

mgr inż. Krzysztof Kamiński¹⁾

ORCID: 0009-0001-9639-511X

dr inż. Konrad Walotek¹⁾

ORCID: 0000-0001-5170-6941

dr inż. Marcin Grygierek^{1*)}

ORCID: 0000-0002-2969-7054

prof. dr hab. inż. Joanna Bzówka¹⁾

ORCID: 0000-0002-1765-7354

Analysis of unbound aggregate test results using Digital Image Correlation

Analiza wyników badań niezwiązanej kruszywa z wykorzystaniem cyfrowej korelacji obrazu

DOI: 10.15199/33.2025.08.06

Abstract. Digital Image Correlation (DIC) is mainly used for testing compact surfaces and rarely used in testing unbound materials, such as materials for road bases. Testing unbound mixtures requires the use of a special stand that ensures the achievement of the appropriate shape of the unbound material being tested. For this purpose, a box with a transparent partition is required. The obtained observation results confirm the possibility of using DIC also for observing fragmented media.

Keywords: road materials tests; displacement measurements; Digital Image Correlation (DIC).

Streszczenie. Cyfrowa korelacja obrazu (DIC) jest wykorzystywana przede wszystkim w warunkach laboratoryjnych do badania powierzchni jednolitych materiałów. DIC rzadko stosuje się w badaniach materiałów niezwiązanych (MN), które wymagają zastosowania specjalnego stanowiska, zapewniającego odpowiedni kształt próbki. W tym celu wymagane jest zastosowanie skrzyni o przezroczystej ścianie. Wyniki badań potwierdzają możliwość wykorzystania DIC do obserwacji ośrodków rozdrobionych i wykorzystania ich do zaawansowanych analiz.

Słowa kluczowe: badania materiałów drogowych; pomiary przemieszczeń pionowych; cyfrowa korelacja obrazu.

The Digital Image Correlation finds application in research in many branches of industry. The use of the DIC allows for drawing up a map of displacements and deformations of a surface being observed. Access to such detailed data concerning the displacements and deformations of a surface being observed provides the opportunities for the advanced analyses of the phenomena occurring in a sample being researched or in a structural element. An instance of the analyses of this type is the assessment of the mechanism of a damage suffered by a sample made of a bound mixture, composed of the following materials: unburnt coal mining slag, fly ash, rubber granulate and cement [1]. The Digital Image Correlation is principally applied in laboratory research into samples, being elements having continuous and homogeneous surfaces [2]. It is possible to differentiate between the measurements of drilled cores of road surfaces or building structures here [3]. It is possible as well to include, into this group of research, the measurements of the deformations of geosynthetics under load [2]. A particular instance of the application of the DIC for the measurement of homogeneous surfaces are the field measurements of the displacements of a road surface [4]. Less frequently is this technique applied in research into unbound granular materials having a non-homogeneous structure of a surface being observed. However, it is worth recommending the successful application of this method for the measurement of displacements and deformations of disintegrated environments [5]. These are most frequently observations performed on models in a laboratory scale the objective of which is to assess the deformation of a roadbed (reinforced or not)

Cyfrowa korelacja obrazu (*Digital Image Correlations* – DIC) znajduje zastosowanie w badaniach, w wielu gałęziach przemysłu. Umożliwia ona wyznaczenie mapy przemieszczeń i odkształceń obserwowanej powierzchni. Dostęp do tak szczegółowych danych o przemieszczeniach i odkształceniach obserwowanej powierzchni umożliwia przeprowadzenie zaawansowanych analiz zjawisk zachodzących w badanej próbce, czy elemencie konstrukcyjnym. Przykładem tego typu analiz jest ocena mechanizmu zniszczenia próbki wykonanej z mieszanki związanej, składającej się z nieprzepracowanego łupka przywęgłowego, popiołu lotnego, granulatu gumowego oraz cementu [1]. Cyfrowa korelacja obrazu wykorzystywana jest najczęściej w laboratoryjnych badaniach elementów o ciągłej, jednolitej powierzchni [2], takich jak np. odwiercone rdzenie z nawierzchni drogowych [2] lub konstrukcji budowlanych [3]. Do tej grupy badań można również zaliczyć pomiary deformacji geosyntetyków pod obciążeniem [2]. Szczególnym przykładem zastosowania DIC są terenowe pomiary przemieszczeń powierzchni nawierzchni drogowej [4]. Rzadziej technika ta wykorzystywana jest w badaniach niezwiązanych materiałów ziarnistych o niejednolitej budowie powierzchni. Warto jednak wskazać na udane aplikacje tej metody do pomiaru przemieszczeń i odkształceń ośrodków rozdrobionych [5]. Są to najczęściej obserwacje wykonywane na modelach w skali laboratoryjnej, których celem jest ocena: deformacji podłoża z/lub bez wzmocnienia pod obciążeniem [6, 7]; deformacji podłoża o różnych warstwach gruntu pod obciążeniem [8]; posadowienia budynku w warunkach dynamicznych oddziaływań [9]; deformacji podłoża w obszarze zapadlisk [10]; oceny stateczności skarpy nasypu [11, 12]. W badaniach modelowych podejmowane

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

^{*)} Correspondence address: marcin.grygierek@polsl.pl

under load [6,7], the deformations of a roadbed having different ground layers under load [8], the foundation of a building in the conditions of dynamic impacts [9], the deformations of roadbed in the area of subsidences [10], the assessment of the stability of an embankment slope [11,12]. In model research, there are even attempts to simulate mobile loads, i.e., caused by a railway [13] or wheeled carriage [11]. A certain kind of inconvenience in conducting the DIC observations is the necessity of acquiring an appropriate contrast of an environment being observed, therefore, it is frequent to apply in research the colouring particular grains of the environment being researched. In the observations of the models of unbound materials, an additional problem applied by the occurrence of larger deformations than those seen in the case of samples having a homogeneous structure and homogeneous surface is encountered. Mixtures composed of aggregates (natural or artificial) having different fractions display a lower level of rigidity, which, while they are under load, results in larger displacements. Additionally, attention should be paid to a higher level of porosity on a surface being observed, which results in certain losses suffered by the maps of displacements and deformations of a non-homogeneous structures being observed.

In the paper, experiences from the measurement of displacements and deformations with the application of the DIC method acquired in the course of applying a load to a layer of a mixture of a natural aggregate (an unbound mixture) at a model station is presented. The objective of the research was to test the usefulness of the DIC system for the measurement of the deformations of layer made of an unbound aggregate, to illustrate the differences in the image of the surface of an unbound aggregate, and also the surfaces of cubes cut out of a rock of the same origin. The preliminary analyses of the results were conducted with the application of calculations performed with the application of the finite element method, and also analytical formulas for estimating foundation settlements.

