

mgr inż. Remigiusz Gut^{1)*}

ORCID: 0000-0002-3327-4142

dr inż. Andrzej Duszyński¹⁾

ORCID: 0000-0002-8842-5630

dr Wiktor Jasiński¹⁾

ORCID: 0000-0001-6612-4207

mgr inż. Piotr Rychlewski²⁾

ORCID: 0000-0002-5477-5205

mgr inż. Robert Sołtysik³⁾

ORCID: 0000-0001-8584-8948

Badania paneli z gruntobetonu i fibrogruntobetonu do wzmocnienia nasypów kolejowych

Testing of soil-concrete and fiber-soil-concrete panels for reinforcing railway embankments

DOI: 10.15199/33.2023.02.12

Streszczenie. W artykule przedstawiono prace badawcze będące częścią projektu dotyczącego opracowania technologii DLM do wzmocnienia podtorza kolejowego. Technologia polega na wykonaniu w gruncie in situ dwóch ciągłych i równoległych paneli z gruntobetonu, tj. mieszanki gruntu rodzimego, cementu, wody i ewentualnie dodatków. Badano wytrzymałość i odporność na obciążenia cykliczne paneli wykonanych z gruntobetonu oraz gruntobetonu z dodatkiem włókien, tzw. fibrogruntobetonu. Wyniki potwierdzają spełnienie wymagań ustalonych jako kamienie milowe projektu dotyczącego paneli z obu materiałów.

Słowa kluczowe: gruntobeton; fibrogruntobeton; badania zmęczenia; stabilizacja gruntu; kolej.

Abstract. The article presents research works that are part of the project to develop the DLM technology for strengthening the railway subgrade. The technology consists in making two recessed, continuous and parallel panels of soil-concrete, i.e. a mixture of native soil, cement, water and possible additives. The strength and resistance to cyclic loads of panels made of soil concrete without additives and soil concrete with fibers were prepared. The results confirm that the requirements set as project milestones for panels in both materials are met.

Keywords: soil-concrete; soil concrete with fibers; fatigue tests; soil stabilization; railway.

Dośkonalenie technologii CDMM (*Continuous Deep Mixing Method*), czyli ciągłego wgłębnego mieszania gruntu z zaczynem cementowym, pozwala na wykonywanie coraz większej liczby posadowień obiektów inżynierskich i wzmocnienia podłoża pod nasypy drogowe. Opracowanie przez zespół badawczy z firmy Soley, Instytutu Badawczego Dróg i Mostów oraz Politechniki Krakowskiej narzędzia do realizacji technologii CDMM (tzw. *Trenchmixingu*), z pionowym zagłębieniem miecza w grunt, czyli prowadnicy zaopatrzonej w łańcuch z narzędziami skrawającymi, stało się kamieniem milowym w przypadku tej metody. Projektanci opracowują, a ekipy wykonawcze realizują ruszty przestrzenne o skomplikowanym niejednokrotnie kształcie dostosowanym do podpór wiaduktów, mostów, przepustów i przejść dla zwierząt, natomiast wzmocnienie podłoża pod na-

sypy drogowe przyjmuje najczęściej kształt równoległe ułożonych pasków z paneli gruntobetonowych o odpowiednio dobranej grubości, głębokości i rozstawie. Na bazie doświadczeń z realizacji wzmocnień podłoża pod nasypy drogowe opracowano koncepcję podobnych konstrukcji liniowych do wzmocnienia podtorza kolejowego oraz narzędzie o podwójnym mieczu (o rozstawie 1435 mm), do jednoczesnego wykonywania dwóch paneli wzmocniających podtorze. Projekt narzędzia, jego skonstruowanie, wykonanie próbnego paneli podwójnych, badań laboratoryjnych oraz poligonowych są częścią programu badawczego o akronimie DLM (*Double Linear Mixing*). Etap badań przemysłowych i jego wyniki są przedmiotem artykułu.

