



BARTŁOMIEJ KRAWCZYK¹⁾
ANTONI SZYDŁO²⁾

IDENTIFICATION OF HOMOGENEOUS PAVEMENT SECTIONS

IDENTYFIKACJA JEDNORODNYCH ODCINKÓW KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI

STRESZCZENIE. W trakcie pomiarów FWD bardzo często dochodzi do sytuacji, w której pomierzone przemieszczenia pionowe różnią się od siebie w sposób znaczący. Te, które bardzo od siebie odbiegają (będące podstawą późniejszej identyfikacji modułów sprężystości warstw konstrukcji nawierzchni) nie mogą być wprost uśredniane, gdyż dawałoby to fałszywy obraz badanego odcinka. W artykule przedstawiono, opartą na podstawowych właściwościach funkcji wykładniczej, metodę jednoznacznej identyfikacji jednorodnych odcinków konstrukcji nawierzchni na podstawie pomierzonych w badaniu FWD przemieszczeń pionowych. Przeanalizowano stosowane algorytmy identyfikacji i wykazano ich ograniczenia. Skuteczność opracowanej metody zweryfikowano na rzeczywistym odcinku nawierzchni o czterech zróżnicowanych konstrukcjach.

SŁOWA KLUCZOWE: konstrukcja nawierzchni, odcinki jednorodne, ugięciomierz FWD.

ABSTRACT. Frequently FWD measurement results of vertical displacements of the same object differ to a considerable degree. Varying measurement results of displacements (making the subsequent base for the identification of elasticity moduli of relevant pavement structure layers) may not be directly averaged since they would build up a false picture of the tested section. The reliable identification method for homogenous sections of pavement structure based on measurement results of FWD tested vertical displacements, with the use of some basic properties of the exponential function, was described in this paper. The applied identification algorithms were analysed and their limitations were pointed out. The effectiveness of the elaborated method was verified on a real pavement section with four different structures.

KEYWORDS: Falling Weight Deflectometer (FWD), homogeneous sections, pavement construction.

DOI: 10.7409/rabdim.013.019

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; antoni.szydlo@pwr.wroc.pl

1. WPROWADZENIE

Jedną z najważniejszych cech eksploatacyjnych nawierzchni jest jej trwałość zmęczeniowa, rozumiana jako liczba obciążeń (np. osi obliczeniowych) pozostała do utraty właściwości strukturalnych, wymaganych dla prawidłowego jej funkcjonowania. Wyznacza się ją pośrednio na podstawie pomierzonych przemieszczeń pionowych konstrukcji nawierzchni pod znanym obciążeniem, zarejestrowanych w co najmniej kilku punktach tworzących tzw. „czaszę przemieszczeń”. Czasze te wykorzystywane są w tzw. „obliczeniach odwrotnych” (ang. *back-calculation*) do identyfikacji parametrów (modułów) modeli obliczeniowych nawierzchni drogowych, z wykorzystaniem których określa się trwałość zmęczeniową konstrukcji. Ugięciomierz FWD (Rys. 1) jest najpopularniejszym i najefektywniejszym urządzeniem, służącym do pomiarów przemieszczeń pionowych konstrukcji nawierzchni pod znanym obciążeniem, umożliwiającym przy tym rejestrację kompletnej czaszy przemieszczeń. FWD (ang. *Falling Weight Deflectometer*) działa podobnie jak lekka płyta dynamiczna, umożliwia jednak realizowanie znacznie większych obciążeń – adekwatnych do rzeczywistych wartości obciążeń nawierzchni. 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 przemieszczenia (ugięcia) konstrukcji nawierzchni, które rejestrują specjalne czujniki, zwane geofonami. Schemat działania ugięciomierza FWD przedstawiono na Rys. 2.



Fig. 1. View of the Dynatest FWD 8002 testing device
Rys. 1. Widok urządzenia FWD 8002 firmy Dynatest

Podczas pomiarów FWD, zwłaszcza w trakcie badania długich odcinków nawierzchni, bardzo często dochodzi do sytuacji, w której przemieszczenia pionowe pomierzone w różnych punktach różnią się od siebie w sposób znaczący. Może to wynikać z różnego stanu technicznego nawierzchni na badanym odcinku, z niejednorodnej grubości warstw konstrukcyjnych lub ze zmiany konstrukcji w obrębie tej samej badanej nawierzchni. Odbiegające od siebie

1. INTRODUCTION

One of the main operating characteristics of pavement is its fatigue life interpreted as the number of loading (e.g. of standard axes) remaining till the loss of structural properties, necessary for its satisfactory functioning. It can be determined indirectly on the basis of measurements of vertical pavement construction displacements under the defined loading, registered in at least a couple of points forming the so-called “deflection basin”. Those basins are used in the so-called “back-calculations” for identification of parameters (moduli) for road pavement computational models, applied to defining the structural fatigue life. The FWD (Falling Weight Deflectometer) testing apparatus shown on Fig. 1 is the most popular and most effective device for measuring vertical displacements of a pavement structure under a defined load, enabling the simultaneous registration of the complete deflection basin. The FWD works like Light Weight Deflectometer, but it enables exerting much higher loads than the latter - proportionate to the existing values of pavement loading. The load, falling freely from a determined height, hits the damping system and eventually deforms it. The loading impulse is smoothly transferred to the pressure plate. Then the plate triggers off vertical displacements (deflections) of the pavement structure which are registered by special sensors called geophones. The functional chart of the FWD is shown on Fig. 2.

It happens very often, especially while measuring long pavement sections with the FWD, that measurement results of vertical displacements in various points differ to a large extent due to either poor technical state of the pavement on a tested section, non-homogenous thickness of structure layers or structural changes within the same tested pavement. Such divergent measurement results of vertical displacements forming the basis for

pomierzone przemieszczenia pionowe (będące podstawą późniejszej identyfikacji modułów sprężystości warstw) nie mogą być wprost uśredniane, gdyż dawałoby to fałszywy obraz badanego odcinka. Przed przystąpieniem do identyfikacji modułów kluczowe zatem jest dokonanie podziału badanego odcinka nawierzchni na tzw. odcinki jednorodny, tj. o zbliżonym stanie technicznym, wyrażonym przez zbliżone moduły sprężystości warstw. W niniejszym artykule przeanalizowano stosowane algorytmy identyfikacji jednorodnych odcinków nawierzchni na podstawie pomierzonych przemieszczeń pionowych. Wykazano błędy i ograniczenia w powszechnie stosowanych metodach i opracowano własną, pozwalającą na jednoznaczną identyfikację odcinków jednorodnych na podstawie pomiarów FWD.

the later identification of elastic moduli of pavement layers cannot be directly averaged because they would build up a false picture of the tested section. Therefore it is a crucial question to divide the tested pavement stretch into so-called homogenous sections with a similar technical state represented by comparable elastic moduli before the identification of moduli. The applied identification algorithms of homogenous pavement sections based on results of measured vertical displacements are discussed in the present article. The errors and limitations of universally accepted methods are demonstrated here as well. Furthermore, a new technique enabling an explicit identification of homogenous sections based on FWD measurements was developed.

