



PIOTR MACKIEWICZ¹⁾
BARTŁOMIEJ KRAWCZYK²⁾

INFLUENCE OF LOADING TIME ON SUBGRADE PARAMETERS DERIVED FROM VSS STATIC PLATE TEST

WPŁYW CZASU ODDZIAŁYWANIA OBCIĄŻENIA W BADANIU VSS NA IDENTYFIKOWANE PARAMETRY PODŁOŻA

STRESZCZENIE. We współczesnym wykonawstwie drogowym bardzo częstym problemem jest uzyskanie wymaganej nośności podłoża koryta drogowego podczas pomiarów płytą statyczną VSS. Wynika to z faktu, że w badaniu tym nie analizuje się lepko-plastycznych cech materiału. W powszechnej praktyce pomiarowej analizowane są wyłącznie sprężyste cechy materiału, co nie daje pełnego obrazu badanego podłoża, szczególnie w przypadku podłoża o ograniczonej nośności. Autorzy przeanalizowali wpływ czasu obciążenia i odciążenia w badaniu VSS na rejestrowane przemieszczenia pionowe oraz szacowaną nośność badanego podłoża. W obliczeniach uwzględniono lepko-plastyczną składową przemieszczeń, wykazano również istotne różnice w wynikach przemieszczeń i wartości modułów pierwotnych oraz wtórnych, w zależności od czasu badania. Opracowany model 3D, wykorzystujący Metodę Elementów Skończonych (MES), zweryfikowano w rzeczywistych badaniach terenowych.

SŁOWA KLUCZOWE: czas obciążenia, MES, model lepko-plastyczny, moduł odkształcenia, moduł sprężystości, VSS, zmiana parametrów podłoża.

ABSTRACT. Achieving the required bearing capacity of a road subgrade during VSS static plate measurements is very often problematic in the contemporary road engineering execution. The problems arise during the test due to passing over a viscous-plastic characteristics of material. The fact remains that only elastic properties of material are being analyzed in the commonly applied measurement practice which does not give a full picture of tested subgrade, especially in case of a subgrade with a limited bearing capacity. Therefore the authors examined the impact of loading and unloading times in the VSS test on registered vertical deflections and the estimated bearing capacity of the examined subgrade. Consequently, the appropriate calculations not only have acknowledged the viscous-plastic component of displacements, but also have disclosed some significant differences in results of deflections, and values of primary and secondary moduli, depending on the time of testing. Moreover, the drawn up 3D model using the Finite Element Method (FEM) has been verified in real field testing.

KEYWORDS: deformation modulus, elastic modulus, FEM, loading time, subgrade parameters change, viscous-plastic model, VSS.

DOI: 10.7409/rabdim.015.002

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

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

1. WPROWADZENIE

Przemieszczenia pionowe podłoża nawierzchni, rejestrowane pod znanym obciążeniem, są wielkością stosunkowo łatwą do wyznaczenia *in situ* i właściwie interpretowane dostarczyć mogą kluczowych informacji na temat parametrów badanego podłoża. W Polsce metoda oceny parametrów podłoża przy użyciu płyty statycznej VSS na przestrzeni półwieku [1 - 3] uległa nieznacznym modyfikacjom i, mimo rozwiniętych nowoczesnych metod dynamicznych, w dalszym ciągu jest najczęściej stosowanym tego typu badaniem w krajowej technice drogowej. Spowodowane jest to tym, że do metody tej odwołuje się większość krajowych wymagań i specyfikacji technicznych. Problem polega na tym, że w omawianym badaniu nie analizuje się lepko-plastycznych cech materiału, co ma ogromne znaczenie, zwłaszcza w przypadku podłoży o niedużej nośności. W praktyce pomiarowej analizowane są wyłącznie sprężyste cechy materiału, co nie daje pełnego obrazu badanego podłoża. Jednocześnie, uzyskany w badaniu VSS wtórny moduł odkształcenia (E_2) powszechnie przyrównuje się do modułu sprężystości podłużnej Younga E , będącego jednym z parametrów w stosowanych liniowo-sprężystych modelach konstrukcji nawierzchni. W praktyce obserwuje się podczas badań VSS nieliniową zależność pomiędzy przyłożonym obciążeniem i przemieszczeniem podłoża, w związku z czym ograniczone zastosowanie mają tu obowiązujące modele liniowo-sprężyste. Prowadzone są w ostatnich latach analizy teoretyczne [4] i badania porównawcze [5, 6], konfrontujące wyniki badań uzyskanych przy użyciu płyty statycznej VSS z innymi, nowszymi metodami badawczymi. Autorom nie są jednak znane takie rozważania z uwzględnieniem lepkich i plastycznych zachowań podłoża.

2. BADANIE VSS

Badanie VSS polega na pomiarze przemieszczeń pionowych (osiadań) badanej warstwy podłoża pod wpływem nacisku statycznego wywieranego za pomocą stalowej okrągłej płyty o średnicy $D = 300$ mm. Nacisk na płytę wywierany jest za pośrednictwem dźwignika hydraulicznego. Dźwignik oparty jest o przeciwwagę, zwykle pojazd ciężarowy, którego ciężar powinien być większy od wywieranej siły. Szczegółowy sposób przeprowadzania badania przedstawiono w normie PN-S-02205:1998 [2]. Schemat aparatury VSS przedstawiono na Rys. 1.

Badanie rozpoczyna się od wprowadzenia wstępnego obciążenia (0,02 MPa) i ustawienia czujników zegarowych

1. INTRODUCTION

Vertical deflections of the pavement subgrade, registered with a known load, are quantities relatively easy to determine *in situ* and when appropriately interpreted can provide essential information on parameters of the examined subgrade. In Poland the method of subgrade assessment by applying the VSS static plate has been subject to some minor modifications over the last half a century [1 - 3], but although there are modern developed dynamic methods it still remains the most frequently practised test of that type in the national road engineering. It is caused by the fact that most of national requirements and technical specifications refer to that method. The problem is that viscous-plastic characteristics of materials are not subjects of analyses. Certainly, that is of great significance, especially in case of subgrades with low bearing capacities. Basically, only elastic properties of a material are being analyzed in the measuring practice which does not give an overall view of the tested subgrade. At the same time the secondary deformation modulus obtained through the VSS test is commonly compared with the Young's modulus of longitudinal elasticity E , being one of parameters applied in linear-elastic models of pavement structures. Still, by reason of an observed non-linear dependence between exerted loads and subgrade displacements during VSS tests, linear-elastic models have a limited application. Theoretical analyses [4] and comparative researches [5, 6] contrasting test results derived from VSS static plate with other newer research methods have been conducted in recent years. However, the authors do not know deliberations taking into consideration viscous and plastic behaviours of subgrades.