Stanowisko badawcze i parametry badań

Badania przeprowadzono na stanowisku do badań dynamicznych i zmęczeniowych STEND, znajdującym się w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów – Filia Wrocław (IBDiM-Filia Wrocław). Tworzy je fundament żelbe-

towy o długości 80,0 m i szerokości 12,0 m wraz z halą oraz stalową ramą stanowiącą konstrukcję oporową urządzeń hydraulicznych wymuszających obciążenia. Wyposażono je w układ siłowników hydraulicznych SCHENCK wraz z systemami pomiarowymi, sterowania i zasilania. Aparatura umożliwia przeprowadzanie badań wytrzymałości pod obciążeniami zmiennymi o dowolnym przebiegu (np. w cyklu sinusoidalnym, trapezowym itp.) i rejestrację zachowania badanych elementów za pomocą systemu przetworników przemieszczeń, przetworników siły, tensometrów, presjometrów oraz innych czujników i przetworników.

Badane panele o grubości 0,6 m zostały wykonane na poligonie doświadczalnym firmy SOLEY sp. z o.o.: pierwszy rodzaj – z gruntobetonu, tj. gruntu in situ i cementu CEM I 42,5, a drugi z fibrogruntobetonu, tj. gruntu in situ, cementu CEM I 42,5 oraz pociętych włókien polipropylenowych fibro. Następnie panele przetransportowano na stanowisko badawcze STEND w IBDiM-Filia Wrocław, gdzie zostały zabudowane w modelowym nasypie kolejowym,

¹⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów – Filia Wrocław

²⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów

³⁾ SOLEY sp. z o.o.

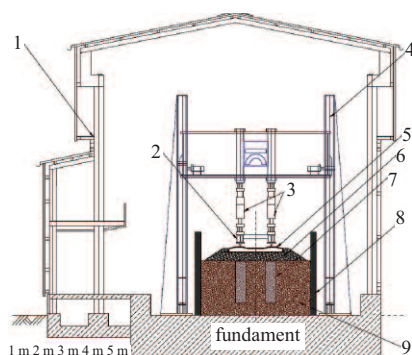
*) Adres do korespondencji: rgut@ibdim.edu.pl

na którym wykonano fragment torowiska o długości 4,5 m na podkładach strunobetonowych i szynach typu 60E1 [1], z warstwą tłucznia kolejowego o grubości 0,35 m. Obciążenia przekazywano za pomocą dwóch zsynchronizowanych siłowników i konstrukcji rozkładającej siły na cztery punkty, symulującej dwuosiowy wózek kolejowy o rozstawie osi 1,6 m, zgodnie z modelem obciążenia LM-71 [2] (fotografia 1 i rysunek 1).

Badania miały na celu określenie odporności paneli na działanie zmiennych, cyklicznie powtarzających się obciążeń symulujących ruch taboru kolejowego wg modelu obciążenia LM-71 (250 kN/oś) (250 kN/oś). Zastosowano sinusoidalny kształt cyklu zmian obciążenia o częstotliwości 1,35 Hz (rysunek 2), wykonując co najmniej 500 000 cykli obciążania/odciążania.



Stanowisko badawcze STEND wraz z modelem z zabudowanymi panelami
STEND test stand with a model with built-in panels



Oznaczenia: 1 – hala stanowiska badawczego STEND; 2 – rama rozkładająca obciążenie; 3 – siłowniki; 4 – rama obciążająca stanowiska badawczego STEND; 5 – torowisko kolejowe; 6 – warstwa tłucznia kolejowego; 7 – badane panele; 8 – ściany oporowe stanowiska badawczego STEND; 9 – nasyp

Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego STEND wraz z badanymi panelami z gruntobetonu i fibrogruntobetonu

