



Politechnika Koszalińska
Wydział Inżynierii Lądowej,
Środowiska i Geodezji
Katedra Geotechniki



mgr inż. Magdalena Pietrzak

**Badanie pól odkształceń i naprężeń
w ośrodku rozdrobnionym w stanie parcia czynnego**

Rozprawa doktorska

Promotor
dr hab. inż. Danuta Leśniewska, prof. nadzw. PK

Koszalin 2013

*Praca wykonana w ramach projektu
finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki
Nr projektu N N506 0412 40*

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń.....	5
1. WSTĘP	6
1.1.Przegląd literatury	6
1.2.Cel, zakres i teza pracy	15
2. METODYKA PRACY	17
2.1.Badania na modelach fizycznych	17
2.2.Analiza obrazu w zastosowaniu do materiałów sypkich	19
2.3.Badania elastooptyczne materiałów sypkich	22
2.4.Połączenie PIV i elastooptyki	26
2.5.Metoda elementów skończonych – program Plaxis	28
3. OPIS TECHNIKI BADAŃ MODELOWYCH	31
3.1.Stanowisko do badań modelowych.....	31
3.2.Materiały	33
3.2.1. <i>Materiały ziarniste</i>	33
3.2.2. <i>Ciecz immersyjna</i>	35
3.3.Przebieg badania modelowego	35
4. CHARAKTERYSTYKA WYNIKÓW	38
4.1.Wyniki otrzymane bezpośrednio z badań modelowych	38
4.2.Wyniki badań modelowych po obróbce cyfrowej	41
4.2.1. <i>Zdjęcia w świetle zwykłym (niespolaryzowanym)</i>	41
4.2.2. <i>Analiza zdjęć wykonanych w świetle spolaryzowanym</i>	47
4.3.Symulacja badań modelowych przy użyciu metody elementów skończonych (program Plaxis)	50
5. DYSKUSJA WYNIKÓW	53
5.1.Omówienie pól odkształceń na przykładzie Testu 4	54
5.1.1. <i>Wpływ obciążenia zewnętrznego na pole deformacji</i>	54

5.1.2. Cykle deformacji	56
5.1.3. Zjawiska niecykliczne	64
5.2. Odkształcenia wewnątrz pasm ścinania	66
6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	85
6.1. Pola odkształceń i naprężeń	85
6.2. Odkształcenia we wnętrzu pasma ścinania	87
6.3. Wnioski	88
7. LITERATURA	90
Wykaz rysunków	103
Wykaz tabel	108

Załącznik 1

<i>Test 5 i Test 12 rejestracja aparatem cyfrowym (światło niespolaryzowane i spolaryzowane) – oryginalne zdjęcia</i>	<i>Z1-1</i>
---	-------------

Załącznik 2

<i>Wyniki analizy badań modelowych metodą cyfrowej korelacji obrazu (DIC)</i>	<i>Z2-1</i>
---	-------------

Załącznik 3

<i>Test 4 Porównanie doświadczalnych i obliczonych metodą elementów skończonych (program Plaxis) pól odkształceń postaciowych</i>	<i>Z3-1</i>
---	-------------

Wykaz ważniejszych oznaczeń

ϕ – kąt tarcia wewnętrznego [$^{\circ}$],

c – spójność [kPa],

γ_d – ciężar objętościowy szkieletu gruntowego [kN/m³],

δd – jednostkowe przemieszczenie ścianki [mm],

d – całkowite przemieszczenie ścianki [mm],

H - wysokość ścianki [mm],

p – obciążenie zewnętrzne [MPa],

ϵ_{\max} – maksymalne odkształcenie [%],

ϵ_p - maksymalne odkształcenie postaciowe [%],

ϵ_v - maksymalne odkształcenie objętościowe [%],

ν - współczynnik Poissona,

E – moduł odkształcenia [MPa],

I_D – stopień zagęszczenia

1. WSTĘP

1.1. Przegląd literatury

Zgodnie z podręcznikami mechaniki gruntów, parcie gruntu to pozioma siła wywierana przez ośrodek gruntowy na zagłębione w nim elementy konstrukcyjne.

Występowanie parcia jest charakterystyczne dla cieczy i fakt stosowania analogicznego pojęcia w przypadku ośrodków ziarnistych wynika z ich dwoistej natury, przejawiającej się w zachowaniu typowym albo dla ciał stałych, albo dla cieczy, w zależności od warunków, którym poddany jest materiał.

Problem parcia gruntu na ściany oporowe jest jednym z podstawowych zagadnień mechaniki gruntów, badanym od początku jej istnienia (Coulomb, 1773). Parcie gruntu jest jedną z zasadniczych sił uwzględnianych przy projektowaniu nabrzeży, budowli podziemnych i hydrotechnicznych, przyczółków mostowych, murów i ścian oporowych oraz innych konstrukcji. Do efektywnego projektowania niezbędna jest znajomość wielkości i rozkładu parcia gruntu. Mimo ponad dwustu lat intensywnych badań w tej dziedzinie nadal nie osiągnięto wystarczającej zgodności między modelami teoretycznymi parcia, a wynikami badań doświadczalnych. Wynika to ze specyficznej natury ośrodków ziarnistych oraz złożonego charakteru ich deformacji, której towarzyszy zdolność do lokalizacji odkształceń, uznana w latach 90-tych XX w. za fundamentalną cechę zachowania materiałów sypkich (Desrues et al., 1996).

Parcie gruntu na ściany oporowe dla celów praktycznych oblicza się zazwyczaj posługując się teorią sprężystości i plastyczności. Dla stanów granicznych plastyczności przyjmuje się dwa podejścia: statyczne i kinematyczne. Podstawą analizy statycznej jest założenie, że materiał ulega uplastycznieniu w granicznym stanie naprężenia (warunek Coulomba-Mohra), co pozwala dla prostych warunków brzegowych otrzymać analityczne wyrażenia na wielkość parcia (Caquot, A., Kerisel, J., 1948). W przypadkach bardziej złożonych można otrzymać rozwiązania numeryczne posługując się metodą charakterystyk (Sokołowski, 1960, Houlsby i Wroth, 1982, Roscoe, 1970, James i Bransby, 1971, Szczepiński, 1974). Istotną wadą

podejścia statycznego jest założenie, że graniczny stan naprężenia występuje jednocześnie we wszystkich punktach ośrodka, co jest na ogół niezgodne z rzeczywistością.

W ramach podejścia kinematycznego, opartego w większym stopniu na obserwacjach doświadczalnych niż podejście statyczne, przyjmuje się, że źródłem parcia gruntu jest ruch quasi-sztywnej bryły gruntu (bryły odłamu) wzdłuż pewnej powierzchni. W związku z tym, w celu uzyskania rozwiązania analitycznego zakłada się przebieg kinematycznie dopuszczalnego mechanizmu zniszczenia, najczęściej w postaci klina ('klin Coulomba'). Przyjmuje się, że klin ten ograniczony jest powierzchnią (linią) poślizgu, będącą teoretycznym odpowiednikiem doświadczalnego pasma ścinania. Rozważając równowagę sił działających na ten klin, otrzymuje się dla prostych geometrii i obciążeń wartość wypadkowego parcia (Coulomb, 1773). W przypadkach bardziej złożonych, kiedy trudno jest z góry przewidzieć przebieg mechanizmu zniszczenia, można również poszukiwać rozwiązania metodą charakterystyk (Szczepiński, 1974, Izbicki i Mróz, 1976). Rozwiązanie problemu parcia można także uzyskać posługując się metodą elementów skończonych, przy zastosowaniu odpowiedniego modelu gruntu.

Historia badań naukowych nad parciem gruntu do końca XX w. została w zwięzły sposób opisana przez Hazarikę i Matsuzawę (1996). Przypomnieli oni, że klasyczna teoria parcia, której początek związany jest z pracami Coulomba (Coulomb, 1773), nadal jest stosowana do projektowania i analizy pracy konstrukcji oporowych i daje akceptowalne w praktyce wyniki w pewnych szczególnych przypadkach. Nie uwzględnia ona jednak sposobu przemieszczania się konstrukcji i daje prosty, hydrostatyczny rozkład parcia, niepotwierdzony doświadczalnie.

Zależność wielkości i rozkładu parcia od sposobu, w jaki może się przemieszczać konstrukcja oporowa została zauważona już przez Terzaghiego (Terzaghi, 1936) i od tej pory do lat 80-tych XX w. ośrodki naukowe skupiły się na badaniu zależności parcia gruntu od rodzaju ruchu ściany oporowej. W celu zdefiniowania tej zależności w szeregu ośrodkach prowadzono badania na modelach fizycznych konstrukcji oporowych (Roscoe, 1970, Ichihara i Matsuzawa, 1973, Sherif et al., 1982, Fang i Ishibashi, 1986). Doprowadziły one do wniosku, że zarówno wielkość i rozkład parcia, jak i punkt przyłożenia jego wypadkowej zależą od rodzaju przemieszczeń, którym ulega w różnych warunkach ściana. W efekcie ustalono, że wielkość parcia zależy przede wszystkim od tego, czy konstrukcja oporowa przemieszcza się w kierunku 'od gruntu' (parcie czynne), czy 'do gruntu' (parcie bierne),

natomiast jego rozkład zależy w istotny sposób również od obrotu ściany, którego środek może być położony w dowolnym jej punkcie, w zależności od schematu pracy konstrukcji. Biorąc to pod uwagę Dubrowa (w Harr, 1966) zaproponowała uproszczone analityczne zależności na nie-hydrostatyczne rozkłady parcia dla różnych sposobów przemieszczania się ściany oporowej.

Wyjątkowo obszerny program badań eksperymentalnych z pomiarem rozkładu parcia i zapisem deformacji zasypki za pomocą aparatu rentgenowskiego rozpoczęto na Uniwersytecie w Cambridge w latach 60-tych i kontynuowano do lat 80-tych XX w. (James i Bransby, 1971, 1971, Arthur et al., 1964, Arthur i Roscoe, 1965, Bransby i Milligan, 1975, Milligan i Bransby, 1976, Milligan, 1983). Badano sztywne ścianki ulegające obrotowi w kierunku 'do' i 'od' zasypki dla różnych położzeń środka obrotu oraz ścianki podatne. Całość badań została skatalogowana i opisana w pracy Leśniewskiej (2000). Badania te pokazały, że parcie zasypki zależy nie tylko od rodzaju, ale również wielkości przemieszczenia ściany. Wykazały ponadto silnie nieliniowy charakter rozkładu parcia dla wszystkich schematów ruchu sztywnej ścianki oraz niejednorodne pole deformacji ośrodka gruntowego, zawierające rozbudowane układy pasm ścinania (Leśniewska, 2000). W rezultacie Bransby i Milligan (1975) doszli do wniosku, że bez dokładnego rozpoznania pola deformacji za ścianką oporową nie jest możliwe określenie działających na nią naprężeń, które są ściśle związane z odkształceniami ośrodka gruntowego. W latach 70-tych i 80-tych ubiegłego wieku nie istniały natomiast narzędzia pomiarowe, pozwalające na takie dokładne rozpoznanie.

W Polsce badania nad parciem gruntu z zastosowaniem modeli fizycznych konstrukcji oporowej prowadził m.in. Horodecki (1998) – jego praca dotyczyła głównie pomiaru rozkładu parcia na ściankę, nie obejmowała natomiast ilościowej analizy deformacji zasypki (w przypadku badań na ośrodku Taylor-Schneebeli uzyskano tylko, wykonując zdjęcia przy otwartej migawce zarys obszaru, w którym wystąpiły duże przemieszczenia).

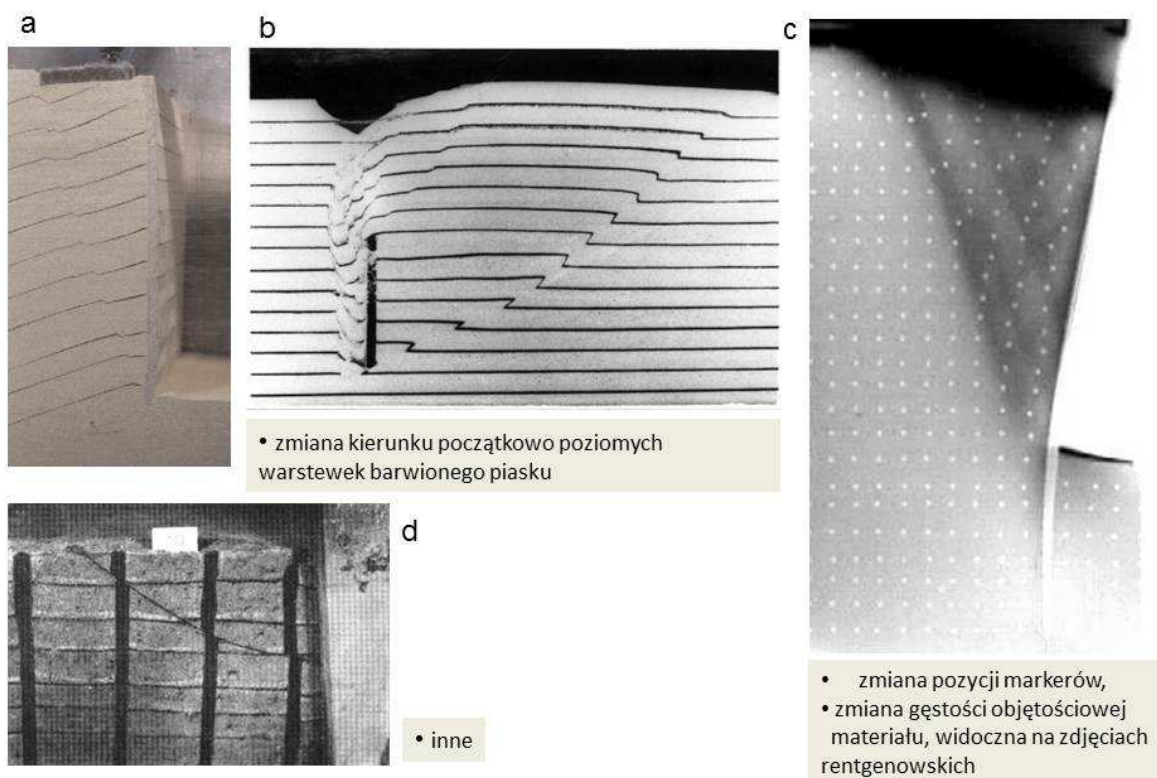
Pod koniec lat 60-tych XX w. rozwinięta została na świecie i w Polsce idea zbrojenia gruntu (Vidal, 1969, Ingold, 1982, Jewell, 1990, Jones, 1996) i powstał nowy rodzaj konstrukcji oporowych z gruntu zbrojonego. Nośność i mechanizmy zniszczenia takich konstrukcji obciążonych sztywnym fundamentem były badane doświadczalnie na modelach w małej skali przez Leśniewską (1988), a w ostatnich latach, w znacznie szerszym zakresie, przez Kulczykowskiego (2002). W pracach tych zastosowano tradycyjny sposób obrazowania

deformacji zasypki poprzez umieszczenie przy przezroczystej ścianie stanowiska badawczego regularnie rozłożonych poziomych warstewek sztucznie barwionego piasku (Rys.1.1a).

Równolegle do badań na modelach fizycznych starano się rozwijać teoretyczne metody analityczne, uwzględniające najnowsze obserwacje doświadczalne. I tak na przykład Bang (1985) rozszerzył metodę Dubrovej, wprowadzając koncepcję ‘pośredniego stanu aktywnego’ i zaproponował wyrażenie na parcie gruntu uwzględniające zarówno efekt wielkości przemieszczenia ściany jak i sposobu tego przemieszczenia. Jednak metody analityczne nie były w stanie opisać kolejnych zjawisk, zaobserwowanych w trakcie badania problemu parcia gruntu, a mianowicie postępującego charakteru deformacji zasypki, stwierdzonego doświadczalnie. Nie udało się to również w pełni na drodze modelowania numerycznego.