2. VSS TESTING

The VSS test consists in a measurement of vertical displacements (due to subsidence) of an examined subgrade layer induced by the static pressure of a circular plate with a diameter D of 300 mm. The pressure on the plate is exerted through a hydraulic jack. The jack is leant against a counter-balance, usually a truck, the weight of which should be heavier than the exerted force. The detailed directions for carrying out the test are presented in the standard PN-S-02205:1998 [2]. Fig. 1 depicts the diagram of VSS measuring apparatus.

The testing starts with pre-loading (0.02 MPa) and setting dial indicators into position 0.00 mm. Then pressures up to 0.05 MPa on a tested layer are supplied, but

przemieszczeń w pozycji 0,00 mm. Następnie doprowadza się ciśnienie na badaną warstwę do 0,05 MPa, a wskazania czujników zegarowych odczytuje się po ustabilizowaniu osiadań. Ciśnienie zwiększa się skokowo, co 0,05 MPa, aż do poziomu 0,25 MPa (0,35 w przypadku podłoża ulepszonego), każdorazowo odczytując wskazania czujników zegarowych dopiero po ustabilizowaniu osiadań.

Po uzyskaniu wymaganego obciążenia końcowego (0,25 lub 0,35 MPa) należy w analogiczny sposób przeprowadzić odciążenie – skokowo, co 0,1 MPa do poziomu 0,00 MPa, każdorazowo rejestrując wskazania czujników zegarowych. Po całkowitym odciążeniu przeprowadza się drugi cykl obciążenia – powtórnie obciążając skokowo, co 0,05 MPa, do założonego poziomu 0,25 lub 0,35 MPa. Na podstawie pierwszego i drugiego cyklu obciążenia wyznacza się odpowiednio pierwotny moduł odkształcenia E_1 i wtórny moduł odkształcenia E_2 , ze wzoru:

$$E_i = \frac{3 \cdot \Delta p}{4 \cdot \Delta s} \cdot D, \quad (1)$$

gdzie:

E_i – moduł odkształcenia [MPa],

Δp – różnica nacisków [MPa],

D – średnica płyty [mm],

Δs – przyrost osiadań odpowiadający różnicy nacisków [mm].

Przy obliczeniach przyjmuje się [2]:

a) dla podłoża gruntowego: przyrost obciążenia Δp w zakresie od 0,05 MPa do 0,15 MPa oraz przyrost osiadań Δs odpowiadający takiemu zakresowi obciążeń,

b) dla ulepszonego podłoża: przyrost obciążenia Δp w zakresie od 0,15 MPa do 0,25 MPa oraz przyrost osiadań Δs odpowiadający takiemu zakresowi obciążeń.

Na podstawie pierwotnego E_1 i wtórnego E_2 modułu odkształcenia wyznacza się wskaźnik odkształcenia I_o , będący miarą poprawności zagęszczenia podłoża:

$$I_o = \frac{E_2}{E_1}, \quad (2)$$

gdzie:

I_o – wskaźnik odkształcenia [-],

E_2 – wtórny moduł odkształcenia [MPa],

E_1 – pierwotny moduł odkształcenia [MPa].

indications of dial gauges ought to be read out when the subsidence is stabilized. The pressure is increased by leaps of 0.05 MPa with every step, up to the level of 0.25 MPa (or 0.35 MPa in case of an improved subgrade), never reading out indications of dial gauges prior to the stabilization of subsidence.

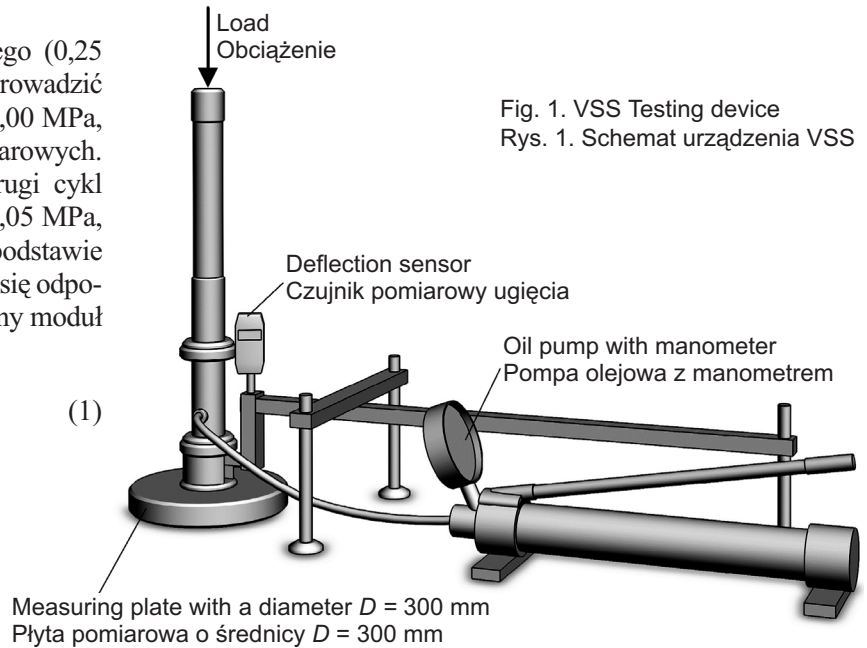


Fig. 1. VSS Testing device
Rys. 1. Schemat urządzenia VSS

Having achieved the required final loading (0.25 MPa or 0.35 MPa) the unloading should be carried in an analogical way – by leaps of 0.1 MPa with every step, down to the level of 0.00 MPa, every single time registering indications of dial gauges. After the final unloading the second cycle of loading is performed as a repetition of loading by leaps of 0.05 MPa with every step to the designed level of 0.25 MPa or 0.35 MPa. Basing on the first and the second loading cycle the primary and secondary moduli of deformation E_1 and E_2 respectively can be determined by means of the formula:

$$E_i = \frac{3 \cdot \Delta p}{4 \cdot \Delta s} \cdot D, \quad (1)$$

where:

E_i – deformation modulus [MPa],

Δp – pressure difference [Mpa],

D – plate diameter [mm],

Δs – increase in subsidence corresponding to the pressure difference [mm].

