ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: BUDOWNICTWO z. 104 Nr kol. 1695

Krzysztof MALESIŃSKI*
Politechnika Gdańska

ZASTOSOWANIE TECHNIKI *PIV* DO WYZNACZANIA PRZEMIESZCZEŃ PODŁOŻA GRUNTOWEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono nową metodę wyznaczania przemieszczeń podłoża gruntowego za pomocą techniki *PIV* (*Particle Image Velocimetry*). Zamieszczono przykładowe wyniki własnych badań modelowych stateczności fundamentów bezpośrednich uzyskane tą metodą.

APPLICATION OF *PIV* TECHNIQUE FOR DETERMINATION OF SUBSOIL DEFORMATIONS

Summary. The new method determination of subsoil deformations using *PIV* (*Particle Image Velocimetry*) technique was shown in this paper. An example results of own model tests obtained by use of this method were also presented.

1. Wstęp

Zapoczątkowany pod koniec lat 90. XX wieku gwałtowny rozwój techniki, a w szczególności techniki audiowizualnej oraz upowszechnienie zastosowań coraz wydajniejszych komputerów zainicjowały powstanie nowych oraz udoskonalenie istniejących technik pomiaru przemieszczeń, umożliwiając znacznie szybsze realizowanie geotechnicznych badań modelowych i uzyskiwanie bardziej szczegółowych informacji o przemieszczeniach podłoża gruntowego. Zmianie uległ głównie sposób rejestracji obrazu, w którym fotografię analogową zastąpiono znacznie wygodniejszą do obróbki fotografią cyfrową. Zmienił się również zasadniczo sposób określania trajektorii przemieszczeń gruntu, które w metodach klasycznych wyznaczano „ręcznie" rysując wektory przemieszczenia znaczników punktowych umieszczanych w badanym gruncie. W metodach nowoczesnych przemieszczenia wyznaczane są za pomocą specjalistycznych programów komputerowych na podstawie analizy serii zdjęć cy-

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Bohdan Zadroga

frowych wykonywanych podczas badania. Ponadto, dzięki zastosowaniu techniki *PIV (Particle Image Velocimetry)*, będącej tematem artykułu, możliwe jest wyznaczanie trajektorii przemieszczeń gruntu bez dodatkowego stosowania specjalnych znaczników punktowych, których układanie podczas wykonywania zasypu nastręcza dużo trudności i znacznie wydłuża proces przygotowywania podłoża gruntowego do badań.

