

Porównanie wyników pomiaru deformacji próbki tensometrami elektrooporowymi i metodą fotogrametryczną

ANDRZEJ NOWAKOWSKI, JACEK SOBCZYK, JANUSZ NURKOWSKI, MAREK GAWOR,
ZBIGNIEW LIZAK, MACIEJ BUJALSKI

Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków

Streszczenie

Praca poświęcona jest zastosowaniu nowoczesnych optycznych technik pomiarowych do analizy stanu deformacji próbki podczas testu jednoosiowego ściskania. W ramach badań wykonano serie testów jednoosiowego ściskania na próbkach prostopadłościennych, podczas których wyznaczano odkształcenia lokalne i globalne badanej próbki z zastosowaniem metod tradycyjnych (tensometry elektrooporowe, indukcyjne czujniki przemieszczeń) oraz metody fotogrametrycznej bazującej na analizie wykonanych podczas eksperymentu zdjęć próbki. Badania wykazały, iż możliwym jest uzyskanie dobrej zgodności wyników pomiarów odkształceń lokalnych prowadzonych tensometrem elektrooporowym i metodą fotogrametryczną oraz duże rozbieżności wyniku pomiarów globalnych prowadzonych czujnikiem indukcyjnym i metodą fotogrametryczną. Przedyskutowano możliwe przyczyny zaistniałego stanu rzeczy i wskazania dla ewentualnych przyszłych badań.

Słowa kluczowe: jednoosiowe ściskanie, pomiar odkształceń, tensometr rezystancyjny, czujnik indukcyjny, pomiar optyczny, metoda fotogrametryczna

1. Wstęp

Test jednoosiowego ściskania od dziesięcioleci pozostaje podstawowym testem wykorzystywanym przy określaniu właściwości wytrzymałościowych i odkształceniowych skał. Przesądza o tym z jednej strony względna łatwość jego wykonywania, a z drugiej duża liczba uzyskiwanych na jego podstawie informacji. Na podstawie eksperymentu wykonanego na jednej próbce można wyznaczyć na przykład dwie stałe wytrzymałościowe: granicę wytrzymałości na ściskanie i wytrzymałość rezydualną, oraz trzy stałe odkształceniowe: efektywny i samorodny moduł Younga oraz współczynnik Poissona. Sposób wykonywania eksperymentu jednoosiowego ściskania jest stale doskonalony, a pozycje zawierające opisy odpowiedniej metodyki publikowane są od wielu lat. Przykładem choćby poświęcony podstawom geotechniki podręcznik Kidybińskiego (1982), obszerne kompendia wiedzy o badaniach laboratoryjnych skał sporządzone przez Vutukuriego i in. (1974) oraz Lamé i Vutukuriego (1978), czy wreszcie odpowiedni rozdział w wydanym przez Międzynarodowe Towarzystwo Mechaniki Skał (ISRM¹) zbiorze zaleceń dotyczących podstawowych metod badawczych mechaniki skał (Ulusay & Hudson (eds.), 2007).

Dla wyznaczenia wymienionych wyżej stałych materiałowych prowadzi się podczas testu jednoosiowego ściskania pomiar siły obciążającej oraz deformacji podłużnej i poprzecznej badanej próbki. O ile pomiar siły obciążającej jest zazwyczaj bezproblemowy – służą do niego różnego typu dynamometry bądź manometry – o tyle w przypadku pomiaru deformacji sprawa jest bardziej złożona. Rzecz w tym, że tradycyjny pomiar deformacji już z założenia może być prowadzony na dwa sposoby: globalnie – gdy interesuje nas deformacja próbki jako całości (np. zmiana długości wysokości próbki lub jej średnicy) oraz lokalnie – gdy chcemy określić zmianę długości pewnego, wyznaczonego na próbce, odcinka zwanego bazą pomiarową. Pomiar globalny prowadzony jest najczęściej poprzez pomiar przemieszczenia tłoka prasy realizującej ob-

¹ ISRM = International Society for Rock Mechanics.

ciążenie, natomiast do pomiarów lokalnych stosuje się różne przetworniki deformacji. Z punktu widzenia celów niniejszej pracy istotnym jest spostrzeżenie, że pomiary lokalne i globalne wzajemnie się wykluczają w tym sensie, że nie można tą samą metodą jednocześnie dokonać pomiaru lokalnego deformacji całej próbki i lokalnego pomiaru deformacji wybranej bazy pomiarowej.

Metody optyczne wykorzystywane są do pomiarów deformacji powierzchni różnorodnych materiałów (od skali nano do mega) już od ponad 50 lat (por. np. Brown, 1971). W przeciwieństwie do metod opartych na przetwornikach odkształceń, metody optyczne pozwalają na jednoczesną analizę deformacji całej powierzchni pod warunkiem jej dostępności optycznej. Do metod tych należą przede wszystkim: interferometria holograficzna, plamkowa i moiré'y, metody siatkowe oraz użyta tu cyfrowa korelacja obrazu (CKO) (Cloud, 1998).

Pierwotnie do pomiarów stosowano analogowe aparaty fotograficzne, a zdjęcia analizowano ręcznie z wykorzystaniem dostępnych metod optycznych. Wraz z rozwojem technik obliczeniowych, przetwarzania i analizy obrazu i pojawieniem się skanerów zdjęć wysokiej rozdzielczości wspomniane wyżej metody zaczęły konkurować dokładnością i szybkością uzyskiwania wyników z tradycyjnymi, punktowymi pomiarami.

Obecnie, w dobie powszechnej komputeryzacji i „cyfryzacji”, nikt już nie analizuje zdjęć „analogowych” powierzchni łądów, prądów oceanicznych, mas powietrza itp. (skala mega) ani struktur białek, czy ruchów rząskówek bakterii (skala nano i mikro) „ręcznie”, jeśli nie jest to absolutnie konieczne. Służą do tego najczęściej zaawansowane (i bardzo drogie) zestawy pomiarowe i algorytmy przetwarzania danych.

2. Cel i zakres pracy

Zasadniczym celem pracy było sprawdzenie, czy, a jeżeli tak to pod jakimi warunkami, możliwe jest wykorzystanie do pomiarów deformacji próbek tzw. fotogrametrycznej metody pomiaru deformacji (FMPD). Punktem wyjścia do zastosowania tej metody jest wykonanie podczas testu jednoosiowego ściskania serii zdjęć testowanej próbki. Wykonane zdjęcia są następnie analizowane przy pomocy odpowiedniego oprogramowania komputerowego, które pozwala wyznaczyć wartości przemieszczeń wybranych punktów badanej próbki. Szczegółowy opis FMPD podany został w dalszej części niniejszego opracowania.

Zakres wykonanych prac został przyjęty w taki sposób, aby możliwe było porównanie wyników pomiaru deformacji próbki metodą fotogrametryczną z wynikami pomiarów deformacji wykonanymi inną, dobrze znaną i wypróbowaną metodą, która w dalszej części niniejszej pracy nazywana będzie metodą referencyjną. W omawianym przypadku za metodę referencyjną uznano lokalny pomiar odkształceń z wykorzystaniem tensometrów elektrooporowych uzupełniony globalnym pomiarem bazującym na pomiarze przemieszczeń tłoka prasy wykonanym przy pomocy czujnika indukcyjnego (LVDT).

3. Przedmiot badań i przyjęta metodyka

Do zaplanowanych eksperymentów wykonano dwie próbki w formie prostopadłościanów o podstawie kwadratowej wycięte z piaskowca oraz z granitu. Próbką piaskowca miała długość krawędzi podstawy $a = 50$ mm i wysokość $h = 100$ mm natomiast dla próbki granitowej było $a = 80$ mm i $h = 160$ mm. Obie próbki przedstawiono na rys. 1.

Dla lokalnego pomiaru podłużnych i poprzecznych odkształceń testowanych próbek na każdą z nich naklejono pod dwa tensometry elektrooporowe o długości bazy pomiarowej $l = 12$ mm. Położenie tensometrów na próbkach pokazuje rys. 1. Tensometry te były podłączone do układu rejestrującego zaprojektowanego i wykonanego na potrzeby Pracowni Odkształceń Skał IMG PAN przez dr inż. Adama Kanciruka. Szczegółowe informacje dotyczące zasad wykonywania pomiarów tensometrycznych oraz używanej do tego aparatury pomiarowo-rejestrującej znaleźć można w niedawno wydanej książce (Kanciruk, 2009).

