

dr inż. Jarosław Górszczyk^{1)*}

ORCID: 0000-0001-5214-6587

dr inż. Konrad Malicki¹⁾

ORCID: 0000-0002-3493-953X

Badania deformacji geosiatki poliestrowej wykorzystywanej w inżynierii lądowej

Deformation tests of polyester geogrid used in civil engineering

DOI: 10.15199/33.2024.03.07

Streszczenie. Geosyntetyki to materiały powszechnie stosowane w inżynierii lądowej. W artykule przedstawiono zastosowanie bezkontaktowej metody pomiaru deformacji (digital image correlation method – DIC) w badaniach laboratoryjnych geosiatki ortogonalnej. W badaniach zrealizowanych metodą rozciągania wyznaczono rozkład przemieszczeń i odkształceń dla całej powierzchni badanych próbek. Ponadto określono wartości i wektory własne tensora odkształcenia. Zaobserwowano występowanie lokalnej koncentracji dużych wartości odkształceń głównych na powierzchniach badanych próbek. Potwierdzono skuteczność zastosowania metody cyfrowej korelacji obrazu (DIC) w przeprowadzonych analizach deformacji.

Słowa kluczowe: geosyntetyki; geosiatka; metoda cyfrowej korelacji obrazu (DIC); badanie wytrzymałości na rozciąganie; analiza deformacji.

Abstract. Geosynthetics are one of the materials widely used in civil engineering. The article presents the use of a non-contact deformation measurement method (digital image correlation method - DIC) in laboratory test of an orthogonal geogrid. In tests carried out using the tensile method, the distributions of displacements and strains were determined for the entire surface of the tested samples. Moreover, the principal values and principal directions of the strain tensor were determined. The occurrence of local principal strain accumulations on the surface of tested samples was observed. The effectiveness of the use of the digital image correlation (DIC) method in deformation analysis was confirmed.

Keywords: geosynthetics; geogrid; digital image correlation method (DIC); tensile test; deformation analysis.

Do rozwoju gospodarczego kraju potrzebna jest budowa nowych i modernizacja istniejących obiektów inżynierii lądowej. Jednym z ważnych obszarów rozwoju jest infrastruktura transportowa. Drogi samochodowe i kolejowe stanowią ważne elementy tej infrastruktury. Ze względu na rygorystyczne wymagania stawiane konstrukcjom nawierzchni drogowych i kolejowych powstaje potrzeba stosowania nowoczesnych materiałów. Takie podejście obejmuje wszystkie warstwy konstrukcyjne oraz warstwy ulepszonego podłoża gruntowego.

Jednym z nowoczesnych materiałów stosowanych obecnie w budownictwie są geosyntetyki, wytwarzane z różnego rodzaju polimerów. Na budowę dostarcza się je zazwyczaj w rolkach, które następnie są rozwijane i układane w postaci płaskich arkuszy. Geosyntetyki stanowią dużą gamę produktów, umożliwiającą realizację różnych zadań [1, 2]. Mogą spełniać np. funkcję zbro-

jącą, separującą lub filtracyjną. W przypadku funkcji zbrojącej ważnymi parametrami są wytrzymałość oraz wydłużenie materiału podczas rozciągania. Ma to szczególne znaczenie np. przy budowie nasypów zbrojonych geosyntetykami [3]. Geosyntetyki jako zbrojenie mogą być stosowane w przypadku wzmocnienia słabego, rodzimego podłoża gruntowego. Możliwe jest również użycie samych włókien z tworzyw sztucznych w postaci zbrojenia rozproszonego.

