

Ocena zachowania zmęczeniowego podbudów drogowych z odpadu ze wzbogacania rudy żelaznej lub ze żwiru, stabilizowanych cementem

Fatigue performance evaluation of the mixture from iron-ore tailings, and gravel stabilized with cement

1. Wprowadzenie

W Chinach rośnie zapotrzebowanie na rudę żelazną bowiem przemysł metalurgiczny rozwija się szybko. Jednak, w procesie wytwarzania koncentratu z rudy powstają znaczne ilości odpadów przemysłowych, w tym również kawałkowe pozostałości po przesiewaniu rudy. Małe wykorzystanie tego granulatu spowodowało kłopoty z jego hałdowaniem. Zajmują one duże tereny, związane z zanieczyszczeniem środowiska, a także powodują rosnące koszty (1–3). W związku z tymi niekorzystnymi efektami ubocznymi w szeregu krajach podjęto badania nad wykorzystaniem tego granulatu (4–6). Równocześnie rośnie zapotrzebowanie na żwir, ponieważ przemysł budowlany oraz budowa autostrad rozwijają się także szybko, w związku z tym rośnie zapotrzebowanie na kruszywa. Przyczyniło się to do niedoboru żwirów. Gdyby odpady ze wzbogacania rudy żelaznej, zwane dalej granulatem rudy żelaznej, mogły znaleźć zastosowanie w budowie dróg, jako podbudowa pod nawierzchnię drogową, mogłoby to rozwiązać problem niewielkich zasobów żwiru, zmniejszyć zanieczyszczanie środowiska oraz obniżyć koszty robót drogowych.

W pracy przeprowadzono badania zachowania zmęczeniowego podbudów złożonych z granulatu rudy żelaznej i dla porównania ze żwiru, stabilizowanych cementem. Porównano wyniki badań podbudów złożonych z granulatu rudy żelaznej stabilizowanego cementem ze żwirem, także stabilizowanego cementem, w celu potwierdzenia możliwości zastosowania tego odpadu w budowie dróg.

2. Materiały i metody

Uziarnienie granulatu rudy żelaznej i naturalnego żwiru, zastosowanych w doświadczeniach, podano w tablicy 1. Właściwości cementu portlandzkiego 32,5 podano w tablicy 2, a charakterystykę domieszki zwiększającej lepkość ZL-2A w tablicy 3.

Skład mieszanki złożonej z granulatu rudy żelaznej lub żwiru stabilizowanych cementem wyznaczono w oparciu o następujące

1. Introduction

The demand for iron-ore is increasing as China steel industry is rapidly developing and growing. However, during the industrial process in which the iron-ore concentrate is extracted from the iron-ore, a large quantity of industrial wastes, such as iron-ore tailings, are generated. The low efficiency of iron-ore tailings utilization has caused serious storage problems. This results in land occupation, environmental pollution, and high maintenance costs (1–3). Because of these negative side effects, the multipurpose utilization of the iron-ore tailings has been taken into account in several countries (4–6). Meanwhile, as the construction industry and highway industry are also rapidly developing, there is an increasing demand for gravel. This has resulted in increasing scarcity of gravel reserves. If the iron-ore tailing can be utilized in the road construction as a pavement base layer, this can help relieve the burden of sparse resources, alleviating environmental pollution and decreasing construction costs.

In this study the fatigue performances of iron-ore tailings stabilized with cement, as gravel, used as foundation was verified. A comparison between iron-ore tailings stabilized with cement, and natural gravel also stabilized with cement, was examined to provide the theoretical support for the application of this new material in the road building.

2. Materials and methods

The grading of iron-ore tailings, and natural gravel used in the experiment are shown in Table 1. The performance indicators of ordinary Portland cement 32.5, used in the test, are depicted in Table 2. The chemical admixture used in the test is solidifying agent ZL-2A and its properties are shown in Table 3.