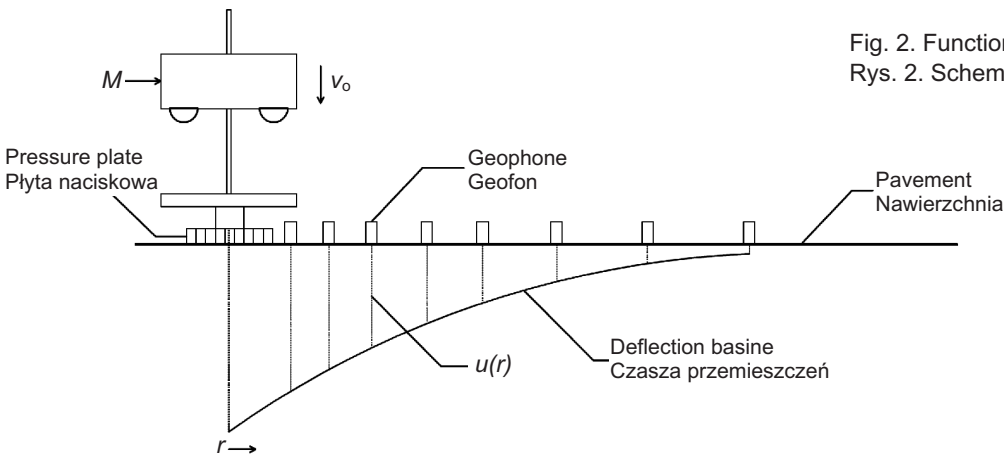


Fig. 2. Functional diagram of the FWD

Rys. 2. Schemat działania ugięciomierza FWD

2. STOSOWANE ALGORYTMY IDENTYFIKACJI ODCINKÓW JEDNORODNYCH

Powszechne jest ustalanie odcinków jednorodnych na podstawie przemieszczeń pomierzonych bezpośrednio w osi obciążenia, przy założeniu że zbliżone przemieszczenia pionowe w tym jednym punkcie implikują zbliżone wartości modułów warstw nawierzchni. Odcinki jednorodne identyfikowane są na podstawie wykresu sum skumulowanych różnic od wartości średniej S_i , w którym zmiana jego nachylenia oznacza granicę między odcinkami:

$$S_i = X_{sr} - x_i + S_{i-1}, \quad (1)$$

gdzie:

S_i – suma skumulowana różnic pomiaru od wartości średniej,

2. APPLIED IDENTIFICATION ALGORITHMS FOR HOMOGENOUS SECTIONS

Establishing homogenous sections based on displacements measured directly at the loading axis is a universal practise supposing that similar vertical displacements in that particular point involve resembling values of pavement layer moduli. Homogenous sections are identified with the use of a cumulative sum chart showing deviations from the mean value S_i . The change in the gradient of the graph indicates the limit between sections:

$$S_i = X_m - x_i + S_{i-1}, \quad (1)$$

where:

S_i – cumulative sum of measurement result differences from the mean value,

x_i – wynik pomiaru w punkcie i ,

X_{sr} – średni wynik pomiarów.

Jest to prosta i niezwykle efektywna metoda analizy sekwencyjnej, opracowana na Uniwersytecie Cambridge w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku [1], która stopniowo została zaadoptowana do wielu dziedzin nauki, jak chociażby medycyny, ekonomii i chemii. W inżynierii drogowej metoda sum skumulowanych różnic od wartości średniej wykorzystywana jest obecnie na całym świecie, m.in. w USA [2, 3], UE [4 - 6], Hong Kongu [7], Australii i RPA [8]. Zastosowanie tej metody do identyfikacji jednorodnych odcinków nawierzchni na podstawie przemieszczeń pomierzonych bezpośrednio w osi obciążenia obarczone jest jednak dużym ryzykiem, gdyż cała zarejestrowana „czasza przemieszczeń” ma wpływ na wartości identyfikowanych modułów, a zgodność przemieszczeń w jednym szczególnym punkcie nie musi przekładać się na zbliżone wartości modułów warstw. W większym stopniu o podobieństwie czasz przemieszczeń (i w konsekwencji zbliżonych modułów sprężystości warstw) świadczy, rzadziej stosowana, suma lub iloczyn przemieszczeń zarejestrowanych pod wszystkimi geofonami.

Obie te metody identyfikacji odcinków jednorodnych, choć bardzo proste do praktycznego stosowania, opierają się jednak na fałszywych miarach podobieństwa czasz przemieszczeń, rozumianych jako zgodność przemieszczeń pomierzonych w osi obciążenia lub zgodność sumy (lub iloczynu) przemieszczeń pod wszystkimi geofonami. Łatwo wyobrazić sobie dwie czasze przemieszczeń o tych samych wartościach w osi obciążenia, opisujące jednak zupełnie inne konstrukcje – przykładowe (a i b) przedstawiono na Rys. 3. Parametry modeli konstrukcji odpowiadających przykładowym czaszom zestawiono w Tabelcy 1. Schemat przyjętego modelu konstrukcji nawierzchni przedstawiono na Rys. 4. Analogicznie występować mogą czasze o takiej samej sumie przemieszczeń pod wszystkimi geofonami, opisujące zupełnie inne konstrukcje – przykładowe (c i d) przedstawiono na Rys. 5, a parametry modeli konstrukcji im odpowiadających zestawiono w Tabelcy 2. W obu metodach prawdopodobne jest popełnienie grubego błędu i przeoczenie zmiany konstrukcji na badanym odcinku drogi. W przypadku stosowania powyższych metod zaleca się zagęszczoną identyfikację wglębną (odwierty) celem ustalenia jednorodnych odcinków konstrukcji nawierzchni. Warto również zauważyć, że przy ustalaniu jednorodnych odcinków nawierzchni nie mają zastosowania klasyczne miary podobieństwa, takie jak odległość Manhattan – tzw. norma L_1 (2) ani odległość euklidesowa – tzw. norma L_2 (3), które z powodzeniem

x_i – measurement result at the point i ,

X_m – mean value of a measurement result.

That both simple and extremely effective method of the sequential analysis, elaborated at the Cambridge University in 1960s [1], gradually made its way to many fields of science, for instance medicine, economics and chemistry. The method of cumulative sums of differences from the mean value has nowadays become a civil engineering technique applied all over the world including the USA [2, 3], the EU [4, 5, 6], Hong Kong [7], Australia and the Republic of South Africa [8]. However, the use of that method for identification of homogenous pavement sections basing on displacements measured directly at the loading axis involves a serious risk due to an impact of the whole “deflection basin” on values of the identified moduli. Moreover, the compatibility of displacement measurement results at one particular point does not have to translate into resembling values of layer moduli. The resemblance of deflection basins (and consequently similar elastic constants of layers) may be proven even more easily with a less often applied sum or product of displacements registered under all geophones.