Wielu autorów ma istotny wkład w numeryczne rozwiązywanie problemów parcia, przy użyciu różnorodnych modeli teoretycznych (Clough i Duncan, 1971, Simpson i Wroth, 1972, Ozawa i Duncan, 1976, Nakai, 1985, Bhatia i Bakeer, 1989). Ich prace pomijają jednak progresywny charakter deformacji zasypki, prowadzący do powstania lokalizacji odkształceń. W latach 90-tych XX w. sformułowano pogląd, że w wyniku odpowiednio dużych odkształceń w zakresie plastycznym, deformacja ośrodka gruntowego ulega lokalizacji wzdłuż skoncentrowanych pasm, nazwanych pasmami ścinania, co zakłóca lokalną jednorodność naprężeń w ośrodku (Hazarika i Matsuzawa, 1996). Uznano, że modelowanie tego zjawiska ma wielkie znaczenie praktyczne, ponieważ zniszczenie wielu konstrukcji inżynierskich rzeczywiście przebiega za pośrednictwem formowania się i propagacji pasm ścinania. W przypadku parcia gruntu, już przejście ze stanu parcia spoczynkowego do stanu parcia czynnego lub biernego ma charakter postępującego zniszczenia. Tak więc założenie o jednoczesnym wzbudzeniu maksymalnej wytrzymałości wzdłuż całej powierzchni poślizgu, jak się przyjmuje w większości metod analitycznych, uznano za zbyt daleko odchodzące od rzeczywistości.

Pasma ścinania nie mają ścisłej definicji, w literaturze charakteryzuje się je w sposób opisowy, jak na przykład: ‘... dylatacja materiału prowadzi do lokalizowania się deformacji plastycznej w cienkich pasmach o skończonej grubości (pasmach ścinania)’, Ehlers i Volk, 1998, albo: ‘W materiałach ziarnistych może się wytworzyć lokalizacja deformacji w wąskich strefach intensywnego ścinania...’, Tejchman i Gudehus (2001).



Rys.1.1. Lokalizacja odkształceń widoczna na zdjęciach końcowej fazy badań modelowych w testach historycznych (b – J. Kwaśniewski, IBW PAN, lata 60-te XXw, c – G.W.E. Milligan, 1974, d) oraz wykonanych aktualnie na modelu konstrukcji z gruntu zbrojonego (a - badania M. Kulczykowskiego, IBW PAN).

Lokalizacja odkształceń może przybierać formę pojedynczego lub wielokrotnego pasma ścinania, albo regularnego układu pasm, w zależności od stanu początkowego gruntu i nałożonych warunków brzegowych (Rys.1.1c, Leśniewska, 2000). Pasma mogą być proste lub posiadać pewną krzywiznę. Są one tworami o skończonej szerokości, która zależy od wielu czynników, takich jak średnia średnica ziaren, poziom obciążenia, porowatość początkowa, kierunek deformacji czy szorstkość ziaren (Tejchman, 2008).

Pasma ścinania były w gruncie rzeczy obserwowane w materiałach ziarnistych już od dawna, czego przykładem są zdjęcia zamieszczone na Rys.1.1, pokazujące badania modelowe z lat 60-tych, 70-tych i 90-tych XX w., jednak ich obecności, do lat 90-tych ubiegłego stulecia, nie wiązano z naturą ośrodków ziarnistych, ale wyłącznie z wpływem warunków brzegowych. Ze względu na ograniczone możliwości rejestracji (klasyczna fotografia) oraz brak metod analizy obrazu trudno też było śledzić ich ewolucję – historyczne metody pokazane na Rys.1.1 pozwalały na obserwację pasm ścinania tylko w fazie dużych deformacji.

Powstawanie pasm ścinania uważa się za czynnik odpowiedzialny za osłabienie odkształceniowe materiału ziarnistego. Wielu autorów (np. Rudnicki i Rice, 1975,

Vardoulakis et al., 1991, Ichikawa et al., 1990, De Borst, 1988, Desrues, J., 1990, Oka et al., 1994, Pietruszczak i Mróz, 1981, Vermeer, 1982) podjęło próbę modelowania zlokalizowanej deformacji jako niestabilności materiałowej, co jednak wprowadziło ograniczenia nie pozwalające na analizę deformacji po utworzeniu się lokalizacji. Szereg nieco późniejszych prac opisuje najczęściej używane modele teoretyczne, pozwalające na analizę lokalizacji (na przykład Khen et al., 1998, Imposimato i Nova, 1998, Schaeffer i Shearer, 1997, Vardoulakis, 1996a,b, Papamichos i Vardoulakis, 1995, Zienkiewicz et al. 1995, Mróz i Maciejewski, 1994, Bigoni i Hueckel, 1989, Mühlhaus i Vardoulakis, 1987, Tejchman, 2008).

Większość badań eksperymentalnych zjawiska lokalizacji, którego powszechność, jak już wspomniano, stwierdzono dopiero w latach 90-tych ubiegłego wieku, prowadzonych było na próbkach (*element tests*). Jest to charakterystyczne dla aktualnego stanu badań, skoncentrowanego na odtworzeniu zachowania niewielkiego elementu ośrodka, co jest niezbędne dla skonstruowania wciąż jeszcze brakującego satysfakcjonującego modelu konstytutywnego ośrodka gruntowego.

Od początku nowoczesnej mechaniki w XVIII wieku, zachowanie gruntów opisywano stosując lokalną teorię ośrodka ciągłego opartą na założeniu, że stan ciała w dowolnym punkcie jest określony przez stan punktów materialnych leżących w jego bezpośrednim sąsiedztwie (Gandhoffer et al., 1999). Większość autorów zajmujących się lokalizacją odkształceń w materiałach ziarnistych uważa, że klasyczna mechanika ośrodka ciągłego nie jest w stanie przewidzieć zjawiska lokalizacji. W związku z tym od początku lat 90-tych ubiegłego stulecia aż do dzisiaj poszukuje się takich modyfikacji teorii ośrodka ciągłego, które by to, według autorów tych prac, umożliwiły.

Jedną z takich modyfikacji jest zastosowanie zaproponowanego już w roku 1909 przez braci Cosserat uogólnienia klasycznej mechaniki ośrodka ciągłego poprzez dodanie dodatkowych stopni swobody, związanych z obrotem punktów materialnych i w ten sposób wprowadzenie do modelu mikrostruktury materiału. Obecność mikrostruktury jest równoważna nielokalnemu charakterowi ośrodka Cosserat, zaadaptowanego dla gruntów przez Mühlhaus'a i Vardoulakisa, 1987. Wprowadzając do problemu charakterystyczną długość otrzymuje się niezerową szerokość pasm lokalizacji odkształceń, do czego dążono, ponieważ rzeczywiste pasma ścinania są skończonej szerokości.

Inną drogą modyfikacji klasycznej mechaniki ośrodka ciągłego jest krytyczna rewizja jej założeń w ramach formalizmu teorii lokalnej. Przede wszystkim zakwestionowany został i odrzucony postulat Druckera, jako zbyt zachowawczy. Uzasadnieniem był fakt, że postulat Druckera (zawsze nieujemna praca odkształceń plastycznych drugiego rzędu) nie wynika z drugiej zasady termodynamiki i jego niespełnienie formalnie nie łamie żadnego z podstawowych praw fizyki (Vardoulakis, 1996a). W rezultacie obowiązywanie takich ograniczeń teorii jak gładkie powierzchnie plastyczności, współosiowość tensorów naprężenia i prędkości odkształcenia i stowarzyszone prawo płynięcia zostały zniesione. Na tej bazie zaproponowano szereg modeli teoretycznych gruntów. Większość z nich opisano w książce Vardoulakisa i Sulema, 1995. Są to zazwyczaj modele ośrodka ciągłego ze wzmocnieniem i niestowarzyszonym lub niepotencjalnym prawem płynięcia.

Modele takie są złożone z matematycznego punktu widzenia i z sukcesem rozwiązuje się przy ich pomocy tylko proste problemy brzegowe. Pozwalają one jednak na osiągnięcie niejednoznaczności rozwiązań, co uzasadnia występowanie kilku sposobów deformacji, spełniających te same warunki brzegowe. Każdy taki potencjalny sposób nazywany jest bifurkacją. W ten sposób lokalizację odkształceń można powiązać z niejednoznacznością problemu matematycznego, a warunek lokalizacji odkształceń zazwyczaj pokrywa się z warunkiem utraty eliptyczności równań różniczkowych opisujących zachowanie ośrodka gruntowego. Inaczej mówiąc, wymaganie dobrego postawienia problemu obowiązujące w klasycznej teorii plastyczności zostaje zniesione, poszukuje się natomiast rozwiązań matematycznie źle postawionych problemów, ze świadomością, że towarzyszą im trudności numeryczne, jak np. silna zależność od podziału obszaru siatką elementów skończonych i możliwość uzyskania rozwiązań nieznaczających fizycznie (np. odkształcenia koncentrujące się w pasmach o zerowej szerokości).

Brak jednoznaczności rozwiązania problemu brzegowego może być na różne sposoby wprowadzony do klasycznej mechaniki ośrodka ciągłego. Jeden ze sposobów polega na rezygnacji z gładkich powierzchni plastyczności i przyjęcia powierzchni z narożami (tzw. *vertex models*, Rudnicki and Rice, 1975). Naroża pozwalają na nieokreśloność kierunków przyrostów odkształceń plastycznych dla niektórych stanów naprężenia, w ten sposób wprowadzając niejednoznaczną reakcję modelu. Innymi przykładami wprowadzenia możliwej niejednoznaczności są: niewspółosiowe prawa płynięcia (przyjmuje się, że tensory naprężenia i prędkości odkształcenia nie są współosiowe, Yatomi et al., 1989) lub nieliniowe prawa

konstrytuwne dla gruntów, zawierające gradienty deformacji drugiego rzędu (Mühlhaus i Oka, 1994). Każdy z modeli teoretycznych definiuje swój własny warunek bifurkacji, ale zazwyczaj nie wyjaśnia, jaka jest fizyczna przyczyna występowania wielu ich rodzajów (czasami nawet nieskończenie wielu).

W latach 90-tych ubiegłego wieku opis układów lokalizacji odkształceń w ramach formalizmu mechaniki ośrodków ciągłych nie miał praktycznie alternatywy (wyjątek stanowiły propozycje Mroza i Maciejewskiego (1994) oraz Leśniewskiej i Mroza (2000), oparte na analizie stanów granicznych). Taka sytuacja spowodowała ukierunkowanie badań doświadczalnych głównie na weryfikację poszczególnych modeli teoretycznych. Ponieważ modele formułowano na ogół dla prostych stanów naprężenia, wykonywano głównie badania na prostopadłościennych i osiowo-symetrycznych próbkach gruntu.

Do doświadczalnej obserwacji pasm ścinania używano tomografii komputerowej (Desrues et al., 1996), aparatów cyfrowych (Saada et al., 1994), aparatów rentgenowskich (Oda and Kazama, 1998), stereofotogrametrii (Finno et al., 1996) i kamer wideo (Saada et al., 1999). Wszystkie te techniki wspierały się zazwyczaj komputerowo sterowanymi systemami obciążania oraz systemami zbierania danych, umożliwiającymi analizę obrazu. Osiągnięto w ten sposób znacznie większą dokładność pomiarów, niż było to do tej pory możliwe. Mimo to nie udało się w sposób zadowalający zweryfikować żadnego z proponowanych w latach 90-tych modeli teoretycznych.

Na początku XXI wieku nastąpił gwałtowny postęp w technice CCD, która pozwoliła na powstanie aparatów i kamer cyfrowych o dużej rozdzielczości. Jednocześnie rozwinęły się nowe techniki analizy obrazu (techniki pełnego pola), takie jak PIV (particle image velocimetry) czy DIC (digital image correlation). Mają one zastosowanie nie tylko do ośrodków gruntowych, ale również innych materiałów sypkich, takich jak np. ziarna pochodzenia organicznego (Sielamowicz et al., 2006, 2010, 2011a, 2011b, Balevičius et al., 2012). Stosując te metody można z dużą dokładnością określić pola przemieszczeń zarówno w dwóch jak i w trzech wymiarach, a na ich podstawie otrzymać pola odkształceń. W ten sposób powstały warunki do dokładnego rozpoznania pola deformacji ośrodka gruntowego za ścianą oporową.

Jednocześnie dzięki upowszechnieniu się super szybkich komputerów rozwinęła się mechanika dyskretna i oparta na niej nowa metoda numeryczna DEM (discrete element method), pozwalająca na symulowanie zachowania się dużych zbiorów obiektów, z których każdy modelowany jest indywidualnie. Metoda DEM znalazła zastosowanie również w mechanice materiałów ziarnistych (Balevičius et al. 2008, 2011), w tym gruntów, jednak wymaga ciągłej kalibracji i weryfikacji w oparciu o badania doświadczalne. W ostatnim czasie ukazały się prace poświęcone modelowaniu tą metodą parcia biernego gruntu na sztywną ścianę (m.in. Widuliński et al., 2011).

Dzięki metodzie DEM możliwe jest badanie ośrodków ziarnistych na poziomie mikrostruktury (pojedynczych ziaren). Najbardziej aktualnym w tej chwili problemem naukowym w dziedzinie fizyki jest badanie przejścia pomiędzy skalą mikro (fizyka kwantowa) a skalą makro (fizyka klasyczna), czyli skali pośredniej (tzw. meso- skali), która w odniesieniu do fizyki nazwana została 'skalą życia', ponieważ, jak powiedział Robert Laughlin, cytowany na konferencji Powders and Grains 2013 w Sydney, 'opisują ją nowe, wyłaniające się dopiero prawa natury, które muszą być raczej odkryte, niż wydedukowane'. Analogiczny problem przejścia od skali mikro do skali makro występuje w przypadku materiałów ziarnistych (*Proc. Int. Conf. Powders and Grains, Sydney 2013, AIP, Vol 1542*). Pojedyncze ziarna ośrodka definiują skalę mikro, natomiast skala makro odpowiada bilionom ziaren charakteryzujących rzeczywiste problemy geotechniczne. Brak zrozumienia przejścia między tymi skalami, a więc specyfiki meso-skali, uniemożliwia dalszy postęp w modelowaniu zachowania materiałów ziarnistych. Warunkiem tego postępu jest zgromadzenie odpowiednio obszernego materiału doświadczalnego, pozwalającego na jednoczesną obserwację zjawisk zachodzących w różnych skalach. Doświadczalne badanie parcia gruntu na ścianę oporową stanowi stosunkowo prosty do modelowania fizycznego i łatwy do interpretacji problem, dostarczający jednocześnie bogatej informacji na temat zachowania materiałów ziarnistych w wielu skalach.

Biorąc to pod uwagę w pracy podjęto próbę zbadania pola deformacji ośrodka ziarnistego za ścianą oporową w trakcie jej prostej translacji w kierunku 'od gruntu' (parcie czynne), realizując tym samym postulat Bransbiego i Milligana (Bransby i Milligan, 1975). Dodatkowo badano geometryczny związek pomiędzy polem deformacji a wywołanymi przez tę deformację zmianami w polu naprężeń. Ponadto w pracy starano się zdefiniować zjawiska,

które zachodzą w ośrodku ziarnistym w meso-skali, w szczególności wewnątrz pasma ścinania.

W wyniku analizy badań historycznych, które pokazały, że w fazie zaawansowanej deformacji pojawiają się w ośrodku gruntowym za ścianą oporową złożone układy lokalizacji odkształceń (tym bardziej złożone, im bardziej skomplikowany jest ruch ściany, Leśniewska, 2000), dla realizacji celów pracy wybrano najprostszy schemat tego ruchu – poziomą translację w kierunku ‘od gruntu’. Wybór kierunku ‘od gruntu’ (parcie czynne) był uzasadniony koniecznością utrzymania stałej wartości obciążenia zewnętrznego zasyпки, niezbędnego dla wzbudzenia w ziarnach ośrodka modelowego mierzalnego efektu elasto-optycznego. W przypadku poziomego ruchu ścianki w kierunku ‘do gruntu’ (parcie bierne) utrzymanie stałej wartości obciążenia zewnętrznego nie było możliwe.

Ponieważ aktualnie dostępne metody pomiaru ‘pełnego pola’ (w tym metody analizy obrazu) umożliwiają rejestrację bardzo małych deformacji, które wcześniej uznano by za niemierzalne, przystępując do badań przyjęto za możliwe dokładne określenie sposobu ewolucji lokalizacji odkształceń, czyli zmian, jakim ulega jej schemat w trakcie ruchu ścianki. Aby możliwe było dokładne przestudiowanie tej ewolucji, w pracy przyjęto bardzo małe (w porównaniu ze stosowanymi we wcześniejszych badaniach, opisanych w literaturze) przyrosty przemieszczeń ścianki, wynoszące ułamek milimetra.

