

Łukasz KRAWCZYK¹

Michał GOŁDYN²

Tadeusz URBAN³

O NIEDOKŁADNOŚCIACH SYSTEMÓW CYFROWEJ KORELACJI OBRAZU

Celem niniejszego opracowania jest omówienie niedokładności pomiarowych systemu Aramis. Ze względu na złożoność zagadnienia trudno jest znaleźć rozwiązanie ogólne. Do celów aplikacyjnych stosowana jest metoda polegająca na porównywaniu wielu zdjęć przedstawiających jeden stan powierzchni. W artykule zaprezentowano analizę niedokładności dla pola pomiarowego 1250×1100 mm. Rozrzut wyników rejestrowany przez system Aramis jest miarą błędu pomiaru. Stwierdzono, że odczyty z map odkształceń obciążone są znacznym błędem w stosunku do wartości powodujących zniszczenie betonu. Jednocześnie stwierdzono dobrą dokładność wyznaczenia zmiany długości odcinków pomiarowych, co umożliwia precyzyjne wnioskowanie o zmianach szerokości rozwarcia rys. Wskazano jak szukać szerokości rozwarcia rys, aby osiągnąć zbieżność z wynikami pomiarów prowadzonych tradycyjnie (wzrokowo). Przeprowadzono dyskusję dotyczącą wpływu wielkości podziału powierzchni na otrzymaną szerokość rys.

Słowa kluczowe: system korelacji obrazu, błąd pomiaru, szerokość rys, badania eksperymentalne

1. Wprowadzenie

Niniejszy artykuł ma na celu przybliżyć tematykę związaną z szacowaniem wielkości błędów z jakimi trzeba się liczyć korzystając z systemów cyfrowej korelacji obrazów. Przedstawiona analiza została przygotowana dla pola pomiarowego 1250×1100 mm. Materiał prezentowany w niniejszym artykule powstał podczas badania wsporników żelbetowych przeprowadzonych w Katedrze Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej. Na wielkość błędów mają wpływ: wielkość pola pomiarowego, niedokładności uśredniania i obliczania wyników przez oprogramowanie, zmiany oświetlenia podczas badania, szum

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Łukasz Krawczyk, Politechnika Łódzka, Katedra Budownictwa Betonowego, al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, lukasz.krawczyk@p.lodz.pl

² Michał Gołdyn, Politechnika Łódzka

³ Tadeusz Urban, Politechnika Łódzka

matryc w aparatach, ustawienie aparatów względem powierzchni, jakość obiektów i sposób naniesienia desenu na mierzoną powierzchnię.

Pomiary wykonywane za pomocą systemu cyfrowej korelacji obrazów możliwe są dzięki wykonaniu zdjęć powierzchni podczas badania. Na podstawie porównania zdjęcia dla danego obciążenia ze zdjęciem referencyjnym możliwe jest ustalenie przemieszczeń wybranych punktów na powierzchni. Na tej podstawie mogą być obliczane odkształcenia. Aby jednak taka analiza była możliwa system dzieli powierzchnię pomiaru na pola o ustalonej wielkości nazywane fasetkami. Standardowa fasetka charakteryzuje się wymiarami 21×21 pikseli. Drugą wartością charakterystyczną dla podziału jest odległość pomiędzy środkami sąsiadujących ze sobą fasetek. Wartość zalecana wynosi 18 pikseli.

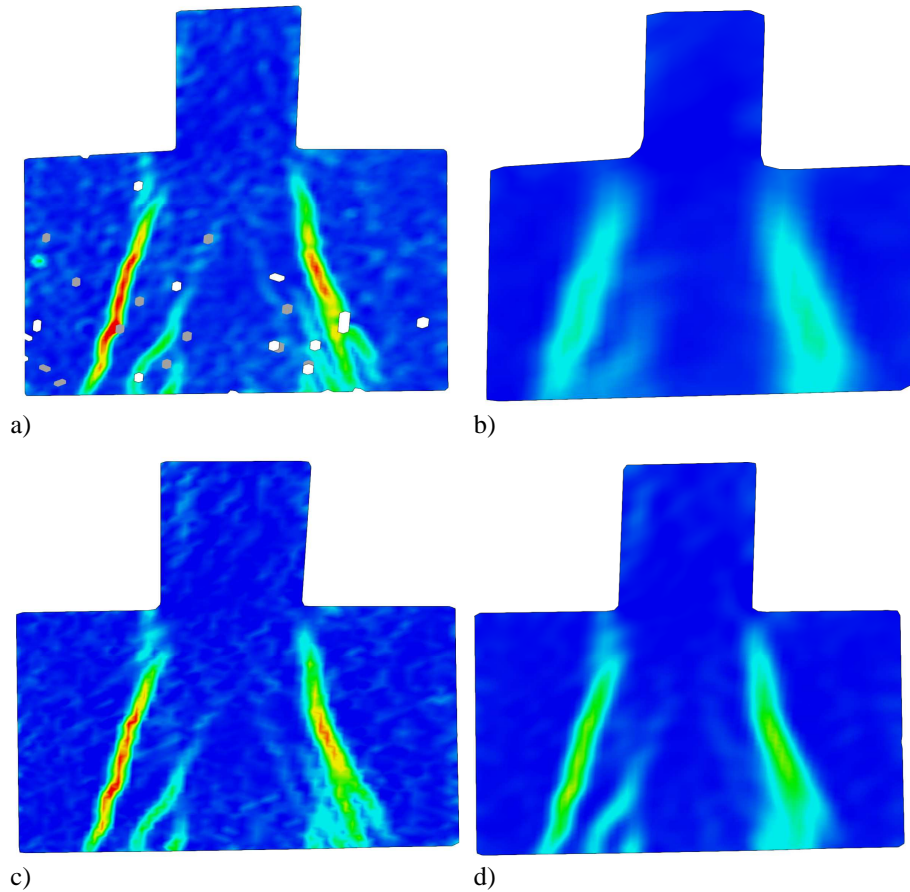
Tabela 1. Wpływ wielkości fasetek na liczbę punktów obliczeniowych