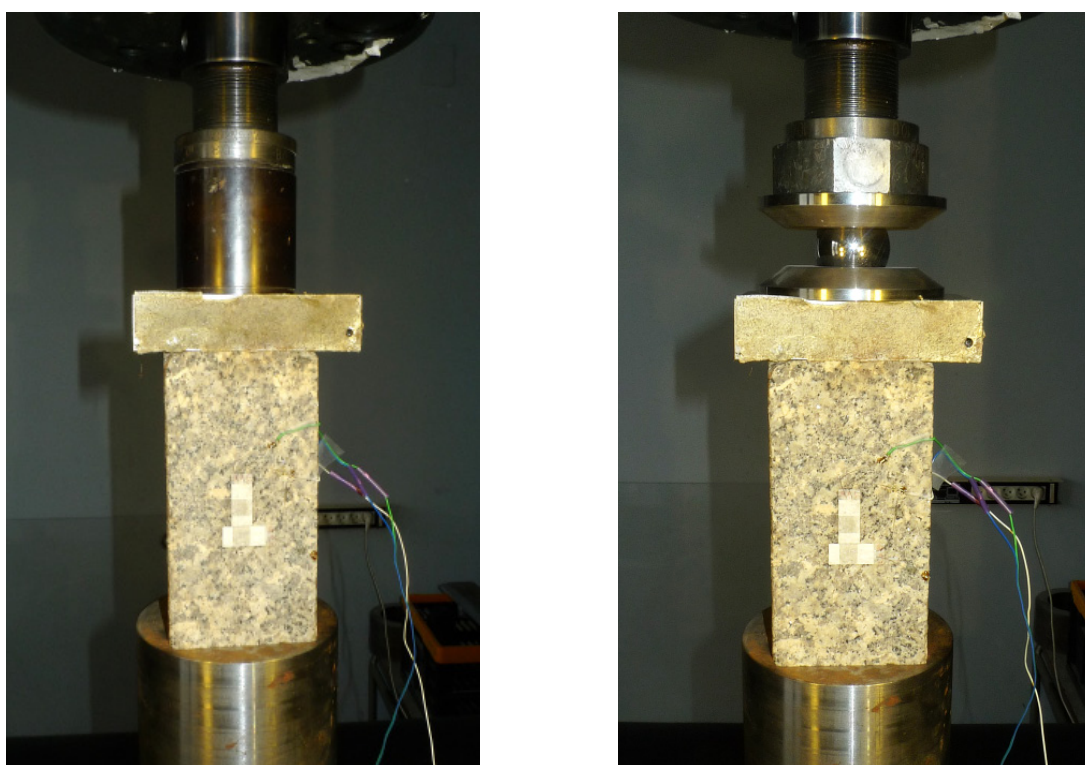
Podczas badań każda z próbek ściskana była jednoosiowo w maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8500 Rock Testing System ze stałą prędkością przesuwu tłoka równą $0,003 \text{ mm} \times \text{s}^{-1}$ przy czym wykonywano dla niej jedną pętlę obciążenie – odciążenie. Maksymalna wartość siły obciążającej dobierano w taki sposób, aby odkształcenia zmierzone tensometrami elektrooporowymi nie przekroczyły wartości 1%. Dla próbki piaskowca oznaczało to, że maksymalna wartość siły obciążającej wyniosła 70 kN, natomiast dla próbki granitu 160 kN.

Dla każdej próbki wykonywano dwa eksperymenty, różniące się sposobem przyłożenia do próbki siły obciążającej. W pierwszym siła przykładana była bez pośrednictwa jakichkolwiek elementów kompensują-



Rys. 1. Przygotowane do badań próbki: z lewej – piaskowca, z prawej – próbka granitu

cych nierówności próbki (jedynie poprzez układ stalowych separatorów), w drugim do układu separatorów włączano kulisę, której zadaniem było kompensowanie momentu zginającego będącego konsekwencją nierównoległości podstaw próbki. Próbkę obciążoną bez kulisy i za jej pośrednictwem przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Próbkę granitową podczas eksperymentu: z lewej – bez kulisy, z prawej – kulisą

Podczas procesu obciążania i odciążania próbki rejestrowano: czas (t) w sekundach, siłę obciążającą próbkę (F) w kiloniutonach, pozycję tłoka prasy (u) w milimetrach oraz zmierzone tensometrami lokalne odkształcenia podłużne (ε_1) i poprzeczne (ε_3) badanej próbki. Częstotliwość odczytu tych wielkości (f) była we wszystkich eksperymentach tak sama i wynosiła 1 Hz.

3.1. Globalny i lokalny pomiar deformacji próbki metodami tradycyjnymi

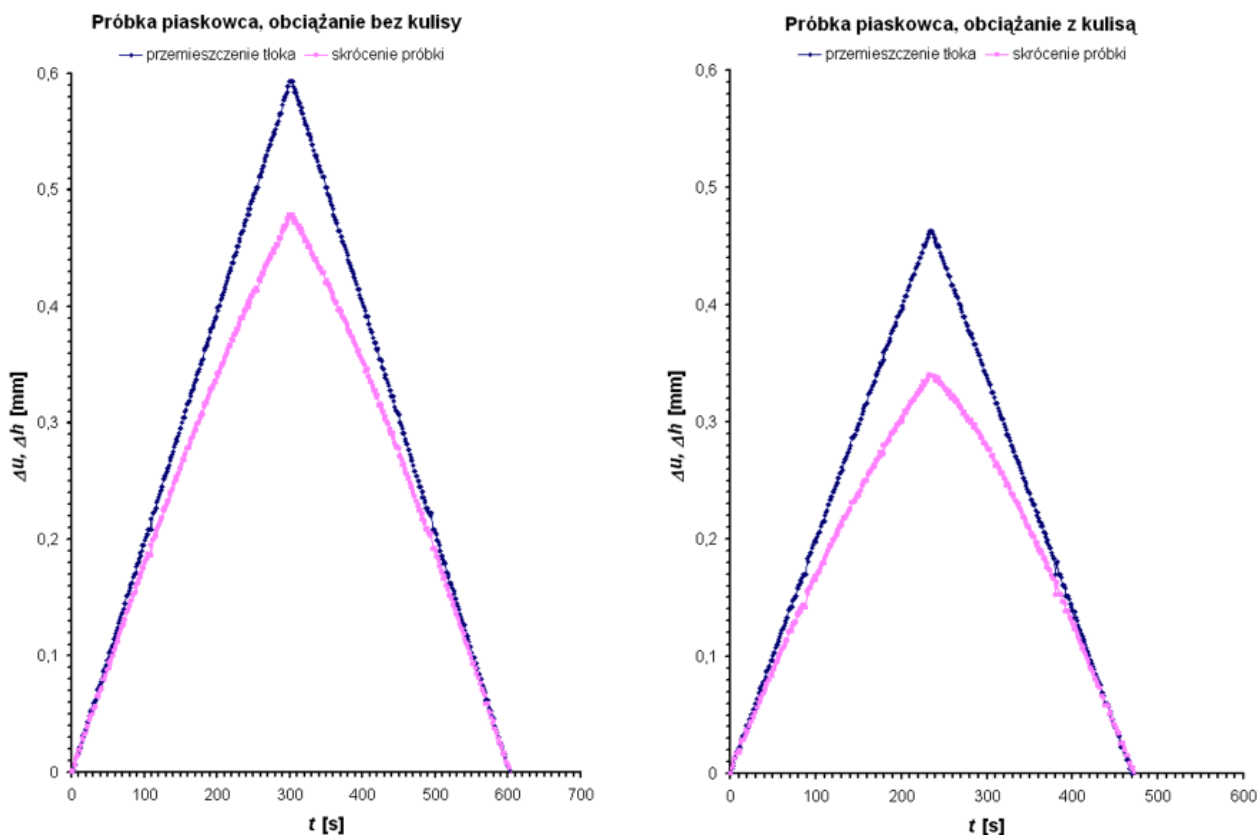
Zarejestrowane podczas eksperymentu wartości pozycji tłoka u były następnie podstawą do wyliczenia wartości przemieszczeń tłoka Δu , a te z kolei posłużyły do wyznaczenia wartości skrócenia próbki Δh . W opisywanym przypadku zawsze zachodzi zależność $\Delta u > \Delta h$ gdyż tor pomiarowy prasy jest tak skonstruowany, że wskazywana przez czujnik indukcyjny pozycja tłoka uwzględnia zarówno zmianę długości próbki jak też zmiany długości stalowych separatorów oraz kasowanie luzów między nimi. Jeżeli sumę zmian długości separatorów oraz przemieszczeń związanych z kasowaniem wspomnianych luzów oznaczmy przez ΔH , to interesująca nas zmiana długości badanej próbki dana jest dość oczywistym wzorem:

$$\Delta h = \Delta u - \Delta H \quad (1)$$

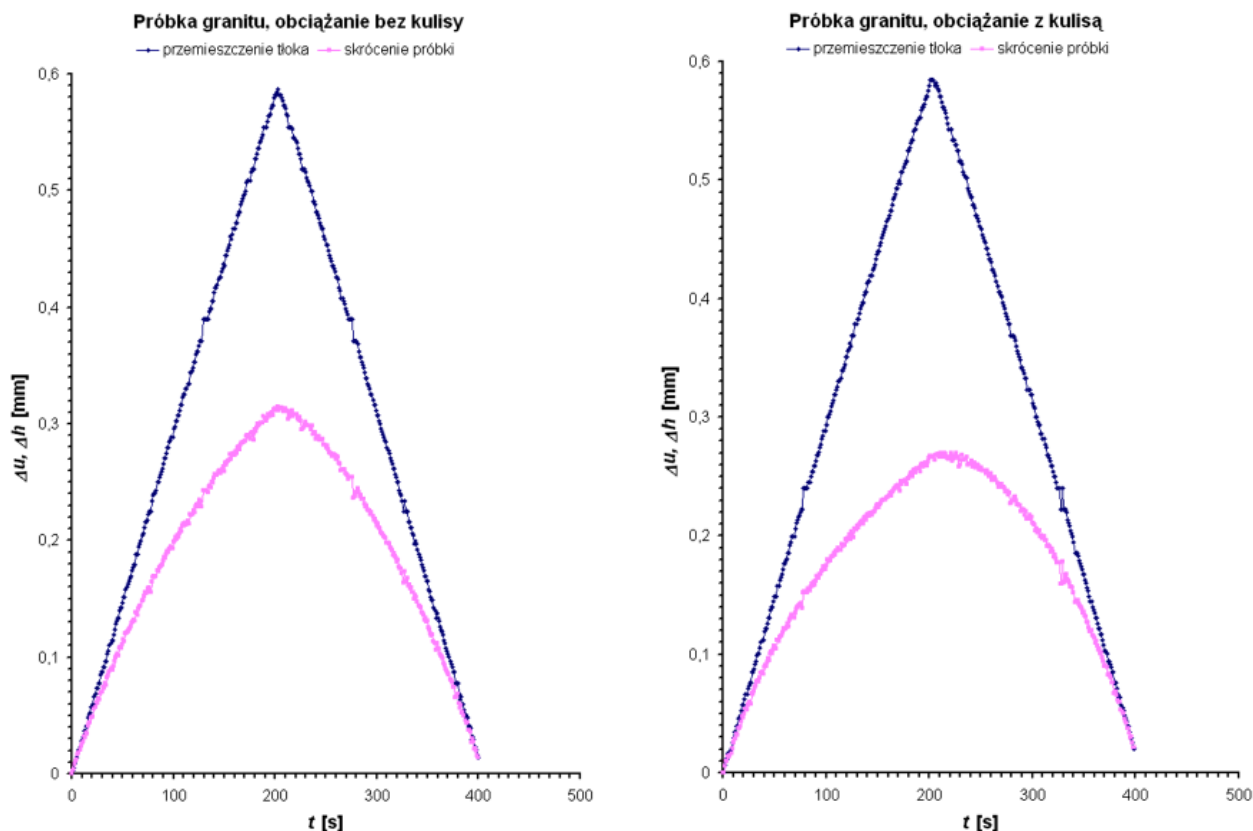
Poniżej (rys. 3 i 4) pokazana różnica między wartościami Δu i Δh dla obu badanych próbek w przypadku gdy układ obciążający nie zawierał, bądź też zawierał kulisę kompensacyjną.