1.2. Cel, zakres i teza pracy

Podstawowym celem pracy było dokładne rozpoznanie ewolucji pola odkształceń w ośrodku ziarnistym za ścianą oporową w trakcie jej prostej translacji w kierunku ‘od gruntu’ (parcie czynne) w zakresie małych deformacji oraz uzyskanie nowej wiedzy na temat mechanizmów lokalizacji odkształceń i zachowania się materiału sypkiego wewnątrz pasma ścinania.

Dodatkowym celem pracy o dużym znaczeniu dla dalszych studiów było określenie zakresu przydatności elastooptyki i połączonej z nią analizy obrazu do badania nie tylko deformacji ośrodków sypkich, ale również zmian związanego z deformacją pola naprężeń.

Zakres rozprawy obejmuje doświadczalne badania modelowe, ich opracowanie numeryczne metodą analizy obrazu oraz porównanie z wynikami analizy numerycznej metodą elementów skończonych.

Rozprawa składa się z dwóch zasadniczych części: (1) analizy doświadczalnych badań modelowych przeprowadzonych na ośrodku symulującym zachowanie gruntu oraz na rzeczywistym ośrodku gruntowym (piasek) oraz (2) numerycznej analizy doświadczeń metodą analizy obrazu i metodą elementów skończonych.

Teza pracy:

Przyjęta kompleksowa metodyka badań, obejmująca badania na modelach fizycznych oraz analizę i symulacje numeryczne pozwala na dokładne rozpoznanie ewolucji mechanizmów zniszczenia w ośrodkach sypkich, przyczyniając się do istotnego poszerzenia wiedzy dotyczącej zachowania tych ośrodków. Metoda ta stanowi właściwe narzędzie do badania lokalizacji odkształceń, a jej zastosowanie do analizy zachowania ośrodka sypkiego za ścianą oporową w zakresie małych deformacji pozwoliło na odkrycie cyklicznej zmienności, której podlega mechanizm zniszczenia konstrukcji oraz materiał wewnątrz pasma ścinania. .

2. METODYKA PRACY

Dla osiągnięcia celów założonych w rozprawie wykorzystano fizyczny model konstrukcji oporowej w małej skali. Głównym narzędziem zastosowanym w pracy była metoda polegająca na połączeniu analizy obrazu i elastoptyki, zaproponowana przez Leśniewską i Muir Wooda (Leśniewska i Muir Wood, 2009, 2010, Muir Wood i Leśniewska, 2010). Oprócz tego do symulacji numerycznej niektórych badań zastosowano metodę elementów skończonych.

2.1. Badania na modelach fizycznych

Badania na modelach fizycznych w płaskim stanie odkształcenia stworzyły doświadczalną podstawę dla metod analitycznych, określających rozwiązania podstawowych problemów geotechnicznych, takich jak nośność fundamentów, parcie gruntu na ściany oporowe czy stateczność zboczy.

Z punktu widzenia praktyki inżynierskiej wartość badań modelowych jest tym większa, im lepiej spełniają one warunki podobieństwa mechanicznego (Podsiadło, 1967), ponieważ można wtedy wyniki badań modelowych po przeskalowaniu odnieść bezpośrednio do prototypu. Dotychczasowe próby wykazały, że w przypadku problemów z dziedziny mechaniki gruntów pełne osiągnięcie podobieństwa mechanicznego jest praktycznie niemożliwe. Najwięcej warunków podobieństwa (pięć z sześciu, Horodecki, 1998) można spełnić stosując wirówkę geotechniczną odpowiednich rozmiarów.

W standardowych badaniach modelowych w małej skali możliwe do osiągnięcia jest w zasadzie jedynie podobieństwo geometryczne modelu i prototypu oraz zgodność początkowych parametrów ośrodka, takich jak porowatość i kąt tarcia wewnętrznego, które mogą być jednakowe w modelu i prototypie. W przypadku modelowania problemów z dziedziny mechaniki gruntów największym ograniczeniem małej skali jest brak możliwości odtworzenia rzeczywistego poziomu naprężeń związanych z ciężarem własnym gruntu. Ograniczenie to nie oznacza jednak, że badania w małej skali są pozbawione wartości poznawczej – pozwoliły one m.in. na jakościowy opis podstawowych mechanizmów

zniszczenia różnych typów konstrukcji geotechnicznych i opracowanie stosowanych do tej pory uproszczonych modeli obliczeniowych.

W chwili obecnej badania na modelach fizycznych zyskały dodatkowe uzasadnienie ze względu na powszechne włączenie do tematyki badawczej problemów wynikających z mikrostruktury ośrodków ziarnistych. Podstawowa wiedza na temat mechanizmów tworzenia się lokalizacji odkształceń, czy własności ośrodka sypkiego wewnątrz pasma ścinania, jest bardzo ograniczona i wymaga właśnie informacji pochodzących z badań modelowych. Zaletą tych badań jest bowiem większa swoboda deformacji badanego materiału, mniej ograniczona przez warunki brzegowe, niż to ma miejsce w przypadku laboratoryjnych badań na próbkach. Taka sytuacja pozwala na bardziej spontaniczne, wynikające z jego natury zachowanie materiału, co jest niezbędne w przypadku prowadzenia badań podstawowych. Biorąc to pod uwagę w pracy przeprowadzono serię badań na modelu fizycznym muru oporowego w skali 1:50. Skala modelu wynikała z rozmiarów polaryzatora i analizatora, stanowiących elementy użytego w badaniach polaryskopu (przyjęto maksymalną możliwą wysokość modelu, wynoszącą około 20cm).

Osobnym problemem, który mogą rozwiązać tylko badania modelowe, jest wyznaczenie możliwie pełnego pola przemieszczeń w ośrodkach gruntowych (nie istnieje możliwość wykonania takich badań w warunkach *in situ*). W pracy Zadrogi i Malesińskiego (2005) przedstawiono przegląd tradycyjnych sposobów wyznaczania pól przemieszczeń, których dokładność była jednak na ogół zbyt mała dla studiowania lokalizacji odkształceń. W badaniach Dantu (1957), Wakabayashi'ego (1957), Dreschera (1976), Allersmy (1987) i Dyer'a, (1985) oraz w badaniach wykonanych przez zespół badaczy na przestrzeni 20 lat na Uniwersytecie w Cambridge (Leśniewska, 2000) pola przemieszczeń wyznaczano przez śledzenie różnymi metodami (klasyczna fotografia, zdjęcia rentgenowskie) zmian pozycji markerów umieszczonych w bardziej lub mniej regularnym szyku w wybranym przekroju próbki (np. Milligan, 1974, Allersma, 1987, Dyer, 1985) lub przez stereoskopowy pomiar położenia nieprzezroczystych porcelanowych znaczników osadzonych przypadkowo w pokruszonym szkłe (Drescher, 1976). Odległości pomiędzy sąsiadującymi markerami były dużo większe niż rozmiary ziaren, a więc nie było pewności, czy marker, który musi być również większy, niż ziarna gruntu, dobrze reprezentuje ich przemieszczenia. Ponadto wprowadzanie do gruntu znaczników, na zmianie pozycji których oparty jest pomiar przemieszczeń, może naruszyć lokalnie strukturę badanego gruntu, a układanie markerów w

warstwach wymusza również warstwową budowę modelu, zaburzając jego jednorodność gęstościową.

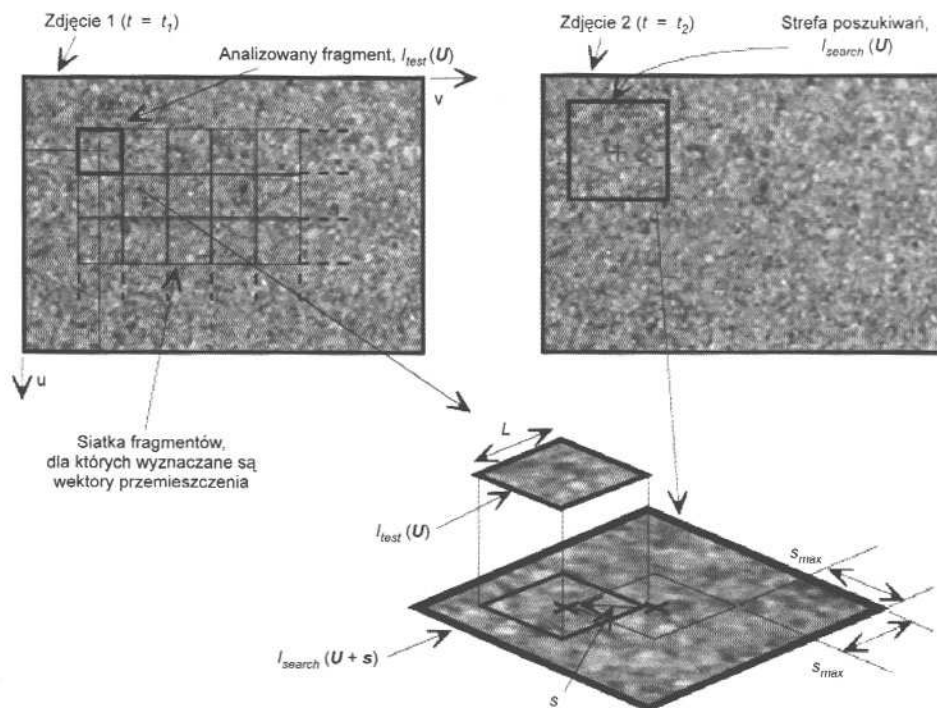
Pod koniec XX w powstały metody analizy obrazu cyfrowego, umożliwiające wyznaczenie pól przemieszczeń z bardzo dużą dokładnością, nie zamazując przy tym, dzięki wysokiej precyzji pomiaru, obecności lokalizacji odkształceń.

2.2. Analiza obrazu w zastosowaniu do materiałów sypkich

Dzięki powstaniu fotografii cyfrowej wysokiej rozdzielczości oraz odpowiedniego oprogramowania możliwa stała się dokładna analiza deformacji ośrodków ziarnistych, głównie w oparciu o metody takie jak PIV (Particle Image Velocimetry), określana również jako DIC (Digital Image Correlation).

Metoda PIV, czyli cyfrowa korelacja obrazu, początkowo wykorzystywana była w dziedzinie mechaniki płynów (Adrian, 1991), a dopiero później do analizy przemieszczeń w badaniach modelowych gruntu (White i Take, 2002, White et al., 2003, Malesiński i Zadroga, 2008). PIV działa na zasadzie śledzenia charakterystycznych przestrzennych układów jasności na dwóch kolejnych obrazach cyfrowych. Porównując dwa kolejne zdjęcia otrzymujemy pole przemieszczeń średnich, odpowiadające pewnemu etapowi doświadczenia. Stanowisko doświadczalne musi być w związku z tym wyposażone w ścianki wykonane z materiału przezroczystego, takiego jak szkło lub pleksiglas. Badany materiał ziarnisty powinien mieć odpowiednią teksturę, aby oprogramowanie do analizy obrazów mogło dokładnie wykryć i zidentyfikować poszczególne elementy obrazów.

W języku polskim metodę PIV (DIC) określa się również terminem ‘anemometrii obrazowej’. Dokładność pomiaru metodą PIV ograniczona jest wieloma czynnikami, z których najistotniejszymi są rozdzielczość obrazu oraz prawidłowy dobór sekwencji korelacji. Pomiar przemieszczeń z wykorzystaniem cyfrowej anemometrii obrazowej mogą być szczególnie przydatne tam, gdzie niewskazane jest wykonywanie pomiarów ingerujących w badany układ (Suchecki, 2003).



Rys.2.1. Etapy analizy obrazu w metodzie PIV, (White et al., 2003).

W cyfrowej anemometrii obrazowej w celu wyznaczenia korelacji obrazów stosuje się szybkie transformacje Fouriera. Poszukiwanie przemieszczeń odbywa się wg następującego schematu (Rys.2.1):

- podział analizowanych obrazów na elementy,
- porównanie wszystkich elementów obrazu drugiego z elementami obrazu pierwszego,
- wyznaczenie przemieszczeń wszystkich elementów.

Zgodnie z Rys.2.1 pierwsze zdjęcie dzieli się na jednakowe elementy (najczęściej kwadraty) tworzące regularną siatkę. Każdy z tych fragmentów stanowi macierz obrazu $I_{test}(U)$ o rozmiarze $L \times L$ pikseli, której elementami są wartości jasności przypisane każdemu pixelowi. Do wyznaczenia przemieszczeń fragmentów wydzielonych na pierwszym zdjęciu konieczne jest założenie dla każdego z nich strefy poszukiwań $I_{search}(U + s)$ na zdjęciu drugim. Strefa poszukiwań jest rozszerzona w stosunku do poprzednio analizowanego fragmentu w obie strony na kierunkach u i v o odpowiednio określoną odległość s_{max} . W tak zdefiniowanej strefie, przesuując co jeden piksel odpowiadający jej fragment zdjęcia pierwszego, poszukuje się jego nowego położenia.

Aby mieć pewność, że nowe położenie analizowanego fragmentu pierwszego zdjęcia będzie odszukane poprawnie, zakłada się najczęściej szerokość strefy poszukiwań na zdjęciu drugim równą podwójnej maksymalnej wartości przemieszczenia gruntu pomiędzy każdą parą zdjęć. Takie założenie wydłuża jednak czas obliczeń. W typowym badaniu geotechnicznym przemieszczenie analizowanego fragmentu zmienia się stopniowo, więc bardziej efektywną techniką wyboru strefy poszukiwań jest przesunięcie jej o wektor przemieszczenia, wyznaczony dla najbliższego poprzednio analizowanego fragmentu zdjęcia pierwszego. W ten sposób można zredukować wielkość strefy poszukiwań do rozmiaru odpowiadającego przewidywanemu przemieszczeniu (Suchecki, 2003).

Miarą zawartości sekcji, dla których szukane jest przemieszczenie, jest rozkład jasności obrazu. Porównanie obu obrazów wykonuje się metodą krzyżowej korelacji macierzy $I_{test}(U)$ i $I_{search}(U + s)$. Przyjmując, że współczynnik korelacji $R_n(s)$ równy jedności oznacza całkowite podobieństwo dwóch zbiorów, a równy zero wskazuje na brak jakichkolwiek wspólnych cech, na podstawie analizy szeregu wartości współczynnika korelacji dla fragmentów dwóch obrazów można wskazać punkt odpowiadający najwyższemu podobieństwu (maksymalny współczynnik korelacji). Odpowiada on przesunięciu, jakiemu uległy względem siebie fragmenty obrazu na kolejnych zdjęciach. W przypadku analizy obrazu mało prawdopodobne jest uzyskanie współczynnika korelacji równego jedności. Odpowiadają za to szумы spowodowane rejestracją obrazu aparatem cyfrowym, nierównomierności oświetlenia oraz inne czynniki. Poszukiwana jest zatem nie wartość 1, a wartość maksymalna w analizowanym zbiorze (Suchecki i Alabrudziński, 2003).

Największy stopień zgodności wyznacza nowe położenie analizowanego fragmentu zdjęcia pierwszego i jednocześnie wektor jego przemieszczenia. Analogicznie analizuje się kolejne fragmenty siatki ze zdjęcia pierwszego. W celu zwiększenia dokładności wyznaczania nowego położenia analizowanego fragmentu, każdy z czterech najwyżej położonych pikseli dzieli się najczęściej na 200 części (tzw. sub-piksele), w wyniku czego otrzymuje się rozdzielczość 0,005 piksela. Dla tak podzielonego obszaru wyznacza się dokładne położenie piksu korelacji, stosując interpolację przestrzenną. Głównym ograniczeniem wyznaczania pola przemieszczeń metodą PIV jest fakt, że obszar badań musi znajdować się za przezroczystą granicą oraz że materiał ziarnisty powinien mieć odpowiednią fakturę, aby program do analizy obrazu mógł zidentyfikować poszczególne elementy obrazu na różnych zdjęciach.

Do analizy badań modelowych opisanych w Rozdziale 3 użyto oprogramowania geoPIV opracowanego i udostępnionego przez White'a (White i Take, 2002). Dokładność metody PIV może dawać wartości przemieszczeń rzędu 10^{-4} piksela (White et al., 2003, Leśniewska i Muir Wood, 2009).

