



KAROL BRZEZIŃSKI<sup>1)</sup>  
GRZEGORZ ADAMCZEWSKI<sup>2)</sup>  
PAWEŁ TUTKA<sup>3)</sup>

## THE INFLUENCE OF CYCLIC LOADING ON THE STATIC STRENGTH OF CEMENT-BOUND SAND - QUALITATIVE ANALYSIS

## WPŁYW OBCIĄŻEŃ CYKLICZNYCH NA WYTRZYMAŁOŚĆ STATYCZNĄ PIASKU ZWIĄZANEGO CEMENTEM - UJĘCIE JAKOŚCIOWE

**STRESZCZENIE.** Głównym celem pracy jest ocena wpływu obciążeń cyklicznych na statyczną wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu  $R_b$  piasku związanego cementem. Badana mieszanka składała się z piasku kwarcowego o normowym uziarnieniu związanego cementem w ilości 10% w stosunku do masy piasku. Zasadnicze badania przeprowadzono na prostopadłościennych próbkach zginanych metodą 3-punktową. Próbki poddawano wstępnym obciążeniom cyklicznym przy różnych zakresach liczby cykli i siły zginającej. Następnie wytrzymałość próbek wstępnie obciążonych porównano z wytrzymałością próbek niepoddanych wstępnemu obciążeniu. Porównanie średnich wytrzymałości przeprowadzono z zastosowaniem testu statystycznego ANOVA. Zaobserwowano w ten sposób efekt zwiększenia wytrzymałości statycznej, przy określonych warunkach cyklicznego obciążenia wstępnego. W dalszej kolejności przeprowadzono wstępną analizę wpływu dwóch czynników obciążenia wstępnego (liczba cykli i poziom siły zginającej) na zmianę wytrzymałości próbek.

**SŁOWA KLUCZOWE:** efekt wzmocnienia, piasek związany cementem, wytrzymałość na zginanie, 3-punktowe zginanie.

**ABSTRACT.** The main purpose of the paper is to evaluate the effect of cyclic loading on the static bending strength  $R_b$  of cement-bound sand (CBS). The mixture contained graded standard quartz sand bound with cement added at a proportion of 10% of the weight of sand. The main part of the experimental research were three-point bending tests performed on rectangular specimens. The specimens were subjected to cyclic pre-loading with different numbers of cycles and different bending force values. Strength tests were then conducted on pre-loaded specimens and the results were compared with non-preloaded specimens. ANOVA statistical analysis method was applied to the comparison of average strengths. This revealed an increase of static strength for specific cyclic pre-loading conditions. The influence of the number of pre-loading cycles and of the bending force value on the strength of specimens was checked as the next step.

**KEYWORDS:** bending strength, cement-bound sand, strengthening effect, 3-point bending.

DOI: 10.7409/rabdim.017.003

<sup>1)</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Dróg i Mostów, Aleja Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa; kbrz@il.pw.edu.pl (✉)

<sup>2)</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Inżynierii Budowlanej; g.adamczewski@il.pw.edu.pl

<sup>3)</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Dróg i Mostów; p.tutka@il.pw.edu.pl

## 1. WSTĘP

Nawierzchnie drogowe podlegają wielu rodzajom obciążeń. Można zaliczyć do nich obciążenia od pojazdów oraz inne oddziaływania środowiska, takie jak zmiany temperatury i wilgotności [1]. Wraz ze wzrostem ruchu obsługiwanego przez drogę zwiększa się znaczenie obciążeń od kół pojazdów. Dlatego też w przypadku dróg wysokich klas (autostrady i drogi ekspresowe) konstrukcje nawierzchni projektuje się metodami mechanistyczno-empirycznymi, które uwzględniają analizę wytrzymałości zmęczeniowej. W mechanistyczno-empirycznym projektowaniu konstrukcji nawierzchni drogowych wyznacza się stan odkształcenia i naprężenia nawierzchni pod wpływem obciążenia od pojedynczej osi pojazdu [2]. Następnie, wykorzystując formuły empiryczne, oblicza się trwałość nawierzchni (liczbę osi obliczeniowych, jaką jest w stanie przenieść konstrukcja do umownego momentu zniszczenia). Zwykle obciążenia od kół poszczególnych typów pojazdów przeliczane są na równoważną liczbę osi obliczeniowych. Za standardową oś obliczeniową przyjmuje się 100 kN [3]. Zatem analiza zmęczeniowa sprowadza się do zagadnienia cyklicznego obciążenia o stałej amplitudzie. W niektórych przypadkach analizę prowadzi się na różnych poziomach obciążeń. Ma to zwykle miejsce podczas projektowania wzmocnień nawierzchni (zmiana odkształceń i naprężeń przy tym samym nacisku osi). Analiza obciążeń na różnych poziomach może również być podyktowana potrzebą większej dokładności obliczeń (analiza pełnego widma obciążeń). Najprostszym sposobem obliczenia trwałości zmęczeniowej konstrukcji pod wpływem zmiennego obciążenia jest zastosowanie hipotezy Palmgrena-Minera [4], opisywanej równaniem (1):

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = 1, \quad (1)$$

gdzie:

$n_i$  – liczba cykli naprężeń o wartości  $\sigma_i$ ,

$N_i$  – liczba cykli do zniszczenia przy naprężeniu  $\sigma_i$ ,

$m$  – liczba poziomów naprężeń  $\sigma_i$ .