Innym aspektem stosowania geosyntetyków jest korzystanie z właściwych parametrów materiałowych na etapie projektowania konstrukcji [4]. Jest to szczególnie istotne w przypadku materiałów niejednorodnych lub anizotropowych. W praktyce budowlanej często stosowane są geosyntetyki, których właściwości mechaniczne uzależnione są od kierunku badania, np. geosiatka ortogonalna lub heksagonalna. Przy projektowaniu obiektów budowlanych z geosyntetykami zalecane jest uwzględnienie tzw. długoterminowej wytrzymałości geosyntetyku zbrojącego. Jest ona uzależniona od czynników środowisko-

wych, montażowych i materiałowych oraz od krótkoterminowej wytrzymałości produktu, którą bada się laboratoryjnie [5]. Parametry mechaniczne określone w badaniach laboratoryjnych mają zatem istotny wpływ na trwałość i bezpieczną eksploatację całej budowli zbrojonej geosyntetykami. W badaniach właściwości geosyntetyków wykorzystuje się zarówno metody normowe, jak i nowo opracowane koncepcje badawcze [6, 7]. W standardowych metodach bazuje się zazwyczaj na pomiarach z użyciem systemu optycznego, który wykorzystuje pojedyncze bazy pomiarowe o określonej długości. Takie podejście nie daje możliwości badania i analizy deformacji całej powierzchni badanej próbki. Jest to natomiast możliwe z zastosowaniem metody cyfrowej korelacji obrazu (*Digital Image Correlation* – DIC). Metoda ta została opracowana pod koniec dwudziestego wieku. Historia i założenia metody DIC zostały szczegółowo przedstawione w literaturze [8, 9]. Jest ona obecnie stosowana w ośrodkach naukowych w badaniach różnych materiałów [10, 11], ale nie jest jeszcze objęta procedurami normowy-

¹⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

^{*} Adres do korespondencji: jgorszcz@pk.edu.pl

mi. Istotną jej zaletą jest możliwość pomiaru deformacji zarówno małych elementów, jak i całych fragmentów konstrukcji budowlanych. Metoda umożliwia także analizowanie rys i propagacji pęknięć w badanych materiałach i konstrukcjach. Przy jej stosowaniu występują pewne uwarunkowania i ograniczenia, które dotyczą właściwego oświetlenia badanego elementu oraz odpowiedniego przygotowania obserwowanej powierzchni [10].

Celem artykułu jest przedstawienie wybranych wyników pomiarów i analiz deformacji całych powierzchni badanych próbek geosiatki poliestrowej z wykorzystaniem metody cyfrowej korelacji obrazu (DIC).

Metoda badań

Metoda DIC jest zaliczana do grupy metod optycznych, nieinterferometrycznych. Przed rozpoczęciem badań należy dokonać kalibracji systemu, a podczas badania tworzona jest korelacja pomiędzy kolejnymi obrazami badanego elementu. Obraz zostanie zapisany jako zbiór małych obszarów rozmieszczonych wokół punktów wirtualnej siatki. Algorytm korelacji pozwala na wyznaczenie transformacji współrzędnych punktów analizowanej powierzchni. Parametry transformacji współrzędnych (u , v) są określane na podstawie przemieszczenia (a_0 , a_4), wydłużenia (a_1 , a_6), ścinania (a_2 , a_5) oraz zdeformowania (a_3 , a_7) obszaru za pomocą równania (1), gdzie zmienne (x , y) są współrzędnymi punktu w znormalizowanej płaszczyźnie obrazu [7, 12]:

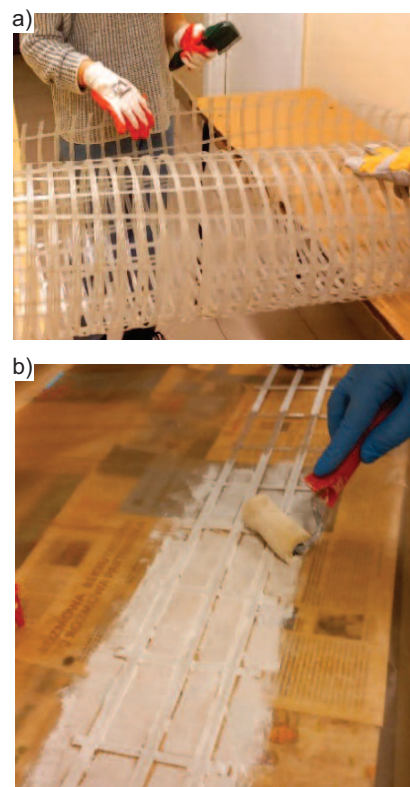
$$u(a_0, a_1, a_2, a_3, x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy \quad (1)$$

