

BARTŁOMIEJ KRAWCZYK¹⁾PIOTR MACKIEWICZ²⁾

IMPACT OF REPETITIVE LOADING ON SUBGRADE PARAMETERS DERIVED FROM LIGHT WEIGHT DEFLECTOMETER TEST

WPŁYW OBCIĄŻEŃ CYKLICZNYCH W BADANIU LEKKĄ PŁYTA DYNAMICZNĄ NA IDENTYFIKOWANE PARAMETRY PODŁOŻA

STRESZCZENIE. W powszechnie stosowanych metodach oceny nośności podłoża, przy użyciu lekkiej płyty dynamicznej (LPD), zakłada się liniowo-sprężyste zachowanie materiału. Przy identyfikacji parametrów podłoża brane są pod uwagę wyłącznie początkowe cykle obciążenia. Nie uwzględnia się zmiany parametrów materiału pod wpływem cyklicznych obciążeń. Z uwagi na specyfikę materiałów używanych do budowy dróg, zwłaszcza materiałów sypkich, pomijanie faktu „dogęszczania” warstwy pod wpływem wielokrotnych obciążeń jest dużym przybliżeniem. W rzeczywistości, z każdym kolejnym obciążeniem parametry podłoża ulegają zmianie. W powszechnej praktyce pomiarowej przyjmuje się, że po trzecim cyklu obciążenia (tzw. „zrzucie”) podłoże jest już dogęszczone, a przemieszczenia pionowe pomierzone w czwartym, piątym i szóstym cyklu są miarodajne (jako średnia z tych trzech) przy ocenie parametrów podłoża. Celem artykułu było zweryfikowanie powyższego założenia, poprzez przeprowadzenie cyklicznych pomiarów przemieszczeń podłoża za pomocą LPD i skonfrontowanie uzyskanych wyników z identyfikacją numeryczną modułów warstw. Autorzy pokazali zmienność identyfikowanych parametrów warstw podłoża w zależności od liczby cykli obciążeń w badaniu LPD. Do identyfikacji parametrów podłoża wykorzystano Metodę Elementów Skończonych 3D MES.

SŁOWA KLUCZOWE: Lekka Płyta Dynamiczna, obciążenia cykliczne, zmiana parametrów podłoża.

ABSTRACT. The most popular methods used for evaluation of subgrade bearing capacity with light weight deflectometer (LWD) assume linear-elastic behaviour of material. In these methods the input data used for identification of subgrade parameters are limited to initial loading cycles. Change of material parameters occurring under repetitive loading is not taken into consideration. Due to the characteristics of road building materials, including in particular granular materials, omitting the compaction resulting from repetitive loading is considered a rough approximation. Actually the subgrade parameters do change after each load application. It is generally accepted that after the third loading cycle (3rd drop) final degree of compaction is achieved and, as such, the vertical deflections obtained at the fourth, fifth and sixth cycles provide a representative measure of the subgrade parameters (calculated as an average of the three measurements). This paper presents the results of research carried out to verify the above-mentioned assumption by measuring subgrade displacements according to LWD test, followed by comparing the measurement results against numerically identified moduli of the respective layers. The authors have demonstrated that the identified subgrade parameters vary depending on the number of loading cycles (drops) in LWD test. Identification of subgrade parameters was carried out with 3D-FEM (Finite Element Method).

KEYWORDS: Light Weight Deflectometer, repetitive loading, subgrade parameters change.

DOI: 10.7409/rabdim.015.001

¹⁾ Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Katedra Dróg i Lotnisk; b.krawczyk@pwr.wroc.pl (✉)

²⁾ Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Katedra Dróg i Lotnisk; piotr.mackiewicz@pwr.wroc.pl

1. WPROWADZENIE

Wielkością stosunkowo łatwą do wyznaczenia *in situ* i bezpośrednio związaną z nośnością podłoża jest przemieszczenie pionowe (ugięcie), rejestrowane pod znanym obciążeniem. Metody pomiarów przemieszczeń pionowych podłoża, w zależności od sposobu obciążenia, podzielić można na: pomiary od obciążeń statycznych – w których ugięcie rejestrowane jest pod płytą naciskową (płyta VSS) oraz pomiary od obciążeń dynamicznych (udarowych) – w których ugięcie rejestrowane jest pod spadającą z ustalonej wysokości masą – lekka płyta dynamiczna (LPD) oraz tester Clegga.

Bez wątpienia najefektywniejszym, z grupy badań niszczących, jest badanie podłoża przy użyciu LPD. W tematyce tej prowadzonych jest w ostatnich latach wiele badań, zarówno w kraju, jak i za granicą. Do najistotniejszych zaliczyć można chociażby [1-9]. Dotyczą one samej procedury badawczej, analiz wyników uzyskanych w badaniach dynamicznych, modelowania oraz korelacji z innymi metodami badawczymi.

Problem polega jednak na tym, że we współczesnej praktyce projektowej i pomiarowej nie uwzględnia się wpływu obciążeń cyklicznych w badaniu LPD na zmianę parametrów badanego podłoża. Przyjmuje się, że po trzecim cyklu obciążenia (tzw. „zrzucie”) podłoże jest już dogęszczone, a jego parametry błędnie identyfikowane są na podstawie wyników ugięć (przemieszczeń pionowych) uśrednionych z czwartego, piątego i szóstego cyklu obciążeniowego. Pomija się natomiast efekt dogęszczenia przy kolejnych cyklach obciążeniowych, co ma istotny wpływ na rejestrowane ugięcia oraz moduły sprężystości podłoża, a w konsekwencji na jego trwałość zmęczeniową.

2. OPIS URZĄDZENIA LPD

Schemat działania LPD przedstawiono na Rys. 1. Zasada działania urządzenia jest następująca: ciężar, swobodnie spadający z ustalonej wysokości, uderza w układ tłumiący, który ulega deformacji i płynnie przekazuje impuls obciążający na płytę naciskową. Płyta z kolei wywołuje pionowe przemieszczenie (ugięcie) podłoża, które rejestruje specjalny czujnik, zwany geofonem. Geofon jest czujnikiem zbliżonym swoją budową do sejsmometru, przystosowanym jednak do pracy w wyższych częstotliwościach drgań. Składa się on zasadniczo z masy sejsmicznej (cewki) przemieszczającej się względem obudowy w polu magnetycznym pod wpływem drgań. Ruch przewodnika z prądem w polu magnetycznym powoduje pojawienie się

1. INTRODUCTION

Vertical displacement (deflection) is a parameter easy to determine *in situ* and directly related to the strength of subgrade, subjected to the known amount of applied loading. The methods used for measuring subgrade displacements can be grouped as follows depending on the method of loading: static load tests – in which deflection is measured under the loading plate (static plate load test) and dynamic (impact) load tests in which deflection is measured under a weight dropped from a fixed height using light weight deflectometer (LWD) or Clegg impact soil tester.

LWD test is without doubt the most effective non-destructive technique for identifying subgrade parameters. A number of research projects have been carried out in this area, both in Poland and in other countries. These include, for example, the projects reported in [1-9]. These research projects cover the test procedure itself, analysis of results obtained in the dynamic load test, as well as modelling and correlation with other test methods.