Preliminary research

The objective of the preliminary research was to record so-called referential surfaces for a few typical samples. To this end, the following were applied (Photo 1): a) a cube made of rubber with a painting coating on, b) a granite stone cube, c) a mixture of an unbound aggregate (0/2) made of a crushed granite (sand), d) a mixture of an unbound aggregate (0/16) of a crushed granite with a low level of density (pilot research), e) a mixture of an unbound

sample even the simulation of mobile loads, i.e., from a vehicle [13], or a wheel [11]. A certain kind of inconvenience in conducting the DIC observations is the necessity of acquiring an appropriate contrast of an environment being observed, therefore, it is frequent to apply in research the colouring particular grains of the environment being researched. In the observations of the models of unbound materials, an additional problem applied by the occurrence of larger deformations than those seen in the case of samples having a homogeneous structure and homogeneous surface is encountered. Mixtures composed of aggregates (natural or artificial) having different fractions display a lower level of rigidity, which, while they are under load, results in larger displacements. Additionally, attention should be paid to a higher level of porosity on a surface being observed, which results in certain losses suffered by the maps of displacements and deformations of a non-homogeneous structures being observed.

In the article, experiences from the measurement of displacements and deformations with the application of the DIC method acquired in the course of applying a load to a layer of a mixture of a natural aggregate (an unbound mixture) at a model station is presented. The objective of the research was to test the usefulness of the DIC system for the measurement of the deformations of layer made of an unbound aggregate, to illustrate the differences in the image of the surface of an unbound aggregate, and also the surfaces of cubes cut out of a rock of the same origin. The preliminary analyses of the results were conducted with the application of calculations performed with the application of the finite element method, and also analytical formulas for estimating foundation settlements.

Badania wstępne

Celem badań wstępnych była rejestracja tzw. powierzchni referencyjnych kilku charakterystycznych próbek. W tym celu wykorzystano (fotografia 1): a) kostkę wykonaną z gumy z naniesioną powłoką malarską; b) granitową kostkę kamienną; c) mieszaninę z niezwiązanego kruszywa 0/2 z przekruszonego granitu (piasek); d) mieszaninę z niezwiązanego kruszywa 0/16 z przekruszonego granitu o słabym zagęszczeniu (badanie pilotażowe); e) mieszaninę z niezwiązanego kruszywa 0/16 z przekruszonego granitu (badanie zasadnicze). Próbkę wykonaną z mieszaniny z niezwiązanego kruszywa były obserwowane w skrzynce z jedną przezroczystą ścianką.

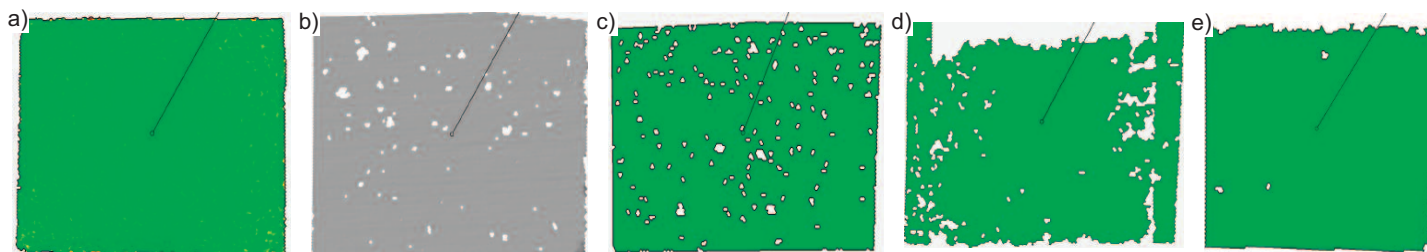


Photo 1. Reference images of individual samples prepared for testing with the use of DIC system: a) rubber cube; b) granite stone cube; c) unbounded aggregate 0/2; d) unbounded aggregate 0/16 (preliminary research); e) unbounded aggregate 0/16 (principal research)

Fot. 1. Obrazy referencyjne poszczególnych próbek przeznaczonych do badań za pomocą systemu DIC: a) kostka gumowa; b) granitowa kostka kamienna; c) mieszanina z niezwiązanego kruszywa 0/2; d) mieszanina z niezwiązanego kruszywa 0/16 (badanie pilotażowe); e) mieszanina z niezwiązanego kruszywa 0/16 (badanie zasadnicze)

aggregate (0/16) of a crushed granite (fundamental research). The samples made of a mixture of an unbound aggregate were being observed in a box with a single transparent wall.

Recording the referential surface by the DIC system takes place before the process of applying a load to a sample, however each next recorded image is compared with the referential one. The difference between the locations of areas containing $n \times n$ pixels, referred to as subsets, which are tracked by the DIC system, is applied to determine the field of displacements, and also the field of the deformations of a surface being observed. In connection with that, it should be emphasized that the quality of the referential image determines the precision of results at the subsequent stages of research. The recorded referential images for various structures of materials (Photo 1) indicate that the applied materials have been displaying certain imperfections of a surface being observed as soon as at the beginning of research. The highest quality of data is typical in the case of a rubber cube having a continuous surface and a spot structure obtained owing to a painting coating (Photo 1a). Each of the remaining surfaces (Photo 1b-e) indicates inferior, in terms of referential image than that of a rubber cube (1a). Deteriorating the quality of a referential image resulted, first and foremost, from the porosity of the surface; it is particularly visible on a sample (d), which was constituted by a layer of a low-density unbound aggregate (0/16). To a smaller degree, influence on the quality of an image was exerted by colour contrast typical in the case of a granite rock. This fact is proved by obtaining a good quality of a surface for the sample (e), which, in comparison with another sample (d), was made of the same material, but with a controlled increase in density. Deteriorating the image of the samples were presented with the application of a proportion of the loss surface expressed in per cent (the absence of an „assigned” colour) to the surface calculated on the basis of geometrical dimensions (Table 1).

