gruncie frakcji drobnych, rozumianych jako suma frakcji iłowej i pyłowej ($f_{i+\pi}$). W badaniach [6] dla piasków uzyskano wartość wskaźnika SC = 0,93, dla piasków gliniastych SC = 2,00, natomiast dla iłów piaszczystych wartość wskaźnika SC była największa i wyniosła 4,99.

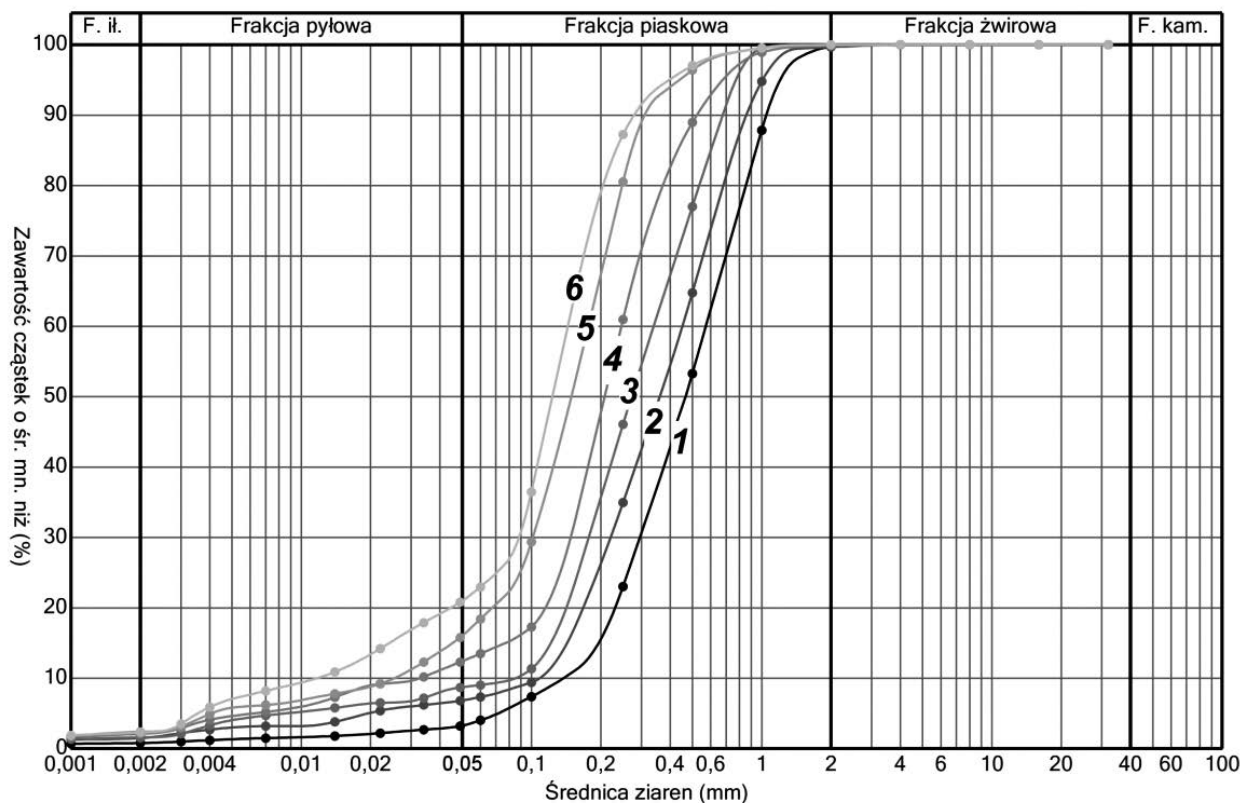
METODA BADAŃ

Badania parametrów zagęszczalności w aparacie Proctora wykonano na mieszkankach gruntów mineralnych uzyskanych poprzez domieszanie do piasków z próbki bazowej dodatku gruntów pylastych, zmiennych procentowo. Próbką bazową były piaski średnie fluwiogłacjalne o wskaźniku jednorodności uziarnienia $C_u = 4,1$ i zawartości frakcji pyłowej $f_\pi = 2,4\%$ (próbka nr 1). Do każdej następnej próbki gruntu modelowanej