The mixture proportion of iron-ore tailings stabilized with cement was determined based on: 1) the compressive strength requirement for soil stabilized with cement in the secondary roads or low level roads from "Technical specification for construction of

Table 1 / Tablica 1

UZIARNIENIE GRANULATU RUDY ŻELAZNEJ I NATURALNEGO ŻWIRU
GRADING OF IRON ORE TAILINGS AND OF TYPICAL GRAVEL

Material	Percent passing, %, through sieve, mm												
	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
Iron ore tailings							100	99.9	98.9	91.8	45.5	17.0	6.0
Typical gravel	100	94.3	88.6	86.3	84.0	78.1	64.0	48.8	35.2	25.8	18.2	15.2	14.1

Table 2 / Tablica 2

WŁAŚCIWOŚCI CEMENTU
PROPERTIES OF CEMENT

Fineness max diameter of particles μm	Stability test	Setting time		Strength after days, MPa			
		Initial	Final	7 compressive	7 flexural	28 compressive	28 flexural
80	Pass	2h10min	5h50min	31.1	5.1	45.5	8.0

Table 3 / Tablica 3

WŁAŚCIWOŚCI DOMIESZKI ZWIĘKSZAJĄCE LEPKOŚĆ
PROPERTIES OF SOLIDIFYING ADMIXTURE ZL-2A

Property	Value
Appearance	Dark red-brown liquid
pH	≥ 11
Solubility	Completely dissolved
Density at 20°C, g/cm^3	1.26 \pm 0.03
Solid content, %	≥ 33
Alkalinity, NaOH %	7.0–9.5

dane: 1) wymagania dotyczące wytrzymałości na ściskanie gruntu utwardzanego cementem, w przypadku dróg lokalnych zaczerpnięte z przepisów „Wymagania techniczne dla budowy autostrad” (JT034 – 2000) (2,7) i 2) zasady oszczędzania cementu przy stosowaniu granulatu rudy żelaznej w miejsce żwiru. Podbudowy z cementu, żwiru, granulatu rudy żelaznej i domieszki chemicznej miały skład: 4:48:48:0,02. Żwir stabilizowany cementem także zbadano dla porównania; zawierał on 4% cementu. Wyniki prób zagęszczania mieszanek podano w tablicy 4.

Próbki do doświadczeń miały optymalną zawartość wody. Maksymalne gęstości, podane w tablicy 4, dotyczą stopnia zagęszczenia bliskiego 98%. Kształtki miały wymiary 100 mm x 100 mm x 400 mm. Mieszanki przygotowane w laboratorium umieszczano w formie w dwóch warstwach i zagęszczano równomiernie za pomocą pręta do sztychowania. Następnie formy umieszczano w maszynie prasującej i zwiększano nacisk aż do równomiernego zagęszczenia obu warstw mieszanki. Następnie przeprowadzano końcowe zagęszczenie w maszynie w ciągu pięciu minut. Próbkę wyjmowano z form i umieszczano w szczelnych woreczkach plastikowych na cztery godziny. Ostatecznie próbki, po wyjęciu z woreczków, dojrzewały przez trzy miesiące w komorze w WW 95% i w temperaturze 20 \pm 2°C.

Table 4 / Tablica 4

BADANIE ZAGĘSZCZANIA
COMPACTION TEST

Mixture	Maximum density, g/cm^3	Optimum water content, %
Iron ore tailings stabilized with cement	2.181	8.5
Gravel stabilized with cement	2.230	6.0

highway pavement” (JTJ034—2000) (7) and 2) the principle of saving cement by using iron-ore tailings as gravel. The mixing proportion of cement, gravel, iron-ore tailing and curing agent was 4:48:48:0.02. The gravel stabilized with cement was also used for comparison, comprised of 4% of cement and 96% of gravel. The compaction test data is shown in Table 4.

The test specimens are made using the optimum water content. The maximum density, shown in the table, with compaction degree amounted to 98%. The specimen dimension was 100 mm x 100 mm x 400 mm. The laboratory prepared mixture was put into the mold in two layers and pressed uniformly by a tamping rod. Then, the mold was placed under the pressing machine. The pressure was increased until both the upper and the lower compacts were fully pressed in the mold. The mold tryout was the compressed with pressure for a consecutive five minutes. The specimen was demoulded and sealed in the plastic bag for four hours. Subsequently, the specimen was cured for three months in the curing chamber. The chamber maintained relative humidity, above 95%, and temperature at 20 \pm 2°C.

3. Experiment

3.1. Flexural Tensile Strength Test

The bars, simply supported with a four-point bending mode, were used in the flexural tensile strength test according to the specification (8).

