

Michał Pawłowski¹

ZALEŻNOŚĆ WSKAŹNIKA ZAGĘSZCZENIA OD WSKAŹNIKA ODKSZTAŁCENIA Z PRÓBNYCH OBCIĄŻEŃ MODELI PODTORZA Z NIESORTU KAMIENNEGO

Streszczenie

W artykule zaprezentowano rezultaty laboratoryjnych testów wielkowskalarowych modeli podtorza kolejowego z niesortu kamiennego – jednego z etapów badań mających na celu określenie zależności wskaźników zagęszczenia i odkształcenia służących do oceny stanu zagęszczenia podtorza. Opisano przebieg i wyniki badań wstępnych, zasadniczych i kontrolnych. Na podstawie wyników oznaczeń opracowano zależność wskaźników zagęszczenia i odkształcenia dla niesortu kamiennego. Podano wnioski wynikające z przeprowadzonych doświadczeń.

Słowa kluczowe: droga kolejowa, podtorze kolejowe, badania stanu zagęszczenia

1. Wstęp

Polskie linie kolejowe poprzez trwającą od kilkunastu lat modernizację dostosowywane są do wymogów umów międzynarodowych. Zakres prac obejmuje wszystkie elementy drogi kolejowej – nawierzchnię, podtorze i obiekty inżynierskie. W przypadku, gdy nie ulega zmianie niweleta toru, w modernizacyjnych przebudowach i naprawach podtorza wzmacniana jest głównie górna jego strefa do głębokości około 80 cm od poziomu istniejącego torowiska. Na właściwie przygotowanych gruntach podtorza lub podłoża budowana jest warstwa ochronna z materiałów ziarnistych naturalnych (grunty niespoiste) lub z ka-

¹ dr inż., Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Lądowej, Zakład Dróg Kolejowych, ul. Piotrowo 5, 60 - 965 Poznań, tel.: +48 6652407, e-mail: michal.pawlowski@put.poznan.pl

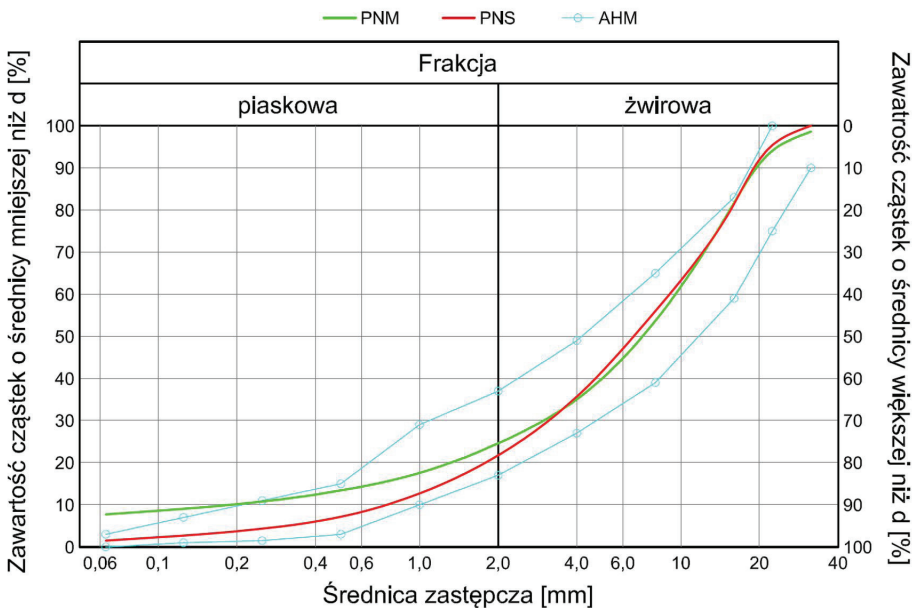
mienia łamanego (niesorty, grysy, kłińce), w razie potrzeby zawierająca geosyntetyki. W trakcie trwania procesu budowlanego kontroluje się właściwości przebudowywanego podtorza przy pomocy badań geotechnicznych. Określa się wartości modułów odkształcenia podtorza (E_2 , E_1) i wskaźników zagęszczenia (I_s) gruntów podtorza oraz kruszyw wbudowanych warstw ochronnych. Wartości modułów odkształcenia wyznacza się z próbnych obciążeń podtorza płytą stalową o średnicy 30 cm. Wartości wskaźników zagęszczenia określa się podczas badań laboratoryjnych na podstawie próbek pobranych z podtorza. W przypadku budowy warstw ochronnych z kruszyw łamanych zastosowanie tej metody jest utrudnione. Z tego względu do określania wartości wskaźników zagęszczenia warstw ochronnych stosowana jest metoda z wykorzystaniem wskaźników odkształcenia (I_o). Wartości wskaźników odkształcenia określa się w trakcie próbnych obciążeń podtorza płytą sztywną. Metoda ta mimo oczywistych zalet posiada ograniczenia utrudniające ocenę rzeczywistych układów wzmocnionego podtorza. Źródłem ograniczeń są normowe zależności wskaźników zagęszczenia i odkształcenia ($I_s(I_o)$) [1, 2, 11].

