

BARTŁOMIEJ KRAWCZYK¹⁾PIOTR MACKIEWICZ²⁾

IMPACT OF REINFORCEMENT LAYER MATERIAL AND THICKNESS ON DEFLECTIONS MEASURED IN THE STATIC AND DYNAMIC PLATE LOAD TESTS

WPŁYW RODZAJU I GRUBOŚCI WARSTW WZMOCNIONEGO PODŁOŻA NA WARTOŚCI PRZEMIESZCZEŃ REJESTROWANYCH W STATYCZNYCH I DYNAMICZNYCH BADANIACH PŁYTA

STRESZCZENIE. Podczas badań podłoża płytą naciskową bardzo często uzyskuje się różne parametry nośności i zagęszczenia (pośrednio), w zależności od metody wykonywania badania (płyta statyczna VSS i płyta dynamiczna LPD). Problem korelacji między obiema metodami, mimo rozległych badań porównawczych, jest wciąż aktualny. Na podstawie pomiarów terenowych oraz obliczeń numerycznych, z uwzględnieniem zjawisk lepkoplastycznych zachodzących w podłożu, autorzy pokazali jak duży wpływ na wartości przemieszczeń w obu metodach (rozbieżności między obiema metodami) ma nie tylko rodzaj, ale także grubość warstw występujących w podłożu wzmocnionym. Weryfikację zjawisk zachodzących w trakcie badań przeprowadzono z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Określono udział odkształceń sprężystych, plastycznych i pełzania w całkowitym odkształceniu podłoża, w zależności od rodzaju i grubości wzmocnienia.

SŁOWA KLUCZOWE: czas obciążenia, Lekka Płyta Dynamiczna, MES, model lepkoplastyczny, moduł sprężystości, parametry podłoża, VSS.

ABSTRACT. The bearing capacity and compaction values obtained in the plate load tests (the latter determined indirectly) often depend on used the test method: static - using static load test apparatus (VSS) or dynamic - using light weight deflectometer (LWD). Despite extensive comparative studies correlation between the two test methods still remains an issue. With the values obtained in the field tests and with the use of numerical calculations allowing for the impact of viscoplastic phenomena, the authors managed to demonstrate how big is the effect of not only the type of material, but also of the thicknesses of the reinforced subgrade layers on the discrepancy between the displacement values obtained with the two test methods in consideration. The behaviour of the subgrade material during the tests was verified using the finite element method. The share of elastic, plastic and creep strains in the total strain was determined for different layered systems and thicknesses.

KEYWORDS: elastic modulus, FEM, Light Weight Deflectometer, loading time, subgrade parameters, viscoplastic model, VSS (static plate load test).

DOI: 10.7409/rabdim.016.006

¹⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Zakład Dróg i Lotnisk; Wybrzeże Wyspiańskiego 41, 50-370 Wrocław; b.krawczyk@pwr.wroc.pl

²⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Zakład Dróg i Lotnisk; Wybrzeże Wyspiańskiego 41, 50-370 Wrocław; piotr.mackiewicz@pwr.wroc.pl (✉)

1. WPROWADZENIE

Stacyczna i dynamiczna metoda badania podłoża płytą naciśkową funkcjonują obok siebie jednocześnie w światowej i krajowej technice drogowej. Choć na metodzie statycznej (VSS) oparte są w dalszym ciągu wytyczne krajowe [1, 2], to metoda dynamiczna jest zdecydowanie bardziej efektywna. Nie wymaga dodatkowego sprzętu (pojazd ciężarowy lub koparka jako przeciwwaga w badaniu statycznym), a ponadto badanie trwa dużo krócej. W związku z tym, mimo braku precyzyjnych wytycznych i norm, metoda dynamiczna jest coraz powszechniej stosowana. Obie metody badawcze zostały przez autorów szerzej przedstawione w [3, 4] oraz [5]. Istotny problem stanowi odniesienie wyników przemieszczeń/osiadań (a w konsekwencji modułów oraz pośrednio - zagęszczenia warstw) między obiema metodami. W ostatnich latach prowadzone były w wielu ośrodkach empiryczne badania porównawcze, jednak problem korelacji metody statycznej i dynamicznej pozostaje wciąż aktualny. Za najbardziej rozległe i kompletne krajowe badania porównawcze uznać można [6], pozostałe natomiast ograniczały się zwykle do konkretnego przypadku konstrukcji lub tylko jednego typu materiału. Do najbardziej aktualnych i wartych uwagi zaliczyć można [7] oraz [8]. Prowadzono również analizy teoretyczne w uproszczonym ośrodku sprężystym [9], z pominięciem niezwykle istotnych zjawisk lepkoplastycznych zachodzących w podłożu, zwłaszcza w przypadku podłoża o małej nośności. W powszechnej praktyce pomiarowej stosuje się opracowane pierwotnie w Niemczech zależności między obiema metodami [10-12], które w opinii autorów często się nie sprawdzają. W niniejszym artykule na podstawie pomiarów terenowych oraz obliczeń numerycznych pokazano, jak skomplikowanym zagadnieniem jest ustalenie korelacji między przemieszczeniami/osiadaniami rejestrowanymi w obu metodach, w zależności od rodzaju materiału. W konsekwencji utrudnia to jednoznaczną ocenę nośności badanych warstw podłoża. W artykule wskazano również na istotne błędy, wynikające z przyjmowania do obliczeń uproszczonego, liniowosprężystego modelu uwarstwionego podłoża.

2. BADANIA TERENOWE

Badania terenowe przeprowadzono na dwóch odcinkach doświadczalnych przy użyciu płyty statycznej (VSS) oraz lekkiej płyty dynamicznej (LPD). Odcinki doświadczalne stanowiły rzeczywiste obszary podłoża wzmocnionego pod nowobudowane nawierzchnie dróg i parkingów. Wzmocnienie podłoża realizowane było przez wymianę gruntu na

1. INTRODUCTION

The static and dynamic plate load tests are both used in contemporary engineering practice for testing road subgrades. The dynamic method is more effective, yet it is the static plate load test that the Polish national guidelines recommends [1, 2]. Other than in the static plate load test the dynamic test can be carried out without any additional equipment (such as a heavy truck or a digger to provide a counterweight) and, moreover, it takes less time. Owing to these advantages, the dynamic method is used with increasing frequency, even though there are no precise guidelines and standards relating to it. The two methods are described in more detail in [3, 4] and [5]. There is an important problem of correlating the displacement/settlement results (and consequently moduli, as well as indirectly - compaction of layers) between the two methods. Although a number of empirical comparative studies were performed at different research institutions, such correlation remains an issue. The study reported in [6] can be considered as the most extensive and comprehensive comparative study carried out so far in Poland, with the remaining studies generally limited to a single design case or one type of material only. The most up-to-date and worthwhile the attention are the studies reported in [7] and [8]. Some analyses use a simplified elastic medium [9], ignoring the viscoplastic phenomena and these are of primary importance, especially in the case of weak subgrades. In the authors' opinion the German relationships commonly used to correlate the two methods [10-12] quite often produce unsatisfactory results. The field data and numerical calculations were used by the authors to show the complexity of correlating the displacements/settlements registered with the two methods for different materials. This makes a definite assessment of the bearing capacity of subgrade layers hardly practicable. Moreover, the paper indicates some significant errors resulting from representing the multi-layered subgrade with a simplified, linear-elastic model.

2. FIELD TESTS

The field tests were carried out on two test sections using static plate load device and lightweight deflectometer (LWD). The test sections were located in areas where subgrade had been reinforced under planned roads and parking facilities. The method of subgrade improvement consisted in replacing a 90 cm thick layer of soil. Two cases were analysed with different materials used for the

głębokość 90 cm. Przeanalizowano przypadki zastosowania do wzmocnienia piasku drobnego oraz wymiany gruntu rodzimego na kruszywo łamane. Badania przeprowadzono na podłożu rodzimym, określonym jako piasek gliniasty/glina piaszczysta, oraz na kolejnych warstwach wzmocnionego/wymienianego podłoża o różnej grubości. Schemat badanych układów warstwowych, z opisem podstawowych parametrów materiałowych, przedstawiono na Rys. 1. Widok stanowisk pomiarowych przedstawiono na Rys. 2.

reinforcing layer: fine sand and crushed stone. The tests were performed on the native subgrade identified as loamy sand/sandy loam, and on the subsequent layers of treated (reinforced/replaced) subgrade. The analysed layered systems are schematically presented in Fig. 1, giving the values of the basic mechanical parameters of the materials. The test set-up is presented in Fig. 2.

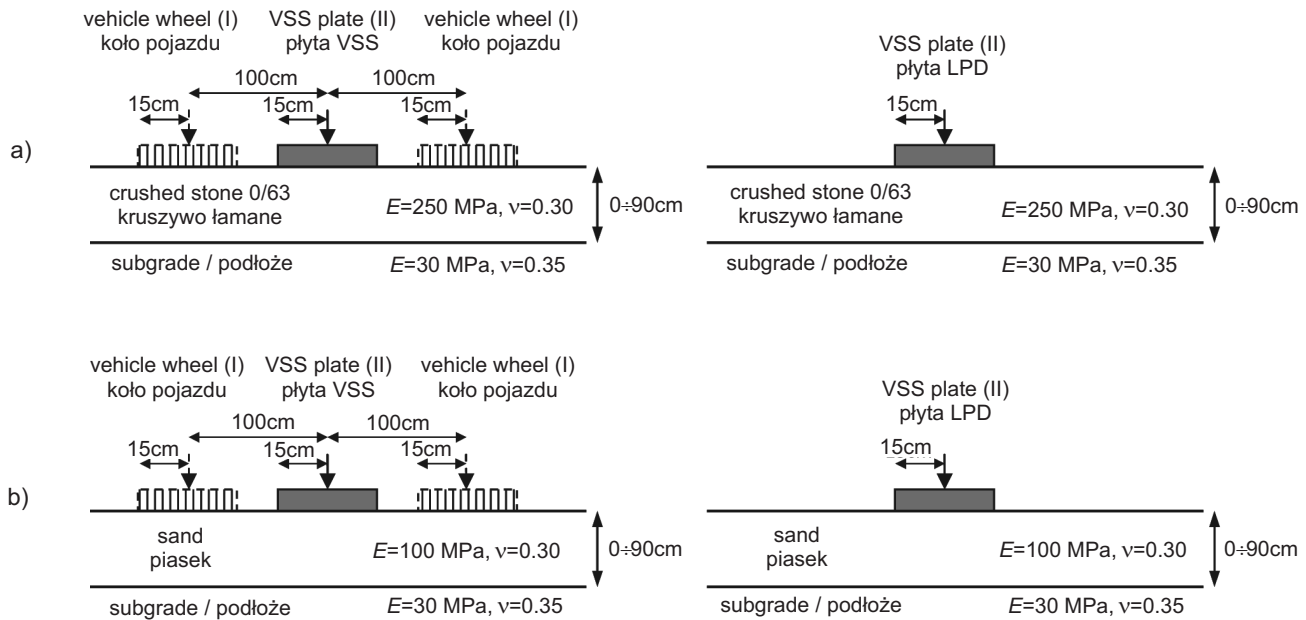


Fig. 1. Schematic diagrams of the tested layered sections
Rys. 1. Schematy badanych układów warstwowych



a)



b)