Table 1. The samples and the analyzed surfaces

Tabela 1. Próbkę i analizowane powierzchnie

No sample according to photo 1/Próbka wg fotografii 1	Lost surface [cm ²]/ Powierzchnia utracona [cm ²]	Calculational surface [cm ²]/Powierzchnia obliczeniowa [cm ²]	Proportion of the lost surface and the calculational surface [%]/ Stosunek powierzchni utraconej do obliczeniowej [%]
Rubber cube (a)/Kostka gumowa (a)	0,00	175,42	0
Granite stone cube (b)/Kostka kamienna (b)	3,75	173,88	2,16
Unbounded aggregate 0/2 (c)/Mieszanka niezwiązana 0/2 (c)	8,66	155,97	5,55
Unbounded aggregate 0/16 (preliminary research) (d)/Mieszanka niezwiązana 0/16 – badanie pilotażowe (d)	8,54	124,69	6,85
Unbounded aggregate 0/16 (principal research) (e)/Mieszanka niezwiązana 0/16 – badanie zasadnicze (e)	0,21	189,17	0,11

Laboratory research stand

In research, an unbound mixture made of granite was applied. The origin of the aggregate was important due to the need to achieve appropriate colour contrast. The application of granite allowed for avoiding the necessity of colouring particular grains of an aggregate. granulation index amounted to $U = 24$, and that of granulation curve $C_c = 2.042$ (Figure 1, Photo 2), which indicates a possibility of substantial increase in density of the material being researched. Research into a granite aggregate was performed at a laboratory station (Photo 3).

Rejestracja powierzchni referencyjnej przez system DIC ma miejsce przed procesem obciążania próbki, natomiast podczas obciążania, każdy kolejny zarejestrowany obraz odnoszony jest do obrazu referencyjnego. Różnica położenia obszarów zawierających $n \times n$ pikseli zwanych subsetami, które śledzi system DIC, wykorzystywana jest do ustalenia pola przemieszczeń oraz pola odkształceń obserwowanej powierzchni. W związku z tym, należy podkreślić, że jakość obrazu referencyjnego determinuje szczegółowość wyników w kolejnych etapach badania. Zarejestrowane obrazy referencyjne różnych struktur materiałów (fotografia 1), wskazują, że już na początku badań wykazują one pewne niedoskonałości obserwowanej powierzchni. Najlepszą jakością danych charakteryzuje się gumowa kostka o ciągłej jednolitej powierzchni i strukturze plamkowej uzyskanej dzięki powłoce malarzkiej (fotografia 1a). Każda z pozostałych powierzchni (fotografia 1b-e) wykazuje gorszy obraz referencyjny od kostki gumowej (1a). Pogorszenie jakości obrazu referencyjnego wynikało przede wszystkim z porowatości powierzchni. Szczególnie jest to widoczne na próbce (d), którą stanowiła warstwa słabo zagęszczonego niezwiązanego kruszywa 0/16. W mniejszym stopniu wpływ na jakość obrazu miał kontrast barw, jakim cechuje się skała granitowa. Świadczy o tym uzyskanie dobrej jakości powierzchni próbki (e), która w porównaniu z próbką (d) była wykonana z tego samego materiału, ale z kontrolowanym zagęszczeniem. Pogorszenie obrazu próbek przedstawiono za pomocą procentowego stosunku powierzchni utraconej (brak „przypisanego” koloru) do powierzchni obliczonej na podstawie wymiarów geometrycznych (tabela 1).

Stanowisko do badań laboratoryjnych

W badaniach wykorzystano mieszankę niezwiązaną wykonaną z granitu. Pochodzenie kruszywa miało znaczenie ze względu na konieczność uzyskania odpowiedniego kontrastu barw. Zastosowanie granitu pozwoliło na uniknięcie konieczności barwienia pojedynczych ziaren kruszywa. Wskaźnik jednorodności uziarnienia wynosił $U = 24$, a wskaźnik krzywizny uziarnienia $C_c = 2,042$ (rysunek 1, fotografia 2), co wskazuje na dobrą zagęszczalność badanego materiału. Badania kruszywa granitowego wykonano na stanowisku laboratoryjnym (fotografia 3).

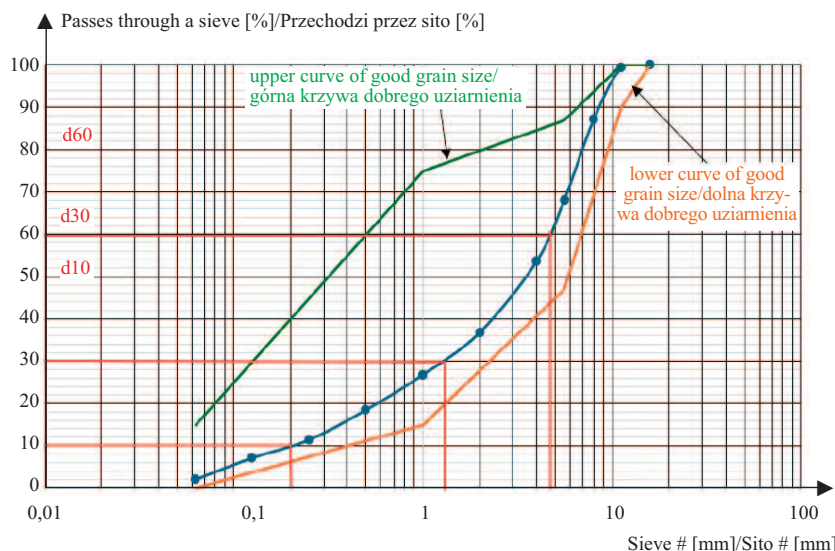


Fig. 1. The grading curve of the aggregate used for testing on the background of good grading curves for the improved subgrade layer according to [14]

Rys. 1. Krzywa przesiewu kruszywa zastosowanego do badań na tle krzywych dobrego uziarnienia warstwy ulepszonego podłoża wg [14]



Photo 2. Granite aggregate 0/31.5 after sieve analysis

*Photo M. Grygierek
Fot. 2. Kruszywo granitowe 0/31.5 po wykonaniu badania uziarnienia Fot. M. Grygierek*

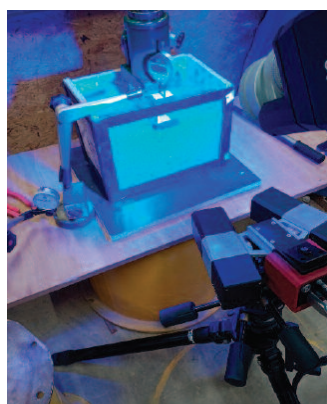
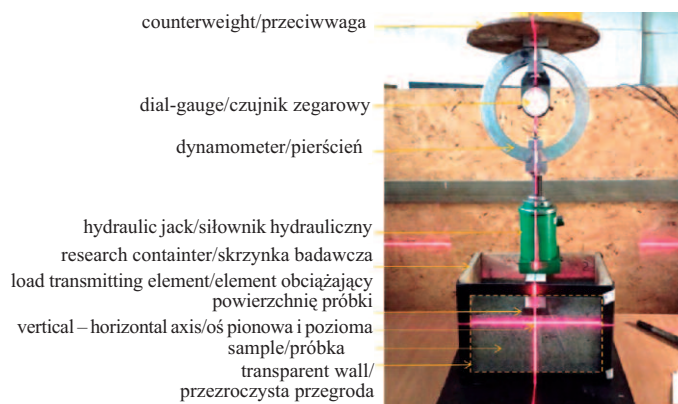