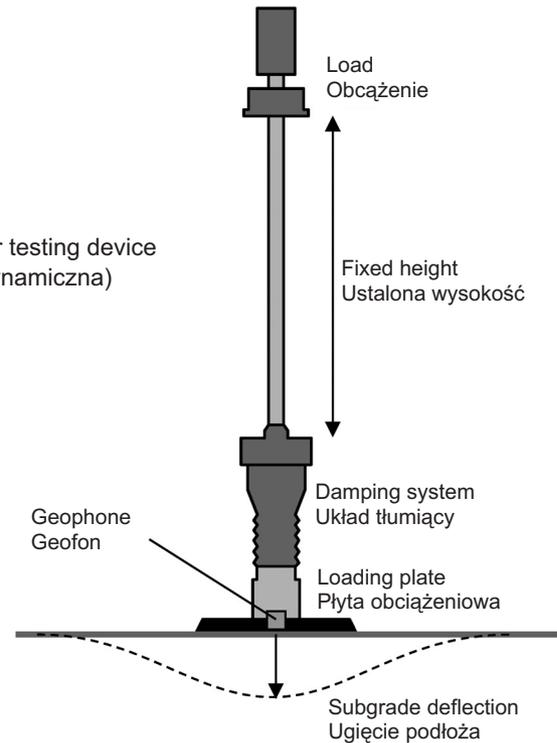
The problem is that both the design practice and LWD test procedures do not allow for the effect of repetitive loading on the subgrade parameters. A common assumption is that after the third loading cycle (3rd drop) the final degree of compaction is achieved and, as such, the subgrade parameters are identified on the basis of deflections (vertical displacements) calculated as the average of the results obtained in the 4th, 5th and 6th drop. That is way additional compaction caused by the following loading cycles is omitted although it has a significant effect both on the recorded deflections and on the calculated moduli, hence on the predicted fatigue resistance as well.

2. DESCRIPTION OF LWD APPARATUS

The set-up of LWD apparatus is presented in Fig. 1. The test procedure is as follows: a test weight is dropped from a fixed height on damping system for smooth transfer of the loading pulse onto the loading plate. The loading plate in turn causes vertical deformation (deflection) of subgrade which is recorded by a special sensor called geophone. In terms of construction it resembles a seismometer, yet it is designed to operate at a higher frequency range. It is based on a coil (moving mass) which is placed in magnetic field and moves under the effect of vibrations in relation to the stationary case. This induces electromotive force (input voltage) equal to the rate of change of magnetic flux and proportional to the coil

siły elektromotorycznej (wyjściowego napięcia) równej szybkości zmian strumienia indukcji pola magnetycznego i proporcjonalnej do prędkości przemieszczenia masy sejsmicznej. Wyjściowy sygnał napięcia (proporcjonalny do prędkości) jest następnie przetwarzany przez oprogramowanie ugięciomierza na względne przemieszczenie masy sejsmicznej (cewki). Względne przemieszczenie masy sejsmicznej odpowiada z kolei pionowemu przemieszczeniu (ugięciu) konstrukcji nawierzchni. Zasadę działania geofonu szczegółowo przedstawiono w [10].

Fig. 1. View of the Light Weight Deflectometer testing device
Rys. 1. Widok urządzenia LPD (lekka płyta dynamiczna)



3. BADANIA TERENOWE

Pomiary przemieszczeń pionowych przy użyciu LPD przeprowadzono na 3 zróżnicowanych podłożach:

- podłoże ulepszone (metoda wymiany warstwy gruntu) z kruszywa łamanego 0/63 mm, grubości 25 cm, wykonane na podłożu rodzimym z piasku gliniastego,
- podłoże ulepszone z kruszywa stabilizowanego cementem $R_m = 1,5-2,5$ MPa, grubości 15 cm, wykonane na podłożu rodzimym z piasku gliniastego,
- podłoże rodzime (piasek gliniasty).

Stanowiska badawcze przygotowano zgodnie z [11], usuwając luźny materiał, a wszelkie nierówności na podłożu ulepszonym wyrównano cienką warstwą piasku kwarcowego, co gwarantowało poprawne posadowienie płyty obciążeniowej. Układy warstwowe przedstawione na Rys. 2 stanowiły podłoże pod konstrukcje nawierzchni dróg dojazdowych oraz parkingów przy budynkach użyteczności publicznej i przeznaczone były dla ruchu lekkiego. Widok przeprowadzonych badań terenowych przedstawiono na Rys. 3.

Na każdym z pól doświadczalnych przeprowadzono pomiary przemieszczeń pionowych płytą dynamiczną LPD, każdorazowo wykonując po 30 zrzutów, generujących na styku płyty naciskowej z podłożem impuls obciążający o wartości 0,1 MPa. Pomiary na kruszywie łamanym oraz na podłożu rodzimym z piasku gliniastego przeprowadzono po zagęszczeniu w warunkach wilgotności optymalnej. Badania na podłożu ulepszonym nie wykonywano bezpośrednio nad miejscem badania podłoża rodzimego. Punkt pomiarowy na podłożu ulepszonym przesuwano każdorazowo o około 1 m od miejsca, w którym wykonywano badania na podłożu

speed. The input voltage signal (proportional to the speed of movement) is then converted by software program to relative displacement of mass (coil). Displacement of the moving mass, in turn, corresponds to the vertical displacement (deflection) of pavement. More details on geophone operation can be found in [10].

3. FIELD TESTS

The measurements of vertical displacements with LPD apparatus were carried out for the following three subgrade types:

- subgrade improved with a 25 cm layer of 0/63 mm crushed stone (soil replacement technique) placed on loamy sand on natural subgrade,
- subgrade improved with 15 cm cement stabilized aggregate of $R_m = 1.5-2.5$ MPa placed on loamy sand on natural subgrade,
- natural subgrade (loamy sand).

The test sites were prepared according to [11] which included removal of all loose material and levelling out the surface with a thin layer of quartz sand to ensure good seating of the loading plate. The layered systems presented in Fig. 2 provided the foundation for driveways and parking areas, next to public buildings, designed for light traffic. Fig. 3 presents an overview of the test sites.

