

mgr inż. Krzysztof Kamiński¹⁾
ORCID: 0009-0001-9639-511X

Digital Image Correlation method for testing unbound mixtures in road pavement

Metoda cyfrowej korelacji obrazu w zastosowaniu do badań niezwiązanych mieszanek nawierzchni drogowych

DOI: 10.15199/33.2024.08.08

Abstract. In this article selected scientific publications from recent years with the use of digital image correlation DIC method are characterized. Laboratory tests concerned unbounded and loose materials are presented. The recorded images allowed for the analyses of selected parameters, such as displacement, deformation, velocity. The analyses expanded the knowledge on phenomena occurring in road structures, ground, retaining structures, slope stability.

Keywords: deformation measurement; Digital Image Correlation; DIC; strain localization; unbounded mixture.

Streszczenie. W artykule przedstawiono wybrane publikacje naukowe z ostatnich lat dotyczące wykorzystania metody cyfrowej korelacji obrazu DIC. Badania laboratoryjne dotyczyły materiałów niezwiązanych i sypkich. Rejestrowane obrazy pozwalały na analizy wybranych parametrów, m.in. przemieszczenia, odkształcenia, prędkości. Analizy wzbogaciły wiedzę na temat zjawisk zachodzących w konstrukcjach nawierzchni drogowych, podłożu gruntowym, konstrukcjach oporowych, stateczności skarp itp.

Słowa kluczowe: pomiar deformacji; cyfrowa korelacja obrazu; Digital Image Correlation; DIC; lokalizacja odkształceń; mieszanki niezwiązane.

The Digital Image Correlation – DIC [1] is a method used within the scope of photogrammetry. It is a non-contact method taking advantage, for the purpose of analysing shape, deformations, displacements and other parameters, of the recorded image of the surfaces of researched items. Scientists apply the DIC for the purpose of researching the surfaces of the structural components, items and samples having varied shapes and origins [2]. In road engineering, the DIC method is applied for research into laboratory samples, and also for the field measurements of existing surface structures. To strengthen road surfaces, the following, among others, are used: bound materials, namely concrete mixtures, mineral-asphalt mixtures, ground and aggregate stabilisation, materials made by means of recycling and made of various binders and binding agents, and also roadbed strengthening with the application of a chosen method like using unbound materials, aggregate mixtures, fillers, grounds and composites.

Research with the application of the Digital Image Correlation method dedicated to unbound materials significantly differs from that dedicated to bound materials. Bound materials are prepared in a manner described in relevant standards. Additionally, painting coatings on the surface of bound samples are used, improving the quality of received data. Research into unbound materials causes problems relevant to the granular structure of samples. It is required to prepare a research station, on which a sample will be shaped. The models of layers and structures of surfaces, and also other ones, may be researched in research forms (precisely, boxes). These are made in a manner ensuring the boundary conditions of models are maintained. The application of the Digital Image Correlation

Metoda cyfrowej korelacji obrazu – DIC [1] należy do dziedziny fotogrametrii. Jest bezkontaktowa i wykorzystuje do analizy kształtu, deformacji, przemieszczeń i innych parametrów, zarejestrowane obrazy powierzchni badanych obiektów. Naukowcy wykorzystują metodę DIC do badań powierzchni elementów konstrukcyjnych, obiektów, próbek o różnym kształcie i pochodzeniu [2]. W budownictwie drogowym jest stosowana do badań próbek laboratoryjnych oraz terenowych pomiarów istniejących konstrukcji nawierzchni. Do wznoszenia konstrukcji nawierzchni drogowych wykorzystywane są m.in.: materiały związane – mieszanki betonowe, mieszanki mineralno-asfaltowe, stabilizacje gruntu i kruszyw, materiały z recyklingu przetworzone z wykorzystaniem różnego rodzaju spoiw i lepiszczy oraz wzmocnienia podłoża wybraną metodą; materiały niezwiązane – mieszanki kruszyw, wypełniacze, grunty, kompozyty.

Badania z wykorzystaniem metody DIC materiałów niezwiązanych znacznie różnią się od badań materiałów związanych. Materiały związane przygotowuje się w sposób, jaki opisują normy. Stosuje się dodatkowe powłoki malarskie nanoszone na powierzchnię próbek związanych, polepszając jakość uzyskiwanych danych. Badania materiałów niezwiązanych stwarzają problemy odnoszące się do budowy ziarnistej próbek. Wymagane jest przygotowanie stanowiska badawczego, w którym zostanie nadany kształt próbki. Modele warstw i konstrukcji nawierzchni oraz inne mogą być badane w formach badawczych w postaci skrzyń. Wykonuje się je tak, aby zachować warunki brzegowe modeli. Stosowanie metody DIC wymaga rejestracji obrazów powierzchni próbki. W przypadku badań materiałów niezwiązanych jedną ze ścianek formy wykonuje się

¹⁾ Politechnika Śląska, Szkoła Doktorów, krzysztof.kaminski@polsl.pl

method requires recording the images of a sample's surface. In the case of unbound materials in a form, one of the walls of the form is made of transparent materials allowing for recording the images of a sample surface. This way, the cross-section of a structure is received. Owing to such a structure, a model can be used for the purpose of analyses.

Review of the literature

In the paper, the review of the most recent publications concerning research into unbound granular materials in road engineering and geotechnical engineering is presented (Table).

In the publications referred to hereinabove, the DIC and related methods based on image analysis for the purpose of research, and also on analysing received data, are presented.

Research into granular materials with the application of the DIC method is a useful manner of registering data for the purpose of comprehensive analysis in various aspects. In one of the publications [3], the authors looked into the mixture of sands which, in a natural state, demonstrated a natural spot pattern, making it easier to analyse recorded images. The sample was placed in a box with a wall made of plexiglass so as to allow for recording the image of a sample inside it. The sample was then moved with the use of

z materiałów przezroczystych umożliwiającą rejestrację obrazu powierzchni. W taki sposób otrzymuje się przekrój konstrukcji. Dzięki takiej budowie model można wykorzystać do analiz.

Przegląd literatury

W artykule przedstawiono przegląd najnowszych publikacji dotyczących badań materiałów niezwiązanych o budowie ziarnistej stosowanych w budownictwie drogowym i geotechnice (tabela). W wymienionych publikacjach do badań oraz analiz otrzymanych danych wykorzystano metodę DIC i pokrewne bazujące na analizie obrazu.

Badania materiałów ziarnistych metodą DIC są użytecznym sposobem rejestracji danych do analizy w różnych aspektach. W publikacji [3] autorzy omówili badania, w których wykorzystali mieszkankę piasków w stanie naturalnym wykazującą naturalny wzór plamkowy, ułatwiający analizę rejestrowanych obrazów. Próbkę była umieszczana w skrzynce, ze ścianką wykonaną z pleksiglasu, aby umożliwić zarejestrowanie obrazu wewnątrz skrzynki. Następnie przesuwano ją za pomocą siłownika pneumatycznego po powierzchni z otworem, do którego następo-

List of publications focus on selected examples of testing unbound granular materials with the use of DIC in road structures and geotechnics

Wykaz publikacji dotyczących wybranych przykładów badania materiałów niezwiązanych o budowie ziarnistej z wykorzystaniem DIC w budownictwie drogowym i geotechnice

