

Odształcenia wewnątrz pasm ścinania w trakcie badań modelowych muru oporowego w stanie parcia czynnego

Dr inż. Magdalena Pietrzak

Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji

W artykule podjęto próbę opisu procesów zachodzących wewnątrz pasma ścinania (lokalizacji odształceń), posługując się prostą miarą, za jaką przyjęto maksymalną wartość odształcenia postaciowego wywołanego jednostkowym przyrostem przemieszczenia ścianki.

Badania modelowe w małej skali przeprowadzono na modelu muru oporowego w IBW PAN w Gdańsku. Stanowisko badawcze składało się ze skrzynki metalowej o wymiarach $36,0 \times 21,5 \times 6$ cm, w której osadzono dwie szyby o grubości 2 cm, które zapewniły płaski stan odształcenia modelu pionowej sztywnej ścianki oraz systemu obciążającego i systemu umożliwiającego poziome przemieszczenia ścianki (rys. 1).

W większości badań modelowych jako gruntu modelowego użyto granulek szklanych Starlitbeads1000 o średnicach z przedziału $0,8 \div 1,2$ mm i krzywej przesiewu widocznej na rys. 2. Zmierzony dla nich w aparacie bezpośredniego ścinania oraz aparacie trójosiowego ściskania kąt tarcia wewnętrznego mieścił się w przedziale $27 \div 34^\circ$. Były one wykonane ze szkła sodowego. Założono, że kąt tarcia wewnętrznego granulek szklanych jest zbliżony do kąta tarcia ścian bocznych stanowiska zbudowanych ze szkła, tym samym zachodzi tarcie szkła o szkło.

Pozostałą część badań modelowych wykonano na rzeczywistym piasku (tzw. piasku Borowiec, [5]), którego ziarna ($d_{50} = 0,8$ mm) i krzywą przesiewu również pokazano na rys. 2.

Zakres obciążeń modelu zawierał się w przedziale od 0 do 4,0 MPa. Wysoki poziom obciążenia był związany z wywołaniem mierzalnego efektu elastooptycznego, który rejestrowano również w trakcie doświadczeń, co nie stanowi przedmiotu tej pracy. Wyniki pomiarów elastooptycznych zawarto w pracy doktorskiej [6].

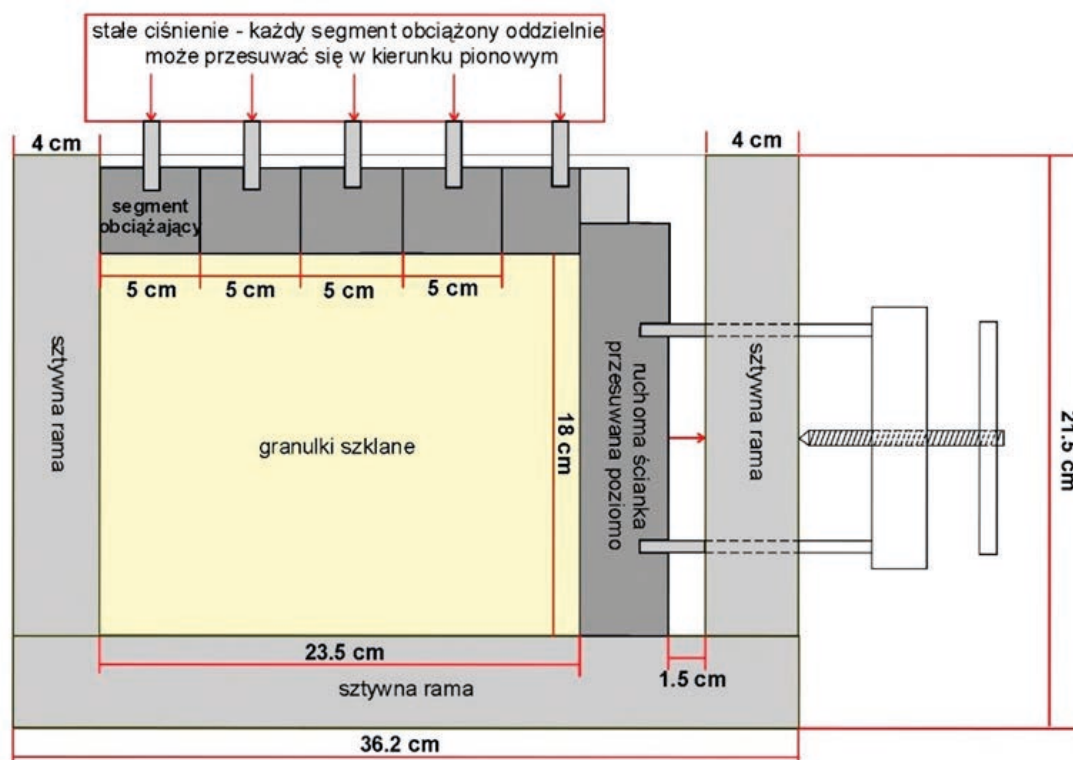
Podstawowy przyrost przemieszczenia ścianki wynosił $\delta d = 0,0625$ mm, czyli był o rząd wielkości mniejszy od średniej średnicy ziarna badanych materiałów ziarnistych.