Fig. 2. View of the static (a) and dynamic (b) plate load tests
Rys. 2. Widok badania płytą statyczną VSS (a) oraz płytą dynamiczną LPD (b)

Jako przeciwwagę w badaniu statycznym wykorzystano ładowarkę o masie 14 ton. Pomiary płytą statyczną wykonano przy normowym czasie oddziaływania obciążenia (odstęp 120 s między kolejnymi poziomami obciążenia), do ustabilizowania osiadań. Każdorazowo przeprowadzono 2 cykle obciążenia-odciążenia, rejestrując przemieszczenia pionowe (osiadania) w zakresie 0-0,35 MPa. Pomiary lekką płytą dynamiczną natomiast przeprowadzono rejestrując przemieszczenia pionowe przy 6 kolejnych „zrzutach” (cyklach), przy maksymalnym obciążeniu 0,10 MPa i średnim czasie oddziaływania impulsu obciążającego 22 ms na piasku oraz na kruszywie łamanym (poza 3 zrzutami „właściwymi”, rejestrowano również przemieszczenia przy 3 zrzutach wstępnych). Wartości przemieszczeń zarejestrowanych dla maksymalnego poziomu obciążenia 0,35 MPa, dla pierwszego i drugiego cyklu w badaniu statycznym, przedstawiono w Tabl. 1. W Tabl. 2 pokazano wyniki przemieszczeń dla szóstego cyklu w badaniu dynamicznym.

A 14 tonne loader was used as a counterweight in the static test. The static plate load test was carried out according to the standard loading procedure (with 120 sec. unloading periods between applications of incrementally increased load), until settlements values flattened out. Each test comprised two load-unload cycles during which vertical displacements (settlements) were measured in the range of 0-0.35 MPa. In the LWD test the vertical displacements were measured after each of 6 repeated drops (load cycles) with the maximum load value of 0.10 MPa, the average load application time of 22 ms for sand and crushed stone layers (besides 3 test drops, the displacements were also measured after 3 pre-loading drops). The displacements obtained in the static plate load test at the maximum load of 0.35 MPa after the 1st and the 2nd load cycles are given in Table 1. Table 2 gives the displacements after the 6th load cycle in the dynamic plate load test.

Table 1. The vertical displacements [m] registered in the static plate load test at the maximum load of 0.35 MPa after the 1st and the 2nd cycle

Tablica 1. Wartości przemieszczeń pionowych [m] zarejestrowanych dla maksymalnego poziomu obciążenia 0,35 MPa, w pierwszym i drugim cyklu, w badaniu płytą statyczną (VSS)

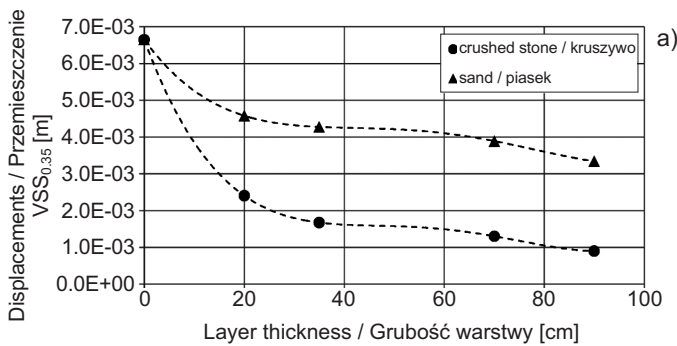
Total thickness of reinforced subgrade Łączna grubość warstw podłoża wzmocnionego [cm]	Crushed stone / Kruszywo łamane		Sand / Piasek	
	1 st displacement cycle I cykl przemieszczenia [m]	2 nd displacement cycle II cykl przemieszczenia [m]	1 st displacement cycle I cykl przemieszczenia [m]	2 nd displacement cycle II cykl przemieszczenia [m]
0	0.01745	0.00664	0.01745	0.00664
20	0.00750	0.00241	0.01285	0.00458
35	0.00439	0.00168	0.01179	0.00428
70	0.00328	0.00131	0.00793	0.00389
90	0.00193	0.0009	0.00733	0.00334

Table 2. Vertical displacements [m] in the 6th cycle of LWD test

Tablica 2. Wyniki przemieszczeń pionowych [m] dla szóstego cyklu w badaniu płytą dynamiczną (LPD)

Total thickness of reinforced subgrade Łączna grubość warstw podłoża wzmocnionego [cm]	Crushed stone / Kruszywo łamane	Sand / Piasek
	6 th displacement cycle VI cykl przemieszczenia [m]	6 th displacement cycle VI cykl przemieszczenia [m]
0	0.00120	0.00120
20	0.00055	0.00055
35	0.00031	0.00043
70	0.00018	0.00032
90	0.00015	0.00031

Dalszej analizie poddano pomiary dla drugiego cyklu w badaniu statycznym oraz szóstego cyklu w badaniu dynamicznym. W przypadku takich warunków w powszechnej praktyce pomiarowej zakłada się [1, 13], że podłoże jest dogęszczone i ustabilizowane od znacznych osiadań (Rys. 3). Wraz ze zwiększaniem grubości wzmocnienia (piasku/kruszywa łamanego) rejestruje się coraz mniejsze przemieszczenia pionowe, zarówno w badaniu statycznym (VSS), jak i dynamicznym (LPD). W przypadku pomiarów statycznych (przy nacisku 0,35 MPa) wartości rejestrowanych przemieszczeń wahają się od 6,5 mm w przypadku dość słabego podłoża rodzimego do 3 mm w przypadku wzmocnienia piaskiem przy grubości 90 cm oraz 1 mm przy wzmocnionym kruszywie łamanym przy grubości 90 cm. W przypadku pomiarów dynamicznych (przy nacisku 0,1 MPa) wartości te są zauważalnie mniejsze i wynoszą odpowiednio 1,2 mm (podłoże rodzime), 0,3 mm (piasek 90 cm) i 0,2 mm (kruszywo łamane 90 cm).



The input data identified for further analysis were the values obtained after the 2nd cycle in the static test and after the 6th cycle in the dynamic test. It is commonly accepted [1, 13] that at that stage the subgrade gets sufficiently compacted and attaining resistance to excessive settlement (Fig. 3). With the increase in the reinforcing layer thickness (made of sand or crushed stone) the vertical displacements become smaller, both in the static and in the dynamic plate load tests. In the static test (with 0.35 MPa plate load value) the registered displacements range from 6.5 mm for relatively weak native soil to 3 mm for subgrade improved with 90 cm sand and 1 mm for crushed stone layer of the same thickness. The values obtained in the dynamic test (with 0.1 MPa test load) are noticeably smaller, namely 1.2 mm (native soil), 0.3 mm (90 cm sand) and 0.2 mm (90 cm crushed stone).

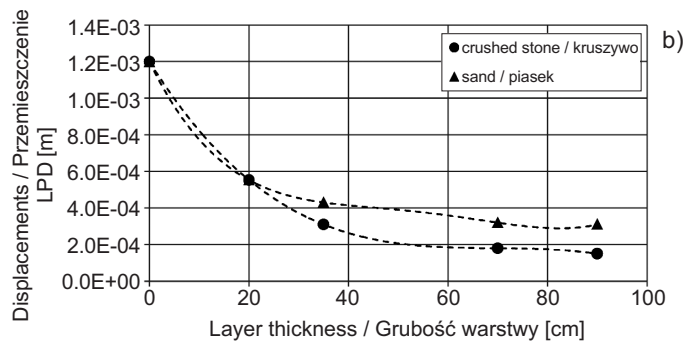


Fig. 3. Vertical displacement as a function of reinforcement layer thickness: a) static test, b) dynamic test

Rys. 3. Rejestrowane przemieszczenia pionowe, w zależności od grubości warstw podłoża wzmocnianego: a) badanie statyczne, b) badanie dynamiczne

W przypadku badania płytą dynamiczną można zaobserwować ponadto stabilizowanie się rejestrowanych przemieszczeń pionowych wzmocnianego podłoża, już przy grubości 60 cm. Stabilizacja ta jest nieco wyraźniejsza w przypadku kruszywa łamanego niż w przypadku wzmocnienia piaskiem, z uwagi na większą sztywność jego warstwy. W przypadku badania płytą statyczną VSS ostatecznie nie stwierdzono ustabilizowania się rejestrowanych przemieszczeń pionowych podłoża. Wyraźnie widać, że największa zmiana przemieszczeń występuje dla małych grubości wzmocnienia (do 20 cm). W przedziale od 40 cm do 70 cm natomiast zwiększanie grubości ma najmniejszy wpływ na redukcję przemieszczeń.