Photo 3. The research stand

Fot. 3. Stanowisko badawcze

Photo: K. Walotek

Fot. K. Walotek

The mixture being researched was placed in a rectangular box, one the walls of which was a 8-mm thick pane. The sample was made by increasing the density of subsequent layers and, simultaneously, controlling the evenness of the surface of each layer. The internal dimensions of the sample being researched amounted to (after increasing its density): length 35 cm, width 18 cm, height 12 cm (three layers 4 cm each). After increasing the density of an unbound mixture, mounting the elements of a station on which a load was to be applied of the sample was commenced. The load arrangement applied in research (Photo 3) consisted of:

- counterweight;
- ring, and also a load level sensor;
- hydraulic servomotor with the application of which a load was applied to the sample;
- element transferring the load on the surface of a layer being researched, having a rectangular base (namely, a steel channel having the dimensions of 45 x 80 and a wall thickness of 6 mm).

The scheme of applying load to the sample followed the field research with the application of a static VSS board. Applying a load to the sample was conducted in two loading cycles,

Badaną mieszkankę zabudowano w prostopadłościenniej skrzyni, w której jedna ze ścian była wykonana z szyby o grubości 8 mm. Próbkę wykonano przez zagęszczenie trzech kolejnych warstw z jednoczesnym kontrolowaniem równości powierzchni każdej z nich. Wymiary wewnętrzne badanej próbki wynosiły po zagęszczeniu: długość 35 cm; szerokość 8 cm; wysokość 12 cm (trzy warstwy po 4 cm). Po zagęszczeniu mieszkanki niezwiązanej przystąpiono do montażu elementów stanowiska służącego do obciążenia próbki. Układ obciążenia zastosowany do badań (fotografia 3), składał się z:

- przeciwwagi;
- pierścienia oraz czujnika do kontroli obciążenia układu;
- siłownika hydraulicznego, za pomocą którego do próbki przykładano obciążenie;
- elementu, przekazującego obciążenie na powierzchnię badanej warstwy, o podstawie prostokątnej (stalowy ceownik o wymiarach 45 x 80 i grubości ścianki 6 mm).

Schemat obciążenia próbki był wzorowany na terenowym badaniu statyczną płytą VSS. Obciążenie próbki prowadzono w dwóch cyklach – pierwotnym i wtórnym. Próbkę obciąż-

secondary and primary. The load applied to the sample started from the value of 0 kPa, to be increased to 125, 250 kPa and then to the maximum value of 375 kPa. After the first cycle of applying loads, i.e., 0 ÷ 375 kPa, the surface being researched was relieved of load (until the value of 0 kPa was reached); then, when the roadbed was relieved of load, afterwards, a primary load was applied from the value of 0 kPa to the following values of 125, 250 kPa, and then to the maximum value of 375 kPa; later, the surface was relieved of load until the value of 0 kPa was reached. In the course of subsequent increases in load, the measurement of the vertical displacement was performed with the application of a dial indicator. The DIC system, Aramis 3D, was applied to record the deformation of a surface being researched.

Results of research and their analysis

In the course of research with the application of the DIC system, the surface having the dimensions of ~160 x 160 mm was observed (Photo 4). The maps of displacements both for secondary load (Photo 5) and a primary one display visible losses in the image of the surfaces recorded by the DIC system. Subsequent degrees of applying a load resulted in an increase in deformations and surface not recognized by the DIC system. Reducing the recognized surfaces is connected, among others, with large displacements, and, additionally, with the porosity of the environment being observed. These losses substantially reduce the scope of possible analyses. It is possible to minimize the observed losses suffered by the image of surfaces in a program analysing the recorded results. At this stage of the work, the available results from the areas containing information in the broadest possible scope of deformations were applied. For the purpose of the analyses, four points located next to the surface of the environment being researched were adopted. In accordance with Photo 4, these are points located at various distances from the load axis, i.e., 0, 20, 40, 60, and also 80 mm. On the basis of data recorded at these points, the

ziano od wartości 0 kPa, kolejno zwiększając obciążenie do 125, 250 i maksymalnej wartości 375 kPa. Po pierwszym cyklu obciążeń, tj. 0 ÷ 375 kPa, badaną powierzchnię odciążono do wartości 0 kPa i odczekano do odprężenia podłoża, a następnie przystąpiono do wtórnego obciążenia od wartości 0 kPa do kolejno 125, 250 i wartości maksymalnej 375 kPa oraz dokonano ponownego odciążenia do wartości 0 kPa. Podczas kolejnych przyrostów obciążeniowych dokonywano pomiaru pionowego przemieszczenia za pomocą czujnika zegarowego. Do rejestracji deformacji badanej powierzchni wykorzystano system DIC Aramis 3D.

Wyniki badań i ich analiza

Podczas badań systemem DIC obserwowano powierzchnię o wymiarach ~ 160 x 160 mm (fotografia 4). Mapy przemieszczeń zarówno dla pierwotnego obciążenia (fotografia 5), jak i obciążenia wtórnego, charakteryzują się widocznymi stratami obrazu powierzchni rejestrowanej przez system DIC. Kolejne stopnie obciążenia powodowały przyrost deformacji i zwiększenie powierzchni nierozpoznawanej przez system DIC. Redukcja rozpoznawanej powierzchni związana jest m.in. z dużymi przemieszczeniami i dodatkowo porowatością obserwowanego ośrodka. Straty te znacznie ograniczają zakres analiz. Możliwa jest minimalizacja obserwowanych strat obrazu powierzchni w programie analizującym rejestrowane wyniki. Na tym etapie prac wykorzystano jednak dostępne wyniki z obszarów zawierających in-

formacje w możliwie największym zakresie deformacji. Do analiz przyjęto cztery punkty rozmieszczone przy powierzchni badanego ośrodka. Zgodnie z fotografią 4, są to punkty rozmieszczone w różnej odległości od osi obciążenia, tj. 0, 20, 40, 60 oraz 80 mm. Na podstawie danych zarejestrowanych w tych punktach przedstawiono rozkład przemieszczeń pionowych w kolejnych stopniach obciążenia pierwotnego oraz



Photo 4. The research stand with the localization of analysed points
Fot. 4. Stanowisko modelowe wraz z lokalizacją analizowanych punktów