Bezpośrednim wynikiem badań były zdjęcia modelu w świetle spolaryzowanym i niespolaryzowanym, wykonane na każdym etapie jego obciążania oraz na każdym etapie przemieszczenia modelowej ścianki oporowej.

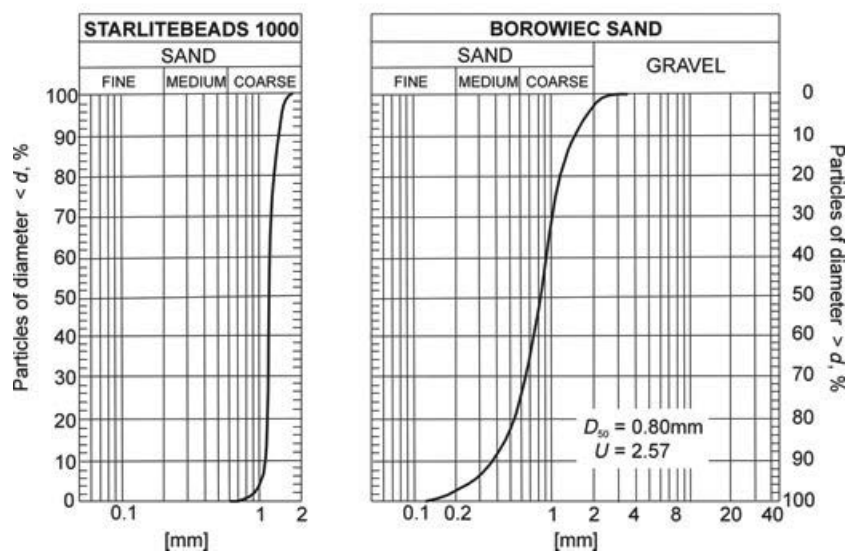
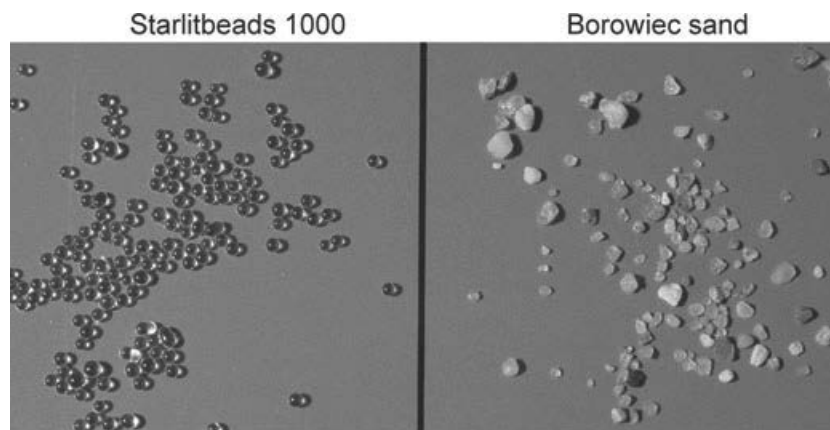
Pola odształceń otrzymano metodą PIV przez porównanie par fotografii cyfrowych wykonanych w świetle białym (rys. 3) [2].

PIV (*Particle Image Velocimetry*), czyli cyfrowa korelacja obrazu, była wykorzystywana początkowo w dziedzinie mechaniki płynów [1], później do analizy przemieszczeń w badaniach modelowych gruntu [3, 4, 7, 8, 9]. PIV działa na zasadzie śledzenia charakterystycznych przestrzennych układów jasności na dwóch kolejnych obrazach cyfrowych. Porównując dwa kolejne zdjęcia, otrzymujemy pole przemieszczeń, odpowiadające pewnemu etapowi doświadczenia.