Powodem takiego stanu rzeczy jest dłuższy czas badania płytą statyczną, podczas którego w większym stopniu ujawniają się cechy lepkoplastyczne badanych materiałów [3], zwłaszcza podłoża rodzimego, oraz większe naciski (ponad 3-krotnie większe niż w badaniu płytą dynamiczną), które

Moreover, in the dynamic plate load test the flattening out of the vertical displacements was observed already at 60 cm thickness of a reinforcement layer. This flattening out is a little more perceptible in the case of reinforcement layer made of crushed stone, which is stiffer than the sand layer. Conversely, no such flattening was observed in the case of static plate load test. The rate of change in the vertical displacement is noted for smaller reinforcement layer thicknesses (up to 20 cm). The smallest effect of the increase in the treatment thickness on the reduction of displacements was noted in the range of 40-70 cm.

This is due to a longer duration of the static plate load test, allowing the viscoplastic characteristics of the material, native soil in particular, to take effect [3] and also due to higher loads (over 3 times greater than in the dynamic test), causing the native soil flow under the tested reinforcement layer. This indicates that the bearing capacity determined in the static plate load test is representative for the whole

powodują „płynięcie” podłoża rodzimego pod warstwą badanego wzmocnienia. Świadczy to o tym, że w trakcie pomiarów płytą statyczną badany jest pod kątem nośności de facto układ „podłoże rodzime + podłoże wzmocnione”. W przypadku badania płytą dynamiczną ocenie podlega w większym stopniu sama warstwa wzmocnienia, „w oderwaniu” od parametrów podłoża rodzimego. W konsekwencji moduły odkształcenia identyfikowane w badaniu VSS traktować należy jako moduły zastępcze całego układu, natomiast moduły identyfikowane w badaniu płytą dynamiczną bliższe są modułom wyłącznie warstwy wzmocnienia. Wyjaśnia to istotne trudności z porównaniem wyników obu metod w praktyce pomiarowej.

Należy również zwrócić uwagę na różnice w przemieszczeniach uzyskiwanych metodą dynamiczną i statyczną przy porównywalnym obciążeniu 0,1 MPa (Rys. 4). Problem ten w odniesieniu do konstrukcji nawierzchni przedstawiono szerzej w [14, 15]. W przypadku wzmocnienia kruszywem różnice q_{stat}/q_{dyn} są około dwukrotne. Zachodzi duża zmienność w przypadku wzmocnienia piaskiem, z ekstremum osiągającym wartość około 4,0. Nieznaczne ekstremum można też zaobserwować w przypadku wzmocnienia kruszywem. W obu przypadkach, przy grubości warstw wzmacniających około 60 cm i powyżej, widać tendencję spadkową analizowanego stosunku przemieszczeń q_{stat}/q_{dyn} . Świadczy to o tym, że powyżej grubości warstw 60 cm w badaniu dynamicznym LPD nie występuje istotna zmienność rejestrowanych ugięć. Jednocześnie nie odnotowuje się analogicznej stabilizacji rejestrowanych osiadań w badaniu statycznym, co skomentowano we wcześniejszej części artykułu. Względne różnice między przemieszczeniami rejestrowanymi w obu metodach badawczych, w zależności od zastosowanego materiału i grubości wzmocnienia, przedstawiono na Rys. 5.

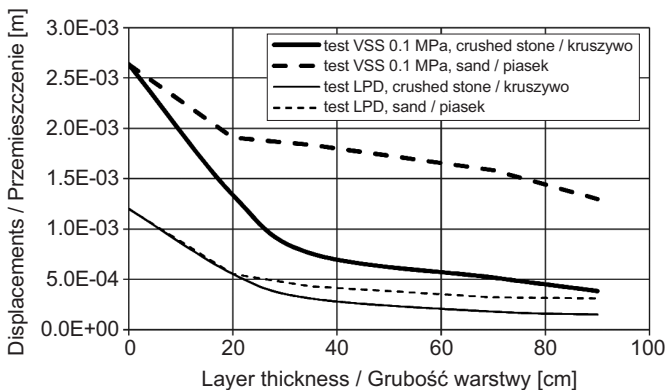


Fig. 4. Comparison of vertical displacements at 0.1 MPa loading level between the static and dynamic plate load tests Rys. 4. Porównanie przemieszczeń dla poziomego obciążenia 0.1 MPa, w badaniu statycznym i dynamicznym

structural system which comprises the native subgrade and the reinforcement layer. This is different in the case of dynamic plate load test in which the results relate more to the reinforcement layer in isolation from the native subgrade parameters. As a result, the strain moduli obtained in the static plate load test should be treated as equivalent moduli of the above-mentioned structural system, while the values obtained in the dynamic tests are more representative to the reinforcement layer alone. This explains the difficulties in correlating the two methods.

Note also the differences between displacements obtained in the dynamic and static tests respectively at comparable test load value of 0.1 MPa (Fig. 4) This problem in relation to the pavement structure is discussed in more detail in [14, 15]. For aggregate reinforcement layer the values of q_{stat} and q_{dyn} differ by a ratio of about 2:1. The sand capping layer features a high variation with a peak of ca. 4.0. A slight peak can be observed also for the aggregate reinforcement layer. In both cases, from the thickness of about 60 cm and up the analysed q_{stat}/q_{dyn} ratio starts to follow a decreasing trend. This indicates that for thicknesses greater than 60 cm there is no significant variation in the deflections recorded during LWD test. Such flattening out of the settlement values does not occur in the static load plate test, what has been explained earlier in this paper. The relative differences between the displacements obtained with the two methods, depending on the reinforcement layer material and thickness, are presented in Fig. 5.

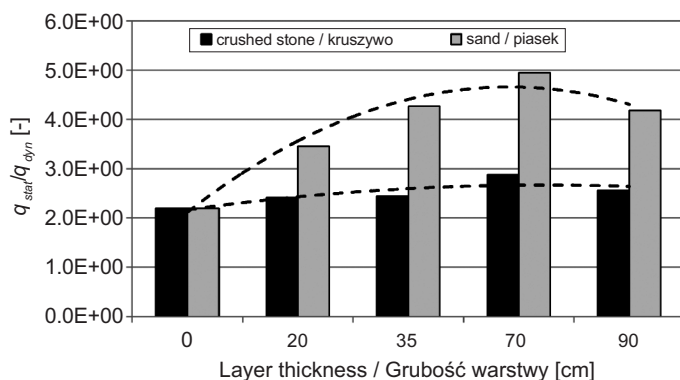


Fig. 5. Comparison of the static-dynamic vertical displacements ratio (q_{stat}/q_{dyn}), at different thickness of sand and crushed stone layers

Rys. 5. Porównanie stosunku przemieszczeń statycznych do dynamicznych (q_{stat}/q_{dyn}), dla różnej grubości warstw kruszywa łamanego i piasku

3. OBLICZENIA NUMERYCZNE

Wyniki przeprowadzonych badań terenowych porównano z obliczeniami numerycznymi przy użyciu Metody Elementów Skończonych (MES) [16]. W obliczeniach uwzględniono elementy objętościowe. Identyfikację parametrów sprężystych oraz lepkoplastycznych przeprowadzono na podstawie wielokrotnych obliczeń iteracyjnych, uzyskując dobrą zgodność wyników obliczeń z badaniami terenowymi. Względne różnice między przemieszczeniami wyznaczonymi w modelu i uzyskanymi w badaniach wynosiły od 6% do 15%. Modele obliczeniowe MES, odpowiadające badanym układom warstwowym, przedstawiono na Rys. 6 i 7. Modelując płytę VSS uwzględniono sztywne obciążenie oraz obciążenie podatne, odpowiednie dla kół pojazdu ciężarowego. Przy modelowaniu badania płytą statyczną zmniejszono odpowiednio nacisk na koła wraz ze wzrostem nacisku na płytę, co symuluje rzeczywiste warunki badania. Problem ten omówiono szerzej w [4]. Model badania LPD uwzględniał impulsowe obciążenie dynamiczne o długości 22 ms i wartości szczytowej 0,1 MPa. Na Rys. 8 zaprezentowano przykładowe impulsy obciążenia i odpowiedzi (przemieszczenia) podłoża, wyznaczone na podstawie obliczeń numerycznych w badaniu statycznym i dynamicznym.

3. NUMERICAL ANALYSIS

The field data were compared with the outcome of the numerical analysis carried out with the Finite Element Method (FEM) [16]. The analysis was performed for 3D elements. The elastic and viscoplastic parameters were identified through multiple iterations, yielding good consistency between the calculated and field data. The relative differences between the displacements determined with the model and measured in field were in the range of 6-15%. The FEM models representing the analysed multi-layer systems are presented in Fig. 6 and Fig. 7. Both rigid and elastic loading conditions were modelled, the first representing the static plate load test and the other – the load from the heavy truck wheels. In modelling the static plate load test the wheels load was gradually decreased with the increase in the test load to simulate the actual conditions during the test. This problem is discussed in more detail in [4]. The load of 0.1 MPa and the load application time of 22 ms were assumed in the model of LWD test. Examples of load applications and subgrade response (displacements) obtained through numerical computations for both the static and dynamic plate load tests are presented in Fig. 8.