Tabl. 2. Charakterystyka uziarnienia badanych gruntów

Numer próbki	Symbol gruntu według [12]	Zawartość frakcji [%]					C_u	C_c
		frakcja żwirowa f_z	frakcja piaszkowa f_p	frakcja pyłowa f_π	frakcja iłowa f_i	frakcje iłowa i pyłowa $f_i + f_\pi$		
1	P _s	0,3	96,5	2,4	0,8	3,2	4,1	1,1
2	P _s	0,3	92,9	5,3	1,5	6,8	4,2	1,0
3	P _d	0,1	91,2	7,1	1,6	8,7	4,0	1,1
4	P _g /P _d	0,1	87,6	10,2	2,1	12,3	7,5	2,7
5	P _g	0,0	84,2	13,4	2,4	15,8	7,1	2,3
6	P _g	0,0	79,2	18,5	2,3	20,8	12,0	4,5

Objaśnienia: próbka 1 – próbka bazowa, próbki 2 ÷ 6 – próbki sztucznie modelowane



Rys. 2. Wykresy uziarnienia badanych gruntów
próbka 1 – grunt rodzimy; próbki 2 ÷ 6 – grunty sztucznie modelowane poprzez dodatek stopniowo rosnących domieszek frakcji pyłowej

sztucznie (próbki nr 2 ÷ 6) dodawano pył. Ilość pyłu w każdej kolejnej próbce była większa o 2 ÷ 5% wagowo. Wykresy uziarnienia analizowanych próbek gruntów pokazano na rys. 2, a charakterystykę ich uziarnienia przedstawiono w tabl. 2. Nazwy gruntów przyjęto według normy [12] ze względu na ich powszechne stosowanie w szerokiej praktyce inżynierskiej.

Parametry zagęszczalności ρ_{ds} i w_{opt} określono w badaniu Proctora, zagęszczając grunt metodą I według normy [11] (metoda normalna). Analizy uziarnienia wykonywano metodą sitoową zgodnie z normą [12].