Fig. 1. Scheme of the STEND test stand with the tested soil-concrete walls

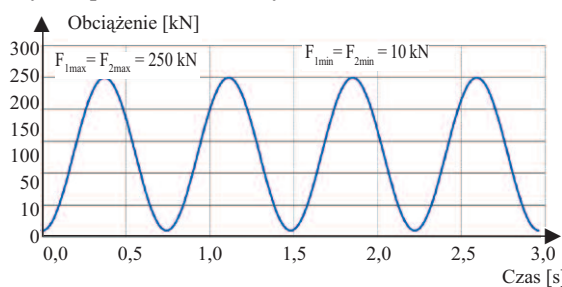
Do pomiarów zastosowano następujące czujniki pomiarowe (rysunek 3):

- indukcyjne przetworniki przemieszczenia o zakresie pomiarowym 100 mm, zamocowane nad punktami przyłożenia obciążeń do szyn (oznaczenia P1, P2, P3 i P4);
- potencjometryczne przetworniki przemieszczenia o zakresie pomiarowym 75 mm zamocowane do główek szyn, w punktach oddalonych o 500 mm

od przyłożenia obciążeń (oznaczenia P5, P6, P7 i P8);

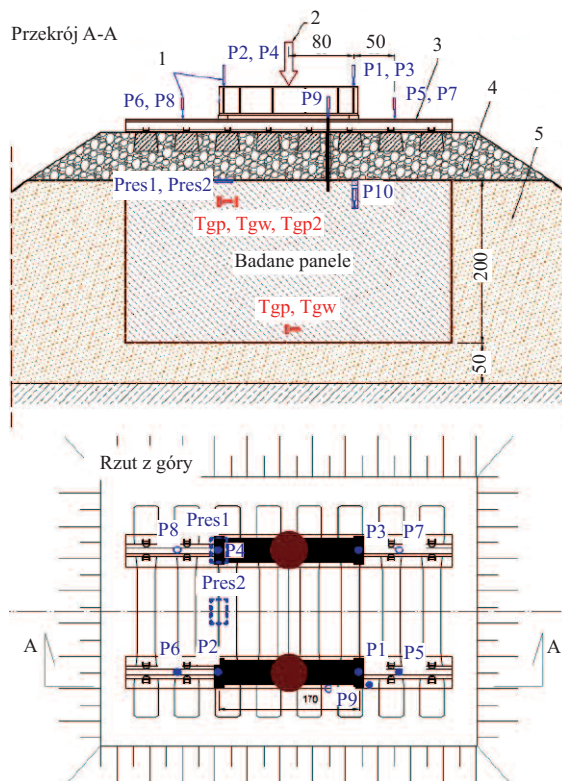
- czujnik przemieszczenia LVDT o zakresie pomiarowym 6 mm do pomiarów przemieszczenia pionowego górnej powierzchni ściany (oznaczenie P9);
- czujnik przemieszczenia LVDT o zakresie pomiarowym 6 mm, do pomiaru odkształcenia górnej części panelu, pod punktem przyłożenia obciążenia, zainstalowany w otworze (oznaczenie P10);
- presjometry o zakresie pomiarowym do 0,5 MPa do pomiarów nacisku pod warstwą tłucznia kolejowego, na górnej powierzchni panelu oraz na warstwie gruntu pomiędzy ścianami (oznaczenia Pres1 i Pres2);
- tensometry foliowe, elektrooporowe o długości pomiarowej 50 mm do pomiarów odkształceń materiału paneli w kierunku pionowym i wzdłużnym, zainstalowane w górnej i dolnej części paneli (oznaczenia Tdg, Tgp, Tgw i Tdw).

Do wyznaczenia naprężeń w materiale paneli przyjęto moduł sprężystości 2200 MPa, otrzymany na podstawie badań odwiertów rdzeniowych pobranych z paneli.