$$v(a_4, a_5, a_6, a_7, x, y) = a_4 + a_5x + a_6y + a_7xy$$

Elementy transformacji wykorzystane w algorytmie zostały pokazane na rysunku 1 [7, 12].

Badaniom poddano teksturowaną, ortogonalną geosiatkę poliestrową przeznaczoną do zbrojenia warstw gruntu lub kruszywa. Węzły geosiatki zostały wykonane metodą spawania polimeru [13]. Badania laboratoryjne zrealizowano na serii trzech próbek o wymiarach 120 x 12 cm. Istotny wpływ na dokładność uzyskiwanych wyników ma sposób przygotowania powierzchni próbki. Konieczne jest, aby na obserwowanym obszarze widoczny był wyraźny układ punktów rozmieszczony losowo. W pierwszym etapie próbkę pomalowano na jednolity biały kolor. Następnie na tak przygotowaną powierzchnię naniesiono w sposób losowy czarne kropki. Sposób przygotowania próbek pokazano na fotografii 1.

Badania zrealizowano zgodnie z normą PN-EN 10319 [14] metodą rozciągania szerokich próbek na kierunku MD (wzdłuż pasma). Ten kierunek wykorzystywany jest jako zbrojenie. Drugi kierunek geosiatki pełni funkcję pomocniczą, zapewniając stały rozstaw żeber zbrojenia głównego. Badania przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym bazującym na serwo-hydraulicznej maszynie wytrzymałościowej MTS Landmark. Stanowisko zostało wyposażone w uchwyty rolkowe umożliwiające bezzaciskowe mocowanie próbek badanej siatki. Ich specjalna konstrukcja zabezpiecza geosyntetyk przed wysunięciem się z rolek podczas badania. Dodatkowo stanowisko zostało rozbudowane o kamerę o rozdzielczości 5,0 Mpx i oświetlenie liniowe systemu DIC. Zastosowano system 2D wraz z oprogramowaniem Istra 4D [15]. Badania przeprowadzono w temperaturze $+22 \pm 1^\circ\text{C}$, prędkość przyrostu przemieszczenia pionowego wyniosła 20 mm/min [14]. Stanowisko laboratoryjne przygotowane do badania oraz zniszczoną próbkę po zakończeniu badania pokazano na fotografii 2.