Both techniques for homogenous section identification, though very simple in practical use, are founded on the false resemblance measures of the deflection basins understood as a resemblance of displacement measurement results at the loading axis or resemblance of a sum (or product) of displacement results under all geophones. It is easy to imagine two deflection basins with the same values at the loading axis, but related to completely different constructions – the examples (a and b) are presented on Fig. 3. The parameters of construction models corresponding with the exemplary basins are presented in Table 1, while Fig. 4 shows the adopted pavement construction model. Analogically, there is a chance that basins with the same displacement sums under all geophones may occur, but they would refer to utterly different constructions – the examples (c and d) are presented on Fig. 5. Table 2 contains the parameters of construction models corresponding with them. It is possible to make gross errors using any of these methods as a result of overlooking some construction changes which may appear on a tested road section. An intensive penetrating identification, i.e. increased number of boreholes, is recommended when using the above described methods aiming at establishing homogenous sections of pavement construction. It is also worth noting that any classical similarity measures such as the Manhattan length, i.e. so-called L_1 distance (2), or the Euclidean distance, i.e. so-called L_2 distance (3),

stosowane są chociażby przy identyfikacji modułów sprężystości warstw na podstawie pomierzonej czaszy przemieszczeń:

$$L_1 = \sum_{i=1}^n |v_i - u_i|, \quad (2)$$

$$L_2 = \sum_{i=1}^n (v_i - u_i)^2. \quad (3)$$

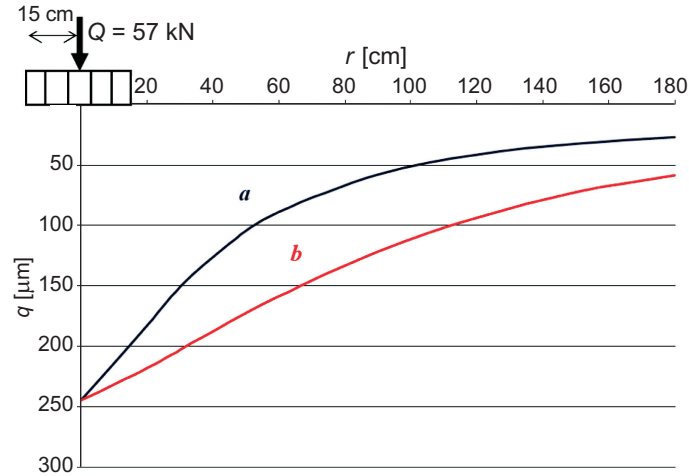


Fig. 3. Deflection basins of the same value at the loading axis, illustrating various constructions

Rys. 3. Czasze przemieszczeń o takiej samej wartości w osi obciążenia, obrazujące różne konstrukcje

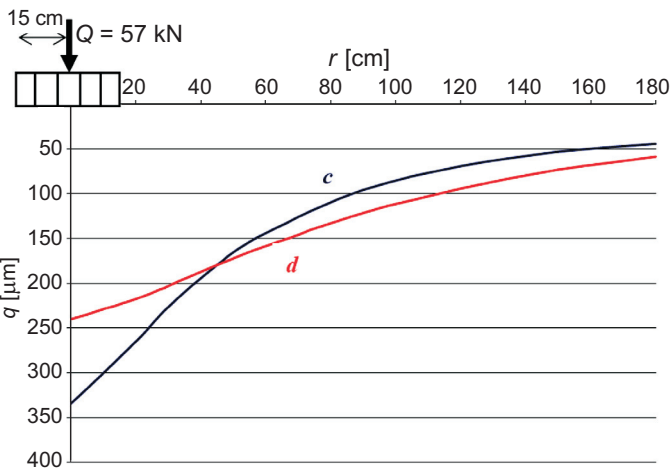


Fig. 5. Deflection basins of the same displacement sum under all geophones, representing different constructions

Rys. 5. Czasze przemieszczeń o takiej samej sumie przemieszczeń pod wszystkimi geofonami, obrazujące różne konstrukcje

cannot be applied when determining homogenous pavement sections, even though both are successfully employed for instance in case of the identification of elastic moduli of pavement layers derived from deflection basin measurements:

$$L_1 = \sum_{i=1}^n |v_i - u_i|, \quad (2)$$

$$L_2 = \sum_{i=1}^n (v_i - u_i)^2. \quad (3)$$

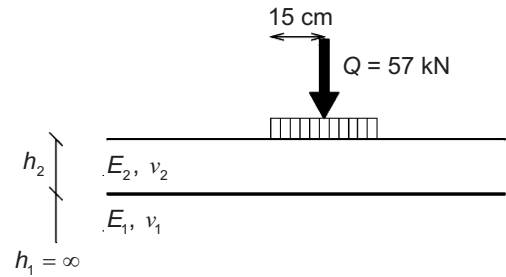


Fig. 4. Pavement construction model
Rys. 4. Model konstrukcji nawierzchni

Table 1. Parameters of pavement models corresponding with exemplary basins
Tablica 1. Parametry modeli konstrukcji odpowiadających przykładowym czaszom

Basin Czasza	Parameters of pavement model Parametry modelu konstrukcji ^{*)}			
	E_1 [MPa]	h_1 [cm]	E_2 [MPa]	h_2 [cm]
a	304	∞	3106	20
b	150	∞	13298	20

Remark / Uwaga
^{*)} marking as in Fig. 4 / oznaczenia jak na Rys. 4

Table 2. Parameters of pavement models corresponding with exemplary basins
Tablica 2. Parametry modeli konstrukcji odpowiadających przykładowym czaszom

Basin Czasza	Parameters of pavement model Parametry modelu konstrukcji ^{*)}			
	E_1 [MPa]	h_1 [cm]	E_2 [MPa]	h_2 [cm]
c	189	∞	3135	20
d	150	∞	13298	20

Remark / Uwaga
^{*)} marking as in Fig. 4 / oznaczenia jak na Rys. 4

Na Rys. 6 przedstawiono przykładowe czasy przemieszczeń o tych samych odległościach L_1, L_2 (o tym samym podobieństwie) między kolejnymi czaszami, co obrazować może systematyczną zmianę nośności konstrukcji bądź to przez zanikanie którejs z warstw, bądź też przykładowo na skutek różnego stopnia degradacji nawierzchni. Parametry modeli konstrukcji odpowiadających przykładowym czaszom zestawiono w Tabelcy 3. W takich przypadkach nie jest możliwe ustalenie jednorodnych odcinków nawierzchni, wykorzystując metodę sum skumulowanych różnic od wartości średniej L_1 bądź L_2 (na wykresie sum skumulowanych zostanie otrzymana parabola). Analogicznie, niemożliwe jest ustalenie odcinków jednorodnych o tej samej odległości czasz od dowolnie ustalonego wzorca (np. średniej ze wszystkich pomiarów) – na wykresie sum skumulowanych otrzymamy prostą poziomą $S_i = 0$ (1). W takim przypadku nawet przeoczenie zmiany typu konstrukcji na badanej drodze wydaje się bardzo prawdopodobne. Przykładowe czasy przemieszczeń o tych samych odległościach L_1, L_2 od wzorca, ale opisujące diametralnie inne konstrukcje, przedstawiono na Rys. 7, a parametry modeli konstrukcji im odpowiadających zestawiono w Tabelcy 4.

