

## BADANIA PARAMETRÓW ZAGĘSZCZALNOŚCI GRUNTÓW NIESPOISTYCH METODĄ PROCTORA

Dariusz Tymosiak, Maria J. Sulewska

Politechnika Białostocka, Białystok

**Streszczenie.** Celem pracy jest analiza wyników badań porównawczych parametrów zagęszczalności – maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ( $\rho_{ds}$ ) i wilgotności optymalnej ( $w_{opt}$ ), według polskich norm: „starej” PN-88/B-04481:1988 oraz „nowej” PN-EN 13286-2:2010. Badania wykonano na dwóch gruntach niespoistych, równoziarnistych (pospółka Po i piasek średni Ps) czterema metodami (I, II, III, IV) według PN-88/B-04481:1988 oraz czterema metodami (A+A, A+B, B+A, B+B) według PN-EN 13286-2:2010. Wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ( $\rho_{ds}$ ) uzyskane według obu norm niewiele różnią się od siebie: dla Po około 1,9–4,0%, a dla Ps około 1,6–2,1%. Różnice wartości wilgotności optymalnej ( $w_{opt}$ ) nie podlegają wyraźnym prawidłowościom.

**Słowa kluczowe:** zagęszczalność gruntów, badania porównawcze, maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego, wilgotność optymalna

### WSTĘP

Zagęszczanie gruntu jest procesem, w którego wyniku następuje przemieszczanie się cząstek gruntu wskutek przyłożonej siły pokonującej siły tarcia pomiędzy ziarnami i cząstkami. Efektem jest możliwie szczelne ułożenie ziaren. Na efektywność procesu zagęszczenia wpływają: wilgotność gruntu [Proctor 1933a, b], uziarnienie i rodzaj gruntu [Pisarczyk 2004, Sulewska 2005, 2009, Majer 2009], cechy kształtu ziaren [Pisarczyk 1977], nakład energii oraz sposób jej przekazywania [Gurtug i Sridharan 2004, Sivrikaya i in. 2008, Dąbska i Pisarczyk 2011]. Dany grunt charakteryzuje się określonymi parametrami zagęszczalności, oznaczonymi jako:  $\rho_{ds}$  i  $w_{opt}$ . Wilgotność optymalna ( $w_{opt}$ ) jest najbardziej korzystna przy zagęszczaniu danej mieszanki, ponieważ przy takiej wilgotności uzyskuje się maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego ( $\rho_{ds}$ ), przy określonej energii

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: Dariusz Tymosiak, Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Zakład Geotechniki, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok, e-mail: d.tymosiak@pb.edu.pl

© Copyright by Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2016

i w danych warunkach zagęszczania. Gdy wilgotność gruntu jest zbyt mała, obserwuje się niewystarczająco szczelne ułożenie cząstek. Z kolei zbyt duża wilgotność powoduje zamknięcie dróg ucieczki powietrza z masy gruntowej na zewnątrz [Pisarczyk 2004].

Odpowiednie zagęszczenie nasypów ma istotny wpływ na dobrą stateczność korpusów ziemnych oraz zwiększa nośność gruntów pod nawierzchniami komunikacyjnymi. Miarą zagęszczenia gruntów nasypowych (spoistych i niespoistych) jest wskaźnik zagęszczenia ( $I_S$ ). Służy on do kontroli jakości wykonywania robót ziemnych i obliczany jest ze wzoru:

$$I_S = \frac{\rho_d}{\rho_{ds}} \quad [-] \quad (1)$$

gdzie:  $\rho_d$  – gęstość objętościowa szkieletu gruntowego wyznaczona w nasypie [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ],  
 $\rho_{ds}$  – maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego przy wilgotności optymalnej, wyznaczona w laboratorium w określonych warunkach zagęszczenia na próbce pobranej z nasypu [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ].

Pośród polowych i laboratoryjnych metod badania parametrów zagęszczalności gruntów spoistych i niespoistych [Pisarczyk 1977, 2004] najbardziej popularna w Polsce jest metoda Proctora zalecana w „starej” normie PN-88/B-04481:1988 oraz w „nowej” normie PN-EN 13286-2:2010 wdrażanej obecnie do praktyki budowlanej.

Kontrola jakości zagęszczenia gruntu polega na sprawdzeniu, czy osiągnięta wartość wskaźnika zagęszczenia w nasypie jest co najmniej równa jego minimalnej wartości wymaganej przy właściwym zagęszczeniu warstw wbudowanych w dany rodzaj budowli ziemnej, określonej w następujących dokumentach:

- w nasypach w budownictwie drogowym w PN-S-02205 [1998],
- w nasypach w budownictwie ogólnym w PN-B-06050 [1999],
- w nasypach urządzeń wodno-melioracyjnych w PN-B-12095 [1997],
- w nasypach w budownictwie hydrotechnicznym w dokumencie Roboty ziemne... [1994],
- w nasypach tramwajowych w PN-K-92011 [1998],
- w nasypach kolejowych w Warunkach technicznych... [2009].