Table 1. Influence of facets size on calculation points number

	Wymiar fasetki	Odległość pomiędzy fasetkami	Punkty obliczeniowe
	piksel	piksel	sztuk
zagęszczona	15×15	12	7145
typowa	21×21	18	3364
rozrzedzona	45×45	35	789

Zagęszczanie fasetek wpływa na wyniki w sposób analogiczny do zagęszczania siatki w modelu obliczeniowym metody elementów skończonych. Dla unaocznienia tego zjawiska przedstawiono przykład na podstawie wspornika E – II. Wpływ wielkości fasetek na liczbę punktów został pokazany w tabeli 1. Wraz z zagęszczeniem podziału siatki obliczenia stają się coraz bardziej czasochłonne. Obraz odkształceń głównych dla wspornika E – II dla zagęszczonego, typowego i rozrzedzonego podziału powierzchni został zaprezentowany na rysunku 1. Wszystkie mapy odkształceń głównych dotyczą tego samego elementu przy sile wynoszącej 1300 kN i skali odkształceń od 0 do 30%. Porównując ze sobą rysunki 1 a i 1 b można stwierdzić, że dla większych fasetek otrzymano rysy zdecydowanie bardziej rozmyte, mniej szczegółowe obrazy odkształceń.

Na rysunku 1a widoczne są miejsca wypełnione białym kolorem. Są to fragmenty powierzchni dla których nie ma danych pochodzących z analizy. Jest to skutkiem sposobu przygotowania powierzchni. W zależności od wielkości pola pomiarowego i od przewidywanego podziału powierzchni na fasetki należy dobrać odpowiedni desień (rozmiar punktów nanoszonych na powierzchnię). W przypadku gdy wewnątrz fasetki znajduje się zbyt dużo elementów o zbyt podobnym do siebie kolorze (Aramis identyfikuje obrazy korzystając z 256 odcieni szarości) system nie rozpoznaje fasetki jako jednoznacznie zdefiniowanego fragmentu powierzchni.



Rys. 1. Mapy odkształceń głównych we wsporniku E - II przy obciążeniu 1300 kN. Powierzchnia podzielona na fasetki a) 15×15 , b) 45×45 , c) 18×18 , d) 18×18 z podwójnym sąsiedztwem

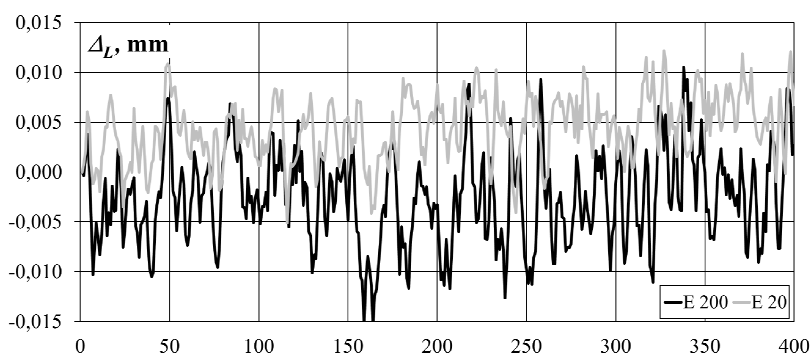
Fig. 1. Comparison of principal strain maps for corbel E - II for load equal to 1300 kN. Surface divided into facets a) 15×15 , b) 45×45 , c) 18×18 , d) 18×18 with double neighborhood