3. BADANIA TERENOWE

Pomiary przemieszczeń pionowych przy użyciu urządzenia VSS przeprowadzono na glinie piaszczystej zwięzłej w stanie twardo-plastycznym, będącej podłożem konstrukcji nawierzchni podatnej. Widok urządzenia VSS w trakcie badań terenowych przedstawiono na Rys. 2. Badania przeprowadzono przy normowym [2] poziomie obciążenia – obciążając podłoże stopniowo, co 0,05 MPa, aż do 0,25 MPa, następnie stopniowo odciążając i ponownie obciążając do poziomu 0,25 MPa. Przeprowadzono cztery pomiary, każdorazowo stosując inne czasy pomiędzy poszczególnymi stopniami obciążenia i odciążenia – odpowiednio 15, 30, 60 i 120 sekund. Schematy sposobu obciążania i odciążania dla wszystkich czterech przypadków przedstawiono na Rys. 3.



Fig. 2. View of the VSS field measurement
Rys. 2. Badania terenowe VSS

Badania przy różnych, ustalonych odstępach czasu pomiędzy kolejnymi stopniami obciążenia i odciążenia miały na celu zaobserwowanie i przeanalizowanie wpływu czasu oddziaływania obciążenia na rejestrowane przemieszczenia pionowe (osiadania) podłoża. Wyniki badań z uwzględnieniem odchylenia od średniej pokazano na Rys. 4. Przeprowadzono od 3 do 4 prób badawczych dla każdego schematu oddziaływania obciążenia (Rys. 3). Miejsca pomiarowe oddalone były od siebie o około 3 m. Średnie wartości przemieszczeń przy różnych czasach oddziaływania obciążenia zestawiono w Tabl. 1.

Widać wyraźnie jak duży wpływ na rejestrowane przemieszczenia (osiadania) podłoża ma czas oddziaływania obciążenia (przy tej samej wartości obciążenia). Oczywiście w związku z powyższym jest to, że w badaniu VSS tylko część rejestrowanego przemieszczenia ma charakter sprężysty, a lepko-plastyczna składowa przemieszczenia rośnie

The assumptions made for calculations [2]:

- for a subgrade: the load increment Δp within the scope from 0.05 MPa to 0.15 MPa and the increase in subsidence Δs corresponding to that loading scope,
- for an improved subgrade: the load increment Δp within the scope from 0.15 MPa to 0.25 MPa and the increase in subsidence Δs corresponding to such a loading scope.

The deformation index I_o as a correctness measure of subgrade compaction is determined on the grounds of the primary E_1 and secondary E_2 deflection moduli:

$$I_o = \frac{E_2}{E_1}, \quad (2)$$

where:

- I_o – deformation index [-],
- E_2 – secondary deformation modulus [MPa],
- E_1 – primary deformation modulus [MPa].

3. FIELD TESTS

The measurements of vertical displacements by applying the VSS device have been carried out on firm sandy clay at the hard-plastic state being the structural subgrade of flexible pavement. The view of the VSS device in the course of *in situ* measurements depicts Fig. 2. Tests have been performed at the standard [2] load level: gradual loading the subgrade every 0.05 MPa, up to 0.25 MPa; followed by its gradual unloading, and then loading it again up to 0.25 MPa. In general, four measurements have been executed, each time having applied different times between individual loading and unloading levels - 15, 30, 60, and 120 seconds respectively. The outline procedures of loading and unloading for all four cases can be seen on Fig. 3.

Tests at various established time intervals between successive loading and unloading steps have been aimed at observations and analyses of the impact of the load time interaction on the registered vertical subgrade displacements (due to subsidence). Test results taking into consideration an average deviation can be seen on Fig. 4. Four to five investigation trials for each outline procedure of load influence have been carried out (Fig. 3). Measurement spots have been circa 3 m away from each other. The average values of displacements at various times of the load influence are presented in Table 1.

wraz z czasem oddziaływania obciążenia. Największą wartość składowej przemieszczenia zaobserwowano przy 120 sekundowych (zalecanych nota bene według [2, 3]) odstępach pomiędzy kolejnymi stopniami obciążenia. Na Rys. 5 przedstawiono maksymalne przemieszczenia podłoża, zarejestrowane w 1. i 2. cyklu obciążenia, przy różnych czasach oddziaływania obciążenia.

As can be seen, the considerable interaction impact of loading time (at a fixed value of loading) on registered displacements (due to subsidence) is evident. Therefore, it is obvious that only a part of registered displacements has an elastic character, while a viscous-plastic component of displacements grows along with the interaction of loading time. The highest value of the viscous-plastic component of displacements has been observed at 120-second intervals (nota bene recommended according to [2, 3]) between consecutive loading levels. Fig. 5 depicts maximal displacement of subgrade registered in the 1st and 2nd loading cycles at various times of loading interactions.