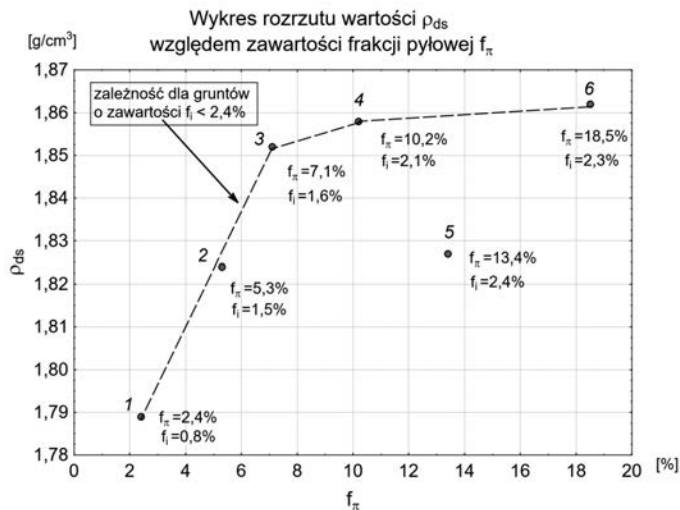
WYNIKI BADAŃ

Badane próbki gruntów charakteryzowały się uziarnieniem ciągłym i jednomodalnym [10]. Zawartość frakcji ilowej w analizowanych próbkach zmieniała się w zakresie $f_i = 0,8 \div 2,4\%$, zawartość frakcji pyłowej rosła od $f_\pi = 2,4\%$ do $f_\pi = 18,2\%$, a zawartość frakcji piaskowej w kolejnych próbkach gruntów obniżała się od $f_p = 96,5\%$ do $f_p = 79,2\%$. Wraz ze wzrostem zawartości frakcji drobnych ($f_{i+\pi}$) zmieniało się uziarnienie badanych gruntów: od piasków średnich przez piaski drobne do piasków gliniastych. Dla gruntów niespoistych (próbki nr 1 ÷ 3) parametry uziarnienia były do siebie zbliżone i wynosiły $C_U = 4,0 \div 4,2$ oraz $C_C = 1,0 \div 1,1$; dla gruntów małospoistych (próbki nr 4 ÷ 6) wraz ze wzrostem zawartości frakcji drobnych ($f_{i+\pi}$) obserwowano wzrost wskaźnika jednorodności od $C_U = 7,5$ do $C_U = 12,0$ i wzrost wartości wskaźnika krzywizny uziarnienia od $C_C = 2,7$ do $C_C = 4,5$.

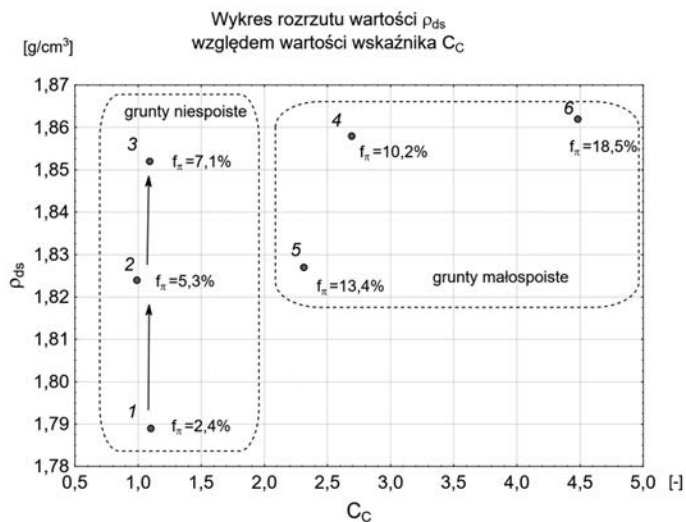
Według kryteriów zagęszczalności odnoszących się do kształtu krzywej zagęszczenia [8, 9] próbka bazowa piasków (próbka nr 1) zaliczała się do gruntów zagęszczalnych ($IC = 0,91$). Stopniowy przyrost zawartości frakcji pyłowej z $f_\pi = 2,4\%$ do $f_\pi = 10,2\%$ oraz wzrost frakcji ilowej z $f_i = 0,8\%$ do $f_i = 2,1\%$ wpłynął na wzrost wskaźnika zagęszczalności IC od wartości $IC = 0,91$ (próbka nr 1 – piaski średnie – grunty zagęszczalne) do $IC = 1,71$ (próbka nr 4 – piaski gliniaste na pograniczu piasków drobnych – grunty bardzo dobrze zagęszczalne). Dalszy przyrost zawartości frakcji pyłowej do $f_\pi = 13,4\%$ (próbka nr 5) spowodował nieznaczne obniżenie wartości wskaźnika zagęszczalności do $IC = 1,55$, nie zmieniając klasyfikacji gruntu pod względem jego zagęszczalności ($IC > 1,2$ – grunty bardzo dobrze zagęszczalne). Kolejny przyrost zawartości frakcji pyłowej o około 5% do wartości $f_\pi = 18,5\%$ (próbka nr 6) spowodował spadek parametru IC do wartości $IC = 0,69$ oraz przeklasyfikowanie badanego gruntu do grupy gruntów trudnozagęszczalnych o $IC < 0,8$.

Wpływ zmian zawartości frakcji pyłowej na wielkości klasycznych parametrów zagęszczalności ρ_{ds} i w_{opt} przedstawiono na rys. 3 i 4. Na rys. 5 i 6 przedstawiono wpływ zmian parametrów uziarnienia C_U i C_C na maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego ρ_{ds} z uwzględnieniem zmian zawartości frakcji pyłowej w poszczególnych próbkach gruntów. Na rys. 7 i 8 przedstawiono analogiczny wpływ parametrów uziarnienia C_U i C_C na wilgotność optymalną w_{opt} badanych gruntów.