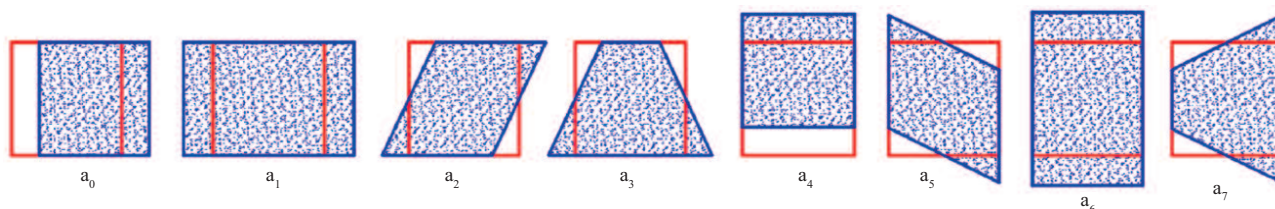


Fot. 1. Przygotowanie próbek geosiatki: a) wycinanie; b) malowanie

Photo 1. Preparation of geogrid samples: a) cutting; b) painting

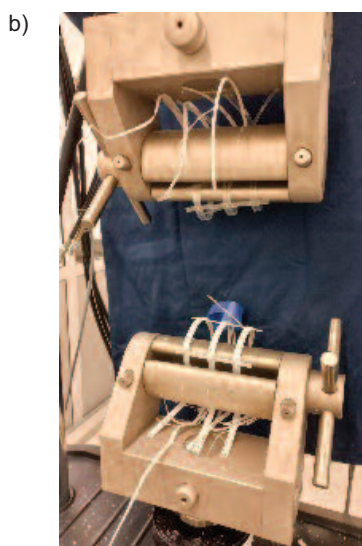
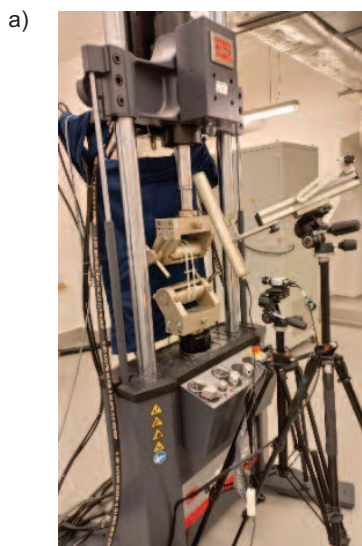
Analiza wyników

W badaniach wyznaczono zależność pomiędzy przyłożoną siłą rozciągającą a odpowiadającym przemieszczeniem, a następnie, bazując na tych danych, obliczono naprężenia i odkształcenia. Do określenia naprężeń nominalnych wykorzystano pole początkowe przekroju poprzecznego pojedynczego żebra geosiatki. Pomierzone średnie pole powierzchni wyniosło 10,32 mm². Badane próbki miały trzy żebra na kierunku działającej siły. Siłę rozciągającą rozłożono na powierzchnię przekroju poprzecznego trzech żeber, a wynik oznaczono jako naprężenie nominalne [MPa]. Odkształcenia rzeczywiste obliczono jako średnią wartość maksymalnych odkształceń głównych z trzech żeber geosiatki (rysunek 2).



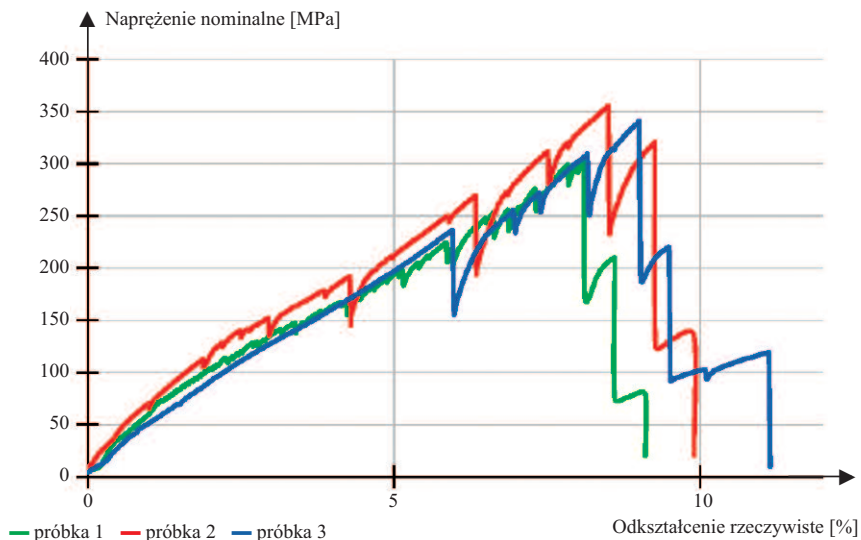
Rys. 1. Elementy użyte w algorytmie transformacji

Fig. 1. Graphical representation of the parameters used in the transformation algorithm



Fot. 2. Stanowisko laboratoryjne wykorzystane w badaniach (a) oraz próbka zniszczona podczas badania (b)
 Photo 2. Laboratory stand used in the tests (a) and the sample destroyed during the test (b)