Rys. 2. Schemat przebiegu obciążeń cyklicznych (obciążenia na jedną oś)

Fig. 2. Scheme of cyclic loads (loads on one axis)



Oznaczenia: 1 – czujniki przemieszczenia; 2 – siła F_1 i F_2 ; 3 – torowisko kolejowe; 4 – warstwa tłucznia kolejowego; 5 – zasypka gruntowa

Rys. 3. Schemat rozmieszczenia czujników pomiarowych

Fig. 3. Scheme of measuring sensors arrangement

Metody i wyniki badań gruntu

Próbki gruntu pobrano w Kryspinowie w miejscu wykonania paneli z gruntobetonu i fibrogruntobetonu (27.02.2020 r.) zgodnie z PN-EN ISO 22475-1:2006 [3]. Przygotowywano je do badań metodą kwartowania wg PN-EN 932-2:2001 [4]. Klasyfikację nazw gruntu wg PN-B-02480:1986 [5] i PN-EN ISO 14688-1:2018 [6] zamieszczono w tabeli 1. Badania laboratoryjne gruntu przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 16907-2:2019 [7], określając jego parametry wewnętrzne i stanu. Badania makroskopowe gruntu

wykonywano na podstawie algorytmu procedury oznaczania i opisu gruntów zamieszczonego w PN-EN ISO 14688-1:2018 [6] wg Id-3, Załącznik 3 [8], które są badaniami wskaźnikowymi określania cech gruntu. W tabeli 2 zamieszczono wyniki badań gruntu ze względu na potrzebę ich ulepszenia.

120 s. Przemieszczenia pionowe górnej powierzchni główki szyny podczas działania pierwszego obciążenia badawczego osiągnęły do 5,8 mm w przypadku modelu z panelami z fibrogruntobetonu i do 3,1 mm w przypadku modelu z panelami z gruntobetonu. Przemieszczenia pionowe górnej po-

w przypadku modelu z panelami z gruntobetonu (rysunki 5 i 6). W tym czasie przemieszczenia pionowe górnej powierzchni paneli każdego z modeli osiągnęły 1,9 mm.

Tabela 1. Klasyfikacja nazwy pobranych próbek gruntu

Table 1. Classification of the name of the collected soil samples

Głębokość pobrania próbki [m]	Nazwa próbki	Zawartość ziaren [%] w zależności od ich średnicy [mm]				Klasyfikacja nazwy gruntu wg	
		>2,00	2,00 ÷ 0,05	0,05 ÷ 0,002	<0,002	PN-B-02480:1986 [5]	PN-EN ISO 14688-1:2018 [6]
1	G1	1,0	76,0	19,0	4,0	–	–
2	G2	0,0	75,0	19,0	6,0	piasek gliniasty Pg	piasek pylasty siSa piasek ilasty ciSa

Tabela 2. Wyniki badań gruntu wg PN-EN 16907-2:2019 [7]

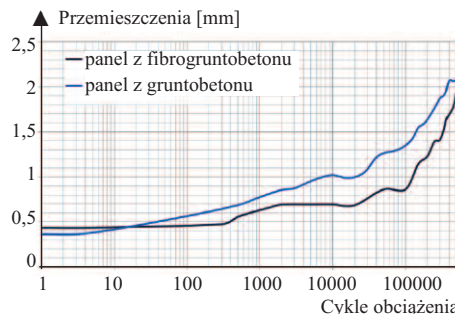
Table 2. Results of soil tests according to PN-EN 16907-2:2019 [7]