Celem pracy jest analiza wyników badań porównawczych parametrów zagęszczalności wybranych gruntów niespoistych – maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ( $\rho_{ds}$ ) i wilgotności optymalnej ( $w_{opt}$ ) według polskich norm: „starej” PN-88/B-04481:1988 oraz „nowej” PN-EN 13286-2:2010.

## RYS HISTORYCZNY METODY PROCTORA

Pierwszą opublikowaną procedurą kontroli sztucznego zagęszczenia gruntów były wycieczne California Impact Test (California State Impact Method), które opracował w 1929 roku O. James Porter w California Division of Highways w Sacramento, USA. Jest ona znana pod nazwą California Test 216 [2006] i używana do dziś, po modyfikacjach (ostatnie modyfikacje nastąpiły w latach: 2000, 2006, 2011) [Rogers 2014]. Metoda polega na zbadaniu *in-situ* gęstości objętościowej gruntu za pomocą objętościomierza piaskowego

i porównaniu z maksymalną możliwą do uzyskania wartością gęstości objętościowej gruntu przy określonej energii i warunkach zagęszczenia, odczytaną z wykresu wilgotność-gęstość objętościowa, sporządzonego na podstawie wyników badań przy użyciu specjalnego cylindra i ubijaka (podobnie jak w metodzie Proctora).

Istnienie zależności między gęstością objętościową szkieletu gruntowego a wilgotnością gruntów drobnoziarnistych przy tej samej energii zagęszczającej stwierdzili niezależnie od siebie Kelso w Australii w 1926 roku oraz Proctor w 1933 roku [Pisarczyk 2004]. Ralph Roscoe Proctor opublikował w 1933 roku w cyklu czterech publikacji [Proctor 1933a, b, c, d] zasady i opis swojej metody określania wilgotności optymalnej ( $w_{opt}$ ), przy której uzyskuje się największe zagęszczenie gruntu przy określonej energii i danych warunkach zagęszczenia. Standardowa metoda Proctora została znormalizowana w 1950 roku przez American Society for Testing and Materials [ASTM 2007] (ostatnie wydanie w 2012 roku) oraz przez American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO 1986] (ostatnie wydanie w 2015 roku). W związku ze wzrostem obciążenia korpusów drogowych coraz cięższymi środkami transportu zwiększały się wymagania dotyczące lepszego zagęszczenia nasypów. Wywołało to również rozwój ciężkiego sprzętu zagęszczającego. Konieczność zwiększenia wartości wymaganych parametrów zagęszczalności gruntów w nasypach uwzględniono w 1958 roku we wprowadzonej zmodyfikowanej metodzie Proctora [ASTM 2009] (ostatnie wydanie w 2012 roku) oraz [AASHTO 2001] (ostatnie wydanie w 2015 roku). Modyfikacja metody polegała na około pięciokrotnym zwiększeniu energii zagęszczania na  $1 \text{ dm}^3$  objętości gruntu w cylindrze normowym.

Metoda Proctora została z niewielkimi zmianami przyjęta także w Polsce, w kolejnych normach: PN-59/B-04491, PN-75/B-04481 oraz PN-88/B-04481:1988. W 2005 roku została opublikowana w Polsce nowa norma europejska, której kolejne wydania jako normy polskiej różniły się wersją językową: PN-EN 13286-2:2005-03E (w języku angielskim) i PN-EN 13286-2:2007-08P (w języku polskim). Aktualnie obowiązująca norma i poprawka do niej zostały wydane w języku angielskim: PN-EN 13286-2:2010-11E:2010 i poprawka PN-EN 13286-2:2010/AC:2014. Norma ta odnosi się tylko do niezwiązanych lub związanych hydraulicznie mieszanek wykorzystywanych w budownictwie drogowym lub w inżynierii lądowej. Nie odnosi się ona do gruntów wykorzystywanych w robotach ziemnych.

Charakterystyki metod wyznaczania parametrów zagęszczalności według norm amerykańskich i polskich: AASHTO, ASTM, PN oraz PN-EN zamieszczono w tabeli 1.

Metoda standardowa we wszystkich procedurach polega na przekazaniu podczas ubijania energii równej około  $0,60 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{dm}^{-3}$  (od  $0,589$  do  $0,596 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{dm}^{-3}$ , czyli energia przekazywana w różnych metodach może maksymalnie różnić się średnio o 1,2%). W metodzie zmodyfikowanej przekazuje się energię zagęszczenia równą około  $2,7 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{dm}^{-3}$  (od  $2,645$  do  $2,698 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{dm}^{-3}$ , a ich maksymalna różnica względna wynosi około 2,0%). Wymiary i objętości cylindrów są we wszystkich normach podobne, z wyjątkiem cylindra C w normie PN-EN 13286-2:2010-11E:2010 przy wprowadzonej tu innej niż w pozostałych normach masie i wysokości spadania ubijaka C.