Tablica 5 / Table 5

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ROZCIĄGANIE

RESULTS FROM FLEXURAL TENSILE STRENGTH TEST

Mixture type	Average \bar{R}_s , MPa	Coefficient of variation \bar{C}_v , %	Critical strength $R_{s0,90}$ $R_{s0,90} = \bar{R}_s - 1.282C_v\bar{R}_s$
Iron ore tailings stabilized with cement	0.88	14.00	0.72
Gravel stabilized with cement	1.14	17.26	0.89

3. Doświadczenia

3.1. Pomiar wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu

Beleczki podparte w 4 punktach, jak do badań zginania, służyły do oznaczania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, zgodnie z instrukcją stosowaną w Chinach (8). W trakcie badania obciążenie rosło z jednostajną szybkością wynoszącą 50 mm/min. Wielkość obciążenia rejestrowano w momencie zniszczenia próbki, a wytrzymałość obliczano z równania [1].

$$R_s = \frac{PL}{bh^2} \quad [1]$$

gdzie: R_s – wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, MPa; P – obciążenie powodujące zniszczeniu próbki, N; $L = 300$ mm – odległość pomiędzy dwoma podporami, b – długość próbki, mm; h – wysokość próbki, mm.

W wynikach nie uwzględniano pomiarów, które miały odchylenie od średniej trzykrotnie większe od odchylenia standardowego. Na tej podstawie wyznaczano krytyczną wytrzymałość na rozciąganie $R_{s0,90}$, jako wytrzymałość z 90% przedziału ufności. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie podano w tablicy 5.

3.2. Zachowanie zmęczeniowe

Poziome obciążenia stosowane w próbach zmęczeniowych ustalono w oparciu o wytrzymałość na rozciąganie próbek. Stosowano obciążenia na poziomie 0,2 granicznej wytrzymałości zmęczeniowej, trwające dwie minuty przed rozpoczęciem pomiarów, w celu utrzymania wzajemnej interakcji wgłębniaka twardościomierza z próbką. Obciążenia cykliczne stanowiły fale sinusoidalne [Havesine'a], o częstotliwości 10 Hz. Wyniki pomiarów podano w tablicy 6.

Table 6 / Tablica 6

POMIARY TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

FATIGUE TEST RESULTS

Property	Mixture type					
	Iron ore tailings stabilized with cement			Gravel stabilized with cement		
Stress ratio S	0.6	0.7	0.8	0.72	0.79	0.86
Fatigue life N_f , cycles	130032	5639	498	67638	24498	1094
	160550	26376	3382	213530	40406	2601
	178995	88320	9173	806084	140020	50291
	1704282	95818	28482	1973046	1380059	61161

The load in the process was uniform and continuous, with the loading rate of 50 mm/min. The ultimate load P was recorded when the specimen was ruptured. The flexural tensile strength is calculated from equation 1.

$$R_s = \frac{PL}{bh^2} \quad [1]$$

where: R_s – flexural tensile strength MPa, P – ultimate failure load N, L – span the distance between two pivots, mm, L – equals to 300 mm in the test, b – specimen width, mm, h – specimen height, mm

In the experiment, the results were excluded if their deviations from the mean were more than three times the standard deviation. Then, the critical flexural strength $R_{s0,90}$ was established as the strength at 90% of confidence interval. The test results for flexural strength in two mixtures are shown in Table 5.

3.2. Fatigue Test

The loading levels in fatigue tests were established on the basis of flexural strength of specimens. The load under the stress ratio of 0.2, was used to preload two minutes prior to the tests in order to maintain the mutual interaction between indenter and specimen. The load on the specimen was exerted by continuous Havesine waves with frequencies of 10 Hz. The results of the fatigue test are shown in Table 6.

4. Processing and analyses of experiment data

Because the fatigue lives obtained from the fatigue test were generally over-dispersed, statistical and reliability analyses were necessary to use the dataset properly and better capture the mixture properties. Previous studies generally assumed that the fatigue life follows lognormal distribution, however, recent extensive

4. Analiza wyników doświadczalnych

W związku z tym, że wyniki pomiarów trwałości zmęczeniowej oznaczone doświadczalnie mają duży rozrzut trzeba było zastosować analizę statystyczną w celu lepszej oceny tych wyników i właściwości mieszanin. W poprzednich badaniach zakładano, że trwałość zmęczeniowa ma rozkład logarytmiczny, jednak ostatnie badania wykazały, że lepiej opisuje ją rozkład Weibulla, szczególnie w przypadku długiej trwałości i dużej zmienności warunków. W tej pracy korzystano z dwuparametrycznego rozkładu Weibulla w celu oceny wyników badań trwałości zmęczeniowej podbudowy żwirowej, stabilizowanej cementem.