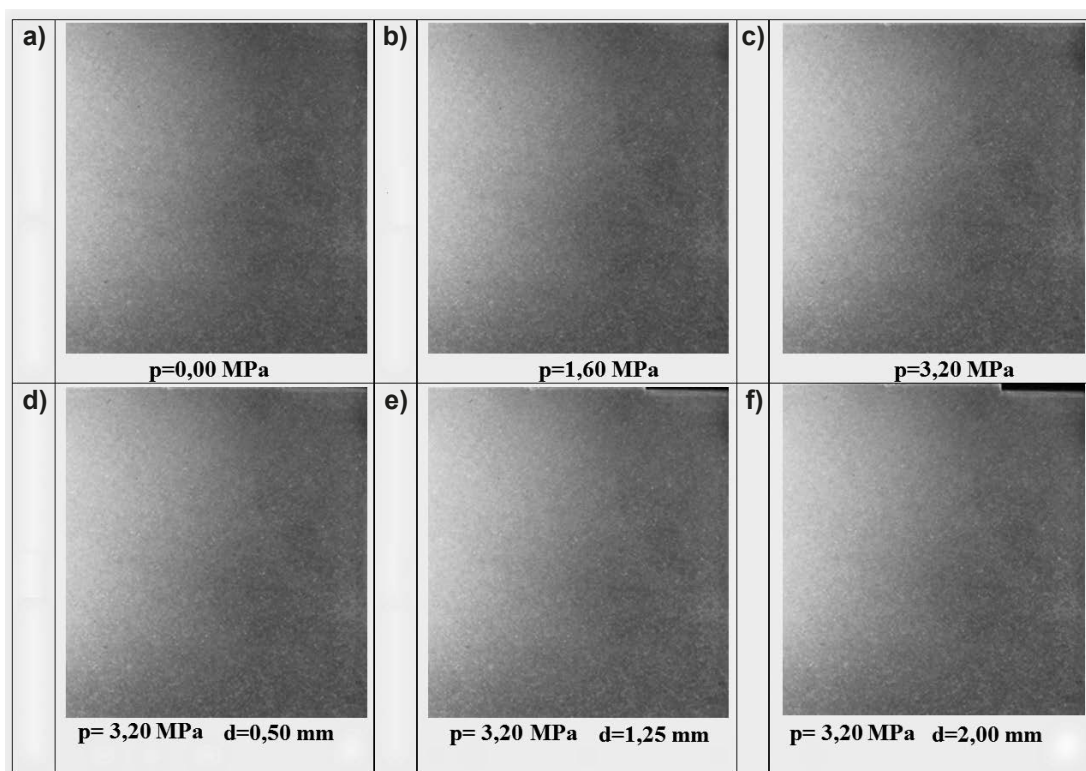
Do analizy doświadczeń użyto oprogramowania GeoPIV opracowanego i udostępnionego przez White'a i Take'a [3].



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego



Rys. 2. Widok ziaren i krzywe przesiewu badanych materiałów ziarnistych



Rys. 3. Fragment badania zarejestrowany w świetle zwykłym (niespolaryzowanym)