Hipoteza ta zakłada liniową kumulację szkody zmęczeniowej, a trwałość konstrukcji nie zależy od kolejności przykładania obciążeń. Badania na wielu materiałach konstrukcyjnych, takich jak beton [5], stopy metali [6, 7] czy grunty związane cementem [8] wykazały, że przy pewnych poziomach obciążeń, kolejność ich przyłożenia jest istotna. Brzeziński i Zbiciak [9] zaproponowali prostą modyfikację hipotezy zmęczeniowej Palmgrena-Minera, która pozwalała na uwzględnienie wpływu historii obciążenia na wytrzy-

## 1. INTRODUCTION

Road pavements are subjected to various types of loading. These include vehicle loading and other environmental effects such as temperature and moisture variations [1]. With increasing volumes of traffic wheel load increases in importance. Hence roads of higher importance class (motorways and trunk roads) have pavements designed with mechanistic-empirical methods which include fatigue strength analysis. These methods are based on determining stress and strain state of pavement under single axle load [2]. Next, empirical formulas are used to calculate the fatigue life of pavement expressed as the number of standard axles which can be applied until arbitrarily defined failure. Generally, loadings imposed by different vehicles are expressed as the number of equivalent single axle loads (ESAL). The equivalent single axle load is 100 kN [3]. Hence, fatigue analysis is reduced to cyclic loading with a constant amplitude. In some cases different load values are considered. These cases include in particular structural overlays resulting in changes to the strains and stresses induced in the pavement by the same axle load. Higher accuracy can be another reason to use different loads (analysis performed for full axle load spectrum). The simplest way to calculate the fatigue life of pavement exposed to variable loading is to use Palmgren-Miner's rule [4] expressed by the following formula:

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = 1, \quad (1)$$

where:

$n_i$  – number of stress cycles with stress level of  $\sigma_i$ ,

$N_i$  – number of cycles to failure at stress value of  $\sigma_i$ ,

$m$  – number of stress levels  $\sigma_i$ .

This hypothesis assumes that fatigue damage accumulates linearly and that the fatigue life does not depend on the sequence in which the different load levels are applied. Various structural materials have been tested, including concrete [5], metal alloys [6, 7] and cement-treated soil [8] to show that the sequence of application can actually be relevant for certain load levels. Brzeziński and Zbiciak [9] proposed a simple modification of the Palmgren-Miner's rule to allow for the effect of the loading history on the fatigue life of structural materials. This method is based on the assumption that cyclic loading has an influence on the static strength of materials. As prerequisite for using this method it is necessary to investigate (or at least predict in some way) the static strength change pattern. The aim of

małość zmęczeniową materiałów konstrukcyjnych. Powyższa metoda zakłada, że wytrzymałość statyczna materiałów ulega zmianie pod wpływem cyklicznego obciążenia. Aby ją zastosować należy zbadać, lub przynajmniej w sposób pośredni założyć w jaki sposób przebiega zmiana wytrzymałości statycznej. Badania opisane w niniejszej pracy miały na celu zaobserwowanie i potwierdzenie w sposób statystyczny zmian wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu  $R_b$  mieszanki związanej cementem pod wpływem cyklicznego obciążenia. Szczególnie interesujące okazuje się, że materiał może ulec wzmocnieniu (wzrost wytrzymałości statycznej). Opisowi tego zjawiska poświęcono najwięcej uwagi. Docelowo planuje się opracowanie modelu zmiany wytrzymałości badanej mieszanki pod wpływem cyklicznego obciążenia. W celu dokładniejszej analizy badanych zjawisk wykorzystano wnioski z badań wstępnych.

## 2. MATERIAŁY BADAWCZE I METODYKA BADAŃ

Przygotowana mieszanka składała się z piasku kwarcowego o normowym uziarnieniu [10] oraz cementu CEM I 42,5 R. Masowa zawartość cementu w stosunku do masy piasku wyniosła 10%. Ponadto zastosowano wodę wodociągową w ilości potrzebnej do uzyskania wilgotności optymalnej określonej w badaniu Proctora, która wynosi około 8%.

Przygotowano próbki prostopadłościennych o wymiarach 16,0×4,0×4,0 cm. Wszystkie próbki uformowano z jednego zarobu. Formę wraz z nadstawką o wysokości 4,0 cm wypełniono w całości mieszanką. Następnie za pośrednictwem kantówek drewnianych przyłożono do mieszanki obciążenie pionowe i zagęszczano na stole wibracyjnym do całkowitego zagłębienia kantówek w mieszance. Po zdjęciu nadstawki nadmiar gruntu usunięto nożem. Uformowane w ten sposób próbki przechowywano w workach foliowych przez 48 godzin. Następnie rozformowano je i przechowywano zanurzone w wodzie przez kolejne 28 dni. Po wyjęciu z wody próbki pozostawiono na okres 3 miesięcy w celu wyeliminowania wpływu zmian wytrzymałości spowodowanych hydratacją w trakcie prowadzenia badań.