Funkcja gęstości prawdopodobieństwa dwuparametrycznego rozkładu Weibulla ma postać:

$$f(N) = \frac{b}{N_a} \left(\frac{N}{N_a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{N}{N_a}\right)^b} \quad [2]$$

gdzie: N – granica trwałości zmęczeniowej, N_a – parameter skali, b – parameter kształtu Weibulla.

Funkcja niezawodności zmiennej Weibulla wyraża się wzorem:

$$P(N_c > N_p) = 1 - p(N_c < N_p) = \int_{N_c}^{N_p} f(N) dN = e^{-\left(\frac{N_p}{N_a}\right)^b} \quad [3]$$

Równanie 4 można otrzymać przez zastosowanie podwójnego logarytmowania obu stron równania 3:

$$\ln \ln \frac{1}{P} = 2,303 b (\lg N_p - \lg N_a) \quad [4]$$

Z równania 4 wynika, że występuje liniowa zależność pomiędzy $-\ln \ln(1/P)$ i $\lg N_p$.

Jeżeli dane doświadczalne uzyskane z badań zmęczeniowych można opisać równaniem 4 ze stosunkowo dobrą korelacją, oznacza to, że trwałość zmęczeniowa N_p spełnia rozkład Weibulla. W związku z tym, że zbiór wyników wynosił 12 to znaleziona w tabelicy (12) korelacja R^2 wynosiła 0.496 dla przedziału ufności równego 90%.

W tabelicy 7 podano rozkład Weibulla wyników doświadczalnych, wyznaczających trwałość zmęczeniową dotyczącą granulatu rudy żelaza, stabilizowanej cementem. Funkcje regresji podane w tabelicy 7 otrzymano zakładając zależność liniową rozkładu wyników. W oparciu o równania regresji podane w tabelicy 7 obliczono ilość cykli trwałości zmęczeniowej z towarzyszącymi im różnymi przedziałami ufności i poziomami naprężeń, które podano w tabelicy 8.

Znaleziono liniową zależność log trwałości zmęczeniowej i poziomu naprężeń w celu oszacowania przewidywanej trwałości dla granulatu rudy żelaza, stabilizowanego cementem, w warunkach laboratoryjnych.

50% przedział ufności: $\lg N = 10.845 - 8.913 S$

95% przedział ufności: $\lg N = 9.953 - 10.571 S$

studies showed that the Weibull distribution is more appropriate to depict the long life and high viability condition. This study used two-parameter Weibull distribution to evaluate the fatigue test results for cement-stabilized gravel.

The probability density function for two-parameter Weibull distribution is:

$$f(N) = \frac{b}{N_a} \left(\frac{N}{N_a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{N}{N_a}\right)^b} \quad [2]$$

where: N – Fatigue life, N_a – Characteristics life parameter, b – Weibull shape parameter.

The reliability of Weibull variable is:

$$P(N_c > N_p) = 1 - p(N_c < N_p) = \int_{N_c}^{N_p} f(N) dN = e^{-\left(\frac{N_p}{N_a}\right)^b} \quad [3]$$

Equation 4 is re-arranging by taking the double-log of both sides of Equation 3:

$$\ln \ln \frac{1}{P} = 2,303 b (\lg N_p - \lg N_a) \quad [4]$$

Equation 4 shows that there is a good *linear* relation between $-\ln \ln(1/P)$ and $\lg N_p$. If the data gathered from fatigue test can be regressed by Equation 4 with relatively high correlation, it implies that fatigue life N_p follow the Weibull distribution. Since the parent population in the test was 12, the correlation coefficient R can be found to be 0.496 at 90% confidence interval from the correlation coefficient test table (12).

Table 7 demonstrates the Weibull distribution test results for the fatigue life of iron-ore tailings stabilized with cement. The scatter plots were plotted for the Weibull distribution of fatigue lives. The regression equations in the table 7 were obtained based on the linear regression of the scatter plots. On the basis of regression equations from Table 7 the fatigue lives associated with different confidence intervals and stress ratios were calculated, as shown in Table 8.