Fig. 6. Computational model for layered subgrade in the static plate load test
Rys. 6. Model obliczeniowy układu warstw podłoża w badaniu statycznym

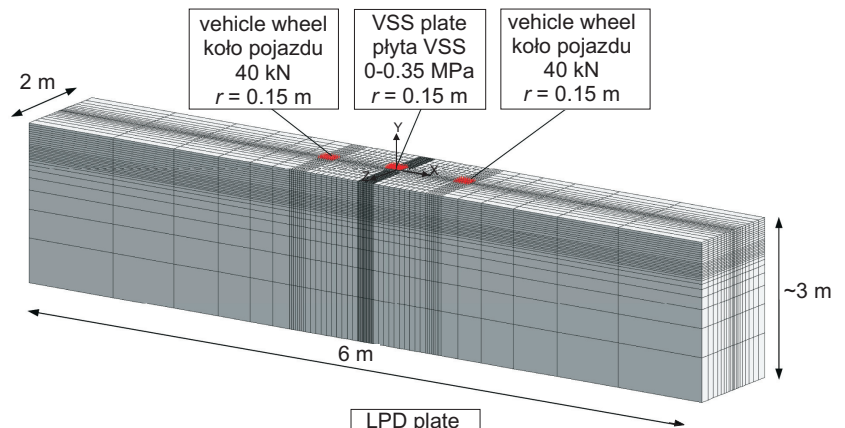
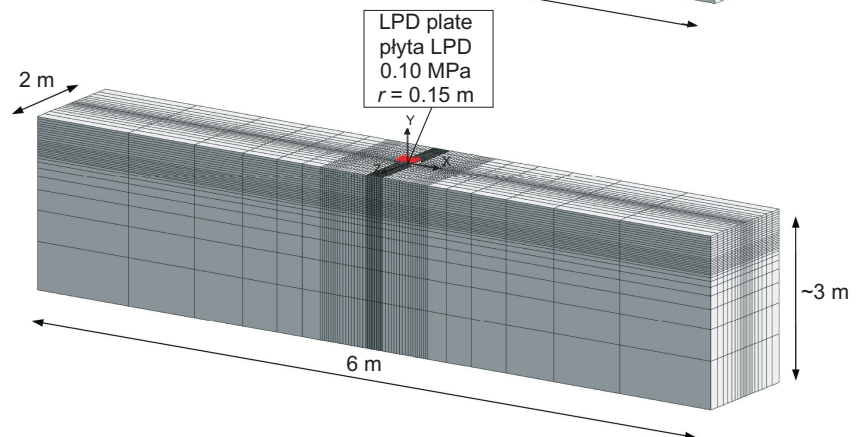


Fig. 7. Computational model for layered subgrade in the dynamic plate load test
Rys. 7. Model obliczeniowy układu warstw podłoża w badaniu dynamicznym



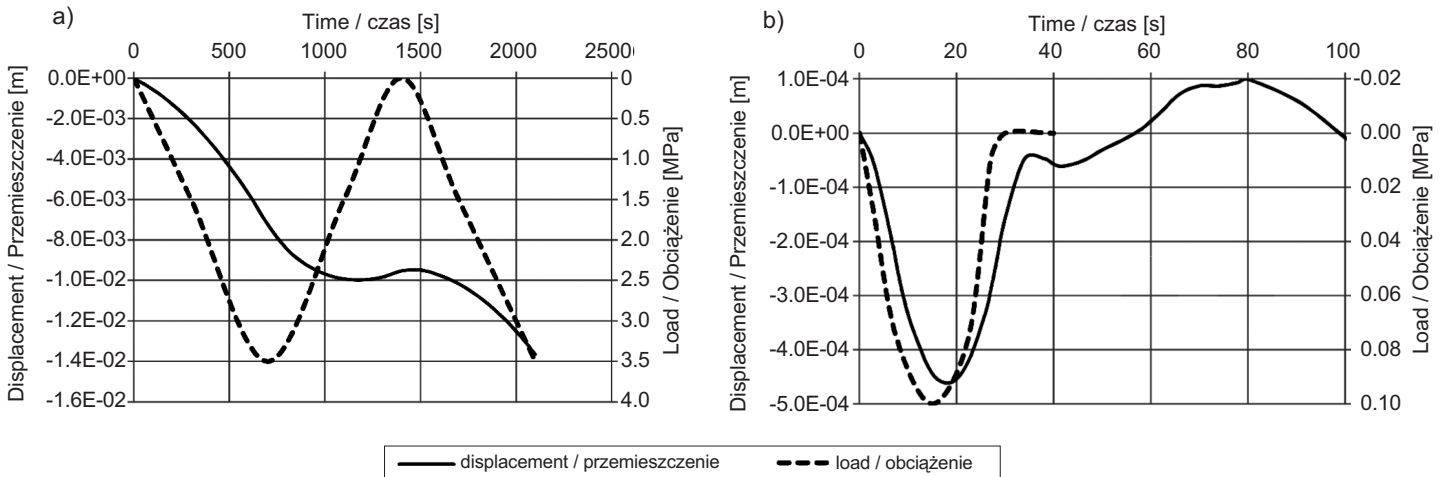


Fig. 8. Examples of the load pulse and subgrade response (displacements) computed in numerical analysis for the static (a) and dynamic plate load tests (b)

Rys. 8. Przykładowe impulsy obciążenia i odpowiedzi podłoża (przemieszczenia), wyznaczone na podstawie obliczeń numerycznych w badaniu statycznym VSS (a) i dynamicznym LPD (b)

Do opisu cech zjawisk plastycznych oraz pełzania zachodzących podczas obciążenia zastosowano model Drucker-Pragera oraz klasyczne prawo pełzania Bailey-Nortona [17]. Dodatkowe parametry materiałowe uwzględniające te cechy zestawiono w Tabl. 3. W przypadku słabego podłoża uwzględniono cechy lepkoplastyczne, natomiast dla piasku przyjęto model sprężystoplastyczny. Warstwę kruszywa łamanego zamodelowano jak warstwę liniowosprężystą. Parametry sprężyste opisane modułem sprężystości i współczynnikiem Poissona pokazano na Rys. 1. Natomiast na Rys. 9 i 10 przedstawiono porównanie wyników obliczeń z wynikami badań terenowych. Wyniki przemieszczeń zestawiono dla maksymalnego obciążenia 0,35 MPa w badaniu statycznym VSS (dla pierwszego i drugiego cyklu) oraz w badaniu dynamicznym LPD (dla szóstego cyklu obciążenia).

The plastic and creep phenomena under the loading were described using the Drucker-Prager model and the Classical Power Law for Creep (Bailey-Norton law) [17]. Additional mechanical parameters taking into account these characteristics are compiled in Table 3. Viscoplastic characteristics were considered in the case of weak subgrade while sand capping layer was represented by the elastic-plastic model. The crushed stone layer was modelled as a linear-elastic layer. The elastic parameters described by the elastic modulus and the Poisson's ratio are shown in Fig. 1. Fig. 9 and Fig. 10 compare the calculated and measured data. The values of displacements concern the maximum load of 0.35 MPa in the static test (the 1st and the 2nd load cycles) and in the LWD test (the 6th load cycle).

Table 3. Additional parameters of the computational model
Tablica 3. Dodatkowe parametry modelu obliczeniowego

	Drucker-Prager parameters Parametry kryterium Druckera-Pragera		Parametry pełzania – prawo Bailey-Nortona Creep parameters – Bailey-Norton law		
	COHESN Zdefiniowana wytrzymałość kohezyjna [Pa]	FRCANG Kąt tarcia [°]	C0 [-]	C1 [-]	C2 [-]
Subgrade / Podłoże	30 000	15	3.67E-11	1.28	0.96
Sand / Piasek	3 000	35	–	–	–

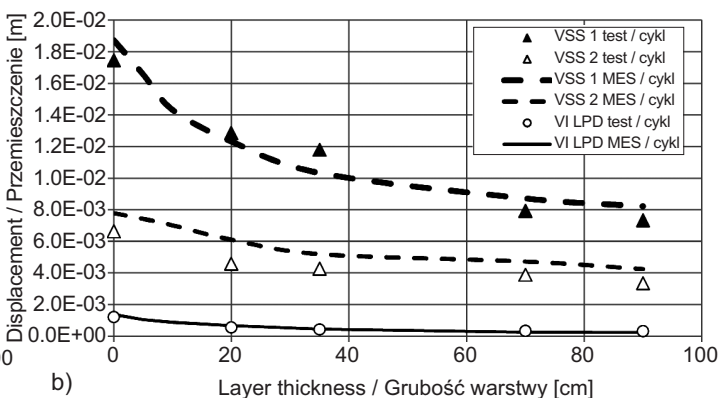
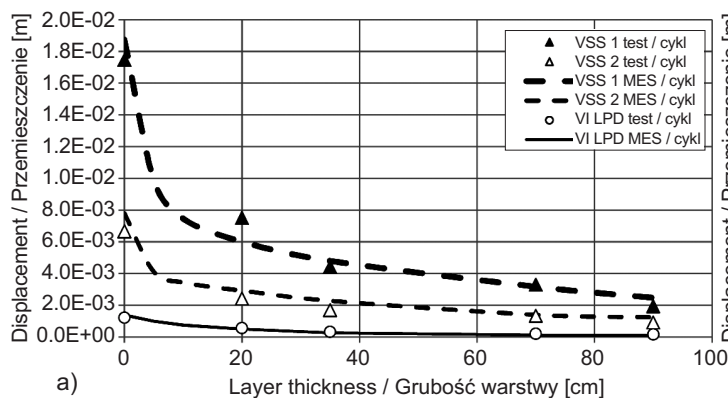


Fig. 9. Comparison of the field test measurements and numerical analysis of the static (VSS) and dynamic (LPD) plate load tests, crushed stone reinforcement layer

Rys. 9. Wyniki badań terenowych i obliczenia numeryczne dla wzmocnienia kruszywem łamanym, w badaniu statycznym VSS i dynamicznym LPD

Fig. 10. Comparison of the field test measurements and numerical analysis of the static (VSS) and dynamic (LPD) plate load tests, sand reinforcement layer

Rys. 10. Wyniki badań terenowych i obliczenia numeryczne dla wzmocnienia piaskiem, w badaniu statycznym VSS i dynamicznym LPD

Wyniki obliczeń numerycznych zasadniczo pokrywają się z badaniami terenowymi. Pewne rozbieżności wynikają z przyjęcia warstw podłoża wzmocnionego jako sprężystych (kruszywo) i sprężystoplastycznych (piasek), w odróżnieniu od podłoża rodzimego (lepkoplastycznego). Przyjmowanie parametrów sprężystych w modelach jest pewnym uproszczeniem i w praktyce wynika z trudności przyjęcia/identyfikacji parametrów układu dwuwarstwowego. Problem w identyfikacji powoduje występowanie zmian w historii obciążenia i w konsekwencji przemieszczenia, co może się wiązać ze zmianą parametrów materiałowych w czasie. W przypadku niektórych materiałów, np. dobrze zagęszczonego kruszywa, przyjęcie parametrów sprężystych nie generuje istotnych błędów w obliczeniach numerycznych. Badania autorów wskazują [3], że zjawiska lepkoplastyczne, pod wpływem czasu obciążenia, zachodzą przede wszystkim w podłożu rodzimym, w trakcie pomiarów metodą statyczną. Na Rys. 11 i 12 pokazano wybrane wyniki przemieszczeń i odkształceń dla badania VSS (drugi cykl) i LPD (szósty cykl), dla warstw kruszywa o grubości 5 cm, spoczywającej na podłożu rodzimym.