W celu rozszerzenia wiedzy na temat określania wartości wskaźników zagęszczenia na podstawie wartości wskaźników odkształcenia rozpoczęto badania mające doprowadzić do określenia zależności $I_s(I_o)$ dla różnych rodzajów gruntów podtorza, kruszyw warstw ochronnych oraz układów podtorze – warstwa ochronna. Doświadczenie podzielono na etapy, podczas których testowane są wybrane grunty i kruszywa budujące podtorze oraz układy podtorze – warstwa ochronna. Na każdym wydzielonym etapie eksperymentu wykonywane są badania geotechniczne w trzech grupach jako badania wstępne, zasadnicze i kontrolne. Podczas badań wstępnych określane są: rodzaj kruszywa, skład granulometryczny, wskaźnik uziarnienia, wskaźnik różnoziarnistości, maksymalna gęstość objętościowa szkieletu oraz wilgotność optymalna. W badaniach zasadniczych, wykonywanych na wielkomiarowych modelach podtorza, wyznaczane są wartości wskaźników odkształcenia i zagęszczenia. Badania kontrolne przeprowadzane są w przypadku budowy modeli badawczych kilkakrotnie z tej samej partii kruszywa. Ich zakres jest zgodny z zakresem badań wstępnych [5]. W pierwszym etapie badań określono zależność $I_s(I_o)$ dla modeli podtorza z piasku średniego [6]. Drugi etap eksperymentu to badania kruszywa warstw ochronnych – niesortu kamiennego.

2. Badania modeli podtorza z niesortu kamiennego

Zgodnie z programem eksperymentu przeprowadzono badania niesortu kamiennego w trzech grupach jako badania wstępne, zasadnicze i kontrolne.

W celu szczegółowego rozpoznania właściwości testowanego kruszywa przeprowadzono badania wstępne obejmujące określenie rodzaju, składu granulometrycznego, maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu i wilgotności optymalnej.



Rys. 1. Krzywe uziarnienia badanego kruszywa – niesortu kamiennego przesianego na mokro (PNM) i na sucho (PNS) oraz graniczne krzywe uziarnienia materiału zalecanego do budowy warstwy ochronnej przy użyciu maszyny AHM 800-R (AHM) według [2]

Z każdej części partii materiału pobrano losowo po jednej próbce pierwotnej, które po zmieszaniu stanowiły reprezentującą średnie właściwości partii materiału próbkę ogólną o masie około 10 kg. Przez kwartowanie [8], próbkę ogólną podzielono na dwie próbki analityczne o masie około 5 kg. Jedną z próbek, wybraną losowo, przepłukano. Przygotowane próbki przesiano przez zestaw jedenastu sit [9, 10]. Pozostałości na sitach zważono z dokładnością 0,1 g. Następnie obliczono procentową zawartość poszczególnych frakcji i narysowano dwie

krzywe uziarnienia kruszywa z przesiewu na mokro i na sucho (rys. 1). Dodatkowo na wykresie umieszczono graniczne krzywe uziarnienia materiału zalecanego do budowy warstw ochronnych przy użyciu maszyny AHM 800-R według [2]. Z wykresów krzywej uziarnienia (rys. 1) odczytano wartości średnic miarodajnych d_{60} , d_{30} i d_{10} , które posłużyły do wyznaczenia wartości wskaźnika uziarnienia oraz wskaźnika wygięcia krzywej uziarnienia obliczonych dla obu próbek (tab. 1) [5].