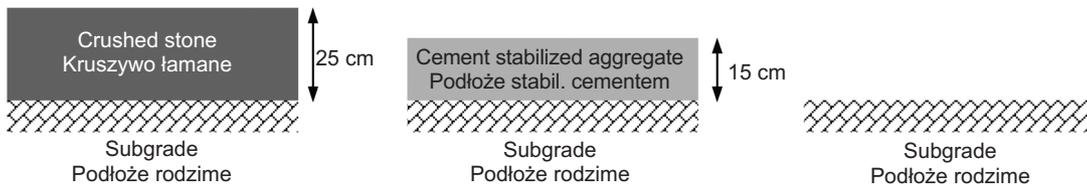


Fig. 2. Diagrams of tested sections
Rys. 2. Schematy badanych układów

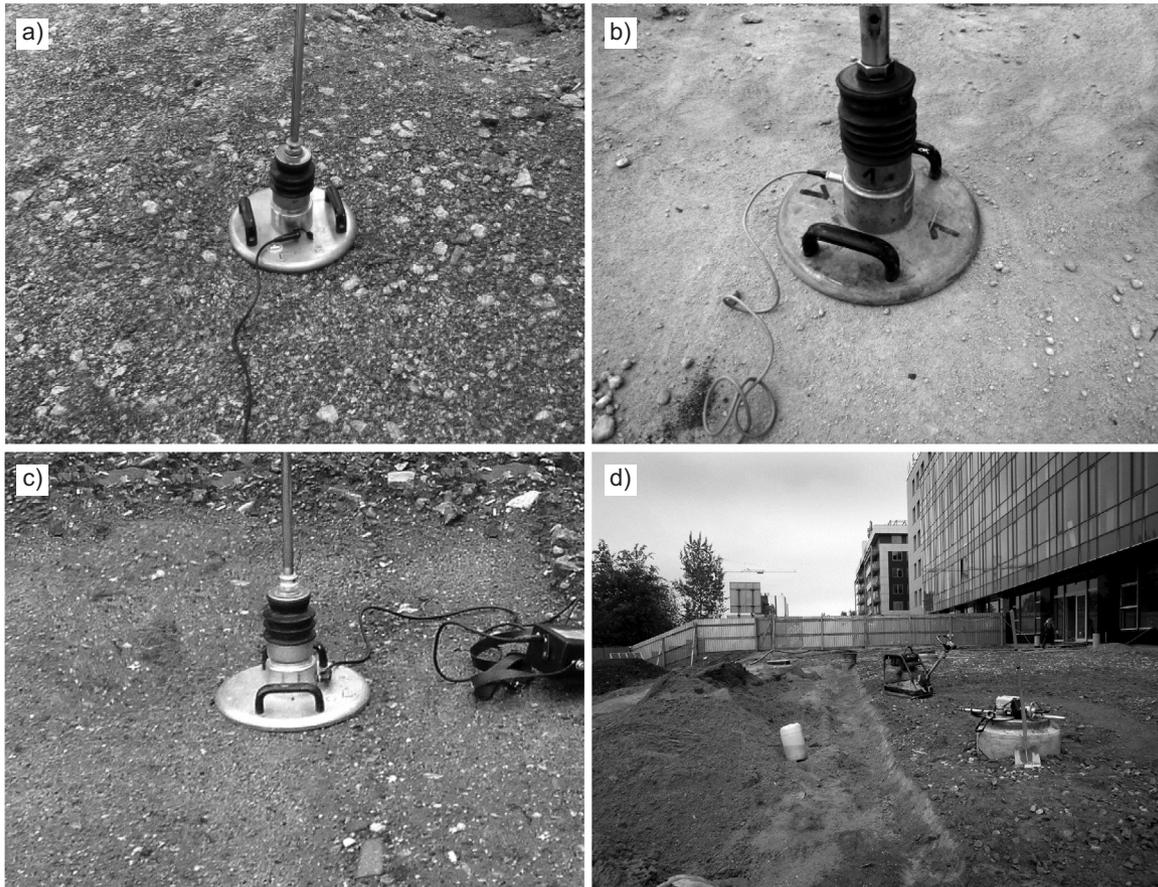


Fig. 3. Field measurements: a) crushed stone, b) cement stabilized aggregate, c) natural subgrade, d) construction site view
Rys. 3. Badania terenowe: a) kruszywo łamane, b) stabilizacja cementowa, c) podłoże rodzime, d) widok miejsca budowy

rodzimum. Na każdym z badanych podłoży przeprowadzono 3 niezależne pomiary. Uzyskane wyniki ugięć uśredniono. Odchylenie wyników pomiaru ugięć od wartości średniej wyniosło od 10 do 15%. W dalszych analizach operowano wartościami średnimi.

Niezależnie, przed przystąpieniem do badania LPD, przeprowadzono pomiary statyczne VSS, uzyskując wskaźnik odkształcenia $I_0 < 2,2$, odpowiadający właściwemu zagęszczeniu badanych warstw ($I_s = 1,0$). W Tabl. 1 oraz na Rys. 4-6 przedstawiono wyniki pomiarów przemieszczeń pionowych (ugięć) w zależności od liczby cykli obciążających.

The LWD tests carried out at each of these sites comprised thirty drops of the test weight generating 0.1 MPa loading pulse at the loading plate and subgrade interface. Crushed stone and natural subgrade (loamy sand) were prepared for testing by compacting at optimum moisture content. In the case of improved subgrade the test locations were moved away from the positions of the natural subgrade tests. In each case about 1 m spacing was maintained between the natural and improved subgrade test locations. Three independent measurements were taken on each tested subgrade. The measured deflections were averaged. The individual results deviated from the average by 10-15%. The average values obtained in this way were used as input for subsequent analyses.

Additionally, before the LWD test static plate load test VSS was carried out, giving the modulus ratio of $I_0 < 2.2$ which indicates adequate compaction of the tested layers ($I_s = 1.0$). Table 1 and Figs. 4-6 present the measured vertical displacements (deflections) depending on the number of loading cycles.

Table 1. Results of deflection measurements (average of three measurements)

Tablica 1. Zestawienie wyników pomiarów ugięć (średnia z trzech pomiarów)

Cycles / Cykle	Deflection / Ugięcie [m]		
	Crushed stone on natural subgrade Warstwa kruszywa na podłożu rodzimym	Cement stabilized aggregate on natural subgrade Warstwa stabilizacji na podłożu rodzimym	Natural subgrade Podłoże rodzime
1	3.09E-04	1.10E-04	8.39E-04
2	2.37E-04	8.37E-05	7.28E-04
3	2.25E-04	7.22E-05	6.96E-04
4	2.32E-04	7.44E-05	6.85E-04
5	2.20E-04	7.07E-05	6.44E-04
6	2.08E-04	7.34E-05	6.33E-04
7	2.07E-04	7.23E-05	6.14E-04
8	2.04E-04	6.93E-05	5.90E-04
9	2.05E-04	7.28E-05	5.87E-04
10	1.91E-04	7.03E-05	6.05E-04
11	1.98E-04	6.85E-05	5.91E-04
12	1.88E-04	6.92E-05	5.83E-04
13	1.95E-04	7.10E-05	5.62E-04
14	1.86E-04	6.97E-05	5.94E-04
15	1.74E-04	6.69E-05	5.43E-04
16	1.83E-04	7.01E-05	5.29E-04
17	1.83E-04	6.73E-05	5.25E-04
18	1.79E-04	6.87E-05	5.53E-04
19	1.79E-04	6.59E-05	5.47E-04
20	1.67E-04	6.82E-05	5.51E-04
21	1.66E-04	6.42E-05	5.43E-04
22	1.64E-04	6.74E-05	5.08E-04
23	1.71E-04	6.78E-05	5.19E-04
24	1.70E-04	6.49E-05	5.23E-04
25	1.69E-04	6.37E-05	5.27E-04
26	1.76E-04	6.41E-05	5.45E-04
27	1.65E-04	6.58E-05	5.04E-04
28	1.65E-04	6.13E-05	5.38E-04
29	1.67E-04	6.12E-05	5.23E-04
30	1.62E-04	5.99E-05	5.11E-04

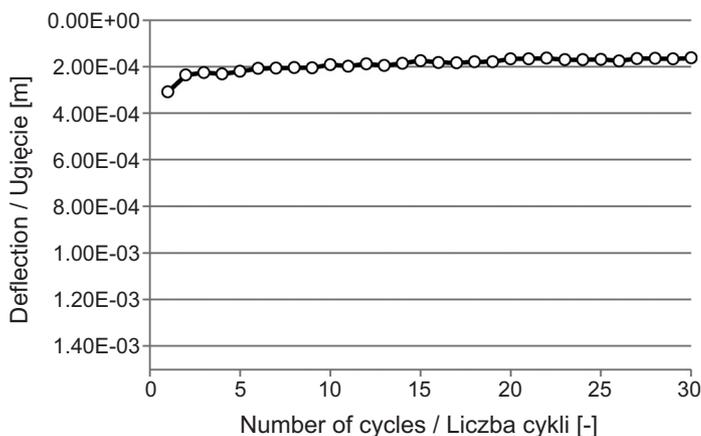


Fig. 4. Crushed stone on natural subgrade vertical deflections as a function of loading cycles

Rys. 4. Ugięcia pionowe w funkcji liczby cykli obciążeń dla warstwy kruszywa na podłożu rodzimym