Według PN-88/B-04481:1988 próbkę gruntu należy wymieszać z wodą i umieścić w szczelnie zamkniętym naczyniu na co najmniej 15 h. Można najwyżej pięciokrotnie

Tabela 1. Zestawienie charakterystyk zagęszczenia według norm amerykańskich i polskich  
 Table 1. Summary of characteristics of compactibility according to polish and american standards

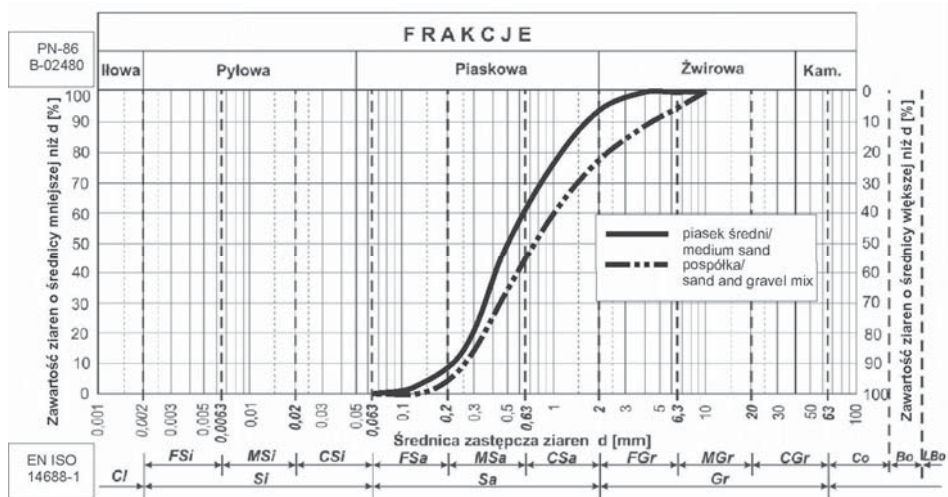
Norma Standard	Metoda Method	Średnica cylindra Diameter of mould	Wysokość cylindra Height of mould	Objętość cylindra Volume of mould	Masa ubijaka; Średnica ubijaka Mass; Diam- eter of ram- mer	Wysokość spadania ubijaka Height of fall	Liczba warstw Number of layers	Liczba uderzeń na warstwę Number of blows per layer	Energia zagęszczenia Compaction energy	Warunki stosowania: średnica ziaren (D) Terms of use: sieve (D) size
		[mm]	[mm]	[m <sup>3</sup> ]	[kg]; [mm]	[mm]	[-]	[-]	[kN·m·dm <sup>-3</sup> ]	[mm]
AASHTO T 99 [1986]	A (standard.)	102,0	116,5	0,000943				25	0,595	D ≤ 4,75
	B (standard.)	152,0	116,5	0,002124	2,50; 50,0	305,0	3	56	0,592	D ≤ 4,75
	C (standard.)	102,0	116,5	0,000943				25	0,595	D ≤ 19,00
	D (standard.)	152,0	116,5	0,002124				56	0,592	D ≤ 19,00
AASHTO T 180 [2001]	A (zmodyf.)	101,6	116,5	0,000943				25	2,698	D ≤ 4,75
	B (zmodyf.)	152,4	116,5	0,002124	4,54; 50,0	457,0	5	56	2,683	D ≤ 4,75
	C (zmodyf.)	101,6	116,5	0,000943				25	2,698	D ≤ 19,00
	D (zmodyf.)	152,4	116,5	0,002124				56	2,683	D ≤ 19,00
ASTM D698 [2007]	A (standard.)	101,6	116,4	0,000943				25	0,595	D ≤ 4,75
	B (standard.)	101,6	116,4	0,000943	2,50; 50,8	305,0	3	25	0,595	D ≤ 9,50
	C (standard.)	152,4	116,4	0,002124				56	0,592	D ≤ 19,00
ASTM D1557 [2009]	A (zmodyf.)	101,6	116,4	0,000943				25	2,696	D ≤ 4,75
	B (zmodyf.)	101,6	116,4	0,000943	4,53; 50,8	457,2	5	25	2,696	D ≤ 9,50
	C (zmodyf.)	152,4	116,4	0,002124				56	2,681	D ≤ 19,00
PN-EN 13286-2 [2010] ubijak + cylinder rammer + mould	A+A (standard.)	100,0	120,0	0,000942	2,50; 50,0	305,0		25	0,596	D < 16,00
	A+B (standard.)	150,0	120,0	0,002120			3	56	0,593	D < 16,00; 31,50; 63,00
	C+C (standard.)	250,0	200,0	0,009813	15,00; 125,0	600,0		22	0,594	D < 31,50; 63,00
	B+A (zmodyf.)	100,0	120,0	0,000942				25	2,677	D < 16,00
	B+B (zmodyf.)	150,0	120,0	0,002120	4,50; 50,0	457,0	5	56	2,665	D < 16,00; 31,50; 63,00
C+C (zmodyf.)	250,0	200,0	0,009813	15,00; 125,0	600,0		98	2,645	D < 31,50; 63,00	
PN-88/B-04481 [1988]	I (standard.)	112,8	100,0	0,0010	2,50; 50,8	320,0	3	25	0,589	D < 6,00
	II (standard.)	152,4	120,6	0,0022	2,50; 76,8			55	0,589	D < 10,00
	III (zmodyf.)	112,8	100,0	0,0010	4,50; 50,8	480,0	5	25	2,649	D < 6,00
	IV (zmodyf.)	152,4	120,6	0,0022	4,50; 76,8			55	2,649	D < 10,00