No. of the source / Nr w wykazie literatury	Year of publishing / Rok publikacji	Subject-matter of research / Obiekt badania	Subject-matter of analysis / Przedmiot analizy
[3]	2016	flow of granular material / przepływ materiału ziarnistego	velocity / prędkość
[4]	2019	ground in a form with a trapdoor / grunt w formie z zapadnią	displacement, deformation / przemieszczenie, odkształcenie
[5]	2019	liquid rocking / kołysanie cieczy	displacement / przemieszczenie
[6]	2020	slope stability rutmeter / stateczność skarpy, koleinomierz	rotation, displacement, deformation / obrót, przemieszczenie, odkształcenie
[7]	2020	tunnel model / model tunelu	displacement, deformation / przemieszczenie, odkształcenie
[8]	2021	geocell / geokomórka	
[9]	2022	arrangement of ground layers / układ warstw gruntu	
[10]	2022	strengthening geogrid – pullout test / wzmocnienie geosiatką – pullout test	
[11]	2022	retaining wall, strengthening the ground with a geogrid / mur oporowy, wzmocnienie gruntu geosiatką	
[12]	2023	strengthening the ground with geosynthetic 1 (metal grid) / wzmocnienie gruntu geosyntetykiem i siatką metalową	
[13]	2023	research into a sandy ground in a direct shear machine / badanie gruntu piaszczystego w aparacie bezpośredniego ścinania	
[14]	2023	model tunnel with a trapdoor / tunel modelu z zapadnią	
[15]	2023	gravel columns and dynamic density / kolumny żwirowe, dynamiczne zagęszczenie	
[16]	2023	tunnel model / model tunelu	
[17]	2023	retaining wall / mur oporowy	
[18]	2024	tunnel model / model tunelu	

a pneumatic servo-motor on the surface with a hole, into which the mixtures subsequently fell. It was predicted that research would be conducted for two scenarios, namely, with a free surface forming above the hole and without it. The authors using in their research various velocities of a sample travel, ranging from 100 mm/s to 400 mm/s, received the images of the shape of ground falling. The analysis of images with the application of an experimental method allowed for assessing the effectiveness of the method, the quality of the received results, and also the flow of the material depending on the velocity of a sample travel.

The asset of the structure of geotechnical engineering models and research with the application of the DIC method is the possibility of creating various variables and the absence of the environment which can influence the received results. An instance of the application of the DIC method for research into a granular model is presented in another publication [4] in which the authors used a movable component simulating a roadbed sagging. Owing to this procedure, arching effect in ground, presented in Figure 1, was generated. The maps of displacements and deformations of a sample are also presented in this Figure. The maps are created for the contact surface between a sample and a wall made of a transparent material. Different variants of research, namely, such which involved applying load to a sample (and the one that did not involve it), and various values of a trapdoor travel, causing the displacements and deformation of a sample, were adapted. Analysing the recorded images allowed for demonstrating the profile of the formation of arching effect, and also the distribution of the values of displacements and deformations. Moreover, the boundary value of displacements for which the satisfactory qualities of maps were received was assessed. For a trapdoor travel amounting to 4.5 mm, a spot pattern degradation was ascertained as happening with the application of the DIC method. The boundary value will differ depending on density, the size of particles, analysis parameters, and the size of subsequent steps, for instance, displacements.

One of the applications of the DIC method in the context of research into granular materials may be research into the flows of liquids. Using a liquid enriched by the addition of particles allowing for developing a useful model for the purpose of analysis with the application of the DIC method may be an innovative method of research. Such a type of research may provide infor-

wało osypywanie się mieszanki. Przewidywano badania dwóch scenariuszy, gdy przy przesuwaniu skrzynki nad otworem tworzy się powierzchnia swobodna lub gdy jej nie ma. Autorzy, wykorzystując różne prędkości przesuwu próbki (100÷400 mm/s), uzyskali obrazy kształtu osypywania się gruntu. Analiza obrazów pozwoliła na ocenę skuteczności metody, jakości uzyskanych wyników oraz przepływu materiału w zależności od prędkości przesuwu próbki.

Zaletą budowy modeli geotechnicznych i badania metodą DIC jest możliwość tworzenia różnorodnych zmiennych i brak środowiska wpływającego na uzyskiwane wyniki. Przykład zastosowania metody DIC do badania modelu ziarnistego jest przedstawiony w publikacji [4], w której autorzy wykorzystali ruchomy element symulujący osiadanie podłoża. Dzięki takiemu zabiegowi wygenerowano efekt łukowania w gruncie, przedstawiony na rysunku 1. Zaprezentowano na nim też mapy przemieszczeń i odkształceń próbki. Mapy tworzone są w przypadku powierzchni styku próbki ze ścianą z materiału przezroczystego. Zastosowane zostały różne warianty badań: z przyłożeniem obciążenia do próbki lub bez niego. Zmieniano wartość przesuwu zapadni, wywołującej przemieszczenia i odkształcenia próbki. Analiza rejestrowanych obrazów pozwoliła na wykazanie charakterystyki powstawania efektu łuku oraz rozkładu wartości przemieszczeń i odkształceń. Ponadto oceniono granicę wartości przemieszczeń, w przypadku której uzyskiwano mapy zadowalającej jakości. Przy wartości przesuwu zapadni 4,5 mm następowała degradacja wzoru plamkowego wg metody DIC. Wartość graniczna będzie różna w zależności od zagęszczenia, wielkości cząstek, parametrów analizy, wielkości kolejnych kroków, np. przemieszczeń.

Zastosowaniem metody DIC w kontekście badań materiałów ziarnistych, może być też badanie przepływów cieczy. Ciecz wzbogacona o cząsteczki pozwalające na utworzenie użytecznego wzoru do analiz metodą DIC, może być nowatorską metodą badań, które dostarczają informacji o zachowaniu się materiałów, cieczy, gruntów mogących ulegać upłynnieniu, ale także o zachowaniu pracy podłoża,

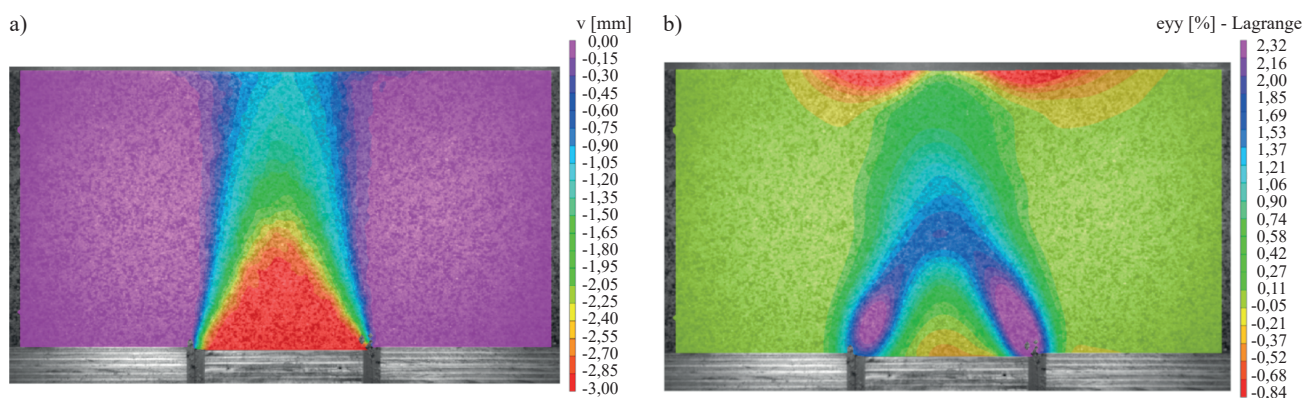


Fig. 1. Load-free model with trapdoor: a) vertical displacement for a 3 mm yield of the trapdoor; b) vertical strains, 3 mm yield of the trapdoor [4]

Rys. 1. Model z zapadnią bez obciążenia: a) pionowe przemieszczenia przy przesuwie zapadni o 3 mm; b) pionowe odkształcenia przy przesuwie zapadni o 3 mm [4]

mation about the behaviour of materials, liquids, grounds to be liquified, but also information about the behaviour of a roadbed work, which is subjected to strengthening with the application of chosen methods. Was proposed the method of a three-dimensional measurement of the surface of a liquid, placed inside a container [5]. A different manner was applied at a research station to create a liquid spot pattern. For that purpose, a design placed together with image-recording cameras above the container with a liquid was applied. The images were recorded from above, and also, for the purpose of comparison, from the side. In the course of research, a liquid was spilt out by means of moving the container with a liquid, whereas the values of the displacement of the container were recorded with the application of a referential image recorded by cameras.