Zarówno próby wytrzymałościowe jak i obciążenia cykliczne były realizowane za pomocą maszyny wytrzymałościowej INSTRON 5567 z przystawką do trzypunktowego zginania (Rys. 1). W pierwszym etapie wykonano pomiar wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu ośmiu próbek bez wstępnego obciążenia cyklicznego (próbki oznaczone N1). Po miesiącu pomiar powtórzono na kolejnych ośmiu próbkach (N2), aby upewnić się, że nie następuje już istotna zmiana wytrzymałości wskutek hydratacji cementu. Prędkość obciążenia w próbie niszczącej wynosiła 3000 N/min.

the experiments described in this report was to observe and confirm through statistical analysis changes in bending strength  $R_b$  of cement-bound mixture subjected to cyclic loading. What can be of particular interest is possible improvement of the strength of the material (tested under static loading). This effect has been paid the highest attention in this paper. Moreover, it is planned to develop a model representing the change of strength of the tested mixture under cyclic loading. Conclusions from preliminary testing were used for a more thorough analysis of the effects under investigation.

## 2. MATERIALS AND TEST PROCEDURE

The tested mixture contained graded standard quartz sand [10] bound and CEM I 42.5 R Portland cement. The amount of cement added to the mix was 10% of the weight of sand. Optimum moisture content of ca. 8% determined in the Proctor test was obtained by adding appropriate amount of mains water.

The specimens were rectangular in shape, 16.0×4.0×4.0 cm in size. All specimens were made from a single batch. The form including 4.0 cm high top extension was filled up with the mixture. Next vertical loading was imposed on the specimen with the use of wood scantlings and the mixture was compacted on vibrating table until the scantlings got fully immersed. The top extension was removed and excess material was cut off with a knife. The specimens produced in this way were put into plastic bags. After 48 hours of storage in plastic bags the specimens were submerged in water. After 28 days of conditioning in water the specimens rested for 3 months to eliminate the effect of hydration during testing on the measured strength.

Both strength measurements and cyclic loading were conducted with INSTRON 5567 strength tester equipped with three point bending fixture (Fig. 1). In stage 1 of the test eight specimens were subjected to bending without prior cyclic pre-loading (N1 series). After one month the test was repeated on the next eight specimens (N2 series) to make sure that cement hydration has no longer any considerable effect on the strength of specimens. In the destructive part of the testing the test load was applied at a rate of 3000 N/min.

In stage 2 of the test another portion of specimens was divided into groups of eight (A1-A3) and then subjected to cyclic loading with different number of cycles and different stress intensity levels. During cyclic loading the test load was applied at a rate of 7500 N/min. Preloaded

W drugim etapie część próbek podzielono na grupy po 8 sztuk (A1-A3) i poddano cyklicznym obciążeniom o różnym poziomie wyężenia i liczbie cykli. Prędkość obciążenia w próbie cyklicznej wynosiła 7500 N/min. Następnie dokonano pomiaru wytrzymałości uprzednio obciążonych (wytrenowanych) próbek i porównano z wynikami próbek nieobciążanych cyklicznie (nietrenowanych), przeprowadzając formalne testy statystyczne. Przykładowy przebieg obciążenia próbki przedstawiono na Rys. 2.

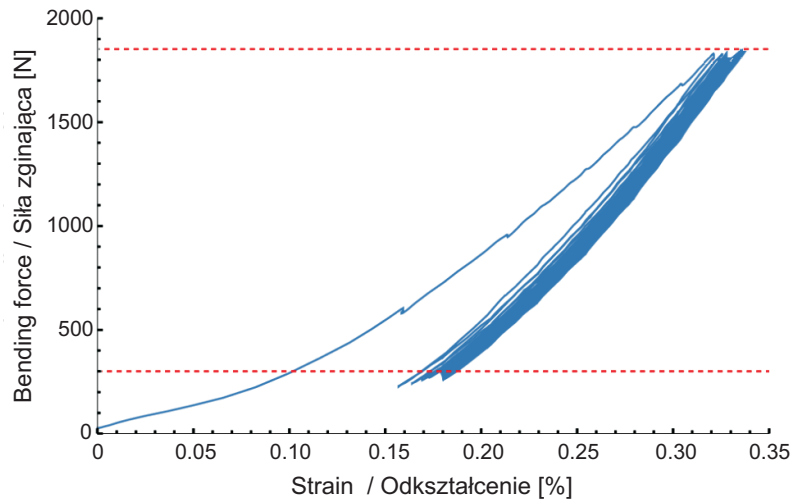


Fig. 2. The course of cyclic loading of a specimen, 20 loading cycles, bending force preset at 300-1850 N

Rys. 2. Przebieg cyklicznego obciążenia próbki, liczba cykli 20, zadany zakres siły zginającej 300-1850 N

W trzecim etapie zrealizowano obciążenia cykliczne w 9 grupach (B1-D3) o mniejszej liczności – po 4 próbki. Liczba grup wynikała z przyjętego programu obciążenia w zawężonym obszarze:

- 3 poziomy siły zginającej (1450 N, 1650 N, 1850 N),
- 3 poziomy liczby cykli (20, 35, 50).

Następnie próbki poddano badaniu niszcącemu i przeanalizowano zmianę wytrzymałości pod wpływem cyklicznego obciążenia.

### 3. OCENA WPŁYWU OBCIĄŻEŃ CYKLICZNYCH NA WYTRZYMAŁOŚĆ STATYCZNĄ PRÓBEK ZGINANYCH

Jakościowa ocena wpływu obciążeń cyklicznych na wytrzymałość statyczną polegała na analizie statystycznej. W przypadku próbek zbadanych w pierwszym i w drugim etapie, średnią wytrzymałość w grupach porównywano z zastosowaniem testu ANOVA. Przed przystąpieniem do testu

specimens were then subjected to the strength test and the results were compared with the strength values of non-preloaded series with the use of formal statistical tests. Example loading curve is presented in Fig. 2.