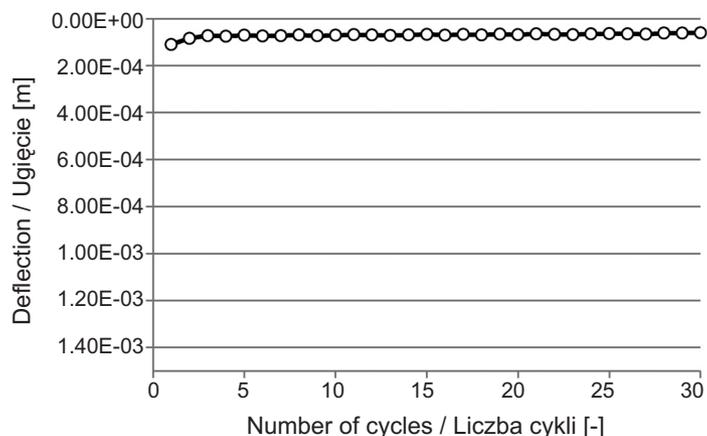


Fig. 5. Cement stabilized aggregate on natural subgrade vertical deflections as a function of loading cycles

Rys. 5. Ugięcia pionowe w funkcji liczby cykli obciążeń dla warstwy stabilizacji na podłożu rodzimym

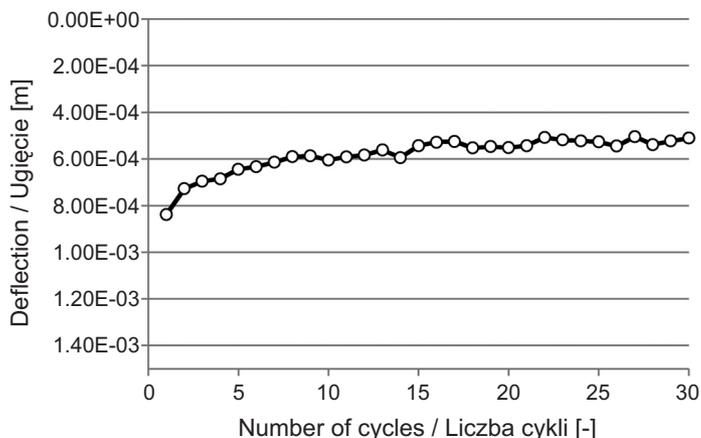


Fig. 6. Natural subgrade vertical deflections as a function of loading cycles

Rys. 6. Ugięcia pionowe w funkcji liczby cykli obciążeń dla podłoża rodzimego

Na podstawie przedstawionych wyników pomiarów widać wpływ liczby cykli obciążeń na rejestrowane przemieszczenia pionowe w badaniu LPD, przy czym wpływ ten zależy od rodzaju podłoża. Najbardziej zauważalny jest on w przypadku podłoża rodzimego, mniej w przypadku kruszywa łamanego. Natomiast w przypadku kruszywa stabilizowanego cementem wpływ liczby cykli obciążeń na rejestrowane przemieszczenia pionowe jest nieznaczny. Zarejestrowane wyniki przemieszczeń wykorzystano w dalszej części pracy do identyfikacji wartości modułów warstw podłoża, w zależności od liczby cykli obciążeń.

These results show that the vertical displacements recorded in the LWD test depend on the number of drops and the magnitude of this effect depends on the type of subgrade. It is most noticeable in the case of natural subgrade and much less noticeable in the case of crushed stone layer. In the case of subgrade improved with cement stabilized aggregate repetitive loading had only a slight effect on the recorded vertical displacements. The recorded displacements were used in the further part of the research for identifying the moduli of the subgrade layers in relation to the number of loading cycles.

4. IDENTIFICATION OF LAYER PARAMETERS WITH FINITE ELEMENT METHOD (FEM)

Identification of subgrade parameters (moduli) on the basis of measured subgrade deflections in relation to the number of loading cycles was carried out using a static-linear numerical model. The relevant calculations were carried out with Finite Element Method (FEM). The model of $2.5 \times 2.5 \times 2.4$ m in size was made of 3D solid elements (Fig. 7) with the subgrade layers described by elastic parameters. The method of load application represented the field tests situation i.e. 0.1 MPa load applied by a circular plate of 0.15 m radius. The model was calibrated according to the test results. The element size was defined using the criterion of correspondence between displacements and stresses at the interface between layers and at different depths in natural subgrade.

4. IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW WARSTW PODŁOŻA Z WYKORZYSTANIEM MES

Identyfikację parametrów (modułów) na podstawie pomierzonych ugięć podłoża, w zależności od liczby cykli obciążeń, przeprowadzono z wykorzystaniem modelu numerycznego o charakterze liniowo-statycznym. Do obliczeń wykorzystano Metodę Elementów Skończonych (MES). Model o wymiarach: $2,5 \times 2,5 \times 2,4$ m zbudowano z wykorzystaniem objętościowych elementów trójwymiarowych (Rys. 7), a warstwy podłoża opisano parametrami sprężystymi. Obciążenie (sztywną płytą) przyjęto zgodnie z warunkami badań terenowych – jako model koła o nacisku 0,1 MPa i promieniu 0,15 m. Model został skalibrowany na podstawie badań. Przy doborze wielkości elementu przyjęto kryterium zbieżności wartości przemieszczeń i naprężeń na styku warstw oraz na różnych głębokościach w podłożu rodzimym.

W kolejnych cyklach obciążenia, w rozwiązaniach iteracyjnych (identyfikacja *back-calculation*) dla warstwy kruszywa łamanego lub stabilizacji cementowej na podłożu rodzimym, uwzględniano także zmianę wartości modułu samego podłoża, na skutek jego pośredniego dogęszczania, w trakcie wykonywania badań LPD na warstwie powyżej. Na podstawie badań terenowych przeprowadzonych bezpośrednio na podłożu rodzimym stwierdzono istotną zmianę wartości jego modułu sprężystości, w zależności od liczby cykli obciążenia 0,1 MPa. Mniejszy (ale wciąż zauważalny) wpływ na zmianę wartości modułu podłoża ma oddziaływanie takiego obciążenia pośrednio, przez warstwę powyżej (kruszywo lub stabilizacja). Wyznaczone w takim przypadku, z wykorzystaniem modelu numerycznego (MES), przeciętne wartości naprężeń pionowych na spodzie warstwy kruszywa lub stabilizacji wynoszą 0,02-0,03 MPa. Na podstawie obliczeń numerycznych przeanalizowano zmianę wartości modułów podłoża, w zależności od wartości ugięć, przy różnych poziomach obciążenia (Rys. 8). Widać wyraźnie, że zmiana wartości modułu podłoża, na skutek oddziaływania nawet niewielkich naprężeń pionowych, jest zauważalna. Fakt ten uwzględnili autorzy w dalszych analizach przy określaniu wartości modułu równoważnego dla całego układu warstw, w przypadku podłoża ulepszanego.

Na Rys. 9-11 przedstawiono zidentyfikowane wartości modułów warstw podłoża w zależności od liczby cykli obciążeń. Określone moduły wyznaczono dla założonego w badaniach terenowych poziomu obciążenia 0,1 MPa.