2. Analiza błędów

Istotną kwestią wydaje się ustalenie błędu wyznaczenia odkształceń. Ze względu na istotną z wyliczeniem niepewności pomiaru powszechnie stosuje się sprawdzenie szumu pomiarowego. Metodę taką zastosował *Kneć* [1] oraz *Revi-lock i inni* [2]. Sprawdzenie polega na wykonaniu wielu zdjęć powierzchni. Zakłada się, że próbka niepoddana obciążeniu, ani zmianie temperatur powinna wyglądać tak samo. A zatem wszelkie zarejestrowane zmiany długości lub przyrosty odkształceń są błędem pomiaru. Takie podejście poza prostotą wykonania ma jeszcze jedną zaletę. Ustalenie niepewności uwzględnia wszystkie możliwe

czynniki wpływu dla konkretnego pomiaru. Należy zwrócić uwagę na utrzymanie jednakowych warunków oświetlenia podczas badania.

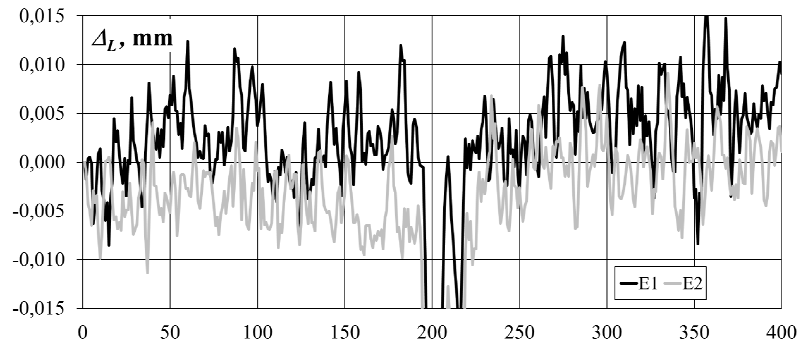
Celem wyznaczenia błędów pomiaru dla prezentowanych wyników badań wykonano serię 400 pomiarów (800 zdjęć) nieobciążonego wspornika. Na rysunkach 2., 3. i 4. przedstawiono odczyty długości dla wirtualnych baz pomiarowych. Na rysunku 2 porównano wyniki dla ekstensometrów o długości 20 mm (E20) i 200 mm (E200). Stwierdzono, że dla dłuższej bazy pomiarowej odczyty wahały się w zakresie od $-0,017$ mm do $+0,011$ mm, natomiast dla krótszej od $-0,005$ mm do $+0,012$ mm. Na podstawie wyników wykonano analizę statystyczną danych celem wyznaczenia błędów. Zgodnie z teorią błędów pomiaru wyznaczono błędy graniczne dla poszczególnych serii odczytów. Prawdopodobieństwo wystąpienia pomiaru, odstającego od wartości średniej o więcej niż o błąd graniczny wynosi 0,86%. Precyzja wyznaczenia długości odcinków jest na poziomie $\pm 0,010$ mm dla krótszej i $\pm 0,014$ mm dla dłuższej bazy pomiarowej. Jest to dokładność większa niż dla typowej lupy Brinella o powiększeniu 24x, gdzie podziałka elementarna na skali to 0,05 mm.



Rys. 2. Zmiana długości wirtualnych baz pomiarowych - element nieobciążony (bazy o długościach 20 mm - E20 i 200 mm - E200)

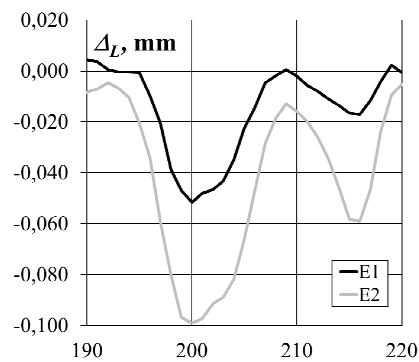
Fig. 2. Length change of virtual measuring base specimen without any load (base length 20 mm - E20 and 200 mm - E200)

Na rysunku 3. przedstawiono odczyt długości wirtualnych baz pomiarowych o długości około 20 mm (E1, E2). W części zarejestrowanych etapów pomiaru widać znacznie większe odczyty. Dla uwidocznienia tej obserwacji na rysunku 4 pokazano etapy od 190 do 220 z rozszerzoną skalą pionową. Widać, że odczyty osiągnęły wartość $-0,100$ mm, kilkukrotnie przekraczając wartość błędu granicznego pomiaru. Przyczyną takiej sytuacji była zmiana warunków oświetlenia na tej części powierzchni, na której znajdowały się bazy E1 i E2.