Właściwości	Wyniki dla miejsca pobrania		Metody badania wg
	G1	G2	
Parametry wewnętrzne			
Kształt krzywej uziarnienia gruntu	gruboziarnisty; dobrze uziarniony (wielofrakcyjny)		PN-EN ISO 14688-1:2018 [6]
Wskaźnik piaskowy SE ₄ [%]	24	20	PN-EN 933-8+A1:2015 [9]
Części organiczne (w temperaturze 480°C) [%]	3,9	4,6	PN-EN 1744-1+A1:2013 [10]
Zagęszczenie metodą Proctora	–	–	
– optymalna zawartość wody [%]	8,2	8,7	PN-EN 13286-2:2010 [11]
– maksymalna gęstość objętościowa szkieletu ziarnowego [Mg/m ³]	2,035	2,054	
Gęstość ziarn i nasiąkliwość	–	–	
– gęstość objętościowa ziarn [Mg/m ³]	2,639	2,636	
– gęstość ziarn wysuszonych w suszarce [Mg/m ³]	2,623	2,610	PN-EN 1097-6:2013 [12] rozdział 7
– gęstość ziarn nasączonych i powierzchniowo osuszonych [Mg/m ³]	2,629	2,619	
– nasiąkliwość [%]	0,2	0,4	
Oznaczenie makroskopowe frakcji drobnoziarnistej	–	pył-ił	PN-EN ISO 14688-1:2018 [6]
Chemiczne: węglan wapnia [%]	–	0,23	PN-EN ISO 10693:2014 [13]
– chlorki rozpuszczalne w kwasie [%]	–	<0,01	PN-EN 1744-5:2008 [14]
– siarczany rozpuszczalne w kwasie [%]	–	<0,01	PN-EN 1744-1+A1:2013 [10]
– odczyn po 2 godzinach [pH]	–	6,8	PN-ISO 10390:1997 [15]
Parametry stanu			
Wilgotność naturalna [%]	13,3	13,3	PN-EN 1097-5:2008 [16]
Wskaźnik CBR (natychmiastowy) [%]	65	65	
Wskaźnik CBR po 4 dobach [%]	24	33	PN-EN 13286-47:2012 [17]
Potencjał na pęcznienie (po 4 dobach) [%]	0,0	0,0	

Wyniki badań modeli z panelami z gruntobetonu i fibrogruntobetonu

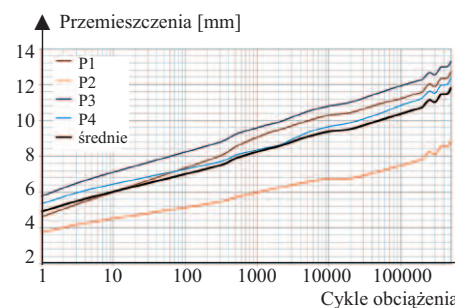
Przed badaniami pod obciążeniami zmiennymi przeprowadzono badanie pod obciążeniem wolnozmiennym, z utrzymaniem siły badawczej przez

wierzchni paneli osiągnęły natomiast odpowiednio 0,43 i 0,37 mm (rysunek 4). Po wykonaniu 500 000 cykli obciążania/odciążania, przemieszczenia pionowe główek szyn wyniosły 13,3 mm w przypadku modelu z panelami z fibrogruntobetonu i do 8,4 mm



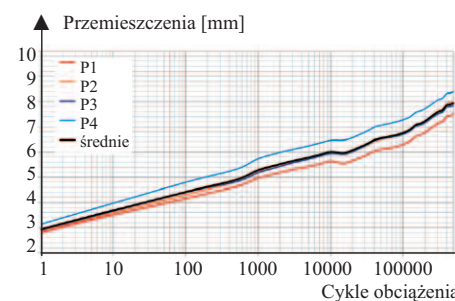
Rys. 4. Przemieszczenia pionowe górnej powierzchni paneli podczas obciążeń cyklicznych

Fig. 4. Vertical displacements of the top surface of panels during cyclic loads



Rys. 5. Przemieszczenia pionowe w punktach nacisku na szynę w czasie obciążeń cyklicznych – model z panelami z fibrogruntobetonu

Fig. 5. Vertical displacements at the pressure points on the rail during cyclic loads – model with soil-concrete panels with fibers



Rys. 6. Przemieszczenia pionowe w punktach nacisku na szynę w czasie obciążeń cyklicznych – model z panelami z gruntobetonu

Fig. 6. Vertical displacements at the pressure points on the rail during cyclic loads – model with soil-concrete panels

Po przeprowadzeniu zakładanej liczby cykli obciążeń panele zostały odsłonięte w celu skontrolowania m.in. pęknięć, zmiażdżeń, wykruszeń oraz pobrania odwiertów do badania wytrzymałości

na ściskanie. Po odsłonięciu panele obu typów zachowały integralność, stabilność i fakturę powierzchni, nie stwierdzono żadnych uszkodzeń badanych elementów.