zagęszczać tę samą próbkę, zwiększając wilgotność gruntu przy kolejnym zagęszczeniu średnio o 2%.

Według procedury zgodnej z PN-EN 13286-2:2010 i poprawki PN-EN 13286-2:2010/AC:2014 do badania należy przygotować kilka oddzielnych próbek mieszanki o wilgotności wzrastającej o 1–2%. Jedna próbka mieszanki może być zagęszczana tylko jeden raz. Jeśli właściwości mieszanki są dobrze znane, to można wykonać tylko trzy oznaczenia  $\rho_d$  i  $w$ . Norma dokładnie opisuje sposób zagęszczania ubijaniem warstw gruntowych w cylindrze, np. w metodzie A+A i B+A należy przyłożyć trzy serie po osiem uderzeń: siedem uderzeń rozmieszczonych równomiernie na powierzchni warstwy z końcowym uderzeniem na środku.

## WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Badania wykonano na dwóch gruntach niespoistych: piasku średnim (Ps) i pospółce (Po) zgodnie z klasyfikacją według PN-86/B-02480:1986 (na piasku ze żwirem drobnym fgrSa i na piasku ze żwirem średnim i żwirem drobnym fgrmgrSa według PN-EN ISO 14688-2:2006 oraz poprawki PN-EN ISO 14688-2:2006/Ap2:2012). Wyniki badań uziarnienia gruntów wykonanych metodą sitową według PN-88/B-04481:1988 przedstawiono w postaci krzywych uziarnienia na rysunku 1. Zgodnie z wartościami wskaźników uziarnienia, pokazanymi w tabeli 2, były to grunty równoziarniste (lub jednofrakcyjne).



Rys. 1. Krzywe uziarnienia pospółki i piasku średniego

Fig. 1. Grain-size distribution curves of sand and gravel mix and medium sand

Parametry zagęszczalności  $\rho_{ds}$  i  $w_{opt}$  wyznaczano czterema metodami (I, II, III, IV) według PN-88/B-04481:1988 oraz czterema metodami (A+A, A+B, B+A, B+B) według PN-EN 13286-2:2010 i poprawki PN-EN 13286-2:2010/AC:2014. Do badań użyto mechanicznego aparatu Proctora według PN-88/B-04481:1988 (rys. 2a) oraz ręcznego ubijaka Proctora według PN-EN 13286-2:2010 (rys. 2b).

Tabela 2. Wskaźniki uziarnienia badanych gruntów  
Table 2. Graining coefficients of tested soils