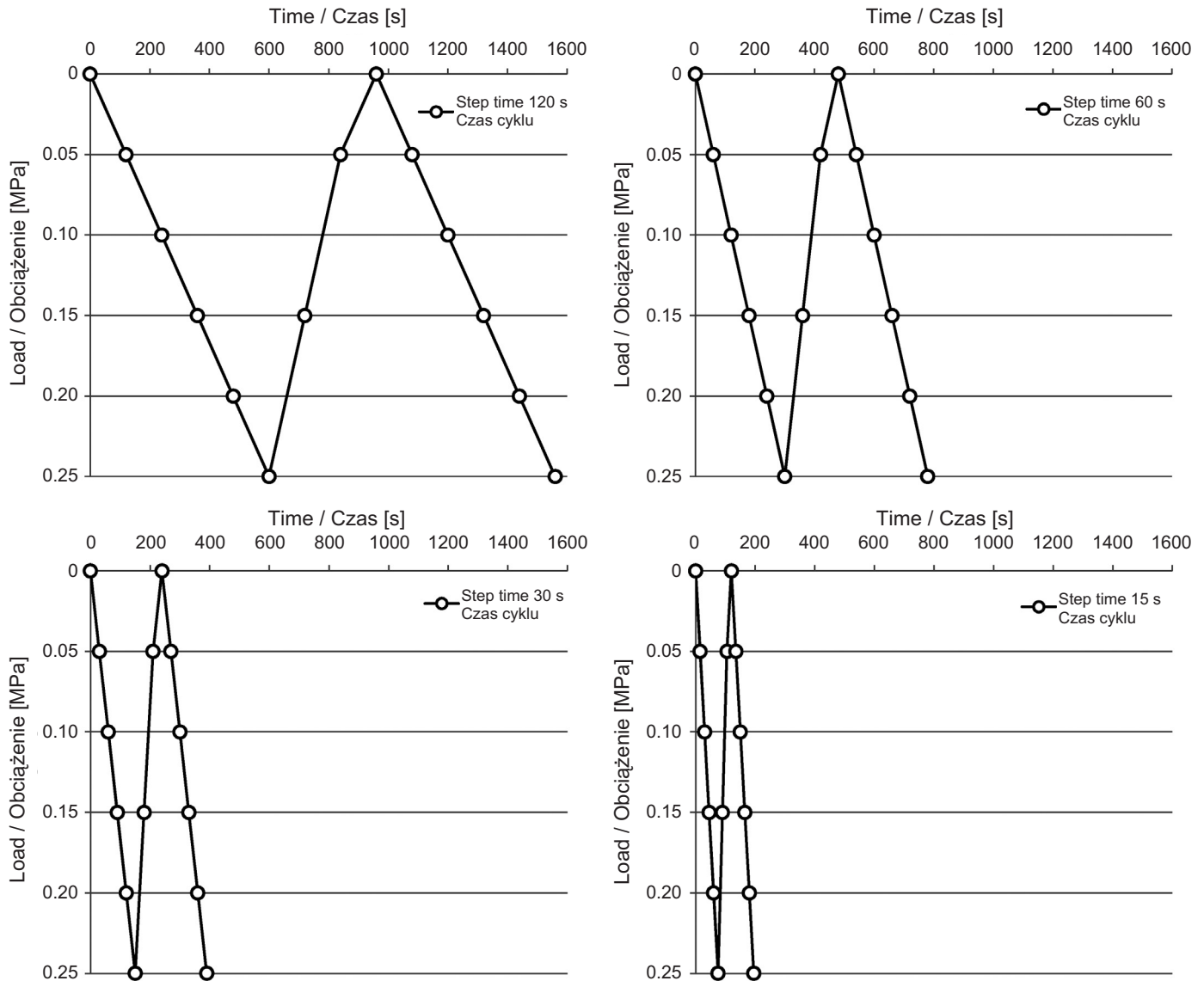


Fig. 3. Loading-unloading time history at different loading times

Rys. 3. Schematy sposobu obciążania i odciążania przy różnych czasach oddziaływania

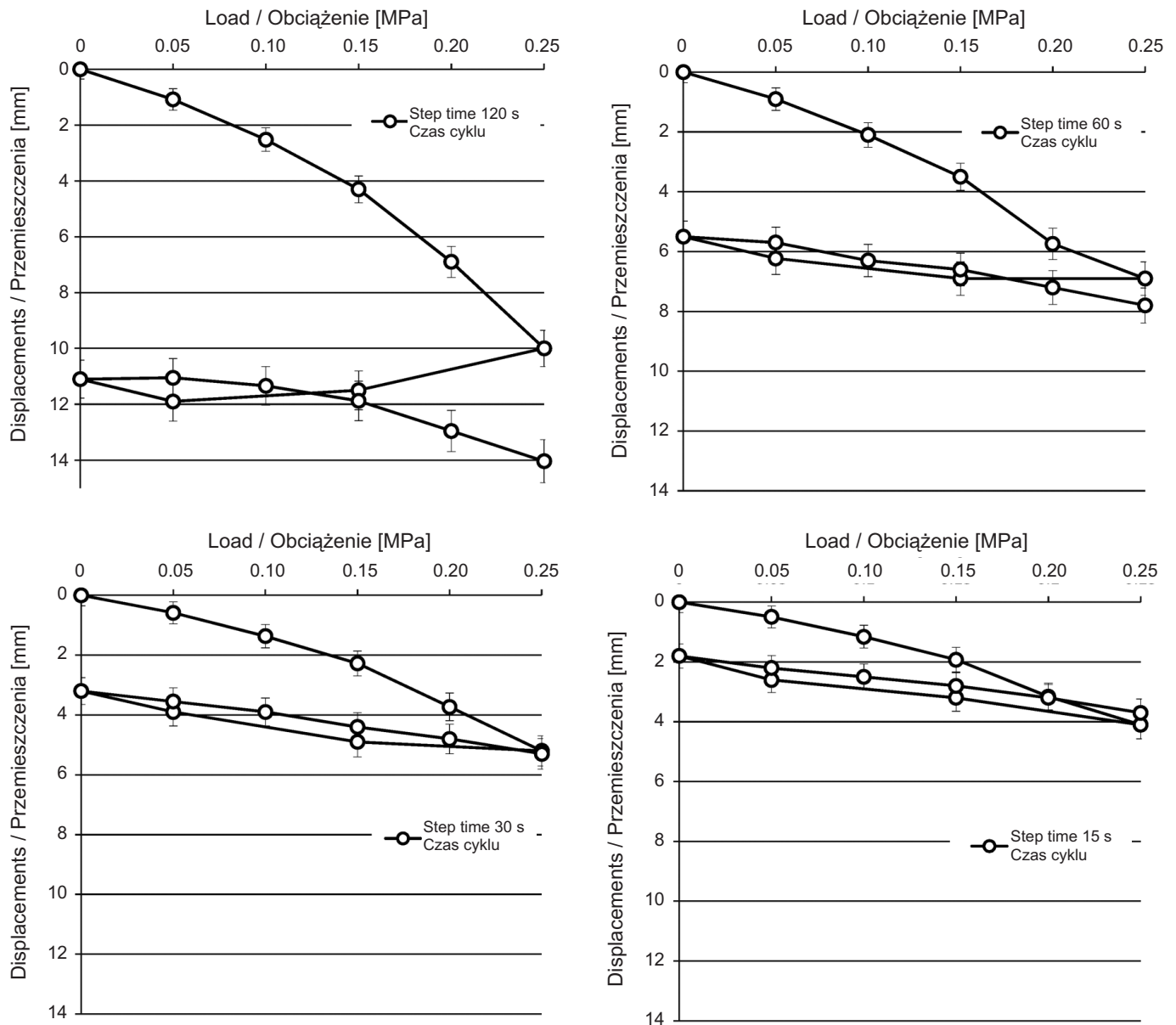


Fig. 4. Subgrade vertical displacements (deflections) at different loading time
 Rys. 4. Przemieszczenia pionowe (osiadania) podłoża przy różnych czasach oddziaływania obciążenia

Jak wykazano powyżej czas oddziaływania w badaniu VSS ma duże znaczenie. Z doświadczenia autorów wynika jednak, że w praktyce pomiarowej wymagany czas stopniowego obciążenia bardzo często nie jest zgodny z obowiązującą normą (odczyty wykonywane są przed ostatecznym ustabilizowaniem osiadań) i nigdzie nie jest rejestrowany. Wyniki przedstawione w Tabl. 1 wykorzystano do kalibracji opracowanego modelu podłoża. Model zbudowany był z objętościowych elementów trójwymiarowych (Rys. 6), w którym warstwy opisano parametrami sprężystymi i

