

Artur Janowski
Jerzy Miałdun
Jakub Szulwic

WYZNACZENIE PRZEMIESZCZEŃ GRUNTU PODCZAS BADAŃ LABORATORYJNYCH Z WYKORZYSTANIEM PSEUDOANAGLIFÓW

Streszczenie. W modelowych badaniach odkształceń gruntu w warunkach laboratoryjnych uwzględnia się często wykorzystanie metod fotogrametrii. Przemieszczenia gruntu obserwowane są w płaszczyźnie szklanej szyby urządzenia laboratoryjnego. Dlatego najodpowiedniejszą metodą wyznaczania tych przemieszczeń jest jednoobrazowa fotogrametria analityczna. Wiązało się to do niedawna z koniecznością stosowania kosztownych stereokomparatorów, a współcześnie korzystania z cyfrowych systemów do pomiaru współrzędnych tłowych.

Niniejsza praca przedstawia wykorzystanie prostych sposobów pozyskiwania danych fotogrametrycznych i ich obróbki. Powstała ona pod wpływem sugestii geotechników, aby dostosować koszt tych opracowań do skromnych środków przeznaczanych na takie badania.

Wstęp

Geotechnika to dział geologii inżynierskiej zajmujący się określaniem fizycznych właściwości gruntu (zwłaszcza metodami laboratoryjnymi) w celu ustalenia warunków budowlanych. Wynikiem takich badań jest ocena stanu podłoża budowlanego z określeniem zasięgu osłabień gruntu.

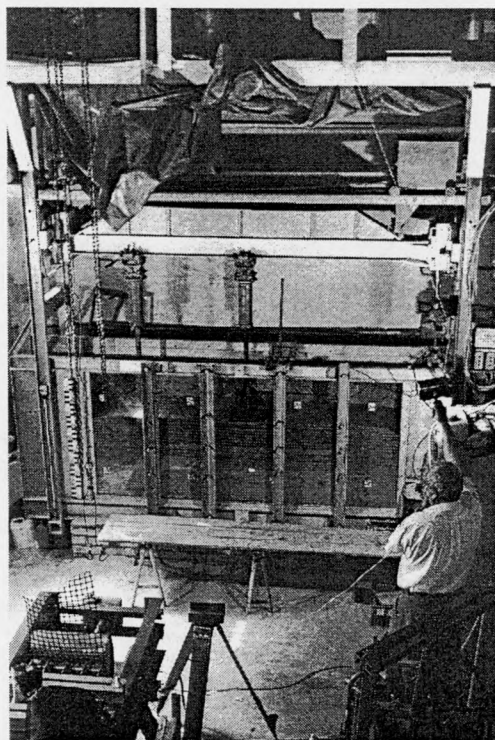
Od kilku lat pracownicy Katedry Geotechniki Wydziału Nauk Technicznych UWM w Olsztynie prowadzą modelowe badania laboratoryjne dynamiki przemieszczeń gruntu pod naciskiem stopy fundamentowej budowli. Autorzy tego artykułu mieli sposobność wykonania fotogrametrycznej rejestracji przemieszczeń gruntu w czasie trwania eksperymentów i opracowania wyników. Podczas wielokrotnego omawiania wyników badań często pojawiał się temat wysokich kosztów prac fotogrametrycznych. Kierując się sugestiami geotechników powstał pomysł stworzenia narzędzia do cyfrowej obróbki wyników rejestracji fotogrametrycznej.

Warunki techniczne eksperymentów

Prace geotechniczne

Eksperymenty prowadzone były w laboratorium geotechnicznym Politechniki Gdańskiej. Urządzenie do modelowania nacisku stopy fundamentowej na grunt to

stalowa otwarta z góry skrzynia o prostokątnym dnie i szklanym jednym boku (Rys. 1). Do skrzyni nasypywany był piasek o znanych cechach granulometrycznych a na styku gruntu z szybą umieszczano wg ustalonego wzorca kontrolne znaczkę pomiarowe. Każdy znaczek wykonany był z czarnego tworzywa w kształcie stożka. Podstawa stożka miała średnicę 3 mm z białą plamką o średnicy 1 mm pośrodku. Wysokość stożka była równa 3 mm. Znaczkę umieszczano tak aby po obsypaniu piaskiem ich podstawy przylegały do szyby. Stopa fundamentowa wykonana ze stalowego ceownika o szerokości ok. 30 cm podlegała naciskom mechanizmu śrubowego napędzanego silnikiem elektrycznym. Przesunięcie ceownika oraz siła nacisku była nadzorowana poprzez czujniki połączone z komputerem.