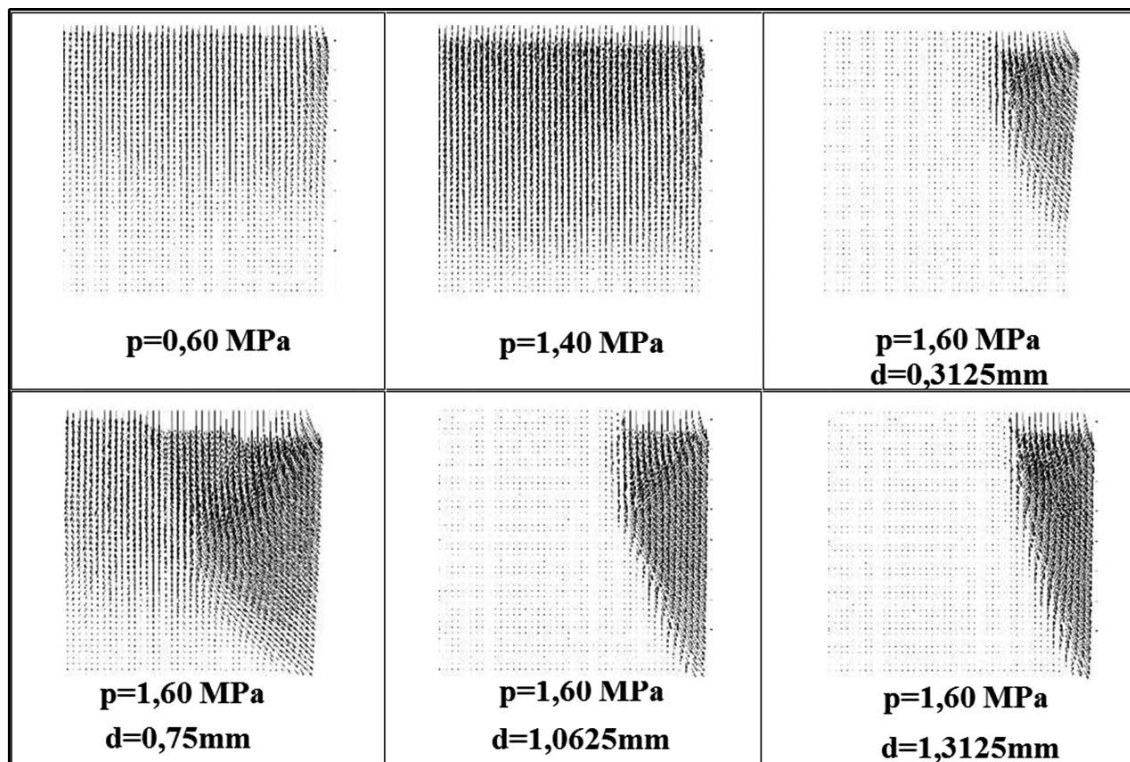
WYNIKI BADAŃ MODELOWYCH PO OBRÓBCE CYFROWEJ

Na podstawie analizy obrazu metodą PIV otrzymano pole przemieszczeń wynikające z porównania dwóch obrazów odpowiadających kolejnym etapom badania (rys. 4).

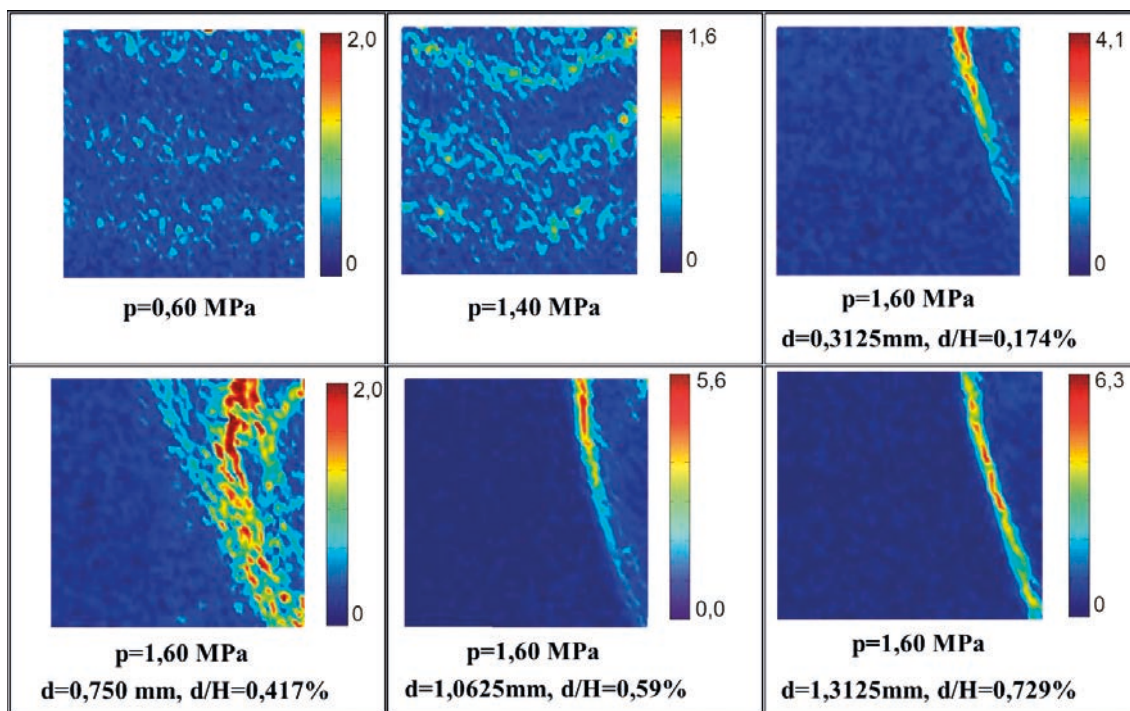
Znając pole przemieszczeń, policzono pola odkształceń, posługując się procedurą obliczeniową stosowaną w metodzie

elementów skończonych, opisaną i zastosowaną przez White'a i Take'a do programu geoPIV (rys. 5) [3].