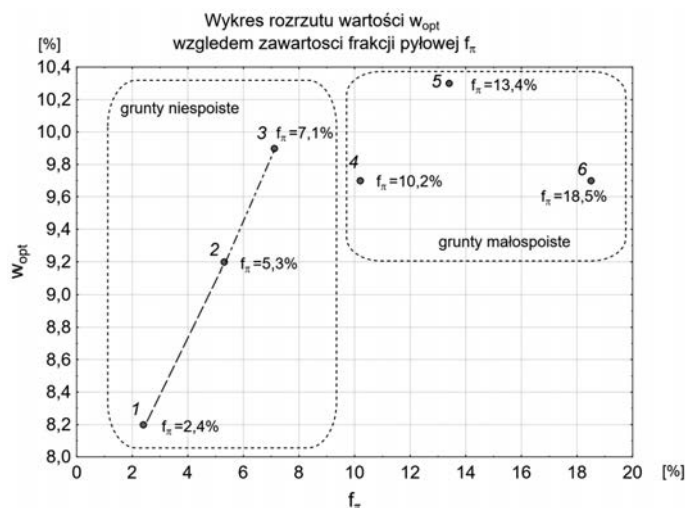
Dla gruntów niespoistych (o zawartości frakcji ilowej $f_i = 0,8 \div 1,6\%$) stopniowy wzrost zawartości frakcji pyłowej



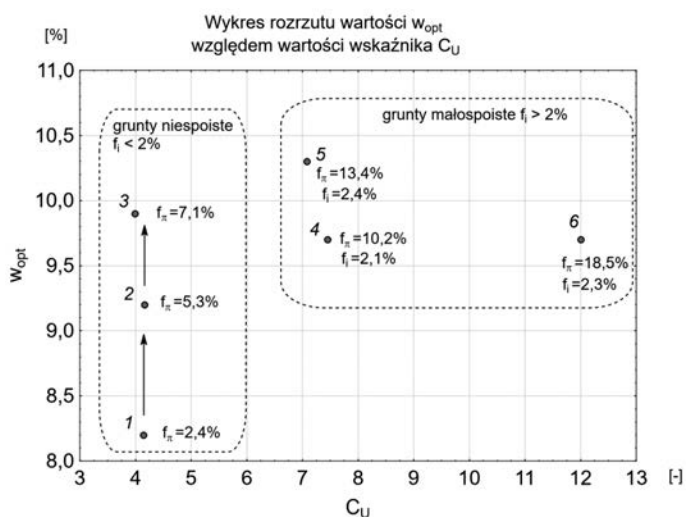
Rys. 3. Wpływ zawartości frakcji pyłowej na maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego badanych gruntów niespoistych i mało spoistych



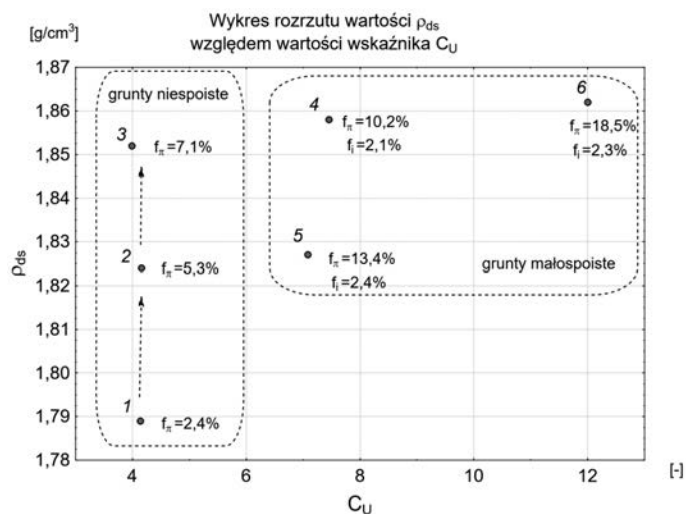
Rys. 6. Wpływ wartości wskaźnika krzywizny uziarnienia C_c na maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego badanych gruntów przy zmiennej zawartości frakcji pyłowej