2.3. Badania elastoptyczne materiałów sypkich

Elastoptyka jest metodą doświadczalną służącą najczęściej do wyznaczania naprężeń w przezroczystych, bezpostaciowych, normalnie izotropowych materiałach litych (np. szkło, poliwęglan, żywice syntetyczne), (Dereszkiewicz, 1975). Materiały te stosuje się również do modelowania przedmiotów (np. części maszyn) wykonywanych z materiałów nieprzezroczystych, takich jak np. metale lub do wykrywania szkodliwych naprężeń w przedmiotach szklanych (Aben i Guillemet, 1992) i badania struktury polimerów.

Badanie elastoptyczne przedmiotów wykonanych z dowolnego materiału wymaga, w przypadku wykorzystania polaryskopu transmisyjnego, wykonania modelu z tworzywa przezroczystego, który poddany zostaje obciążeniom. Obciążenia wprowadzają w materiale anizotropię, przejawiającą się m.in. dwójłomnością optyczną - pod wpływem naprężeń model nabiera cech optycznych kryształu jednoosiowego, o osi optycznej skierowanej równolegle do kierunku rozciągania lub ściskania. Przy przejściu światła spolaryzowanego przez obciążony model powstają prążki interferencyjne: izokliny i izochromy. Na ich podstawie możliwe jest wyznaczenie różnicy naprężeń głównych w dowolnym punkcie ciała, za pomocą podstawowych równań elastoptyki, zredukowanych dla światła spolaryzowanego kołowo do postaci (1) i (2):

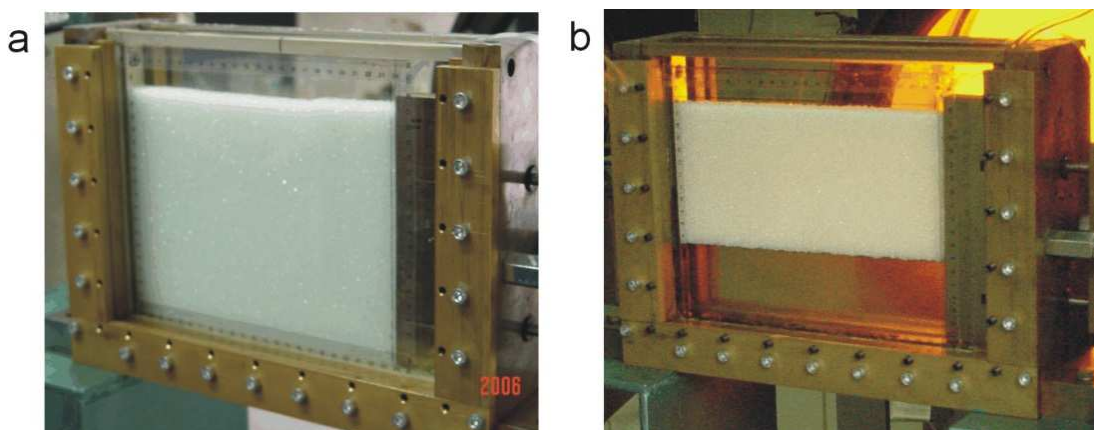
$$I = I_0 \sin^2 \Delta / 2, \quad (1)$$

$$\Delta = \left[2C\pi d / \lambda (\sigma_1 - \sigma_3) \right] , \quad (2)$$

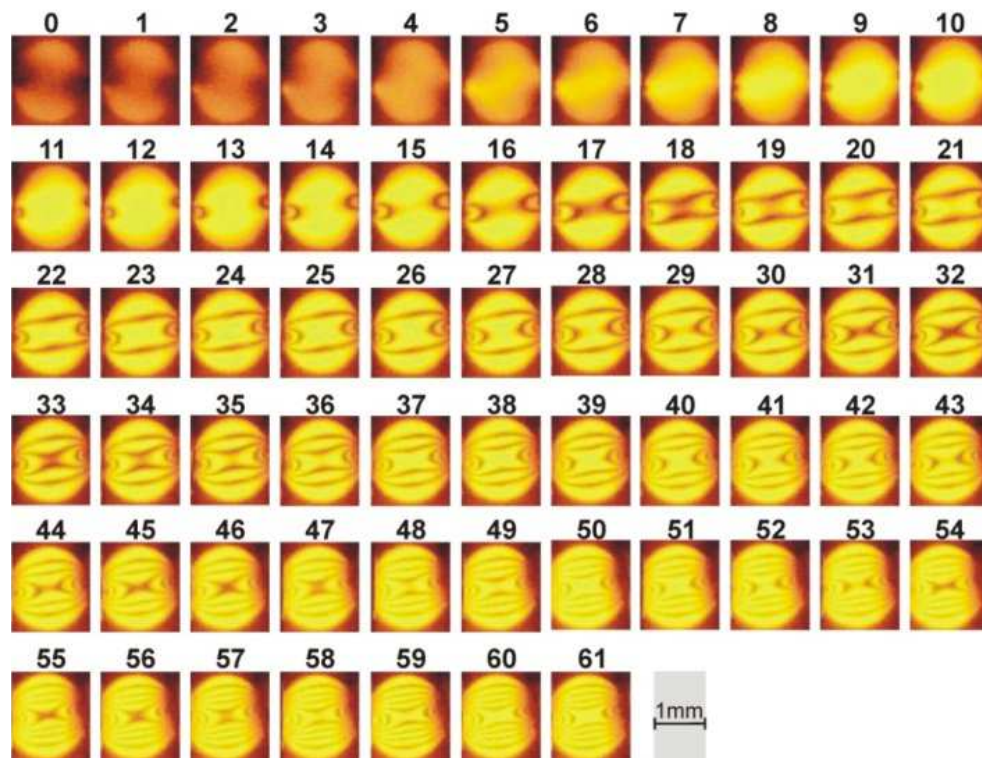
gdzie I i I_0 oznaczają odpowiednio natężenie światła spolaryzowanego po przejściu przez model i natężenie światła wchodzącego do modelu, Δ oznacza różnicę dróg optycznych dla szybkiego i wolnego promienia (Dereszkiewicz, 1975), d grubość modelu, C – stałą elastoptyczną materiału, z którego zbudowany jest model, λ - długość fali świetlnej, a $\sigma_1 - \sigma_3$ różnicę naprężeń głównych w danym punkcie modelu.

Jak wynika z równania (2), elastooptykę stosuje się zazwyczaj do badania płaskich modeli o stałej grubości, które umieszcza się w polaryskopie i poddaje odpowiednim obciążeniom. Polaryskop jest przyrządem optycznym, w którym w przypadku ogólnym światło przechodzi kolejno przez polaryzator, następnie przez próbkę i analizator. Często stosowaną konfiguracją jest układ tzw. polaryskopu kołowego, gdzie próbkę bada się w świetle spolaryzowanym kołowo, co wymaga umieszczenia w układzie optycznym dwóch płytek ćwierćfalowych: za polaryzatorem i przed analizatorem. Taka konfiguracja była stosowana do badań elastooptycznych opisanych w dalszej części pracy.

Specyfika badań elastooptycznych materiału zbudowanego z ziaren wiąże się z faktem, że nawet gdy każde z nich jest z osobna przezroczyste, jak to ma miejsce w przypadku granulek szklanych, umieszczonych w stanowisku badawczym widocznym na Rys.2.2, w całej masie stanowią one ośrodek nieprzezroczysty (Rys.2.2a). Wynika to z rozproszenia światła wywołanego odbiciem na ścianach ziaren. Jeżeli jednak wszystkie przestrzenie między ziarnami wypełni się przezroczystą cieczą o takim samym współczynniku załamania światła jak szkło – tzw. cieczą immersyjną – ośrodek zbudowany z ziaren stanie się, w stopniu wystarczającym do prowadzenia badań elastooptycznych, przezroczysty (Rys.2.2b). Nie oznacza to jednak, że do określenia stanu naprężenia w danym punkcie takiego optycznie jednorodnego ośrodka można stosować w sposób bezpośredni równania (1) i (2), ponieważ mają one zastosowanie do płaskiego modelu o stałej grubości d , wykonanego z materiału litego, natomiast w ośrodku ziarnistym, nawet po wypełnieniu jego porów cieczą immersyjną i uzyskaniu makroskopowej przezroczystości, efekt elastooptyczny w postaci jasnych i ciemnych prążków interferencyjnych występuje indywidualnie w każdym wystarczająco obciążonym ziarnie (Rys.2.3).



Rys.2.2. Stanowisko badawcze w trakcie przygotowania modelu, a) wypełnione suchymi granulami szklanymi, b) w trakcie napełniania od dołu cieczą immersyjną

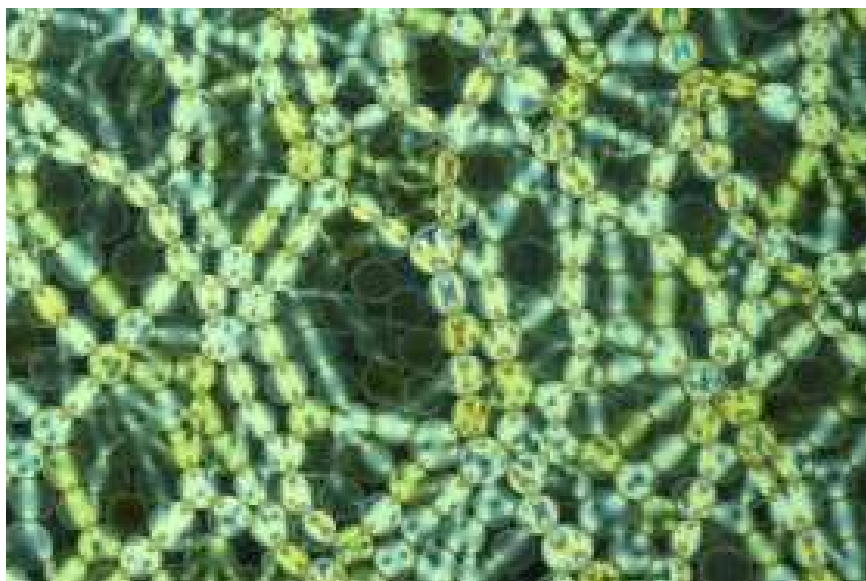


Rys.2.3. Elasto-optyczna reakcja pojedynczej granulki szklanej o średnicy $\sim 1.4\text{mm}$ na jednoosiowe ściskanie – widoczne prążki interferencyjne, których liczba rośnie wraz ze wzrostem obciążenia (Muir Wood i Leśniewska, 2010)

Oznacza to, że interpretacja obrazów elastoptycznych w przypadku próbki materiału ziarnistego o grubości większej niż grubość pojedynczej warstwy ziaren jest o wiele bardziej złożona, niż w przypadku materiału litego, a na obecnym poziomie badań jest praktycznie niemożliwa, ponieważ wymaga nie tylko zastosowania techniki trójwymiarowej, ale również rozwiązań teoretycznych w trzech wymiarach .

Obraz trójwymiarowej (składającej się z wielu ‘warstw’ ziaren) próbki materiału, otrzymany w świetle przechodzącym polaryskopu stanowi natomiast tylko rzut na płaszczyznę zdjęcia wypadkowej reakcji elasto-ptycznej wielu ziaren, zebranej z całej grubości próbki.

W związku z tym niektórzy badacze zachowania materiałów ziarnistych (np. Clark et al., 2012), aby rozpoznać charakter oddziaływań pomiędzy pojedynczymi ziarnami (skala mikro) stosują próbki złożone z bardzo wyidealizowanych ‘ziaren’ (najczęściej dysków, Rys.2.4) o dużych (rzędu kilku centymetrów) średnicach, wykonanych z materiałów przezroczystych o wysokiej stałej elastoptycznej, dzięki czemu badania mogą być wykonywane przy niewielkich obciążeniach zewnętrznych próbki.



Rys.2.4. Fragment obciążonej próbki wykonanej z pojedynczej warstwy płaskich walców o średnicach 3-4cm, sfotografowanej w świetle białym i polaryzacji kołowej (B. Behringer)

Zaletą badania takich próbek jest możliwość określenia obciążeń działających na poszczególne ziarna przy pomocy klasycznych równań elastoptyki, np. (1) i (2) oraz opartych na nich metodach pomiaru oraz uniknięcie konieczności stosowania cieczy immersyjnej, natomiast wadą jest nadmierna idealizacja ośrodka i zbyt mało liczny, z punktu widzenia np. problemów mechaniki gruntów, zbiór ziaren tworzących badany model.

Mimo trudności związanych z interpretacją wyników, badania modelowe na ziarnistych materiałach elasto-ptycznych, dotyczące problemów mechaniki gruntów, mają jednak stosunkowo długą historię i dopracowały się pewnych użytecznych interpretacji, mających przy tym znaczenie praktyczne. Takie badania na modelowych ośrodkach sypkich przeprowadzali między innymi: Dantu (1957), Wakabayashi (1957), Drescher (1976), Allersma (1987) i Dyer (1985). Badania Dantu wykonane były na wałeczkach szklanych, natomiast pozostali używali pokruszonego szkła. Obserwując fotografie wykonane w świetle spolaryzowanym byli w stanie rozpoznać charakterystyczne jasne pasma przedstawiające obciążone łańcuchy ziaren. Wywnioskowano, że pasma te pokrywają się z trajektoriami naprężeń głównych.

Ponieważ głównym celem badań było określenie związku pomiędzy naprężeniami, a odkształceniami, oprócz ziaren szklanych umieszczano w badanych próbkach inne ziarna, pełniące rolę markerów – przy ich pomocy starano się określić pola przemieszczeń, poprzez śledzenie zmian pozycji markerów umieszczonych (w bardziej lub mniej regularnym szyku)

w wybranym przekroju próbki (Allersma, 1987, Dyer, 1985) lub przez stereoskopowy pomiar położenia nieprzezroczystych porcelanowych znaczników osadzonych przypadkowo w pokruszonym szkłe (Drescher, 1976). Odległości pomiędzy sąsiadującymi markerami były dużo większe niż rozmiary ziaren (np. Allersma użył siatki o rozstawie około 10 mm, a ziarna pokruszonego szkła miały średnicę 3 mm). Ideą takich pomiarów było jednoczesne otrzymanie informacji dotyczących pola odkształceń i naprężeń w ośrodku ziarnistym. Cel ten został tylko częściowo osiągnięty, przede wszystkim dlatego, że przy dużych odległościach między markerami otrzymane pola przemieszczeń były zbyt mało dokładne w stosunku do obrazów elasto-optycznych, zarejestrowanych na fotografiach i dokładne porównanie obu rodzajów pól nie było możliwe. Z drugiej strony nie istniały w okresie klasycznej fotografii metody szczegółowej analizy obrazu, które rozwinęły się dopiero wraz z fotografią cyfrową – w tej sytuacji możliwe było otrzymanie obrazu ‘naprężeń’ (sił między ziarnami) tylko w końcowej fazie testów, w stanie zaawansowanej deformacji, nie można było natomiast śledzić zmian w polu naprężeń w trakcie niewielkich deformacji ośrodka. Ze względu na fakt, że zakres małych deformacji z powodów technicznych leżał poza zasięgiem możliwości badawczych, do badań elasto-optycznych wybierano problemy, którym z natury towarzyszą duże deformacje, takie jak zagłębianie pala, przepływ w silosach (Allersma, 1987), czy aparat prostego ścinania (Drescher, 1972, 1976). W XXI w zagadnienie zagłębiania pala metodą elasto-optyczną przy użyciu fotografii cyfrowej badał Dijkstra (2009). Jako modelowego ośrodka sypkiego użył okruchów szklanych. W ostatnich latach badania przepływu granulatów w silosach z wykorzystaniem elasto-optyki, fotografii cyfrowej i DEM prowadził zespół J. Antony’ego z Uniwersytetu w Leeds (Albaraki et al., 2013). Nie realizowano natomiast dotychczas elasto-optycznych badań problemu parcia na ściany oporowe – wyniki pierwszych takich badań opublikowano w pracach Leśniewskiej i Muir Wood’a (Leśniewska i Muir Wood, 2009, 2010, Muir Wood, Leśniewska, 2010).