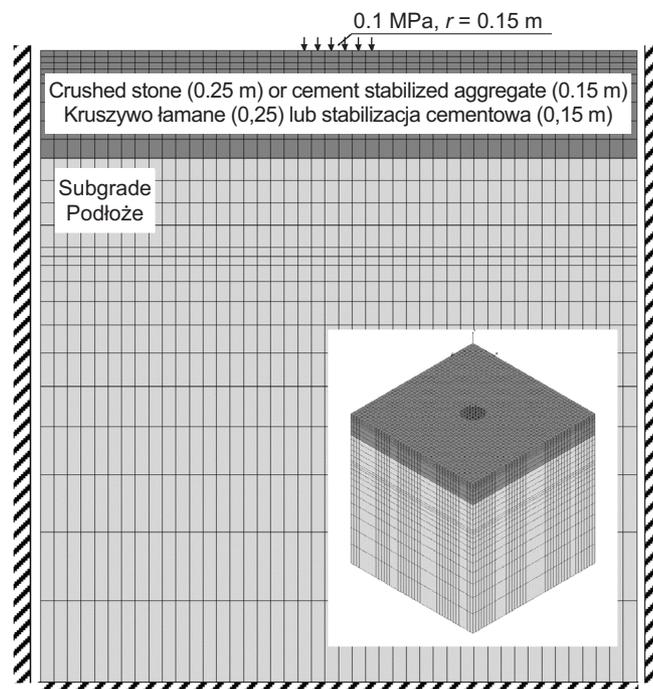


Fig. 7. Computational model for layered subgrade
Rys. 7. Model obliczeniowy układu warstw podłoża

In the subsequent loading cycles the iterative solutions (identification of parameters using back calculation technique) for crushed stone or cement stabilized aggregate layers placed on natural subgrade allowed for the change of subgrade modulus as a result of indirect compaction during LWD testing of the overlying layer. The field tests carried out directly on natural subgrade have showed that the value of elasticity modulus changes considerably depending on the number of loading cycles of 0.1 MPa. This effect was smaller (yet still noticeable) where the load was applied on the natural subgrade indirectly, i.e. through the overlying layer (crushed stone or cement stabilized aggregate). In such case the average values of vertical stresses at the bottom of aggregate or cement stabilized aggregate layer, identified using numerical model (FEM), were in the range 0.02-0.03 MPa. Numerical calculations were carried out to analyse variation of the subgrade modulus depending on deflection at different loading levels (Fig. 8). As shown the subgrade modulus changes even under small vertical stress values. This conclusion was taken into consideration by the authors in the further analyses carried out to obtain equivalent modulus of layered systems in case of improved subgrades.

Fig. 9-11 present the identified moduli values of subgrade layers depending on the number of loading cycles. The moduli were calculated for the loading level used in the

W przypadku podłoża rodzimego przeprowadzono także analizę wpływu różnych poziomów obciążenia (0,0125; 0,025; 0,05 i 0,1 MPa) z uwagi na występowanie w układzie warstwowym (podłoże ulepszone) mniejszych niż 0,1 MPa naprężeń na poziomie podłoża rodzimego.

field tests, i.e. 0.1 MPa. Additionally, the impact of different loading levels (0.0125; 0.025; 0.05 and 0.1 MPa) was also checked for natural subgrade since in layered systems (improved subgrade) the stress values at the interface with natural subgrade were below 0.1 MPa.

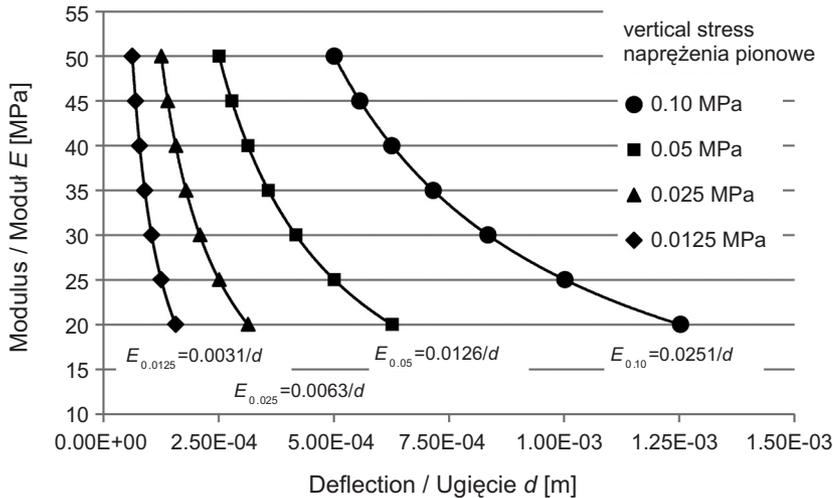


Fig. 8. Subgrade modulus of elasticity as a function of vertical stress
Rys. 8. Wpływ wartości naprężeń pionowych na zmianę modułu podłoża

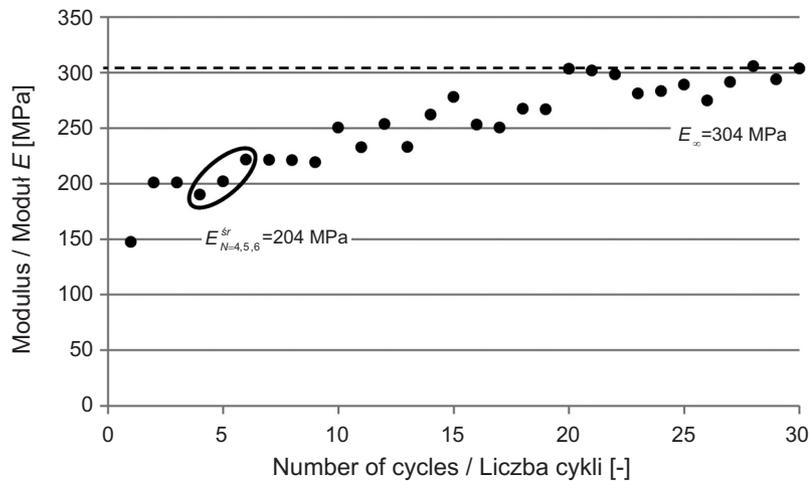


Fig. 9. Crushed stone modulus of elasticity as a function of loading cycles
Rys. 9. Zależność wartości modułów warstwy kruszywa od cykli obciążenia

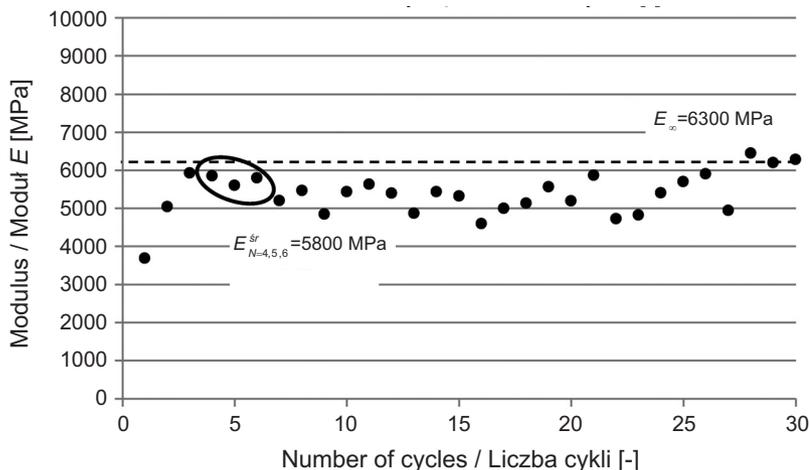


Fig. 10. Cement stabilized aggregate modulus of elasticity as a function of loading cycles
Rys. 10. Zależność wartości modułów warstwy stabilizacji cementowej od cykli obciążenia