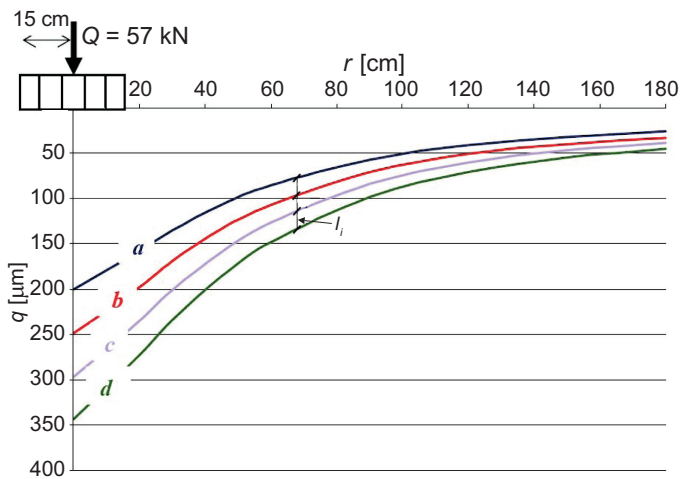


Fig. 6. Deflection basins of the same space l_i between subsequent basins

Rys. 6. Czasze przemieszczeń o takiej samej odległości l_i między kolejnymi czaszami

Fig. 6 presents the exemplary deflection basins with the same distances L_1, L_2 (with the same similarity) between subsequent basins, which might illustrate the systematic change in the bearing capacity of pavement due to either disappearance of one of layers or, for instance, because of different degree of the pavement deterioration. The parameters of structural models corresponding with exemplary basins are collected in Table 3. In such cases it is impossible to establish homogeneous pavement sections using the method of cumulative sums of differences from the mean value L_1 or L_2 (the graph of cumulative sums would present a parabola). Similarly, it is impossible to establish homogenous sections with the same distance of basins from an established pattern (e.g. the mean value of all measurement results). Consequently, the graph of cumulative sums would show a horizontal line $S_i = 0$ (1). In these circumstances even an oversight of the structural change on a tested road seems very possible. The exemplary deflection basins with the same distances L_1, L_2 from the pattern, but describing diametrically different structures, are shown on Fig. 7, while parameters of models corresponding with them are presented in Table 4.

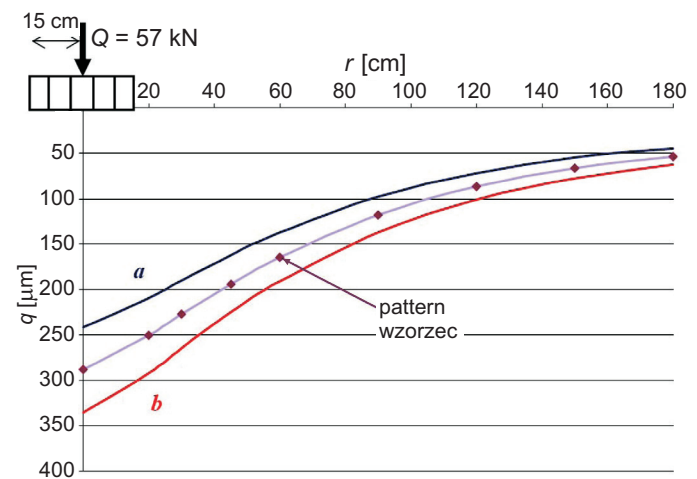


Fig. 7. Deflection basins a and b of the same distance from the reference pattern

Rys. 7. Czasze przemieszczeń a i b o takiej samej odległości od wzorca

Table 3. Parameters of construction models corresponding with deflection basins
 Tablica 3. Parametry modeli konstrukcji odpowiadających przykładowym czaszom

Basin Czasza	Parameters of construction model Parametry modelu konstrukcji ^{*)}			
	E_1 [MPa]	h_1 [cm]	E_2 [MPa]	h_2 [cm]
<i>a</i>	318	∞	5201	20
<i>b</i>	254	∞	4212	20
<i>c</i>	215	∞	3445	20
<i>d</i>	183	∞	3052	20
Remark / Uwaga *) marking as in Fig. 4 / oznaczenia jak na Rys. 4				

Table 4. Parameters of construction models corresponding with deflection basins
 Tablica 4. Parametry modeli konstrukcji odpowiadających przykładowym czaszom

Basin Czasza	Parameters of construction model Parametry modelu konstrukcji ^{*)}			
	E_1 [MPa]	h_1 [cm]	E_2 [MPa]	h_2 [cm]
<i>a</i>	189	∞	8097	20
pattern wzorzec	157	∞	7032	20
<i>b</i>	135	∞	5954	20
Remark / Uwaga *) marking as in Fig. 4 / oznaczenia jak na Rys. 4				

3. PROPONOWANY ALGORYTM IDENTYFIKACJI ODCINKÓW JEDNORODNYCH

Poniżej przedstawiono opracowany przez autorów algorytm identyfikacji jednorodnych odcinków nawierzchni na podstawie pomierzonych przemieszczeń pionowych konstrukcji, łączący elementy przedstawionych wcześniej metod. Algorytm ten opiera się na założeniu, że w pewnym stopniu znany jest kształt czaszy przemieszczeń - czasze modelować można z bardzo dużą dokładnością ($R^2 > 0,98$) za pomocą funkcji wykładniczej (spełniającej warunki brzegowe) o nieznanymi parametrach *a* i *b*:

$$q = a \cdot e^{b \cdot r}, \quad (4)$$

gdzie:

a, *b* – parametry funkcji wykładniczej zależne od wartości obciążenia oraz rodzaju i grubości konstrukcji.

Przykładowe, aproksymowane funkcją wykładniczą czasze przemieszczeń, pomierzone na nawierzchniach o zróżnicowanych konstrukcji, przedstawiono na Rys. 8. Do ustalenia parametrów *a* i *b* wystarczy znajomość co najmniej dwóch punktów leżących na krzywej opisanej zależnością (4). Sformułowano w związku z tym dwa warunki, które razem stanowią kryterium podobieństwa czasz przemieszczeń – czasze przemieszczeń *P* i *Z* są równoważne wtedy i tylko wtedy, gdy występuje zgodność przemieszczeń w osi obciążenia q_1 (I) oraz zgodność sumy (lub iloczynu) przemieszczeń zarejestrowanych pod wszystkimi geofonami lub zgodność różnicy między przemieszczeniami zarejestrowanymi na skrajnych geofonach (II):

3. SUGGESTED IDENTIFICATION ALGORITHM FOR HOMOGENOUS SECTIONS

Below an authorial identification algorithm for homogeneous sections based on measurement results of vertical structural displacements can be found. It combines some elements of the previously presented techniques. This algorithm is grounded on an assumption that the form of deflection basin is recognised to a considerable degree. Basins may be modelled with a very high accuracy ($R^2 > 0.98$) by means of the exponential function (meeting the boundary conditions) with unknown parameters *a* and *b*:

$$q = a \cdot e^{b \cdot r}, \quad (4)$$

where:

a, *b* – parameters of the exponential function depending on the loading value, type and thickness of the structure.