It has been demonstrated above that the effective time of VSS testing is of great significance. However, it results from the authors' experience with measurement practice that the required time of gradual loading is very frequently incompatible with the binding standard (readings carried out prior to the final stabilization of subgrade subsidence), and is not registered anyway. The results presented in Table 1 have been applied to calibrate the worked out subgrade model. That model has been built of three-dimensional spatial elements (Fig. 6), with layers

lepko-plastycznymi. Obciążenie przyjęto zgodne z rzeczywistymi warunkami badań trenowych VSS – jako model koła o nacisku od 0 do 0,25 MPa i promieniu 0,15 m. Do obliczeń przemieszczeń pionowych w modelu zastosowano Metodę Elementów Skończonych. Identyfikację parametrów sprężystych oraz lepko-plastycznych przeprowadzono na podstawie obliczeń iteracyjnych z zastosowaniem zmodyfikowanej metody Newtona-Raphsona oraz automatycznego doboru kroku czasu podczas obliczeń zależnych od czasu.

marked out with elastic and viscous-plastic parameters. The adopted loading has been in accordance with the real conditions of VSS testing – as a model of wheel load from 0 to 0.25 MPa and with a radius of 0.15 m. The Finite Element Method (FEM) has been used to calculate vertical displacements of the model. The identification of elastic and viscous-plastic parameters has been performed on the grounds of iterative calculations using the modified Newton-Raphson's method and an automatic selection of time stepping at calculations depending on time.

Table 1. Average vertical subgrade displacements (due to subsidence) at various loading times

Tablica 1. Średnie przemieszczenia pionowe (osiadania) podłoża przy różnych czasach oddziaływania obciążenia

Load / Obciążenie [MPa]	Average deflections / Średnie przemieszczenia [mm]			
	Step time / Czas cyklu 120 s	Step time / Czas cyklu 60 s	Step time / Czas cyklu 30 s	Step time / Czas cyklu 15 s
0	0	0	0	0
0.05	1.08	0.9	0.6	0.5
0.10	2.52	2.1	1.4	1.2
0.15	4.30	3.5	2.3	1.9
0.20	6.90	5.7	3.7	3.2
0.25	10,00	6.9	5.2	4.1
0.15	11.50	6.9	4.9	3.2
0.05	11.90	6.2	3.9	2.6
0	11.10	5.5	3.2	1.8
0.05	11.05	5.7	3.6	2.2
0.10	11.34	6.3	3.9	2.5
0.15	11.88	6.6	4.4	2.8
0.20	12.96	7.2	4.8	3.2
0.25	14.04	7.8	5.3	3.7

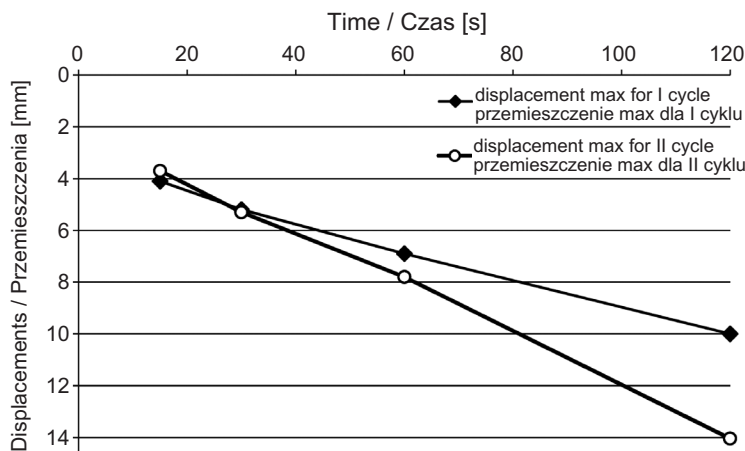


Fig. 5. Maximum vertical displacements (deflections) as a function of loading time

Rys. 5. Maksymalne przemieszczenia pionowe (osiadania) podłoża w funkcji czasu oddziaływania obciążenia

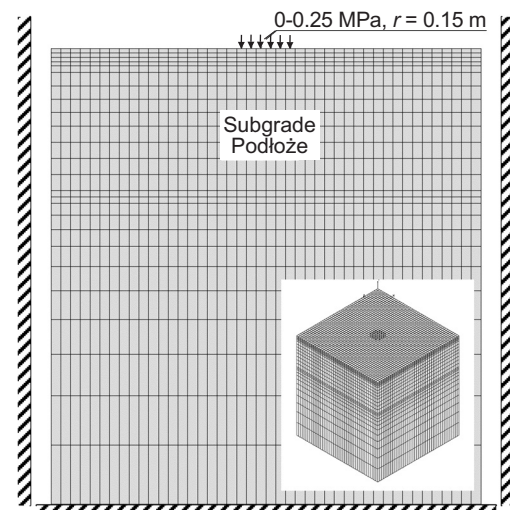


Fig. 6. Computational model for layered subgrade
Rys. 6. Model obliczeniowy układu warstw podłoża

Określenie parametrów modelu przeprowadzono odrębnie na podstawie pierwszego cyklu obciążenia i odciążenia (parametry A) oraz drugiego cyklu obciążenia (parametry B). Uwzględniono w ten sposób zmianę cech materiału podłoża, która nastąpiła po pierwszym cyklu dogęszczenia, uzyskując przy tym lepszą zbieżność wyników dla poszczególnych cykli. Identyfikowane parametry sprężyste stanowił moduł sprężystości podłużnej Younga E oraz współczynnik Poissona ν . Właściwości plastyczne opisano modelem Druckera-Pragera jako kąt tarcia wewnętrznego ϕ oraz spójność c . Do opisu właściwości lepkich (pełzania) zastosowano Klasyczne Prawo Pełzania Bailey-Nortona [7] (3):

$$\varepsilon^c = C_0 \cdot \sigma^{C_1} \cdot t^{C_2}, \quad (3)$$

gdzie:

ε^c – odkształcenie pełzania [-],

σ – naprężenie pełzania [Pa],

C_0, C_1, C_2 – parametry modelu pełzania [-],

t – czas [s].

Na Rys. 7-10 pokazano wyniki rzeczywistych badań VSS oraz wyniki uzyskane w założonym modelu z wykorzystaniem MES. Zidentyfikowane parametry A (określane na podstawie pierwszego cyklu obciążenia i odciążenia) oraz B (określane dla drugiego cyklu obciążenia) przedstawiono w Tabl. 2. Stwierdzono bardzo dobre dopasowanie modelu z wynikami uzyskanymi z pomiarów, o współczynniku determinacji R^2 powyżej 0,9, niezależnie od czasu oddziaływania obciążenia (odstępu między kolejnymi poziomami obciążenia).