The linear regression was established between the log of fatigue life and stress ratio to simulate the predicted fatigue life for the iron-ore tailing stabilized with cement under laboratory conditions.

50% confidence interval: $\lg N = 10.845 - 8.913 S$

95% confidence interval: $\lg N = 9.953 - 10.571 S$

Table 9 shows the Weibull distribution test result for the fatigue life of the natural gravel stabilized with cement. Table 10 demonstrates the fatigue life of the gravel regarding different stress ratios and confidence intervals.

The fatigue life prediction models under laboratory conditions for the gravel stabilized with cement are:

50% confidence interval: $\lg N = 14.225 - 11.765 S$

95% confidence interval: $\lg N = 16.613 - 17.921 S$

Tablica 7 / Table 7

ROZKŁAD WEIBULLA WYNIKÓW DOŚWIADCZALNYCH GRANULATU RUDY ŻELAZA

WEIBULL DISTRIBUTION OF TEST RESULTS FOR IRON ORE TAILINGS

Stress ratio S	Fatigue life N_i	Log Fatigue life $\lg N_i$	Reliability P	$-\ln \ln 1/P$	Goodness of fit R
0.6	130032	5.114050	0.8	1.499940	$-\ln \ln 1/P = -1.2879 \lg N_i + 7.4664$ $R^2 = 0.6373$
	160550	5.205610	0.6	0.671727	
	178995	5.252841	0.4	0.087422	
	1704282	6.231541	0.2	-0.475885	
0.7	5639	3.751202	0.8	1.499940	$-\ln \ln 1/P = -1.4176 \lg N_i + 6.8603$ $R^2 = 0.9344$
	26376	4.421209	0.6	0.671727	
	88320	4.946059	0.4	0.087422	
	95818	4.981447	0.2	-0.475885	
0.8	498	2.697229	0.8	1.499940	$-\ln \ln 1/P = -1.131 \lg N_i + 4.5861$ $R^2 = 0.9962$
	3382	3.529174	0.6	0.671727	
	9173	3.962511	0.4	0.087422	
	28482	4.454570	0.2	-0.475885	

Tablica 8 / Table 8

TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA [LICZBA CYKLI] I POZIOMY NAPRĘŻENI ORAZ PRZEDZIAŁY UFNOŚCI GRANULATU RUDY ŻELAZA

FATIGUE LIVES ASSOCIATE WITH DIFFERENT STRESS RATIOS AND CONFIDENCE INTERVALS FOR IRON ORE TAILINGS

Stress ratio S	0.6	0.7	0.8
50% confidence interval	325659	38092	5381
95% confidence interval	3098	555	27

W tablicy 9 podano rozkład Weibulla wyników badań trwałości zmęczeniowej żwiru stabilizowanego cementem. Natomiast w tablicy 10 zamieszczono zmiany tej trwałości [liczby cykli] w zależności od poziomu naprężeń i przedziału ufności.

Modelowe wyznaczanie trwałości zmęczeniowej w warunkach laboratoryjnych w przypadku żwiru są następujące:

50% przedział ufności: $\lg N = 14.225 - 11.765 S$

95% przedział ufności: $\lg N = 16.613 - 17.921 S$

Tablica 9 / Table 9

ROZKŁAD WEIBULLA WYNIKÓW BADAŃ TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ ŻWIRU

WEIBULL DISTRIBUTION OF TEST RESULTS FOR FATIGUE LIFE OF GRAVEL

No.	Stress ratio	Fatigue life, N_i	Log fatigue life, $\lg N_i$	Reliability	$-\ln \ln 1/P$	Goodness of fit R
1	0.72	67638	4.830191	0.8	1.499940	$-\ln \ln 1/P = -1.3063 \lg N_i + 7.7485$ $R^2 = 0.9907$
2		213530	5.329459	0.6	0.671727	
3		806084	5.906380	0.4	0.087422	
4		1973046	6.295137	0.2	-0.475885	
5	0.79	24498	4.389131	0.8	1.499940	$-\ln \ln 1/P = -1.0038 \lg N_i + 5.5354$ $R^2 = 0.8611$
6		40406	4.606446	0.6	0.671727	
7		140020	5.146190	0.4	0.087422	
8		1380059	6.139898	0.2	-0.475885	
9	0.86	1094	3.039017	0.8	1.499940	$-\ln \ln 1/P = -0.8931 \lg N_i + 4.0053$ $R^2 = 0.8853$
10		2601	3.415140	0.6	0.671727	
11		50291	4.701490	0.4	0.087422	
12		61161	4.786475	0.2	-0.475885	

Table 11, Figure 2 and Figure 3 summarize the fatigue life prediction models for two mixtures. The fatigue lives of two mixtures under different confidence intervals and flexural strength were calculated according to Table 5 and Table 11, as shown in Table 12.