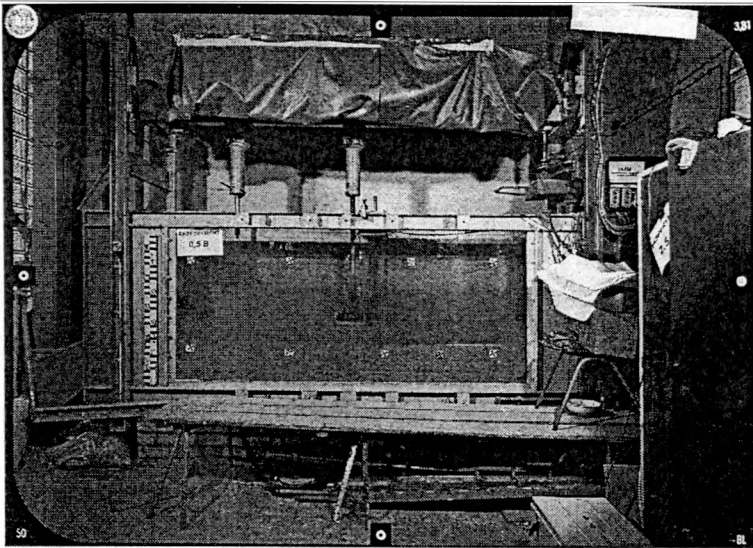


Rys. 1. Laboratorium do modelowego badania odkształceń gruntu

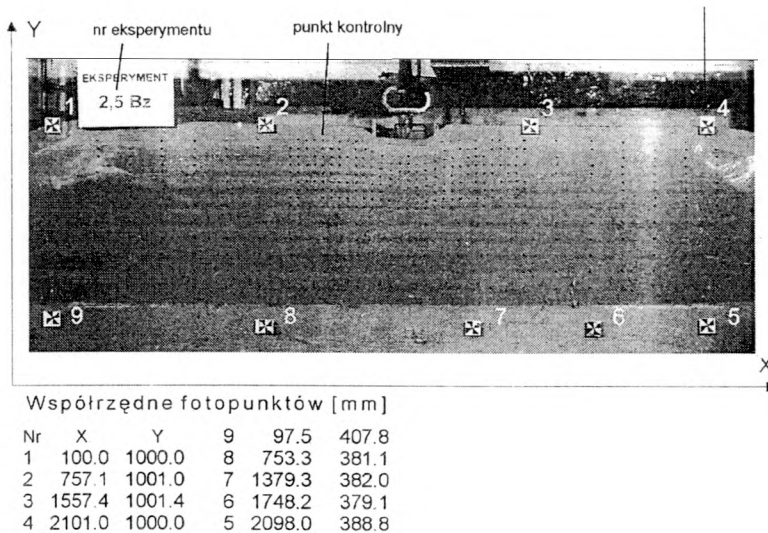
Prace fotogrametryczne

Na szybie urządzenia naklejono znaki w kształcie zbliżonym krzyża maltańskiego (Rys. 2). Na podstawie bezpośrednich pomiarów liniowych i niwelacji geometrycznej obliczono ich współrzędne w układzie lokalnym. Błąd położenia tych fotopunktów po wyrównaniu nie przekroczył $\pm 0,4$ mm. Pierwsze eksperymenty prowadzone były w środkowej części urządzenia i dlatego najpierw założono sieć pięciu fotopunktów tworzących czworobok o wymiarach ok. 1 m na 1m. Piąty punkt służył do orientacji kamery i jako punkt kontrolny do oceny dokładności. Cztery

kolejne – zewnętrzne fotopunkty dodano w fazie badań zajmujących całą przestrzeń urządzania. Część punktów, na pierwszy rzut oka, leży prawie na jednej prostej. Fakt ten nie ma jednak wpływu na możliwość wyznaczenia położenia znaczków kontrolnych, o czym będzie mowa później.