Warto zauważyć, że w badaniu statycznym, przy małej grubości wzmocnienia kruszywem, w podłożu rodzimym pojawiają się odkształcenia plastyczne i lepkie. W wyniku znacznej podatności układu największe wartości odkształceń występują w takim wypadku pod kołami pojazdu. Natomiast w krótkotrwałym obciążeniu dynamicznym dominują odkształcenia sprężyste, a wartości odkształceń pełzania oraz plastycznych są bardzo małe. Stanowią one w tym przypadku zaledwie 1% odkształceń całkowitych. Przy kruszywie o znacznej grubości (35 cm) zwiększa się

The outcome of the numerical analysis is generally consistent with the field test results. The existing discrepancies result from treating the subgrade reinforcement layers as elastic (crushed-stone), and elastic-plastic material (sand), differing from the viscoplastic native soil subgrade. Adopting elastic parameters in the models is a certain simplification and in practice it results from the problems in adopting/identifying the parameters of a two-layer system. The identification problem is caused by variation in the time-history of loading and the consequential variation in the displacement values which can be related to a change of material parameters over time. However, in the case of some materials, such as well compacted aggregate, adopting elastic parameters will not generate significant errors in the results of numerical computations. According to the results of the studies carried out by the authors of this paper [3] the viscoplastic phenomena developing during load application occur mainly in the native subgrade in the static plate load test. Fig. 11 and Fig. 12 show chosen displacements and strain values obtained in the static plate load test (2nd cycle), and in the dynamic plate load test (6th cycle) carried out on a 5 cm thick aggregate reinforcement layer laid on the native subgrade.

Note that with a small thickness of the aggregate layer the static test generates in the subgrade both plastic and viscous strains. Due to high yielding of the system, the greatest strains occur under the vehicle wheels. On the other hand, short-term loading in the dynamic plate load test produces mainly elastic strains accompanied with very small creep and plastic strains. Their share in the total

sztwność układu i czasu przemieszczeń od kół „zachodzi” na czasze przemieszczeń pod płytą, powodując skumulowanie przemieszczeń (Rys. 13). W tym przypadku w podłożu pod płytą kumulują się odkształcenia pełzania, natomiast odkształcenia plastyczne nie osiągają znacznych wartości.

strain is only 1%. A greater thickness of the aggregate layer (35 cm) increases the stiffness of the system and the deflection basin caused by the vehicle wheels encroaches on the deflection basin under the load plate, resulting in accumulation of deflections (Fig. 13). In this case creep strains accumulate under the load plate and plastic strains remain relatively low.

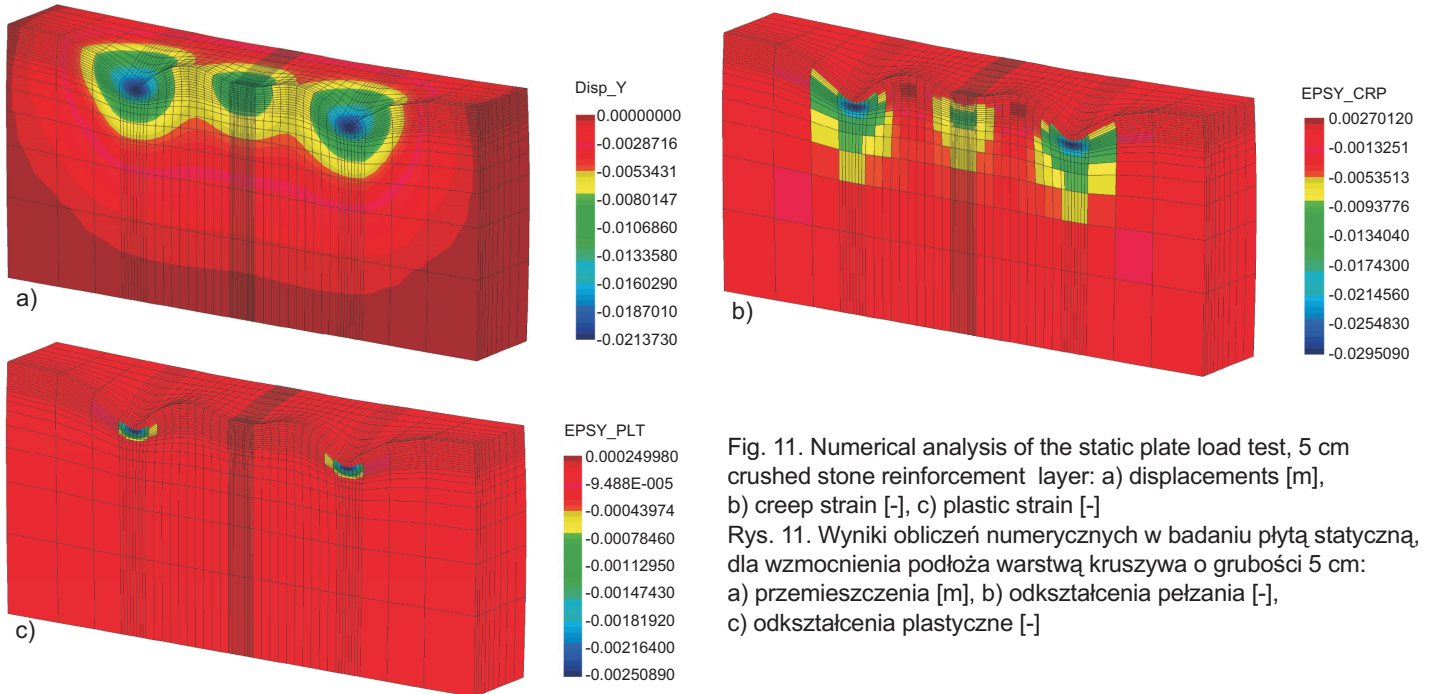


Fig. 11. Numerical analysis of the static plate load test, 5 cm crushed stone reinforcement layer: a) displacements [m], b) creep strain [-], c) plastic strain [-]

Rys. 11. Wyniki obliczeń numerycznych w badaniu płytą statyczną, dla wzmocnienia podłoża warstwą kruszywa o grubości 5 cm: a) przemieszczenia [m], b) odkształcenia pełzania [-], c) odkształcenia plastyczne [-]

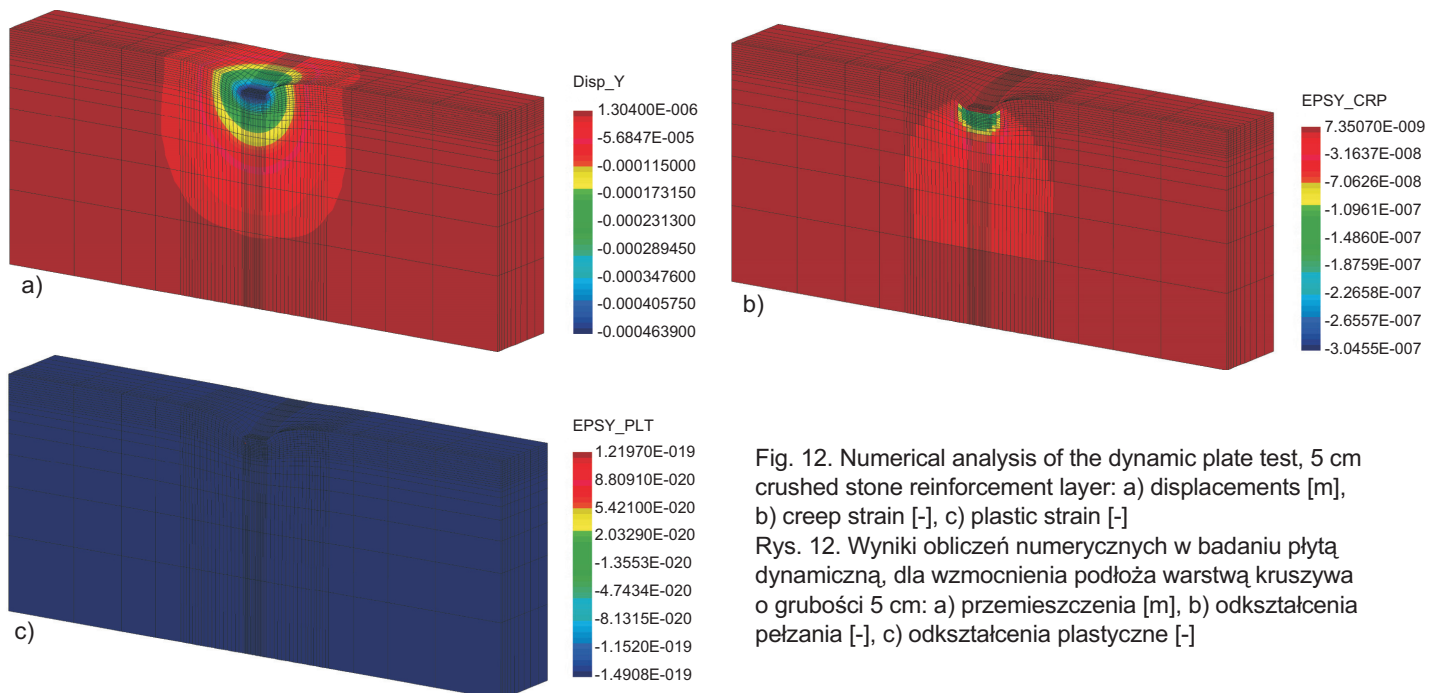


Fig. 12. Numerical analysis of the dynamic plate test, 5 cm crushed stone reinforcement layer: a) displacements [m], b) creep strain [-], c) plastic strain [-]