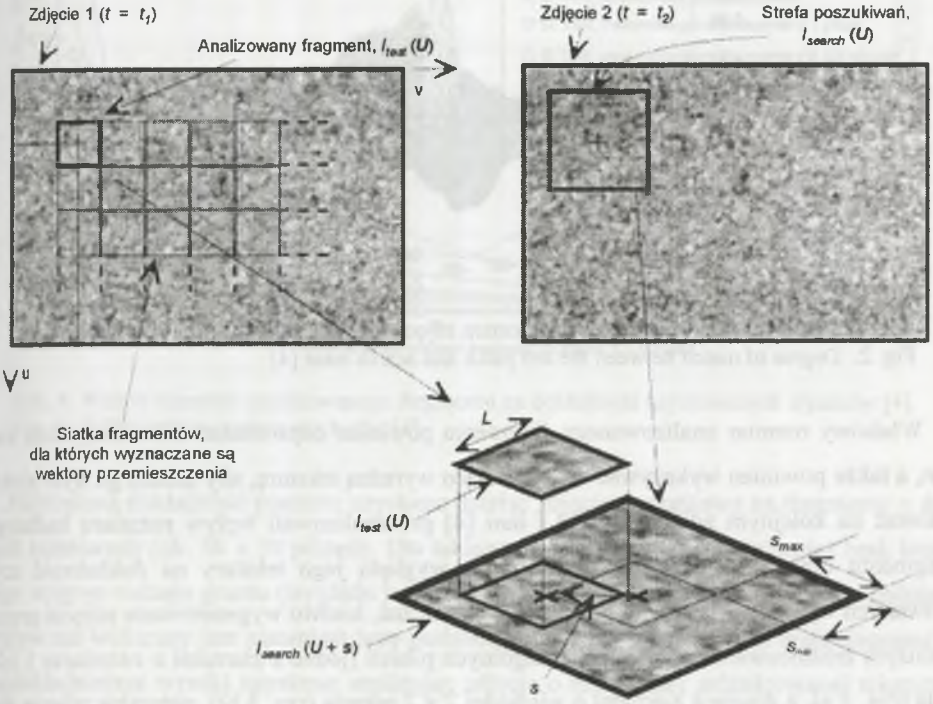
2. Podstawy teoretyczne techniki *PIV*

PIV (Particle Image Velocimetry) jest techniką służącą do wyznaczania przemieszczeń, opracowaną w 1991 r. i stosowaną pierwotnie w mechanice płynów do określenia pola przepływu cieczy [1]. Pole to określa się poprzez analizę porównawczą pary zdjęć przedstawiających wybrany fragment pola przepływu, wykonanych w określonym odstępie czasu. Aby uzyskać jak najdokładniejsze wyniki, fotografowane pole przepływu powinno mieć istotnie zróżnicowaną i kontrastową teksturę. W tym celu do przepływającej cieczy dodaje się specjalne substancje (np. polistyrenowe kuleczki lub barwiony proszek), pełniące funkcję znaczników i śledzi się ich przemieszczenie.

Po raz pierwszy technikę tę, zastosowano w geotechnice w 2001 roku na Uniwersytecie w Cambridge [3]. Przemieszczenia gruntu w badaniach modelowych można rozpatrywać jako proces powolnego przepływu. W przeciwieństwie do cieczy, piasek ma naturalnie zróżnicowaną teksturę, na którą składają się różnokolorowe ziarna oraz oświetlone i zacienione obszary pomiędzy przylegającymi do siebie ziarnami. Teksturę gruntów spoistych, która naturalnie jest jednolita i mało zróżnicowana, można *sztucznie urozmaicić* dodając włóknisty materiał lub drobny piasek.

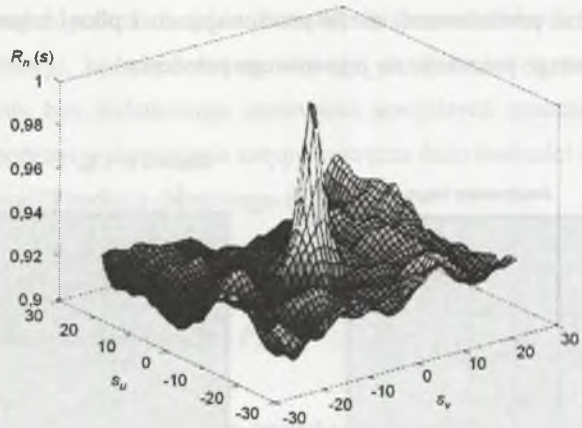
Określenie przemieszczenia gruntu naturalnego metodą *PIV* na podstawie analizy porównawczej pary cyfrowych zdjęć przedstawiających teksturę analizowanego obszaru gruntu odbywa się poprzez wyszukiwanie fragmentów zdjęcia początkowego na zdjęciu następnym. Schematycznie przedstawiono to na rys. 1 i 2. W tym celu pierwsze zdjęcie dzieli się na siatkę analizowanych kolejno fragmentów, z których każdy rozpatrywany jest jako macierz obrazu $I_{test}(U)$ o rozmiarze L x L pikseli. Do wyznaczenia przemieszczeń tak wydzielonych fragmentów konieczne jest założenie dla każdego z nich strefy poszukiwań $I_{search}(U+s)$ na zdjęciu drugim. Strefa poszukiwań jest rozszerzona w stosunku do analizowanego fragmentu zdjęcia pierwszego w obie strony na kierunkach u i v o odległość s_{max}. Odległość ta zależy od wielkości przemieszczenia gruntu, które miało miejsce w czasie pomiędzy wykonaniem analizowa-

nej pary zdjęć. W tak zdefiniowanej strefie przesuwając co 1 piksel odpowiadający jej fragment zdjęcia pierwszego poszukuje się jego nowego położenia.