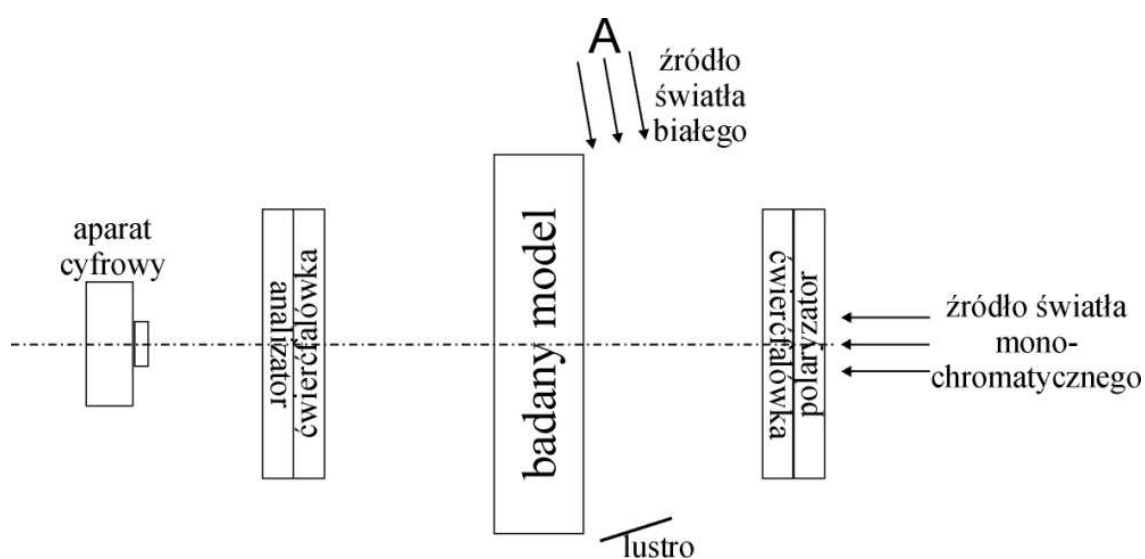
2.4. Połączenie PIV i elasto-optyki

W pracy zastosowano metodykę badań, opisaną w pracach Leśniewskiej i Muir Wood’a (Leśniewska i Muir Wood, 2009, 2010, Muir Wood, Leśniewska, 2010). Jej głównym celem również było uzyskanie w trakcie tego samego doświadczenia pełnej, niezależnej informacji dotyczącej pola deformacji i odpowiadającego mu pola naprężeń. Dla uzyskania informacji o rozkładzie naprężeń zastosowano elasto-optykę, nowym elementem było natomiast sprzężenie jej z cyfrową korelacją obrazów (DIC), co umożliwiło rezygnację z wprowadzania do badanej

próbki materiału ziarnistego markerów i otrzymanie pola przemieszczeń i odkształceń na podstawie naturalnej tekstury obrazu, jak to zostało opisane w Rozdziale 2.2. Aby informacja charakteryzująca oba rodzaje pól (naprężenia i odkształcenia) pochodziła dokładnie z tego samego zbioru ziaren, zaproponowano użycie dwóch rodzajów światła przechodzącego przez model: monochromatycznego, kołowo spolaryzowanego do zdjęć elasto-optycznych, w celu uzyskania obrazu naprężeń oraz białego, niespolaryzowanego, do zdjęć naturalnej tekstury próbki, umożliwiającej analizę deformacji przy użyciu cyfrowej korelacji obrazów. W związku z tym standardowy układ polaryskopu kołowego został uzupełniony o dodatkowe źródło światła niespolaryzowanego, oznaczone literą A na Rys.2.5 oraz aparat cyfrowy, przeznaczony do rejestracji przebiegu doświadczeń zarówno w świetle spolaryzowanym, jak i niespolaryzowanym.

Konieczność rejestracji poszczególnych etapów doświadczenia w świetle spolaryzowanym i niespolaryzowanym wynika z faktu, że obrazy otrzymane w trakcie obciążania modelu w świetle spolaryzowanym wykazują istotne lokalne zmiany jasności, wywołane efektem elasto-optycznym w pojedynczych ziarnach (Rys.2.3). Metoda PIV (DIC) opiera się natomiast na rozpoznawaniu schematu jasności elementów obrazu składających się z pewnej liczby pikseli, z których każdemu przypisana jest jedna wartość natężenia światła. Jeżeli zdjęcie podzielone zostanie na jednakowe elementy, zawierające wystarczającą ilość informacji, czyli wystarczającą liczbę pikseli o zróżnicowanej jasności, każdy element obrazu staje się jednoznacznie rozpoznawalny na następnym zdjęciu. Jest to możliwe ponieważ schemat jasności pikseli tworzących element obrazu jest unikalny, pod warunkiem, że nie zostanie zmodyfikowany przez żaden dodatkowy, zmiennie oddziałujący czynnik, jakim może być na przykład lokalne rozjaśnienie obrazu na skutek pojawienia się w ziarnach efektu elasto-optycznego. Jeżeli ten efekt nieznacznie zmieni układ jasności pikseli tworzących element obrazu, jego rozpoznanie przez oprogramowanie DIC na kolejnym zdjęciu jest możliwe, jeżeli jednak lokalne zmiany jasności pikseli są znaczące, program może nie być w stanie właściwie rozpoznać elementu, generując błędne wartości przemieszczenia. Aby uniknąć takiej sytuacji, zasadniczo nie należy prowadzić analizy deformacji metodą DIC (PIV) na obrazach elasto-optycznych. W związku z tym każdy etap doświadczeń opisanych w Rozdziale 3 rejestrowany był w świetle przechodzącym na dwóch fotografiach - wykonanej w świetle spolaryzowanym i w świetle niespolaryzowanym. Należy przy tym zwrócić uwagę, że na ogół metodą PIV (DIC) wyznacza się pola przemieszczeń i odkształceń modeli nieprzezroczystych i reprezentują one wtedy tylko deformację widoczną w świetle odbitym

powierzchni modelu. W przypadku próbki przezroczystej, sfotografowanej w białym świetle przechodzącym (Rys.2.5) otrzymuje się, tak jak w przypadku zdjęć w świetle spolaryzowanym, rzut informacji wizualnej pochodzącej z całej głębokości modelu w kierunku prostopadłym do płaszczyzny zdjęcia, na tę płaszczyznę. W związku z tym analiza deformacji próbki przezroczystej daje uśrednione po głębokości pola przemieszczeń i odkształceń, odpowiadające dokładnie tak samo uśrednionemu polu naprężeń, otrzymanemu w świetle spolaryzowanym.



Rys.2.5. Układ optyczny polaryzatora transmisyjnego (polaryzacja kołowa) z dodatkowym źródłem światła białego (A) przeznaczonym do zdjęć służących do analizy deformacji metodą PIV (DIC)

Dodatkową korzyścią z użycia fotografii cyfrowej w połączeniu z metodą badań elastoptycznych jest możliwość wykonywania operacji arytmetycznych na analizowanych obrazach, dzięki czemu można studiować zmiany w polu naprężeń, wywołane nawet niewielkimi zmianami warunków brzegowych.

2.5. Metoda elementów skończonych – program Plaxis

Dla celów interpretacji wyników badań modelowych w pracy wykonano symulację niektórych z nich za pomocą metody elementów skończonych (Zienkiewicz, 1972), używając programu Plaxis 2D 2011.

Przy pomocy metody elementów skończonych, opartej na formalizmie mechaniki ośrodków ciągłych, otrzymuje się pola odkształceń i naprężeń, będące wynikiem rozmycia rzeczywistej ziarnistej struktury ośrodka sypkiego. Porównanie tych pól z polami doświadczalnymi

pozwała w związku z tym na badanie zakresu stosowalności mechaniki ośrodków ciągłych w odniesieniu do materiałów sypkich.

Plaxis 2D służy głównie do analizy problemów brzegowych z dziedziny mechaniki gruntów i fundamentowania w płaskim lub osiowo-symetrycznym stanie odkształcenia. Analiza numeryczna polega na symulacji zachowania się konstrukcji geotechnicznej, współpracującej z podłożem gruntowym, pod wpływem nałożonych obciążeń. Wynikiem analizy są pola deformacji, obejmujące podłoże gruntowe i konstrukcję oraz związane z nimi pola naprężeń, jak również przemieszczenia elementów strukturalnych i wartości wzbudzonych w nich sił.

Wyniki analizy metodą elementów skończonych zależą od wielu czynników, takich, jak przyjęte modele konstytutywne materiałów, wartości parametrów materiałowych, czy warunki brzegowe. Program Plaxis zawiera szereg modeli konstytutywnych, z których najczęściej wykorzystuje się model liniowo sprężysty (dla elementów strukturalnych) i model Coulomba-Mohra oraz jego rozszerzenia (dla gruntów).

Uniwersalność programu Plaxis oraz łatwość przygotowania modeli geometrycznych stwarzają możliwość zastąpienia (czy też rozszerzenia zakresu) czasochłonnych badań doświadczalnych, takich, jak badania opisane w Rozdziale 3, symulacjami numerycznymi.

Do obliczeń, których wyniki zamieszczono w Załączniku 3 przyjęto, że zachowanie ośrodka ziarnistego opisuje sprężysto-idealnie plastyczny model Coulomba-Mohra. Model ten wybrano ze względu na powszechność jego stosowania oraz łatwość określenia w badaniach laboratoryjnych jego parametrów: kąta tarcia wewnętrznego φ , spójności c , modułu odkształcenia E (moduł Younga) i współczynnika Poissona ν .

Zgodnie z instrukcją programu Plaxis (Plaxis Manual, MaterialModels, Appendix B), klasyczny liniowo-sprężysty – idealnie-plastyczny model Coulomba Mohra, przy założeniu właściwych wartości parametrów, najlepiej opisuje zachowanie takich materiałów jak beton, dobrze opisuje zachowanie skał, natomiast w przypadku symulowania praktycznych problemów gruntowych powinien być traktowany jako pierwsze, zgrubne przybliżenie. Stosując ten model, dla każdej warstwy gruntu określa się uśredniony moduł sprężysty lub zakłada się liniową zmienność tego modułu z głębokością. Uważa się, że przy tych założeniach uzyskuje się pierwsze przybliżenie stanu deformacji. Dla uzyskania lepszych

przybliżeń zaleca się stosowanie bardziej zaawansowane modeli gruntowych, takich jak model ze wzmocnieniem (hardening soil model HS), czy model ze wzmocnieniem dla zakresu małych odkształceń (HSsmall).

Model ze wzmocnieniem (HS) w zakresie plastycznym posługuje się tymi samymi parametrami, co model Coulomba-Mohra (c , ϕ i ψ , gdzie ψ oznacza kąt dylatacji), natomiast w zakresie sprężystym wprowadza trzy moduły sztywności: trójosiowy przy obciążeniu E_{50} , trójosiowy przy odciążeniu E_{ur} oraz moduł edometryczny E_{oed} . Ponadto model HS, w odróżnieniu od modelu Coulomba-Mohra, uwzględnia zależność modułów sztywności od poziomu naprężenia (wartości modułów podaje się dla naprężenia odniesienia, na ogół jest to 100 kPa).

Model ze wzmocnieniem dla zakresu małych odkształceń (HSsmall) jest modyfikacją modelu HS, która uwzględnia fakt, że ośrodki gruntowe wykazują zwiększoną sztywność w zakresie małych odkształceń. Większość gruntów wykazuje większą sztywność w zakresie małych niż dużych odkształceń, przy czym sztywność w zakresie małych odkształceń zależy od nich w sposób nieliniowy. Takie zachowanie opisane jest przez model HSsmall poprzez wprowadzenie dodatkowego parametru uwzględniającego historię odkształceń oraz dwa dodatkowe parametry materiałowe. Dzięki takiej konstrukcji model HSsmall daje na ogół bardziej wiarygodne wartości przemieszczeń, niż model HS, dlatego został uznany za najlepiej modelujący zachowanie gruntów sypkich, takich jak żwir, piasek i pył (Plaxis Manual).

Mimo tych zaleceń do analizy badań modelowych, opisanych w Rozdziale 3 zastosowano klasyczny model Coulomba-Mohra. Pierwszą przyczyną takiego wyboru było przekonanie, że analizę badań doświadczalnych należy przeprowadzić przy pomocy możliwie prostego modelu teoretycznego, a dopiero w przypadku stwierdzenia istotnych jej braków, przejść do stosowania bardziej złożonych modeli. Istotnym ograniczeniem stosowania złożonych modeli jest ponadto konieczność wyznaczenia nietypowych parametrów gruntowych, co nie było technicznie możliwe w trakcie realizacji pracy.

Dodatkowym argumentem na rzecz zastosowania modelu Coulomba-Mohra była mała skala badań modelowych – w przypadku warstwy gruntu o miąższości około 20 cm, na przykład zmienność wartości modułów sztywności z głębokością nie odgrywa znaczącej roli.

3. OPIS TECHNIKI BADAŃ MODELOWYCH

Podstawową serię badań doświadczalnych przeprowadzono przy użyciu dużego polaryskopu, przekazanego Instytutowi Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku w roku 2005 przez Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie.

3.1. Stanowisko do badań modelowych

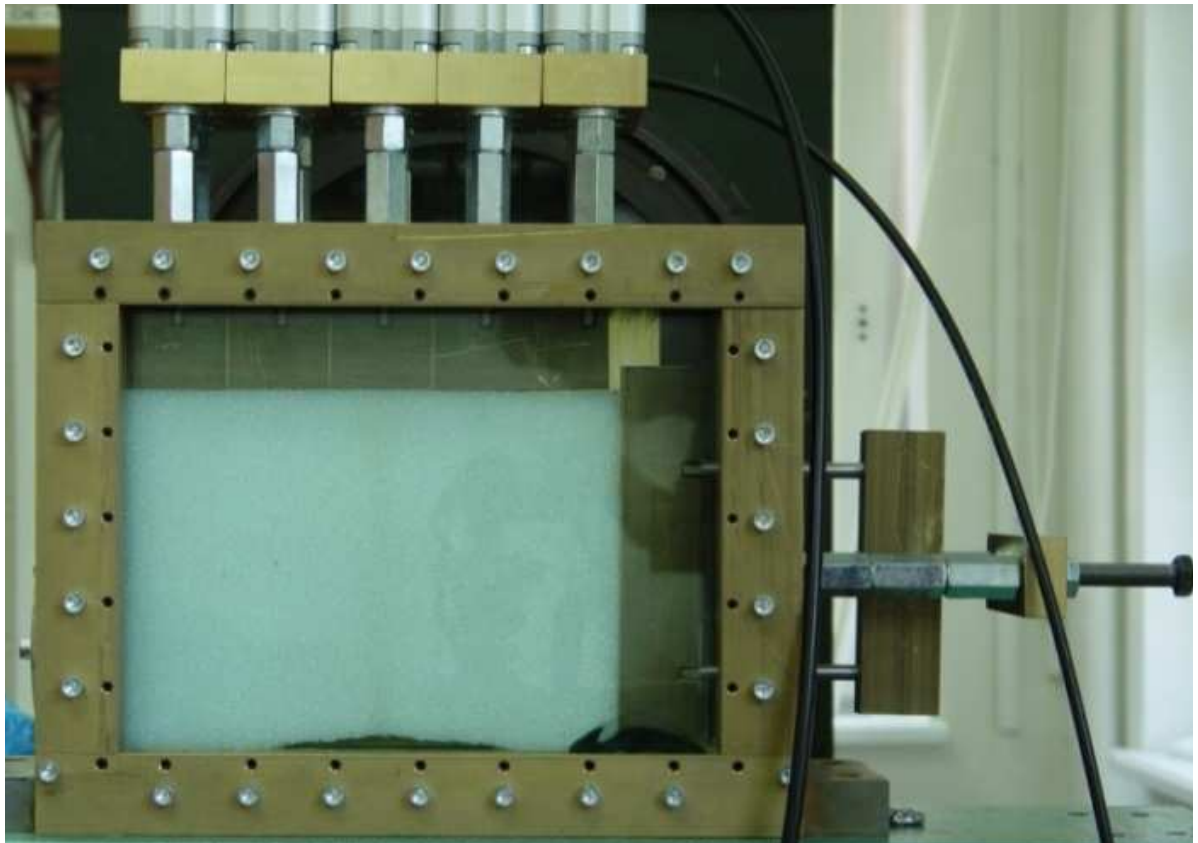
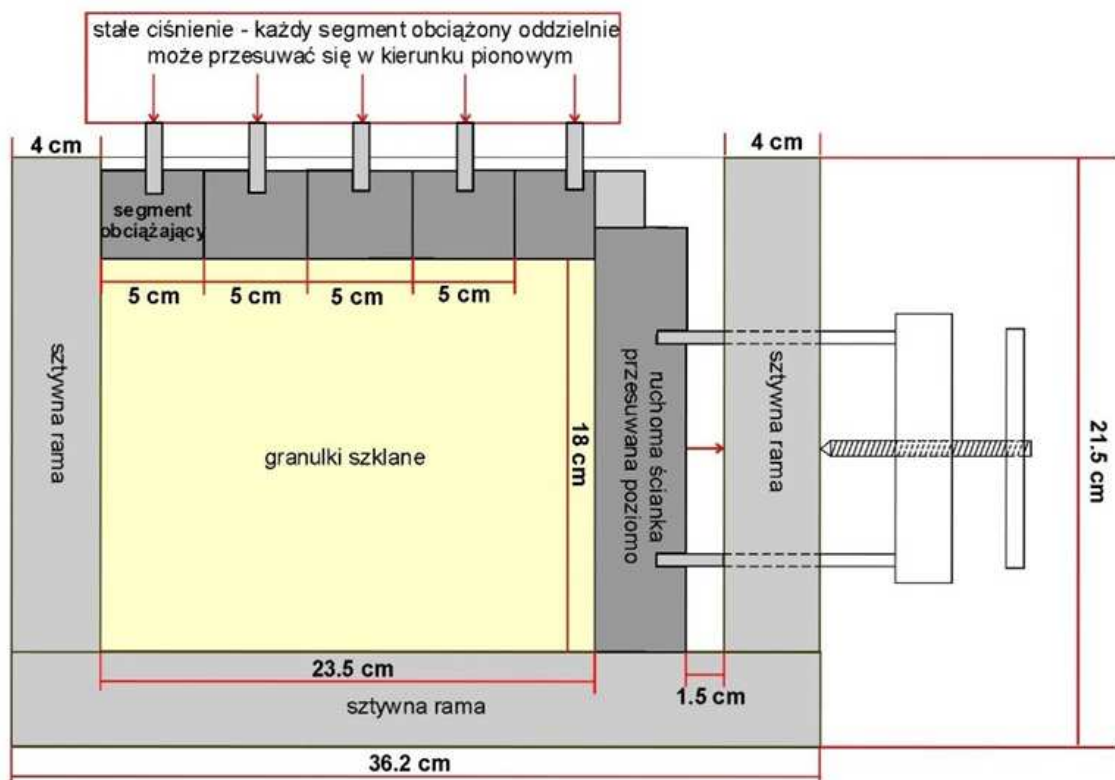
Badania modelowe wykonano w małej skali, w stanowisku badawczym pokazanym na Rys.3.1. Składało się ono ze skrzynki metalowej o wymiarach 36.0 x 21.5 x 6 cm, w której osadzono dwie szyby o grubości 2 cm, modelu pionowej sztywnej ścianki oraz systemu obciążającego i systemu umożliwiającego poziome przemieszczenia ścianki (Leśniewska i Muir Wood, 2009, 2010, Muir Wood, Leśniewska, 2010).