Wartość odkształceń postaciowych zmienia się od zera do maksymalnej wartości występującej w analizowanym kroku doświadczenia. Kolor ciemnoniebieski na mapach odkształceń postaciowych oznacza obszar o bardzo małych odkształceniach, kolor czerwony – maksymalne odkształcenia.



Rys. 4. Pole przemieszczeń kilku wybranych kroków Testu 4



Rys. 5. Przykładowe pole odkształceń otrzymane w wyniku analizy programem geoPIV dla sześciu wybranych przyrostów przemieszczenia ścianki

ODKSZTAŁCENIA WEWNĄTRZ PASM ŚCINANIA

Dokładna analiza pól odkształceń otrzymanych w poszczególnych badaniach sugerowała, że wewnątrz pasm ścinania zachodzą cykliczne zmiany procesu deformacji. W celu sprawdzenia zjawiska przyjęto, że miarą odkształcenia wewnątrz pasma ścinania jest maksymalna wartość odkształcenia postaciowego i dla wszystkich badań sporządzono wykresy jej zmienności w trakcie przemieszczania się ścianki.

Wykresy te przedstawiono jako wykresy maksymalnego odkształcenia postaciowego w każdym kolejnym kroku przemieszczenia ścianki albo jako odkształcenie skumulowane: sumę odkształceń po określonej liczbie przemieszczeń ścianki (rys. 6) [6].

Charakter zmian, jakie zachodziły w trakcie badań wewnątrz pasma ścinania, można opisać najlepiej na przykładzie badania, którego przebieg pokazano na rys. 6a. Obciążenie zewnętrzne

w trakcie tego badania wynosiło 1,6 MPa. Wykres przyrostów maksymalnych odkształceń postaciowych (rys. 6b) w trakcie poszczególnych kroków, z których każdy odpowiada stałej wartości jednostkowego przesunięcia ścianki, pokazuje wyraźne cykliczne zmiany. Średnio co 4 przyrosty przemieszczenia ścianki pojawia się stromy pik maksymalnego odkształcenia odpowiadający dokładnie kolejnym epizodom lokalizacji widocznym w polach odkształceń. Niewielkie odkształcenia pomiędzy pikami, stanowiące ich tło, odpowiadają natomiast fazom rozproszonej deformacji [6].

Cykliczny charakter zmian wartości odkształcenia jest widoczny również na wykresie odkształceń całkowitych w postaci niewielkich regularnych skoków. Badania, które składały się z największej liczby kroków, pokazują dodatkowo cykliczne zmiany o większym zasięgu, charakteryzujące się okresem rzędu 20 jednostkowych przemieszczeń ścianki. Wszystkie badania pokazane na rys. 7 składały się z dużej liczby kroków i wykonano je przy obciążeniu 0,4 MPa lub jego całkowitym braku. W celu oceny, który z dwóch czynników jest odpowiedzialny za cykliczne zmiany o mniejszym zasięgu, maksymalne odkształcenia postaciowe dla 4 badań wykreślono w tej samej skali – dla granulek szklanych i piasku bez obciążenia oraz dla granulek i piasku przy obciążeniu 0,4 MPa. Na rysunku tym przedstawiono, że to wysokość obciążenia zewnętrznego decyduje o bardziej dyskretnym (z większymi odległościami między ostrymi pikami) charakterze deformacji wewnątrz pasma ścinania [6].

Porównanie tych rysunków pokazuje z kolei, że nie ma istotnej jakościowej różnicy pomiędzy zachowaniem ośrodka zbudowanego z granulek szklanych i piasku. Jedynie w piasku luźnym bez obciążenia zewnętrznego obserwuje się stosunkowo niższy poziom „tła”.