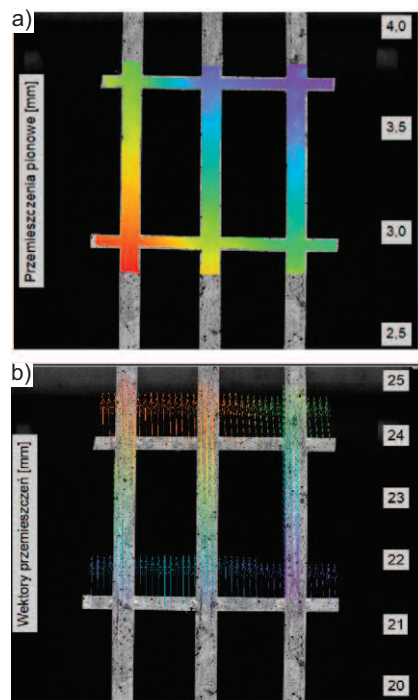
Podczas badania w fazie przed zniszczeniem zaobserwowano chwilowe, gwałtowne zmiany wartości siły rozciągającej (naprężeń nominalnych). Takie zachowanie próbek wynikało z włóknistej struktury żeber badanej geosiatki. Żebra geosiatki zbudowane są z małych wiązek włókien połączonych między sobą. Pęknięcie jednej z wiązek powoduje chwilowe zmniejszenie nośności całej próbki i spadek przenoszonych sił, a następnie redystrybucję sił wewnętrznych na pozostałe, nieuszkodzone jeszcze wiązki. To z kolei powoduje zwiększenie siły rozciągającej (naprężenia nominalnego) przenoszonych przez próbkę. W końcowej fazie badania (faza pokry-



Rys. 2. Zależność naprężenie [MPa] – odkształcenie [%] w badaniu rozciągania geosiatki
 Fig. 2. Stress [MPa] – strain [%] curve in geogrid tensile testing

tyczna) zaobserwowano typowy dla geosiatek przebieg krzywej naprężenie-odkształcenie. Pękanie kolejnych, całych żeber powodowało skokowe zmniejszenie naprężeń w badanej próbce. Na podstawie badań wyznaczono średnią wartość nośności geosiatki na rozciąganie w przeliczeniu na metr szerokości geosyntezy. Wartość ta wyniosła 86,2 kN/m, przy współczynniku zmienności 7,6%. Uzyskana nośność przekroczyła deklarowaną przez producenta wartość 80 kN/m [13], co świadczy o bardzo dobrej jakości badanego materiału.

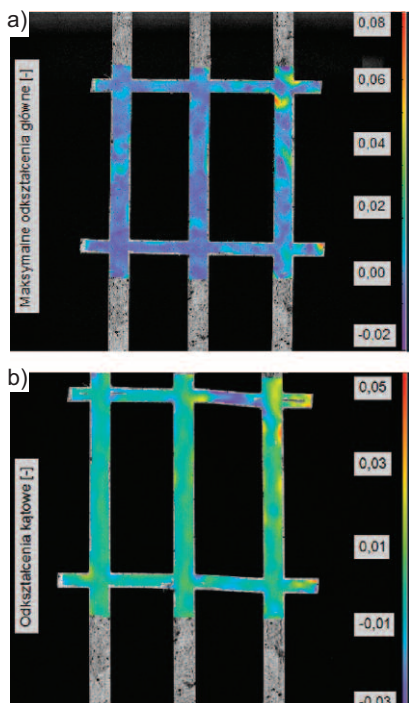
Następny etap prac obejmował analizę deformacji całych powierzchni próbek. Na początku wyznaczono pola przemieszczeń w wybranych kierunkach oraz wektory przemieszczeń w przypadku analizowanych powierzchni. Podczas badania stwierdzono występowanie zmienności kierunku i wartości wektora przemieszczeń na powierzchni geosiatki. Możliwość obserwacji przemieszczeń na całej badanej powierzchni daje znacznie większe możliwości analizy deformacji próbki w porównaniu z tradycyjnymi metodami pomiarowymi, które ograniczają się tylko do lokalnej bazy. Ma to istotne znaczenie w przypadku badania materiałów niejednorodnych lub anizotropowych. W analizach zwrócono szczególną uwagę na początkową i końcową fazę badania. Przemieszczenia wybranej próbki w początkowym i końcowym etapie badania pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Przemieszczenia [mm] powierzchni wybranej próbki: a) wertykalne w przypadku siły 0,2 kN; b) kierunki i wartości wektora przemieszczenia w przypadku siły 8 kN
 Fig. 3. Displacements [mm] of the selected surface samples: a) vertical in the case of load 0.2 kN; b) directions and values of the displacement vector in the case of a load of 8 kN