The three-dimensional images of liquid were presented in the wave phase of: 0.5π , 1.0π , 1.5π and 2.0π in Figure 2. For the changing levels of the liquid in the container, namely: 40 mm, 60 mm and 80 mm, similar profiles of the surface of a liquid were received. The level of the liquid in the container exerted influence on the intensity of rocking. The higher level of liquid in the container means a smaller effect of rocking the liquid; inertia is indicated as a factor behind this phenomenon. A series of three performed measurements allowed for receiving repeatable results (the number of which amounted to approximately 4%). Further research into loose and liquid materials may extend our knowledge relevant to the methods of strengthening sensitive grounds with the application of a cement slurry, for instance, to jet-grouting.

In the subsequent publication [6], the authors of the paper presented the system applied by themselves in the DIC method, and also the instances of its application. Apart from its use in geotechnical engineering such as research with the application of a geotechnical centrifuge and research into the stability of ground together with a block

rotation, an interesting solution is the application of the DIC method for road research with the use of a rut meter. In that case, six image-recording cameras were used, and a plastic structure of a surface was received in a concrete form. The model was used to research the phenomenon of a rut formation on a surface, which resulted from applying a load (a tyre moving on the surface being researched). In Figure 3, a map con-

które poddawane jest wzmocnieniu wybranymi metodami. W [5] zaproponowano sposób pomiaru trójwymiarowego powierzchni cieczy, umieszczonej wewnątrz pojemnika. Na stanowisku badawczym na cieczy utworzono wzór plamkowy. Rejestrowano obraz z góry oraz porównawczo z boku. W trakcie badania wywoływano chłustanie cieczy przez przesuwanie pojemnika z cieczą, natomiast wartości przemieszczeń kontrolowano za pomocą obszaru referencyjnego rejestrowanego przez kamery.

Na rysunku 2 przedstawiono profile trójwymiarowe cieczy w fazie fali 0.5π , 1.0π , 1.5π , 2.0π . Przy zmiennej wysokości cieczy w pojemniku 40; 60; 80 mm, uzyskano podobne profile powierzchni cieczy. Efekt wysokości cieczy w pojemniku wpłynął na intensywność jej kołysania. Ze wzrostem wysokości uzyskuje się mniejszy efekt kołysania cieczy; bezwładność jest wskazywana jako odpowiedzialna za to zjawisko. Seria trzech pomiarów pozwoliła uzyskać powtarzalność wyników wynoszącą ok. 4%. Dalsze badanie materiałów sypkich i płynnych może wzbogacić wiedzę o metodach wzmocnień gruntów wrażliwych, wzmacnianych za pomocą zaczynu cementowego, np. jet-grouting.

W publikacji [6] autorzy przedstawili system przez nich stosowany w metodzie DIC oraz przykładowe zastosowania. Oprócz badania w wirówce geotechnicznej i stateczności gruntu wraz z rotacją bloków, ciekawym rozwiązaniem jest zastosowanie metody DIC do badań drogowych, korzystając z koleinomierza. W tym ostatnim przypadku użyto sześciu kamer rejestrujących obraz i wykonano sprężystą konstrukcję nawierzchni w betonowej formie. Badano zjawisko koleinowania się nawierzchni, które nastąpiło na skutek obciążenia w postaci opony, poruszającej się po

nawierzchni. Na rysunku 3 przedstawiono mapę odkształceń w zależności od osi obciążenia oponą i głębokości.

W publikacji [7] przedstawiono mechanizm awarii konstrukcji tunelu, na opracowanym modelu laboratoryjnym (rysunek 4), który został wykonany w wielkoskalowej skrzyni, umożliwiającej symulowanie warunków zniszczenia, jak wystąpienie uskoku. Strefa uskoku została zrealizowana

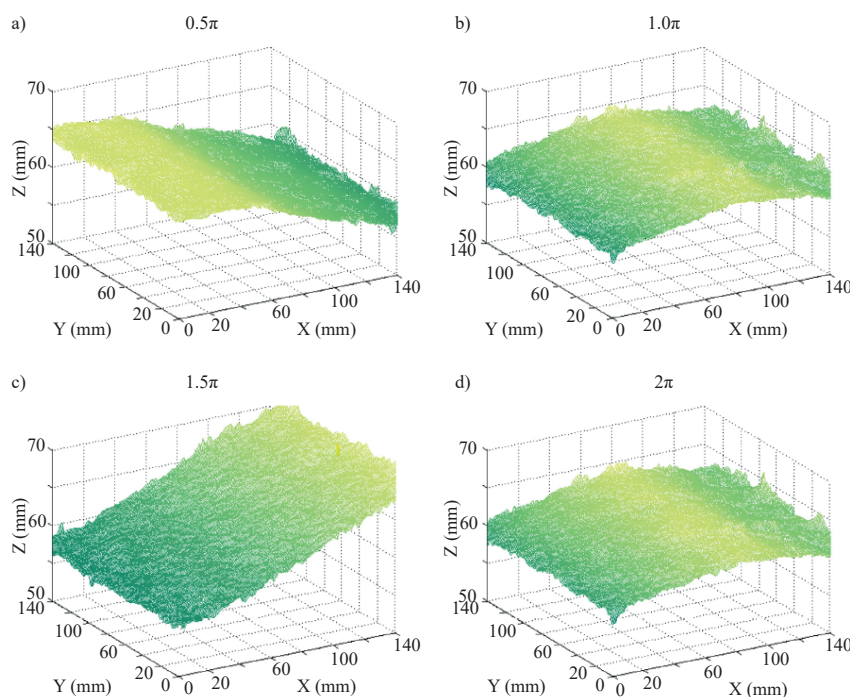


Fig. 2. 3-D surface profile of flowing liquid rocking for a 60 mm depth liquid [5]

Rys. 2. Profil trójwymiarowy kołysania cieczy, w przypadku wysokości cieczy 60 mm [5]

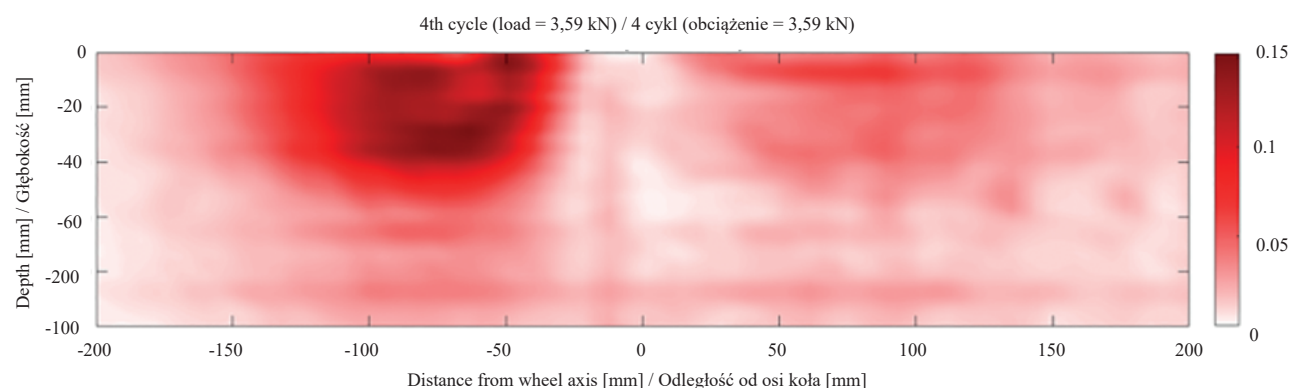


Fig. 3. Strain train of a single-layer pavement [6]

Rys. 3. Odształcenia jednowarstwowej nawierzchni [6]

cerning deformations depending on the axis of the tyre load and depth is presented.

The authors of another publication [7] presented the mechanism of a tunnel structure failure on the developed laboratory model made in a large-scale box, allowing for simulating the cases of lethal damage, like the formation of a fault (Figure 4). The authors chose, out of methods of creating boundary conditions on a model, an overload method. The load was applied vertically to the upper part of the model. Its sizes were determined so as to maintain boundary conditions allowing for conducting analysis in the flat state of deformations. In this publication, conclusions from research, including the profile of the distribution of strains and deformations, the process of tunnel collapse, together with the description of phenomena accompanying it, are presented.