The results presented in Table 12 are showing that the fatigue life increases as the flexural strength of mixture increases. Under the same stress ratio, the gravel stabilized with cement can withstand more repeated loads. The slope curve for cement-stabilized gravel is greater than the slope curve for iron-ore tailings stabilized with cement. This provides that very small changes in strain will have higher impact for the gravel stabilized with cement. To a certain extent, the flexural strength of material determines the fatigue characteristic. Thus, the improvement of flexural tensile strength of the iron-ore tailings stabilized with cement can compensate of the rapid deterioration in fatigue life.

Because the micro crack propagation behavior is the main cause of fatigue damage, the fatigue property is correlated to the microstructure. In the cement-stabilized, iron-ore tailing gravel, the

W tabelicy 11 oraz na rysunkach 2 i 3 podsumowano wyniki oszacowanej trwałości zmęczeniowej dla obu mieszanek. Trwałość zmęczeniowa tych dwóch mieszanek w przypadku różnych przedziałów ufności i wytrzymałości na rozciąganie obliczono stosując zależności podane w tabelicach 5 i 11, a wyniki zebrano w tabelicy 12.

Wyniki podane w tabelicy 12 pokazują, że trwałość zmęczeniowa wzrasta wraz ze wzrostem wytrzymałości na rozciąganie mieszanki. Przy tym samym stosunku naprężeń do wytrzymałości żwir stabilizowany cementem wytrzymuje więcej cykli obciążania.

Nachylenie krzywej w przypadku żwiru jest większe niż dla granulatu rudy żelaznej. Wskazuje to na większy wpływ nawet małych zmian naprężeń w przypadku mieszanki ze żwiru. W pewnym stopniu wytrzymałość materiału na rozciąganie wyznacza jego zachowanie zmęczeniowe. Z tego względu poprawa wytrzymałości na rozciąganie mieszanek z granulatu jako kruszywa,

Tablica 10 / Table 10

TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA UWZGLĘDNIAJĄCA RÓŻNY POZIOM NAPRĘŻEŃ ORAZ PRZEDZIAŁY UFNOŚCI DLA ŻWIRU

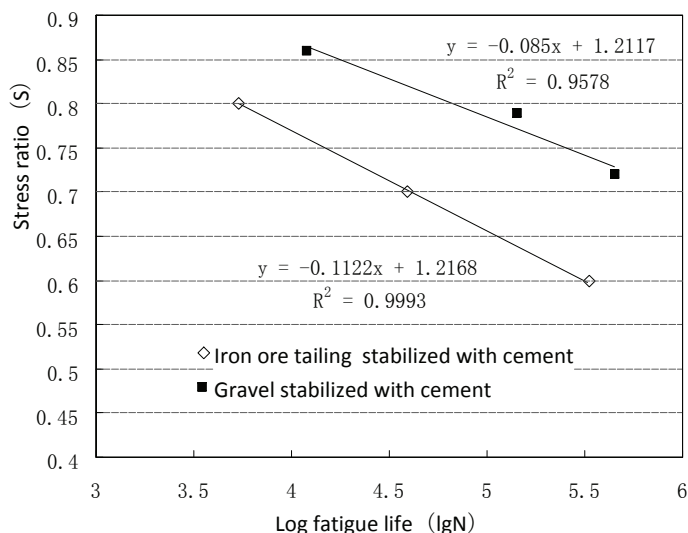
FATIGUE LIFE CONSIDERING DIFFERENT STRESS RATIOS AND CONFIDENCE INTERVALS FOR GRAVEL

Stress ratio S	0.72	0.79	0.86
50% confidence interval	447781	141033	11867
95% confidence interval	4549	359	14

Tablica 11 / Table 11

MODEL POZWALAJĄCY NA OSZACOWANIE TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ
FATIGUE LIFE PREDICTION MODEL

Mixture type	Fatigue model, 50%	Fatigue model, 95%
Iron ore tailing stabilized with cement	$\lg N = 10.845 - 8.913 S$	$\lg N = 9.953 - 10.571 S$
Gravel stabilized with cement	$\lg N = 14.225 - 11.765 S$	$\lg N = 16.613 - 17.921 S$