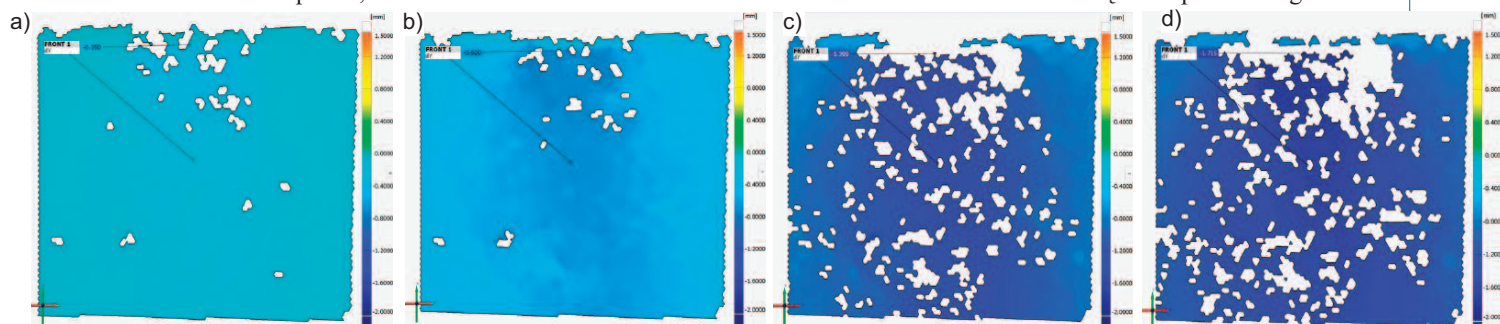


Photo 5. Map of displacement from the ARAMIS 3D system: a) 0 kPa, primary load; b) 125 kPa, primary load; c) 250 kPa, primary load; d) 375 kPa, primary load

Fot. 5. Mapa przemieszczeń z systemu ARAMIS 3D: a) 0 kPa, pierwotne obciążenie; b) 125 kPa, pierwotne obciążenie; c) 250 kPa, pierwotne obciążenie; d) 375 kPa, pierwotne obciążenie

distribution of vertical displacements at the following stages of secondary load, removing the load and also a primary load, was presented. The connection between change in the load and the reaction of the layer being researched is illustrated in Figure 2, i.e. 0 mm from it (Figures 2, 3), each increase in displacements was closely connected further increases in the load being applied. The maximum value of the displacement under a primary load of 375 kPa amounted to 1.74 mm, and under secondary load to 1.80 mm.

The values of vertical displacements for a point on the axis of applying a load were applied for essential analyses, the objective of which is to determine the parameters of the environment being researched, and, simultaneously, the qualitative assessment of data acquired on the basis of measurement with the application of the DIC system. At this stage of the work, the analysis of data was based on the calculation of deformation modules with the application of a correlation (1) applied to estimate surface displacement in the case of an elastic half-space [15], and also on calculations based on an elastic model, with the application of the finite element method (FEM). Applying the correlations assuming the elastic behaviour of the environment in the case of a station having relatively small dimensions and filled with an unbound mixture is a major simplification. However, the results of the analyses of this type allow for the qualitative assessment of the usefulness of data obtained with the application of the DIC system.

The deformation module E_0 of the environment being researched was calculated on the basis of the correlation (1), derived from the formula (2) [15]. The impact coefficient was adopted like for a flexible foundation under a rectangular load and for the average displacement value. The dimensions of the load-applying surfaces were assumed to be as follows: width $B = 4.5$ cm, and also length $L = 18$ cm. The value of impact coefficient for the relation $B/L = 4$ was interpolated (Fig. 4).

$$E_0 = \frac{q \cdot \omega \cdot B \cdot (1 - \nu^2)}{s} \quad (1)$$

$$s = \frac{q \cdot \omega \cdot B \cdot (1 - \nu^2)}{E_0} \quad (2)$$

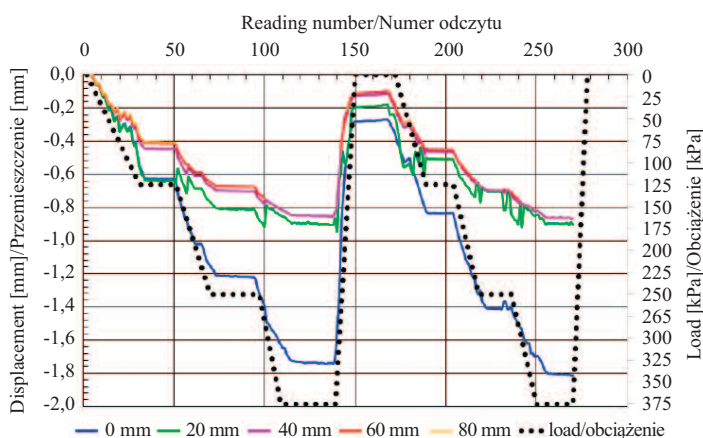


Fig. 2. Distribution of observed displacements using the DIC system at selected points of the model (photo 4)

Rys. 2. Rozkład obserwowanych przemieszczeń za pomocą systemu DIC w wybranych punktach modelu (wg fotografii 4)

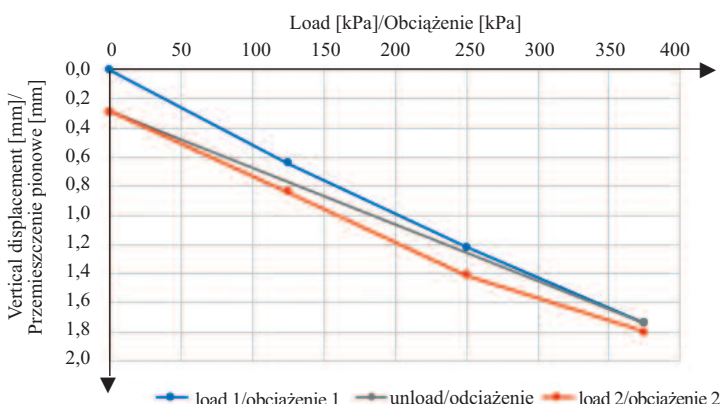


Fig. 3. Vertical displacements in the load axis measured using the DIC system

Rys. 3. Przemieszczenia pionowe w osi obciążenia pomierzone za pomocą systemu DIC

odciążenia i obciążenia wtórnego. Związek pomiędzy zmianą obciążenia a reakcją badanej warstwy ilustruje rysunek 2, np. w punkcie znajdującym się w osi obciążenia, tj. w odległości 0 mm od osi obciążenia (rysunki 2, 3), każdy przyrost przemieszczenia był ściśle związany z kolejnymi przyrostami obciążenia. Maksymalna wartość przemieszczenia pod obciążeniem pierwotnym 375 kPa, wyniosła 1,74 mm, a w obciążeniu wtórnym 1,80 mm.