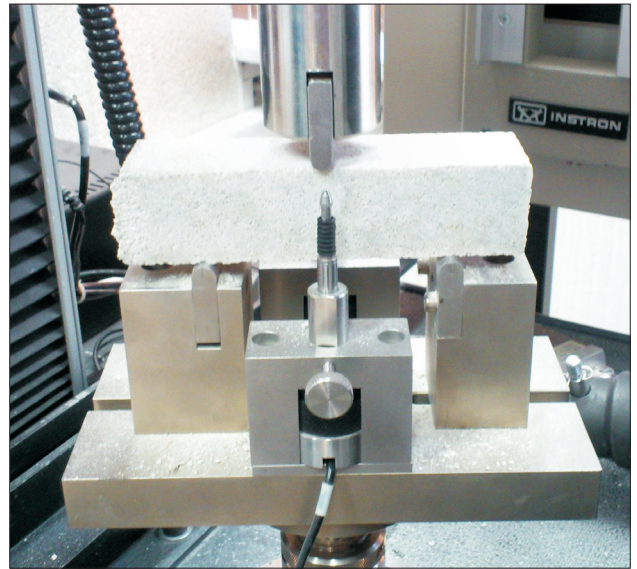


Fig. 1. Three-point bending of a rectangular specimen in INSTRON 5567 machine

Rys. 1. Badanie 3-punktowego zginania próbki prostokątnej w aparacie INSTRON 5567

In stage 3 of the test cyclic loading was performed on nine groups (B1-D3) of four specimens each. Nine groups were required for the following testing program:

- three levels of bending force (1450 N, 1650 N, 1850 N),
- three levels of cycle loading force (20, 35 and 50 cycles).

Finally, the specimens were subjected to destructive testing and the change of strength due to cyclic loading was evaluated.

### 3. EVALUATION OF HOW CYCLIC LOADING HAS CHANGED THE STRENGTH OF SPECIMENS SUBJECTED TO STATIC BENDING

The effect of cyclic loading on the strength of specimens under static loading was evaluated through statistical analysis. Average strength was calculated for each group tested in the first and second stage and the results were compared using ANOVA statistical analysis method. The tests were



sprawdzono czy jego założenia są spełnione. W celu sprawdzenia normalności rozkładu sporządzono wykresy kwantylowe oraz przeprowadzono test Shapiro-Wilka. Równość wariancji w porównywanych grupach sprawdzono stosując test Bartletta. Charakterystyczne parametry poszczególnych grup przedstawiono w Tabl. 1.

performed following verification of assumptions. Normality of distribution was assessed on the basis of normal quantile plots and the Shapiro-Wilk normality test. Homogeneity of variances between the compared groups was checked with the Bartlett's test. The characteristic parameters of the respective groups are given in Table 1.

Table 1. Characteristic parameters of the respective groups  
Tablica 1. Charakterystyczne parametry poszczególnych grup

Designation Oznaczenie	Group size [No.] Liczność grupy [szt.]	Number of preload cycles Liczba cykli wstępnego obciążenia	Range of cyclic bending force Zakres siły zginającej cyklicznie [N]	Average strength Średnia wytrzymałość $R_b$ [MPa]	Standard deviation Odchylenie standardowe	Shapiro-Wilk test $p$ -value Test Shapiro-Wilka $P$ -wartość prawdopodobieństwa
N1	8	–	–	4.96	0.50	0.7883
N2	8	–	–	4.99	0.34	0.4054
A1	5	2000	0-950	5.11	0.37	0.2500
A2	8	300	100-1200	5.13	0.24	0.3057
A3/B3	8	20	300-1850	5.33	0.24	0.1043
B1	4	20	300-1450	5.18	0.16	0.2214
B2	4	20	300-1650	5.28	0.29	0.3571
C1	4	35	300-1450	4.99	0.24	0.0920
C2	4	35	300-1650	5.35	0.42	0.3429
C3	4	35	300-1850	5.18	0.57	0.9176
D1	4	50	300-1450	5.37	0.25	0.9735
D2	4	50	300-1650	5.16	0.45	0.4500
D3	4	50	300-1850	5.17	0.74	0.8711

Zgodnie z przedstawionymi w Tabl. 1 rezultatami testu normalności można uznać, że wyniki przeprowadzonych badań spełniają założenie o normalności rozkładu. Dalsza analiza, której wyniki przedstawiono w Tabl. 2, pozwoliła na potwierdzenie pozostałych założeń. Ponadto, na jej podstawie wyciągnięto dwa istotne wnioski, wykorzystane w kolejnym etapie badań. Po pierwsze, z porównania średniej wytrzymałości w grupach N1 i N2 widać, że wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu nie uległa istotnej zmianie w ciągu miesiąca. Zatem wykluczono z analizy wpływ zmian wytrzymałości spowodowanych hydratacją w trakcie prowadzenia badań. Po drugie, zaobserwowano interesujący efekt wzmocnienia materiału pod wpływem cyklicznego obciążenia w przypadku próbek z grupy A3. Na przyjętym poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  wynik testu ANOVA w postaci  $p$ -value (wartości prawdopodobieństwa testowego) wynoszącej 0,0249 potwierdza, że zaobserwowana zmiana jest istotna ze statystycznego punktu widzenia. Dlatego też obciążenia kolejnych próbek zaplanowano w obszarze zbliżonym do tych, którym poddane były próbki z grupy A3.