Rys. 3. Zmiana długości wirtualnych baz pomiarowych w strefie, gdzie zostały zmienione warunki oświetleniowe, element nieobciążony

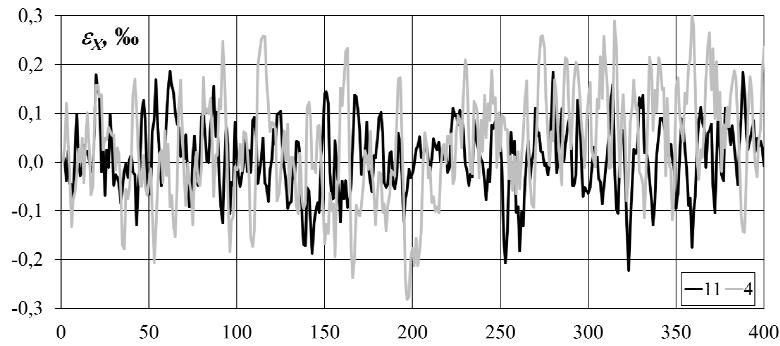
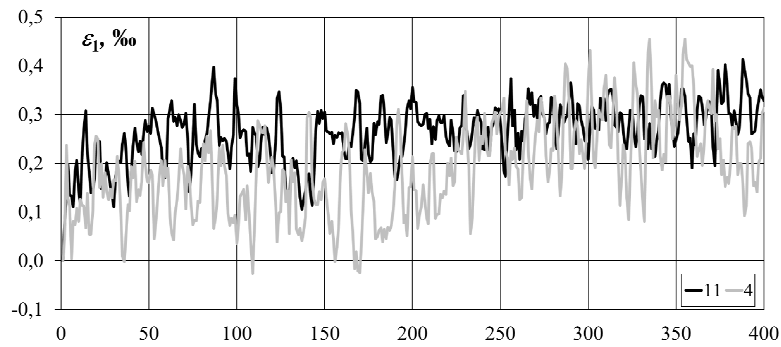
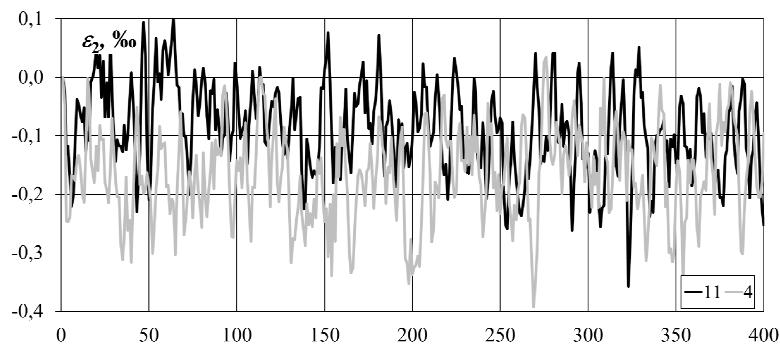
Fig. 3. Length change of virtual measuring base in area where lighting conditions were changed specimen without any load



Rys. 4. Zmiana długości wirtualnych baz pomiarowych podczas zmiany warunków oświetlenia bez obciążenia (etapy od 190 do 220)

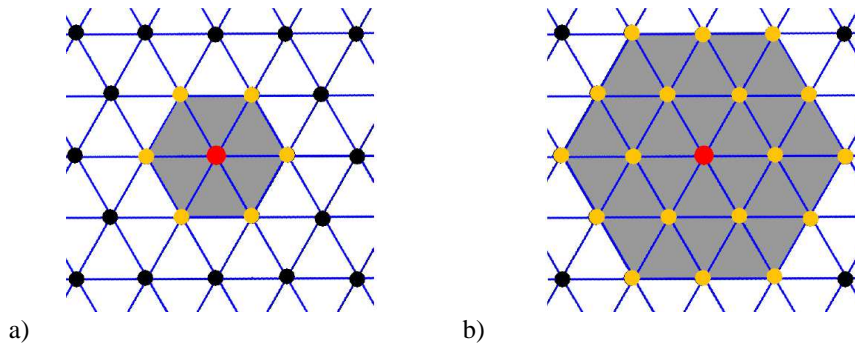
Fig. 4. Length change of virtual measuring base during lighting conditions were changed without any load (stages from 190 to 220)

Kolejnym zagadnieniem jest dokładność wyznaczenia odkształceń w punktach powierzchni. Na rysunkach 5., 6. i 7. przedstawiono odczyt odkształceń ε_x , ε_1 i ε_2 . Błąd graniczny odczytu odkształceń wzdłuż osi X wynosi $\pm 0,34\%$, natomiast dla odkształceń głównych $\pm 0,59\%$. O ile wyznaczenie przemieszczeń liniowych można uznać za precyzyjne na potrzeby badania konstrukcji żelbetowych, o tyle dokładność wyznaczenia odkształceń stanowi znaczący procent wartości, przy której spodziewane jest zniszczenie betonu.