Fig. 8 presents some exemplary deflection basins based on measurement results of pavements with diversified structures approximated with the exponential function. Knowing at least two points lying on the curve described with the dependence (4) is sufficient to determine parameters *a* and *b*. Consequently, two conditions have been defined, which together constitute the similarity criterion for deflection basins: deflection basins *P* and *Z* are equivalent only if the displacement conformity appears at the loading axis q_1 (I) and compliance of the sum (or the product) of displacements registered under all geophones or conformity of difference between displacements registered appears on terminal geophones (II):

$$P = Z \Leftrightarrow \begin{cases} q_{1(P)} = q_{1(Q)}, & \text{(I)} \\ \sum_{i=1}^n q_{i(P)} = \sum_{i=1}^n q_{i(Q)} \vee \prod_{i=1}^n q_{i(P)} = \prod_{i=1}^n q_{i(Q)} \vee (q_{1(P)} - q_{n(P)}) = (q_{1(Q)} - q_{n(Q)}). & \text{(II)} \end{cases} \quad (5)$$

Są to warunki konieczne i zarazem dostateczne do wyznaczenia dwóch tożsamyh czasz przemieszczeń (o L_1 i $L_2 = 0$), a stosując metodę sum skumulowanych – do zidentyfikowania jednorodnych odcinków nawierzchni bez ryzyka popełnienia grubego błędu. Należy zaznaczyć, że spełnienie jednego z podanych warunków jest niewystarczające, co zilustrowano na przykładach przedstawionych na Rys. 3 i Rys. 5. Możliwe jest stosowanie alternatywnych warunków równoważności czasz w postaci zgodności przemieszczeń w dwóch różnych punktach, co również pozwala wyznaczyć unikalne parametry a i b funkcji wykładniczej (4). Jednak zaproponowany przez autorów warunek II lepiej kompensuje ewentualne rozrzuty wyników pomiarów na poszczególnych geofonach.

Both requirements constitute sufficient and sine qua non conditions for determining two identical deflection basins (with L_1 and $L_2 = 0$), and for identifying homogenous pavement sections – using the cumulative sum method with no risk of making a gross error. It should be emphasized that meeting only one of the given conditions will not be sufficient, what is illustrated using examples shown on Fig. 3 and Fig. 5. However, the application of alternative conditions is also possible for the basins equivalence in the form of displacement conformity at two different points, which also enables determining the unique parameters a and b of the exponential function (4). Nonetheless, the authorial condition II compensates better the potential scatter of measurement results on the individual geophones.

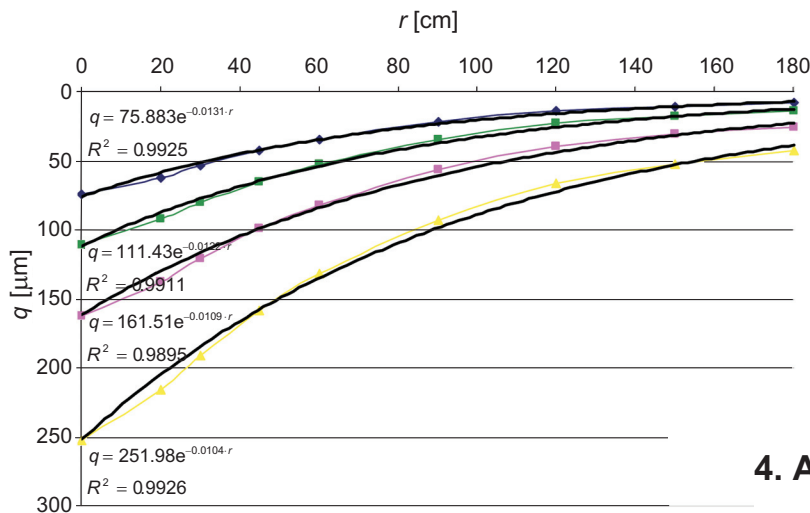


Fig. 8. Deflection basins approximated with the exponential function

Rys. 8. Czasze przemieszczeń aproksymowane funkcją wykładniczą

4. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Poniżej zaprezentowano przykład identyfikacji jednorodnych odcinków nawierzchni z wykorzystaniem opracowanej metody. Badania FWD przeprowadzono na odcinku nawierzchni lotniskowej długości 2,1 km o znanej i dokładnie zidentyfikowanej głębokości konstrukcji. Przekroje konstrukcyjne badanej nawierzchni przedstawiono na Rys. 9.

Pomiary przemieszczeń przeprowadzono w 51 punktach, co 50 m, przy użyciu 9 geofonów rozmieszczonych na długości 1,8 m. Dla wszystkich punktów pomiarowych

4. ANALYTICAL EXAMPLE

An example of identification of homogenous pavement sections by means of the elaborated technique can be found below. The FWD tests were carried out on an air-field stretch of 2.1 km with a thoroughly identified and penetrated structure. The structural cross-sections of the tested pavement are presented on Fig. 9.

The displacement measurements were taken at 51 points, every 50 m, with the use of 9 geophones arranged along the 1.8 m length. The displacement sums for all measurement points under nine geophones, and differences between the central geophone q_1 and geophone q_9 were calculated. The determined sums (the criterion condition II) and differences (the alternative criterion condition II), as well as displacements under geophone q_1 (the criterion

obliczono sumy przemieszczeń pod dziewięcioma geofonami oraz różnice między przemieszczeniami pomierzonymi pod geofonem centralnym q_1 i geofonem q_9 . Obliczone sumy (warunek II kryterium) i różnice (alternatywny warunek II kryterium) wraz z przemieszczeniami pod geofonem q_1 (warunek I kryterium) przedstawiono w postaci wykresu sum skumulowanych (1) na Rys. 10. Zgodnie z opracowaną metodą podstawą identyfikacji jednorodnych odcinków nawierzchni była zgodność dwóch warunków jednocześnie według (5). Warto jednak zauważyć, że przemieszczenia pomierzone bezpośrednio pod płytą naciskową (w osi obciążenia – q_1) charakteryzują się największym względnym rozrzutem wyników, rozumianym jako stosunek odchylenia standardowego s_q do średniej q_{sr} , uzyskanych na danym geofonie [9]. Niezasadne zatem może być ustalanie odcinków jednorodnych na podstawie najmniej „pewnego” pomiaru. Względne rozrzuty wyników w zależności od odległości geofonu od osi obciążenia, dla dwóch przykładowych zestawów wyników, przedstawiono na Rys. 11. W przypadku dużych rozrzutów wyników pomiarów przemieszczeń bezpośrednio w osi obciążenia q_1 prawdopodobne jest zidentyfikowanie dodatkowych (błędnych) odcinków jednorodnych na skutek występowania dodatkowych załamań na wykresach sum skumulowanych. Zaleca się w takich przypadkach podstawianie w warunkach I i II (5) przemieszczeń pod kolejnym, najbliższym osi obciążenia geofonem q_2 , zamiast q_1 .

condition I), are shown on Fig.10 in the form of a graph of cumulative sums (1). According to the developed method the simultaneous conformity of two conditions (5) formed the basis for identification of homogenous sections. However, it is worth mentioning that displacements measured directly under the pressure plate (at the loading axis – q_1) are distinguished by the highest relative scatter of results, defined as the ratio of the standard deviation s_q to the mean of results q_m , obtained from a given geophone [9]. Therefore, establishing homogenous sections basing on the least “reliable” measurement might be unjustified. Relative scatters of results depending on the distance between a geophone and the loading axis for two exemplary combinations of results are presented on Fig. 11. It is probable to identify additional (incorrect) homogenous sections due to the development of additional refractions on the cumulative sum graphs in case of significant scatters of displacement measurement results directly at the loading axis q_1 . In such cases it is recommended to provide under the subsequent and nearest to the loading axis geophone q_2 , instead of q_1 , in conditions I and II (5) of displacement results.