Obliczona wg wzoru (1) wartość skrócenia próbki była następnie podstawą do wyznaczenia globalnego odkształcenia podłużnego próbki (ε_1) wyliczanego wg następującego wzoru:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{h} \quad (2)$$



Rys. 3. Różnice między przemieszczeniem tłoka (Δu) a skróceniem próbki (Δh) dla obciążania: z lewej – bez kulisy, z prawej – z kulisą; próbka piaskowca



Rys. 4. Różnice między przemieszczeniem tłoka (Δu) a skróceniem próbki (Δh) dla obciążania: z lewej – bez kulisy, z prawej – z kulisą; próbka granitu

3.2. Globalny i lokalny pomiar deformacji próbki metodą fotogrametryczną

Fotogrametryczna metoda pomiaru odkształceń w dwóch wymiarach (2D) opiera się najczęściej na porównaniu co najmniej jednej pary² zdjęć cyfrowych wykonanych w tych samych, znanych warunkach i w znanym odstępie czasu. W przypadku testu jednoosiowego ściskania próbek skalnych jedno zdjęcie dokumentuje stan próbki przed interesującym odkształceniem, a drugie po wystąpieniu tego odkształcenia. Porównanie wykonanych zdjęć dokonuje się metodą CKO³ (Chu i in., 1985), wynalezioną w latach 80-tych ubiegłego wieku na Uniwersytecie Południowej Karoliny (Stany Zjednoczone). Następnie możliwości tej metody poszerzono poprzez dodanie analizy w trzech wymiarach (3D) – stereoskopowej oraz tzw. wolumetrycznej. Jednocześnie znacznej poprawie uległa także dokładność i szybkość działania algorytmów obliczeniowych.

Ogólne założenia metody CKO i algorytmy obliczeniowe są bardzo zbliżone do metody Cyfrowej Anemometrii Obrazowej (CAO) (ang. PIV – *Particle Image Velocimetry*) (Raffel i in., 2007) wykorzystywanej głównie w eksperymentalnej mechanice płynów. Znane są przypadki zastosowania z powodzeniem CAO zamiast CKO do analizy deformacji gruntów (White i in., 2003) i metalu (Lee i in., 2008). Autorzy niniejszego opracowania postąpili podobnie ze względu na dostępność oprogramowania do CAO i brak dostępu do oprogramowania opartego na algorytmach CKO.

Przebieg eksperymentów rejestrowany był za pomocą aparatu cyfrowego marki Nikon, model D300s z dołączonym obiektywem zmiennooogniskowym ustawionym na ogniskową ~ 270 mm. Aparat zamontowany na stabilnym statywie w odległości około 1.6 m od próbki pracował przy następujących ustawieniach: interwałometr (ustawiony na 70 zdjęć z odstępem 10 sekund w przypadku piaskowca i 25 zdjęć z odstępem 20 sekund – w przypadku granitu), ostrość ustawiana manualnie, preselekcja przysłony, czułość ISO no-

² Ze względu na to, że w przypadku skał przemieszczenia są niezwykle małe w porównaniu z rozmiarami próbek rozwijane są ostatnio metody analizy oparte na trójce zdjęć (Cofaru i in., 2012). Trzecie zdjęcie służy podniesieniu rozdzielczości metody, choć okupione jest to nieznacznym spadkiem szybkości obliczeń.

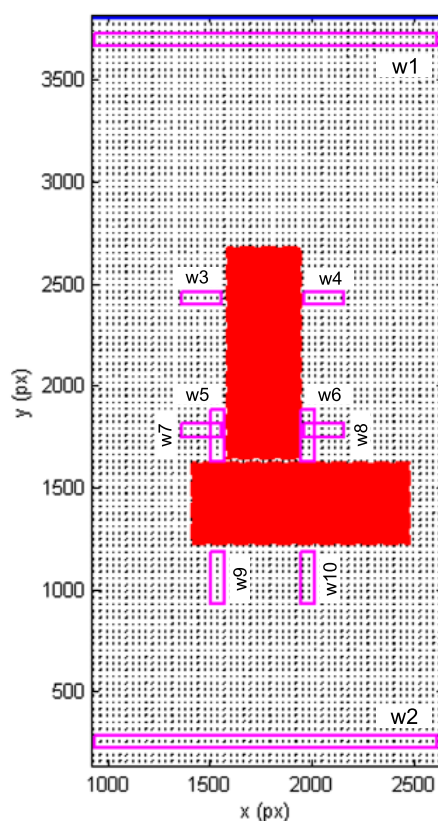
³ W literaturze można spotkać wiele innych nazw tej samej metody, jednak CKO (ang. DIC – *Digital Image Correlation*) jest używana najpowszechniej.

minalna (200), podniesienie lustra na 1 sekundę przed wykonaniem zdjęcia, zapis zdjęć do formatu TIFF, neutralne ustawienia korekty obrazu. Zastosowane dodatkowe oświetlenie pozwoliło na rejestrację zdjęć z czasem ekspozycji 1/50s przy otworze względnym przysłony obiektywu ustawionym na wartość f/8.

Rozdzielczość efektywna matrycy światłoczułej użytego aparatu fotograficznego to 4288×2848 pikseli (12,2 MP)⁴. Ze względu na zastosowane kadrowanie skala odwzorowania zdjęć wykonanych podczas eksperymentów wynosiła 36,4 piksela/mm w przypadku próbki piaskowca i 23,9 piksela/mm w przypadku próbki granitu. Zatem przemieszczenie się obrazu fotografowanego obiektu dokładnie o jeden piksel jest tożsame przemieszczeniu się obiektu rzeczywistego o 27,5 mm w przypadku pierwszej skały i 41,8 mm w przypadku drugiej.

W przypadku każdej skały zarejestrowano trzy serie zdjęć: jedną – diagnostyczną – jeszcze przed uruchomieniem eksperymentu jednoosiowego ściskania, jedną bez kulisy, i jedną z użyciem kulisy. Serie zdjęć dokumentujące przebieg eksperymentów były wykonywane w taki sposób, aby pierwsze zdjęcie było zarejestrowane przed rozpoczęciem eksperymentu, a drugie zbiegało się z dokładnością do 2-3 sekund z jego początkiem. Dzięki temu wynik porównania pierwszych dwóch zdjęć można było przypisać momentowi w czasie odpowiadającemu początkowi eksperymentu, wynik porównania pierwszego i trzeciego zdjęcia – kolejnemu momentowi itd.

Do analizy zarejestrowanych obrazów wykorzystano komercyjne oprogramowanie firmy Dantec Dynamics – DynamicStudio w wersji 3.41. Analiza polegała na wyznaczeniu pola przemieszczeń pokrywającego się z całą powierzchnią testowanej próbki skalnej, a następnie na obliczeniu wektorów średnich reprezentujących 10 arbitralnie wybranych obszarów w1-w10. Jak wynika z rys. 5 obszary te określono tak, aby za ich pomocą można było odnieść się do wyników pomiarów wykonanych metodami tradycyjnymi. W szczególności w wyniku porównania przemieszczeń obszarów w1 i w2 otrzymano wartości odkształceń reprezentujące całą próbkę, a porównanie w3 i w4 z w5 i w6 pozwoliło wyznaczyć odkształcenia lokalne odniesione do tensometru.



Rys. 5. Oznaczenia przyjęte podczas analizy zdjęć

⁴ Rzeczywiste rozmiary matrycy światłoczułej użytego aparatu fotograficznego wynoszą $23,6 \times 15,8$ mm, stąd rozmiary pojedynczego piksela to $\sim 5,5 \times 5,5$ μm .