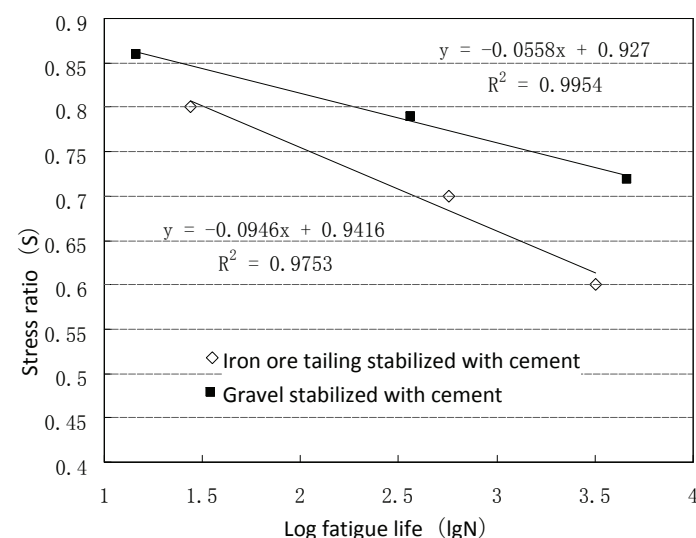


Rys. 1. Krzywa pokazująca log krzywej trwałości zmęczeniowej dla 50% przedziału ufności

Fig. 1. Fatigue curve at 50% confidence interval

stabilizowanych cementem może zrównoważyć mniejszą trwałość zmęczeniową.

Ponieważ propagacja mikro-spękań jest główną przyczyną zniszczenia zmęczeniowego, zachowanie zmęczeniowe jest uzależnione od mikrostruktury. W przypadku granulatu z rudy że-



Rys.2. Krzywa pokazująca log krzywej trwałości zmęczeniowej dla 95% przedziału ufności

Fig. 2. Fatigue curve at 95% confidence interval

compactd volume of fine aggregate is greater than the void volume of the coarse aggregate. Consequently, voids in the skeleton structure of coarse aggregate can be filled with fine aggregate, and can create the coarse aggregate interlock. It will assure the lower porosity of the skeleton of iron ore tailings. To assure good

Tablica 12 / Table 12

TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA DWÓCH MIESZANEK PRZY RÓŻNYCH OBCIĄŻENIACH ROZCIĄGAJĄCYCH
FATIGUE LIFE OF TWO MIXTURES UNDER DIFFERENT FLEXURAL STRENGTH

Property		Mixture	
		Iron ore tailings stabilized with cement	Gravel stabilized with cement
Flexural load, MPa		0.72	0.89
Fatigue life at 50% confidence interval	Stress ratio of 0.6	314051	14655478
	Stress ratio of 0.7	40365	977237
Fatigue life at 95% confidence interval	Stress ratio of 0.6	4074	724436
	Stress ratio of 0.7	357	11695

laznej objętość po zagęszczeniu drobnego kruszywa jest większa niż zawierająca pustki objętość grubego kruszywa. W związku z tym pustki w stosie okruszowym grubego kruszywa mogą ulec wypełnieniu tym drobnym kruszywem i mogą spowodować zazębienie się ziaren tego kruszywa. To zazębienie się ziaren będzie zapewniało dobrą wytrzymałość stosu okruszowego w przypadku zastosowania granulatu w mieszance. Może to zapewnić dobre zachowanie zmęczeniowe w wyniku opóźnionej propagacji rys w więźbie tej mieszanki.

5. Wnioski

W pracy oceniano doświadczalnie zachowanie zmęczeniowe mieszanki wykonanej z oddzielonej na sitach frakcji rudy żelaza, stabilizowanej cementem. Jej właściwości porównano z mieszanką wykonaną z naturalnego żwiru, także stabilizowanego cementem. Stosując rozkład Weibulla i liniowe równanie korelacji oceniono trwałość zmęczeniową dwóch mieszanek [jako podbudów] przy różnym obciążeniu i różnych przedziałach ufnosci. Uzyskane wyniki można podsumować następującymi wnioskami:

(1) Wytrzymałość na rozciąganie jest głównym czynnikiem decydującym o trwałości zmęczeniowej podbudów drogowych. Z tego względu poprawa tej wytrzymałości w przypadku granulatu rudy żelaznej stabilizowanej cementem zapewnia jej lepszą trwałość zmęczeniową.