Wartości pionowych przemieszczeń w przypadku punktu w osi obciążenia wykorzystano do podstawowych analiz, mających na celu wyznaczenie parametrów badanego ośrodka i zarazem jakościową ocenę danych pozyskanych na podstawie pomiaru systemem DIC. Na tym etapie prac, analizę danych wykonano na podstawie obliczenia modułów odkształcenia, wykorzystując zależność

(1), stosowaną do szacowania osiadania powierzchni półprzestrzeni sprężystej [15] oraz obliczeń bazujących na sprężystym modelu metodą elementów skończonych (MES). Wykorzystanie zależności zakładających sprężyste zachowanie się ośrodka, w przypadku stanowiska o niewielkich wymiarach i wypełnionego mieszkanką niezwiązaną, stanowi duże uproszczenie. Wyniki tego typu analiz pozwalają jednak na jakościową ocenę przydatności danych otrzymanych z pomiaru rozdrobionego ośrodka za pomocą systemu DIC.

Moduł odkształcenia E_0 badanego ośrodka obliczono na podstawie zależności (1), przekształconej ze wzoru (2) [15]. Współczynnik wpływu ω przyjęto, jak w przypadku podanego fundamentu o prostokątnym kształcie obciążenia i przy średniej wartości osiadania. Wymiary obciążającej powierzchni przyjęto następująco: szerokość $B = 4,5$ cm oraz długość $L = 18$ cm. Wartość współczynnika wpływu ω interpolowano dla stosunku $B/L = 4$ (rysunek 4).

$$E_0 = \frac{q \cdot \omega \cdot B \cdot (1 - \nu^2)}{s} \quad (1)$$

$$s = \frac{q \cdot \omega \cdot B \cdot (1 - \nu^2)}{E_0} \quad (2)$$

gdzie:

q – horizontal load of the surface of the half-space [kPa];

B – width of the area (or its diameter) [m];

ν – Poisson's ratio 0,30;

E_0 – modulus of deformation [MPa];

ω – impact coefficient, dependent on the shape of an area under load, its rigidity, as well as the place where a given point is located in relation to the area under load = 1.663, $\omega = 1.663$ (figure 4);

s – vertical displacement [m].

The calculated modulus of deformation E_0 , depending on the scope of loading the sample being researched, reach the values of 13 ÷ 15 MPa (primary load), and also 15 ÷ 17 MPa (secondary load) (table 2). At the second stage of the analyses, data from the DIC measurement were applied in a back analysis, which consisted in searching for such values of a model parameters which will allow for obtaining the theoretical vertical values of displacements as similar as possible to those received by means of the DIC measurement [16, 17]. To that end, a 3D model was made, geometrically identical to the dimensions and profile of the loading of the sample being researched (Figure 5). The calculations were conducted with the application of the Z_Soil v11.03 program [18]. The comparison of the calculated values with the measured ones is presented in Figure 6. The values of

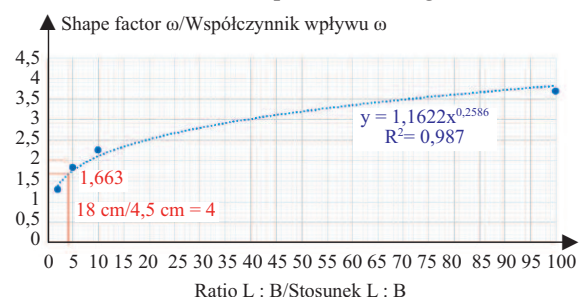


Fig. 4. Interpolation of the shape factor ω [15]

Rys. 4. Interpolacja współczynnika kształtu ω [15]

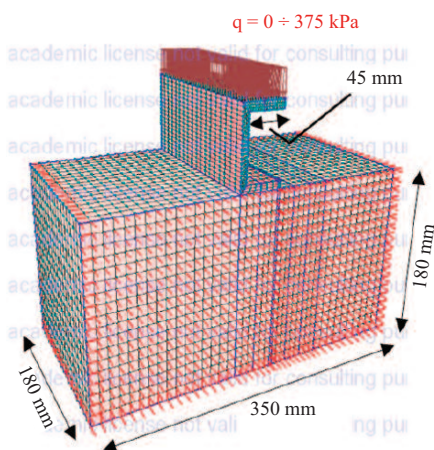


Fig. 5. Computational model

Rys. 5. Model obliczeniowy

the modules, and also Poisson's ratio, are presented in Table 3. The maps of vertical displacements presented for the surface being observed by the DIC system are presented in Figure 7. Those results con-

gdzie:

q – obciążenie w poziomie powierzchni półprzestrzeni [kPa];

B – szerokość obszaru (lub średnica) [m];

ν – współczynnik Poissona 0,30;

E_0 – moduł odkształcenia [MPa];

ω – współczynnik wpływu, zależny od kształtu obciążonego obszaru i jego sztywności oraz miejsca położenia danego punktu w stosunku do obciążonego obszaru, $\omega = 1,663$ (rysunek 4);

s – przemieszczenie pionowe [m].

Obliczone moduły odkształcenia E_0 , w zależności od zakresu obciążenia badanej próbki, osiągają wartość 13 ÷ 15 MPa (obciążenie pierwotne) oraz 15 ÷ 17 MPa (obciążenie wtórne), co przedstawiono w tabeli 2. W drugim etapie analiz, dane z pomiaru DIC wykorzystano w analizie wstecznej, która polegała na poszukiwaniu wartości parametrów modelu pozwalających na otrzymanie teoretycznych wartości przemieszczeń pionowych jak najbardziej zbliżonych do uzyskanych z pomiaru DIC [16, 17]. W tym celu zbudowano model 3D, geometrycznie odpowiadający wymiarom i charakterystyce obciążenia badanej próbki (rysunek 5). Obliczenia wykonano w programie Z_Soil v11.03 [18]. Porównanie wartości obliczonych z pomierzonymi przedstawia rysunek 6, a wartości modułów oraz współczynnika Poissona tabela 3. Mapy przemieszczeń

Table 2. Estimated values of deformation moduli calculated according to the dependencies (1) [15]

Tabela 2. Szacunkowe wartości modułów odkształcenia obliczone wg zależności (1) [15]

q [kPa]	ω	ν	Vertical Displacement according to DIC measurement/Przemieszczenie pionowe wg pomiaru DIC s [mm]		Deformation module (1) E_0 [MPa]/Moduł odkształcenia wg (1) E_0 [MPa]	
			load/obciążenie		load/obciążenie	
			primary/pierwotne	secondary/wtórne	primary/pierwotne	secondary/wtórne
125			0,64	0,06	13	15
250	1,663	0,30	1,12	1,14	14	15
325			1,74	1,53	15	17