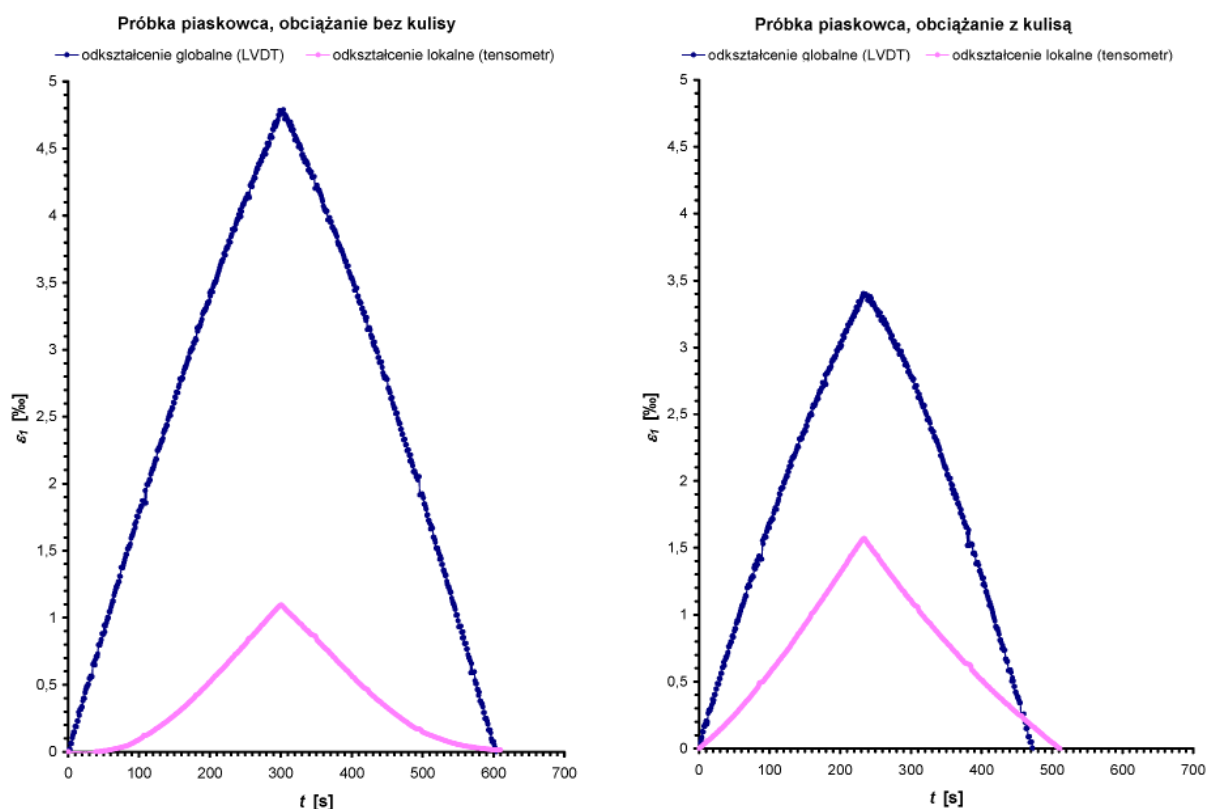
4. Wyniki pomiarów

Przedstawione poniżej wyniki dotyczą pomiarów deformacji próbki wykonanych zarówno metodami tradycyjnymi (do których zaliczono pomiar przetwornikiem LVDT oraz tensometrem elektrooporowym) jak i metodą, którą umownie nazwano fotogrametryczną (FMPD). Aby ułatwić analizę uzyskanych wyników i uwypuklić najistotniejsze fakty najpierw zaprezentowano i omówiono wyniki uzyskane metodami tradycyjnymi, następnie przedstawiono wyniki działania metody fotogrametrycznej, a dopiero na końcu dokonano odpowiednich porównań.

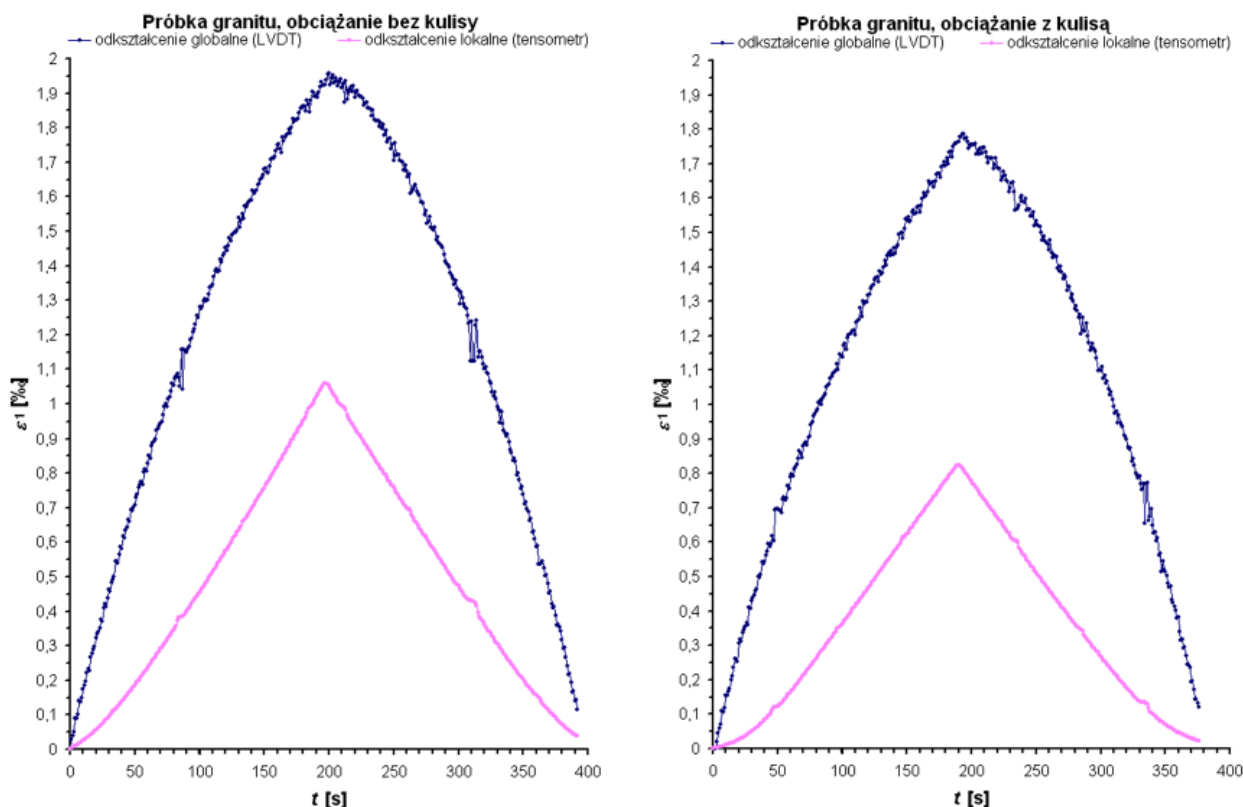
4.1. Wyniki pomiarów odkształceń podłużnych próbek metodami tradycyjnymi

Rezultaty pomiarów odkształceń podłużnych badanych próbek przy pomocy metod tradycyjnych zaprezentowano na rys. 6 – dla próbki piaskowca i rys. 7 – dla próbki granitu. Rysunki te pokazują, iż odkształcenia globalne całej próbki są znacząco większe od zmierzonych tensometrami odkształceń lokalnych. Fakt ten jest powszechnie tłumaczony pojawieniem się dużych zaburzeń stanu odkształcenia próbki w pobliżu płyt prasy, za pośrednictwem których realizowane jest obciążenie próbki. Należy przy tym zwrócić uwagę, że proporcje między maksymalnymi odkształceniami mierzonymi w układzie obciążania bez kulisy i z kulisą są różne dla obu badanych próbek. O ile bowiem dla granitu można uznać, iż $\epsilon_1 : \epsilon_1^G \approx 2 : 1$ niezależnie od tego, czy eksperyment jest prowadzony z kulisą czy bez niej, o tyle dla piaskowca wspomniane $\epsilon_1 : \epsilon_1^G \approx 5 : 1$ w układzie bez kulisy oraz $\epsilon_1 : \epsilon_1^G \approx 2 : 1$ w układzie z kulisą.

Wy tłumaczenie powyższych różnic jest następujące: zakłada się, iż wpływ braku kulisy jest tym większy, im większe są niedokładności w przygotowaniu próbki, a w szczególności im większa jest nierównoległość jej podstaw. Zarówno teoria jak i praktyka dowodzą, że gdyby podstawy próbki były idealnie równoległe do siebie i prostopadłe do osi podłużnej próbki kulisa byłaby całkowicie zbędna (por. Gustkiewicz, 1975 a-d). W omawianym przypadku nierównoległość podstaw próbki piaskowca była bardzo znaczna i dużo większa niż w przypadku granitu *ergo* wpływ obecności kulisy bądź jej braku manifestował się znacznie mocniej w przypadku piaskowca niż w przypadku próbki granitowej.



Rys. 6. Odkształcenia globalne (LVDT) vs. odkształcenia lokalne (tensometr) dla obciążania:
z lewej – bez kulisy, z prawej – z kulisą; próbka piaskowca



Rys. 7. Odształcenia globalne (LVDT) vs. odształcenia lokalne (tensometr) dla obciążania: z lewej – bez kulisy, z prawej – z kulisą; próbka granitu

4.2. Wyniki pomiarów odształceń podłużnych próbki metodą fotogrametryczną

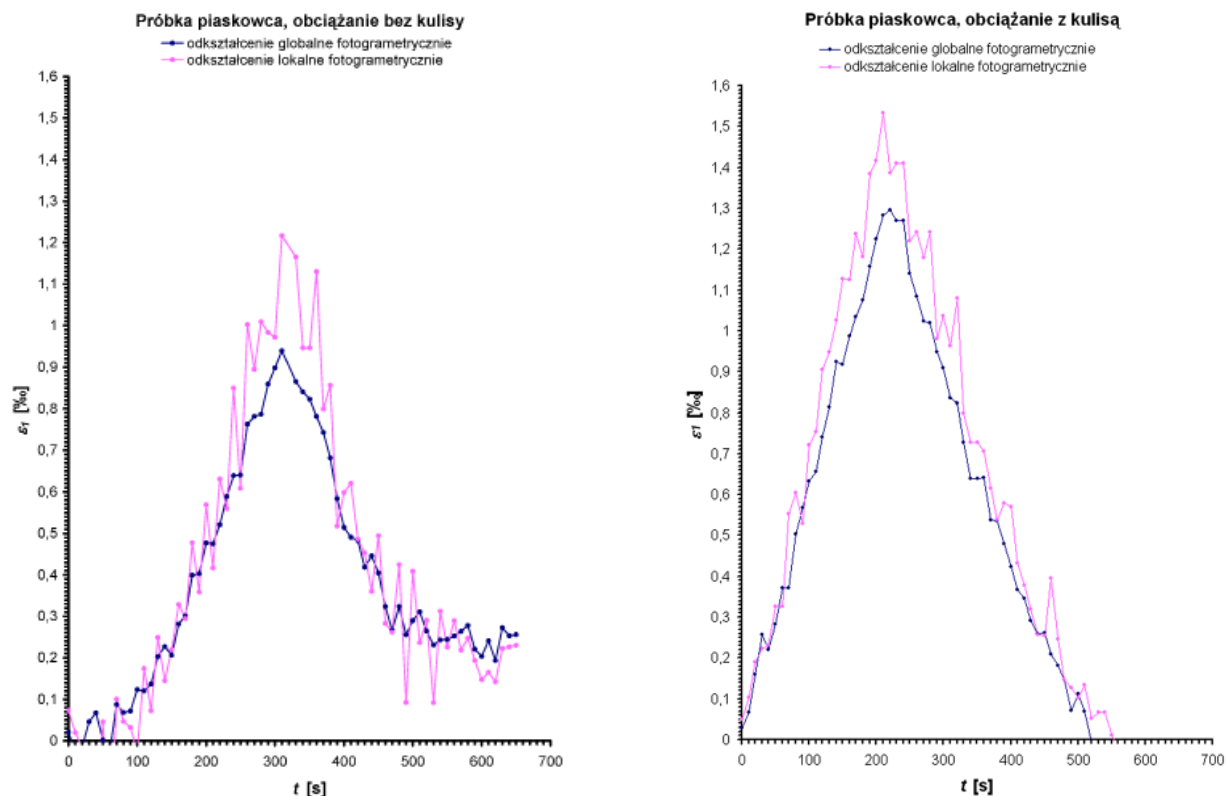
Rezultaty oznaczania dla badanych próbek piaskowca i granitu wartości odształceń podłużnych metodą fotogrametryczną pokazano odpowiednio na rys. 8 i 9. Podczas analizy pokazanych na tych rysunkach krzywych przede wszystkim zwraca uwagę fakt, iż w przypadku metody fotogrametrycznej nie widać znaczących różnic pomiędzy wynikami globalnego i lokalnego pomiaru deformacji. Jest to wynik dość zaskakujący w świetle całej dotychczasowej wiedzy o pomiarze odształceń podczas testu jednoosiowego ściskania.