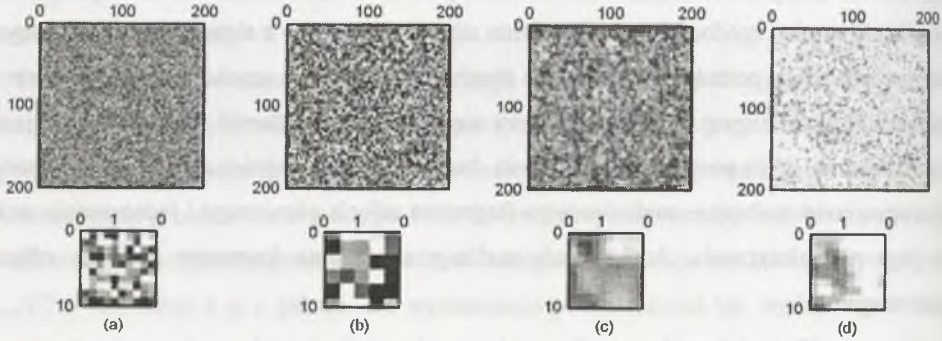
Rys. 1. Etapy analizy obrazu w technice *PIV* [4]
Fig. 1. Image manipulation during *PIV* analysis [4]

Dla każdego położenia, na podstawie korelacji krzyżowej macierzy $I_{test}(U)$ i $I_{search}(U+s)$ określa się stopień zgodności $R_n(s)$ fragmentu zdjęcia pierwszego z aktualnie porównywanym fragmentem strefy poszukiwań na zdjęciu drugim. Na podstawie uzyskanych stopni zgodności i ich krzywoliniowej interpolacji tworzy się tzw. mapę zgodności fragmentu ze zdjęcia pierwszego ze strefą poszukiwań na zdjęciu drugim (rys. 2). Największy stopień zgodności wyznacza nowe położenie analizowanego fragmentu zdjęcia pierwszego i jednocześnie wektor jego przemieszczenia. Analogicznie analizuje się kolejne fragmenty siatki ze zdjęcia pierwszego.

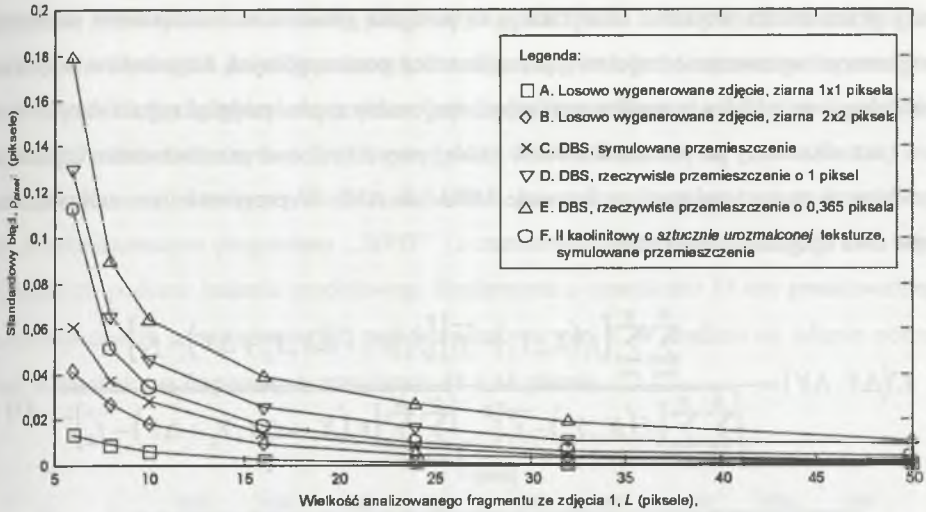


Rys. 2. Mapa zgodności pomiędzy fragmentem zdjęcia początkowego i strefą poszukiwań [4]
Fig. 2. Degree of match between the test patch and search zone [4]