A modern method of strengthening and optimising geotechnical engineering and road structures consists in applying a broad assortment of geosynthetics. These materials, depending on their properties, may form two- or three-dimensional systems. One of such applications is geocells, which, after arranging and covering with loose material, may constitute a strengthening layer, or an independent structure of a surface in appropriate conditions. An

przez zastosowanie warstwy z folii polietylenowej i wazelin. Spośród metod doprowadzenia modelu do warunków granicznych, w których ulegnie on zniszczeniu, wybrano metodę przeciążenia. Obciążenie przyłożono pionowo, na górze modelu. Wymiary modelu tak dobrano, aby zachować warunki brzegowe umożliwiające analizy w płaskim stanie odkształceń. W publikacji przedstawiono wnioski z badań, zamieszczając charakterystykę rozkładu naprężeń i odkształceń, proces zawalenia tunelu wraz z opisem towarzyszących zjawisk.

Nowoczesną metodą wzmacniania i optymalizacji konstrukcji geotechnicznych i drogowych jest zastosowanie różnego rodzaju geosyntetyków. Materiały te, w zależności od właściwości, mogą tworzyć dwu- lub trzypiętrowe układy. Jednym z takich zastosowań są geokomórki, które po ułożeniu i zasypaniu materiałem sypkim mogą stanowić warstwę wzmacniającą, umocnienie lub samodzielną konstrukcję nawierzchni w odpowiednich warunkach. Przykładowe zastosowanie geokomórki zawiera publikacja [8], w której autorzy przedstawili model wzmocnienia gruntu geosyntetykiem (rysunek 5).

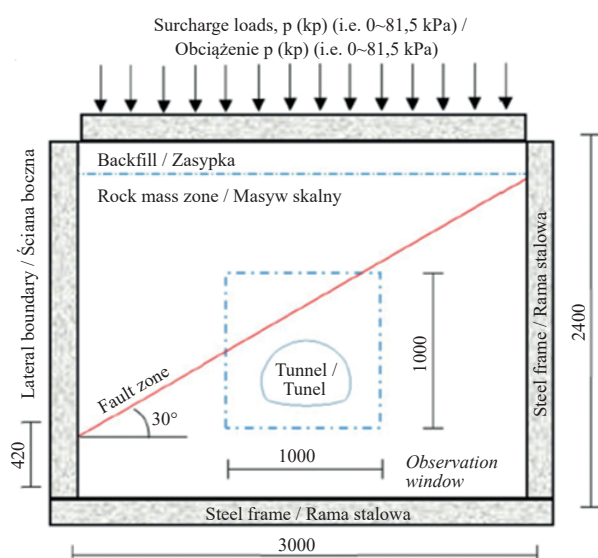


Fig. 4. Laboratory model of the tunnel with slip zone [7]

Rys. 4. Laboracyjny model tunelu ze strefą poślizgu [7]

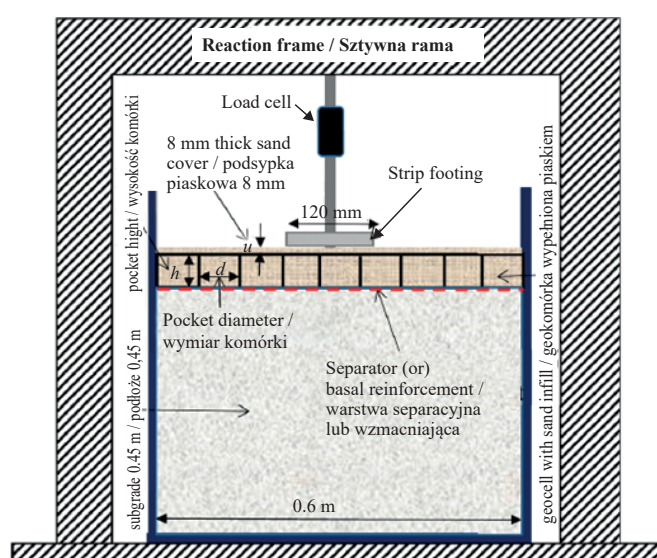


Fig. 5 Schematic view of the laboratory test set up [8]

Rys. 5. Schemat badania laboratoryjnego [8]

instance of the application of a geocell is contained in another publication [8], in which the authors presented a model of strengthening the ground with a geosynthetic (Figure 5).

In the research, a referential model (not strengthened) was compared with the one strengthened with the use of geocells of varied height and roughness parameters. The authors described the influence of a geocell on the values of sagging, displacements and deformations in the model, as well as the way of relocating loads between particles, and also the angle of internal friction.

In geotechnical engineering and road engineering, an important issue is the layer structure. The properties of particular layers influence an entire structure. Research into a layered model is presented in another publication [9]. The combinations of grounds such as sand and spread clay was applied. The model was placed in a box allowing for research into it with the application of the DIC method. Figure 6 shows one of the six models presented by the authors, who determined, on the researched samples, the lines of deformation on the contact surface of layers, the path of lethal damage caused by shearing and the direction of breakdown by means of shearing. A collation and analysis of the deformation of models was presented, proving the influence of a material on the received results, and also correlation between the width of the deformation and sagging.

Research into geogrids is described in another publication [10]. The results of research into the influence of reinforcing, with the use of geogrids, granular grounds while removing this reinforcement. Moreover, the influence of pressure and humidity on the received results of research is presented. To construct the model, aggregates such as sand, gravel and clay were used, whereas a single-axis geogrid was made of HDPE. 7 different combinations consisting of various arrangements of grounds, humidity and load applied to a model surface, and also different locations of installed geogrids, were applied. For these combinations, 66 studies of geogrid pull-out were conducted. An instance of arranging a geogrid on sand is presented in Photograph 1, which additionally shows the location of applied geogrid extensometers. There was a tendency to deviate observable for the results of laboratory research in relation to the results of analysis and field research. In the analysis, the sizes of shearing zones under the influence of geogrid pull-out was presented, the effectiveness of the DIC method confirmed, and the mechanics of geogrid pull-out shown, depending on the kind of a reinforced ground.

A publication raising the subject of reinforcing ground with the application of geosynthetics is a paper dedicated to the ground reinforced with the use of a geogrid behind a retaining wall under cyclical load [11]. Six tests were discussed; one did not involve the use of a geogrid, whereas the other five were conducted with the application of reinforcing four layers. To simulate

W badaniu porównano model referencyjny bez wzmocnienia oraz z zastosowaniem wzmocnienia geokomórką o różnej wysokości i chropowatości wyrobu. Autorzy opisali wpływ geokomórki na wartości osiadania, przemieszczania, deformacji w modelu, a także sposób przenoszenia obciążeń między cząsteczkami oraz kąta tarcia wewnętrznego.

W geotechnice i drogownictwie ważnym zagadnieniem jest budowa warstwowa konstrukcji. Właściwości poszczególnych warstw wpływają na całość konstrukcji. Badanie modelu warstwowego przedstawiono w [9]. Zastosowano kombinację gruntów takich jak: piasek i roztarta glina. Model warstwowy umieszczono w skrzyni umożliwiającej badanie modelu z użyciem metody DIC. Na rysunku 6 widoczny jest jeden z sześciu badanych modeli. Na badanych próbkach wyznaczono linie deformacji styku warstw, ścieżkę zniszczenia przez ścinanie i kierunek przebiecia ze ścinaniem. Przedstawiono zestawienie i analizę deformacji modeli, wykazując wpływ materiału na uzyskane wyniki oraz zależność pomiędzy szerokością strefy deformacji a osiadaniem.