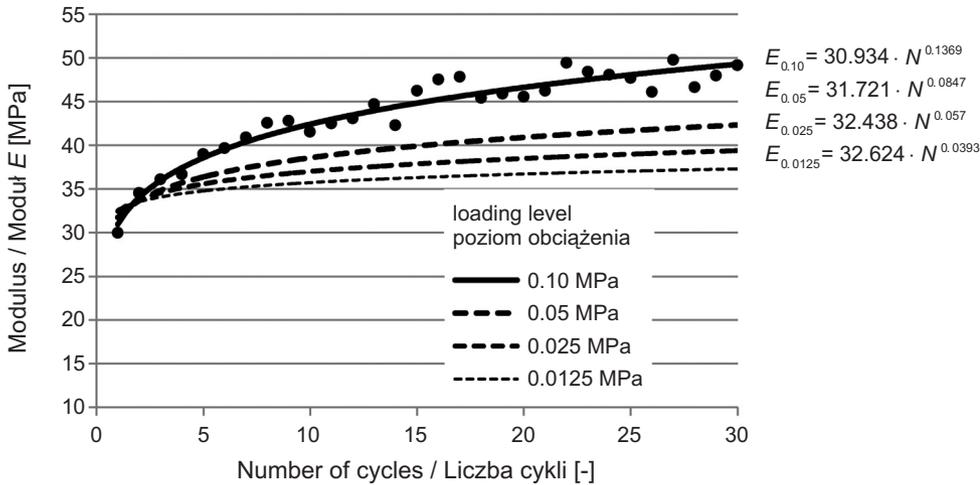


Fig. 11. Natural subgrade modulus of elasticity as a function of loading cycles for different loading levels

Rys. 11. Zależność wartości modułów podłoża rodzimego od liczby cykli i poziomu obciążenia

Na podstawie przeprowadzonych identyfikacji widać wyraźną zmianę wartości modułów kruszywa łamanego i podłoża rodzimego w zależności od liczby cykli obciążeń. Szczególnie istotna jest różnica między modułami zidentyfikowanymi na podstawie ugięć uśrednionych z czwartego, piątego i szóstego cyklu (zwyczajowo wykorzystywanych przy identyfikacji) oraz cykli dalszych. W 20.-30. cyklu następuje już stabilizowanie się wartości identyfikowanych modułów. Zdecydowanie mniejszą zmianę wartości modułów w zależności od liczby cykli obciążeń obserwuje się w przypadku warstwy stabilizacji cementowej.

Przedstawiona w punkcie 4 zmiana modułu podłoża rodzimego (w przypadku oddziaływania cyklicznego), podczas badania podłoża ulepszanego (warstwa stabilizacji lub kruszywa łamanego na podłożu rodzimym), ma wpływ na moduł równoważny całego układu warstw podłoża. Na Rys. 12 i 13 pokazano zmianę wartości modułów równoważnych podłoża ulepszanego (moduł dynamiczny E_{vd} , obliczony bezpośrednio z wartości ugięć w badaniu LPD), w funkcji liczby cykli obciążeń, na podstawie wyników uzyskanych w badaniach terenowych. Przy założeniu nacisku 0,1 MPa oraz średnicy płyty 0,3 m, wartość modułu wyznaczana jest z zależności (1) [11]:

$$E_{vd} = 22,5 / d, \quad (1)$$

gdzie:

- E_{vd} – moduł równoważny podłoża [MPa],
- d – przemieszczenie [mm].

Wyraźnie widać jak istotny może być fakt zmiany wartości modułów identyfikowanych na podstawie 30. cyklu obciążenia (gdy rejestrowane ugięcia są już „ustabilizowane”) względem modułów identyfikowanych na podstawie

The identified values clearly show change of the modulus value with the increase in the number of loading cycles – both for natural and crushed stone improved subgrades. The most important is the difference between moduli identified on the basis of averaged deflections at the 4th, 5th and 6th drop (as typically used for identification of moduli) and at further drops. The moduli values stabilize between 20th and 30th drop. In the case of cement stabilized aggregate repetitive loading has much less effect on the modulus.

Change of the natural subgrade modulus as described in 4 (in case of repetitive loading) during testing of improved subgrade (cement stabilized aggregate or crushed stone layer placed on natural subgrade) has an effect on the value of equivalent modulus of the layered system. Fig. 12 and Fig. 13 present the variation of the equivalent modulus of improved subgrade (dynamic modulus E_{vd} calculated directly from deflections in LPD test) as a function of the number of loading cycles based on the results from field tests. Assuming 0.1 MPa load and 0.3 m plate diameter the modulus is calculated with the following equation (1) [11]:

$$E_{vd} = 22.5 / d, \quad (1)$$

where:

- E_{vd} – equivalent modulus of subgrade [MPa],
- d – displacement [mm].

There is a big difference between moduli identified on the basis of deflections at 30th drop (when the deflection values stabilized) as compared to the averaged value obtained at 4th, 5th and 6th drop. In the case of crushed stone layer placed on natural subgrade the difference amounts

ugięć uśrednionych z 4., 5. i 6. cyklu obciążenia. W przypadku warstwy kruszywa łamanego na podłożu rodzimym różnica ta wynosi około 30%. W przypadku warstwy stabilizacji cementowej na podłożu rodzimym, z uwagi na bardzo dużą sztywność stabilizacji i niewielki impuls obciążający w badaniu LPD (0,1 MPa), obserwuje się znacznie mniejszy wpływ liczby cykli obciążeń na zmianę wartości modułu równoważnego takiego układu warstw.

to about 30%. The number of loading cycles has much less effect on the equivalent modulus of layered system in the case of cement stabilized aggregate on natural ground system due to its very high stiffness and a small loading pulse in LWD test, i.e. 0.1 MPa.

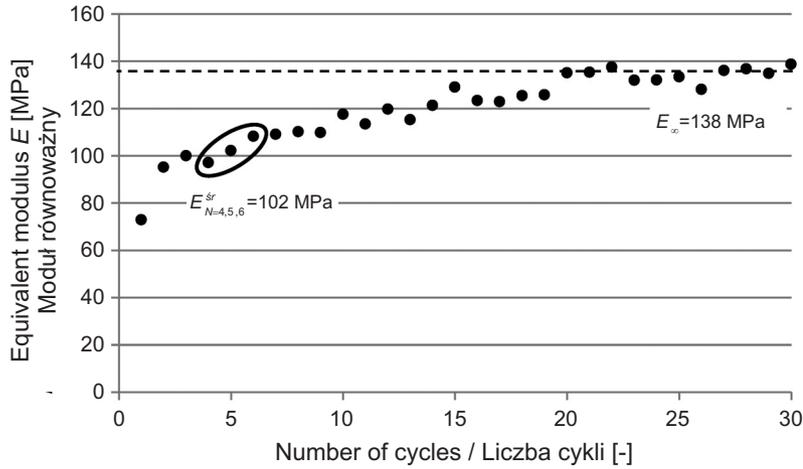


Fig. 12. Crushed stone on natural subgrade equivalent modulus of elasticity as a function of loading cycles
Rys. 12. Zależność wartości modułów równoważnych od cykli obciążenia dla warstwy kruszywa na podłożu rodzimym

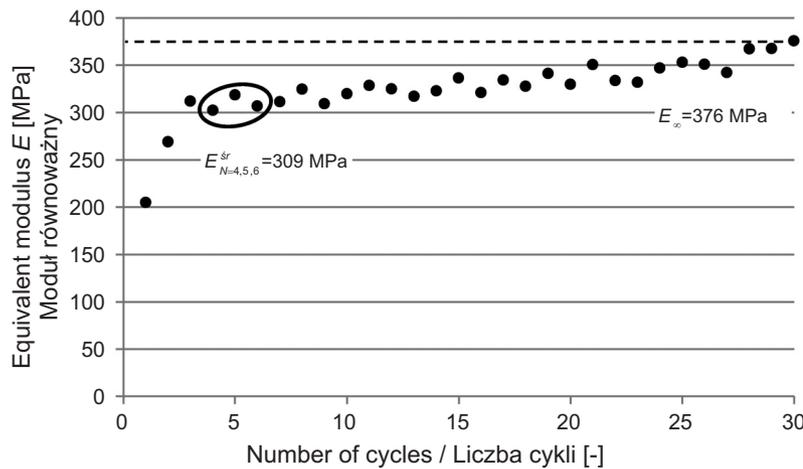


Fig. 13. Cement stabilized aggregate on natural subgrade equivalent modulus of elasticity as a function of loading cycles
Rys. 13. Zależność wartości modułów równoważnych od cykli obciążenia dla warstwy stabilizacji cementowej na podłożu rodzimym