Table 2. Parameters of the computational model
Tablica 2. Parametry modelu obliczeniowego

	Elastic parameters Parametry sprężystości		Drucker-Prager parameters Parametry według Druckera-Pragera		Creep parameters – Bailey-Norton law Parametry pełzania według prawa Bailey-Nortona		
	E [MPa]	ν [-]	COHESN [Pa]	FRCANG [°]	C_0 [-]	C_1 [-]	C_2 [-]
Parameters Parametry A	20	0.3	30 000	15	3.67E-11	1.280	0.9600
Parameters Parametry B	40	0.3	40 000	17	3.30E-11	1.152	0.8640

The determination of the model parameters has been individually carried out on the ground of the first loading and unloading cycle (parameters A), and the second loading cycle (parameters B). This way changes in characteristics of the subgrade material after the first post-compaction cycle have been taken into account with a good effect in the form of a better correspondence between results of consecutive cycles. The Young's modulus of longitudinal elasticity E and the Poisson's ratio ν have made the identified elastic parameters. Plastic characteristics have been described with the Drucker-Prager's yield criterion as the internal friction angle ϕ and coherence c . The Bailey-Norton's classical creep law [7] (3) has been applied to outline viscosity (creeping) properties:

$$\varepsilon^c = C_0 \cdot \sigma^{C_1} \cdot t^{C_2}, \quad (3)$$

where:

ε^c – strain due to creep [-],

σ – stress due to creep [Pa],

C_0, C_1, C_2 – parameters of the creep model [-],

t – time [s].

Fig. 7-10 depict results of the real VSS tests and results obtained by means of a designed model using MES. The identified parameters A (determined through the first cycle of loading and unloading), and B (determined for the second cycle of loading) are shown in Table 2. The very accurate conformance of the model with the measurement results, with a determination coefficient R^2 above 0.9, has been observed, irrespectively of the time of loading interaction (intervals between consecutive loading levels).

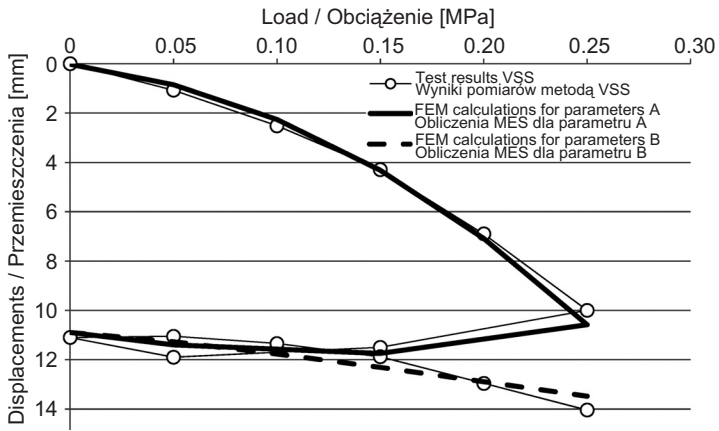


Fig. 7. Subgrade vertical displacements at different loading level (120 sec time intervals between the loading levels)
Rys. 7. Przemieszczenia pionowe podłoża w zależności od poziomu obciążenia (120 sekundowe odstępy między kolejnymi poziomami obciążenia)

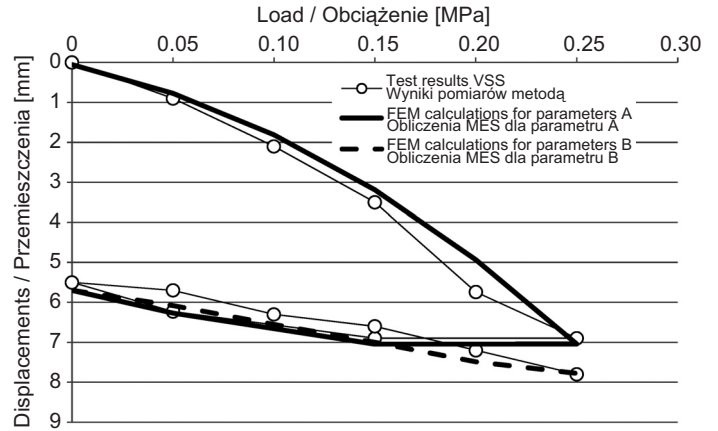


Fig. 8. Subgrade vertical displacements at different loading level (60 sec time intervals between the loading levels)
Rys. 8. Przemieszczenia pionowe podłoża w zależności od poziomu obciążenia (60 sekundowe odstępy między kolejnymi poziomami obciążenia)

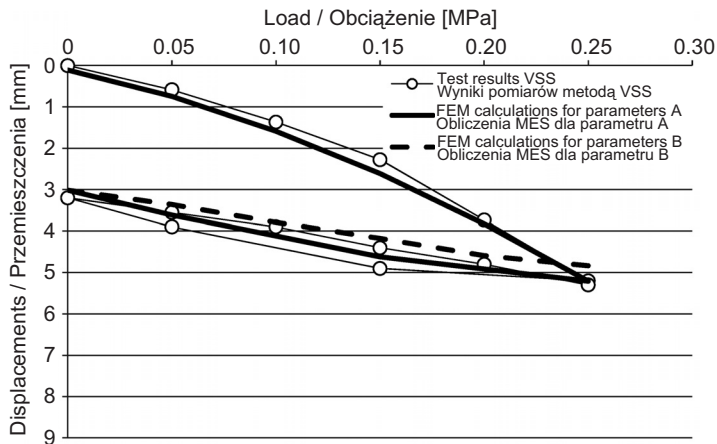


Fig. 9. Subgrade vertical displacements at different loading level (30 sec time intervals between the loading levels)
Rys. 9. Przemieszczenia pionowe podłoża w zależności od poziomu obciążenia (30 sekundowe odstępy między kolejnymi poziomami obciążenia)

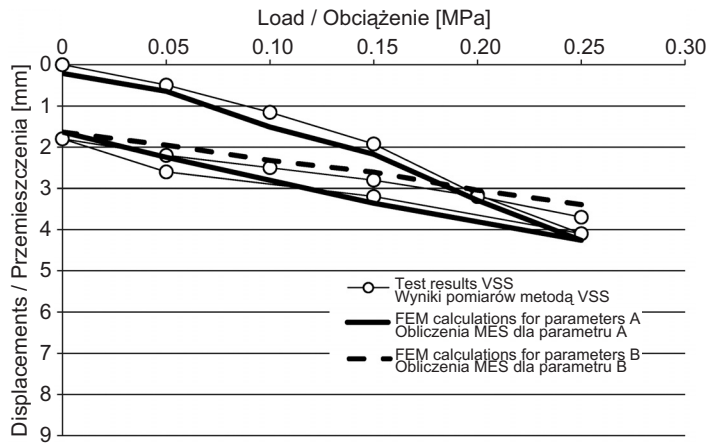


Fig. 10. Subgrade vertical displacements at different loading level (15 sec time intervals between the loading levels)
Rys. 10. Przemieszczenia pionowe podłoża w zależności od poziomu obciążenia (15 sekundowe odstępy między kolejnymi poziomami obciążenia)