Rys. 2. Zdjęcie fotogrametryczne wykonane kamerą UMK 1318/100 podczas eksperymentu



Rys. 3. Szkic rozmieszczenia fotopunktów i znaczków kontrolnych. Eksperyment Ex 2,5 Bz po 30 minutach.

Stanowisko kamery UMK 1318/100 wyznaczono i zastabilizowano w podłodze w odległości 2,8 m od środka płaszczyzny szyby. Zdjęcia wykonywano na płytach ORWO TO1 orientując oś kamery prostopadle do płaszczyzny szyby urządzenia. Pierwsze zdjęcie wykonywano przed włączeniem mechanizmu naciskającego, następne co 10 minut do chwili utraty stabilności gruntu. Rejestracja fotogrametryczna trwała zazwyczaj 17 do 35 minut. Po wywołaniu negatywów współrzędne tłowe fotopunktów i znaczków kontrolnych mierzono na stereokomparatorze Stecometer C. W tym przypadku pełnił on rolę monokomparatora.

Różnicowy charakter pomiarów był osiągnięty przez wykonywanie zdjęć z tego samego stanowiska przy niezmienniej orientacji. Wpływ grubej na 25 mm szyby urządzenia laboratoryjnego, za którą umieszczone były znaczki kontrolne oraz dystorsji obiektywu kamery na położenie ich obrazów na zdjęciu w tym zadaniu zostały pominięte.

Do obliczenia współrzędnych znaczków kontrolnych w układzie lokalnym fotopunktów wykorzystano następujący algorytm:

Przekształcenie rzutowe płaszczyzn wyrażone jest następującą zależnością:

$$x = \frac{AX + BY + C}{DX + EY + 1} \quad \text{oraz} \quad y = \frac{FX + GY + H}{DX + EY + 1} \quad (1)$$

gdzie: $A... H$ - to parametry przekształcenia, x, y, X, Y - współrzędne fotopunktów w obu płaszczyznach (zdjęcia i urządzenia laboratoryjnego).

Kiedy par punktów jest więcej niż 4 można napisać układ równań poprawek w postaci:

$$\begin{aligned} AX + BY + C - DxX - ExY & - x = v_x \\ - DyX - EyY + FX + GY + H - y & = v_y \end{aligned} \quad (2)$$

Po ułożeniu układu równań normalnych i rozwiązaniu go otrzymujemy poprawki do współrzędnych fotopunktów w układzie zdjęcia. W oparciu o poprawione współrzędne x_w, y_w oraz współrzędne fotopunktów X, Y wykorzystując zależności:

$$X = \frac{A_1 x_w + B_1 y_w + C_1}{D_1 x_w + E_1 y_w + 1} \quad \text{oraz} \quad Y = \frac{F_1 x_w + G_1 y_w + H_1}{D_1 x_w + E_1 y_w + 1} \quad (3)$$

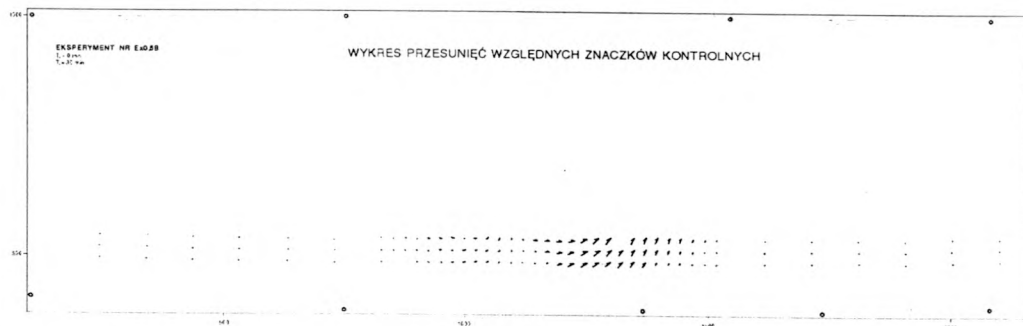
wyznaczamy współczynniki $A_1... H_1$ i obliczamy współrzędne przetworzone zmierzonych na zdjęciu znaczków kontrolnych.