The normality test results given in Table 1 allow us to conclude that the assumption of normal distribution is valid for the experimental results. Validity of the remaining assumptions was confirmed through further analysis – for results see Table 2. Moreover, two important conclusions were drawn at that stage which were used further in this research. Firstly, comparison of the average strengths in groups N1 and N2 has shown that bending strength has not changed significantly over the one month period. This allowed to exclude from the analysis any changes to the strength of material due to hydration during experiments. Secondly, an interesting strengthening effect was noted in the A3 group of specimens as a result of cyclic loading. At the adopted significance level of  $\alpha = 0.05$  the  $p$ -value of 0.0249 obtained in ANOVA test confirmed the statistical significance of the observed change. Hence, loading of the next specimens was planned to approximate group A3 loading conditions.

Table 2. Comparison of average strengths of the chosen groups

Tablica 2. Porównanie średnich wytrzymałości w wybranych grupach

Compared groups Porównywane grupy	Test result <i>p</i> -value Wartość <i>p</i> prawdopodobieństwa testowego	
	Comparison of variances Porównanie wariancji (Bartlett)	Comparison of average values Porównanie średnich (ANOVA)
N1-N2	0.3290	0.8946
N2-A1	0.8222	0.5436
N2-A2	0.3609	0.3747
N2-A3	0.3181	0.0249

W trzecim etapie próbki podzielono na 9 grup, o mniejszej liczności – po 4 próbki. Badano wpływ dwóch czynników na zmianę wytrzymałości materiału – liczba cykli i poziom (siła zginająca) wstępnego obciążenia. W przypadku każdego czynnika przyjęto trzy poziomy. Ponieważ efekt wzmocnienia został potwierdzony w poprzednim etapie, nie zastosowano formalnego testu do porównywania średnich w grupach. Wzrost średniej wytrzymałości w zależności od poziomów poszczególnych czynników przedstawiono na Rys. 3. Przyjęty poziom odniesienia stanowi średnia wytrzymałość próbek nietrenowanych z grupy N2.

Średnia wytrzymałość we wszystkich grupach wzrosła po wstępnym obciążeniu. Wzrost wytrzymałości w większości przypadków wyniósł od około 0,17 MPa do 0,38 MPa. Jest to niewielka wartość, porównywalna z odchyleniem standardowym uzyskiwanym w niniejszych badaniach. Nie ulega wątpliwości, że nastąpił wzrost wytrzymałości wskutek cyklicznego obciążenia, co potwierdzono statystycznie w poprzednim etapie badań, lecz duży rozrzut wyników utrudnia ilościową ocenę tego zjawiska. Można jednak wyciągnąć ogólne spostrzeżenia dotyczące zaobserwowanego efektu wzmocnienia. Mechanizm wzmocnienia może być tłumaczony przemianami struktury wewnętrznej. Wymaga zatem dostarczenia energii, która będzie w tym procesie rozpraszana. Istotny dla prędkości przebiegu tego zjawiska powinien być więc poziom obciążenia, gdyż wiąże się z intensywnością dostarczania energii. Dostarczenie zbyt dużej energii może jednak wywołać procesy zmęczeniowe i degradację materiału. Zatem nasuwają się trzy możliwe sekwencje rozwoju wytrzymałości w trakcie cyklicznego obciążania. Przy dużym poziomie obciążenia szybko następuje przyrost wytrzymałości, a następnie jej spadek wskutek zmęczenia materiału. Przy średnim poziomie obciążenia wytrzymałość zwiększa się stopniowo, a następnie ulega zmniejszeniu.

In stage 3 of the test the specimens were divided into nine groups of four specimens each. The two factors whose effect on the material strength was investigated were: the number of pre-loading cycles and the value of bending force applied during pre-loading. Three levels were used for either of them. Since the strengthening effect had been confirmed in the previous stage, it was not required to conduct a formal test to compare the group averages. The increase of the average strength depending on the levels of these two factors is presented in Fig. 3. The reference level is the average strength of non-preloaded specimens from group N2.

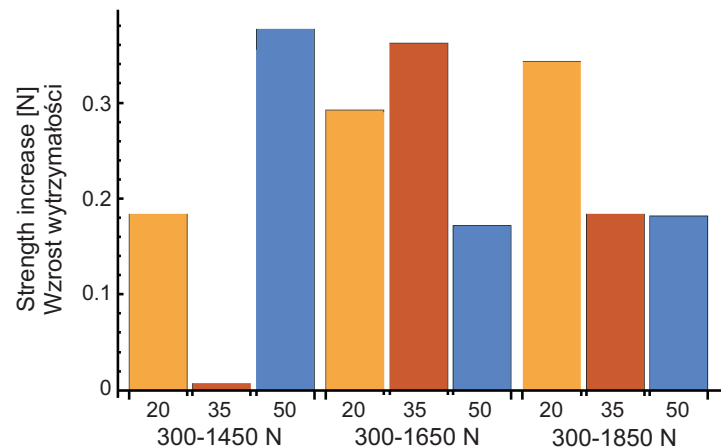


Fig. 3. Increase of the average strength of preloaded specimens depending on the number of preloading cycles and bending force range

Rys. 3. Wzrost średniej wytrzymałości wytrenowanych próbek w zależności od liczby cykli wstępnego obciążenia i zakresu siły zginającej