Właściwy rozmiar analizowanego fragmentu powinien odpowiadać kilku średnicom ziaren, a także powinien wykazywać wystarczająco wyraźną teksturę, aby można go było zlokalizować na kolejnym zdjęciu. White i inni [4] przeanalizowali wpływ rozmiaru badanego fragmentu oraz rodzaju gruntu, a właściwie wyglądu jego tekstury na dokładność uzyskiwanych wyników. Analizom poddano dwa sztuczne, losowo wygenerowane zdjęcia gruntu o dużym zróżnicowaniu odcieni poszczególnych pikseli (jedno z ziarnami o rozmiarze 1 piksela (rys. 3 a), a drugie z ziarnami o wielkości 2 x 2 piksele (rys. 3 b)), naturalne zdjęcie piasku Dog's Bay (rys. 3 c) oraz zdjęcie iłu kaolinitowego o *sztucznie urozmaiconej* teksturze (rys. 3 d). Wyniki tych analiz zestawiono na rys. 4.



Rys. 3. Zdjęcia użyte do analizy wpływu rozmiaru fragmentu na dokładność uzyskiwanych wyników (wymiary w pikselach) [4]
Fig. 3. Images used in *PIV* validation experiments (axes in pixels) [4]



Rys. 4. Wpływ rozmiaru analizowanego fragmentu na dokładność uzyskiwanych wyników [4]
Fig. 4. *PIV* precision against patch size [4]

Największą dokładność pomiaru uzyskano dzieląc zdjęcie początkowe na fragmenty o dużych rozmiarach (ok. 50 x 50 pikseli). Dla takiego podziału stwierdzono również brak istotnego wpływu rodzaju gruntu (wyglądu jego tekstury) na dokładność uzyskiwanych wyników. Wpływ ten widoczny jest natomiast przy podziale zdjęcia początkowego na małe fragmenty. Najdokładniejsze wyniki uzyskano analizując zdjęcia o najbardziej zróżnicowanej teksturze (zdjęcia wygenerowane losowo), nieco mniejszą dokładnością charakteryzują się wyniki analiz zdjęć piasku Dog's Bay i iłu kaolinitowego, na których zasymulowano ich przemieszczenie (zdjęcie drugie powstało przez przesunięcie zdjęcia pierwszego). Symulowane przemieszczenie miało na celu wyeliminowanie wpływu zmienności oświetlenia i ewentualnych drgań aparatu. Najgorsze pod względem dokładności wyniki otrzymano analizując zdjęcia rzeczywistego przemieszczenia gruntu o mało zróżnicowanej teksturze.

3. Przykładowe wyniki własnych badań modelowych

Wykorzystywanie techniki *PIV* w geotechnicznych badaniach modelowych prowadzonych w Katedrze Geotechniki Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej rozpoczęto w styczniu 2005 r. Do wyznaczenia przemieszczeń podłoża gruntowego wykorzystano bezpłatny moduł (toolbox) do programu MATLAB o nazwie „*MPIV*" [2] zmodyfiko-

wany przez autora artykułu. Modyfikacja ta polegała głównie na rozszerzeniu możliwości programu o: wyznaczanie trajektorii przemieszczeń poszczególnych fragmentów zdjęcia początkowego na podstawie analizy serii zdjęć, opcjonalny zapis i podgląd uzyskiwanych wyników (aktualizowany po przeanalizowaniu każdej pary zdjęć) oraz przedstawianie uzyskanych wyników w postaci animacji w formacie MPG lub AVI. W programie tym zaimplementowano dwa opcjonalne algorytmy:

$$C(\Delta X,\Delta Y)=\frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left[f_1(X_i,Y_j)-\overline{f_1}\right]\left[f_2(X_i+\Delta X,Y_j+\Delta Y)-\overline{f_2}\right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left[f_1(X_i,Y_j)-\overline{f_1}\right]^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left[f_2(X_i+\Delta X,Y_j+\Delta Y)-\overline{f_2}\right]^2}} \quad (1)$$

$$C(\Delta X,\Delta Y)=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left|f_1(X_i,Y_j)-f_2(X_i+\Delta X,Y_j+\Delta Y)\right| \quad (2)$$

gdzie:

f_1 – wartość liczbowa analizowanego piksela z fragmentu zdjęcia 1,

f_2 – wartość liczbowa piksela ze strefy poszukiwań na zdjęciu 2 porównywanego z pikselem o wartości f_1,