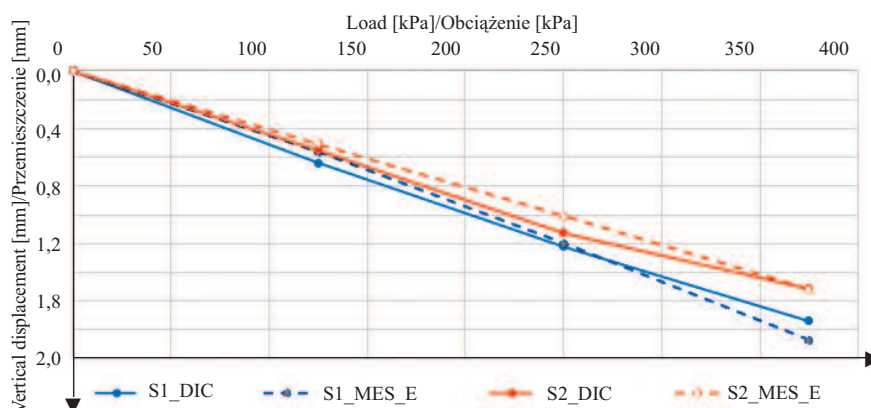


Fig. 6. Comparison of vertical displacements in the load axis with displacements calculated in the FEM model as a function of load increase

Rys. 6. Porównanie przemieszczeń pionowych w osi obciążenia z przemieszczeniami obliczonymi w modelu MES w funkcji przyrostu obciążenia

Table 3. Parameters of the computational model

Tabela 3. Parametry modelu obliczeniowego

Calculation variant/ Wariant obliczeń	Module [MPa]/ Moduł [MPa]	Poisson's ratio/Współ- czynnik Poissona
S1_MES_E	19	0,30
S2_MES_E	22	0,30

pionowych w płaszczyźnie obserwowanej przez system DIC pokazano na rysunku 7. Wyniki te dotyczą wariantu obliczeniowego w przypadku modułu $E = 22$ MPa oraz $\nu = 0,30$. Celem obliczeń MES było przyjęcie

cern the computational variant in the case of module $E = 22$ MPa, and also $\nu = 0.30$. The objective of the calculations with the application of the FEM was to adopt such values of the module E for which the curve: load (q) – displacement in the axis of load (s) will display a similar course.

Comparing the values of the modules of deformation calculated on the basis of correlations (1) with the values of the modules determined on the basis of calculations with the application of the FEM, it is ascertained that they match in qualitative aspect because the differences between modules amount to, approximately, 20%. It is sufficient to refer this instance of the scope of com-

takich wartości modułu E , przy którym krzywa obciążenie (q) – przemieszczenie w osi obciążenia (s) będą charakteryzowały się zbliżonym przebiegiem.

Porównując wartości modułów odkształcenia obliczonych na podstawie zależności (1) z wartościami modułów określonych na podstawie obliczeń MES, stwierdzono jakościową zgodność, ponieważ różnice pomiędzy modułami wynoszą ok. 20%. Ten przykładowy zakres analiz obliczeniowych MES wskazuje na dobrą przydatność danych z obserwacji ośrodka rozdrobionego metodą DIC.

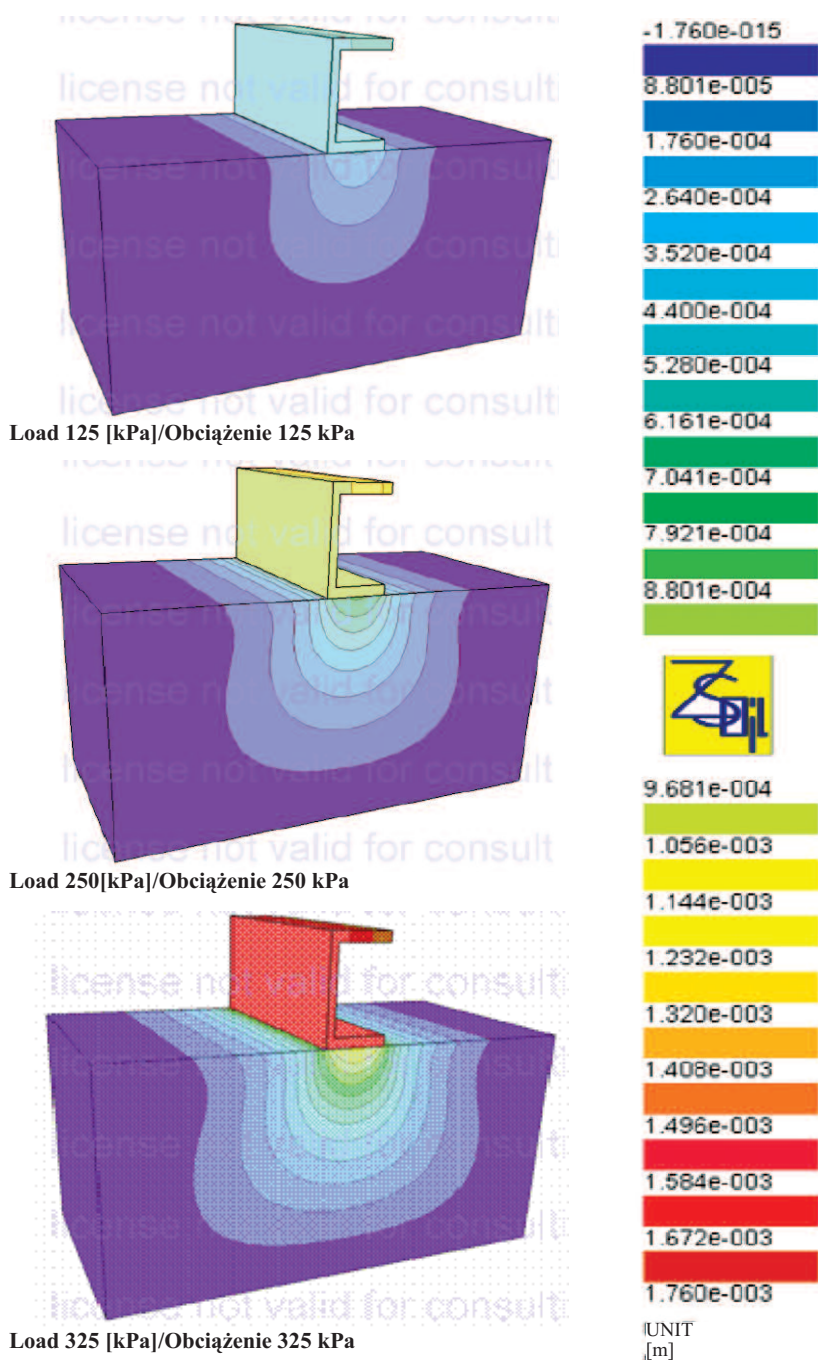


Fig. 7. Displacement maps (ABS Y) calculated in the Z_Soil_11.03 program
 Rys. 7. Mapy przemieszczeń (ABS Y) obliczonych w programie Z_Soil_11.03

putational analyses with the application of the FEM to indicate a good usefulness of data obtained by means of the observation of environment disintegrated with the application of the DIC.