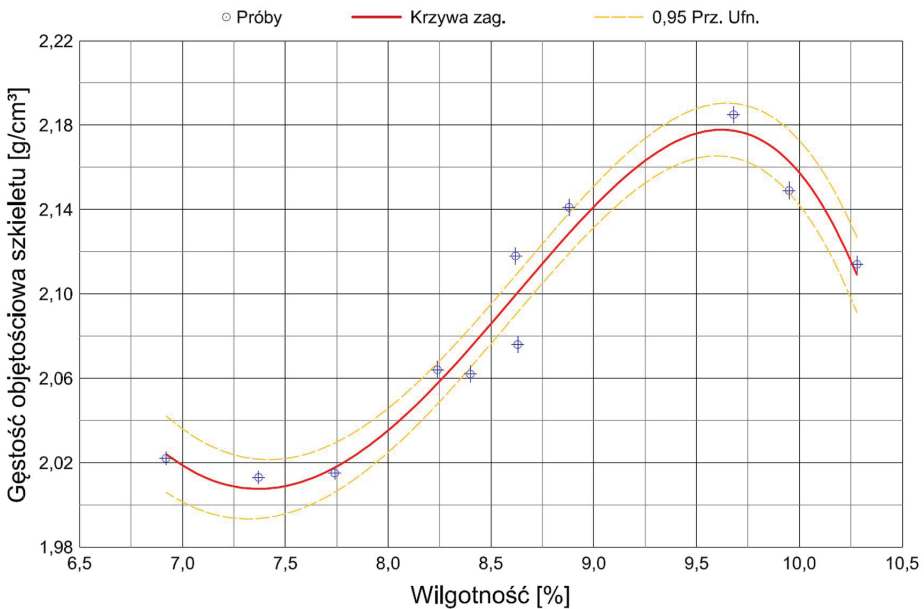
Tablica 1. Wyniki badań wstępnych i kontrolnych – średnice zastępcze oraz wskaźniki różnoziarnistości i wygięcia krzywej uziarnienia dla próbek niesortu kamiennego przesianych na mokro (PNM) i na sucho (PNS) [5]

Badanie		PNM					PNS				
		d_{10}	d_{30}	d_{60}	U	C	d_{10}	d_{30}	d_{60}	U	C
		[mm]			[-]		[mm]			[-]	
Wstępne	0x	0,191	2,993	9,551	50,0	4,9	1,438	0,751	3,128	9,1	12,1
Kontrolne	1x	0,114	2,737	9,648	84,6	6,8	2,153	0,484	3,135	9,4	19,5
	2x	0,172	3,372	9,462	55,0	7,0	2,568	0,457	3,214	8,8	19,3
	3x	0,175	3,075	9,401	53,7	5,7	1,878	0,619	3,280	9,3	15,0
	4x	0,151	3,329	9,643	63,9	7,6	2,092	0,479	2,921	8,5	17,8
	5x	0,088	2,447	9,182	104,3	7,4	1,851	0,560	2,919	8,2	14,7
Średnia		0,149	2,992	9,481	68,6	6,6	1,997	0,558	3,100	8,9	16,4

Wyniki analizy sitowej wskazują, że badanym kruszywem jest niesort kamienny o uziarnieniu 0-31,5 mm. Uzyskany wskaźnik różnoziarnistości pozwala zastosować badane kruszywo na warstwę ochronną zgodnie z wymogami przepisów [2]. Wynik przesiewu na sucho lokuje badany materiał pomiędzy granicznymi krzywymi materiału zalecanego do budowy warstw ochronnych maszyną AHM 800-R. Wynik przesiewu na mokro wskazuje, że badane kruszywo zawiera zbyt dużo drobnych cząstek.

Po określeniu składu ziarnowego niesortu kamiennego (mieszanka w 99 % przesiewała się przez sito 31,5 mm) przystąpiono do określenia maksymalnej gęstości szkieletu i wilgotności optymalnej. Przyjęto metodę wykonania oznaczenia zgodną z normą [7] polegającą na zagęszczaniu kruszywa w cylindrze dużym (o objętości 2200 dm³) w 3 warstwach 56 uderzeniami ubijaka lekkiego (masa 2,5 kg) opuszczonego z wysokości 320 mm (jednostkowa energia zagęszczania równa 0,5993 MJ/m³). Z każdej części partii materiału pobrano losowo po kilka próbek pierwotnych, które po zmieszaniu stanowiły reprezentujące średnie właściwości partii materiału próbki ogólne o łącznej masie około 120 kg. Przez kwartowanie [8], próbki ogólne podzielono

na 18 próbek analitycznych o masie około 6,5 kg każda. Przygotowane próbki analityczne przesiano przez sito o boku oczka kwadratowego 31,5 mm i oznaczono procentową zawartość ziaren pozostałych na sicie w stosunku do całkowitej masy próbek. W żadnym przypadku masa odsianych ziaren nie przekraczała 5 % całkowitej masy szkieletu próbek. Każdą próbkę dokładnie wymieszano z inną ilością wody i zagęszczano tylko raz. Ilość mieszanki zagęszczanej w poszczególnych warstwach dobierano tak, by po zakończeniu ubijania ostatniej warstwy ubita mieszanka nie wystawała więcej niż 10 mm ponad górną krawędź formy. Uderzenia ubijaka rozmieszczano równomiernie na powierzchni zagęszczanej mieszanki przykładając osiem kompletów po siedem uderzeń na każdą z warstw.