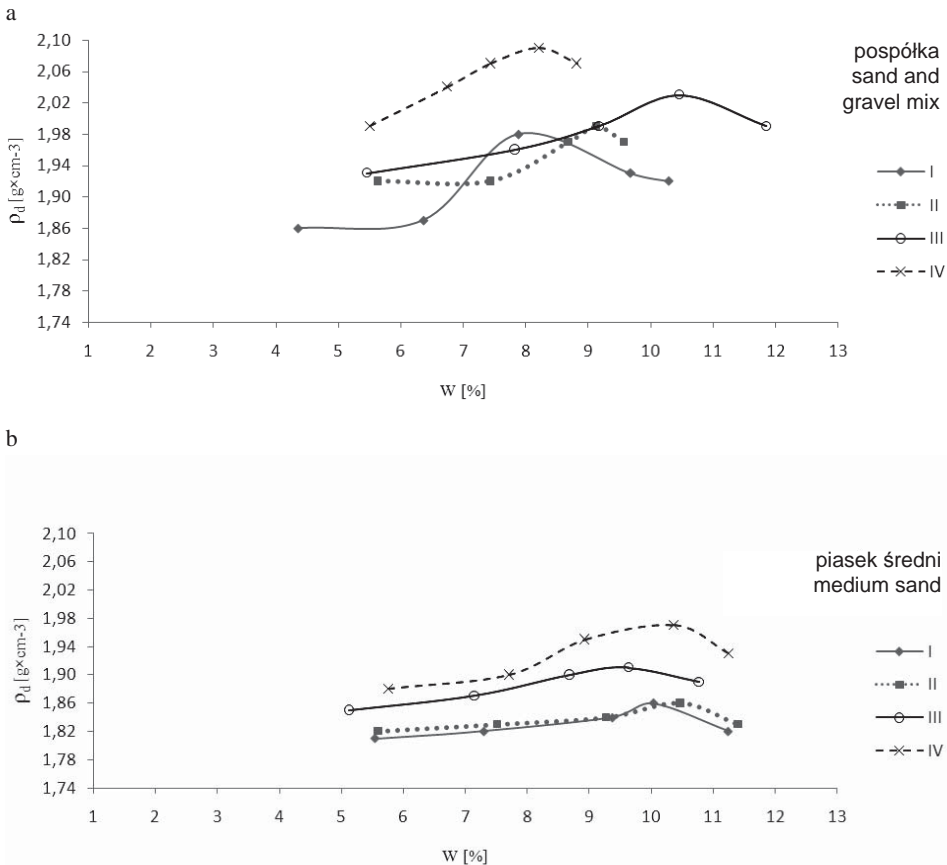
Charakterystyka według Characteristics according	Rodzaj gruntu (symbol) Soil (symbol)	Średnica ziaren Sieve ( <i>D</i> ) size	Wskaźniki uziarnienia Graining coefficients		Jednorodność uziarnienia Graining uniformity
Czyżewski i in. [1973]	piasek średni (Ps)		$U = 2,95$ wskaźnik różnoziarnistości	$C_C = 0,94$ wskaźnik krzywizny	grunt równoziarnisty
PN-EN ISO 14688-2:2006 i poprawka PN-EN ISO 14688-2:2006/ /Ap2:2012	piasek ze żwirem drobnym (fgrSa)	$D_{10} = 0,21$ mm $D_{30} = 0,35$ mm $D_{60} = 0,62$ mm	$C_U = 2,95$ wskaźnik jednorodności uziarnienia	$C_C = 0,94$ wskaźnik krzywizny	grunt jednofrakcyjny
Czyżewski i in. [1973]	pospółka (Po)		$U = 4,00$ wskaźnik różnoziarnistości	$C_C = 0,74$ wskaźnik krzywizny	grunt równoziarnisty
PN-EN ISO 14688-2:2006 i poprawka PN-EN ISO 14688-2:2006/ /Ap2:2012	piasek ze żwirem średnim i żwirem drobnym (fgmGrSa)	$D_{10} = 0,25$ mm $D_{30} = 0,43$ mm $D_{60} = 1,00$ mm	$C_U = 4,00$ wskaźnik jednorodności uziarnienia	$C_C = 0,74$ wskaźnik krzywizny	grunt jednofrakcyjny



Rys. 2. Ubijaki Proctora: a – mechaniczny według PN-88/B-04481:1988, b – ręczny według PN-EN 13286-2:2010 (ubijak A + cylinder A)

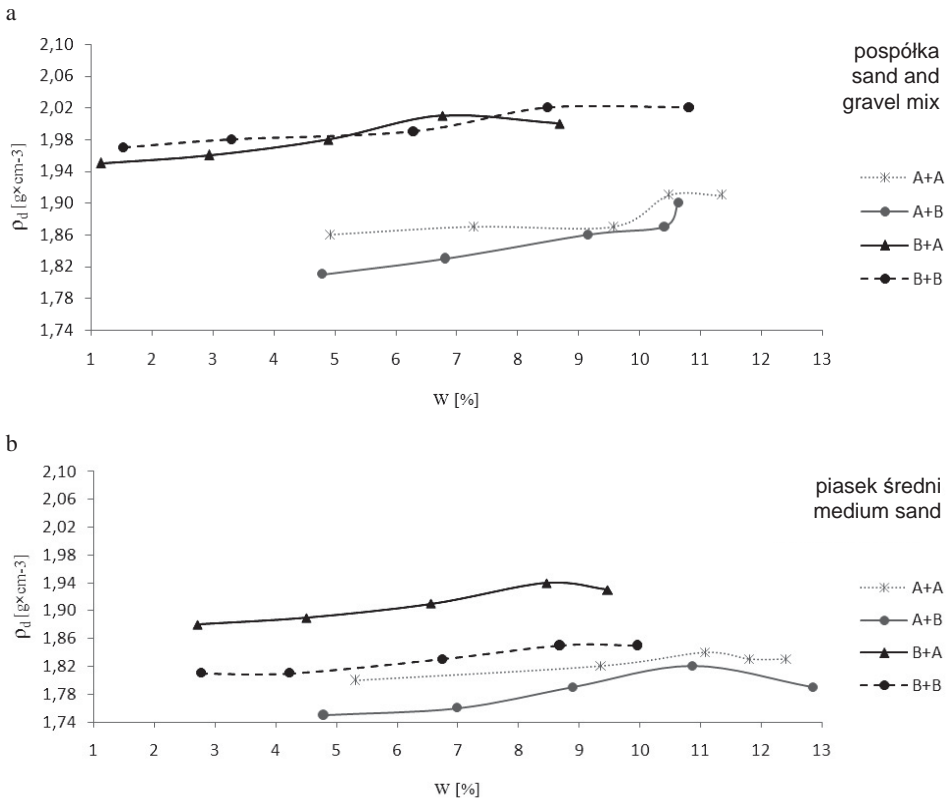
Fig. 2. Proctor rammers: a – automatic according to PN-88/B-04481:1988, b – manual according to PN-EN 13286-2:2010 (rammer A + mould A)