Badania wytrzymałości na ściskanie wykonano wg PN-EN 13286-41:2005 [18] na próbkach walcowych o średnicy 0,153 m wyciętych z paneli z gruntobetonu i fibrogruntobetonu, z miejsc bezpośrednio poddanych obciążeniu O i nieobciążonych N (tabela 3).

Tabela 3. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie wyciętych próbek z paneli wykonanych z gruntobetonu i fibrogruntobetonu

Table 3. Compressive strength test results of cut samples from panels made of soil concrete and soil concrete with fibers

Rodzaj materiału	Miejsce pobrania	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]
Gruntobeton	N – nieobciążone	2,6
	O – obciążone	3,1
Fibrogruntobeton	N – nieobciążone	4,1
	O – obciążone	4,5

Przeprowadzone badania potwierdziły, że długotrwałe obciążenia cykliczne nie mają negatywnego wpływu na wytrzymałość na ściskanie wyciętych próbek z paneli z gruntobetonu i fibrogruntobetonu.

Pomiary z presjometrów zainstalowanych pod warstwą tłuczni kolejowego wykazują, że panele podczas badań mogły przenieść 43 ÷ 55% obciążeń od taboru kolejowego, mimo mniejszej powierzchni w porównaniu z powierzchnią gruntu narażoną na rozłożone obciążenia badawcze. Jest to uzasadnione ze względu na większą sztywność paneli w porównaniu ze stosunkowo podatnym gruntem otaczającym zasypkę. Ponadto panele przekazują przenoszone obciążenia na znaczną głębokość, ograniczając niekorzystny wpływ na nasyp oraz budowle i urządzenia znajdujące się w pobliżu torowiska w rzeczywistych warunkach.

Analiza wyników zarejestrowanych za pomocą presjometrów, przetworników przemieszczeń i tensometrów wykazała, że zarówno w przypadku elementów z gruntobetonu, jak i fibrogruntobetonu, występujące w materiale panele naprężenia przy największych dopuszczalnych obciążeniach kolejowych (250 kN/oś) są wielokrotnie mniejsze (maksymalnie do 0,22 MPa w jednym

z punktów pomiarów tensometrycznych) od zbadanej laboratoryjnie wytrzymałości gruntobetonu na ściskanie (średnia wytrzymałość na ściskanie próbek gruntobetonu 3,6 MPa).

Przemieszczenia pionowe torowiska mierzone na górnej powierzchni główek szyn zawierają duży narzut spowodowany brakiem możliwości użycia na stanowisku badawczym ciężkiego, specjalistycznego sprzętu do podbijania podkładów. Potwierdza to porównanie przemieszczeń pionowych górnej powierzchni paneli (1,9 mm po 500 000 cykli obciążeń w obydwu modelach) w porównaniu z przemieszczeniami główek szyn (do 13,3 mm w jednym z punktów pomiarowych na torowisku na panelach z fibrogruntobetonu). Przemieszczenia pionowe szyn wynikają więc głównie z dogęszczenia warstwy tłuczni, ale również z zastosowania wkładek amortyzujących między szynami a podkładami strunobetonowymi. Ponadto nieruchomy układ siłowników zastosowany w badaniach jest bardziej niekorzystny, ponieważ generuje narastające przemieszczenia zlokalizowane w miejscach przyłożenia obciążeń.