Rys. 2. Wykres zależności gęstości objętościowej szkieletu od wilgotności z oznaczeń niesortu kamiennego przed użyciem go do formowania modeli badawczych

W komplecie siedmiu uderzeń, sześć rozkładano równomiernie na powierzchni, a ostatnie siódme przykładano w środku. Po ubiciu ostatniej warstwy nadmiar mieszanki zgarniano wygładzając górną powierzchnię zagęszczanej mieszanki do poziomu górnej krawędzi formy usuwając grube ziarna, zastępując ubytki mocno wciśniętym drobniejszym materiałem próbki. Następnie ważono formę wraz z zagęszczoną mieszanką i oznaczano gęstość objętościową (ρ). Po wyjęciu

kruszywa z formy oznaczano jego wilgotność (w) susząc całą zawartość formy. W następnej kolejności sporządzono wykres zależności gęstości objętościowej szkieletu kruszywa (ρ_d) od wilgotności (rys. 2).

W wyniku badania określono maksymalną gęstość objętościową szkieletu równą $2,178 \text{ g/cm}^3$ przy wilgotności równej $9,69 \%$ (tab. 2) [5].

Tablica 2. Wyniki badań wstępnych i kontrolnych – wartości maksymalnych gęstości objętościowych szkieletu oraz wilgotności optymalnych uzyskanych w poszczególnych oznaczeniach (niesort kamienny) [5]

Badania		Wstępne	Kontrolne					Średnia
		X00	X01	X02	X03	X04	X05	
W_{opt}	[%]	9,69	9,26	8,99	9,02	9,60	9,70	9,38
ρ_{ds}	[g/cm ³]	2,178	2,202	2,242	2,209	2,207	2,198	2,206
R^2	[-]	0,944	1,000	1,000	1,000	0,987	1,000	0,989

Po rozpoznaniu właściwości niesortu kamiennego w badaniach wstępnych, zgodnie z programem eksperymentu, przystąpiono do przeprowadzenia badań zasadniczych. Na specjalnie do tego celu utworzonym stanowisku badawczym wykonano i przebadano 12 wielkowsymiarowych modeli podtorza kolejowego z niesortu kamiennego. Stanowisko badawcze składało się z: stalowego cylindra służącego do formowania modeli badawczych (średnica 1400 mm, wysokość 1900 mm), stalowej ramy z przeciwwagą służącą do przenoszenia obciążeń, wciągarki łańcuchowej zawieszanej na wózku jezdnym umożliwiającej transport poziomy i pionowy w obrębie stanowiska badawczego. Dodatkowym wyposażeniem stanowiska była aparatura pomiarowa i sprzęt pomocniczy. Aparaturę pomiarową stanowiła stalowa płyta sztywna o średnicy 300 mm wraz z dźwignikiem hydraulicznym zasilanym olejową pompą ręczną umożliwiającą zadawanie odpowiednich obciążeń. Osiadania płyty oraz wartość siły przekazywanej przez dźwignik były rejestrowane przy pomocy przetworników drogi i siły, wzmacniacza pomiarowego i specjalistycznego oprogramowania komputerowego. Do zagęszczania poszczególnych warstw modeli badawczych w trakcie ich formowania wykorzystywano spalinową zagęszczarkę wibracyjną z okrągłą płytą denną o średnicy 450 mm [3, 4, 5, 6].

W trakcie badań zasadniczych wykonano po 12 oznaczeń wartości wskaźników odkształcenia i zagęszczenia.

Wartości wskaźników odkształcenia wyznaczono z wyników dwukrotnego cyklu obciążenia i odciążenia modeli podtorza płytą sztywną

umieszczaną w środku górnej powierzchni modeli badawczych według zależności:

$$I_o = \frac{\Delta y_1}{\Delta y_2} \quad (1)$$

gdzie:

Δy_i - różnica osiadań płyty w przyjętym przedziale obciążeń z pierwszego (1) i drugiego (2) obciążenia [mm].

Modele obciążano stopniami po 0,05 MPa aż do uzyskania końcowego obciążenia równego 0,35 MPa. Odciażenie wykonywano stopniami po 0,10 MPa. Przedział obciążenia, z którego wyznaczano wskaźniki odkształcenia przyjęto 0,15 – 0,25 MPa według normy [11] oraz 0,10 – 0,25 MPa według przepisów [2]. W celu zwiększenia dokładności oceny odkształcalności modeli podtorza osiadania płyty aproksymowano wielomianami drugiego stopnia [2]. Wyznaczono cztery zbiory wartości wskaźników odkształcenia po dwa z rzeczywistych i aproksymowanych krzywych osiadań (tab. 3).