Istotną i bardzo czasochłonną czynnością jest utworzenie par współrzędnych tych samych znaczków kontrolnych zarejestrowanych w różnym czasie. Na urządzenie laboratoryjne przenoszone są wibracje silnika elektrycznego napędzającego mechanizm śrubowy naciskający stopę fundamentową. Pod ich wpływem między część znaczków kontrolnych a szybę wciska się badany grunt. W ten sposób powstają obserwacje „sieroty”-bez pary. Usunięcie ich ze zbiorów wymaga

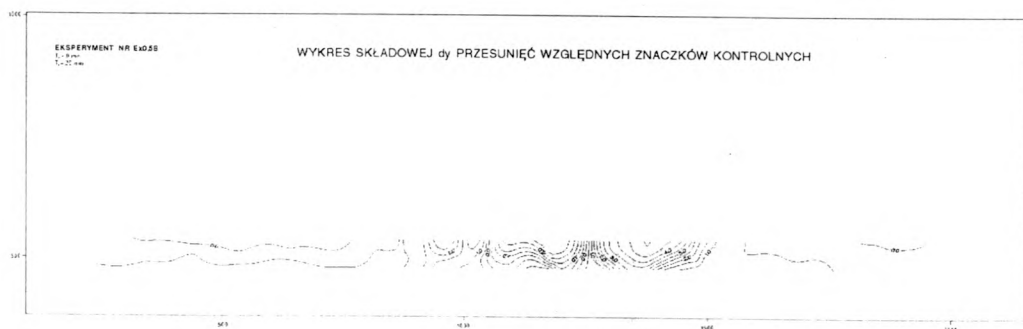
czasu i ciepłowości. Jeśli już pokonamy ten etap to pozostaje wyznaczenie z obliczonych współrzędnych:

- składowych wektorów przesunięcia znaczków kontrolnych ΔX i ΔY
- długości wektorów przesunięć znaczków kontrolnych D
- wektorów prędkości przesunięcia znaczków kontrolnych V

W oparciu o te dane można stworzyć wykres przesunięć znaczków kontrolnych (Rys. 4), a po wytworzeniu numerycznego modelu powierzchni składowych ΔX i ΔY oraz prędkości V wykresy równych składowych przesunięć i równych prędkości w postaci izolinii (Rys. 5).



Rys. 4. Wykres przesunięć względnych znaczków kontrolnych w lokalnym układzie fotopunktów



Rys. 5. Wykres składowej ΔY przesunięć względnych znaczków kontrolnych w lokalnym układzie fotopunktów

Mowa tu jest o parze współrzędnych znaczków kontrolnych, ale można prześledzić również trajektorię po jakiej poruszał się taki znaczek w dowolnie zadanych odcinkach czasowych. To zadanie wymaga jeszcze większej uwagi zwłaszcza gdy przesunięcia są duże i bliskie odległości początkowej między rzędami znaczków kontrolnych. Jeszcze trudniejsze jest wyeliminowanie „punktów-sierot” pozbawionych pary. Stąd pomysł wykorzystania „pseudoanaglifów”. Przedni człon

„pseudo” użyty jest po to aby odróżnić to pojęcie od klasycznego znaczenia słowa anaglif. Pseudoanaglify, w rozumieniu autorów, nie służą do tworzenia efektu stereoskopowego. Ułatwiają one natomiast obserwację na ekranie monitora par (lub grup w przypadku wielobarwnego pseudoanaglifu) znaczków kontrolnych zarejestrowanych w różnym czasie.