Badania geosiatek zostały opisane w [10]. Przedstawiono wyniki badań wpływu zbrojenia geosiatkami gruntów ziarnistych przy wrywaniu tego zbrojenia. Omówiono też wpływ docisku i wilgotności. Do budowy modelu użyto kruszyw, takich jak piasek, żwir i glina, natomiast jednoosiowa geosiatka wykonana była z HDPE. Przygotowano siedem różnych kombinacji (różnych układów gruntów, wilgotności i obciążenia powierzchni modelu oraz różnych lokalizacji zainstalowanych geosiatek), które poddano 66 badaniom wrywania geosiatki. Przykładowe ułożenie siatki w piasku przedstawiono na fotografii 1, gdzie dodatkowo widoczne są założone ekstensometry do geosiatki. Zauważono tendencję do odchylenia wyników badań laboratoryjnych w stosunku do rezultatów analitycznych i badań terenowych. W analizie pokazano wielkości stref ścinania pod wpływem wrywania geosiatki, potwierdzono skuteczność metody DIC, przedstawiono mechanikę wrywania geosiatki w zależności od rodzaju gruntu, w której umieszczono zbrojenie.

W [11] poruszono zagadnienia dotyczące gruntu zbrojonego geosiatką za murem oporowym pod obciążeniem cyklicznym. Omówiono sześć testów, przy czym jeden bez siatki, a pozostałe pięć z wykorzystaniem zbrojenia czterech warstw. Aby zasymulować wpływ lokalizacji obciążenia na grunt, zastosowano trzy różne położenia obciążenia. W odróżnieniu od badania przedstawionego w [10], w tym przypadku użyto dwuosiowej geosiatki. W [11] podano wiele wniosków z badań, m.in. doty-

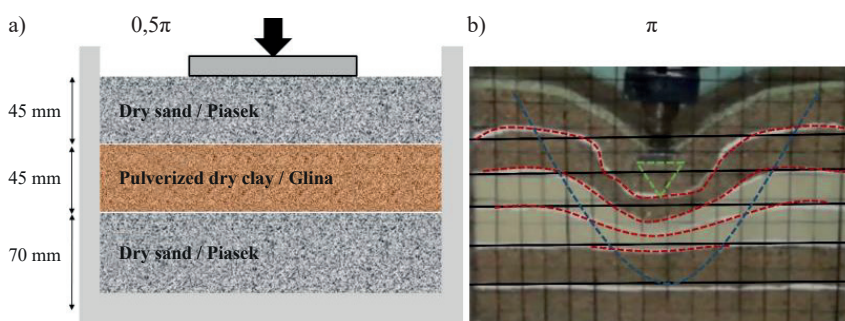


Fig. 6. Layer arrangement (a) and lethal damage (b) [9]
Rys. 6. Układ warstw (a) i schemat zniszczenia (b) [9]

the influence of the load location on ground, three different locations of the load were applied. Unlike the previous research [10], in that case, a bi-axial geogrid was used. In [11], a number of conclusions were drawn, among others, concerning the influence of the distance between the load and a retaining wall, the influence of the reinforcement failure of ground on the values of sagging wall sagging and a retaining wall stability, influence of deformations on strain accumulation, and also influence on the values of the deformations geogrid and cyclical load. A research model together with the system of measurements is presented in Figure 7.

In model research into grounds loaded with fundaments, it was as well another kind of a geosynthetic, namely, a geotextile, that was used; it was applied by scientists to model the arrangement of ground strengthened with the layer of a geotextile and wire cloth and presented in Figure 8 [12].

The model was made in a research box with a transparent partition (5.1 cm thick) ensuring boundary conditions; on the bottom, abrasive paper ensuring friction was placed. A series of six tests was conducted with a single layer of reinforcement, and a single test was performed without any additional reinforcement of the ground. On the basis of research resulting in a sample lethal damage, conclusions were drawn concerning the mechanism of a lethal damage to a roadbed reinforced with the use of a wire cloth and a geotextile, and also the influence of the shape of reinforcement on the received results.

Apart from making a laboratory model in a layered arrangement, the DIC is applied as well in another kind of research, in

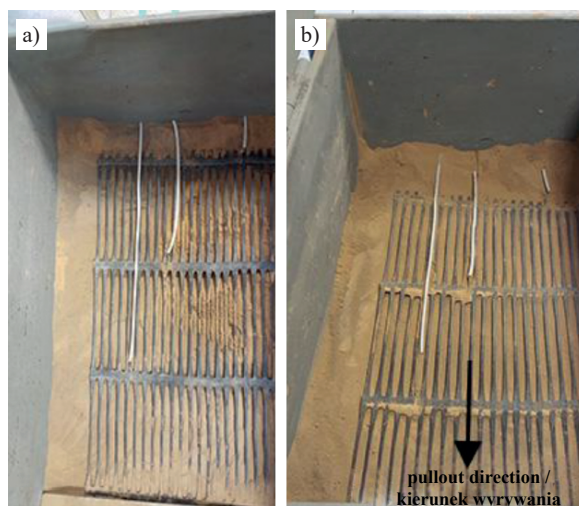


Photo 1. Geogrid on a soil layer: a) before test; b) direction of a pulling-out test [10]

Fot. 1. Geosiatka na gruncie: a) przed badaniem; b) kierunek badania pull-out [10]

czących wpływu odległości obciążenia od muru oporowego; awarii zbrojenia gruntu na wartości osiadania i stateczności muru oporowego; odkształcenia na akumulację naprężeń oraz wpływ na wartości odkształcenia geosiatki od obciążenia cyklicznego. Model badawczy wraz z systemem pomiarowym przedstawiono na rysunku 7.

W modelowych badaniach gruntów obciążonych fundamentami zastosowano również inny rodzaj geosyntetyku – geowłókninę, która posłużyła naukowcom do zamodelowania układu gruntu wzmocnionego warstwą geowłókniny

i siatką drucianą, obciążonego pionowo jak na rysunku 8 [12]. Model wykonano w skrzyni badawczej, z przezroczystą przegrodą o grubości 5,1 cm zapewniającą warunki brzegowe, a na dnie umieszczono papier ścierny zapewniający tarcie. Przeprowadzono serię sześciu badań z jedną warstwą wzmocnienia i jedno badanie bez dodatkowych zabiegów wzmocniających grunt. Na podstawie badań prowadzących do zniszczenia próbki wyciągnięto wnioski dotyczące mechanizmu zniszczenia w podłożu zbrojonym siatką i geowłókniną oraz wpływu kształtu zbrojenia na otrzymane wyniki.

Oprócz budowy modelu laboratoryjnego w układzie warstwowym, metodę DIC stosuje się również w badaniach, w których możliwe jest przygotowanie modelu do rejestracji obrazu. Przykładem jest badanie w aparacie bezpośredniego ścinania, gdzie rejestrowano obraz powierzchni w kierunku prostopadłym do kierunku ścinania [13]. Do badania

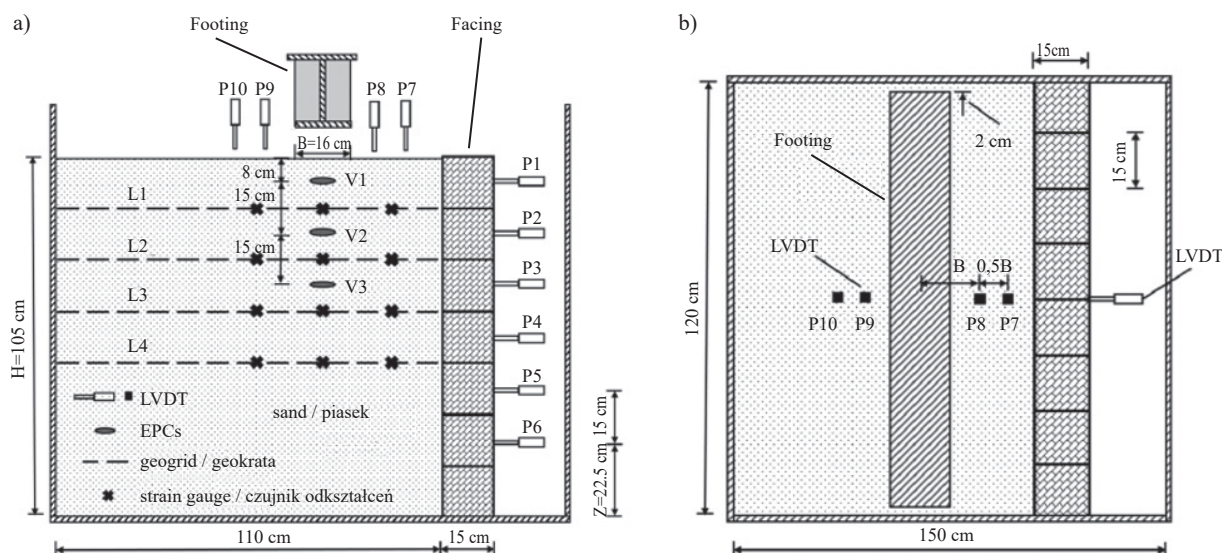


Fig. 7. Advanced model testing system: a) view elevation; b) top view [11]