Kolejny etap prac objął analizę odkształceń powierzchni próbek. Wyznaczanie tensorów odkształceń otwiera duże możliwości wykorzystania różnych hipotez wyteżeńowych stosowanych przy projektowaniu materiałów i konstrukcji budowlanych. Stanowi to

istotną zaletę zastosowanej metody pomiarowej. Na rysunku 4a pokazano rozkład maksymalnych odkształceń głównych, a na rysunku 4b odkształceń kątowych w przypadku wybranych poziomów siły rozciągającej.



Rys. 4. Odkształcenia powierzchni wybranej próbki: a) maksymalne odkształcenia główne przy sile rozciągającej 0,2 kN; b) odkształcenia kątowe w przypadku siły rozciągającej 10 kN

Fig. 4. Strains of the selected surface samples: a) maximum true principal strains at a tensile load of 0.2 kN; b) XY strains at a tensile load of 10 kN

Rozkłady odkształceń uzyskane podczas próby rozciągania wskazują na występowanie niejednorodności w pracy całej struktury geosiatki. W przypadku jednej z badanych próbek zaobserwowano koncentrację odkształceń w obszarze przylegającym do miejsca łączenia skrajnego, żebra pionowego oraz górnego żebra ułożonego w kierunku poziomym. Dalsza analiza tensora odkształceń potwierdziła zmienność deformacji próbki w tym obszarze. Takie zachowanie próbki może być związane z niejednorodnością badanego materiału lub niesymetrycznymi warunkami zamocowania. Wykrycie obszarów koncentracji odkształceń oraz możliwość wyznaczenia i analizy pełnego tensora odkształceń na etapie nukleacji i propagacji pęknięcia

może stanowić podstawę do optymalizacji geometrii oraz właściwości badanego materiału.

Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono możliwość zastosowania metody DIC do bezkontaktowego pomiaru deformacji w badaniu rozciągania geosiatki ortogonalnej. Wykonano analizy przemieszczeń i odkształceń występujących na powierzchni próbki. **Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:**

- możliwość wyznaczenia przemieszczeń na całej powierzchni badanej próbki stanowi istotną zaletę zastosowanej metody i nie jest możliwe z zastosowaniem tradycyjnych, kontaktowych i optycznych metod pomiarowych;

- na krzywych naprężenie-odkształcenie uzyskanych w badaniach zaobserwowano chwilowe zmiany (nagły spadek i wzrost) wartości naprężeń nominalnych w fazie przed zniszczeniem. Takie zachowanie próbek mogło wynikać z faktu, że żebra, które są zbudowane z połączonych między sobą pojedynczych wiązek włókien, niszczą się etapami. Pęknięcie jednej z takich wiązek i towarzysząca temu redystrybucja sił rozciągających na inne wiązki powodują chwilową zmianę nośności próbki. Geosiatka jako całość nadal przenosi zwiększające się obciążenie, aż do zniszczenia całego żebra;