Odstęp między szymbami, a więc również i głębokość modelu, wynosiły 2cm. Rozmiary stanowiska ograniczone były przez wymiary polaryzatora i analizatora, stanowiące elementy składowe użytego w badaniach polaryskopu (ich średnica wynosiła 30cm).

Model ścianki oporowej, umieszczony z prawej strony modelu (Rys.3.1) połączony był za pomocą dwóch poziomych prętów prowadzących, z wyskalowaną śrubą, znajdującą się na zewnątrz skrzynki pomiarowej.

W trakcie badania, w wyniku obrotu śruby o zadany kąt, model ścianki oporowej uzyskiwał swobodę ruchu pod wpływem siły parcia działającej od strony umieszczonego za ścianką materiału ziarnistego i poruszał się w prawo, zgodnie z kierunkiem wskazanym przez czerwoną strzałkę na Rys. 3.1b.

Ze względu na konieczność wzbudzenia w badanym materiale mierzalnego efektu elastooptycznego, model musiał być zewnętrznie obciążony. Obciążenie zewnętrzne zasympki było nakładane poprzez system pięciu sztywnych bloczków metalowych, z których każdy był niezależnie połączony z miniaturowym siłownikiem hydraulicznym, w celu zapewnienia stałego ciśnienia działającego na powierzchnię modelu (Rys.3.1). System hydraulicznego obciążenia pozwalał na osiągnięcie ciśnienia do 4MPa.

a**b**

Rys.3.1. Widok (a) i schemat (b) stanowiska pomiarowego po wypełnieniu granulkami szklanymi i nałożeniu obciążenia.



Rys.3.2. Widok obciążonego modelu umieszczonego w układzie optycznym polaryzatora.

Następnie, w badaniach, w których wykorzystywano elastoptykę, model napełniano od dołu cieczą immersyjną, nakładano głowicę obciążającą i zadawano najpierw program obciążenia, a następnie realizowano program przemieszczenia ścianki. Jako podstawowy krok przemieszczenia wybrano 1/20 skoku śruby, który wynosił 1.25mm, co odpowiadało jednostkowemu przemieszczeniu ścianki δd równemu 0,0625mm lub $\delta d/H$ równemu w przybliżeniu 0,035%, gdzie δd oznacza jednostkowe przemieszczenie ścianki, a H jej wysokość. Rys.3.2 przedstawia model w stanowisku pomiarowym, umieszczony w układzie optycznym polaryzatora transmisyjnego, oświetlony światłem monochromatycznym (żółta linia sodu).

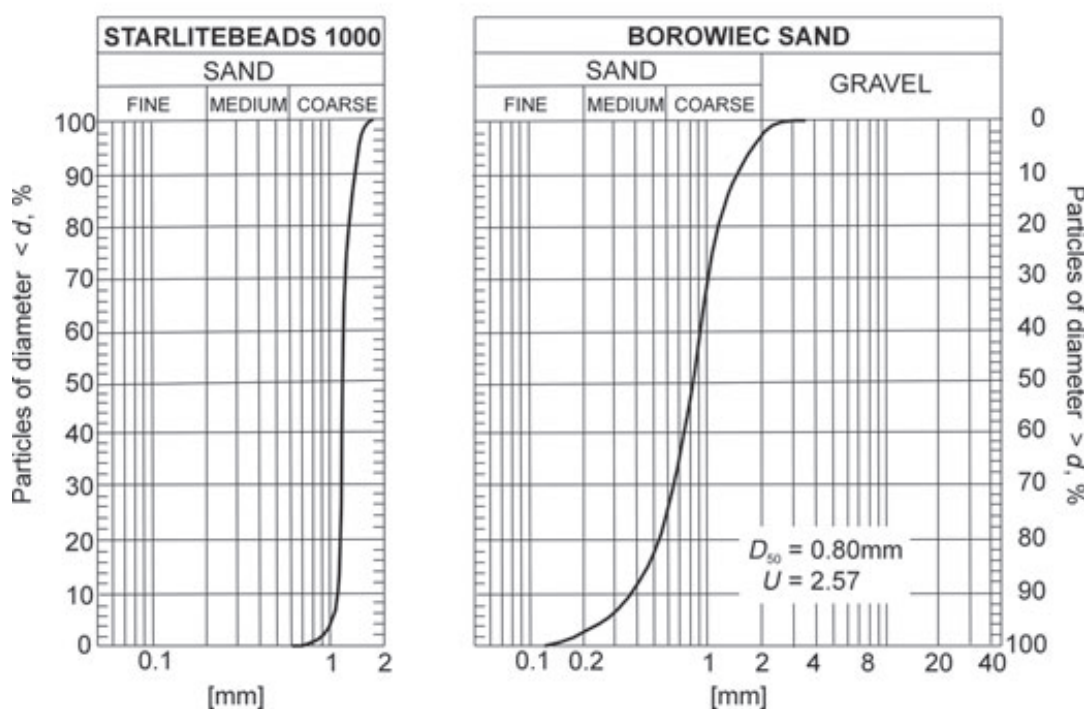
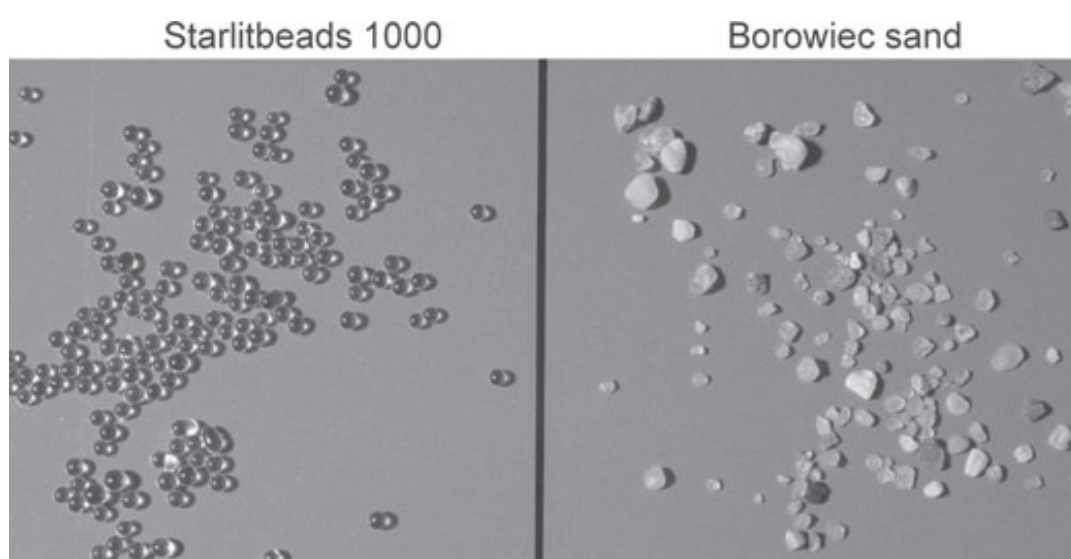
3.2. Materiały

3.2.1. Materiały ziarniste

W większości badań modelowych, których wyniki opracowano w rozprawie, jako gruntu modelowego użyto granulek szklanych Starlitbeads1000 o średnicach z przedziału 0.8 – 1.2 mm i krzywej przesiewu zamieszczonej na Rys.3.3, na którym również pokazano wygląd granulek. Zmierzony dla nich w aparacie bezpośredniego ścinania oraz aparacie trójosiowego ściskania kąt tarcia wewnętrzznego mieścił się w przedziale $27^{\circ} - 34^{\circ}$. Były one wykonane ze szkła sodowego o współczynniku załamania światła równym 1.54.

Tabela 3.1. Parametry materiałowe granulek Starlitbeads1000 i piasku Borowiec

	Średnica d_{50}	Wskaźnik różnoziarnistości U	Ciężar objętościowy szkieletu gruntowego γ_d (kN/m^3)	Stopień zagęszczenia I_D
Granulki szklane w stanie początkowo zagęszczonym	1,1	1,1	16,80	0,80
Piasek Borowiec w stanie początkowo zagęszczonym	0,8	5	17,10	0,72
Piasek Borowiec w stanie początkowo luźnym	0,8	5	15,75	0,19



Rys.3.3. Widok ziaren i krzywe przesiewu badanych materiałów ziarnistych.

Pozostałą część badań modelowych wykonano na rzeczywistym piasku (tzw. piasku Borowiec, Leśniewska et. al, 2012), którego ziarna ($d_{50} = 0.8\text{mm}$) i krzywą przesiewu również pokazano na Rys.3.3. Wybrane parametry obu materiałów zebrano w Tabeli 1.

Jak widać z Rys.3.3, granulki szklane mają kształt zbliżony do kulistego i tworzą zbiór o wiele bardziej jednolity pod względem wymiaru i kształtu, niż ziarna piasku.

3.2.2. Ciecz immersyjna

We wszystkich (za wyjątkiem jednego) badaniach modelowych na granulkach szklanych zastosowano wypełnienie porów ośrodka cieczą immersyjną: olejkiem goździkowym o współczynniku załamania światła równym 1.53, bliskim współczynnikowi załamania szkła, z którego wykonano granulki szklane.

3.3. Przebieg badania modelowego

Typowe badanie modelowe składało się z następujących etapów:

1. formowanie próbki przez sypanie,
2. napełnianie modelu cieczą immersyjną,
3. nałożenie elementów obciążających,
4. połączenie elementów z głowicą obciążającą, przez którą zadawane jest ciśnienie przy pomocy pompy hydraulicznej,
5. obciążanie modelu (zakres obciążeń – 0-4.0 MPa, minimalny przyrost obciążenia 0.2 MPa)
6. przemieszczanie ścianki za pomocą obrotu śruby podtrzymującej,
7. rejestracja poszczególnych etapów doświadczenia aparatem cyfrowym, w świetle zwykłym i spolaryzowanym.

Tabela 3.2. Zestawienie analizowanych badań modelowych

Nr testu	Obciążenie p [MPa]	Przemieszczenie Całkowite d [mm]	Liczba kroków w teście	Wysokość ścianki H [mm] i stosunek d/H [%]	Materiały	Liczba zdjęć w świetle spolaryzowanym	Liczba zdjęć w świetle niespolaryzowanym	Uwagi
Test 1	0,00-2,00	0,000	10	180	gs+o	11	11	
Test 2	0,00-1,60-0,00	1,250	26 0,125mm	180 <i>0,0069</i>	gs+o	27	27	
Test 3	0,00-1,60-0,00	1,250	31 0,0625mm	180 <i>0,0069</i>	gs+o	32	32	
Test 4	0,00-1,60	3,4375	63 0,0625mm	180 <i>0,0191</i>	gs+o	64	64	
Test 5	0,00-1,60-0,80-1,60	1,3750	34 0,0625mm	180 <i>0,0076</i>	gs+o	35	35	
Test 6	0,00-3,20	1,0625	25 0,0625mm	180 <i>0,0059</i>	gs+o	26	26	Pęknięcie szyby
Test 7	0,00-3,20	0,4375	16 0,0625mm	15,5 <i>0,0024</i>	gs+o	17	17	Pęknięcie szyby
Test 8	0,00-2,40	7,625	67 0,125mm	180 <i>0,0424</i>	gs+o	68	68	
Test 9	0,00-0,40	3,3750	56 0,0625mm	180 <i>0,0187</i>	gs+o	58	58	
Test 10	0,00-3,60	1,500	22 0,125mm	180 <i>0,0083</i>	gs+o	23	23	Pęknięcie szyby
Test 11	0,00-3,20-1,60	5,875	61 0,125mm	180 <i>0,0326</i>	gs+o	62	62	
Test 12	0,00-3,20-1,60	2,5625	65 0,0625mm	180 <i>0,0142</i>	gs+o	66	66	
Test 13	0,00	6,1250	98 0,0625mm	180 <i>0,0340</i>	gs	99	99	
Test 14	0,00-0,40	8,9375	145 0,0625mm	180 <i>0,0496</i>	pB-luz	146	146	
Test 15	0,00	8,500	136 0,0625mm	180 <i>0,0472</i>	pB-zag	137	137	
Test 16	0,00	7,500	120 0,0625mm	180 <i>0,0417</i>	pB-luz	121	121	

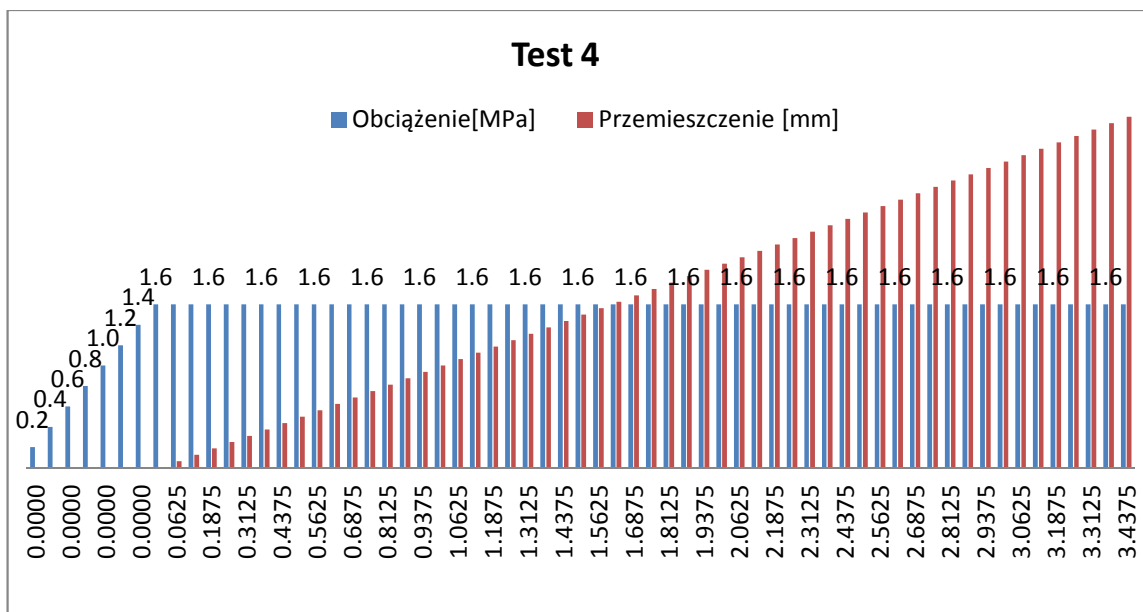
Objaśnienia do kolumny *Materiały*:

gs+o – granulki szklane z olejkim goździkowym

gs – granulki szklane

pB-luz – piasek Borowiec w stanie luźnym

pB-zag – piasek Borowiec w stanie zagęszczonym



Rys.3.4. Przykładowy przebieg badania modelowego

Przebieg każdego z analizowanych badań przedstawiono w postaci grafów słupkowych (Rys.3.4), z których jeden reprezentuje poziom obciążenia w MPa (słupki niebieskie), a drugi całkowite przemieszczenie ścianki na danym etapie doświadczenia (słupki czerwone). Tak więc na osi pionowej odłożona jest jednocześnie wartość obciążenia i skumulowana wartość przemieszczenia ścianki, natomiast na osi poziomej kolejne kroki badania, reprezentowane początkowo przez liczbę przyrostów obciążenia modelu, a następnie przez liczbę przyrostów przemieszczenia ścianki. Rys.3.4 przedstawia typowy dla większości analizowanych badań przebieg: stopniowe (krokami o wartości 0.2 MPa) nakładanie obciążenia zewnętrznego przy utwierdzonej ściance, aż do osiągnięcia założonej końcowej wartości obciążenia (utrzymywanej do końca badania), a następnie zadawanie przyrostów przemieszczenia ścianki aż do osiągnięcia jego maksymalnej założonej wartości (w niektórych przypadkach założone maksymalne przemieszczenia nie zostały osiągnięte z powodu pęknięcia szyby stanowiącej ściankę stanowiska pomiarowego, Tabela 3.2). Analogiczne do Rys.3.4 grafy pokazujące przebieg pozostałych analizowanych w pracy badań zamieszczono w Załączniku 2.