Rys. 7. Zaawansowany układ badawczy: a) widok; b) rzut z góry [11]

which it is possible to prepare a model for recording an image. An instance is research in a direct shear machine, where the surface image was recorded in the direction perpendicular to the direction of shearing [13]. The authors used [13] in their research in a DST device an original form made with the use of a 3D printing method. The scheme of research is presented in Photography 2. The research was conducted on sand for the following pressure values: 100, 200, 300 and 400 kPa, with the velocity of shearing amounting to 0.5 mm/min until the value of 10 mm of travel was reached; lethal damage occurred before that. The analysis of research covered noises, which influence the usability and reliability of received data.

The behaviour of ground in the area of a rigid tunnel casing if the model includes a trapdoor simulating a roadbed sagging under the tunnel is described in another publication [14]. The model of the tunnel was made in a steel box (Photography 3), with a transparent partition allowing for recording the image of a surface behind it. On the bottom, a trapdoor allowing for sagging was placed. Sand used in the model had been coloured before placing it in a box to receive a better quality of the images, which, in turn, improves the precision in the DIC analysis. On the basis of experimental research, information on the course of displacements and deformations of the model was received, including (and not) the tunnel. Owing to the DIC method, a profile of displacements and deformations was developed, the influence of the values of a trapdoor displacements on the ground determined, and that of the depth of tunnel location on the received results was established as well.

Methods of reinforcing a roadbed may include, for instance, a complete replacement of ground, but one in frequent use is wet granulation (gravel columns). Reinforcing a roadbed with the use of gravel is presented in another paper [15]. Marshland conditions were simulated with the use of a hydrogel placed above a sand layer. The gravel columns were

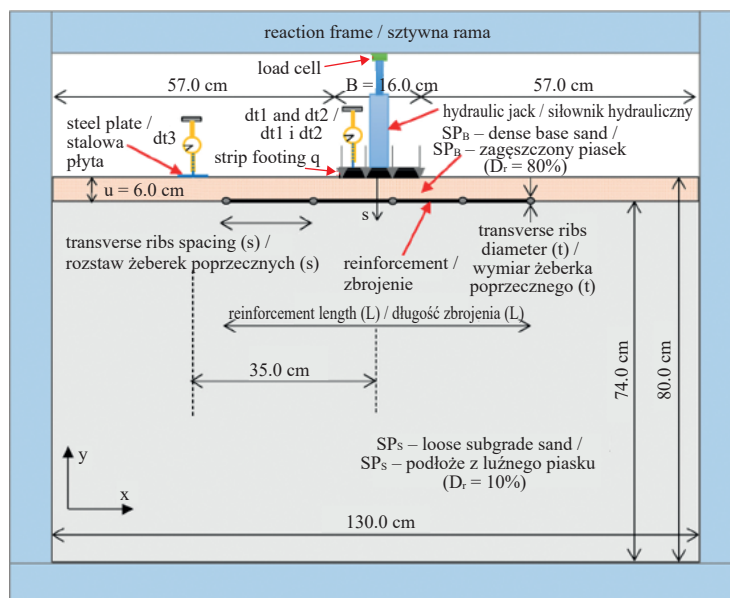


Fig. 8. Model with geotextile [12]
Rys. 8. Model z geosyntetykiem [12]

Zachowanie się gruntu w obszarze sztywnej obudowy tunelu, w przypadku, gdy w modelu zastosowano zapadnię, która symulowała osiadanie podłoża pod tunelem, przedstawiono w [14]. Model tunelu wykonano w stalowej skrzyni (fotografia 3), z przegrodą przezroczystą umożliwiającą rejestrację obrazu powierzchni za przegrodą. Na dnie umieszczono zapadnię. Piasek do wykonania modelu zabarwiono, aby uzyskać lepszą jakość obrazów, która zwiększa dokładność w analizie DIC. Bazując na badaniach eksperymentalnych, uzyskano informację dotyczącą przebiegu przemieszczeń i deformacji modelu, z uwzględnieniem i bez uwzględnienia tunelu. Dzięki metodzie DIC otrzymano charakterystykę przemieszczeń i odkształceń, określono wpływ wartości przemieszczenia zapadni na grunt, jak również wpływ głębokości posadowienia tunelu na otrzymane wyniki.

Metodą wzmocnienia podłoża może być np. całkowita wymiana gruntu, ale często stosowane jest wgłębne doziarnienie – kolumny żwirowe. Wzmocnienie podłoża za pomocą żwiru przedstawiono w [15]. W badaniach zasymulowano tereny bagniste przy użyciu hydrożelu ułożonego nad warstwą piasku. Kolumny żwirowe zostały umieszczone centralnie w skrzyni

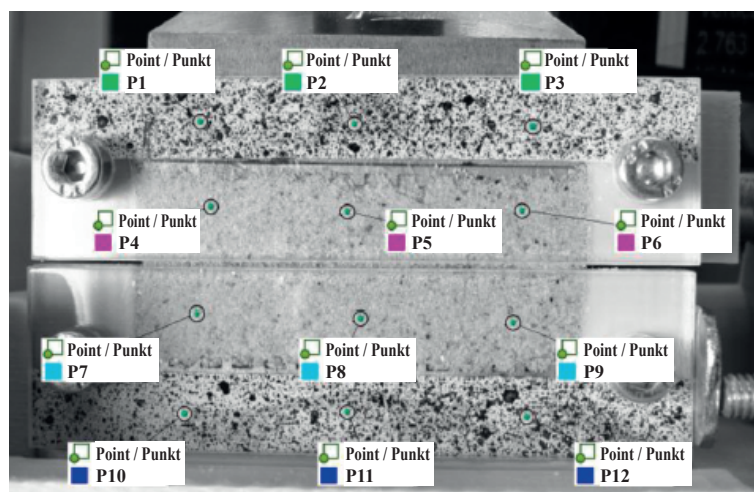


Photo 2. Selected check points distributed on both sides and in the middle of a shear cell [13]

Fot. 2. Wybrane punkty na formie do badania w aparacie bezpośredniego ścinania [13]

located in the center of a research box. Such an approach allowed for conducting research and analysis in every direction (Photography 4), unlike in other studies dedicated to granular materials with the application of the DIC method. The gravel columns were formed by means of dynamic gravel pressing into a simulated roadbed. Information concerning the choice of an effective method of gravel delivery and increasing its density was received.

The DIC method was used as well to assess the influence on the surface ground above the constructed tunnel [16]. A consecutive relocation of a drilling device causes decrease in density and the formation of voids, which, until the tunnel casing is put in place, exert a significant influence on what is on the surface. The tunnel model was made in a transparent form shown in Photography 5.

The simulation of a ground sagging was performed in the manner opposite to the actual drilling of the tunnel. In this case, the front part of the tunnel was drawn back, and a void formed. In the paper [16], the following results of research are presented: the description of displacements and deformations on the surface and below, the occurrence of arching effect in ground, the influence of the tunnel depth on the values of a surface sagging, and parameters influencing a tunnel sagging.

In the paper concerning the structures of a retaining wall [17], the authors applied the DIC method as one of complementary methods [17]. It was used, in particular, within the scope of the values of displacements and deformations of a fill.