Wartości wskaźników zagęszczenia określano według zależności:

$$I_s = \frac{\rho_d}{\rho_{ds}} \quad (2)$$

gdzie:

ρ_d - gęstość objętościowa szkieletu kruszywa z badań zasadniczych [g/cm³],

ρ_{ds} - maksymalna gęstość objętościowa szkieletu kruszywa z badań wstępnych i kontrolnych [g/cm³].

Gęstość objętościową szkieletu kruszywa wyznaczano określając ciężar, wilgotność i zajmowaną objętość kruszywa użytego do budowy modelu w cylindrze stanowiska badawczego. Masę wyznaczano za pomocą legalizowanej wagi hakowej przy każdorazowym formowaniu i rozformowywaniu modelu badawczego. Z każdej partii kruszywa pobierano próbki w celu określenia jego wilgotności. Objętość kruszywa oceniano na podstawie pomiarów geometrycznych w cylindrze badawczym. Wyznaczono dwa zbiory wartości wskaźników zagęszczenia z uwzględnieniem zmiennej i stałej wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego po każdorazowym użyciu niesortu do formowania modeli badawczych (tab. 3).

Tablica 3. Zestawienie zbiorów wskaźników zagęszczenia oraz wskaźników odkształcenia modeli podtorza z niesortu kamiennego [5]

Przypadek	Model	Is1	Is2	Io1	Io2	Io3	Io4
1	2	3	4	5	6	7	8
1	26	0,924	0,912	3,39	3,25	2,75	2,67
2	27	0,930	0,919	2,41	3,31	3,02	3,08
3	28	0,933	0,922	2,08	2,25	2,24	2,29
4	29	0,917	0,916	1,80	1,82	1,84	1,83
5	30	0,920	0,919	2,13	2,13	2,05	2,01
6	31	0,924	0,922	2,09	2,08	1,98	2,02
7	32	0,922	0,938	2,05	2,00	1,89	1,89
8	33	0,925	0,940	1,95	2,03	1,89	1,90
9	34	0,924	0,939	1,92	2,02	2,02	1,93
10	35	0,967	0,968	2,48	2,50	2,11	2,17
11	36	0,969	0,970	2,11	2,26	2,14	2,23
12	37	0,965	0,966	1,91	1,99	1,91	1,98

Po każdorazowym użyciu tej samej partii kruszywa do budowy modeli podtorza, w celu identyfikacji zmian właściwości materiału wykonywano badania kontrolne. Zakres badań kontrolnych był zgodny z zakresem badań wstępnych i obejmował oznaczenie składu ziarnowego oraz określenie maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu oraz wilgotności optymalnej.

Określenie składu granulometrycznego dokonywano przesiewając na sucho i na mokro dwie próbki analityczne o masie około 6 kg każda, pozyskanych z podziału przez kwartowanie próbki ogólnej o masie około 50 kg. Próbkę ogólną uzyskiwano z ośmiu próbek pierwotnych pobieranych z każdej 20 cm warstwy niesortu użytego do budowy modeli badawczych. Jedną losowo wybraną próbkę przepłukano. Dalsze postępowanie było takie jak w badaniach wstępnych. Uzyskane wartości średnic miarodajnych oraz wskaźników uziarnienia i wygięcia krzywej uziarnienia zawiera tablica 1.

Oznaczenie wilgotności optymalnej i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu dokonywano na minimum pięciu próbkach analitycznych o masie około 6 kg. Próbkę analityczną pozyskiwano z podziału próbki ogólnej o masie około 50 kg. Próbkę ogólną uzyskiwano z ośmiu próbek pierwotnych, pobieranych z każdej 20 cm warstwy niesortu użytego do budowy modeli badawczych. Badania maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu i wilgotności optymalnej przeprowadzono analogicznie jak w badaniach wstępnych. Wartości maksymalnych

gęstości objętościowych szkieletu oraz wilgotności optymalnych uzyskanych w poszczególnych oznaczeniach zawarte są w tablicy 2.