4. WYNIKI OBLICZEŃ W ZALEŻNOŚCI OD CZASU OBCIĄŻENIA I ODCIĄŻENIA

Rzeczywiste wyniki badań oraz wyniki obliczone w modelu, w odniesieniu do czasu trwania badania, przedstawiono na Rys. 11-14. Widać wyraźny wpływ czasu oddziaływania obciążenia na rejestrowane przemieszczenia pionowe podłoża. Przy krótkich odstępach (15 sekundowych, Rys. 14) między kolejnymi poziomami obciążenia nie uwiadcza się jeszcze znaczne płynięcie lepkie i plastyczne materiału. Uzyskuje się w takim wypadku większe wartości modułów pierwotnych E_1 i wtórnych E_2 (Tabl. 3).

4. RESULTS OF CALCULATION ACCORDING TO LOADING AND UNLOADING TIMES

Fig. 11-14 present real results of tests and results calculated in the model with reference to the time of test. Undoubtedly, an evident impact of time of loading influence on registered vertical subgrade displacements can be observed. Still, there is no considerable viscous and plastic flowing of the material over short intervals (of 15 seconds, Fig. 14) between individual loading levels. In these circumstances greater values of primary moduli E_1 and

Im dłuższy czas badania, tym większa jest lepko-plastyczna składowa przemieszczenia, a identyfikowane moduły – mniejsze. Przy 120 sekundowych odstępach między kolejnymi poziomami obciążenia (Rys. 11) lepko-plastyczna składowa przemieszczenia jest decydująca, nawrót sprężysty po pierwszym cyklu jest mniejszy, a moduły najmniejsze. Wartości modułów wyznaczonych na podstawie rzeczywistych badań terenowych VSS oraz modułów obliczonych w założonym modelu, w zależności od czasu oddziaływania obciążenia, przedstawiono na Rys. 15 i w Tabl. 3. Warto zauważyć, że moduły pierwotny i wtórny wyznaczone przy najkrótszym czasie oddziaływania obciążenia (gdy nie uwidacznia się jeszcze znaczne płynięcie materiału) są najbliższe zidentyfikowanym w modelu modułom sprężystości podłużnej Younga (Tabl. 2).

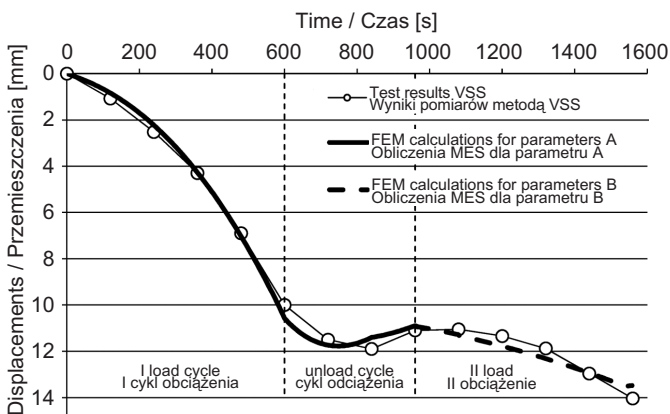


Fig. 11. Subgrade vertical displacements time history (120 sec time intervals between the loading levels)

Rys. 11. Przemieszczenia pionowe podłoża w zależności od czasu trwania badania (120 sekundowe odstępy między kolejnymi poziomami obciążenia)

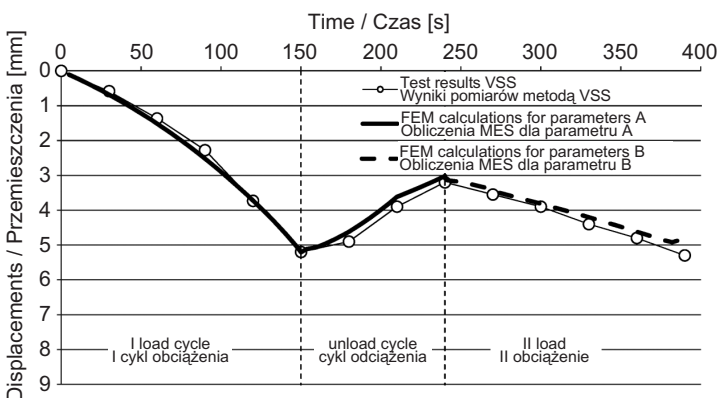


Fig. 13. Subgrade vertical displacements time history (30 sec time intervals between the loading levels)

Rys. 13. Przemieszczenia pionowe podłoża w zależności od czasu trwania badania (30 sekundowe odstępy między kolejnymi poziomami obciążenia)

secondary ones E_2 can be achieved (Table 3). The longer investigation time is, the higher viscous-plastic component of displacement, and the lower identified moduli are. The viscous-plastic component of displacement is decisive at 120-second intervals between subsequent loading levels (Fig. 11), the elastic recovery after the first cycle is lower, and the moduli are the lowest ones. Values of moduli determined on the grounds of real VSS field investigations and moduli calculated in the designed model depending on the time of loading influence can be seen on Fig. 3 and in Table 3. It is worth noticing that primary and secondary moduli determined at the shortest time of loading influence (when any substantial floating of material is not visible yet) are the closest to Young's moduli of longitudinal elasticity identified in a model (Table 2).

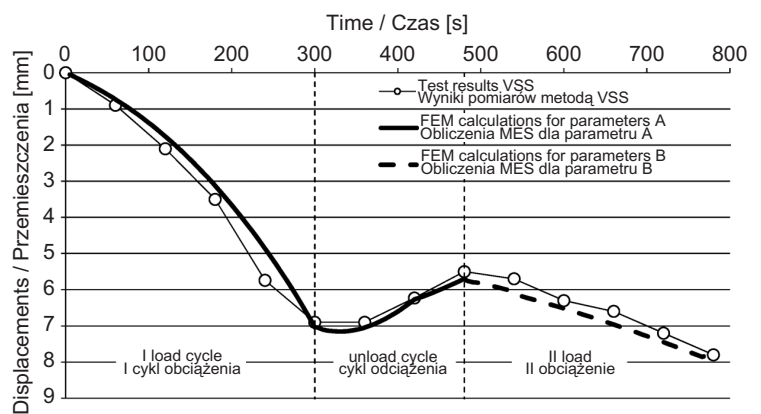


Fig. 12. Subgrade vertical displacements time history (60 sec time intervals between the loading levels)