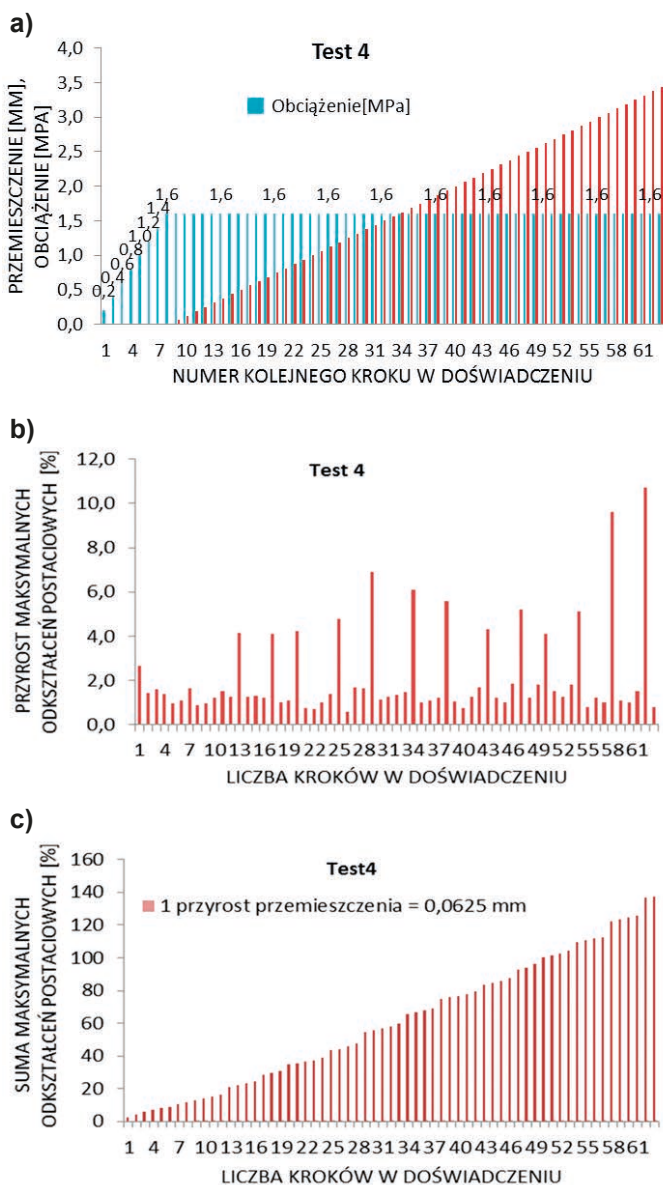
Analizując wszystkie doświadczenia, można wyciągnąć wnioski, że odległość między sąsiednimi pikami odkształcenia jest funkcją wartości obciążenia zewnętrznego – im jest ono wyższe, tym większa wydaje się ta odległość. Obserwację tę potwierdza wykres przedstawiony na rys. 8, na którym odłożono średnią liczbę przyrostów przemieszczenia ścianki od wartości obciążenia. Każdy punkt wykresu reprezentuje średnią z kilku badań wykonanych przy tym samym obciążeniu zewnętrznym. Jak widać otrzymano wysoką liniową korelację między liczbą przyrostów a poziomem obciążenia zewnętrznego [6].

WNIOSKI

Użycie cyfrowej fotografii wykonanej w świetle niespolaryzowanym w połączeniu z analizą obrazów metodą PIV pozwala otrzymać przemieszczenia i pola odkształceń z bardzo dużą dokładnością, która nie mogłaby być osiągnięta przez wcześniejsze metody, takie jak mierzenie przemieszczeń siatki markerów czy zastosowanie stereoskopu.