Na podstawie wyników badań gruntów czterema metodami (I, II, III, IV) według PN-88/B-04481:1988 sporządzono krzywe zagęszczalności pospółki (rys. 3a) i piasku średniego (rys. 3b). Na podstawie wyników badań gruntów czterema metodami (A+A, A+B, B+A, B+B) według PN-EN 13286-2:2010 i poprawki PN-EN 13286-2:2010/AC:2014 sporządzono krzywe zagęszczalności pospółki (rys. 4a) i piasku średniego (rys. 4b). Z wykresów zagęszczalności odczytano wartości parametrów  $\rho_{ds}$  i  $w_{opt}$  badanych gruntów (tab. 3).



Rys. 3. Krzywe zagęszczalności według PN-88/B-04481:1988: a – pospółki, b – piasku średniego  
Fig. 3. Compaction curves according PN-88/B-04481:1988 for: a – sand and gravel mix, b – medium sand

Na rysunkach 3–4 widać potwierdzenie znanego zjawiska, że większe wartości  $\rho_{ds}$  uzyskuje się, stosując metody o większej energii zagęszczania (III i IV oraz B+A i B+B). I tak na podstawie tabeli 3 dla pospółki można zaobserwować maksymalną różnicę względną między wynikami badań metodami B+B i A+B:  $[(2,02 - 1,90)/2,02] \cdot 100 = 5,9\%$  (średnia różnica między wynikami badań metodami zmodyfikowanymi i standardowymi wynosi 4,7%), a dla piasku średniego różnica względna między wynikami badań metoda-



Rys. 4. Krzywe zagęszczalności według PN-EN 13286-2:2010: a – pospółki, b – piasku średniego  
Fig. 4. Compaction curves according PN-EN 13286-2:2010 for: a – sand and gravel mix, b – medium sand

mi IV i II wynosi:  $[(1,97 - 1,86)/1,97] \cdot 100 = 5,6\%$  (średnio 3,8%). Wartości wskaźników zagęszczenia zmniejszają się wtedy do  $I_S$  (przy  $\rho_{ds}$  zmod.) =  $1/1,047 = 0,955$  (dla pospółki) i 0,963 (dla piasku średniego), przy założeniu, że  $I_S$  (przy  $\rho_{ds}$  stand.) = 1,000. Niewielkie zwiększenie się wartości parametrów zagęszczalności przy zagęszczeniu metodami zmodyfikowanymi tłumaczy się jednorodnością uziarnienia badanych gruntów. Na podstawie wartości wskaźników uziarnienia (tab. 2) można było przewidzieć, że grunty będą się słabo zagęszczać, ponieważ są źle uziarnione.

Wiłun [2005] dla żwirów i piasków przytacza orientacyjne wartości  $\rho_{ds}$  i  $w_{opt}$  odpowiednio w granicach: według metody standardowej  $\rho_{ds} = 2,00\text{--}1,80 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  i  $w_{opt} = 8\text{--}12\%$  oraz według metody zmodyfikowanej  $\rho_{ds} = 2,10\text{--}1,90 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  i  $w_{opt} = 6\text{--}8\%$ . Różnice wartości  $\rho_{ds}$  uzyskanych metodą standardową i metodą zmodyfikowaną wynoszą dla obu gruntów  $\Delta\rho_{ds} = 0,10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , czyli 5,6% i 4,8%, co powoduje zmniejszenie się wartości średnich  $I_S$  (przy  $\rho_{ds}$  zmod.) =  $1/1,056 = 0,947$  (dla żwirów) i 0,954 (dla piasków), przy założeniu  $I_S$  (przy  $\rho_{ds}$  stand.) = 1,000.

Generalnie z badań według normy PN-88/B-04481:1988 otrzymuje się wartości  $\rho_{ds}$  niewiele większe niż według normy PN-EN 13286-2:2010. Obliczone na podstawie średnich



Tabela 3. Wartości parametrów zagęszczalności gruntów w zależności od metody badania  
 Table 3. Compaction parameters of soils in dependence on compaction method