Rys. 5. Zmiana odkształceń ε_x w wybranych punktach powierzchni bez obciążeniaFig. 5. Strain ε_x change in chosen points of surface without any loadRys. 6. Zmiana odkształceń głównych ε_1 w wybranych punktach powierzchni bez obciążeniaFig. 6. Principal strain ε_1 change in chosen points of surface without any loadRys. 7. Zmiana odkształceń głównych ε_2 w wybranych punktach powierzchni bez obciążeniaFig. 7. Principal strain ε_2 change in chosen points of surface without any load

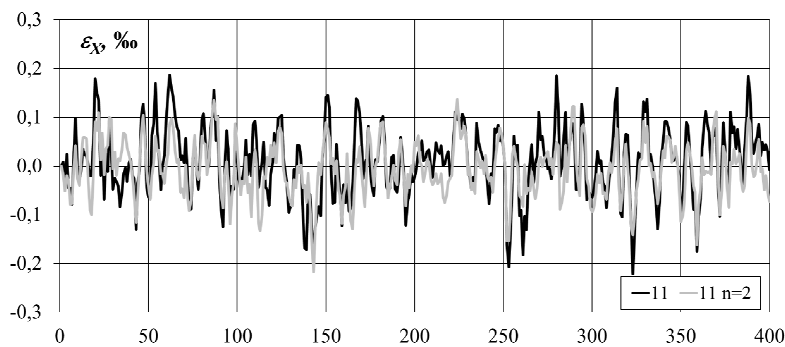
Algorytmy programu Aramis pozwalają na zwiększenie dokładności wyznaczenia odkształceń. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu większej liczby punktów obliczeniowych. Dla Aramisa, który stosuje trójkątną siatkę obliczeniową, typowa procedura zakłada wykorzystanie pojedynczego sąsiedztwa (sześciu punktów) dla wyznaczenia odkształceń. Zwiększenie dokładności wymaga zastosowania podwójnego sąsiedztwa (osiemnastu punktów). Ideę sąsiedztwa graficznie zaprezentowano na rys. 8. Wewnątrz zaciemnionego obszaru oznaczono miejsce, dla którego obliczamy odkształcenia. Wewnątrz strefy oznaczonej kolorem szarym znajdują się punkty konieczne do przeprowadzenia obliczeń.

Na rysunkach 9, 10 i 11 pokazano porównanie odczytów odkształceń ε_x , ε_1 i ε_2 wybranego punktu obliczanego z uwzględnieniem pojedynczego (11) i podwójnego sąsiedztwa (11 n=2). Dla ε_x i ε_2 nie obserwuje się zwiększenia dokładności (patrz rysunki 9, i 11). Znaczny wzrost precyzji zaobserwowano dla ε_1 (patrz rysunek 10).



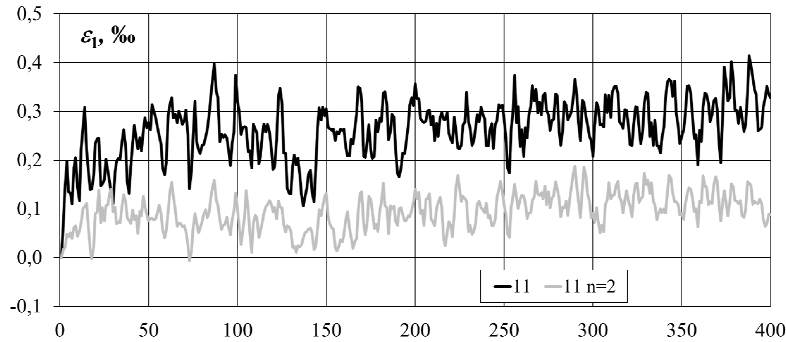
Rys. 8. Wielkość sąsiedztwa przyjmowana do obliczenia odkształceń a) pojedyncze b) podwójne

Fig. 8. Neighborhood size adopted to strain calculation a) single b) double



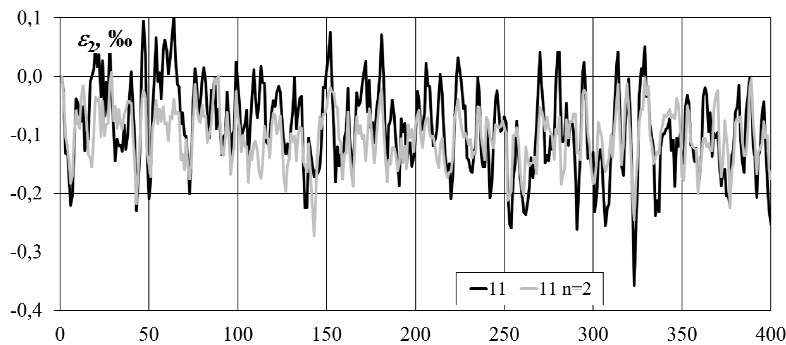
Rys. 9. Porównanie odkształceń ε_x dla pojedynczego (11) i podwójnego sąsiedztwa (11 n=2) punktu bez obciążenia