Dodatkowo podczas analizy krzywych pokazanych na rys. 8 i 9 rzuca się w oczy, iż krzywa odształceń lokalnych jest znacznie mniej „gładka” niż krzywa odształceń globalnych. W tym przypadku jednak wyjaśnienie przyczyny tych różnic nie nastrocza większych trudności. Pomiar lokalny odniesiony jest bowiem do odcinka bazy o długości 12 mm co oznacza, że nawet niewielki błąd bezwzględny daje stosunkowo duży błąd względny. Natomiast przy wyznaczaniu odształceń globalnych odcinkiem odniesienia jest cała wysokość próbki (100 lub 160 mm). Biorąc pod uwagę, iż błąd bezwzględny jest dla obu pomiarów taki sam to błąd względny dla pomiaru globalnego będzie wyraźnie mniejszy.

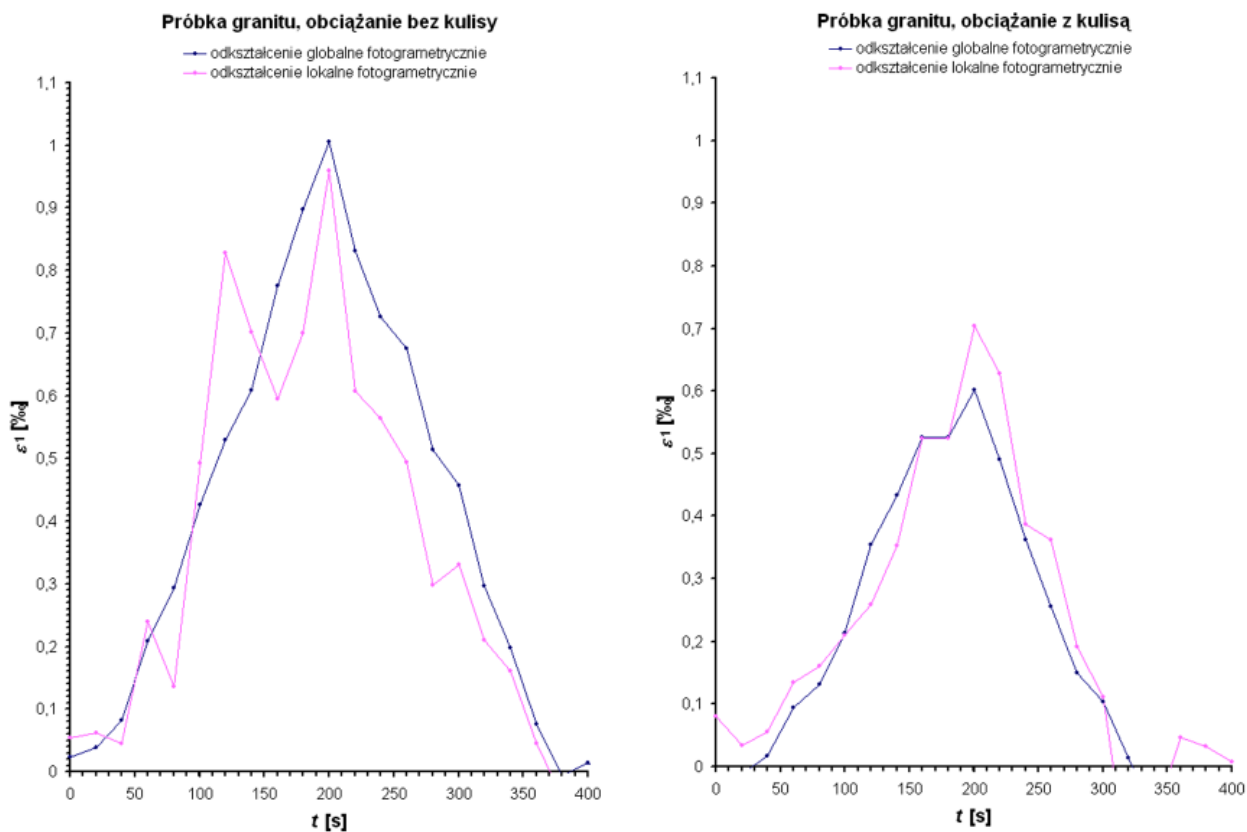
Kończąc tę część rozważań należy jeszcze przypomnieć, że o ile odczyty z tensometrów rezystancyjnych czy też z czujnika LVDT wykonywane były z częstotliwością 1 Hz o tyle w przypadku metody fotogrametrycznej wykonywano 1 zdjęcie na 10 lub 20 sekund, co można by uznać za wykonywanie odczytów z częstotliwością 0,1 lub 0,05 Hz. Oznacza to, że dla metody fotogrametrycznej otrzymano 10 oraz 20 razy mniej punktów pomiarowych niż dla metod tradycyjnych, co nie pozostaje bez wpływu na kształt krzywych pokazanych na rys. 8 i 9.

4.3. Porównanie wyników pomiarów odształceń podłużnych próbki metodami tradycyjnymi i metodą fotogrametryczną

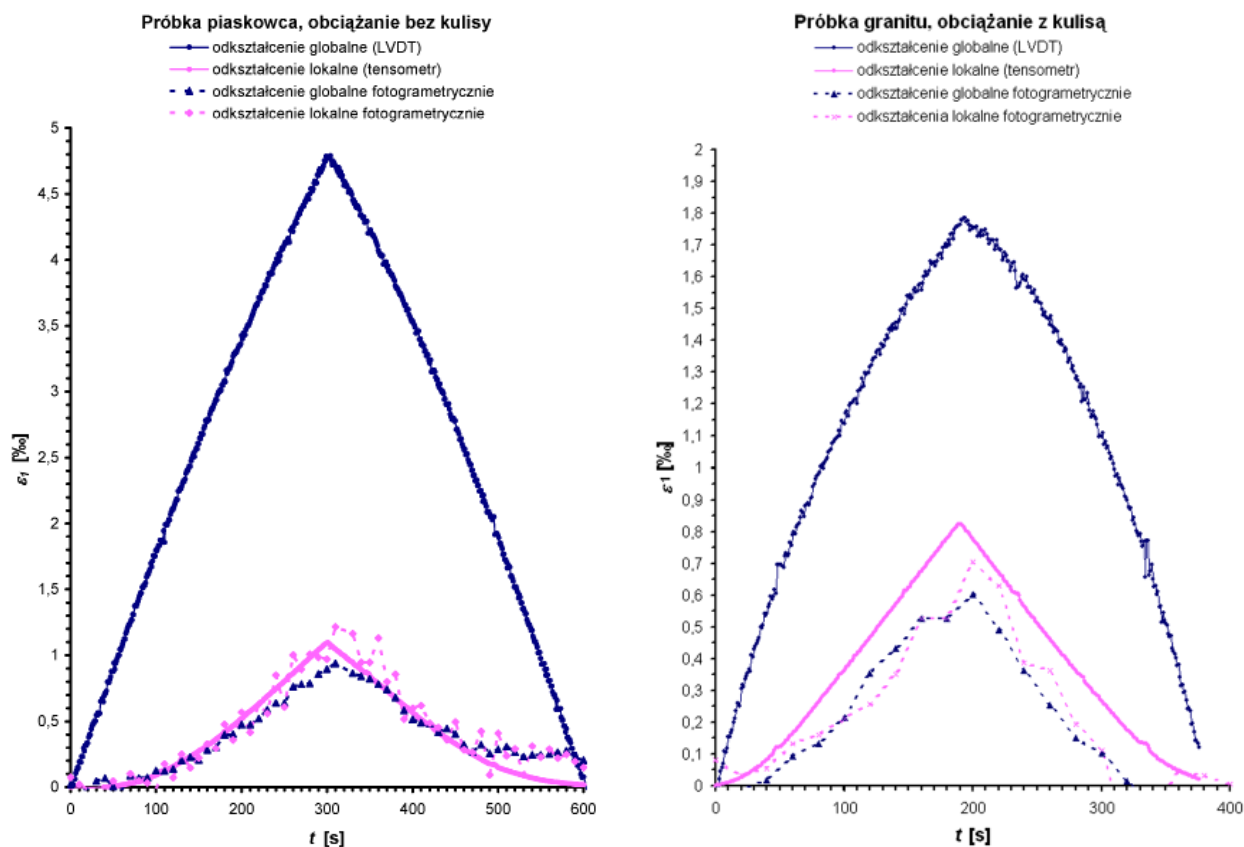
Wyniki pomiarów odształceń metodami tradycyjnymi oraz metodą fotogrametryczną zestawiono dla piaskowca na rys. 10 a dla granitu na rys. 11. Porównanie odpowiednich krzywych na tych rysunkach prowadzi do następujących wniosków.