Grunt Soil	Metoda standar- dowa Proctora Standard Proctor	$\rho_{ds}$ [g·cm <sup>-3</sup> ]	Średnia Average		Średnia Average		$\rho_{ds}$ [g·cm <sup>-3</sup> ]	Średnia Average		Średnia Average
			$\rho_{ds}$ [g·cm <sup>-3</sup> ]	$w_{opt}$ [%]	$w_{opt}$ [%]	$\rho_{ds}$ [g·cm <sup>-3</sup> ]		$w_{opt}$ [%]		
Pospółka Sand and gravel mix	I	1,98	1,99	7,88	10,56	III	2,03	2,06	10,46	9,33
	II	1,99		9,13			IV		2,09	
	A+A	1,91	10,48	B+A		2,01	6,77			
	A+B	1,90	10,64	B+B		2,02	8,50			
Piasek średni Medium sand	I	1,86	1,86	10,03	10,98	III	1,91	1,94	9,64	10,01
	II	1,86		10,47			IV		1,97	
	A+A	1,84	11,08	B+A		1,94	8,46			
	A+B	1,82	10,87	B+B		1,85	8,68			

wartości  $\rho_{ds}$  z tabeli 3 względne różnice wynoszą: dla Po około 1,9–4,0%, a dla Ps około 1,6–2,1%. Wartości wilgotności optymalnej ( $w_{opt}$ ) badanych gruntów nie podlegają wyraźnym prawidłowościom (rys. 3–4); generalnie można zauważyć, że przy użyciu metod zmodyfikowanych otrzymuje się przeważnie wartości  $w_{opt}$  nieco mniejsze niż przy użyciu metod standardowych.

## WNIOSKI

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań można stwierdzić, że:

1. W gruntach źle uziarnionych, równoziarnistych otrzymuje się nieco większe wartości parametrów zagęszczalności  $\rho_{ds}$  i  $w_{opt}$  przy zagęszczaniu metodami zmodyfikowanymi w porównaniu z metodami standardowymi: dla Po średnio o 4,7%, dla Ps średnio o 3,8%.

2. Generalnie z badań według normy PN-88/B-04481:1988 otrzymuje się wartości  $\rho_{ds}$  nieco większe niż z badań według normy PN-EN 13286-2:2010. Dla badanych gruntów równoziarnistych (pospółki i piasku średniego) względne różnice wyniosły: dla Po 2,0–4,0%, a dla Ps 1,6–2,1%. Różnice wartości wilgotności optymalnej  $w_{opt}$  tych gruntów nie podlegały wyraźnym prawidłowościom.

3. Wobec niewielkich różnic między wartościami parametrów otrzymywanych dwiema metodami można uznać, że w przypadku gruntów źle uziarnionych wyniki badań parametrów zagęszczalności wykonane według „nowej” normy PN-EN 13286-2:2010 odpowiadają wynikom badań według „starej” normy PN-88/B-04481:1988.

4. Rozpoczęto wykonywanie badań porównawczych według obu norm na gruntach dobrze uziarnionych (różnoziarnistych i bardzo różnoziarnistych, spełniających wymagania techniczne mieszanek niezwiązanych według WT-4 [2010]), gdzie przypuszczalnie uwidocznią się wyraźniej prawidłowości i ewentualne różnice wartości parametrów zagęszczalności w zależności od zastosowanej metody badania.

**PIŚMIENNICTWO**

- AASHTO Standard T 99-86 (1986). Standard Method of Test for The Moisture-Density Relations of Soils Using a 5.5-lb [2.5 kg] Rammer and a 12-in. [305 mm] Drop.
- AASHTO Standard T 180-01 (2001). Standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 4.54-kg (10-lb) Rammer and a 457-mm (18-in.) Drop.
- ASTM Standard D698-07 (2007). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard Effort (12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)). ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM Standard D1557-09 (2009). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>)). ASTM International, West Conshohocken, PA.
- California Test 216 (2006). Method of Test for Relative Compaction of Untreated and Treated Soils and Aggregates. State of California – Business, Transportation and Housing Agency; [http://www.dot.ca.gov/hq/esc/ctms/pdf/CT\\_216oct06.pdf](http://www.dot.ca.gov/hq/esc/ctms/pdf/CT_216oct06.pdf), data wejścia: 1.04.2016.
- Czyżewski, K., Wolski, W., Wójcicki, S., Żbikowski, A. (1973). Zapory ziemne. Wydawnictwo Arkady, Warszawa.
- Dąbska, A., Pisarczyk, S. (2011). Wpływ energii zagęszczania na zagęszczenie gruntów i parametry zagęszczalności. *Inżynieria i Budownictwo*, 1, 21–23.
- Gurtug, Y., Sridharan, A. (2004). Compaction behaviour and prediction of its characteristics of fine grained soils with particular reference to compaction energy. *Soils and Foundations*, 44, 5, 27–36.
- Majer, S. (2009). Zagęszczalność gruntów niespoistych a wskaźnik jednorodności uziarnienia. *Materiały IV Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Nowoczesne technologie w budownictwie drogowym”*, Poznań, 446–455.
- Pisarczyk, S. (1977). Zagęszczalność gruntów gruboziarnistych i kamienistych. Praca habilitacyjna. Politechnika Warszawska, Warszawa.
- Pisarczyk, S. (2004). Grunty nasypowe. Właściwości geotechniczne i metody ich badania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- PN-59/B-04491. Grunty budowlane. Oznaczenie wilgotności optymalnej i maksymalnego ciężaru objętościowego szkieletu gruntowego.
- PN-75/B-04481. Grunty budowlane. Badania laboratoryjne.
- PN-86/B-02480:1986. Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- PN-88/B-04481:1988. Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
- PN-B-06050:1999. Geotechnika. Roboty ziemne. Wymagania ogólne.
- PN-B-12095:1997. Urządzenia wodno-melioracyjne. Nasypy. Wymagania i badania przy odbiorze.
- PN-EN 13286-2:2005-03E. Unbound and hydraulically bound mixtures. Part 2: Test methods for the determination of the laboratory reference density and water content. Proctor compaction.
- PN-EN 13286-2:2007-08P. Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym. Część 2: Metody określania gęstości i zawartości wody. Zagęszczenie metodą Proctora.
- PN-EN 13286-2:2010-11E. Mieszanki niezwiązane i związane hydraulicznie. Część 2: Metody badań laboratoryjnych gęstości na sucho i zawartości wody. Zagęszczenie metodą Proctora + poprawka PN-EN 13286-2:2010/AC:2014-07E.
- PN-EN ISO 14688-2:2006. Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania + poprawka PN-EN ISO 14688-2:2006/Ap2:2012.
- PN-K-92011:1998. Torowiska tramwajowe. Wymagania i badania.
- PN-S-02205:1998. Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.
- Proctor, R.R. (1933a). Fundamental principles of soil compaction. *Engineering News-Record* 111, 9, August 31, 245–248.