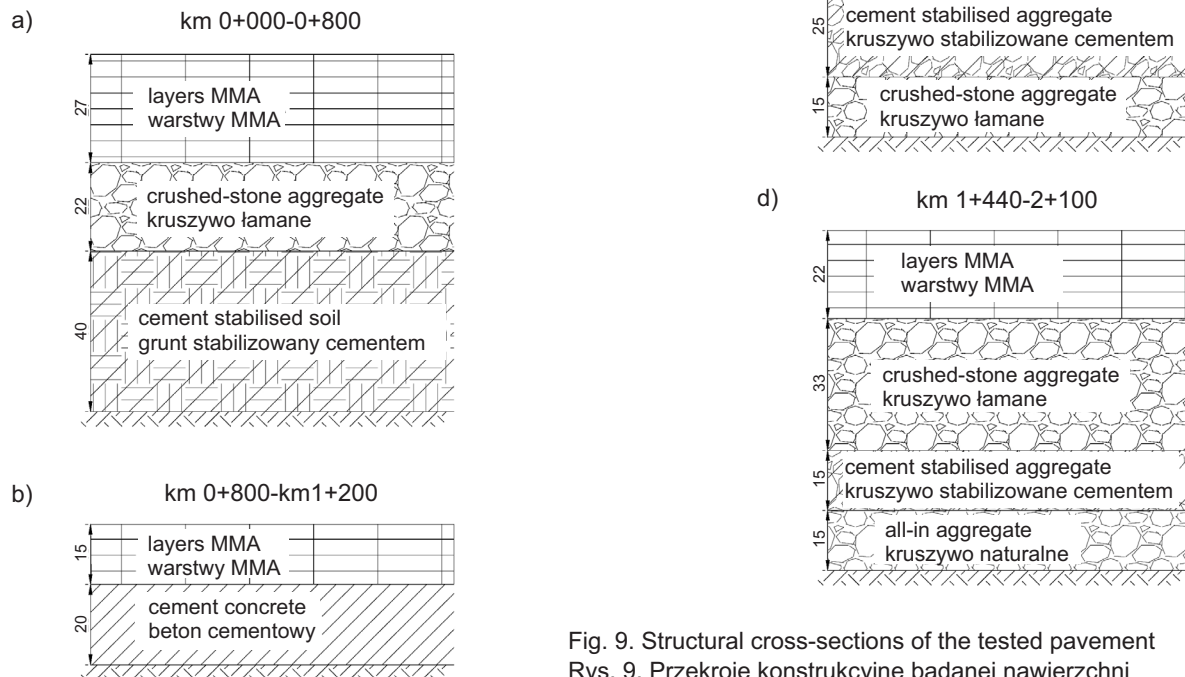


Fig. 9. Structural cross-sections of the tested pavement
 Rys. 9. Przekroje konstrukcyjne badanej nawierzchni

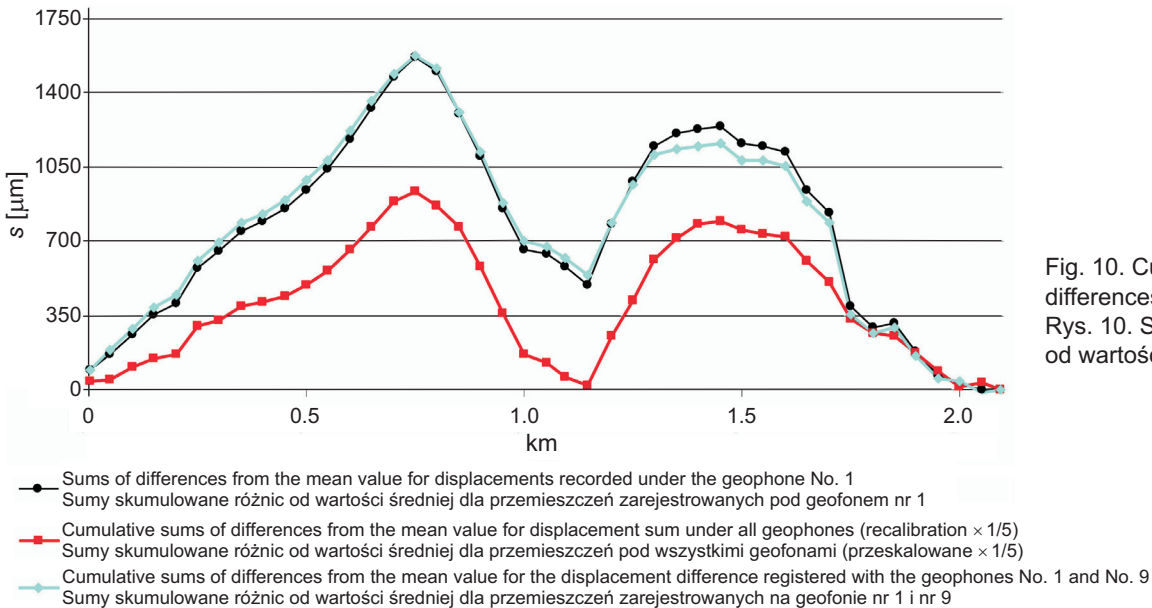


Fig. 10. Cumulative sums of differences from the mean value
Rys. 10. Sumy skumulowane różnic od wartości średniej

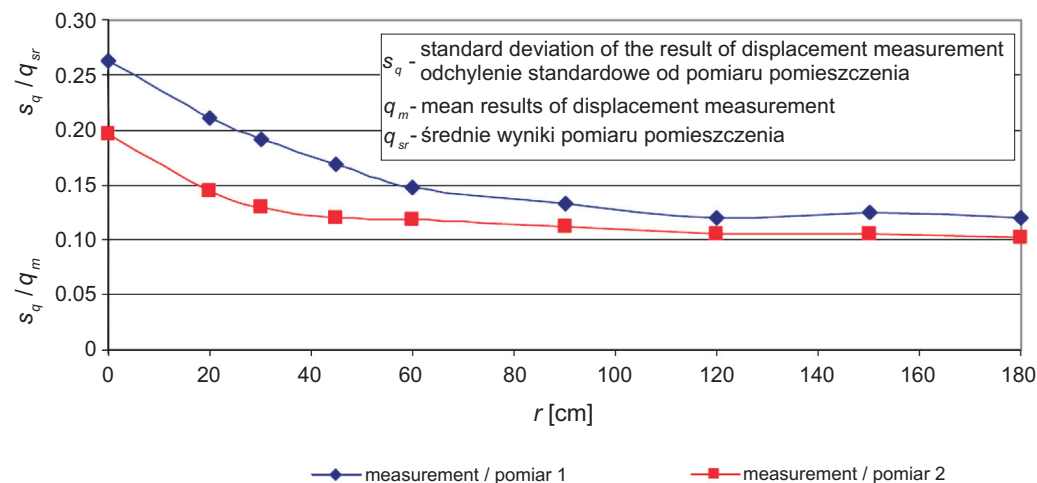


Fig. 11. Exemplary relative spreads of measurement results of vertical construction displacements, depending on the distance from the loading axis (of the pressure plate), for two independent measurements
Rys. 11. Przykładowe względne rozrzuty wyników pomiarów przemieszczeń pionowych konstrukcji, w zależności od odległości od osi obciążenia (płyty naciskowej), dla dwóch niezależnych pomiarów