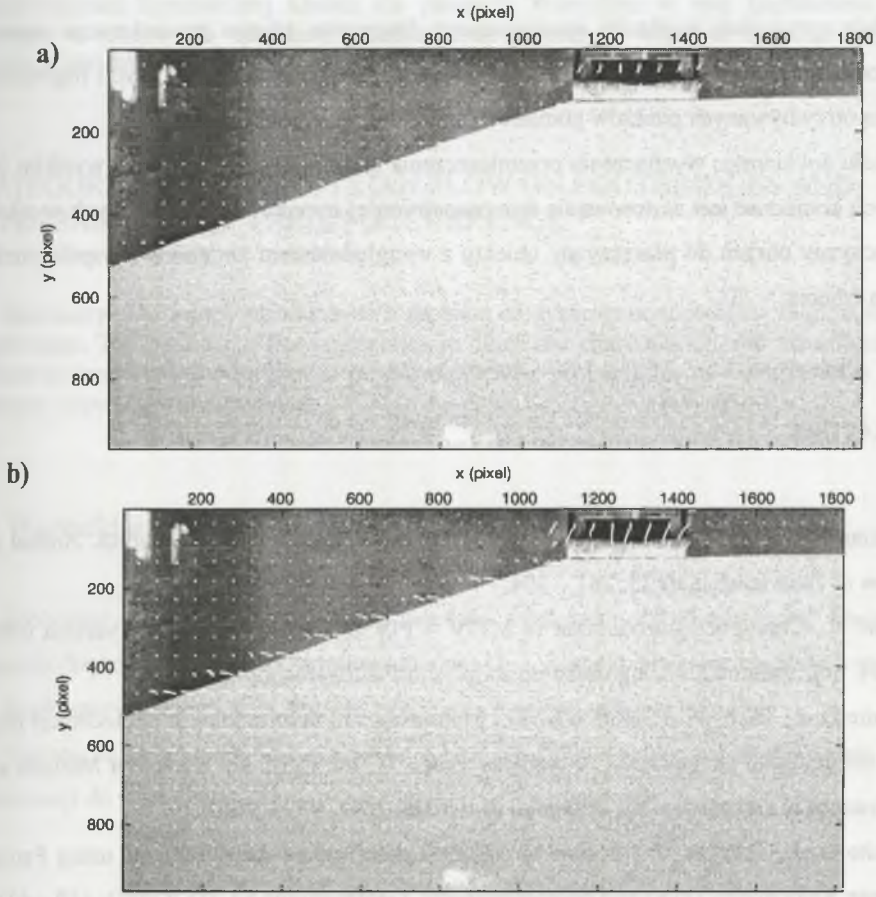
N – rozmiar fragmentu, na jakie podzielono zdjęcie początkowe.

Pierwszy z nich to wspomniany już wcześniej algorytm korelacji krzyżowej (1), w którym poszukiwana jest największa wartość C wyznaczająca nowe położenie analizowanego fragmentu zdjęcia pierwszego. Algorytm ten jest szybki, lecz ma jedną wadę – nie nadaje się do analizy zdjęć o mało zróżnicowanej teksturze. Potwierdziło się to także w przypadku analizy zdjęć z własnych badań modelowych. Drugi zaś to algorytm *MQD* (*Minimum Quadric Differences*) (2), w którym nowe położenie analizowanego fragmentu początkowego zdjęcia wskazuje najmniejszą wartość C. Pomimo dłuższego czasu obliczeń sprawdza się on doskonale w przypadku analizy zdjęć o mało zróżnicowanej teksturze.