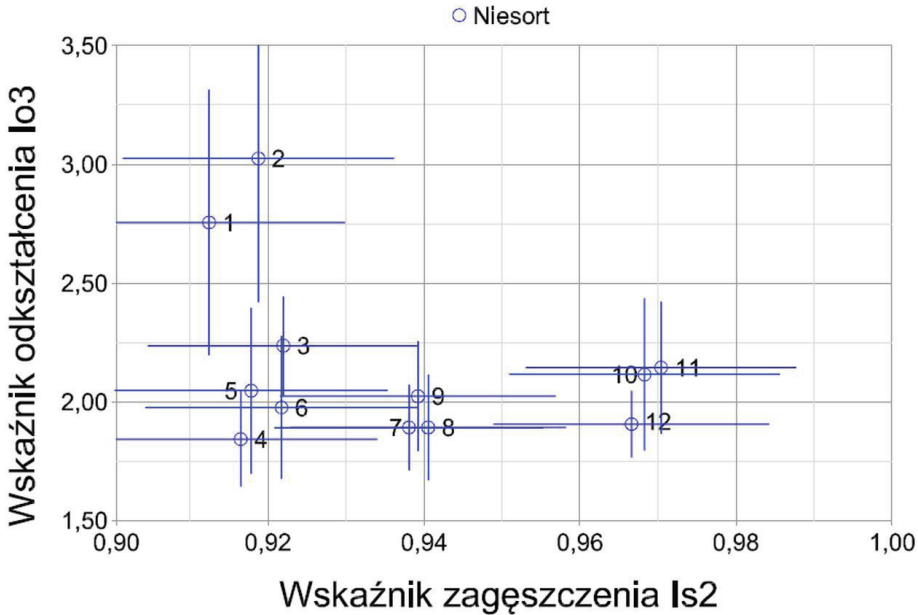
Ze względu na ilość używanego materiału do formowania modeli badawczych wielkość i liczba próbek analitycznych była niewystarczająca do pełnej oceny zmian właściwości stosowanego kruszywa. Można jednak stwierdzić, że zmiany uziarnienia niesortu oraz różnice uzyskiwanych wartości maksymalnych gęstości szkieletu po wielokrotnym jego użyciu do formowania modeli badawczych były niewielkie (tablica 1 i 2). Wobec powyższego w dalszych oznaczeniach przyjęto, że niesort kamienny użyty do badań mimo wielokrotnego wykorzystania tych samych partii materiału nie zmienia swoich właściwości.

3. Zależność wskaźników zagęszczenia i odkształcenia dla niesortu kamiennego

Wzajemnej zależności wskaźników zagęszczenia i odkształcenia poszukiwano stosując możliwie najprostsze funkcje z wykorzystaniem estymacji metodą najmniejszych kwadratów z algorytmem Gaussa-Newtona [12]. Ze względu na zależność stanu odkształcenia podtorza, w trakcie pomiarów płytą sztywną, od ocenianego stanu zagęszczenia, w celu właściwej interpretacji wyników, w analizie statystycznej zależności wskaźnika zagęszczenia od wskaźnika odkształcenia przyjęto zgodnie z warunkami rzeczywistymi: wskaźnik zagęszczenia jako zmienną niezależną, a wskaźnik odkształcenia jako zmienną zależną. Założono, że w analizie będą uwzględniane tylko te pary zbiorów wskaźników zagęszczenia i odkształcenia, dla których zostaną wyznaczone wartości współczynników korelacji z poziomem istotności nie większym niż 0,05 oraz wartości mocy test t braku korelacji pomiędzy analizowanymi zmiennymi, dla rozważanej liczby przypadków, nie mniejsze niż 0,8.

Dla zbiorów wartości wskaźników zagęszczenia wyznaczonych z uwzględnieniem zmiennej (Is1) i stałej (Is2) wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu po każdorazowym użyciu niesortu do formowania modeli badawczych (tab. 3, kol. 3 i 4) i zbiorów wartości wskaźników odkształcenia wyznaczonych z rzeczywistych (Io1 i Io2) i aproksymowanych (Io3 i Io4) krzywych osiadań (tab. 3, kol. 5 - 8) sporządzono wykresy rozrzutu oraz wyznaczono współczynniki kore-

lacji liniowej (tab. 4). Przykładowy wykres rozrzutu zmiennych z oznaczonymi błędami pomiarowymi przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Wykresy rozrzutu zbioru wartości wskaźników odkształcenia (I_{o3}) względem zbioru wartości wskaźników zagęszczenia (I_{s2}) modeli podtorza z niesortu kamiennego (12 przypadków)

Tablica 4. Współczynniki korelacji liniowej wskaźników zagęszczenia wyznaczonych na podstawie zmiennej (I_{s1}) oraz stałej (I_{s2}) wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu oraz wskaźników odkształcenia z badań modeli podtorza z niesortu kamiennego (12 przypadków)

	12 przypadków							
	Io1		Io2		Io3		Io4	
	r	p	r	p	r	p	r	p
Is1	0,003	0,992	0,034	0,916	-0,045	0,889	0,065	0,842
Is2	-0,246	-0,440	0,265	0,405	-0,359	0,252	-0,270	0,396