Opisany powyżej problem dobrze ilustruje inny jeszcze przykład odcinka drogi krajowej – wykresy sum skumulowanych, liczonych na podstawie (1), w przypadku przemieszczeń zarejestrowanych w osi obciążenia oraz sumy przemieszczeń zarejestrowanych pod wszystkimi geofonami, przedstawiono na Rys. 12. Pionowymi kreskami oddzielono odcinki jednorodnego. Widać wyraźnie, że wykres sum skumulowanych przemieszczeń w osi obciążenia jest znacznie bardziej „postrzępiony”. Wykres sum skumulowanych dla sum przemieszczeń zarejestrowanych pod wszystkimi geofonami jest bardziej „gładki”, gdyż w tym przypadku znaczne rozrzuty przemieszczeń zarejestrowanych w osi obciążenia mają mniejszy wpływ. Rzutuje to na

The above described problem is also clearly illustrated on Fig. 12, which shows one more example of cumulative sum charts of a national road section calculated on the basis (1) for displacements registered at the loading axis and for displacement sums registered under all geophones. The homogenous sections are separated with vertical lines. It can be clearly seen that the graph of cumulative sums at the loading axis is much more “ragged”. The graph of cumulative sums for displacement sums registered under all geophones is “smooth” because of a weaker impact of significant displacement scatters registered at the loading axis. It had an effect on a division of the tested pavement into homogenous sections: eight of

podział badanej nawierzchni na odcinki jednorodne: w pierwszym przypadku zidentyfikowano ich 8, a w drugim tylko 5.

they were identified in the first instance, and only five in the second one.

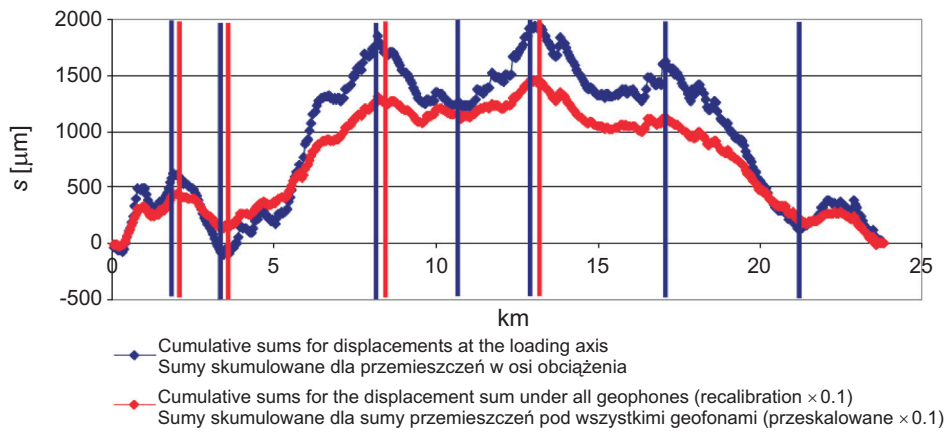


Fig. 12. Exemplary division diagram of the tested pavement into homogenous sections
Rys. 12. Przykładowy schemat podziału nawierzchni na odcinki jednorodne

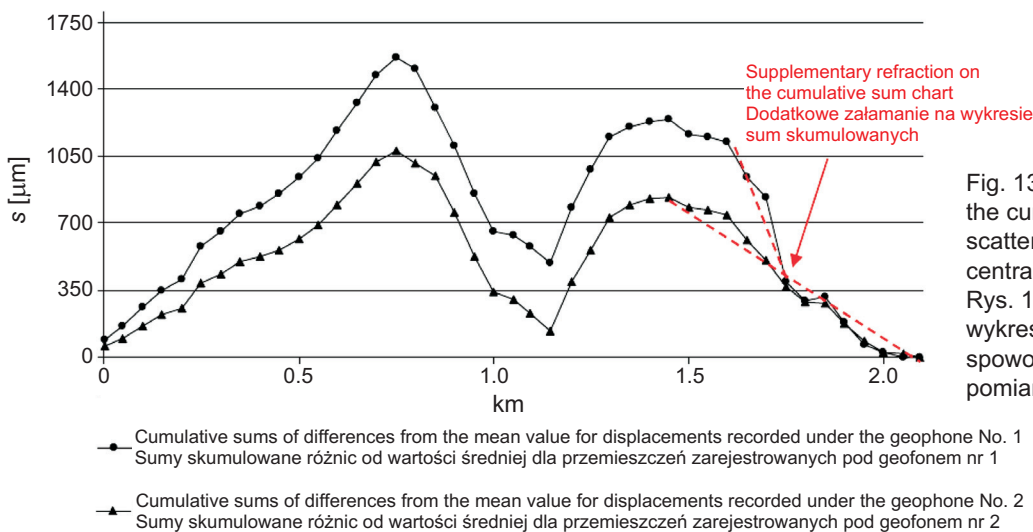


Fig. 13. Additional (incorrect) refraction of the cumulative sum graph caused by the scatter of measurement results under the central geophone
Rys. 13. Dodatkowe (błędne) załamanie wykresu sum skumulowanych spowodowane rozrzutami wyników pomiarów pod centralnym geofonem

W analizowanym przykładzie nawierzchni lotniskowej rozrzuty wyników pomiarów pod centralnym geofonem q_1 skutkują jednym dodatkowym załamaniem na wykresie sum skumulowanych (Rys. 13) względem wykresu tychże sum sporządzonego na podstawie wyników pomiarów pod geofonem q_2 . W związku z tym, w warunkach I i II, jako alternatywę dla przemieszczeń w osi obciążenia przyjęto przemieszczenia pod kolejnym, najbliższym osi obciążenia geofonem q_2 . Końcowy rezultat procesu identyfikacji odcinków jednorodnych na badanej nawierzchni przedstawiono na Rys. 14. Pionowymi kreskami oddzielono odcinki jednorodne według wcześniejszej głębszej identyfikacji. Jako że załamania wszystkich trzech wykresów sum skumulowanych wskazują te same miejsca

In the analysed example of the airfield pavement, the measurement scatters under the central geophone q_1 resulted in an additional refraction on the graph of cumulative sums (Fig. 13) regarding the graph of cumulative sums based on measurement results under the geophone q_2 . That is why displacements under the geophone q_2 as the subsequent and nearest to the loading axis were adopted in conditions I and II as an alternative to displacements at the loading axis. The final result of the identification process of homogenous sections on the tested pavement is shown on Fig. 14. The homogenous sections are separated with vertical lines according to the previous penetrating identification. The criterion (5) is satisfied since refractions of cumulative sums of all three

zmiany konstrukcji nawierzchni, spełnione jest kryterium (5) i tym samym wyznaczone odcinki można uznać za jednorodne. Co więcej, załamania wykresów sum skumulowanych dokładnie pokrywają się z granicami konstrukcji wyznaczonymi na podstawie wcześniejszej identyfikacji głębszej, co dowodzi poprawności opracowanej metody. Warto również zauważyć, że metoda nie wykazała dodatkowych podziałów na odcinki jednorodne w obrębie jednej konstrukcji (według Rys. 9), co świadczy o jednakowym stanie technicznym (stanie degradacji) nawierzchni w obrębie tej samej konstrukcji.

graphs indicate the same spots of pavement structure change, thereby the determined sections may be fully recognised as homogenous. Moreover, refractions of cumulative sum graphs coincide exactly with structural limits determined on the basis of the previous penetrating identification, which proves the correctness of the developed method. It is also worth noting that the method has not revealed additional divisions within one structure (according to Fig. 9). This proves the identical technical state (the state of degradation) of the pavement inside the structure limits.