Wartości modułów (zidentyfikowanych w zależności od liczby cykli obciążeń) będą w konsekwencji znacząco wpływać na trwałość zmęczeniową danego układu warstw. Do oceny trwałości zastosowano kryterium deformacji strukturalnej podłoża (kolein strukturalnych), łączącego zależność pomiędzy liczbą obciążeń i odkształceniem pionowym podłoża (2) [12]:

$$\varepsilon_p = k \cdot (1/N)^m, \quad (2)$$

gdzie:

ε_p – odkształcenie pionowe na powierzchni podłoża [-],

where

ε_p – vertical strains on the subgrade surface [-],

Therefore, the moduli (depending on the number of loading cycles) will have a considerable influence on the fatigue resistance of the analysed layered system. Structural deformation of subgrade (structural ruts) was used as a criterion for identifying the fatigue resistance of subgrade relating the number of loading cycles to the vertical strains of subgrade (2) [12]:

k, m – współczynniki eksperymentalne zależne od rodzaju kryterium (przyjęto dla Uniwersytetu w Nottingham i Mobil Design; $k=2,16e-02$; $m=0,280$),

N – liczba dopuszczalnych obciążeń do wystąpienia krytycznej deformacji strukturalnej w nawierzchni.

k, m – experimental coefficients depending on the applied criterion (taken at $k=2.16e-02$; $m=0.280$ for the University of Nottingham and Mobil Design),

N – number of loading cycles until critical structural deformation of pavement.

W Tabl. 2 przedstawiono wyniki trwałości zmęczeniowej oraz wartości odkształceń pionowych w podłożu (obliczonych z wykorzystaniem MES) dla uśrednionych 4., 5. i 6. cyklu oraz 30. cyklu obciążenia.

Table 2 presents the estimated fatigue resistance and vertical strains of subgrade calculated with FEM for average values of 4th, 5th and 6th and at 30th loading cycle.

Table 2. Results of vertical strains and fatigue resistance of improved subgrade

Tablica 2. Wyniki odkształceń pionowych w podłożu oraz trwałości zmęczeniowe podłoża ulepszonego

Number of loading cycles Liczba cykli obciążeń	Model	Parameters (secondary modulus E_2 and primary modulus E_1) Parametry (moduł wtórny E_2 i moduł pierwotny E_1)	Vertical strains Odształcenia pionowe [-]	Fatigue resistance, number of cycles Trwałość zmęczeniowa, liczba cykli [-]
Averaged / Uśrednione 4, 5, 6	Crushed stone on natural subgrade	$E_2 = 204 \text{ MPa}$, $\nu_2 = 0.30$ $E_1 = 36 \text{ MPa}$, $\nu_1 = 0.35$	4.35E-04	1137073
30	Warstwa kruszywa na podłożu rodzimym	$E_2 = 304 \text{ MPa}$, $\nu_2 = 0.30$ $E_1 = 39 \text{ MPa}$, $\nu_1 = 0.35$	3.43E-04	2675 346
Averaged / Uśrednione 4, 5, 6	Cement stabilized aggregate on natural subgrade	$E_2 = 5800 \text{ MPa}$, $\nu_2 = 0.30$ $E_1 = 36 \text{ MPa}$, $\nu_1 = 0.35$	1.37E-04	70016844
30	Warstwa stabilizacji na podłożu rodzimym	$E_2 = 6300 \text{ MPa}$, $\nu_2 = 0.30$ $E_1 = 39 \text{ MPa}$, $\nu_1 = 0.35$	1.25E-04	97442392

Na Rys. 14 i 15 pokazano przykładowe (dla 30. cyklu) wyniki rozkładu odkształceń, wykorzystanych do analizy trwałości.

Fig. 14 and Fig. 15 present examples of strain distributions (for 30th drop) which were used for estimating the fatigue resistance.

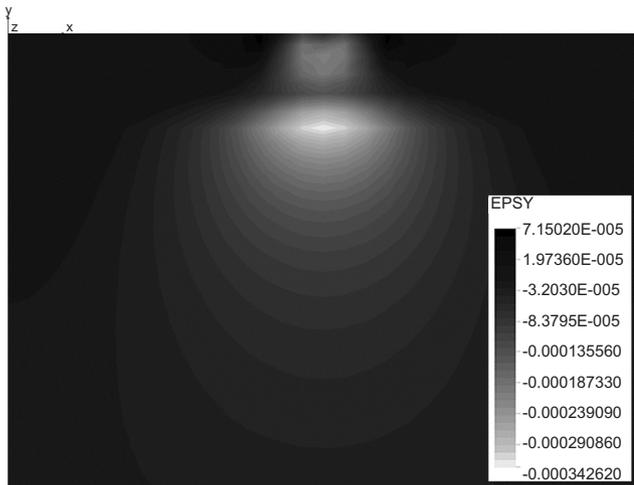


Fig. 14. Vertical strains in crushed stone on natural subgrade calculated for loading cycle No. 30

Rys. 14. Rozkład odkształceń pionowych w 30. cyklu dla warstwy kruszywa łamanego na podłożu rodzimym

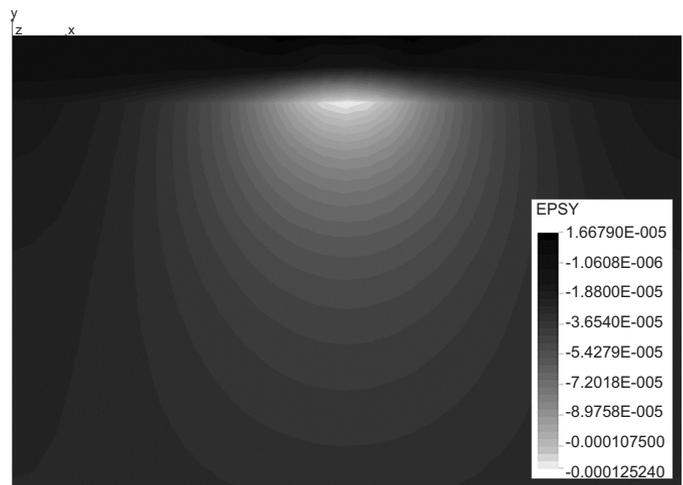


Fig. 15. Vertical strains in cement stabilized aggregate on natural subgrade calculated for loading cycle No. 30

Rys. 15. Rozkład odkształceń pionowych w 30. cyklu dla warstwy stabilizacji cementowej na podłożu rodzimym

Z przedstawionych analiz wynika, że liczba cykli obciążeń, wykorzystanych przy identyfikacji parametrów warstw podłoża w badaniu LPD, ma istotny wpływ na końcową trwałość zmęczeniową układu warstw. W przypadku kruszywa łamanego na podłożu rodzimym trwałość zmęczeniowa układu, wyznaczona na podstawie parametrów (modułów równoważnych) identyfikowanych przy 4., 5. i 6. cyklu obciążenia, jest znacznie niedoszacowana. W warunkach zagęszczenia materiału w wilgotności optymalnej różnica w trwałości wyznaczonej na podstawie uśrednionego 4., 5. i 6. cyklu oraz 30. cyklu obciążenia jest dwukrotna. Należy się spodziewać, że w przypadku niewłaściwych warunków zagęszczenia różnica ta może być większa, jednak badania takie nie zostały przez autorów przeprowadzone. W przypadku warstwy stabilizacji cementowej na podłożu rodzimym stwierdzono mniejszy wpływ liczby cykli obciążeń na trwałość zmęczeniową całego układu. Jest to spowodowane dużą sztywnością warstwy stabilizacji cementowej i niewielką wartością impulsu obciążającego w badaniu LPD (0,1 MPa).