In all groups the average strength increased as a result of pre-loading. In most cases this increase was in the range of ca. 0.17-0.38 MPa. This value is small, comparable to standard deviation obtained in the tests performed as part of this research. While there is no doubt that the strength increase resulted from cyclic loading which had been confirmed with statistical analysis performed at the previous stage of the test, it is difficult to perform quantitative evaluation of this effect due the large spread of the results. This said, we can still draw some general conclusions regarding the observed strengthening. The mechanism responsible for this strengthening can be associated with the transformation of the internal structure of the material. As such, there is a need of input energy to be dissipated in the process. Consequently, the rate at which this effect develops should depend on the level of loading which is related to the rate of energy transfer. On the other hand, too much

Wytrzymałość próbek poddanych niewielkim obciążeniom zwiększa się bardzo powoli, a próbki mogą w ogóle nie ulec procesom zmęczeniowym. W przybliżony sposób wszystkie trzy sekwencje są odzwierciedlone przez wyniki badań przedstawione na Rys. 3. W ten sposób ujawnia się jednak kolejny problem ilościowego opisu omawianego zjawiska. Zakładamy początkową wytrzymałość każdej próbki jako średnią wytrzymałość próbek niepoddawanych cyklicznym obciążeniom. Założenie to jest obarczone pewnym błędem, który przekłada się nie tylko na niepewność wyniku (przyrost wytrzymałości), ale także na niepewność poziomu czynnika (poziom wyężenia próbki jako stosunek obciążenia do wytrzymałości). Wskazane jest zatem dążenie do zmniejszenia błędu przez zwiększenie liczby pomiarów, lub przez wprowadzenie dodatkowych czynników, takich jak moduł Younga czy energia uwalniana w cyklu. Zmieniają się one w trakcie cyklicznych obciążeń, więc mogą być powiązane ze zmianą wytrzymałości materiału. Znalezienie takiej zależności ułatwiłoby ocenę zjawiska w sposób ilościowy.

#### 4. DYSKUSJA

W trakcie realizacji programu badawczego zaobserwowano efekt wzmocnienia, który do tej pory nie był przedmiotem badań. Wpisuje się on dobrze w zaproponowaną przez jednego z autorów pracy [9] hipotezę kumulacji szkody zmęczeniowej, pozwalającą na ocenę wpływu obciążeń o zmiennej amplitudzie na wytrzymałość zmęczeniową. Wcześniejsze badania poświęcone wpływowi obciążeń cyklicznych na wytrzymałość statyczną mieszanek związanych cementem nie brały pod uwagę efektu wzmocnienia [11], a jedynie możliwość zmniejszenia wytrzymałości statycznej. Takie podejście jest być może związane z tym, że w rzeczywistej nawierzchni warstwa wykonana z mieszanki związanej cementem od momentu wbudowania jest osłabiana przez wiele różnych czynników. W trakcie wiązania występuje skurcz mieszanki powodujący praktycznie nieuniknione spękania skurczowe [8]. Następnie ruch technologiczny może wywołać w podbudowie naprężenia większe niż te, do których została zaprojektowana mieszanka, ponieważ obciążenie nie jest jeszcze równomiernie rozkładane przez górne warstwy nawierzchni [12]. W trakcie eksploatacji nawierzchni, pod wpływem obciążeń od kół pojazdów ciężarowych, na spodzie podbudowy pojawiają się spękania zmęczeniowe, które z czasem propagują ku górze [13]. Wszelkie spękania, o różnej genezie prowadzą do osłabienia warstwy podbudowy. Wraz z upływem czasu, w eksploatowanej nawierzchni maleje sztywność podbudowy [14], co w efekcie prowadzi do obniżenia nośności konstrukcji.

energy can activate fatigue processes and result in deterioration of the material. Hence, three patterns of the strength development under cyclic loading can be figured out. A high level of load yields rapid increase of strength followed by a drop due to fatigue of the material. At the intermediate loading level the strength increases gradually up to a certain level after which it starts to decrease. Low level of loading results in a very slow increase of strength with possibly no fatigue processes involved. These three patterns are reflected by the experimental results presented in Fig. 3. This reveals yet another problem related to quantitative description of the analysed effect. The initial strength of each specimen is assumed at the average strength of controls not subjected to cyclic loading. However, this assumption is somewhat inaccurate resulting in uncertainty of both the result (increase of strength) and the variable factor (stress intensity level expressed as a load to strength ratio). Therefore, it is recommended to reduce the error by increasing the number of measurements or by introducing additional variable factors, such as Young modulus or the amount of energy released per cycle. These factor change over the course of cyclic loading and hence they can be related to the material strength variation. Such a relationship would facilitate quantitative evaluation of the effect in consideration.

#### 4. DISCUSSION

In the course of the research project a strengthening effect was observed, not investigated up to that time. It fits well with the fatigue damage accumulation hypothesis proposed by one of the authors of this paper [9] which allows to evaluate the effect of varying amplitude loading on the fatigue strength of the material. Earlier investigations of the effect of cyclic loading on the static strength of cement bound mixtures did not take into account the strengthening effect [11], considering only reduction of static strength. This approach could have been inspired by real-life situations where cement-bound courses are exposed to various strength affecting factors right after placement. Shrinkage that occurs during binding results in development of shrinkage cracks which can hardly be avoided [8]. The site traffic, another detrimental factor, can induce stresses higher than allowed for by the design which assumes distribution of load by the overlying courses of pavement [12]. During the operation phase, loading of pavement by heavy vehicles induces fatigue cracks starting at the bottom of the subbase with bottom-up propagation [13]. Any cracks of whatever cause have a detrimental effect on the strength of the road foundation. The stiffness of road