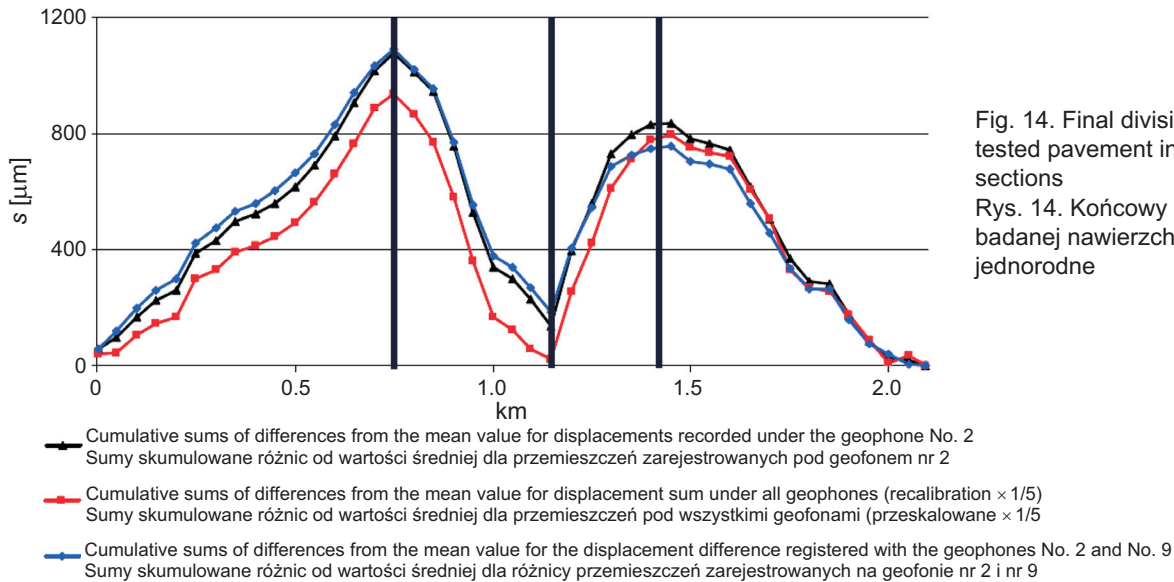


Fig. 14. Final division diagram of the tested pavement into homogenous sections

Rys. 14. Końcowy schemat podziału badanej nawierzchni na odcinki jednorodne

5. WNIOSKI

W artykule przedstawiono prostą i efektywną metodę identyfikacji odcinków jednorodnych na podstawie pomiarów przemieszczeń pionowych ugięciomierzem FWD. Przeanalizowano powszechnie stosowane algorytmy identyfikacji, wykazano ich ograniczenia i opracowano oparte na podstawowych właściwościach funkcji wykładniczej kryteria pozwalające na jednoznaczną identyfikację jednorodnych odcinków konstrukcji nawierzchni. Skuteczność opracowanej metody zweryfikowano na rzeczywistym odcinku nawierzchni o czterech zróżnicowanych konstrukcjach. Należy jednak pamiętać, że ostateczne ustalenie odcinków jednorodnych powinno nastąpić dopiero po identyfikacji modułów warstw i podłoża, a zaproponowana metoda może służyć do wstępnej identyfikacji odcinków jednorodnych, jak również do wskazania liczby odwiertów, jakie należy wykonać w konstrukcji nawierzchni, w zależności od ilości i długości odcinków jednorodnych.

5. CONCLUSIONS

Establishing homogenous construction sections is regarded as a fundamental issue of the pavement diagnosis. Both simple and effective identification method for homogenous sections based on vertical displacements with the FWD testing device was described in this article. First, the commonly applied identification algorithms were analysed and their limitations were pointed out. Second, the criteria based on basic properties of the exponential function enabling reliable identification of homogenous pavement construction sections were established. Third, the effectiveness of the developed method was proven on an actual pavement section with four various designs. However, it should be reminded that the final designation of homogenous sections ought to be followed by modulus identification of the suitable layers and subgrade. The proposed method could serve for the initial identification of homogenous sections, as well as for the indication of the

INFORMACJE DODATKOWE

Badania zostały wykonane w ramach realizacji projektu „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju”, współfinansowanego przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Page E.S.*: Continuous Inspection Scheme. *Biometrika*, **41**, 1-2, 1954, 100-115
- [2] *Bennett Ch. R.*: Sectioning of Road Data for Pavement Management. Proceedings of the 6th International Conference on Managing Pavements, Queensland, 2004
- [3] Guide for Design of Pavement Structures (4th Edition). AASHTO, 1993
- [4] *Fridtjof T.*: Generating homogeneous road sections based on surface measurements: available methods. Proceedings of the 2nd European Pavement and Asset Management Conference, Berlin, 2004
- [5] *Mechowski T.*: Wpływ dokładności identyfikacji konstrukcji nawierzchni na wymiarowanie wzmocnienia dróg. IBDiM, Warszawa, 2006
- [6] Use of Falling Weight Deflectometers in Pavement Evaluation. European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research COST 336, 2005
- [7] Guidance Notes on Backcalculation of Layer Moduli and Estimation of Residual Life Using Falling Weight Deflectometer Test Data. Highways Department Research & Development Division, Hong Kong, 2009
- [8] *Emery S., Horak E.*: Falling Weight Deflectometer Bowl Parameters As Analysis Tool for Pavement Structural Evaluations. Proceedings of 22nd ARRB Conference, Canberra, 2006
- [9] *Szydło A., Krawczyk B., Ruttmar I.*: Rozrzuty wyników pomiarów przemieszczeń nawierzchni rejestrowanych za pomocą ugięciomierza dynamicznego FWD. Międzynarodowa Konferencja Nowoczesne Technologie w Budownictwie Drogowym, Poznań, 2009

number of exploratory boreholes which should be drilled in a pavement structure depending on the number and length of homogenous sections.

ACKNOWLEDGEMENT

Scientific research has been carried out as a part of the Project “Innovative recourses and effective methods of safety improvement and durability of buildings and transport infrastructure in the sustainable development” financed by the European Union from the European Fund of Regional Development based on the Operational Program of the Innovative Economy.