5. WNIOSKI

Przeprowadzone pomiary wskazują na ograniczenia i błędy w powszechnie stosowanej procedurze identyfikacji parametrów podłoża z użyciem lekkiej płyty dynamicznej, polegającej na niewłaściwym przyjmowaniu przemieszczeń pionowych (ugięć) zarejestrowanych w 4., 5. i 6. cyklu obciążenia (tzw. „zrzucie”) jako podstawy identyfikacji parametrów (modułów) podłoża w obliczeniach odwrotnych. Na podstawie badań terenowych oraz identyfikacji z wykorzystaniem MES wykazano zależność wartości identyfikowanych parametrów (modułów) podłoża od liczby cykli obciążeń dla różnych rodzajów materiałów wykorzystanych do wykonania podłoża pod konstrukcję nawierzchni. W przypadku warstwy kruszywa łamanego na podłożu rodzimym różnica między modułami równoważnymi takiego układu, identyfikowanymi na podstawie 4., 5. i 6. cyklu oraz 30. cyklu obciążenia wynosi około 30%, co skutkuje przynajmniej dwukrotnym niedoszacowaniem trwałości zmęczeniowej. W przypadku podłoża nieulepszzonego różnice te wynoszą od 20% do 60% w zależności od wartości obciążenia. W przypadku warstwy stabilizacji cementowej na podłożu rodzimym (z uwagi na bardzo dużą sztywność samej stabilizacji i niewielką wartość impulsu obciążającego w badaniu LPD) obserwuje się mniejsze zmiany modułu równoważnego takiego układu w funkcji liczby cykli obciążeń, a co za tym idzie – mniejsze zmiany jego trwałości zmęczeniowej. Można w związku z powyższym przyjąć, że podłoże wzmocnione kruszywem

These analyses show that the number of loading cycles used for identifying the parameters of subgrade layers in LWD has a significant effect on the estimated fatigue resistance of the layered systems in consideration. For layered system comprising crushed stone layer on natural subgrade the fatigue resistance obtained on the basis of equivalent moduli for 4th, 5th and 6th drop is considerably underestimated. Assuming that the materials have been compacted at optimum moisture content, there is a double difference between the fatigue resistance estimated for the average of 4th, 5th and 6th drop and for the 30th drop. Although this has not been verified under this research, it should be expected that this difference may be yet higher for compaction at conditions other than optimum. A lesser effect of repetitive loading on the fatigue resistance was established for a layered system comprising cement stabilized aggregate placed on natural subgrade. This results from high stiffness of cement stabilized aggregate and small loading pulse applied in LWD test (0.1 MPa).

5. CONCLUSIONS

The measurements carried out under this research demonstrated limitations and errors in the procedure commonly used for identifying the subgrade parameters with LWD test as a result of back calculating the moduli on the basis of vertical displacements (deflections) recorded at 4th, 5th and 6th drop. The field data and FEM identification were used to find, for different subgrade materials, a relationship between subgrade moduli and the number of loading cycles. In the case of layered system comprising crushed stone layer placed on natural subgrade a difference of about 30% was established between equivalent moduli identified for the 4th, 5th and 6th cycle and for the 30th cycle respectively. As a result a fatigue resistance was at least two times underestimated. For unimproved subgrade the difference was in the range of 20-60% with the exact value depending on the amount of applied loading. A smaller variation of the equivalent modulus and of the resulting fatigue resistance as a function of loading cycles was established for cement stabilized aggregate on natural ground (which is attributed to a very high stiffness and a small loading pulse in LWD test). Therefore, it can be assumed that the behaviour of subgrades strengthened with cement stabilized aggregate is closer to the linear-elastic model (vertical displacements are independent of the total number of loading cycles and that these cycles provide hardly any additional compaction of natural subgrade, especially if the material has been compacted at optimum moisture content).

stabilizowanym cementem w większym stopniu realizuje założenia modelu liniowo-sprężystego (przemieszczenia pionowe nie zależą od ilości cykli obciążeń, a podłoże rodzime w takim układzie praktycznie nie ulega dogęszczeniu wraz z kolejnymi cyklami, zwłaszcza w warunkach zagęszczenia w wilgotności optymalnej).

W dalszym etapie prac autorzy opracują współczynniki korekcyjne do obowiązującej procedury identyfikacji parametrów podłoża z wykorzystaniem lekkiej płyty dynamicznej, w zależności od rodzaju podłoża i warunków wilgotnościowych. Ograniczy to potrzebę wykonywania dodatkowych cykli obciążenia, a jednocześnie pozwoli na właściwą ocenę trwałości podłoża konstrukcji nawierzchni. W dalszy etapie uwzględniona zostanie także analiza z wykorzystaniem modelu plastycznego (ze wzmocnieniem), z uwzględnieniem stopnia zagęszczenia i stopnia plastyczności różnych rodzajów podłoży.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Badanie i ustalenie zależności korelacyjnych dla oceny stanu zagęszczenia i nośności gruntów niespoistych płytą dynamiczną. GDDKiA-IBDiM, Warszawa, 2005
- [2] *Ruta P., Szydło A.*: Drop-weight test based identification of elastic half-space model parameters. *Journal of Sound and Vibration*, **282**, 2005, 411-427
- [3] TP BF-StB. Technische Prüfvorschrift für Boden und Fels im Straßenbau. Teil B 8.3. Dynamischer Plattendruckversuch mit Hilfe des Leichten Fallgewichtsgertes, 1992
- [4] *Gosk W.*: Badanie podłoża gruntowego za pomocą płyty dynamicznej ZFG-01 – ocena zastosowania modelu sprężystego do interpretacji wyników. *Aparatura badawcza i dydaktyczna*, **15**, 2, 2010, 99-106
- [5] *Gosk W.*: Zastosowanie metody stycznych do identyfikacji modułu sztywności podłoża gruntowego badanego płytą dynamiczną ZFG-01. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, **59**, 3/IV, 2012, 33-40
- [6] *Sulewska M.J.*: Doświadczenia ze stosowania lekkiego ugięciomierza dynamicznego. *Drogownictwo*, **58**, 11, 2003, 365-367
- [7] *Sulewska M.J.*: Lekka płyta dynamiczna w zastosowaniu praktycznym. IBDiM, VII Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, Kielce, 2001, 139-145
- [8] ZTVE-StB 94: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, Fassung 1997, FGSV Verlag, Köln
- [9] ZTVA-StB 97: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Aufgrabungen in Verkehrsflächen, FGSV Verlag, Köln
- [10] *Oome A.J.J.A., Janssen J.L.G., Encica L., Lomonova E., Dams J.A.A.T.*: Modeling of an electromagnetic geophone with passive magnetic spring. *Sensors and Actuators A: Physical*, **153**, 2, 2009, 142-154
- [11] Light Weight Deflectometer for the dynamic plate load test. Terratest Instruction Manual. TERRATEST GbmH, Berlin, August, 2013
- [12] *Bejarano M.O.*: Subgrade Soil Evaluation for the Design of Airport Flexible Pavements. University of Illinois at Urbana-Champaign, 1999