Fig. 9. Comparison of strain ε_x for single (11) and double (11 n=2) neighborhood without any load



Rys. 10. Porównanie odkształceń głównych ε_1 dla pojedynczego (11) i podwójnego (11 n=2) sąsiedztwa punktu bez obciążenia

Fig. 10. Comparison of principal strain ε_1 for single (11) and double (11 n=2) neighborhood



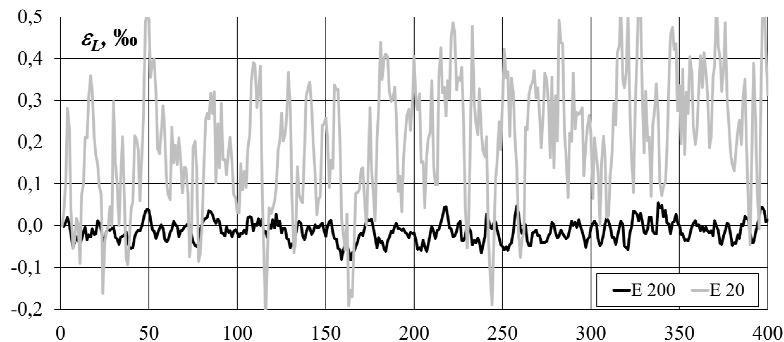
Rys. 11. Porównanie odkształceń głównych ε_2 dla pojedynczego (11) i podwójnego (11 n=2) sąsiedztwa punktu

Fig. 11. Comparison of principal strain ε_2 for single (11) and double (11 n=2) neighborhood

Trzeba jednak zdawać sobie sprawę z konsekwencji zwiększenia dokładności przez powiększenie sąsiedztwa. Większy obszar, potrzebny do wyznaczenia odkształceń, oznacza mniejszą szczegółowość danych. Różnicę widać porównując rysunki 1c (pojedyncze) i 1d (podwójne sąsiedztwo).

Za pomocą systemu Aramis możliwy jest też odczyt odkształceń na zadanej liniowej bazie pomiarowej. Na rysunku 12. przedstawiono wyniki odkształceń dla baz pomiarowych.

Stwierdzono taki sam (co do rzędu wielkości) błąd wyznaczenia długości bazy. Zatem błąd wyznaczania odkształceń będzie tym większy im krótsza baza. Jest to widoczne na omawianym rysunku 12. Odczyty odkształceń dla bazy o długości 200 mm (E200) wahają się od $-0,081\%$ do $+0,055\%$, natomiast dla krótszego odcinka (E20) od $-0,236\%$ do $+0,567\%$. Błąd graniczny odczytu odkształceń bazy pomiarowej wynosi $\pm 0,07\%$, a dla 20 mm $\pm 0,45\%$.



Rys. 12. Porównanie odkształceń na baz pomiarowych liniowych bez obciążenia (bazy o długościach 20 mm - E20 i 200 mm - E200)

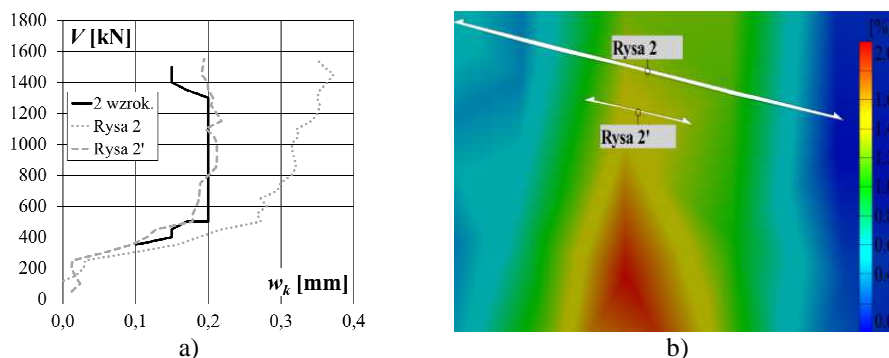
Fig. 12. Comparison of strain for linear measuring bases without any load (base 20 mm and 200 mm)

3. Odczyt szerokości rys

Oczywistą możliwością wykorzystania Aramisa jest pomiar szerokości rozwarcia rys. Poprawny odczyt szerokości rysy nie jest jednak łatwy do określenia. Na mapach nie są widoczne rysy a jedynie kumulacje odkształceń. Dzieje się tak na skutek uśredniania wyników wewnątrz elementów obliczeniowych – punkty obliczeniowe znajdują się w odległości kilkunastu milimetrów od siebie, więc nie ma możliwości zaobserwowania rysy jako nieciągłości materiału. Wyznaczenie szerokości rozwarcia rysy zostało zaprezentowane na kilku przykładach.