W trakcie badań zmęczeniowych gruntów i mieszanek związanych cementem zniszczenie definiowane jest jako obniżenie modułu Younga o około 50% [13]. Jest to jednak związane z pojawieniem się spękań zmęczeniowych, które osłabiają konstrukcję. Co prawda obserwuje się również korelacje pomiędzy wytrzymałością statyczną i początkowym modułem Younga [15], ale ich zmiany pod wpływem obciążeń cyklicznych wydają się być już mniej zależne. Ocena nośności podbudów często wykonywana jest z wykorzystaniem urządzenia FWD (ang. *Falling Weigh Deflectometer*) [16, 17]. Oszacowany wówczas moduł Younga warstwy jest podstawą do wnioskowania o nośności. Nie można jednak utożsamiać ich z wytrzymałością statyczną mieszanki. Ponadto niewielki wzrost wytrzymałości może zostać łatwo pominięty, gdyż wyniki takich badań charakteryzują się dość dużym rozrzutem [18].

Zaobserwowany w niniejszej pracy efekt wzmocnienia jest liczbowo porównywalny z rozrzutem wyników, zatem może się wydawać nieistotny z praktycznego punktu widzenia. Tak niewielka zmiana wytrzymałości może jednak nieść za sobą znaczne konsekwencje. Na podstawie przeprowadzonych badań nie można było jeszcze dokładnie określić przebiegu zmiany wytrzymałości w zależności od liczby cykli. Dlatego też przeprowadzono dodatkową uproszczoną analizę praktycznej istotności wielkości obserwowanego efektu. Założono, że po wykonaniu danej liczby obciążeń cyklicznych przy określonym stopniu wyężenia średnia wytrzymałość statyczna zostanie zwiększona o 0,38 MPa (co stanowi około 7,6% wytrzymałości początkowej). Na tej podstawie obliczono jak zmieni się wytrzymałość zmęczeniowa tak wytrenowanej próbki. Korzystając z wzoru Dempseya [19] uzyskano równanie (2) pozwalające określić stosunek wytrzymałości zmęczeniowej próbki trenowanej  $\eta_2$  do wytrzymałości zmęczeniowej próbki nietrenowanej  $\eta_1$ :

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = 10^{12,121 \left(1 - \frac{1}{1,076}\right) \cdot S_n} = 10^{0,856 \cdot S_n}, \quad (2)$$

gdzie:

$S_n$  – nominalny stopień wyężenia (stopień wyężenia próbki nietrenowanej).

Jeżeli do powyższego wzoru zostaną podstawione wartości stopnia wyężenia spotykane praktycznie w konstrukcjach nawierzchni drogowej (0,5-0,6) okazuje się, że wytrzymałość statyczna wyższa o 7,6% może spowodować nawet około 3-krotne zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej. Istotności powyższego efektu nie umniejsza fakt, że jest on porównywalny z rozrzutem wyników. Ponieważ wariancje w grupach nie zmieniły się pod wpływem obciążeń

foundation decreases over time during service of pavement [14] reducing its bearing capacity. In fatigue testing of soil and cement-bound materials, the failure state is taken at ca. 50% reduction in the value of Young modulus [13]. This, however, is associated with strength reduction by fatigue cracks. Although correlations can be found between the static strength and the initial Young modulus [15] yet their changes under cyclic loading appear to be less correlated. Falling weight deflectometer test is a widely used method to assess the structural capacity of road bases [16, 17]. It is based on measurement of the Young modulus of the layer. However, it must not be considered equivalent to the static strength of mixture. Moreover, a slight increase in the strength can be easily omitted taking into account considerable spread of results typical of this method [18].

The strengthening effect observed in the present research is numerically comparable with the spread of results and, as such, it could well be considered insignificant for the sake of practicality. However, small as it is, this change of strength can have significant consequences. The performed tests do not provide sufficient basis for accurate determination of the variation in strength depending on the number of cycles. Hence a simplified analysis was performed to determine practical significance of the observed effect. It was assumed that after a given number of load applications up to a pre-determined stress intensity level the average static strength would increase by 0.38 MPa (this being ca. 7.6% of the initial strength). This value was used as the basis to calculate the fatigue strength of specimen preloaded as described above. Then equation (2) was derived from the University of Illinois (Dempsey's) criterion [19] to calculate the ratio between the fatigue strengths of preloaded and non-preloaded specimens ( $\eta_1$  and  $\eta_2$  respectively):

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = 10^{12,121 \left(1 - \frac{1}{1,076}\right) \cdot S_n} = 10^{0,856 \cdot S_n}, \quad (2)$$

where:

$S_n$  – nominal stress intensity (stress state of a non-preloaded specimen).

Putting in the above equation stress intensity levels typically encountered in road pavements (0.5-0.6) yields static strength levels higher by 7.6% which can increase the fatigue strength approximately a factor of three. The fact that this is comparable to the spread of results does not compromise the significance of this effect. Since cyclic loading has not changed variances within the respective groups (as confirmed by the Bartlett's test) the difference



cyklicznych (co wykazał test Bartletta), wpływ na niezawodność konstrukcji ma jedynie różnica średniej wytrzymałości.