Analizie techniką *PIV* poddano zdjęcia wykonane podczas serii badań modelowych fundamentów bezpośrednich posadowionych na zboczu z gruntu naturalnego. Przebieg każdego badania fotografowano z częstotliwością jednego zdjęcia na minutę, co w efekcie pozwalało uzyskać około 20 ÷ 30 zdjęć z jednego badania. Przy założeniu jednakowej skali na całym zdjęciu, jeden piksel zdjęcia odpowiadał w przybliżeniu 0,5 mm fotografowanego obiektu, co

odpowiada średniej wielkości ziarna piasku użytego do badań modelowych. Piasek ten charakteryzował się bardzo jednolitą teksturą. Przed przystąpieniem do wyznaczania przemieszczeń wszystkie zdjęcia wykonane podczas badań przekonwertowano z 24-bitowej palety kolorów (16,7 milionów kolorów) do 8-bitowej palety 256 odcieni szarości.

Przykładowe trajektorie przemieszczeń podłoża gruntowego uzyskane na podstawie analizy zmodyfikowanym programem „*MPIV*" (z zastosowaniem algorytmu *MQD*) serii zdjęć wykonanych podczas badania modelowego fundamentu o szerokości 15 cm posadowionego na koronie zbocza o nachyleniu 20° przedstawiono na rys. 5. W analizie tej zdjęcie początkowe podzielono na fragmenty o rozmiarach 48 x 48 pikseli.



Rys. 5. Fundament bezpośredni o szerokości 15 cm posadowiony na koronie zbocza o nachyleniu 20°. Trajektorie przemieszczeń podłoża gruntowego w fazie sprężystej a) i plastycznej b)

Fig. 5. Shallow foundation (width 15 cm) on the crest of slope (inclination angle 20°). Trajectories of subsoil deformations in elastic a) and plastic phase b)

4. Podsumowanie

Technika *PIV*, stworzona pierwotnie na potrzeby mechaniki płynów, umożliwia również wyznaczenie wektorów i trajektorii przemieszczeń podłoża gruntowego bez konieczności stosowania znaczników punktowych, co znacząco wpływa na przyśpieszenie i ułatwienie przygotowania podłoża gruntowego do badań modelowych. Wyniki uzyskiwane przy jej użyciu charakteryzują się większą dokładnością niż wyniki uzyskiwane na podstawie obserwacji przemieszczeń znaczników punktowych. Technika ta pozwala na analizowanie przemieszczeń podłoża gruntowego na podstawie bardzo dużej liczby punktów pomiarowych, co nie było możliwe ze względów technicznych przy zastosowaniu znaczników punktowych.

Wybór optymalnej wielkości analizowanego fragmentu zdjęcia początkowego stanowi kompromis pomiędzy precyzją wyznaczenia nowego położenia poszczególnych fragmentów a ilością otrzymywanych punktów pomiarowych.

W celu dokładnego wyznaczenia przemieszczenia gruntu, a także uzyskania wyników ilościowych konieczne jest zastosowanie fotogrametrycznej transformacji uzyskanych wyników z płaszczyzny obrazu do płaszczyzny obiektu z uwzględnieniem zmienności współczynnika skali na zdjęciu.

LITERATURA

1. Adrian R. J.: Particle imaging techniques for experimental fluid mechanics. Annual review of fluid mechanics 23, 261 – 304.
2. Mori N., Chang K.: Introduction to MPIV – PIV toolbox in MATLAB version 0.965, 2004. http://sauron.civil.eng.osaka-cu.ac.jp/~mori/softwares/mpiv/.
3. White D. J., Take W. A., Bolton M. D.: Measuring soil deformation in geotechnical models using digital images and PIV analysis. Proc. 10th Int. Conf. On Computer Methods and Advances in Geomechanics, Balkema, Rotterdam 2001, 997 – 1002.
4. White D. J., Take W. A., Bolton M. D.: Soil deformation measurements using Particle Image Velocimetry (PIV) and photogrammetry. Geotechnique 53, No 7/2003, 619 – 631.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Bogdan Wolski