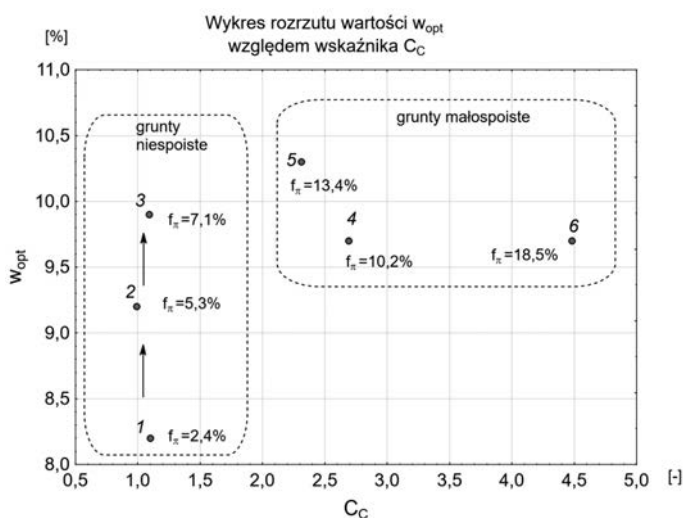
Rys. 4. Wpływ zawartości frakcji pyłowej na wilgotność optymalną badanych gruntów niespoistych i mało spoistych



Rys. 7. Wpływ wartości wskaźnika jednorodności uziarnienia C_u na wilgotność optymalną badanych gruntów niespoistych i mało spoistych przy zmiennej zawartości frakcji pyłowej



Rys. 5. Wpływ wartości wskaźnika jednorodności uziarnienia C_u na maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego badanych gruntów przy zmiennej zawartości frakcji pyłowej



Rys. 8. Wpływ wartości wskaźnika krzywizny uziarnienia C_c na wilgotność optymalną badanych gruntów niespoistych i mało spoistych przy zmiennej zawartości frakcji pyłowej

Tabl. 3. Charakterystyka parametrów zagęszczalności analizowanych gruntów

Numer próbki	Symbol gruntu	Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego	Wilgotność optymalna	Wskaźnik zagęszczalności	Pochylenie krzywej zagęszczalności	Zdolność gruntów do zagęszczania
		$\rho_{d\max}$	w_{opt}	IC	α_z	SC
		[g/cm ³]	[%]	[-]	[°]	[-]
1	P _s	1,789	8,2	0,91	42	0,83
2	P _s	1,824	9,2	1,76	60	1,83
3	P _d	1,852	9,9	1,46	56	1,47
4	P _g /P _d	1,858	9,7	1,71	60	1,75
5	P _g	1,827	10,3	1,55	49	1,09
6	P _g	1,862	9,7	0,69	35	0,71

Objaśnienia: próbka 1 – próbka bazowa, próbki 2 ÷ 6 – próbki sztucznie modelowane

od 2,7% do 7,1% powoduje liniowy przyrost wartości ρ_{ds} oraz liniowy przyrost wartości w_{opt} , co widoczne jest na rys. 3 i 4.

Dla gruntów o uziarnieniu gruntów małościopistych na pograniczu gruntów niespoistych (o zawartości frakcji iłowej $f_i = 2,1 \div 2,3\%$) przyrost zawartości frakcji pyłowej od 10,2% do 18,5% praktycznie nie wpływa na zmianę wartości ρ_{ds} ($\rho_{ds} \approx 1,86 \text{ g/cm}^3$). Taką samą prawidłowość obserwuje się przy wilgotności optymalnej w_{opt} ; wielość tego parametru pozostała na stałym poziomie wynoszącym $w_{opt} = 9,7\%$.