Summary

The results of the observations of the behaviour of a disintegrated environment under load with the application of the DIC (Digital Image Correlation) are a source of valuable data. However, it should be indicated that, in unbound materials, the quality of acquired images is deteriorated, which happens in connection with difficulties in tracking the surfaces undergoing major deformations. Calculations with the application of the FEM in the case of applying data acquired by means of measurement with the application of the DIC system are a useful tool for conducting detailed analyses in the case of a as well as a disintegrated environment.

Regardless of a partial loss of the surface being observed, data acquired with the application of the DIC system concerning the deformations of sample made of an unbound aggregate in the course of applying load to its surfaces are a source of valuable information for advanced analyses. The scope of those analyses may include, among others, the assessment of the mechanism of a damage suffered by a structure, the assessment of the behaviour of different materials under the same load and calibrating theoretical constitutive model adopted for the purpose of theoretical calculations.

Received: 14.04.2025
Revised: 27.05.2025
Published: 21.08.2025

Literature

- [1] Walotek K, Bzówka J, Ciołczyk A. Impact of Shredded Rubber Waste (SRW) on the Range of Elastic Work of Road Construction Mixtures Containing Industrial Waste Bound with a Binder, *Materials*. 2022. DOI: 10.3390/ma15238503.
- [2] Górszczyk J, Malicki K, Zych T. Application of Digital Image Correlation (DIC) Method for Road Material Testing, *Materials*. 2019. DOI: 10.3390/ma12152349.
- [3] Jasiński R, Stebel K, Domin J. Application of the dic technique to remote control of the hydraulic load system, *Remote Sensing (Basel)*. 2020. DOI: 10.3390/rs12213667.
- [4] Grygierek M, Grzesik B, Rokitoski P, Rusin T. Usage of digital image correlation in assessment of behavior of block element pavement structure, *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2018. DOI: 10.1088/1757-899X/356/1/012024.
- [5] Kwiecień S, Ihnatov S, Kowalska M. Influence of soft layer thickness on the aggregate displacement in the backfill material of dynamic replacement columns – results of laboratory model tests, *Archives of Civil Engineering*. 2023. DOI: 10.24425/ace. 2023.146079.
- [6] Kapor M, Skejić A, Medić S, Balić A. DIC assessment of foundation soil response for different reinforcement between base and soft subgrade layer – Physical modeling, *Geotextiles and Geomembranes*. 2023. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2023.01.00.
- [7] Stanier SA, Blaber J, Take WA, White DJ. Improved image-based deformation measurement for geotechnical applications, *Canadian Geotechnical Journal*. 2016. DOI: 10.1139/cgj-2015-0253.
- [8] Rafi MDNI, Rahman MS, Tarin F, Ibne M. Distorted Path Analysis of Different Layered Soil Pressurized Under Uniform Displacement Rate: A Laboratory-based Study, *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2022; vol. 09, no. 09, pp. 1–7.

Podsumowanie

Wyniki obserwacji zachowania się rozdrobnionego ośrodka pod obciążeniem, z wykorzystaniem DIC (*Digital Image Correlation*) stanowią źródło cennych danych. Należy jednak podkreślić, że w materiałach niezwiązanych występują ograniczenia jakości pozyskiwanego obrazu, które związane są z trudnościami w śledzeniu znacznie deformujących się powierzchni.

Obliczenia z wykorzystaniem MES, w przypadku wykorzystania danych z pomiaru systemem DIC, stanowią przydatne narzędzie do prowadzenia szczegółowych analiz również w przypadku ośrodka rozdrobnionego. Pomimo częściowej utraty obserwowanej powierzchni, dane pozyskiwane za pomocą systemu DIC o deformacjach próbki z niezwiązanego kruszywa podczas obciążenia jej powierzchni, stanowią źródło wartościowych danych do zaawansowanych analiz. Zakres tych analiz może obejmować m.in.: ocenę mechanizmu zniszczenia struktury, ocenę zachowania różnych materiałów pod tym samym obciążeniem, kalibrację przyjętego do obliczeń teoretycznych modelu konstytutywnego.

Artykuł wpłynął do redakcji: 14.04.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 27.05.2025 r.
Opublikowano: 21.08.2025 r.

- [9] Segaline H, Sáez E, Ubilla J. Evaluation of dynamic soil-structure interaction effects in buildings with underground stories using 1 g physical experimentation in a transparent shear laminar box, *Engineering Structures*. 2022. DOI: 10.1016/j.engstruct. 2022.114645.
- [10] Khatami H, Deng A, Jaksa M. An experimental study of the active arching effect in soil using the digital image correlation technique, *Computers and Geotechnics*. 2019. DOI: 10.1016/j.compgeo. 2018.12.023.
- [11] Eichhorn GN, Bowman A, Haigh SK, Stanier S. Low-cost digital image correlation and strain measurement for geotechnical applications, *Strain*. 2020. DOI: 10.1111/str. 12348.
- [12] Kapogianni E, Sakellariou M. Application of Particle Image Velocimetry (PIV) and Digital Image Correlation (DIC) techniques on scaled slope models, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2017, [Online]. Available: www.irjet.net.
- [13] Sabato A, Niezrecki C. Feasibility of digital image correlation for railroad tie inspection and ballast support assessment, *Measurement*. 2017. DOI: 10.1016/J.MEASUREMENT. 2017.02.024.
- [14] The General Directorate for National Roads and Motorways, *Wymagania Techniczne WT4 – Mieszanki niezwiązane do dróg krajowych*, Warszawa, 2010.
- [15] Wiłun Z. *Zarys geotechniki*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 2000.
- [16] Pieczyrak J. Ustalanie parametrów wybranych modeli gruntów na podstawie próbnych obciążeń, vol. 91. Gliwice: Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, 2001.
- [17] Kwiecień S. Influence of load plates diameters, shapes of columns and columns spacing on results of load plate tests of columns formed by dynamic replacement, *Sensors*. 2021. DOI: 10.3390/s21144868.
- [18] Zimmermann T, Truty A, Urbański A, Podleś K. *Theory. Z. Soil. PC 2011 Manual*, 1st ed. Lausanne, Switzerland: Zace Services Ltd., Software Engineering. 2011.