Cyfrowe opracowanie eksperymentu

W toku badań eksperymentalnych z wykorzystaniem analogowych fotogrametrycznych urządzeń pomiarowych postanowiono wykorzystać możliwości leżące w fotogrametrii obrazów cyfrowych. Za takim rozwiązaniem przemawiały przede wszystkim:

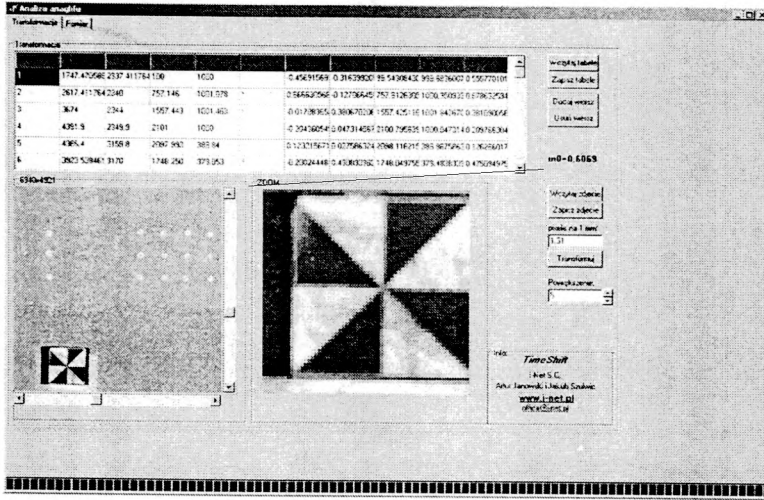
- trudny i kosztowny dostęp do specjalistycznych urządzeń fotogrametrycznych,
- powszechność i łatwość użytkowania dobrej klasy komputerów osobistych,
- porównywalne dokładności uzyskiwane z użyciem obrazów cyfrowych i technik komputerowych.

Pierwszym etapem było przetworzenie analogowych zdjęć fotogrametrycznych na postać cyfrową. Obrazy skanowano z rozdzielczością 1000 dpi, którą uznano wstępnie za optymalną dla jakości i ekonomiczności opracowania. Przy takim poziomie rozdzielczości na 1 mm² w płaszczyźnie eksperymentu przypadło 1550 piskeli. Powyższe parametry skanowania umożliwiły osiąganie wyników z dokładnością do ok. 0,013 mm w skali zdjęcia czyli w tym przypadku 0,38 mm w mierze terenowej eksperymentu. Wielkości te nieznacznie tylko odbiegają od dokładności pomiarów możliwych do osiągnięcia na stekometrze i (jednak) mogły zostać uznane za granicznie wystarczające do opracowania eksperymentu przy zachowaniu istotnej łatwości obsługi i dostępności oprogramowania dla nieco nawet przestarzałych platform sprzętowych.

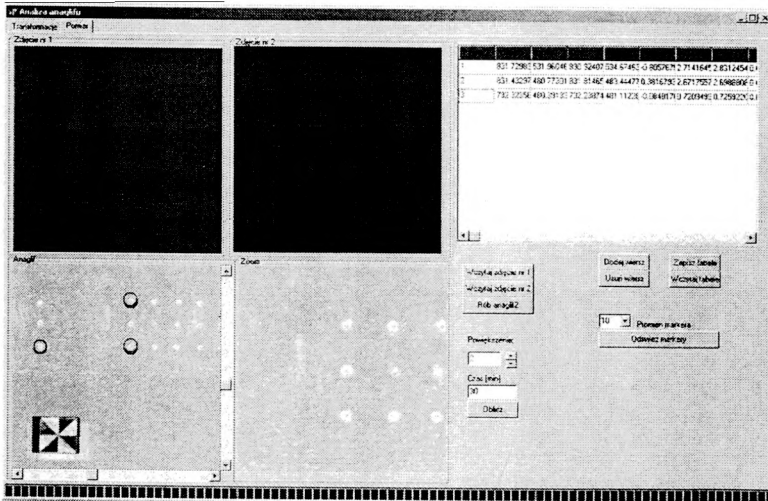
System pomiarowy dla skanowanych zdjęć został zbudowany w środowisku DELPHI™ firmy Borland®. Powstał on w wyniku realizacji zapotrzebowania w konkretnym eksperymencie geotechnicznym. Chociaż jest produktem testowym, przygotowany został do rozbudowy w zależności od potrzeb wyrażonych przy realizacji konkretnego zadania. Przy tworzeniu oprogramowania uznano, iż winno ono być proste w obsłudze z jednoczesnym wykorzystaniem możliwości cyfrowych opracowań fotogrametrycznych.