Podstawowe informacje na temat wszystkich badań zebrano w Tabeli 3.2. Dwanaście testów (Test1 – Test12) przeprowadzono na jednorodnym optycznie ośrodku modelowym, złożonym z granulek szklanych, którego pory wypełnione były cieczą immersyjną, w warunkach ze swobodnym odpływem. W teście 13 (T13) nie użyto cieczy immersyjnej – doświadczenie wykonano na suchych granulkach szklanych, natomiast testy 14-16 (Test14 – Test16) wykonano na piasku grubym (piasek Borowiec).

4. CHARAKTERYSTYKA WYNIKÓW

4.1. Wyniki otrzymane bezpośrednio z badań modelowych

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

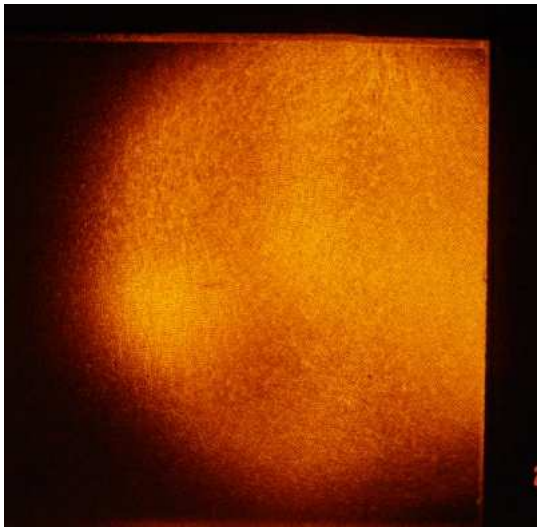
Zdjęcia wykonywane były za pomocą standardowego aparatu cyfrowego SonyCybershot o rozdzielczości 2560x1920 pixeli, w formacie *.jpg*. W trakcie badań wypróbowano kilka odległości aparatu od modelu (Leśniewska i Muir Wood, 2009), w związku z czym ilość pikseli przypadających na 1mm modelu wynosiła od 9 do 13, co oznacza, że jedno ziarno badanego ośrodka było reprezentowane w przybliżeniu przez 50 – 150 pikseli.

Na Rys.4.1 przedstawiono dwie pary oryginalnych zdjęć, reprezentujących pojedynczy przyrost przemieszczenia ścianki, wynoszący 0.125mm, otrzymane w świetle spolaryzowanym (Rys.4.1A) i niespolaryzowanym (Rys.4.1B). Kolisty cień z lewej strony zdjęć w świetle spolaryzowanym wskazuje granicę obszaru oświetlonego przez lampę sodową w polaryskopie. Jak widać na Rys.4.1, gołym okiem trudno jest dostrzec na zdjęciach zmiany, wywołane w ośrodku ziarnistym jednostkowym przemieszczeniem ścianki, dlatego tego rodzaju zdjęcia stanowią jedynie surowy materiał, wymagający dalszej specjalistycznej analizy, zwłaszcza w przypadku zdjęć przeznaczonych do określenia pola deformacji materiału, wykonanych w świetle niespolaryzowanym. Pełny zapis przebiegu dwóch wybranych testów (Test 5 i Test 12), zarejestrowanych w świetle zwykłym i spolaryzowanym zamieszczono w Załączniku 1.

Nieco inaczej przedstawia się sytuacja w przypadku zdjęć przeznaczonych do rejestracji pola sił (naprężeń) w ośrodku sypkim – w pewnych warunkach mogą one być wykorzystane w sposób bezpośredni, bez specjalnej obróbki. Widać to na przykładzie Rys.4.2 i 4.3, które stanowią zapis sześciu etapów badania modelowego, polegającego na odsuwaniu w kierunku ‘od gruntu’ (w prawo) sztywnej ścianki.

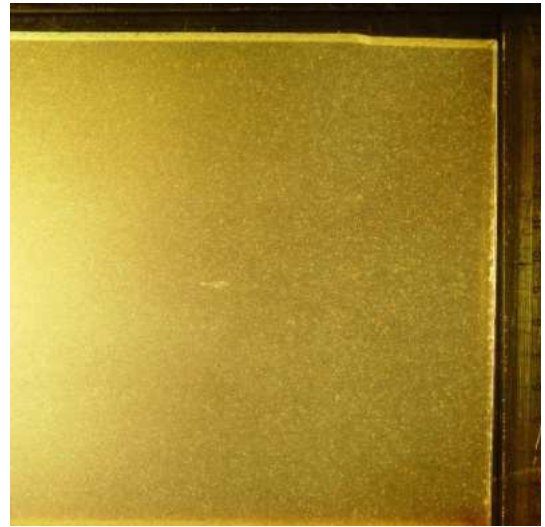
A. Zdjęcia w świetle niespolaryzowanym

zdjęcie nr 0034



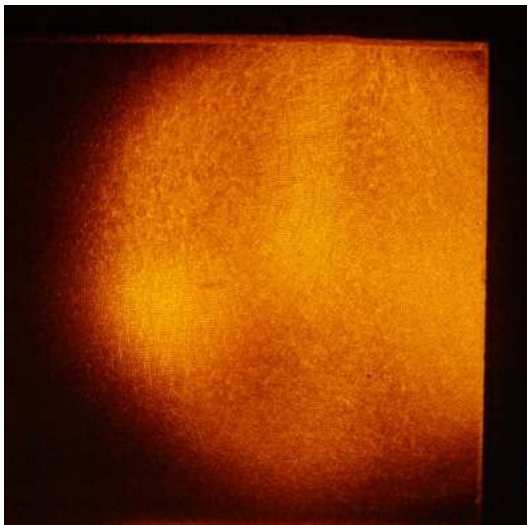
B. Zdjęcia w świetle niespolaryzowanym

zdjęcie nr 0035



d=0,500 mm; p=3,0 MPa

zdjęcie nr 0037



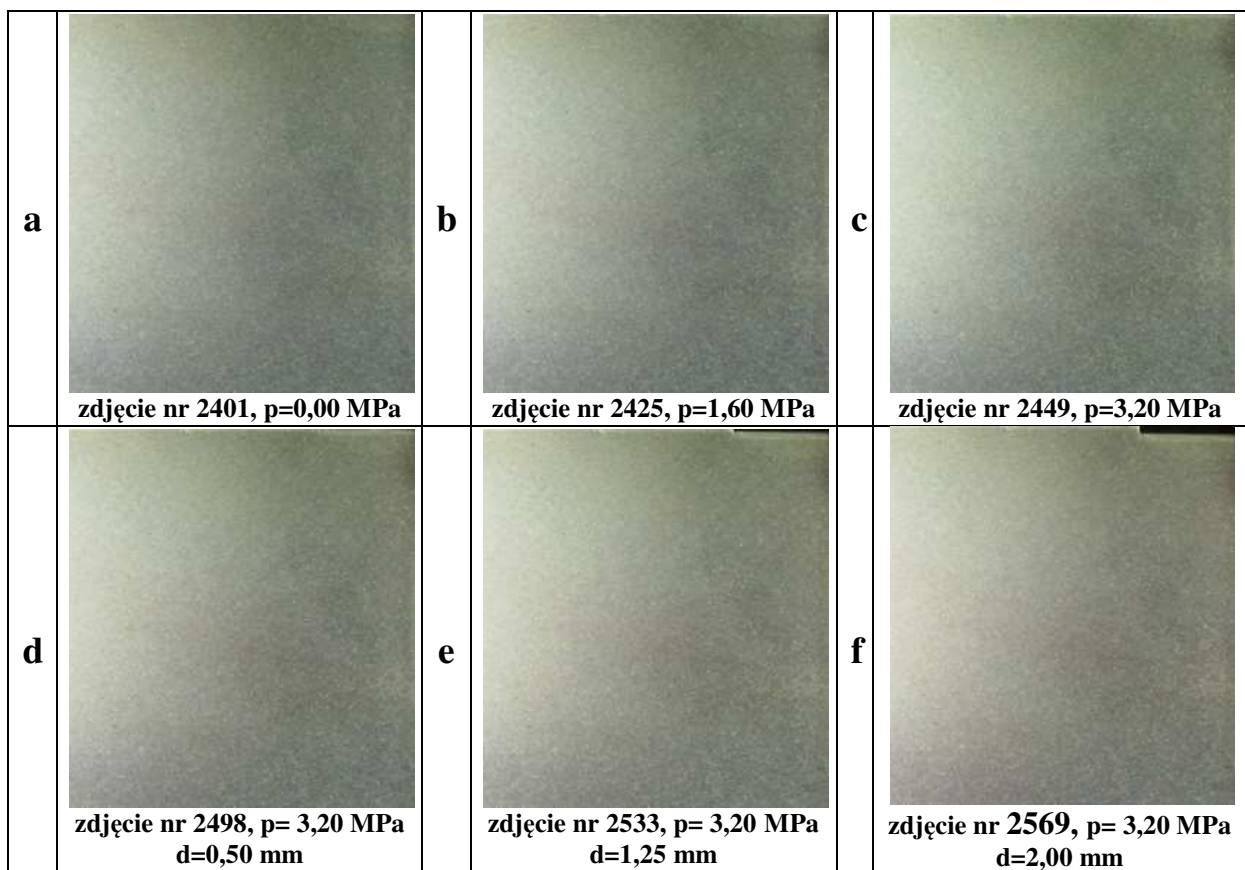
zdjęcie nr 0038



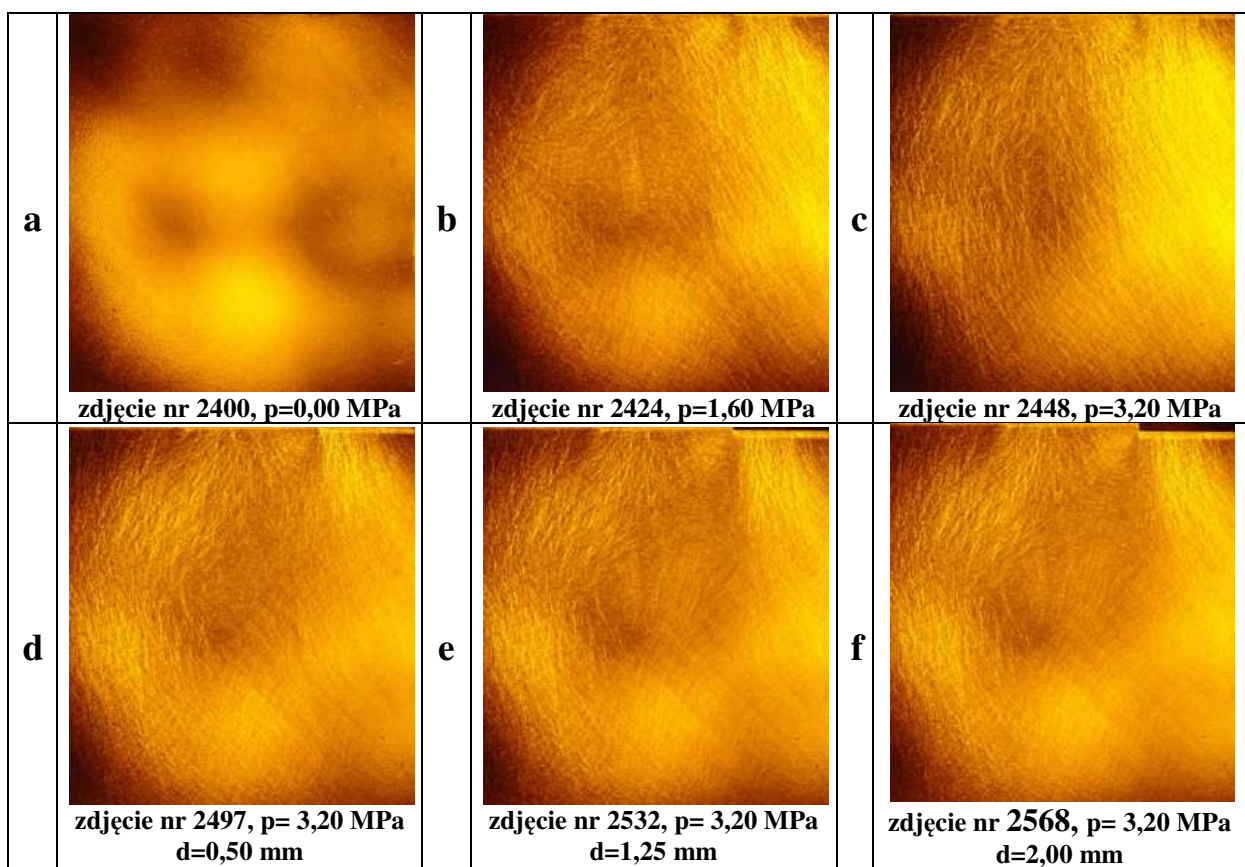
d=0,625 mm; p=3,0 MPa

Rys.4.1. Przykład oryginalnych zdjęć, zarejestrowanych na początku i końcu przyrostu przemieszczenia ścianki, a,b) fotografia w świetle niespolaryzowanym, c,d) fotografia w świetle spolaryzowanym

Rys.4.2 zawiera zdjęcia wykonane w świetle zwykłym (niespolaryzowanym), a Rys.4.3 odpowiadające tym samym etapom doświadczenia zdjęcia wykonane w świetle spolaryzowanym – tym razem widoczna jest na nich wyraźna struktura utworzona przez ‘łańcuchy obciążonych ziaren’, wyłaniająca się w miarę wzrostu obciążenia.



Rys.4.2. Fragment Testu 12 (Tabela 3.2, Załącznik 2), zarejestrowany w świetle zwykłym (niespolaryzowanym).



Rys.4.3. Fragment Testu 12 (Tabela 3.2, Załącznik 2), zarejestrowany w świetle kołowo spolaryzowanym.