Rys. 12. Przemieszczenia pionowe podłoża w zależności od czasu trwania badania (60 sekundowe odstępy między kolejnymi poziomami obciążenia)

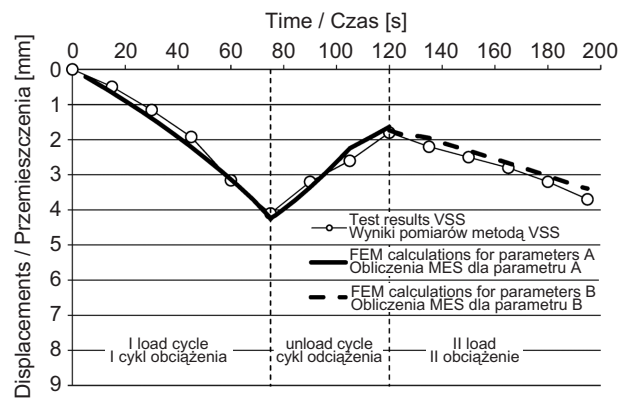


Fig. 14. Subgrade vertical displacements time history (15 sec time intervals between the loading levels)

Rys. 14. Przemieszczenia pionowe podłoża w zależności od czasu trwania badania (15 sekundowe odstępy między kolejnymi poziomami obciążenia)

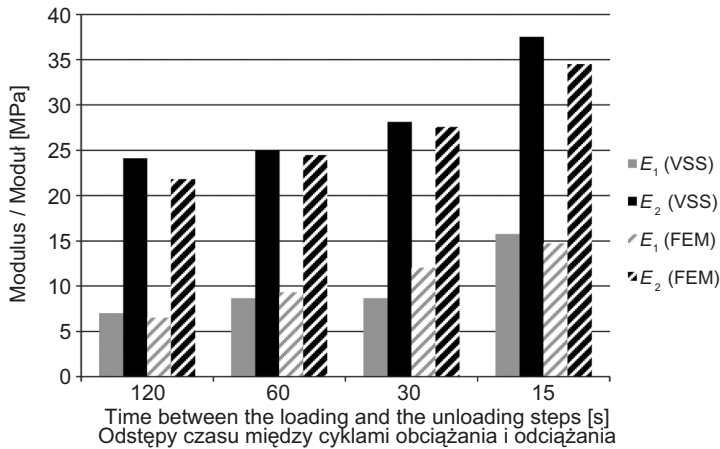


Fig. 15. Deformation moduli (E_1 and E_2) derived from VSS field measurements vs. FEM calculations at different loading time
Rys. 15. Wartości modułów pierwotnych E_1 i wtórnych E_2 na podstawie wyników badań terenowych VSS oraz obliczeń MES, w zależności od czasu oddziaływania obciążenia

5. WNIOSKI

Przeprowadzone przez autorów analizy wskazują na ograniczenia powszechnie stosowanej procedury identyfikacji parametrów podłoża w badaniu VSS. Wykazano jak istotnym parametrem podczas badania podłoża, zwłaszcza o ograniczonej nośności, jest odstęp czasu pomiędzy poszczególnymi stopniami obciążenia i odciążenia. Autorzy wskazują, że przy bardzo słabym podłożu dowolnie długi czas oczekiwania może nie zapewnić ustabilizowania się osiadań. Zastosowanie nieliniowego modelu, uwzględniającego dodatkowo cechy plastyczne oraz pełzanie materiału, pozwoliło wykazać różnice w uzyskanych wynikach modułów odkształcenia, w zależności od czasu oddziaływania obciążenia. Udowodniono, że w przypadku podłoża o ograniczonej nośności dominująca jest lepko-plastyczna (a nie sprężysta) składowa przemieszczenia pionowego w badaniu VSS (przemieszczenia trwałe). Wykazano, w związku z powyższym, że wyznaczone w takich warunkach moduły odkształcenia nie są miarodajne, jak jest to powszechnie przyjęte, przy ocenie sprężystych cech materiału i nie mogą być utożsamiane z modułem sprężystości podłużnej Younga, będącym jednym z parametrów w stosowanych linowo-sprężystych modelach konstrukcji nawierzchni.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] BN-64/8931-02:1964 Oznaczenie modułu odkształcenia nawierzchni podatnych i podłoża przez obciążenie płytą
- [2] PN-S-02205:1998 Roboty ziemne
- [3] Instrukcja badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych. GDDP, Warszawa, 1998

Table 3. Average primary moduli E_1 and secondary ones E_2 on the grounds of VSS field tests and FEM calculations
Tablica 3. Średnie moduły pierwotne E_1 i wtórne E_2 na podstawie badań terenowych VSS i obliczeń MES

Intervals between load levels [s] Odstępy sekundowe między poziomami obciążenia	E_1 (VSS)	E_2 (VSS)	E_1 (FEM)	E_2 (FEM)
120	6.99	24.11	6.50	21.82
60	8.65	25.00	9.32	24.46
30	8.65	28.13	12.05	27.58
15	15.73	37.50	14.73	34.50

5. CONCLUSIONS

The analyses carried by the authors have pointed out some limitations to the commonly applied identification procedure for subgrade parameters at VSS testing. The significance of time intervals between individual loading and unloading cycles while testing subgrades, particularly those of limited load capacities, has been demonstrated. The authors have pointed out that even considerably extended loading time cannot guarantee stabilisation of subgrade subsidence at a very poor subgrade. The application of a non-linear model additionally taking into consideration material plasticity and creep features have enabled presentation of differences in obtained results of deformation modules depending on the time of load effect. Moreover, it has been proved that, in case of a subgrade with limited bearing capacity, the viscous-plastic (but not the elastic) component of vertical displacement is predominant at VSS testing (permanent displacements). Consequently, it has been explained that the deformation moduli, determined in such circumstances, and commonly applied for assessment of elastic features of a material, cannot be regarded as equivalent to the Young's modulus of longitudinal elasticity, remaining one of the basic parameters applied to linear-elastic models of pavement structures.

- [4] Ruta P., Szydło A.: Drop-weight test based identification of elastic half-space model parameters. Journal of Sound and Vibration, **282**, 1-2, 2005, 411-427
- [5] Badanie i ustalenie zależności korelacyjnych dla oceny stanu zagęszczenia i nośności gruntów niespoistych płyta dynamiczną. IBDiM, Warszawa, 2009
- [6] Kumor M.K., Farmas J., Kumor Ł.A.: Wybrane związki korelacyjne parametrów zagęszczenia określone metodami VSS i LFG. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, **4**, 4, 2013, 271-279
- [7] Norton F.H.: The Creep of Steel at High Temperatures. McGraw-Hill, London, 1929