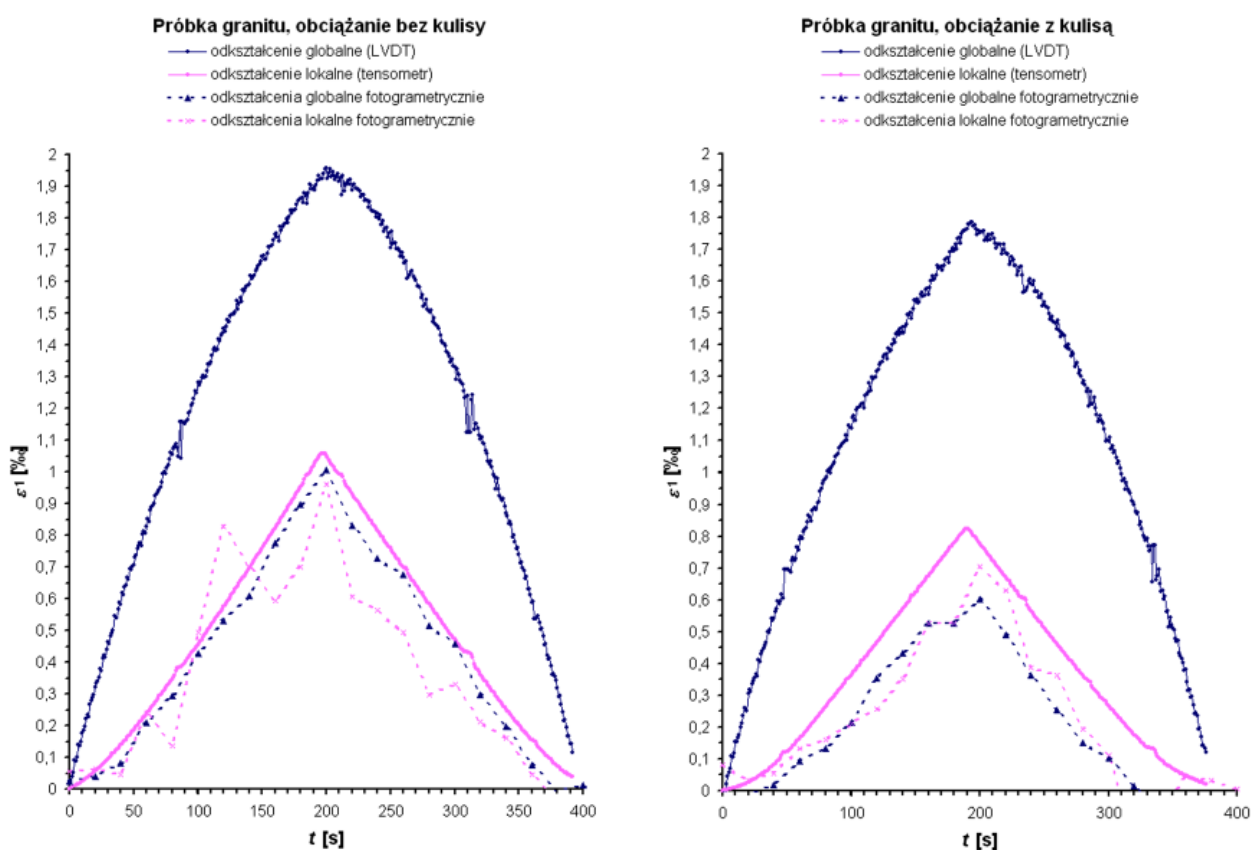
Rys. 8. Odkształcenia globalne (metoda fotogrametryczna) vs. odkształcenia lokalne (metoda fotogrametryczna) dla obciążania: z lewej – bez kulisy, z prawej – z kulisą; próbka piaskowca



Rys. 9. Odkształcenia globalne (metoda fotogrametryczna) vs. odkształcenia lokalne (metoda fotogrametryczna) dla obciążania: z lewej – bez kulisy, z prawej – z kulisą; próbka granitu



Rys. 10. Porównanie wyników pomiaru odkształceń metodami tradycyjnymi oraz metodą fotogrametryczną dla obciążania: z lewej – bez kulisy, z prawej – z kulisą; próbka piaskowca



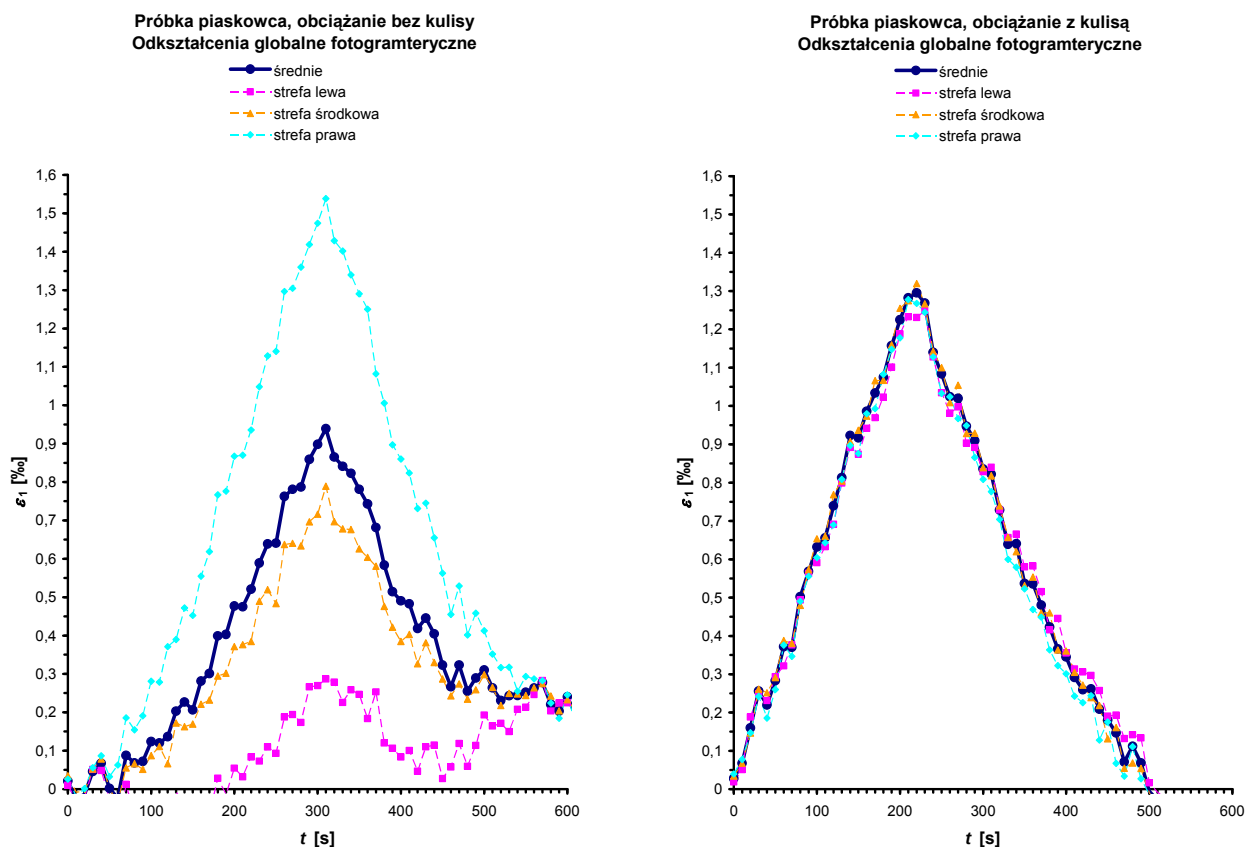
Rys. 11. Porównanie wyników pomiaru odkształceń metodami tradycyjnymi oraz metodą fotogrametryczną dla obciążania: z lewej – bez kulisy, z prawej – z kulisą; próbka granitu

Przede wszystkim rzuca się w oczy, iż zarówno ilościowo jak i jakościowo pomiar fotogrametryczny jest w zasadzie zgodny z lokalnym pomiarem tensometrem rezystancyjnym. Wprawdzie krzywe „fotogrametryczne” nie są tak gładkie i regularne jak krzywe „tensometryczne” (o przyczynach obserwowanych różnic będzie mowa niżej, w rozdz. 5), ale z dobrym przybliżeniem można uznać, iż krzywa „tensometryczna” jest po prostu obwiednią dla krzywych „fotogrametrycznych”.