Oprogramowanie w pierwszym kroku opracowania daje możliwość transformacji zdjęcia cyfrowego do układu płaszczyzny eksperymentu w oparciu o fotopunkty (Rys. 6). Procedura wewnętrzna pozwala również założyć nową rozdzielczość przetransformowanej bitmapy jako liczbę pikseli na milimetr. Przy wyborze metody transformacji wzięto pod uwagę warunek, w którym reguła przekształcenia cyfrowego musi poprawnie przetworzyć układ pikselowy dyskretny zdjęcia na nowy układ pikselowy, w którym pomiary odbywają się na zbiorze ciągłym. Z uwagi na fakt, iż transformacji poddawano zdjęcie cyfrowe w rzucie środkowym do układu eksperymentu – roboczo nazwanym „układem płaszczyzny szyby” – zastosowano przekształcenie rzutowe płaszczyzny. Eksperyment poddano

analizie w zakresie rozłożenia punktów dopasowania wzdłuż jednej prostej. W stosunku do możliwości algorytmów stosowanych w systemie DELPHI, stwierdzono, iż lokalizacja punktów nie powoduje nieoznaczoności w rozwiązaniu układu równań. Mając na uwadze zdolność obliczeniową komputera PC wykorzystanego w eksperymencie oraz wyniki analizy nad możliwością dokonania obliczeń, pozostano na przekształceniu rzutowym, uznając, iż jakość i dokładność pomiarów może być dla tego rozwiązania w pełni poprawna.



Rys. 6. Moduł transformacji zdjęcia do układu płaszczyzny szyby z analizą błędów wpasowania.



Rys. 7. Moduł pomiarowy z wykorzystaniem pseudoanalogów

Kolejny moduł systemu pomiarowego generuje pseudoanaglif z pary zdjęć na podstawie paralaksy czasowej (Rys. 7). Pomiar na punktach kontrolnych wykonywany jest bądź to na obrazie anaglifowym, bądź to monokularnie na czasowo pierwszej i drugiej fotografii. Przy pomiarze anaglifowym możliwe jest używanie klawiszy funkcyjnych z klawiatury komputera, dzięki którym wyświetlane są jednocześnie dwa zdjęcia, albo też wymiennie pierwsze i drugie. System prezentacji obrazów pomiarów sprawdził się w czasie badań, podnosząc dokładność szczególnie w przypadku punktów słabo widocznych lub o najmniejszej paralaksie czasowej.

Transformacja i pomiar opatrzone są analizą dokładności, która dostępna jest w pliku tekstowym oraz wyświetlana na interfejsie systemu.

Wnioski

System informatyczny stworzony na potrzeby eksperymentu sprawdził się w zakresie funkcjonalności i obsługi. Otrzymane wyniki były niższej jakości niż wyniki otrzymane dla tego samego obiektu ale realizowane z wykorzystaniem stecometru. Fakt ten jednak nie dyskwalifikuje tego sposobu opracowania wyników badań geotechnicznych prostymi, dedykowanymi systemami pomiarowymi. Zdaniem autorów istnieje szerokie pole dla wykorzystania prezentowanego eksperymentalnego systemu. Atutem oprogramowania jest jego modułowa budowa, wsparcie na zaawansowanym systemie programistycznym DELPHI oraz możliwość szybkiej i gruntownej modernizacji w odpowiedzi na potrzeby konkretnego badania geotechnicznego.

Literatura:

ERDAS®, Przewodnik geoinformacyjny

Jankowski M, 1990, Elementy grafiki komputerowej, WNT, Warszawa

Ostaficzuk S., 1978, Fotogeologia fotointerpretacja i fotogrametria geologiczna

Recenzował: dr inż. Zdzisław Kurczyński