Rys. 12. Wyniki obliczeń numerycznych w badaniu płytą dynamiczną, dla wzmocnienia podłoża warstwą kruszywa o grubości 5 cm: a) przemieszczenia [m], b) odkształcenia pełzania [-], c) odkształcenia plastyczne [-]

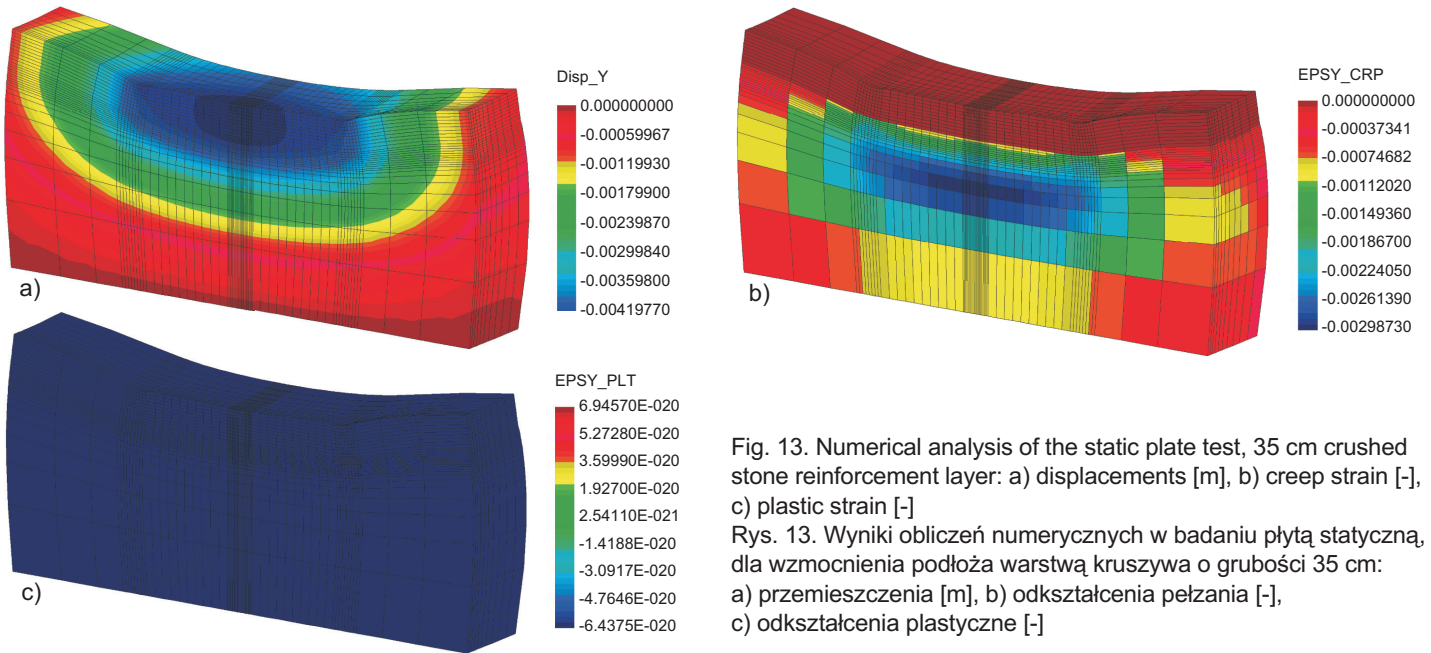


Fig. 13. Numerical analysis of the static plate test, 35 cm crushed stone reinforcement layer: a) displacements [m], b) creep strain [-], c) plastic strain [-]

Rys. 13. Wyniki obliczeń numerycznych w badaniu płyty statycznej, dla wzmocnienia podłoża warstwą kruszywa o grubości 35 cm:

a) przemieszczenia [m], b) odkształcenia pełzania [-], c) odkształcenia plastyczne [-]

Modelowana warstwa piasku o charakterze sprężystoplastycznym jest zdecydowanie „słabsza” od warstwy kruszywa. Na Rys. 14 pokazano wyniki obliczeń dla warstwy piasku o grubości 35 cm. Przy tej grubości obserwuje się mniejsze oddziaływanie kół pojazdów na przemieszczenia w środkowej części modelu (pod płytą), jednak z uwagi na zjawiska pełzania w podłożu i plastyczne w piasku dochodzi do ponad dwukrotnie większych przemieszczeń niż w przypadku wzmocnienia kruszywem.

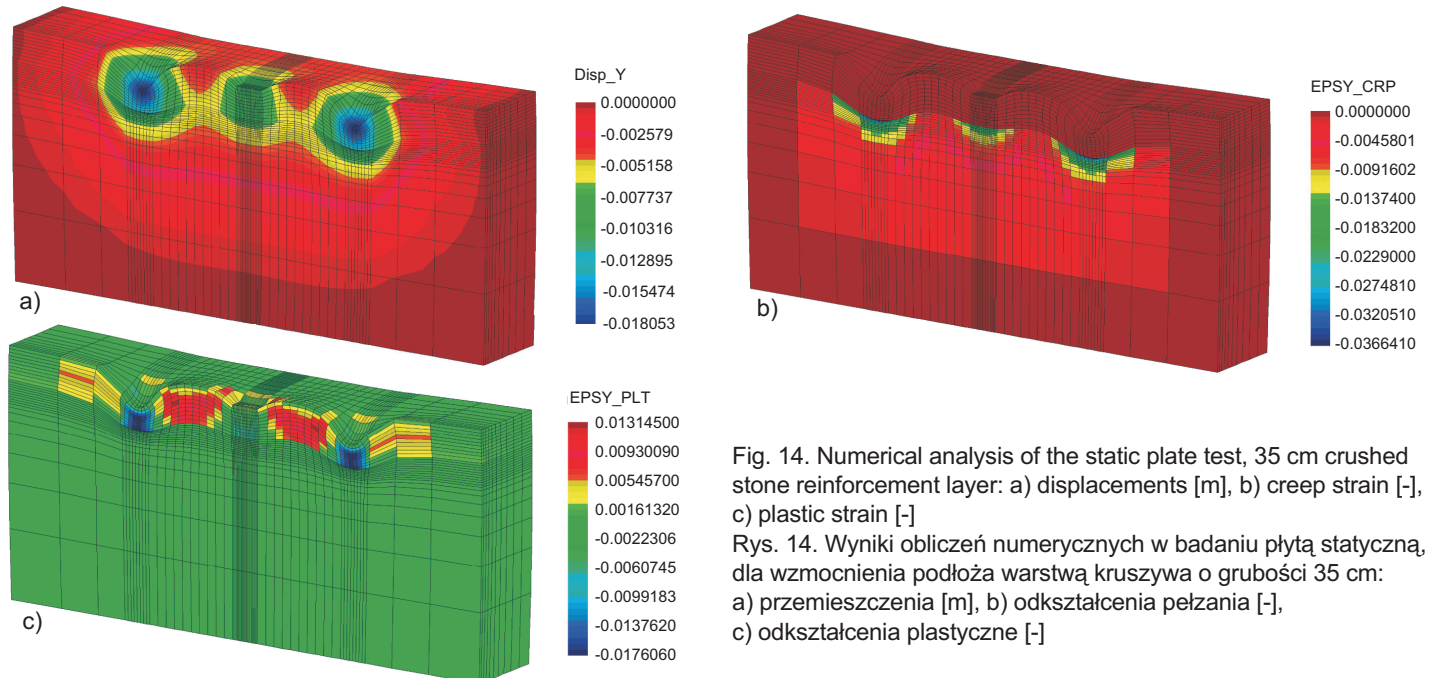


Fig. 14. Numerical analysis of the static plate test, 35 cm crushed stone reinforcement layer: a) displacements [m], b) creep strain [-], c) plastic strain [-]

Rys. 14. Wyniki obliczeń numerycznych w badaniu płyty statycznej, dla wzmocnienia podłoża warstwą kruszywa o grubości 35 cm:

a) przemieszczenia [m], b) odkształcenia pełzania [-], c) odkształcenia plastyczne [-]

Należy podkreślić, jak istotne jest uwzględnianie zjawisk plastycznych i lepkich w modelach. Autorzy wskazywali już na ten problem w [3]. Zastosowanie modeli sprężystych dla wszystkich warstw powoduje znaczne rozbieżności w porównaniu z wynikami badań terenowych. Nawet w przypadku wzmocnienia kruszywem o znacznej miąższości 60 cm, zastosowanie modelu sprężystego odnośnie podłoża rodzimego powoduje błędy rzędu 30% (Rys. 15). W modelach, w których poza podłożem rodzimym także piasek opisany jest modelem sprężystym, przemieszczenia są około 3-krotnie mniejsze w stosunku do wyników badań terenowych (Rys 16). W przypadku modelowania dynamicznego LPD różnice obliczeń pomiędzy modelami (sprężystoplastycznym i sprężystym) są mniejsze i przy grubościach powyżej 60 cm wynoszą około 10% (Rys. 17 i 18). Stosowanie zatem „całościowych” modeli sprężystych oraz założenie, zwłaszcza w badaniu statycznym, że zjawiska lepkoplastyczne są pomijalne, jest zdecydowanie błędne. Na Rys. 19 i 20 przedstawiono udział odkształceń sprężystych i pełzania w podłożu rodzimym, w obu metodach badawczych, w zależności od rodzaju i grubości zastosowanego wzmocnienia.