- w końcowej (pokrytycznej) fazie badania geosiatek zaobserwowano typowy przebieg krzywej naprężenie-odkształcenie. Pęknięcie kolejnych żeber powodowało skokowe zmniejszanie nośności, aż do zniszczenia całej struktury próbki;

- wyznaczone tensory odkształcenia pozwoliły na zaobserwowanie na badanej próbce miejsc koncentracji odkształceń w obszarze jednego z węzłów geosiatki. Takie zachowanie próbki mogło być związane z niejednorodnością badanego materiału lub niesymetrycznymi warunkami zamocowania. Możliwość spostrzeżenia takiej zmienności potwierdza skuteczność zastosowania metody DIC w badaniach deformacji geosiatki.

Literatura

- [1] Zornberg JG. Functions and Applications of Geosynthetics In Roadways. *Procedia Eng.* 2017; DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.048.
- [2] Bednarek W. Wybrane rozwiązania zwiększające trwałość podsyпки tuczniowej eksploatawanej nawierzchni kolejowej. *Materialy Budowlane.* 2023; DOI: 10.15199/33.2023.10.09.
- [3] van Eekelen SJM, Han J. Geosynthetic-reinforced pile-supported embankments: state of the art. *Geosynth. Int.* 2020; DOI: 10.1680/jgein.20.00005.
- [4] Tang X, Stoffels SM, Palomino AM. Mechanistic-empirical approach to characterizing permanent deformation of reinforced soft soil subgrade. *Geotext. Geomembr.* 2016; DOI: 10.1016/j.geotexmem.2015.06.004.
- [5] Johnson A. Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements – EBGeo. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 2011.
- [6] Peng X, Zornberg JG. Evaluation of soil-geogrid interaction using transparent soil with laser illumination. *Geosynth. Int.* 2019; DOI: 10.1680/jgein.19.00004.
- [7] Górszczyk J, Malicki K. New approach to junction efficiency analysis of hexagonal geogrid using digital image correlation method. *Geotext. Geomembr.* 2023; DOI: 10.1016/j.geotexmem.2023.04.009.
- [8] Sutton MA, Orteu JJ, Schreier H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications. Springer Science & Business Media, 2009.
- [9] Tan C-S, Karuppanan S, Khoo S-W. A Review of Surface Deformation and Strain Measurement Using Two-Dimensional Digital Image Correlation. *Metro. Meas. Syst.* 2016 Vol 23 No 3 461-480, 2016, Dostęp: 22 listopad 2023. [Online]. Dostępne na: <https://journals.pan.pl/dlibra/publication/121997/edition/106333>.
- [10] Górszczyk J, Malicki K, Zych T. Application of Digital Image Correlation (DIC) Method for Road Material Testing. *Materials.* 2019; DOI: 10.3390/ma12152349.
- [11] Jezierski D, i in. A comparison of elastoplastic parameters of S355 steel obtained in tensile tests using an extensometer, a strain gauge and an ARAMIS 3D DIC system. *Arch. Civ. Eng.* 2022. Dostęp: 22 listopad 2023. [Online]. Dostępne na: <https://journals.pan.pl/dlibra/publication/143034/edition/125674>.
- [12] Herbst V, Splithof K, Ettmeyer A. New Features in Digital Image Correlation Techniques. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2005. Dostęp: 22 listopad 2023. [Online]. Dostępne na: <https://doi.org/10.4271/2005-01-0897>.
- [13] Technical Specifications. Secugrid® R6". NAUE GmbH, Germany, 2021.
- [14] EN ISO 10319. Geosynthetics, Wide-Width Tensile Test. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2015.
- [15] Digital Image Correlation (DIC) – 3D Full-Field Measurement, Dantec Dynamics – Precision Measurement Systems & Sensors. Dostęp: 21 listopad 2023. [Online]. Dostępne na: <https://www.dantecdynamics.com/solutions/digital-image-correlation-dic/>.

Przyjęto do druku: 13.02.2024 r.