Uzyskane wartości współczynników korelacji wskazują na słabą liniową współzależność analizowanych zmiennych. Wobec powyższego podjęto próbę ustalenia zależności pomiędzy wskaźnikami zagęszczenia i odkształcenia estymując ich przebieg jedną z 4 funkcji:

$$I_o = c + e^{b-a \cdot I_s} \quad (3)$$

$$I_o = \frac{1 - a \cdot I_s}{I_s - b} \quad (4)$$

$$I_{\dot{o}} = \frac{I_s - b}{1 - a \cdot I_s} \quad (5)$$

$$I_{\dot{o}} = \frac{I_s - b}{I_s - a} \quad (6)$$

gdzie:

$$I_{\dot{o}} = \frac{1}{I_o} \quad (7)$$

W analizie uwzględniono tylko jedną parę zbiorów wartości wskaźników zagęszczenia (I_{s2}) i odkształcenia (I_{o3}), dla której uzyskano największą wartość współczynnika korelacji liniowej (tablica 4). Wyniki estymacji zależności zmiennych I_{s2} i I_{o3} wyżej wymienionymi funkcjami (3 - 6) zawarte są w tablicy 5.

Tablica 5. Zestawienie wyników estymacji zależności wskaźnika zagęszczenia i odkształcenia z badań modeli podtorza z niesortu kamiennego testowanymi krzywymi (12 przypadków)

Równanie	p	R	R^2	Błąd estymacji	Moc testu t
(3)	0,344	0,540	0,292	0,308	0,476
(4)	0,595	0,375	0,140	0,339	0,237
(5)	0,973	0,314	0,099	0,064	0,188
(6)	0,313	0,327	0,107	0,063	0,176

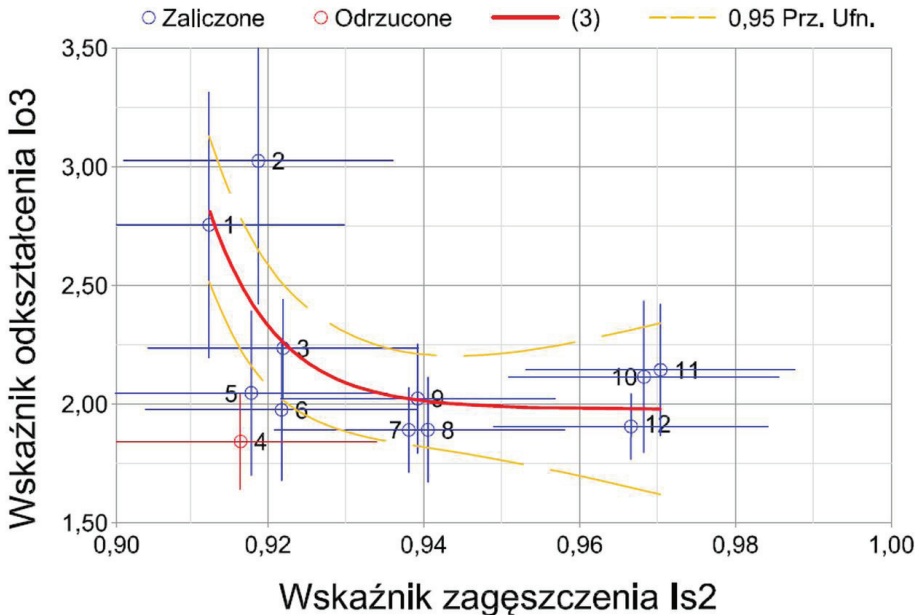
Po przeanalizowaniu parametrów testowanych funkcji (tab. 5) odzwierciedlających zależność pomiędzy zbiorami wskaźników zagęszczenia (I_{s2}) i odkształcenia (I_{o3}) do dalszych testów przyjęto zależność (3). Dla wszystkich analizowanych 12 przypadków nie uzyskano współczynników korelacji liniowej z założonym poziomem istotności oraz moc testu t o braku korelacji pomiędzy zmiennymi nie osiągnęła wymaganej wartości. Wobec tego, na podstawie analizy reszt i błędów pomiarowych, wyeliminowano jeden przypadek (nr 4, tab. 3, rys. 3). Dla zmodyfikowanego zbioru przypadków ponownie dokonano estymacji zależności $I_{o3}(I_{s2})$ funkcją o równaniu (3) (tab. 6).

Tablica 6. Zestawienie wyników estymacji zależności wskaźnika zagęszczenia i odkształcenia z badań modeli podtorza z niesortu kamiennego testowaną krzywą (11 przypadków)

Równanie	p	R	R^2	Błąd estymacji	Moc testu t
(3)	0,199	0,703	0,494	0,263	0,739

Estymując zależność zbiorów Is_2 i Io_3 funkcją o równaniu (3) uzyskano współczynnik korelacji $R = 0,703$ zapewniający uzyskanie mocy testu t o braku korelacji pomiędzy zmiennymi równej 0,739 o 7,6 % mniejszej od wartości granicznej. W celu uzyskania bardziej wiarygodnych wyników – o mniejszym poziomie istotności oraz większej wartości mocy testu t o braku zależności zmiennych – należałoby uzupełnić zbiór przypadków dodatkowymi wynikami badań zasadniczych.