Na rysunku 13b zaprezentowano bazy pomiarowe do wyznaczenia szerokości rys nr 2, 2'. Wstępnie przyjęto, że dla prawidłowego odczytania szerokości rysy pomiaru należy dokonywać poza strefą kumulacji odkształceń (rysa 2). Takie rozwiązanie sugerowane jest przez *Goszczyńską i Tworzewską* [3]. W innym artykule wydanym przez ośrodek kielecki [4] autorzy stwierdzają dobrą zgodność szerokości rys zmierzonych za pomocą Aramisa i lupką Brinella (stosowano lupkę o podziałce $\pm 0,05$ mm). Stosując takie podejście zaobserwowano jednak większe szerokości większe szerokości rozwarcia rys w porównaniu z pomiarami wykonanymi tradycyjnie (rysa 2) – patrz rysunek 13a. Stwierdzono zatem, że należy dobrać właściwą długość bazy pomiarowej dla otrzymania miarodajnych wyników. Na podstawie prób zaproponowano bazy pomiarowe (rysa 2'), dla których szerokości rozwarcia są najbardziej zbliżone do pomierzonych tradycyjnie (2 wzrok.).

Dla otrzymania rezultatów najbardziej zbliżonych do pomiaru tradycyjnego (wzrokowego) szukano najbardziej odpowiedniej długości pomiaru. Każdorazowo długość ta była krótsza od całkowitej szerokości kumulacji odkształceń (patrz rys. 13b). Dla prezentowanego przykładu użyto długości referencyjnej równej 12 mm. Jest to odcinek pomiarowy, który nie obejmuje całej strefy kumulacji odkształceń (wynoszącej 42 mm).

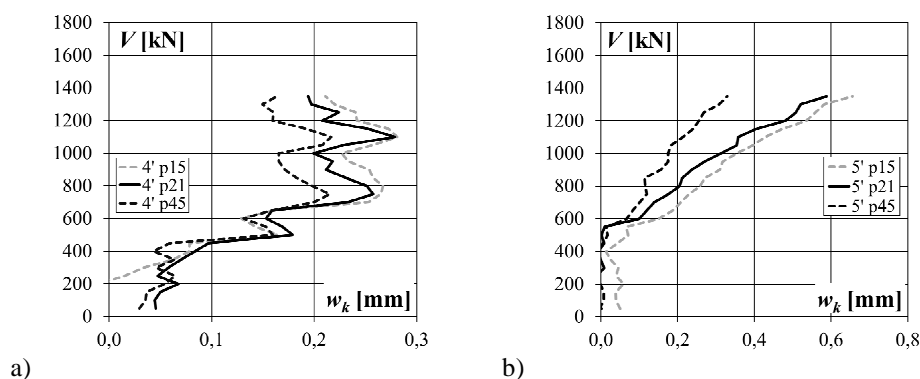


Rys. 13. Rysa nr 2 a) porównanie szerokości rozwarcia zmierzonych tradycyjnie (pomiar wzrokowy – 2 wzrok.) i za pomocą systemu Aramis, b) bazy pomiarowe Aramis (Rysa 2 i Rysa 2')

Fig. 13. Crack no. 2 a) comparison of crack widths measured traditionally (2 wzrok.) and by Aramis, b) measuring base Aramis (Rysa 2 i Rysa 2')

Dla prawidłowego odczytania szerokości rozwarcia rysy należy dobrać długość referencyjną. Najprostszą metodą jest dopasowanie bazy na podstawie wzrokowych pomiarów szerokości rysy dla kilku wybranych poziomów obciążenia. Na podstawie takich danych można sprawdzić dla jakiej długości pomiaru uzyskiwana jest zgodność między wynikami otrzymanymi z Aramisa a pomiarami tradycyjnymi. Pozostałe wartości otrzymane z systemu będą miarodajne.

Ze względu na różnice w odkształceniach głównych w zależności od przyjętej wielkości siatki obliczeniowej (patrz rys. 1.) zbadano wpływ tej zmiennej na szerokość rys. Początkowo chciano utrzymać taką samą długość i lokalizację pomiaru. Ostatecznie zdecydowano się na pewne przesunięcie baz względem siebie, ze względu na nieco inny przebieg strefy kumulacji odkształceń w zależności od wielkości fasetek. W zaproponowanej konfiguracji każdy z pomiarów wykonywany jest względem środka symetrii strefy zwiększonych odkształceń. Na rysunku 14. pokazano porównanie otrzymanych wyników. Szerokości rys 4' p15 i 5' p15 otrzymano na podstawie siatki o wielkości fasetki 15×15 , z dopiskiem p21 dla fasetek 21×21 , natomiast adnotacja p45 oznaczała odniesienie do siatki 45×45 . Wniosek jaki można sformułować jest następujący: czym drobniejsza siatka tym większe rozwarcie rysy otrzymujemy dla bazy o takiej samej długości. Dla utrzymania prawidłowej (porównywalnej z pomiarem tradycyjnym) szerokości rys należy skrócić bazę wraz z zagęszczeniem siatki.