In another paper [18], experimental research into the tunnel model was presented; its purpose was to analyse the phenomenon of raising the bottom of a casing and tunnel surface. One of the tunnel models is presented in Figure 9. The research was conducted for two variants of samples, rounding up the bottom and without it. Registering displacements and deforma-

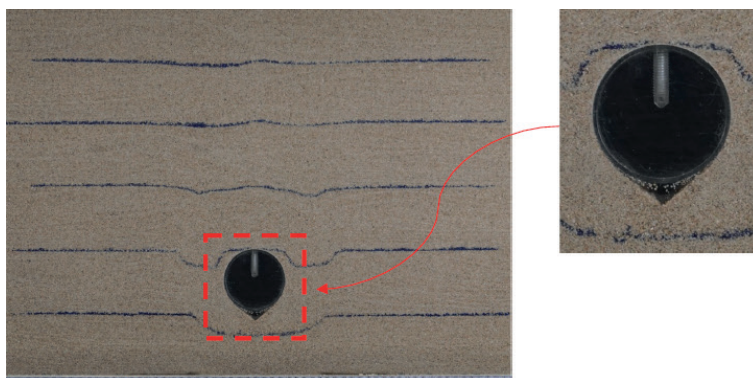


Photo 3. Ground deformation at the trapdoor displacement of 20 mm [14]

Fot. 3. Odkształcenie podłoża przy przesuwie zapadni o wartości 20 mm [14]

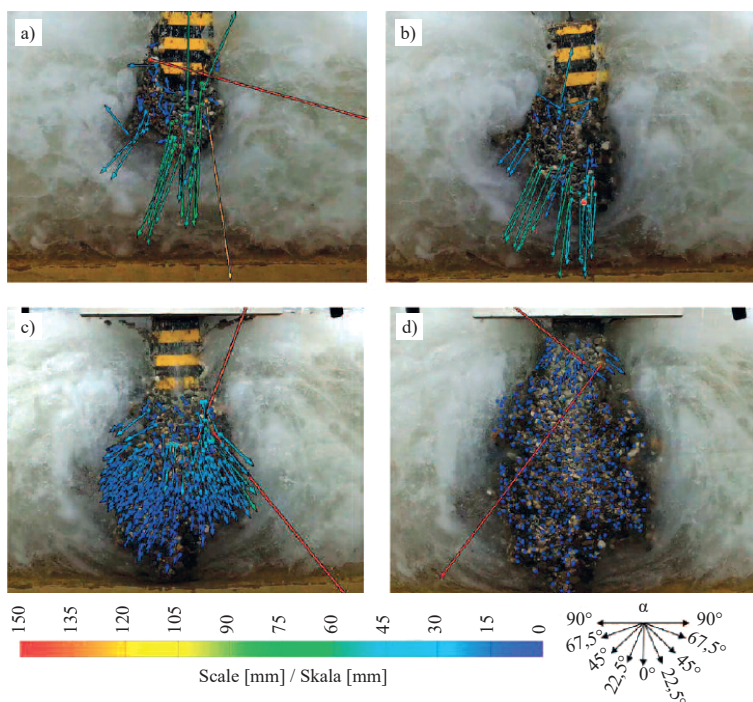


Photo 4. Displacement resultant vectors with crater fully filled [15]

Fot. 4. Wektory przemieszczeń wypadkowych przy pełnym zasypie krateru [15]

badawczej. Umożliwiało to wykonanie badania i analizy w każdym kierunku (fotografia 4), odmiennie niż w innych badaniach materiałów ziarnistych metodą DIC. Kolumny żwirowe były formowane poprzez dynamiczne wbijanie żwiru w symulowane podłoże. Autorzy uzyskali informacje, jaka metoda nasypu żwiru i zagęszczania jest skuteczna przy formowaniu kolumn.

Metodę DIC wykorzystano również do oceny wpływu na powierzchnię gruntu nad wykonywanym tunelem [16]. Sukcesywne przesuwanie urządzenia drążącego powoduje rozluźnienie i powstawanie pustek, które do czasu zamontowania obudowy tunelu znacznie oddziałują na obiekty na powierzchni. Model tunelu został wykonany w formie przezroczystej pokazanej na fotografii 5. Symulacja osiadania

gruntu była odwrotna, niż gdy faktycznie wykonywany jest tunel maszyną drążącą. W tym przypadku wycofywano przednią część tunelu, wytwarzając pustkę. W [16] opisano wyniki badań, dotyczące przemieszczeń oraz deformacji na powierzchni i pod powierzchnią terenu, wystąpienia efektu łukowania w gruncie, wpływu głębokości tunelu na wartości osiadania powierzchni, parametrów wpływających na osiadania tunelu. W artykule dotyczącym konstrukcji muru oporowego [17] autorzy zastosowali DIC jako jedną z metod uzupełniających [17]. Została ona wykorzystana w szczególności w zakresie wartości przemieszczeń i deformacji zasyпки.

W [18] przedstawiono badanie eksperymentalne modelu tunelu, którego celem była analiza zjawiska podnoszenia się dna obudowy i nawierzchni tunelu. Jeden z modeli przedstawiono na rysunku 9. Badano próbki w dwóch wariantach: z zaokrągleniem dna i bez zaokrąglenia. Rejestrację przemieszczeń

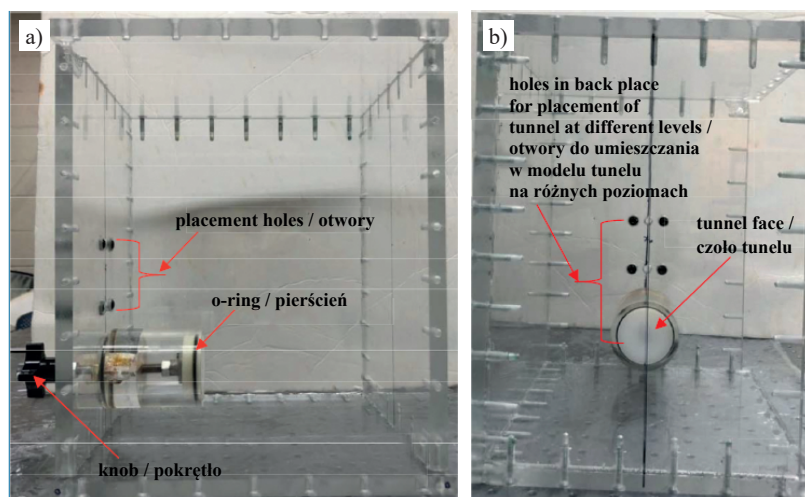


Photo 5. The box for tests: a) side view; b) front view [16]

Fot. 5. Forma do badań: a) widok boczny; b) widok z przodu [16]

tions, and also the mechanism of lethal damage, was recorded with the application of the DIC method. The analysis of the results of research allowed for determining the influence of side stresses and correlation between life and the casing shape. What was determined as well was the profile of a sample lethal damage; the concentration zones of displacements and deformations were also described.

Summary

For many years already, the Digital Image Correlation (the DIC) has been applied in geotechnical engineering and road engineering. Using this method allows for acquiring knowledge on, among others, road structures, granular environments, strengthening grounds and layered structures, and the stability of structures. In the majority of cases, the instances of applying the DIC concern a similar scope of topics, which require a case-by-case approach.

In the DIC laboratory research involving the application of the DIC method into loose materials is necessary to build case-by-case research stations. Recording the images of a surface adjacent to a wall of a box in which research is conducted requires the use of a transparent partition of a good quality. Choosing a partition appropriate in terms of thickness, and also of a material of which it is made, allows to ensure the proper boundary condition of research, their repeatability and a good quality of results. As it is presented in the publication concerning research into ground in a direct shear machine [13], the application of the DIC for laboratory research into granular materials is restricted only to the possibility of preparing an appropriate research equipment, which will allow for recording an image correctly.