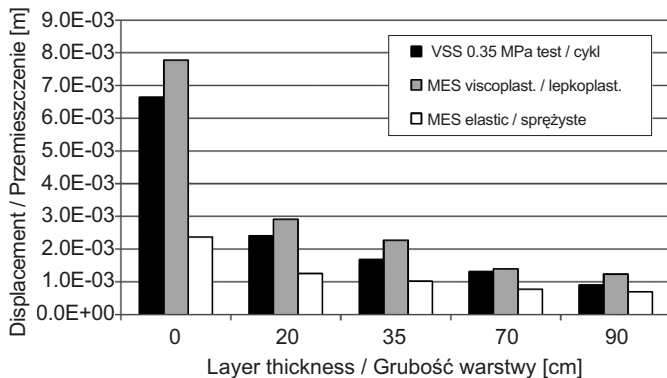


Fig. 15. Comparison of the field test measurements and numerical analysis of the static plate load test for different computational models; crushed stone reinforcement layer Rys. 15. Porównanie wyników badań terenowych i obliczeń numerycznych w różnych modelach, dla płyty statycznej; przypadek wzmocnienia kruszywem łamanym

Wraz ze wzrostem grubości wzmocnienia, wartość i udział odkształceń sprężystych w odkształceniu całkowitym podłoża w badaniu statycznym rośnie. Jednocześnie maleje odkształcenie całkowite podłoża. Odwrotna sytuacja ma miejsce w badaniu dynamicznym, w którym odkształcenia sprężyste dominują w całkowitym odkształceniu podłoża i maleją wraz ze wzrostem grubości wzmocnienia. Zaobserwować można to zarówno w przypadku wzmocnienia zarówno kruszywem, jak i piaskiem. Trudno w związku z powyższym uzyskać jednoznaczne i uniwersalne korelacje do

The need for including the plastic and viscous phenomena in the models must be stressed. This problem was noted by the authors in [3]. Adopting elastic models for each of the subgrade layers results in significant discrepancies with the field results. With the native subgrade represented by elastic model errors of about 30% can be expected even when with thick reinforcement layers of 60 cm crushed stone (Fig. 15). If elastic model is used also to represent the sand layer, the calculated displacements will be about three times smaller than the values measured in field (Fig. 16). The differences between the results obtained with the two models (elastic-plastic and elastic) are smaller in the case of LPD test of about 10% for layer thicknesses greater than 60 cm (Fig. 17-18). Hence, it is definitely wrong to use global elastic models and purposefully ignore the viscoplastic phenomena, especially in modelling the static plate load test. Fig. 19-20 present the share of elastic and creep strains occurring in the native subgrade in both test methods, depending on the capping layer material and thickness.

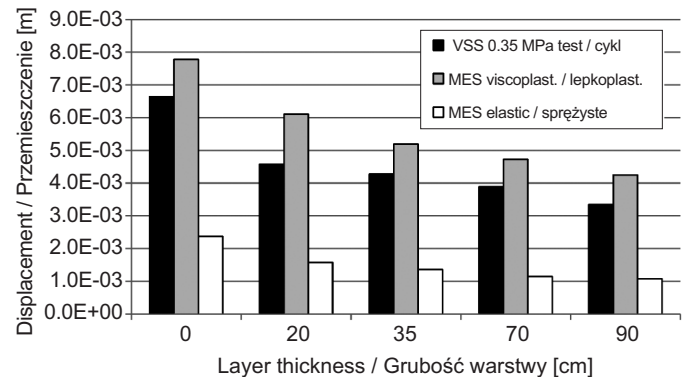


Fig. 16. Comparison of the field test measurements and numerical analysis of the static plate test for different computational models; sand on natural subgrade case Rys. 16. Porównanie wyników badań terenowych i obliczeń numerycznych w różnych modelach, dla płyty statycznej; przypadek wzmocnienia piaskiem

With the increasing reinforcement layer thickness the level and share of elastic strain in the total strain also increase. At the same time the total strain of subgrade is reduced. It is quite the opposite in the case of the dynamic test where elastic strains have a prevailing share in the total strain and decrease with the increase in the capping layer thickness. This is observed both in the case of the crushed stone and sand reinforcement layers. This explains the difficulty in obtaining definite and universal correlations for converting the displacements obtained in

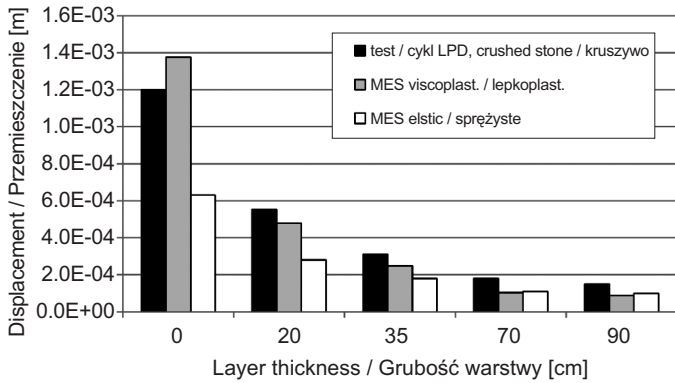


Fig. 17. Comparison of the field test measurements and numerical analysis of the dynamic plate test for different computational models; crushed stone on natural subgrade case

Rys. 17. Porównanie wyników badań terenowych i obliczeń numerycznych w różnych modelach, dla płyty dynamicznej; przypadek wzmocnienia kruszywem

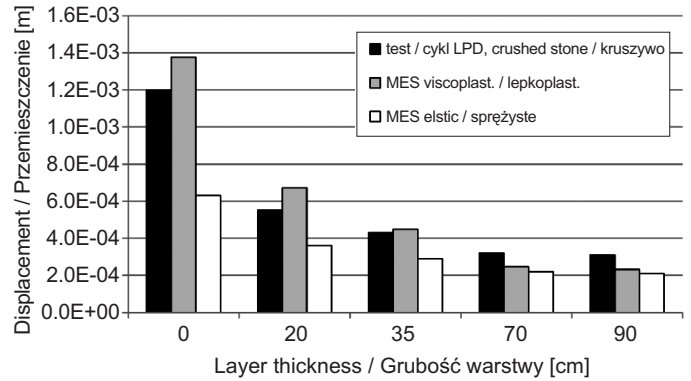


Fig. 18. Comparison of the field test measurements and numerical analysis of the dynamic plate test for different computational models; sand on natural subgrade case

Rys. 18. Porównanie wyników badań terenowych i obliczeń numerycznych w różnych modelach, dla płyty dynamicznej; przypadek wzmocnienia piaskiem

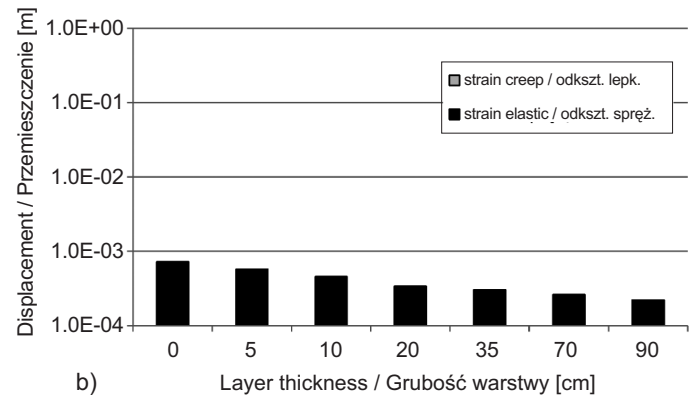
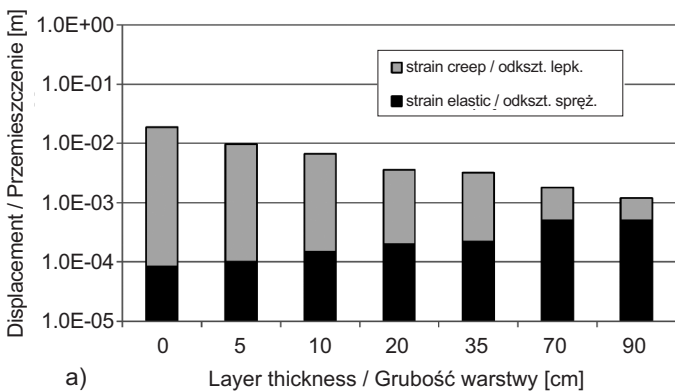


Fig. 19. Elastic strain and creep strain share in total subgrade strain: a) in static plate test, b) in dynamic plate test; crushed stone on subgrade case

Rys. 19. Udział odkształceń sprężystych i pełzania w całkowitym odkształceniu podłoża: a) w badaniu statycznym, b) w badaniu dynamicznym; przypadek wzmocnienia kruszywem

przeliczenia wyników przemieszczeń pomiędzy obiema metodami. Autorzy w niniejszym artykule zwracają uwagę, że rodzaj warstw podłoża wzmoczonego istotnie ogranicza uzyskanie prostych zależności. Na Rys. 21 pokazano korelacje dla uzyskanych wyników przemieszczeń z badania statycznego VSS (przy obciążeniu 0,35 MPa, z drugiego cyklu) i dynamicznego LPD (z szóstego cyklu), dla kruszywa i piasku, z uwzględnieniem zmiennej grubości. O ile dla zmiennej grubości uzyskuje się wysokie korelacje liniowe, to należy pamiętać, że są one charakterystyczne tylko dla danego typu wzmocnienia (kruszywa/piasku).

the two methods. Obtaining simple relationships is considerably hindered by different materials used for capping layers. Fig. 21 presents correlations for displacements obtained in the static plate load test (at 0.35 MPa, 2nd load cycle) and in the dynamic plate load test (6th load cycle) for crushed stone and sand, allowing for thickness variation. Although high linear correlations are obtained for varying depth, one should bear in mind that they are characteristic only for the particular type of material (crushed stone/sand).