Podsumowanie

Przedstawione badania były jednym z etapów projektu zakończonego opracowaniem rozwiązania technologicznego do wykonywania ciągłych wzmocnień podtorza kolejowego z gruntu rodzimego mieszanego z cementem. Wyniki prac przemysłowych potwierdziły osiągnięcie kamieni milowych projektu i pozwoliły przejść do badań rozwojowych. Kolejny etap badawczy obejmował wykonanie paneli i długotrwałych badań cyklicznych na poligonie doświadczalnym, w celu sprawdzenia ich wytrzymałości w rzeczywistych warunkach oraz sprawdzenia wpływu sąsiadujących obciążeń działających podczas wiązania paneli na ich wytrzymałość. Jego pozytywne efekty pozwolą przejść do etapu wdrażania technologii podwójnych ścian gruntobetonowych pod liniami kolejowymi i innymi nasypami komunikacyjnymi.

Literatura

[1] Warunki Techniczne Wykonania i Odbioru Szyn Kolejowych – Wymagania i badania Id-106 (Załącznik do uchwały nr 139/2019 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z 5.03.2019 r.).

[2] PN-EN 1991-2:2007 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – Część 2: Obciążenia ruchome mostów.

[3] PN-EN ISO 22475-1:2006 Rozpoznanie i badania geotechniczne. Metody poboru próbek oraz pomiarów wody gruntowej. Część 1: Zasady techniczne poboru próbek gruntu, skał oraz wody gruntowej.

[4] PN-EN 932-2:2001 Badania podstawowych właściwości kruszyw. Metody pomniejszania próbek laboratoryjnych.

[5] PN-B-02480:1986 Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.

[6] PN-EN ISO 14688-1:2018 Rozpoznanie i badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Oznaczanie i opis.

[7] PN-EN 16907-2:2019 Roboty ziemne. Część 2: Klasyfikacja materiałów.

[8] Id-3 Załącznik 3 (normatywny) wg Id-3. Oznaczenie wilgotności i zagęszczenia gruntów metodami wzorcowymi.

[9] PN-EN 933-8+A1:2015 Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Część 8: Ocena zawartości drobnych cząstek. Badanie wskaźnika piaskowego.

[10] PN-EN 1744-1+A1:2013 Badania chemicznych właściwości kruszyw. Część 1: Analiza chemiczna.

[11] PN-EN 13286-2:2010 Mieszanki niezwiązane i związane hydraulicznie. Część 2: Metody badań laboratoryjnych gęstości na sucho i zawartości wody. Zagęszczanie metodą Proctora.

[12] PN-EN 1097-6:2013 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Część 6: Oznaczanie gęstości ziarn i nasiąkliwości.

[13] PN-EN ISO 10693:2014 Jakość gleby. Oznaczanie zawartości węglanów. Metoda objętościowa.

[14] PN-EN 1744-5:2008 Badania chemicznych właściwości kruszyw. Część 5: Oznaczanie soli chlorkowych rozpuszczalnych w kwasie.

[15] PN-ISO 10390:1997 Jakość gleby. Oznaczanie pH.

[16] PN-EN 1097-5:2008 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Część 5. Oznaczanie zawartości wody przez suszenie w suszarce z wentylacją.

[17] PN-EN 13286-47:2012 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym. Część 47: Metoda badania kalifornijskiego wskaźnika nośności, natychmiastowego wskaźnika nośności i pęcznienia liniowego.

[18] PN-EN 13286-41:2005 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym. Część 41: Metoda badania wytrzymałości na ściskanie mieszanek związanych hydraulicznie.

Przedstawione badania zostały wykonane w ramach projektu POIR. 01.01.01-00-0493/19 „Innowacyjna, ekonomiczna technologia DLM wzmocnienia nasypu kolejowego”, dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020 zgodnie ze sprawozdaniami S1/21/TW-1 i S1/22/TW-1.

Przyjęto do druku: 31.01.2023 r.