## 5. WNIOSKI

Przedstawione w pracy wyniki badań pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Obciążenia cykliczne mają wpływ na wytrzymałość statyczną piasku związanego cementem. W szczególności wytrzymałość statyczna może ulec zwiększeniu – następuje tzw. zjawisko trenowania, jednak wielkość odchylenia standardowego uzyskanych wyników jest porównywalna z obserwowaną zmianą wytrzymałości.
2. Określenie ilościowej zależności pomiędzy parametrami obciążenia wstępnego jest utrudnione ze względu na duży rozrzut wyników. Zwiększenie dokładności analizy wymaga dalszych badań i wspomaganie teoretycznym opisem materiału na podstawie dodatkowo mierzonych wielkości.
3. Chociaż zaobserwowany efekt wzmocnienia jest liczbowo porównywalny z rozrzutem wyników, to jego wielkość jest istotna zarówno ze statystycznego jak i praktycznego punktu widzenia.

## INFORMACJE DODATKOWE

Przeprowadzenie niniejszych badań zostało sfinansowane z grantu dziekańskiego nr 504 / 02169/1081/42.000, realizowanego na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Graczyk M.*: Nośność konstrukcji nawierzchni wielowarstwowych w krajowych warunkach klimatycznych. *Studia i Materiały, Zeszyt 63, IBDiM, Warszawa, 2010*
- [2] *Papagiannakis A.T., Masad E.A.*: *Pavement Design and Materials*. Wiley, New Jersey, 2008
- [3] *Judycki J.*: Podstawy określania współczynników równoważności obciążenia osi do projektowania nawierzchni drogowych. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **5**, 2, 2006, 55-92
- [4] *Miner M.A.*: Cumulative damage in fatigue. *Journal of Applied Mechanics*, 67A, 1945, 159-164
- [5] *Oh B.H.*: Cumulative Damage Theory of Concrete under Variable-Amplitude Fatigue Loadings. *American Concrete Institute Materials Journal*, **88**, 1, 1991, 41-48
- [6] *Xi L., Songlin Z.*: Strengthening and damaging under low-amplitude loads below the fatigue limit. *International Journal of Fatigue*, **31**, 1, 2009, 341-345

of average strength is to be considered the only indication of structural reliability.

## 5. CONCLUSIONS

The following conclusions can be drawn from the results of this research:

1. Cyclic loading affects the static strength of cement-bound sand. In particular, the static strength can increase as a result of preloading, called in short the “preloading effect”, however, the standard deviation of results is comparable to the observed change of strength.
2. It is difficult to determine a quantitative relationship between preloading parameters due to the high spread of results. Further testing accompanied by theoretical description of the material on the basis of the measured parameters is required to obtain a more accurate determination.
3. Although numerically comparable with the spread of results the observed preloading effect is both statistically significant and important for practical purposes.

## ACKNOWLEDGEMENT

This research project was financed from Dean’s research grant No. 504 / 02169/1081/42.000 and carried out at the Faculty of Civil Engineering at the Warsaw University of Technology.

- [7] *Zhao L., Zheng S., Feng J.*: Fatigue life prediction under service load considering strengthening effect of loads below fatigue limit. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 27, 6, 2014, 1178-1185
- [8] *Koba H.*: Trwałość Nawierzchni drogowych o podbudowach związanych cementem. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2000*
- [9] *Brzeziński K., Zbiciak A.*: Wpływ historii obciążenia na trwałość zmęczeniową gruntów związanych cementem. *Drogownictwo*, **LXIX**, 9, 2014, 288-293
- [10] PN-EN 196-1:2006 Metody badania cementu - Część 1: Oznaczanie wytrzymałości
- [11] *Raad L.*: Design Criteria for Soil-Cement Bases. Ph. D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, 1976
- [12] *Rafalski L.*: *Podbudowy Drogowe. Studia i Materiały, Zeszyt 59, IBDiM, Warszawa, 2007*

- [13] *Mandal T., Tinjum J.M., Gokce A., Edil T.B.*: Protocol for testing flexural strength, flexural modulus, and fatigue failure of cementitiously stabilized materials using third-point flexural beam tests. *Geotechnical Testing Journal*, **39**, 1, 2016, 91-105
- [14] *Yeo R., Vuong B., Alderson A.*: Towards National Test Methods for Stiffness and Fatigue Characterisation of Stabilised Materials, Report RC2028-002. ARRB Transport Research, Sydney, Australia, 2002
- [15] *Gajewska B., Gajewski M., Kraszewski C., Rafalski L.*: Badania modułów sprężystości wybranych mieszanek związanych hydraulicznie (HBM) pod obciążeniem cyklicznym. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **11**, 4, 2012, 269-280
- [16] *Ruta P., Krawczyk B., Szydło A.*: Identification of pavement elastic moduli by means of impact test. *Engineering Structures*, **100**, 2015, 201-211
- [17] *Sybilski D., Bańkowski W., Sudyka J., Krysiński L.*: Reasons of premature cracking pavement deterioration – a case study. 7<sup>th</sup> RILEM International Conference on Cracking in Pavements, Springer Netherlands, 2012, 1029-1038
- [18] *Mechowski T., Harasim P., Kowalski A., Borucki R.*: Sprawozdanie z realizacji pracy TD-80: Analiza wpływu stanu podbudowy na ocenę nośności nawierzchni o konstrukcji półsztywnej. IBDiM, Warszawa, 2007
- [19] *Dempsey B.J., Janssen D., Thomas J., Frey P., Ioannides A., Elliot R.*: Development of a Preliminary ALRS Stabilized Material Pavement Analysis System (SPAS). Department of Civil Engineering, University of Illinois, Illinois, 1984