Dla gruntów niespoistych o zbliżonych wartościach parametrów uziarnienia C_U i C_C ($C_U = 4,0 \div 4,2$, $C_C = 1,0 \div 1,1$) – przy praktycznie stałych parametrach uziarnienia C_U i C_C – wzrost zawartości frakcji pyłowej powoduje zauważalny wzrost wartości parametrów zagęszczalności ρ_{ds} oraz w_{opt} (rys. 3 i 4). W przypadku gruntów małościopistych tego rodzaju zależności nie zaobserwowano.

W prowadzonych badaniach wyniki uzyskane dla próbki nr 5 odbiegają od pozostałych. W analizowanej grupie badawczej próbka nr 5 jest gruntem o najwyższej zawartości frakcji iłowej ($f_i = 2,4\%$). Z analizy rysunków nr 3 i 4 wynika, że dla gruntów małościopistych o zawartości frakcji iłowej $f_i \geq 2,4\%$ zaznaczać się może istotny wpływ frakcji iłowej na wielość parametrów zagęszczalności ρ_{ds} i w_{opt} , być może o silniejszym oddziaływaniu na parametry zagęszczalności niż procentowo większy przyrost zawartości frakcji pyłowej.

We wcześniej prowadzonych badaniach [6] dla piasków uzyskano wartość wskaźnika $SC = 0,93$, dla piasków gliniastych $SC = 2,00$, przy czym obserwowany był wzrost parametru SC wraz ze wzrostem zawartości frakcji drobnych ($f_{i+\pi}$). W badaniach wykonanych obecnie dla piasków średnich uzyskano wartości parametru $SC = 0,83$ i $SC = 1,83$, dla piasków drobnych $SC = 1,47$, a dla piasków gliniastych $SC = 1,09$ i $SC = 0,71$. Rozrzut wyników wskazuje na potrzebę poszerzonej analizy zakresu zmienności tego parametru w oparciu o bardziej rozbudowany zbiór wyników badań gruntów, zróżnicowanych tak pod względem genezy, jak i uziarnienia. Na tej podstawie powinno być możliwe przeanalizowanie przydatności parametru SC – jako jednego z kryteriów oceny przydatności do zagęszczania gruntów czwartorzędowych stosowanych w budownictwie ziemnym.

WNIOSKI

1. Wszystkie badane próbki gruntów charakteryzowały się uziarnieniem ciągłym, jednomodalnym.
2. Dla gruntów niespoistych ($f_i = 0,8 \div 1,6\%$) wzrost zawartości frakcji pyłowej (w badaniu: z 2,7% do 7,1%) powoduje liniowy przyrost wartości ρ_{ds} oraz liniowy przyrost wartości w_{opt} .
3. Dla gruntów małościopistych o zawartości frakcji iłowej $f_i < 2,4\%$ wzrost zawartości frakcji pyłowej z 10,2% do 18,5% praktycznie nie wpływa na przyrost wartości ρ_{ds} ($\rho_{ds} \approx 1,86 \text{ g/cm}^3$) i nie wpływa na zmianę wartości w_{opt} ($w_{opt} = 9,7\%$).
4. Dla gruntów niespoistych o zbliżonych wartościach parametrów uziarnienia C_U i C_C ($C_U = 4,0 \div 4,2$, $C_C = 1,0 \div 1,1$) wzrost zawartości frakcji pyłowej powoduje wzrost wartości klasycznych parametrów zagęszczalności ρ_{ds} oraz w_{opt} – bez istotnych zmian analizowanych parametrów uziarnienia. W przypadku gruntów małościopistych nie zaobserwowano tego rodzaju zależności.
5. W prowadzonych badaniach wyniki uzyskane dla próbki nr 5 zaznaczają się jako wartości odbiegające od pozostałych; próbka nr 5 w analizowanej grupie badawczej jest gruntem o najwyższej zawartości frakcji iłowej ($f_i = 2,4\%$). Dla gruntów małościopistych o zawartości frakcji iłowej $f_i \geq 2,4\%$ zaznaczać się może istotny wpływ frakcji iłowej na wielość parametrów zagęszczalności ρ_{ds} i w_{opt} , być może o silniejszym oddziaływaniu na parametry zagęszczalności niż przyrost zawartości frakcji pyłowej. W dalszych etapach prac badawczych wskazana będzie analiza tego zjawiska dla gruntów małościopistych o wyższych zawartościach frakcji iłowej wynoszących $f_i = 2,0 \div 5,0\%$ oraz $f_i = 5,0 \div 10,0\%$.
6. W badanych gruntach niespoistych i małościopistych wzrost zawartości frakcji pyłowej do 13,4% wpływa na poprawę parametrów zagęszczalności charakteryzowanych przez parametry zagęszczalności ρ_{ds} i w_{opt} oraz wskaźnik zagęszczalności IC . Powyższa zależność obserwowana jest dla gruntów o sumarycznej zawartości