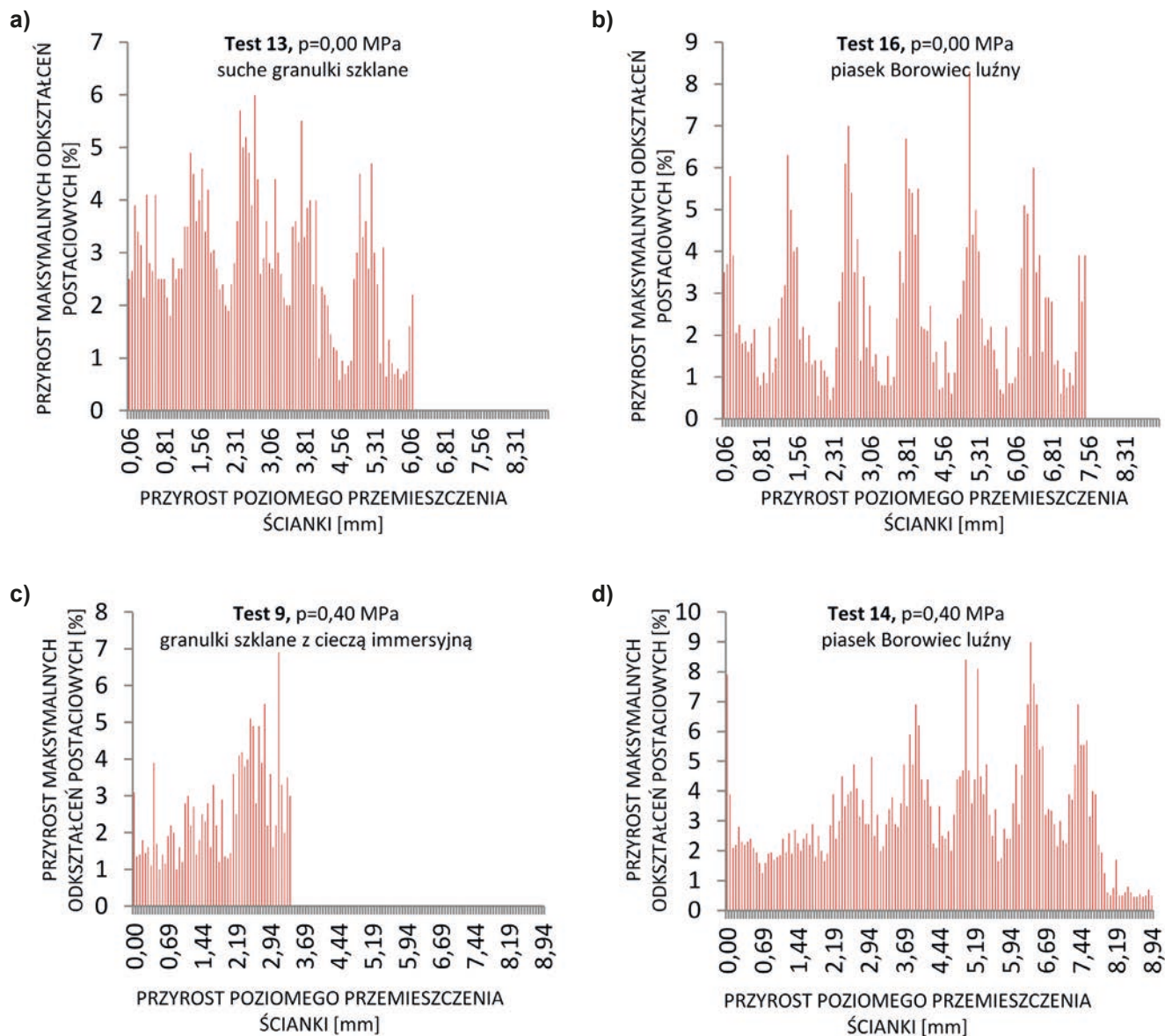
Analiza zachowania ośrodka sypkiego za ścianą oporową w zakresie małych deformacji pozwoliła na uchwycenie cyklicznej zmienności, której podlega mechanizm zniszczenia konstrukcji oraz materiał wewnątrz pasma ścinania.

Wiadomo, że wartość parcia wywieranego na konstrukcję zależy od mechanizmu zniszczenia, wiadomo również, że w sposób istotny zależy od wartości przemieszczenia konstruk-