(2) Badania zachowania zmęczeniowego analizowane z większą niezawodnością mogą dać lepsze jej oszacowanie. Ponadto zróżnicowanie materiałów staje się wyraźniejsze.

(3) Pomimo, że granulatu rudy żelaznej stabilizowanej cementem zapewnia mniejszą trwałość zmęczeniową podbudów od żwiru, ten niedostatek może być zrekompensowany korzystnymi zmianami mikrostruktury podbudów, uzyskanymi poprzez zmiany w jego składzie. Granulatu rudy żelaza może więc być stosowany do produkcji podbudów drogowych.

Podziękowanie

Badania były finansowane przez Chińską Fundację Nauk Stosowanych (Grant No. 51178085).

Literatura / References

1. R. J. Chandler, G. Tosatti, Stava tailings dams failure, Italy, July 1985. Proceeding of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, **113**, 2, 67-79 (1995).
2. S. G. Vick, Tailings dam failure at Omai in Guyana. Mining Engineering, **48**, 11, 34-37 (1996).
3. A. B. Fourie, G. E. Blight, G. Papageorgiou, Static liquefaction as a possible explanation for the Merriespruit tailings dam Failure. Canadian Geotechnical Journal, **38**, 4, 707-719 (2001).

strength in a skeleton-void structure, by interlocking with one another, it must rely upon a large amount of coarse aggregate. Good fatigue characteristic can then be achieved by the retarded fracture propagation by the framework.

5. Conclusions

The study evaluated the fatigue performances of iron-ore tailings stabilized with cement on the basis of laboratory experiments. A comparison between the iron-ore tailings stabilized with cement and typical gravel stabilized with cement was tested experimentally. The Weibull distribution test and the linear regression were applied to evaluate the fatigue life of two mixtures regarding different stress ratios and confidence intervals. The conclusions found by the results are summarized below.

(1) The flexural strength of material is the major factor affecting the fatigue life in roads engineering. Thus, the improvement of flexural tensile strength of iron-ore tailings stabilized with cement can assure longer fatigue life.

(2) The fatigue test analyzed with higher reliability can result in a better prediction of material fatigue performance. Moreover, the discrepancy between different materials becomes more significant.

(3) Though iron-ore tailings stabilized with cement does not perform as well as the fatigue performance of gravel stabilized with cement, the disadvantage can be compensated by a unitized design of pavement structure. By this the implementation of cement-stabilized, iron-ore tailing gravel on the low-grade highway can then be applicable.

Acknowledgement

This research was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51178085).

4. S. K. Das, Sanjay Kumar, P. Ramachandrarao, Exploitation of iron ore tailing for the development of ceramic tiles, *Waste Management*, **20**, 725-729 (2000) .
5. J. H. P. Watson, P. A. Beharrell, Extracting values from mine dumps and tailings, *Minerals Engineering*, **19**, 1580-1587 (2006).
6. J. E. Oti, J. M. Kinuthia, J. Bai, Engineering properties of unfired clay masonry bricks, 2009.
7. Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical specification for construction of highway pavement (JTJ034—2000). Beijing, China Communications Press 2000.
8. Ministry of Transport of the People's Republic of China, Test Methods of Materials Stabilized with Inorganic Binders for Highway Engineering (JTG E51— 2009). Beijing, China Communications Press 2009.
9. Shigeo Shimizu, Weibull Distribution Function Application to Static Strength and Fatigue Life of Materials, *Tribology Transactions*, **55**, 3, 267-277 (2012).
10. Tsai, Bor-Wen, M. O. Bejarano, J. T. Harvey, C. L. Monismith, Prediction and calibration of pavement fatigue performance using two-stage weibull approach, *Asphalt Paving Technology*, **74**, 697-731 (2005).
11. Olsson, Karl-Erik, Weibull analysis of fatigue test data, *Quality and Reliability Engineering International*, **10**, 5, 437-438 (1994).
12. Y. D. Zhou, Zheng, A new calculation method of correlation coefficient test table, *Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica*, **18**, 18-22 (1997).