Rys. 14. Wpływ rozmiaru fasetki na szerokości rys a) 4' b) 5', zmierzonych system Aramis

Fig. 14. Influence of the facet size on width of cracks a) 4' b) 5', measured by Aramis system

4. Podsumowanie

Przedstawione poniżej wnioski dotyczą niedokładności systemu Aramis, dla pola pomiarowego 1250×1100 mm. Uwzględniają one wszystkie wpływy, które występowały podczas badań. Jest to o tyle istotne, że błędy systemów korelacji obrazów zależne są od niedokładności wyznaczenia punktów na matrycy (położenie w pikselach). A zatem czym większy obszar pomiarowy przypada na każdy piksel mierzonej powierzchni tym błąd (mierzony w mm) staje się większy. Teoretyczne rozważania dotyczące błędów systemów cyfrowej korelacji obrazów przedstawiono w [5].

Wyznaczenie przemieszczeń liniowych można uznać za precyzyjne na potrzeby badania konstrukcji żelbetowych. Trzeba zastrzec, że dla prawidłowego, czyli zgodnego z pomiarem wzrokowym, określenia szerokości rozwarcia rys należy dobrać referencyjną długość bazy pomiarowej. Wartość ta może być inna dla każdej z rys w danym zadaniu. Ponadto należy uwzględnić wpływ wielkości fasetek na tę długość.

Dokładność wyznaczenia odkształceń w punktach stanowi istotny procent odkształceń granicznych betonu. Mapa odkształceń składa się z wielu punktów, każdy z nich obarczony jest błędem pomiaru. Pomimo tego można wyciągać wnioski na podstawie obrazu odkształceń, dzięki któremu wiemy w jakich obszarach występuje ściskanie a w jakich rozciąganie, jak wygląda obraz odkształceń głównych. Co do ilościowych danych należy zachować świadomość występujących błędów. Jednocześnie na podstawie zmiany długości czujnika liniowego można obliczyć odkształcenie na długości bazy pomiarowej. Błąd pomiaru jest tym mniejszy im dłuższe bazy zostaną użyte.

Istotny wpływ na dokładność pomiaru ma intensywność oświetlenia powierzchni. Dla uzyskania najlepszych efektów należy prowadzić badania przy możliwie stałych warunkach oświetlenia. Wykonując kilka (kilkanaście) pomia-

rów dla jednego obciążenia możliwe będzie uśrednienie wyników, co prowadzi do mniejszego błędu pomiaru.

Literatura

- [1] Kneć M.: „Technika cyfrowej korelacji obrazów w analizie deformacji połączeń elementów konstrukcji stosowanych w lotnictwie”. Rozprawa doktorska. Politechnika Rzeszowska 2015.
- [2] Revilock D.M., Thesken J.C., Schmidt T.E. i Forsythe B.S.: “Three-Dimensional Digital Image Correlation of a Composite Overwrapped Pressure Vessel During Hydrostatic Pressure Test” Raport techniczny wydany przez NASA 2007.
- [3] Goszczyńska B., Trąmpczyński W., Tworzewska J., Tworzewski P.: “Doświadczalna analiza odkształceń przestrzennych belek żelbetowych z zastosowaniem skanera optycznego 3D”, Inżynieria i Budownictwo, 2014 s. 156-159.
- [4] Goszczyńska B., Tworzewska J.: “Określenie rysy na potrzeby analizy wyników badania procesu powstawania i rozwoju rys w belkach żelbetowych z zastosowaniem systemu Aramis”, Przegląd Budowlany, 2014, s. 24-29.
- [5] Ajdukiewicz C., Gajewski M., Mossakowski P. „Zastosowanie systemu optycznej korelacji obrazu „Aramis” do identyfikacji rys w elementach betonowych”, Materiały konferencyjne Transcomp – XIV International Conference Computer Systems Aided Science, Industry and Transport, 2011.

ABOUT INACCURACIES OF DIC SYSTEM

Summary

The aim of the paper is estimating of measuring inaccuracies for Aramis system. Because of issue complexity it is difficult to find general solution. For the application purpose method consists of comparison many photos showing one state of surface is used. In the paper analysis of the inaccuracies for measuring volume 1250×1100 mm is presented. Dispersion of the results recorded by Aramis system is the value of the measuring error. It is stated that values from strain maps contain error which is significant with respect to ultimate strain of concrete. Simultaneously very good accuracy of the the line segment length change is reported. It causes that observation of crack width is precisely. In the second part of the paper some practical information concern how determined compatibility between crack width measured traditionally and by Aramis are written. Discussion of influence of facet size on crack width is presented.

Keywords: digital image correlation, measuring error, crack width, experimental investigations

Przesłano do redakcji: 24.05.2017 r.

Przyjęto do druku: 01.09.2017 r.