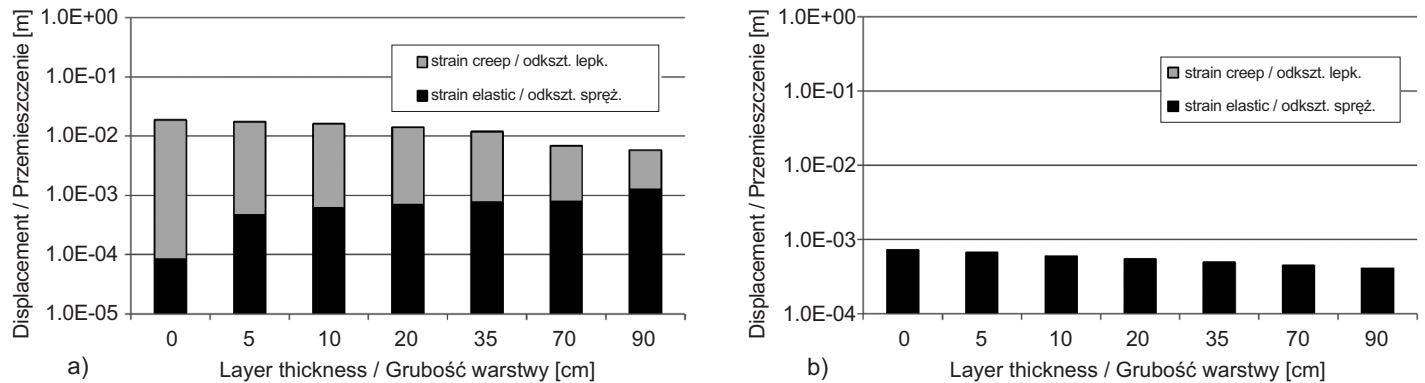


Fig. 20. Elastic strain and creep strain share in total subgrade strain: a) in static plate test, b) in dynamic plate test; sand on subgrade case

Rys. 20. Udział odkształceń sprężystych i pełzania w całkowitym odkształceniu podłoża: a) w badaniu statycznym, b) w badaniu dynamicznym; przypadek wzmocnienia piaskiem

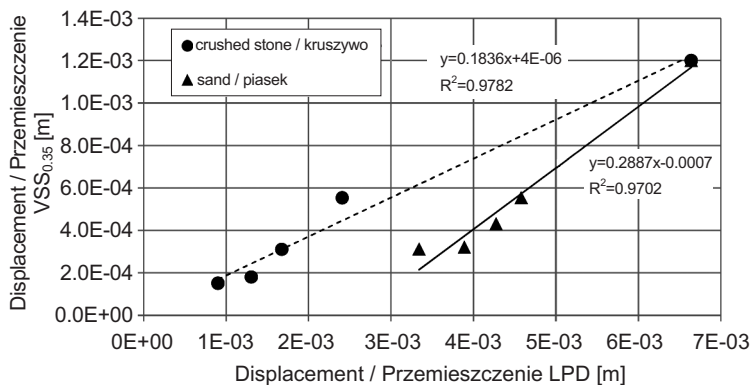


Fig. 21. Correlation dependence between static (VSS) and dynamic (LPD) plate test for crushed stone and sand subgrade reinforcement

Rys. 21. Zależności korelacyjne wyników przemieszczeń w badaniu statycznym (VSS) i dynamicznym (LPD) w przypadku wzmocnienia kruszywem łamanym i piaskiem

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Badania terenowe i przeprowadzone obliczenia numeryczne potwierdziły poprawność przyjętych przez autorów modeli uwarstwionego podłoża i pozwoliły na weryfikację zjawisk zachodzących w podłożu pod obciążeniem. Przeanalizowano, w jaki sposób błędy wynikające z przyjęcia uproszczonego modelu uwarstwionego podłoża (uwarstwiona pół-przestrzeń sprężysta) wpływają na wyznaczone przemieszczenia/osiadania pionowe pod płytą naciskową. Wykazano, że o ile warstwy kruszywa łamanego przyjmować można jako liniowosprężyste, to warstwy z piasku należy modelować jako sprężystoplastyczne, a w przypadku podłoża rodzimego o niedużej nośności konieczne jest również uwzględnienie odkształceń zależnych od czasu obciążenia (pełzania). Zbadano wpływ grubości warstw wzmocniających na rejestrowane przemieszczenia/osiadania pionowe, w zależności od rodzaju materiału użytego do wzmocnienia (kruszywo łamane/piasek) i metody badawczej. Stwierdzono stabilizowanie się rejestrowanych wyników przemieszczeń przy grubościach powyżej 50 cm

4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The field tests and the numerical calculations confirmed appropriateness of the models adopted by the authors to represent layered subgrade, and enabled verification of the phenomena occurring in the subgrade during loading. The errors resulting from adopting a simplified model of the layered subgrade (represented by elastic half-space) were analysed in terms of their effect on the calculated displacements/vertical settlements under the load plate. It has been demonstrated that while crushed stone layers can be represented by linear-elastic model, it is necessary to use elastic-plastic model in the case of sand layers and, moreover, strains depending on the loading time (creep) must be considered when analysing weaker native subgrades. The influence of the capping layer thickness on the registered displacements/vertical settlements was also investigated, depending on the material (crushed stone/sand) and the test method. It was found that the displacements flatten out when the layer thickness exceeds 50 cm in the dynamic test, different than in the static plate

w metodzie dynamicznej, inaczej niż w metodzie statycznej, gdzie rejestrowane przemieszczenia malały wraz z dalszym pogrubianiem warstw podłoża wzmocnionego.

Przeprowadzone badania porównawcze i modelowanie pozwoliły na wyjaśnienie istotnych różnic między dynamiczną i statyczną metodą badawczą. Ze względu na dłuższy czas obciążenia i większe naciski w badaniu płyta statyczną decydujące są odkształcenia lepkoplastyczne podłoża rodzimego (nawet mimo przyjęcia górnych warstw podłoża wzmocnionego jako liniowosprężystych), podczas gdy w badaniu dynamicznym dominujące są odkształcenia sprężyste. Bardzo trudno jest wobec tego ustalić uniwersalne zależności między przemieszczeniami rejestrowanymi w obu metodach badawczych. Autorzy wykazali, że stosunek przemieszczeń rejestrowanych w badaniu statycznym i dynamicznym nie jest stały, nawet dla danego typu materiału. Zależy on dodatkowo od grubości warstw, czego nie uwzględniano w dotychczasowych badaniach porównawczych. Przekłada się to w konsekwencji na rozbieżności w identyfikowanych oboma metodami parametrach materiałowych (modułach) i trudności z jednoznaczną oceną nośności wbudowanych warstw.

Doświadczenia autorów wskazują, że w warunkach terenowych, ze względu na skomplikowanie zagadnienia, bardzo trudne jest odnoszenie wyników uzyskanych w metodzie statycznej do metody dynamicznej i na odwrót. Jednocześnie autorzy nie zalecają korzystania z powszechnie stosowanych zależności, które nie uwzględniają grubości i układu warstw podłoża. Do czasu opracowania krajowych wytycznych dla metody dynamicznej, zaleca się ustalanie korelacji z metodą statyczną w warunkach budowy przez przeprowadzanie każdorazowo badań porównawczych dla danego układu warstw i warunków gruntowo-wodnych.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] PN-S-02205:1998. Roboty ziemne
- [2] Instrukcja badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych. GDDP, IBDiM, Warszawa, 1998
- [3] *Mackiewicz P., Krawczyk B.*: Wpływ czasu oddziaływania obciążenia w badaniu VSS na identyfikowane parametry podłoża. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **14**, 1, 2015, 19-29
- [4] *Krawczyk B., Mackiewicz P., Szydło A.*: Analiza wpływu rodzaju przeciwwagi na identyfikowane parametry warstw konstrukcji nawierzchni oraz podłoża w badaniu VSS. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **14**, 2, 2015, 143-157
- [5] *Krawczyk B., Mackiewicz P.*: Wpływ cyklicznych obciążeń w badaniu lekką płytą dynamiczną na identyfikowane parametry podłoża. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **14**, 1, 2015, 5-17
- [6] Badanie i ustalenie zależności korelacyjnych dla oceny stanu zagęszczenia i nośności gruntów niespoistych płytą dynamiczną. IBDiM, Warszawa, 2005
- [7] *Gorączko A., Śmigiel P., Topoliński Sz.*: Korelacje parametrów zagęszczenia podbudowy drogowej z kruszywami łamanymi. *Logistyka*, 6, 2014, 4025-4030
- [8] *Rogojsz G.*: Badanie nośności nasypów drogowych przy wykorzystaniu lekkiej płyty dynamicznej. *Przegląd Budowlany*, **86**, 7-8, 2015, 60-63

load tests in which the measured displacements decrease with the increase in the reinforcement layer thickness.

The comparative analyses and modelling enabled explaining the mechanism underlying the significant differences between the dynamic and static test methods. The longer time of load application and greater load values make the viscoplastic strains of native subgrade critical in the static plate load test (even with linear-elastic model adopted for the top reinforcement layers), with the primary role of elastic strains in the dynamic test. Hence it is most difficult to establish universal relationships between displacements registered with these two test methods. The results show that the ratio between displacements registered in the static and dynamic plate load tests varies, even for the same material. It depends on the layer thickness which was not taken into account in former comparative studies. This results in the discrepancy between the mechanical parameters (moduli) identified with the two methods and problems with definite determination of the bearing capacity by field testing.

Based on their own experience the authors conclude that in field conditions it is very hard, due to complexity of the problem, to relate the results obtained in the static test to the results of the dynamic test and the other way round. Besides, the authors do not recommend the popularly used relationships which ignore the effect of the thickness and arrangement of subgrade layers. Therefore, until national guidelines are developed for the dynamic plate load test, it is recommended to establish correlation with the static method through comparative analysis based on field tests carried out for each specific arrangement of the subgrade layers and the subsurface conditions.

- [9] *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
- [10] ZTV E-StB 09 Dodatkowe warunki techniczne i wytyczne dla robót ziemnych obejmujących budowę dróg
- [11] ZTV T-StB 95 Dodatkowe warunki techniczne i wytyczne dla warstw nośnych przy pracach ziemnych
- [12] ZTV A-StB 97 Dodatkowe warunki techniczne umowy i wytyczne dla wykopów przeznaczonych na cele komunikacyjne
- [13] Light Weight Deflectometer for the dynamic plate load test. Terratest Instruction Manual, 2013
- [14] *Krawczyk B.*: Identyfikacja parametrów modeli nawierzchni drogowych na podstawie impulsowych testów dynamicznych. Praca Doktorska, Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, 2012
- [15] *Ruta P., Krawczyk B., Szydło A.*: Identification of pavement elastic moduli by means of impact test. *Engineering Structures*, **100**, 2015, 201-211
- [16] *Rusiński E.*: Metoda elementów skończonych. System COSMOS/M. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1994
- [17] *Norton F.H.*: The Creep of Steel at High Temperatures. McGraw-Hill, London, 1929