- Proctor, R.R. (1933b). Description of field and laboratory methods. *Engineering News-Record*, 111, 10, September 7, 286–289.
- Proctor, R.R. (1933c). Field and laboratory verification of soil suitability. *Engineering News-Record*, 111, 12, September 21, 348–351.
- Proctor, R.R. (1933d). New principles applied to actual dam building. *Engineering News-Record*, 111, 13, September 28, 372–376.
- Roboty ziemne. Warunki techniczne wykonania i odbioru (1994) Ministerstwo Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa, Warszawa.
- Rogers, J.D. (2014). GE 441 Geotechnical Construction Practice, Part 1: Origins of mechanical compaction; [http://web.mst.edu/~rogersda/umrcourses/ge441/online\\_lectures/compactonn/GE441-Lecture2-1.pdf](http://web.mst.edu/~rogersda/umrcourses/ge441/online_lectures/compactonn/GE441-Lecture2-1.pdf), data wejścia 27.03.2016.
- Sivrikaya, O., Togrol, E., Kayadelen, C. (2008). Estimating compaction behavior of fine-grained soils based on compaction energy. *Canadian Geotechnical Journal*, 45, 6, 877–887.
- Sulewska, M.J. (2005). Modelowanie statystyczne w ocenie zagęszczenia gruntów niespoistych. Materiały 51. Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZiTb, 4, Gdańsk – Krynica.
- Sulewska, M.J. (2009). Sztuczne sieci neuronowe w ocenie parametrów zagęszczenia gruntów niespoistych. IPPT PAN, Studia z Zakresu Inżynierii, 64, Warszawa – Białystok.
- Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego (2009). Id-3, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa.
- Wiłun, Z. (2005). Zarys geotechniki. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- WT-4 (2010). Wymagania techniczne. Mieszanki niezwiązane do dróg krajowych. Załącznik Nr 3 do Zarządzenia nr 102 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 19 listopada 2010 r., Warszawa.

## ADNOTACJA

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr S/WBiIŚ/6/2013 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.

## THE STUDY OF COMPACTIBILITY PARAMETERS IN NON-COHESIVE SOILS BY PROCTOR COMPACTION TEST

**Abstract.** The aim of this study was to analyse the results of comparative tests on compaction parameters – maximum bulk density of dry soil ( $\rho_{ds}$ ) and optimum moisture ( $w_{opt}$ ), by Polish standards of previous edition: PN-88/B-04481:1988 and a new edition: PN-EN 13286-2:2010. The study was performed on two non-cohesive, uniform soils sandy gravel Po (fgrSa) and medium sand Ps (fgrmgrSa) with the use of four methods (I, II, III, IV) in compliance with PN-88/B-04481:1988 and four other methods (A+A, A+B, B+A, B+B) in compliance with EN 13286-2:2010. The maximum volume of the bulk density of dry soil ( $\rho_{ds}$ ) obtained by the procedures under both standards differ little from each other: by about 2.0–4.0% in sandy gravel and about 1.6–2.1% in medium sand. The values of optimum moisture ( $w_{opt}$ ) are not subject to any clear patterns.

**Key words:** compactibility of soil, comparative tests, maximum dry density, optimum moisture content

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 26.07.2016

Cytowanie: Tymosiak, D., Sulewska, M.J. (2016). Badania parametrów zagęszczalności gruntów niespoistych metodą Proctora. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 15 (3), 43–53.