The DIC method uses a spot structure to create a net of points on models' surfaces, necessary to analyse recorded images. In the case of granular materials, it is necessary to use, in order to construct a model, a material naturally having such a structure, for instance, granite, porphyry etc. If that is not possible, steps are taken to form an artificial spot structure of grains, e.g. granulating, painting grains etc.

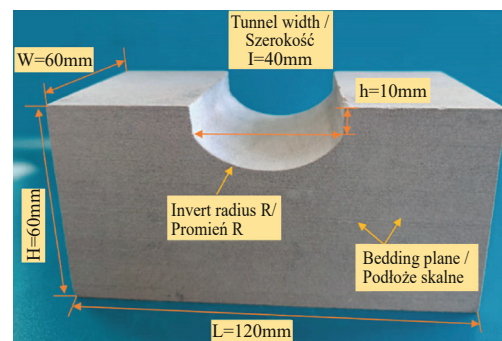


Fig. 9. Schematic diagram of the partial tunnel casing model [18]

Rys. 9. Wymiary elementu symulującego fragment obudowy tunelu [18]

i odkształceń oraz mechanizm zniszczenia zarejestrowano za pomocą metody DIC. Analiza wyników badań pozwoliła na określenie wpływu naprężeń bocznych i zależności trwałości od kształtu obudowy. Wyznaczono również charakterystykę zniszczenia próbki oraz opisano strefy koncentracji przemieszczeń i deformacji.

Podsumowanie

Od wielu lat metoda cyfrowej korelacji obrazu DIC znajduje zastosowanie w geotechnice i drogownictwie. Pozwala ona na uzyskanie wiedzy dotyczącej m.in konstrukcji drogowych, ośrodków ziarnistych, wzmocnienia gruntów i konstrukcji warstwowych, stateczności konstrukcji. W przedstawionych w artykule przykładach zastosowania DIC w większości przypadków konieczne jest indywidualne podejście.

W badaniach laboratoryjnych metodą DIC materiałów sypkich należy budować indywidualne stanowiska badawcze. Rejestrowanie obrazów powierzchni przyległej do ściany skrzyń wymaga zastosowania przegrody przezroczystej o dobrej jakości. Dobór odpowiedniej przegrody pod względem grubości przegrody oraz materiału, z jakiego jest wykonana, pozwoli zapewnić odpowiednie warunki brzegowe badania, ich powtarzalność i dobrą jakość wyników. Jak przedstawiono w publikacji dotyczącej badania gruntu w aparacie bezpośredniego ścinania [13], zastosowanie metody DIC do badań laboratoryjnych materiałów ziarnistych jest ograniczone tylko do przygotowania odpowiedniego sprzętu badawczego, który umożliwi właściwą rejestrację obrazu.

W metodzie DIC wykorzystuje się strukturę plamkową, aby tworzyć siatkę punktów na powierzchni modeli, która jest niezbędna do analizy rejestrowanych obrazów. W przypadku materiałów ziarnistych do budowy modelu konieczne jest zastosowanie materiału, który naturalnie charakteryzuje się strukturą plamkową, np. granitu, porfiru. Jeżeli nie ma takiej możliwości, to wykonuje się zabiegi, które powodują powstanie sztucznej struktury plamkowej ziaren, np. doziarnienie, malowanie ziaren

The DIC method may serve as complementary research for other measurements on the same research model. Field models, for which it is not possible to perform cross-section measurements, like in the DIC, may be plotted represented in laboratory conditions, and complemented with analysis with the application of the DIC method.

Metoda DIC może służyć jako badanie uzupełniające przy innych pomiarach na tym samym modelu badawczym. Modele terenowe, dla których nie ma możliwości wykonania pomiarów przekrojowych, takich jak w badaniach DIC, mogą zostać odwzorowane w warunkach laboratoryjnych i uzupełnione o analizy z wykorzystaniem metody DIC.

Received: 10.03.2025

Revised: 28.05.2025

Published: 21.08.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 10.03.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 28.05.2025 r.

Opublikowano: 21.08.2025 r.

Literature

- [1] Sutton MA, Ortu JJ, Schreier HW, Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Cambridge, MA, USA: MIT Press; 1986.
- [2] Walotek K, Bzówka J, Ciołczyk A, Examples of the Use of the ARAMIS 3D Measurement System for the Susceptibility to Deformation Tests for the Selected Mixtures of Coal Mining Wastes. *Sensors*, vol. 21, no. 13, pp. 695-701, 2021; <https://doi.org/10.3390/s21134600>
- [3] Larsson S, Gustafsson G, Oudich A, Jonsen P, Haggblad H-A. Experimental methodology for study of granular material flow using digital speckle photography. *Chemical Engineering Science*, vol. 155, pp. 524-536, 2016; <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.09.010>
- [4] 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*, vol. 108, pp. 183-196, 2019; <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.12.023>
- [5] Chien C-H, Su T-H, Huang C-J, Chao Y-J, Yeh W-L, Lam P-S. Application of digital image correlation (DIC) to sloshing liquids. *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 115, pp. 42-52, 2019; <https://doi.org/10.1016/j.optlas-eng.2018.11.016>
- [6] Larsson S, Gustafsson G, Oudich A, Jonsen P, Haggblad H-A. Low-cost digital image correlation and strain measurement for geotechnical applications. *Strain*, vol. 56, no. 74, pp. 1-15, 2020; <https://doi.org/10.1111/str.12348>
- [7] Huang F, Wu C, Ni P, Wan G, Zheng A, Jang B-A, Karekal S. Experimental analysis of progressive failure behavior of rock tunnel with a fault zone using non-contact DIC technique. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 132, 2020; <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104355>
- [8] Gadel R, Kalla S, Sudarsanan N, Karpurapu R. Assessment of load distribution mechanism in geocell reinforced foundation beds using Digital Imaging Correlation Techniques. *Transportation Geotechnics*, vol. 31, 2021; <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100664>
- [9] Rafi NI, Rahman MS, Tarin F, Sadeque MI. Distorted Path Analysis of Different Layered Soil Pressurized Under Uniform Displacement Rate: A Laboratory-based Study. *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 09, no. 09, 2022.
- [10] Mirzaeifar H, Hatami K, Abdi MR. Pullout testing and Particle Image Velocimetry (PIV) analysis of geogrid reinforcement embedded in granular drainage layers. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 50, no. 6, 2022, pp. 1083-1109; <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.06.008>
- [11] Liu Y, Zhao Y, Zhang D, Liu Z. The long-term mechanical performance of geogrid-reinforced soil retaining walls under cyclic footing loading. *Case Studies in Construction Materials*, 17, 2022; <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01642>
- [12] 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*, vol. 51, no. 3, pp. 390-404, 2023; <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2023.01.003>
- [13] Alhakim G, Núñez-Temes C, Ortiz-Sanz J, Arza-García M, Jaber L, Gil-Docampo ML. Experimental application and accuracy assessment of 2D-DIC in meso-direct-shear test of sandy soil. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 211, 2023; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112645>
- [14] Zhang RX, Su D, Lin XT, Zhu TF, Lei G, Chen XS. Investigation of the soil arching evolution in the ground with or without a tunnel. *Transportation Geotechnics*, vol. 43, 2023; <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101149>
- [15] Kwiecień S, Ihnatov S. Wpływ technologii wymiany dynamicznej na kształt kolumn w warunkach laboratoryjnych. *Materiały Budowlane*, vol. 1, no. 10, pp. 35-41, 2023; <https://doi.org/10.15199/33.2023.10.07>
- [16] Ads A, Shariful Islam M, Iskander M. Longitudinal settlements during tunneling in soft Clay, using transparent soil models. *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 136, 2023; <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105042>
- [17] Leśniewska D, Tordesillas A, Pietrzak M, Zhou S, Nitka M. Structured deformation of granular material in the state of active earth pressure. *Computers and Geotechnics*, vol. 157, 2023; <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105316>
- [18] Luo P, Li D, Zhang C, Ru W, Han Z, Ma J. Experimental investigation on biaxial mechanical properties of laminated rock and floor heave mechanism of tunnel based on DIC. *Engineering Failure Analysis*, vol. 156, 2024; <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107848>