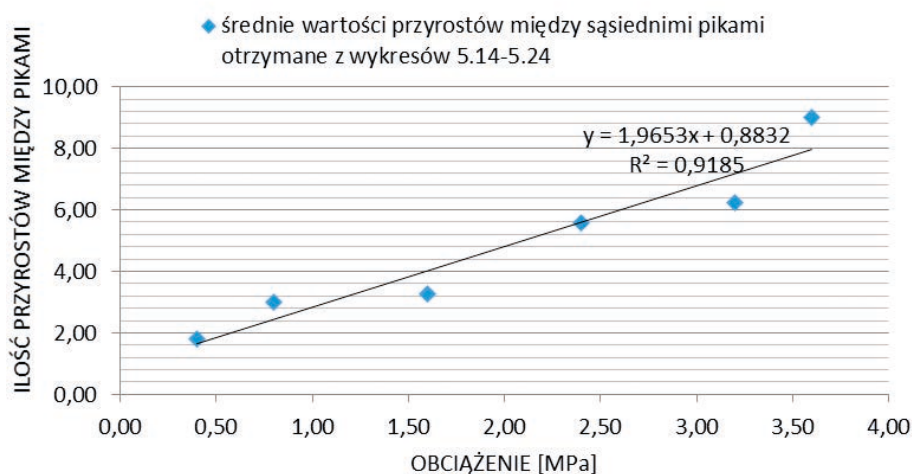
Rys. 6. Test 4

a) przebieg badania modelowego b) przyrosty maksymalnych odkształceń postaciowych w poszczególnych krokach doświadczenia, c) suma maksymalnych odkształceń postaciowych po danej liczbie kroków doświadczenia



Rys. 7. Przyrosty maksymalnych odkształceń postaciowych w zależności od całkowitego przemieszczenia ścianki
a) Test 13, b) Test 16, c) Test 9, d) Test 14

Aproksymacja wyników doświadczeń



Rys. 8. Zależność średniego minimalnego przemieszczenia potrzebnego do uaktywnienia epizodu silnej lokalizacji odkształceń w zależności od poziomu obciążenia zewnętrznego modelu

cji w zakresie małych przemieszczeń. Pełne wyjaśnienie związku między chwilowym mechanizmem zniszczenia a wartością parcia wymagałoby pomiaru rozkładu parcia na ścianie modelowej. Takiej możliwości w momencie wykonywania badań nie było.

Mechanizm zniszczenia modelu konstrukcji oporowej, polegający na wytworzeniu się w zasypce lokalizacji odkształceń (pasma ścinania), nie zależy w znaczący sposób od poziomu obciążenia zewnętrznego.

Od poziomu obciążenia zewnętrznego zależy natomiast minimalne przemieszczenie ścianki potrzebne do uaktywnienia lokalizacji odkształceń – im wyższe jest obciążenie, tym większa jest wartość tego minimalnego przemieszczenia.

Zarówno sam mechanizm zniszczenia, jak i odkształcenia wewnątrz pasma ścinania zmieniają się cyklicznie, przy czym istnieje możliwość nakładania się na siebie cykli o różnym okresie wymagająca dalszego zbadania.

LITERATURA

1. Adrian R. J.: Particle imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Annual review of fluid mechanics*. Vol. 23, 1991, 261-304.
2. Drescher A.: An experimental investigation of flow rules for granular materials using optically sensitive glass particles. *Géotechnique*, Vol. 26, 1975, 591-601.

3. Leśniewska D., Muir Wood D.: Granular materials at meso and macro scale: photoelasticity and digital image correlation, *Advances in bifurcation and degradation in geomaterials*, Red. Stéphane Bonelli, Cristian Dascalu, François Nicot, Dordrecht: Springer, Springer Series in Geomechanics and Geoengineering, Vol. 11, 353-358, 2011.
4. Malesiński K., Zadroga B.: Stateczność fundamentów bezpośrednich posadowionych na zboczu z gruntu zbrojonego. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2008.
5. Niedostatkiewicz M., Leśniewska D., Tejchman J.: Experimental analysis of shear zone patterns in sand for earth pressure problems using Particle Image Velocimetry. *Strain*, Vol. 46, 2010, doi: 10.1111/j.1475-1305.2010.00761.x2010.
6. Pietrzak M.: Badanie pól odkształceń i naprężeń w ośrodku rozdrobnionym w stanie praca czynnego. Praca doktorska, Politechnika Koszalińska, 2014.
7. White D. J., Take W. A.: GeoPIV: Particle Image Velocimetry (PIV) software for use in geotechnical testing. Manual for GeoPIV. Technical Report CUED/D-SOILS/TR322, Cambridge University Engineering Department, 2002.
8. White, D. J., Take, W. A., Bolton, M. D.: Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry, *Geotechnique* 53, No. 7, 619-631, 2003.
9. White D. J., Randolph M., Thompson B.: An image-based deformation measurement system for the geotechnical centrifuge. *Int. J. Phys. Modell. Geotech.*, 3, 1-12, 2005.

PODZIĘKOWANIE: Praca wykonana w ramach projektu NCN Nr DEC-2011/03/B/ST8/05865.