Sporządzono wykres rozrzutu wartości wskaźników zagęszczenia Is_2 i odkształcenia Io_3 z oznaczoną funkcją zależności pomiędzy tymi zmiennymi według równania (3) (rys. 4).



Rys. 4. Wykresy rozrzutu zbioru wartości wskaźników odkształcenia (Io_3) względem zbioru wartości wskaźników zagęszczenia (Is_2) modeli podtorza z niesortu kamiennego z oznaczoną krzywoliniową zależnością (3) (11 przypadków)

Sformułowana, w oparciu o stałą wartość maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu, niezależną od krotności użycia kruszywa do

formowania modeli podtorza, zależność pomiędzy zmiennymi I_s i I_o (rys. 4) jest obowiązująca dla niesortu kamiennego, w zakresie wartości wskaźnika odkształcenia od 1,89 do 3,02 wyznaczonego z aproksymowanych krzywych odkształceń z zakresu obciążeń od 0,15 do 0,25 MPa.

4. Wnioski

1. Małym zmianom wskaźnika zagęszczenia towarzyszą duże zmiany wskaźnika odkształcenia.
2. Zależność wskaźników zagęszczenia i odkształcenia jest nieliniowa.
3. Do oceny zależności wskaźników zagęszczenia i odkształcenia najkorzystniejsze z analizowanych zbiorów zmiennych okazały się: zbiór wartości wskaźników odkształcenia określonych z aproksymowanych krzywych osiadań wyznaczony zgodnie z [11] oraz zbiór wartości wskaźników zagęszczenia określony z uwzględnieniem niezmiennych właściwości kruszywa przy wielokrotnym jego wykorzystaniu do formowania modeli badawczych.

Bibliografia

- [1] BN-88/8932-02 *Podtorze i podłoże kolejowe – Roboty ziemne – Wymagania i badania*. WN „ALFA”, Warszawa 1989r.
- [2] Id-3. *Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego*. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa 2009r.
- [3] Pawłowski M.: *Badania na wielkowymiarowym modelu podtorza kolejowego*. Technika Transportu Szybowego nr 4/2010, str. 44-48.
- [4] Pawłowski M.: *O badaniach wielkowymiarowych modeli podtorza kolejowego*. Przegląd Komunikacyjny 11-12/2010, s. 28-33.
- [5] Pawłowski M.: *Zależność wskaźnika zagęszczenia i wskaźnika odkształcenia kruszyw na podstawie próbnich obciążeń płytą statyczną*. Rozprawa doktorska Politechnika Poznańska, Poznań 2010r.

- [6] Pawłowski M.: *Zależność wskaźnika zagęszczenia i wskaźnika odkształcenia z próbnych obciążeń modeli podtorza z piasku średniego*. Przegląd Komunikacyjny 9-10/2011, s. 92-97.
- [7] PN-EN 13286-2 *Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym – Część 2: Metody określania gęstości i zawartości wody – Zagęszczanie metodą Proctora*. PKN, Warszawa 2007r.
- [8] PN-EN 932-2 *Badania podstawowych właściwości kruszyw – Metody pomniejszania próbek*. PKN, Warszawa 1999 r.
- [9] PN-EN 933-1 *Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Oznaczenie składu ziarnowego – Metoda przesiewania*. PKN, Warszawa 2000r.
- [10] PN-EN 933-2 *Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Oznaczenie składu ziarnowego – Nominalne wymiary otworów sit badawczych*. PKN, Warszawa 1999r.
- [11] PN-S-02205 *Drogi samochodowe – Roboty ziemne – Wymagania i badania*. PKN, Warszawa 1998 r.
- [12] Volk W.: *Statystyka stosowana dla inżynierów*. WNT, Warszawa 1973r.

RELATIONSHIP BETWEEN COMPACTION RATIO AND DISTORTION RATIO USING TEST LOADS OF MODELS OF MINERAL MIXTURE (0-31.50 MM) SUBGRADE

Summary

The paper presents laboratory test results of large-scale models of a subgrade of mineral mixture (0-31.50 mm). The described work is one of the research stages devoted to determination of the relationship between compaction rates and distortion rates, which try to estimate the state of subgrade density. The paper shows the progress and results of preliminary, principal and check research. Using the test results, the relationship between compaction ratio and distortion ratio was elaborated. Finally, the experimental tests and results were concluded.

Keywords: *railroad, subgrade, research the state of the compaction*