frakcji drobnych ($f_{i+\pi}$) wynoszącej do 15,8% wagowo (około 1/6 masy zagęszczanego gruntu).

7. W badanych próbkach gruntów małościśniętych przyrost zawartości frakcji pyłowej z 13,4% do 18,5% pogarsza w sposób zauważalny wartość wskaźnika zagęszczalności IC . Powyższa zależność obserwowana jest dla sumarycznej zawartości frakcji drobnych wynoszących $f_{i+\pi} = 20,8\%$, co odpowiada około 1/5 masy zagęszczanego gruntu.
8. Na obecnym etapie badań można przyjąć, że zawartość frakcji drobnych, traktowanych jako suma zawartości frakcji pyłowej i ilowej wynosząca do 1/6 masy zagęszczanego gruntu, może wpływać pozytywnie na proces zagęszczania, poprawiając parametry zagęszczalności gruntu oraz skuteczność wykonywanych robót ziemnych. Zaobserwowane na obecnym etapie badań prawidłowości będą przedmiotem dalszych analiz na próbkach gruntów modelowanych sztucznie oraz na gruntach naturalnych stosowanych bezpośrednio w budownictwie ziemnym.

LITERATURA

1. ASTM D 2487 – 06 Standard practice for classification of soils for engineering purposes.
2. Czyżewski K., Wolski W., Wójcicki S., Żbikowski A.: Zapory ziemne. Arkady, Warszawa, 1973.
3. Diaz-Zorita M., Grosso G. A.: Effect of soil texture, organic carbon and water retention on the compactability of soils from the Argentinean pampas. *Soils & Tillage Research*, Vol. 54, 2000, 12-126.
4. Field Manual FM 5-410 Technical Manual TM 3-34.64 MCRP 3-17.7G. Military Soils Engineering. U.S. Army, Headquarters Department of the Army, Washington DC, 2012.
5. Krzic M., Bulmer C. E., Teste F., Dampier L., Rahman S.: Soil properties influencing compactability of forest soils in British Columbia. *Canadian Journal of Soil Science*, Vol. 84, 2004, 219-226.
6. Kumar D., Bansal M. L., Phogat V. K.: Compactability in relation to texture and organic matter content of alluvial soils. *Indian Journal of Agricultural Research*, Vol. 43 (3), 2009, 180-186.
7. Proctor R. R.: Fundamental principles of soil compaction. *Engineering News Record*, Vol. 111, No. 9, New York, 1933, 245-248.
8. Patakiewicz M.: Zastosowanie wskaźników krzywej zagęszczalności jako charakterystyk zagęszczalności gruntów niespoistych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, Nr 4/, 2012, 366-370.
9. Patakiewicz M.: Wpływ wskaźników sedimentologicznych uziarnienia na parametry zagęszczalności gruntu. Praca doktorska. Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Białystok 2013.
10. Patakiewicz M., Zabielska-Adamska K.: Wskaźnik krzywizny uziarnienia a parametry zagęszczalności gruntów niespoistych o dwumodalnym rozkładzie uziarnienia. *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura*, Vol. 12 (3), 2013, 111-123.
11. PN-86/B-02480 Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
12. PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
13. PN-98/S-02205 Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.