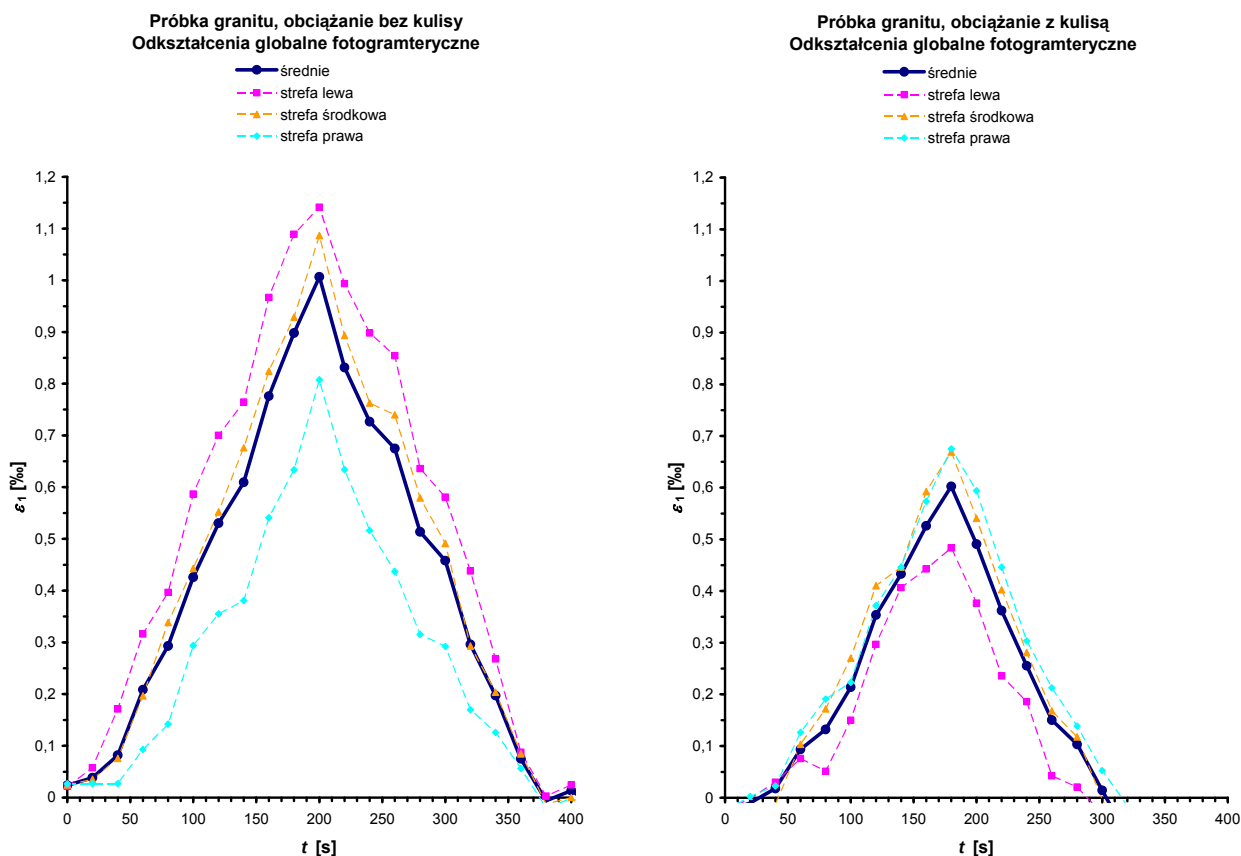
Drugi rzucający się w oczy fakt to bardzo duże różnice między wynikami wyznaczania odkształceń globalnych na podstawie odczytów z LVDT a pozostałymi wynikami pomiaru odkształceń. Przyjęte wstępnie założenie, iż przeprowadzona wyżej (rozdz. 3.1) korekta odczytów LVDT uwzględniająca zmianę długości stalowych separatorów, za pośrednictwem których realizowane jest obciążenie próbki, powinna wystarczająco zredukować wartość wyznaczanego odkształcenia globalnego okazało się niestety fałszywe. Krzywe pokazane na rys. 11 i 12 zmuszają do ponownego przemyślenia procesów zachodzących w próbce podczas testu jednoosiowego ściskania. Wydaje się, że szczególną uwagę należałoby zwrócić na zjawiska zachodzące w strefie kontaktu między próbką a stalowymi separatorami. Strefa ta nie była przedmiotem analizy fotogrametrycznej a tensometry rezystancyjne naklejone są od niej zbyt daleko, aby mogły zarejestrować jej wpływ na mierzone deformacje. Dodatkowo trzeba pamiętać iż właśnie w tej strefie będą się najsilniej manifestować konsekwencje niedokładności przygotowania podstaw próbek.

To ostatnie spostrzeżenie pośrednio obrazują rys. 12 i 13 wykonane na podstawie danych z metody FMPD. Obok odkształceń globalnych dla całej próbki na wykresy naniesiono także odkształcenia globalne w trzech strefach – lewej, centralnej i prawej. Wyznaczono je w ten sposób, że obszary w1 i w2 (z rys. 5) zostały podzielone na 3 równe części (w1a, w1b, w1c, w2a, w2b i w2c), a następnie odkształcenia każdej ze stref wyznaczono porównując przemieszczenia odpowiadających sobie obszarów (w1a i w2a itd.) i odnosząc do dzielącej je odległości.

Krzywe pokazane na rys. 12 i 13 bardzo dobitnie ilustrują wpływ obecności kulisy, bądź też jej braku, na rozkład odkształceń w obciążanej próbce. Szczególnie wyraźnie jest to widoczne w przypadku piaskowca (rys. 12). Używając żargonowego określenia można napisać, iż próbka piaskowca ściskana bez kulisy „stoi na kancie” i jej prawa część jest ściskana bardzo silnie (odkształcenie maksymalne osiąga 1,6‰) podczas



Rys. 12. Porównanie wyników pomiaru odkształceń globalnych metodą FMPD dla całej próbki i w trzech strefach dla obciążania: z lewej – bez kulisy, z prawej – z kulisą; próbka piaskowca



Rys. 13. Porównanie wyników pomiaru odkształceń globalnych metodą FMPD dla całej próbki i w trzech strefach dla obciążania: z lewej – bez kulisy, z prawej – z kulisą; próbka granitu

gdy jej część lewa deformuje się stosunkowo nieznacznie (przez pierwsze 200s odkształcenia są praktycznie zerowe). Wprowadzenie do układu obciążenia kulisy powoduje, iż odkształcenia w rozważanych strefach próbki się wyrównują i pole odkształceń można uznać za jednorodne. Podobny efekt daje się zaobserwować w przypadku próbki granitowej (rys. 13) z tym, że wpływ kulisy nie jest tak duży jak w przypadku piaskowca. Jest to naturalne w świetle poczynionych już wyżej (rozd. 4.1) uwag, iż wpływ kulisy na wynik eksperymentu jest tym większy im większe są niedokładności w przygotowaniu podstaw próbki.

5. Kilka uwag na temat niepewności pomiarowych metody fotogrametrycznej

W zasadzie każdy etap pomiaru deformacji powierzchni metodą fotogrametryczną wpływa na jakość i dokładność uzyskiwanych wyników. Do głównych źródeł niepewności pomiarowych w tej metodzie należą:

- właściwości optyczne obiektu pomiarowego: czy obserwowana powierzchnia obiektu spełnia założenia metody CKO/CAO; czy na powierzchni występują np. obiekty opalizujące/lustrzane, od których obserwowane natężenie światła odbitego silnie zależy od kąta padania światła, itd.,
- właściwości optyczne zestawu pomiarowego: rodzaj i rozdzielczość matrycy aparatu/kamery cyfrowej; rodzaj i jakość zastosowanego obiektywu – jasność, kontrast, obecność i natężenie zniekształceń typu beczkowatego, komy, astygmatyzmu, obecność elementów ruchomych; zastosowane oświetlenie itd.,
- sposób zamocowania wszystkich elementów zestawu pomiarowego: stabilność krótko- (drgania) i długookresowa (płynięcie) itd.,
- sposób wykonywania zdjęć: warunki ekspozycji; sposób wyzwalania; obróbka cyfrowa zdjęć na poziomie elektroniki aparatu; synchronizacja czasowa, itd.,
- sposób analizy zdjęć: zastosowany rodzaj wstępnego przetwarzania zarejestrowanych obrazów; zastosowane algorytmy (oprogramowanie) do wyznaczania pól przemieszczeń, zastosowane algorytmy walidacji wyników, itd.

Z powyższego wynika, że określenie niepewności pomiarowych w metodzie FMPD jest zagadnieniem silnie złożonym. Z tego powodu zamiast szczegółowej analizy niepewności każdej serii pomiarowej autorzy niniejszego opracowania ograniczą się do uwypuklenia pewnych specyficznych cech obydwu zaprezentowanych eksperymentów.

Porównanie metod tradycyjnej i fotogrametrycznej w przypadku obu próbek skalnych w zakresie odkształceń lokalnych wskazuje na dobrą zgodność ilościową. Jednak trudno nie zauważyć różnicy pomiędzy niemal gładkimi krzywymi uzyskanymi w wyniku pomiarów tensometrycznych oraz „postrzępionymi” liniami charakteryzującymi pomiary fotogrametryczne. Sytuację na pewno istotnie poprawiłoby zwiększenie częstotliwości wykonywania zdjęć, a następnie zastosowanie lokalnego uśredniania (np. filtra Sawickiego-Golaya) do uzyskanych wyników. Zasadniczo jednak mamy tu do czynienia z dwoma sumującymi się efektami. Pierwszy z nich to niedokładność pomiaru odkształcenia wynikająca z ograniczeń metody, a drugi – lokalnie zmienny charakter odkształceń oraz niemożliwość wykonania pomiaru na powierzchni próbki zajmowanej przez przyklejony tensometr.

Drugi z wspomnianych efektów częściowo mogą ilustrować wykresy z rysunków 12 i 13. Wskazują one na znaczne różnice w wartościach odkształceń trzech stref próbki. Przy przejściu do mniejszych obszarów, o rozmiarach rzędu kilkunastu-kilkudziesięciu ziaren (powierzchnia zakryta drutem oporowym tensometru) mamy do czynienia z jeszcze większą zmiennością w tym zakresie, co może ujawniać metoda fotogrametryczna, a maskować metoda tradycyjna.

Natomiast jeśli chodzi o ograniczenia wynikające z samej metody fotogrametrycznej, to podkreślenia wymagają tu trzy najistotniejsze czynniki, które najsilniej wpłynęły na dokładność pomiaru odkształcenia:

1. skala odwzorowania,
2. jakość dostępnych algorytmów obliczeniowych,
3. wielkość „znaczników”, czyli obiektów na obrazie dostarczających stochastycznie zróżnicowanego sygnału koniecznego do analizy statystycznej metodą korelacji wzajemnej wykorzystującej FFT.

Ad. 1. Skala odwzorowania wynika z fizycznych rozmiarów obszaru objętego kadrem oraz rozdzielczości matrycy aparatu cyfrowego. W podrozdziale 3.2 wskazano, że w jeden piksel niesie w sobie informacje o poziomie jasności obszaru fizycznego o rozmiarach $27,5 \times 27,5 \mu\text{m}$ w przypadku piaskowca i $41,8 \times 41,8 \mu\text{m}$ w przypadku granitu. Liczby te determinują rząd wielkości możliwej do osiągnięcia precyzji wyznaczenia przemieszczeń. Precyzję tą można podnieść bądź „ciaśniej” kadrem, bądź przez zastosowanie matrycy o wyższej rozdzielczości.

Ad. 2. Przyjmuje się, że standardowa analiza „subpikselowa” metodami CAO (tu zastosowane) pozwala na uzyskanie dokładności pomiaru na poziomie 1/10 piksela. W określonych przypadkach możliwa do osiągnięcia jest nawet precyzja dwukrotnie wyższa⁵. Analiza przemieszczeń (nie zaprezentowana) wskazuje, że maksymalne oscylacje ich wartości wokół linii trendu nie przekraczają 0,1 piksela w przypadku obu skał, a średnie są znacznie niższe. Zatem jest to wynik w pełni zadowalający, a wraz ze zgodnością z metodą tensometryczną wskazuje również na to, że same pomiary zostały przeprowadzone z najwyższą starannością.

Ad. 3. Metody optyczne takie jak CAO, CKO są znamienne tym, że wymagają stochastycznie rozłożonego znacznika (posiewu) w całym analizowanym obszarze. W przypadku płynów do przepływu wprowadza się substancję drobnocząsteczkową, o której zakłada się, że jej cząsteczki poruszają się identycznie, jak płyn w którym są zawieszone. W przypadku skał można wykorzystać naturalnie występujący wzór wynikający z ułożenia ziaren. Jednakże w zależności od rodzaju skały, tj. rozkładu wielkości i zróżnicowania kolorystycznego ziaren oraz od skali odwzorowania takie postępowanie może być nieefektywne. Ziarna widoczne jako względnie duże i niezróżnicowane obszary przyczyniają się do pogorszenia jakości korelacji, co może prowadzić do zafałszowanych lub nawet zupełnie błędnych wyników. W takiej sytuacji konieczne jest „domalowanie” wskaźników np. poprzez rozpylenie z daleka kontrastującej farby w aerozolu. Taka sytuacja wystąpiła w przypadku granitu, jednak zastosowanie wstępnego przetworzenia obrazów oraz algorytmu korelacji adaptacyjnej wyeliminowało obecność zafałszowanych wektorów do minimum, przy czym nie zostały one wzięte pod uwagę podczas opracowania wyników.

⁵ Jeden z czołowych producentów oprogramowania dedykowanego do CKO deklaruje, że jego algorytmy pozwalają na osiągnięcie precyzji nawet na poziomie 1/100 piksela.

6. Podsumowanie

Rozważania zawarte wyżej (w szczególności w rozdz. 4.3) pokazują, iż metoda fotogrametryczna daje możliwość ilościowej oceny stanu deformacji próbki podczas testu jednoosiowego ściskania. W szczególności można uznać, iż po spełnieniu pewnych warunków, jakość uzyskanych tą metodą wyników nie będzie gorsza od wyników uzyskanych za pomocą wielokrotnie już sprawdzonych tensometrów rezystancyjnych. Warunki te dotyczą przede wszystkim następujących grup zagadnień (nie wszystkie były poruszone powyżej):

- a) sposobu przygotowania próbki do testu,
- b) sposobu oświetlania próbki podczas testu,
- c) doboru sprzętu fotograficznego i sposobu jego umocowania na stanowisku pomiarowym,
- d) doboru skali odwzorowania,
- e) doboru oprogramowania służącego obróbce wykonanych zdjęć.

Jeśli chodzi o sposób przygotowania próbki to w chwili obecnej w grę wchodzi jedynie próbki prostopadłościenną ze względu na możliwość zastosowania jedynie metody 2D CAO. Istotną kwestią będą natomiast wymiary próbki, które trzeba dobierać z uwzględnieniem parametrów posiadanego sprzętu fotograficznego oraz wymaganej dokładności pomiarów przemieszczeń.

Dopracowania wymaga jeszcze zestaw oświetlenia, aby pozwalał na uzyskiwanie krótszych czasów ekspozycji, a jednocześnie gwarantował równomierne oświetlenie całej próbki.

Zastosowany w opisanych powyżej pomiarach obiektyw zmiennoogniskowy (tzw. „zoom”) nie jest rozwiązaniem optymalnym. Nie tylko nie posiada on opcji „makro”, ale przede wszystkim wyposażony jest w system redukcji drgań. System ten realizuje swoją funkcję za pomocą ruchomej soczewki. Sposób budowy zawieszenia tej soczewki, nawet przy wyłączonej funkcji redukcji drgań nie gwarantuje, że będzie ona nieruchoma nawet podczas wykonywania zdjęć z użyciem statywu. Zatem konieczny jest zakup teleobiektywu stałoogniskowego z funkcją makro.

Istotne jest sztywne umocowanie aparatu fotograficznego na stanowisku pomiarowym, odczekanie pewnego okresu czasu oraz wykonanie „jałowej” serii zdjęć. Pozwala to na ustalenie się „mikro-warunków” pomiarowych wynikających zarówno z budowy aparatu fotograficznego, jak i sposobu jego zamocowania.

Skala odwzorowania powinna być dobrana tak, aby zapewnić wystarczającą precyzję do wyznaczenia minimalnych wymaganych deformacji powierzchni. Może się to odbyć kosztem „poświęcenia” mniej interesującej części próbki, ponieważ pole przemieszczeń jest wyznaczane lokalnie, a analiza globalna jest tylko sposobem interpretacji informacji lokalnych.

Do analizy fotogrametrycznej najlepiej służy oprogramowanie komercyjne wykorzystujące metodę CKO. W przypadku braku takiego oprogramowania można wykorzystać oprogramowanie komercyjne wykorzystujące metodę CAO, mając na uwadze pewne wynikające z tego ograniczenia. Programy ogólnodostępne przeważnie charakteryzują się gorszą precyzją w przypadku analizy „subpikselowej”.

Praca została wykonana w roku 2013 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Brown D.C., 1971: *Lens Distortion for Close-Range Photogrammetry*. Photometric Engineering, 37(8): 855-866
- Chu T.C., Ranson W.F., Sutton M.A., Peters W.H., 1985: *Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics*. Exp. Mech. 25: 232-44
- Cloud G., 1998. *Optical Methods of Engineering Analysis*. Cambridge University Press, New York, USA
- Cofaru C., Philips W., Van Paepegem W., 2012: *A three-frame digital image correlation (DIC) method for the measurement of small displacements and strains*, Meas. Sci. Technol. 23
- Gustkiewicz J., 1975a: *O zniekształceniach wyników testowania skał na jednoosiowe ściskanie*. Archiwum Górnictwa, t. XX, z. 1, s. 18-39.
- Gustkiewicz J., 1975b: *Uniaxial Compression Testing of Elastic-Brittle Materials, the Bending Moment Being Considered*. Bulletin de l'Academie Polonaise des Sciences. Série des sciences techniques. Vol. XXIII, No. 2, p. 67-74.
- Gustkiewicz J., 1975c: *Strain Fluctuations in Heterogeneous Rocks*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 12, p. 181-189.

- Gustkiewicz J., 1975d: *Uniaxial Compression Testing of Brittle Rock Specimens with Special Consideration given to Bending Moment Effects*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 12, p. 13-25.
- Kanciruk A., 2009: *Urządzenia do pomiarów wielkości mechanicznych i temperatury przy użyciu przetworników rezystancyjnych I przykłady ich zastosowania*. IMG PAN, Kraków, 165 s.
- Kidybiński A., 1982: *Podstawy geotechniki kopalnianej*. Wyd. „Śląsk”, Katowice, 516 str.
- Lama R.D., Vutukuri S.V., 1978: *Handbook on Mechanical Properties of Rocks. Vol. II – Testing Techniques and Results*. Trans Tech Publications, Claustahl, Germany, 481 p.
- Lee S., Hwang J., Shankar M.R., Chandrasekar S., Compton W.D., 2008: *Large strain deformation field in machining*. Metall. Mater. Trans. 37A: 1633-1643.
- Raffel M., Willert Ch.E., Wereley S.T., Kompenhans J., 2007: *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*, 2nd ed. Springer.
- Ulusay R., Hudson J.A., (eds.) 2007: *Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials*. In: “The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006”, Kozan Ofset Matbaacilik San. Ve Tic. Sti., Ankara, Turkey, p. 151-156
- Vutukuri S.V., Lama R.D., Saluja S.S., 1974: *Handbook on Mechanical Properties of Rocks. Vol. I – Testing Techniques and Results*. Trans Tech Publications, Claustahl, Germany, 282 p.
- White D.J., Take W.A., Bolton M.D., 2003: *Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry*. Geotechnique, 53: 619-31

Comparison of the results of measurement of sample deformation by means of strain gauges and photogrammetric method

Abstract

The work is devoted to the application of modern optical measurement techniques for the analysis of the deformation of the sample during uniaxial compression test. In the study a series of uniaxial compression tests on rectangular rock specimens was made. During the tests the local and global deformation of the sample were measured using traditional methods (strain gauges, inductive displacement sensors) and photogrammetric method based on the analysis of samples' images taken during the experiments. Studies have shown that it is possible to obtain a good agreement between the results of local strain measurements conducted by strain gauges and photogrammetric method and large discrepancies between results of global measurements conducted by an inductive sensor and photogrammetric method. The possible causes of a given set of things were discussed as well as some indications for possible future research were formulated.

Keywords: uniaxial compression, strain measurement, resistant strain gauge, inductive sensor, optical measurement, photogrammetric method