Łańcuchy te, przypominające podobne, otrzymane w klasycznych pracach Wakabayashi i Dreschera dla pokruszonego szkła (Wakabayashi, 1957, Drescher, 1976) są wyraźnie widoczne, kiedy do budowy modelu używa się granulek odpuszczonych termicznie. Jednak w takim przypadku uzyskuje się mniej wyraźną teksturę zdjęć w świetle białym (niespolaryzowanym), Rys.4.2, co utrudnia późniejszą analizę deformacji metodą PIV (DIC). Po raz pierwszy łańcuchy obciążonych ziaren w ośrodku zbudowanym ze sferoidalnych granulek szklanych zaobserwowali Muir Wood i Leśniewska (2010).

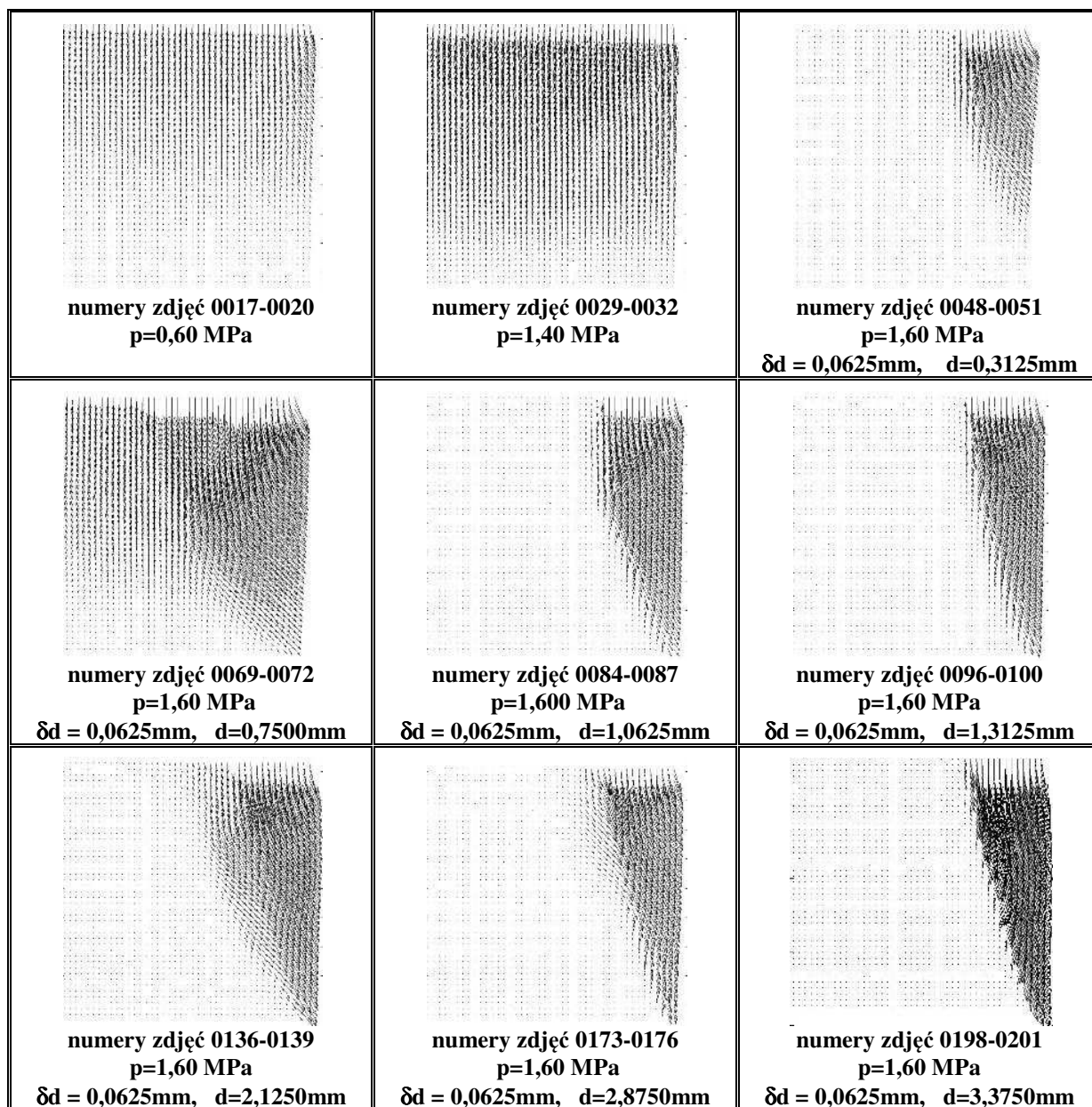
Na Rys.4.3a można zauważyć, że szyby stanowiące przednią i tylną ścianę modelu posiadały naprężenia własne, które można 'usunąć', traktując ten obraz jako tło i odejmując go od następnych zdjęć. Pozostałe zdjęcia, zwłaszcza Rys.4.3b-f, pokazują, że zmiany w układzie łańcuchów obciążonych ziaren, zachodzące pod wpływem przemieszczeń ścianki są, jak poprzednio, trudno dostrzegalne gołym okiem, a więc dla ich wyodrębnienia potrzebna jest również cyfrowa obróbka obrazu.

4.2. Wyniki badań modelowych po obróbce cyfrowej

4.2.1. Zdjęcia w świetle zwykłym (niespolaryzowanym)

Próbne zdjęcia rejestrujące przebieg pierwszych badań modelowych w świetle zwykłym wykazały, że ich rozdzielczość oraz tekstura spełniają wymagania metody cyfrowej korelacji obrazów PIV (DIC).

Zasadniczym efektem prawidłowo przeprowadzonej analizy obrazu metodą PIV (DIC) jest pole przemieszczeń wynikające z porównania dwóch obrazów odpowiadających kolejnym stadiom testu (Rys.4.4 pokazuje przykłady pola przemieszczeń odpowiadające wybranym krokom Testu 4, Tabela 3.2). Istotne dla prawidłowości analizy PIV jest, aby różnica przemieszczeń odpowiadająca obu porównywanym obrazom nie była zbyt duża – w przypadku dużych przemieszczeń elementy obrazu w obszarach skumulowanej deformacji odkształcają się tak bardzo, że mogą nie zostać prawidłowo rozpoznane przez program do analizy obrazu (w tym przypadku geoPIV). Znając pole przemieszczeń można policzyć pola odkształceń, posługując się np. procedurą obliczeniową stosowaną w metodzie elementów skończonych, opisaną i zaimplementowaną przez White'a i Take'a do programu geoPIV (White et al., 2002), W literaturze, ze względów praktycznych, najczęściej poszukuje się pól odkształceń postaciowych ϵ_p i objętościowych ϵ_v , zdefiniowanych zależnościami (4.1) i (4.2):



Rys.4.4. Pole przemieszczeń dla kilku wybranych kroków Testu 4 (Tabela 3.2, Załącznik 2).

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \quad (4.1)$$

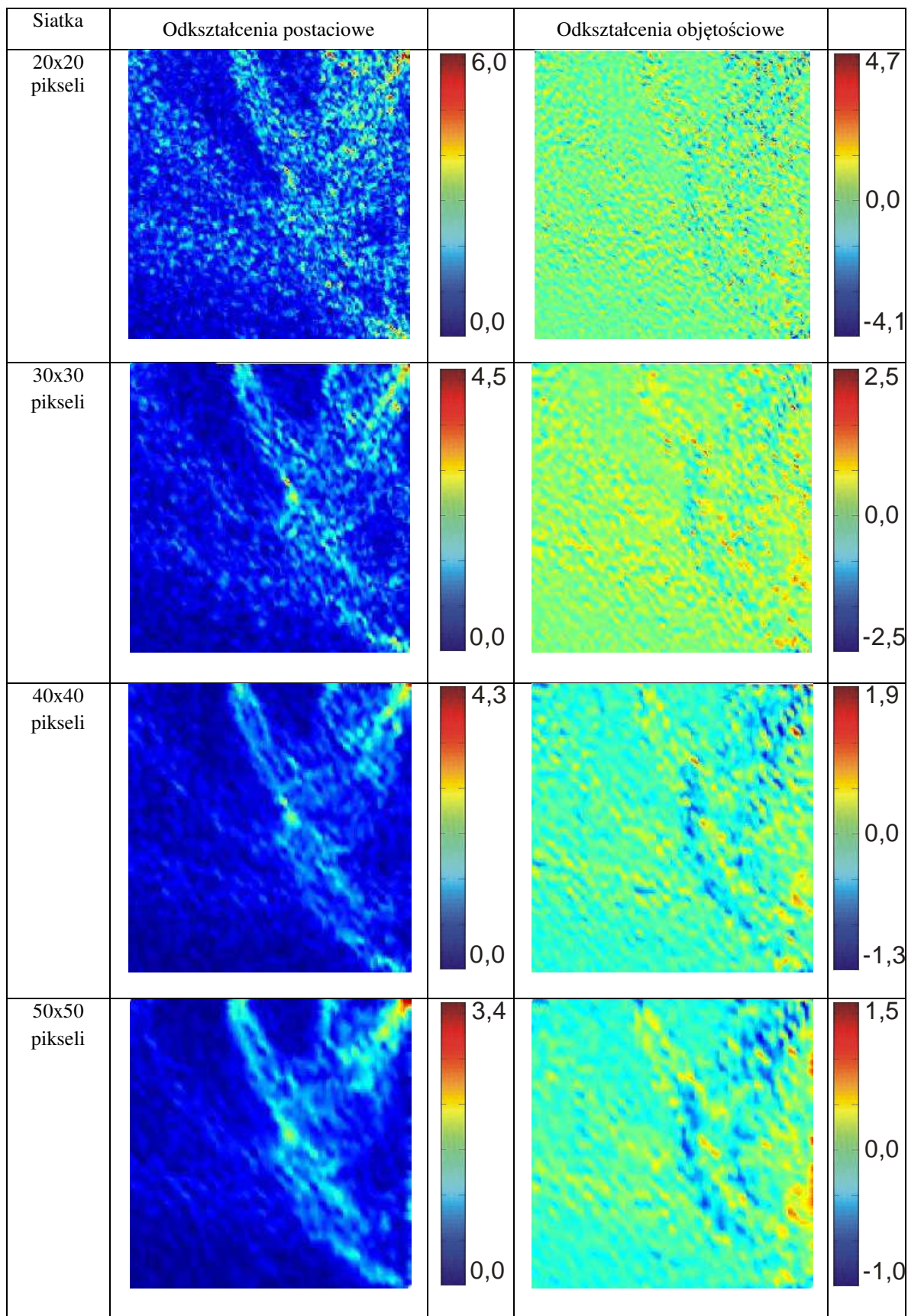
$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z, \quad \text{gdzie } \varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (4.2)$$

Przed obliczeniem odkształceń trzeba jednak pamiętać, że muszą być one wyznaczone z mającego sens fizyczny pola przemieszczeń. Warunkiem otrzymania poprawnego pola przemieszczeń jest natomiast właściwy podział obrazu na elementy – ich rozmiar nie może być ani zbyt mały (nie zostaną rozpoznane z powodu niewystarczającej ilości zawartej w nich

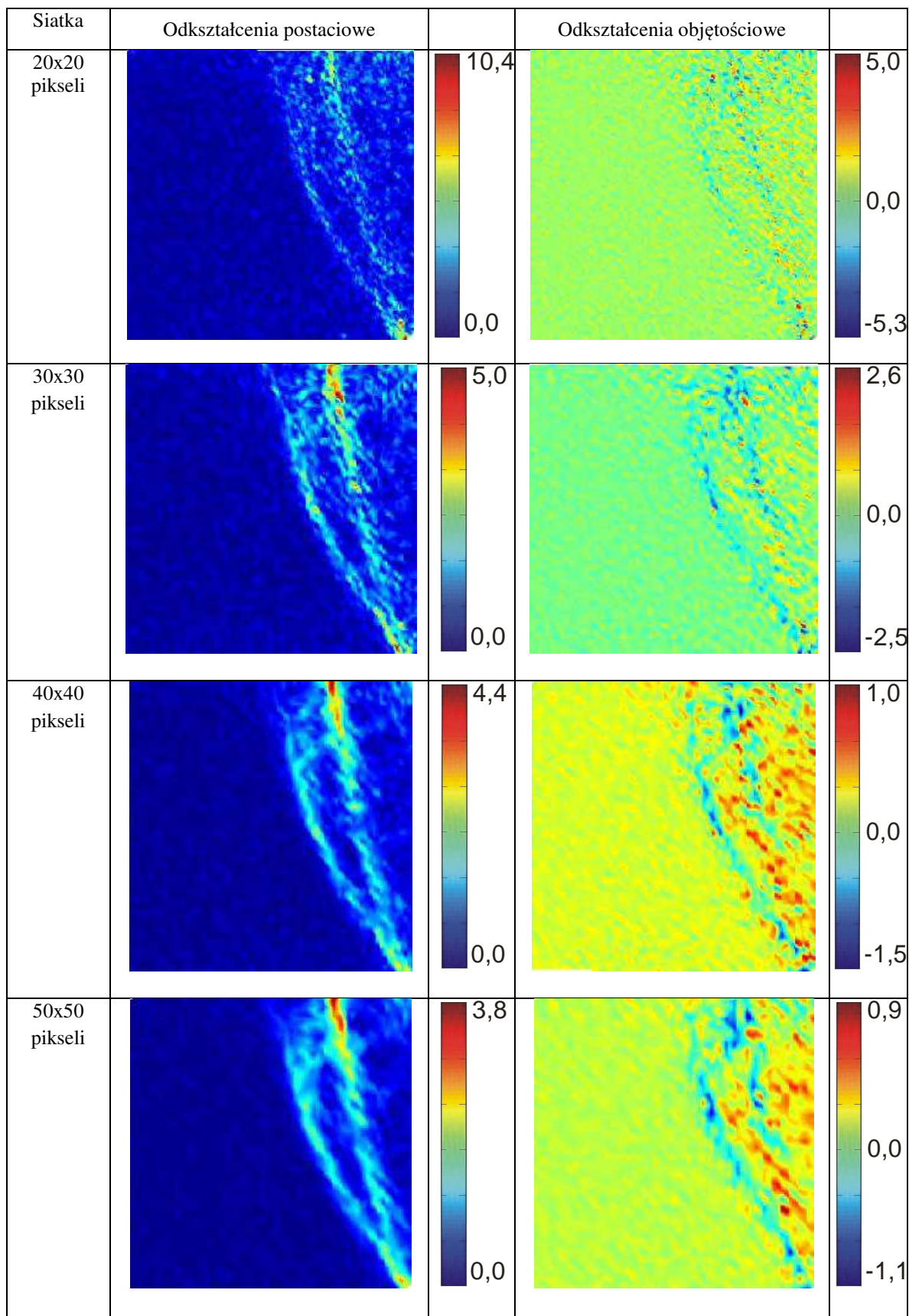
informacji wizualnej) ani zbyt duży - zostaną rozpoznane, ale spowodują zbyt duże lokalne uśrednienie pola przemieszczeń w obszarach zlokalizowanej deformacji (Leśniewska i Muir Wood, 2009, 2010). W związku z tym pierwszym krokiem w analizie deformacji metodą cyfrowej korelacji obrazu jest dobór (metodą prób i błędów) wymiaru podstawowego elementu podziału obrazu.

Ponieważ celem pracy jest analiza pól odkształceń, optymalny rozmiar elementu podziału zdjęcia został ustalony nie na podstawie pól przemieszczeń, ale w oparciu o obliczone z nich pola odkształceń postaciowych i objętościowych. Kryterium doboru rozmiaru elementów było uzyskanie wystarczającej ciągłości pola odkształceń przy zachowaniu odpowiedniego poziomu jego szczegółowości. Procedura poszukiwania siatki podziału przebiegała analogicznie do procedury oceny zbieżności rozwiązania (*convergence study*) w metodzie elementów skończonych, w sposób zilustrowany na Rys.4.5-4.7. Polegała ona na wykonaniu analizy jednego kroku wybranego z trzech różnych badań modelowych (Test 4) przy zastosowaniu czterech podziałów zdjęcia: siatką zbudowaną z kwadratów o wymiarach 20x20 pikseli (element pokrywający w przybliżeniu obszar 2x2 średnich ziaren), 30x30 pikseli (~3x3 ziarna), 40x40 pikseli (~4x4 ziarna) i 50x50 pikseli (~5x5 ziaren). Rys.4.5-4.7 pokazują mapy przyrostów odkształceń postaciowych ϵ_p i objętościowych ϵ_v , wywołanych pojedynczym przemieszczeniem modelowej ściany oporowej, otrzymane dla tych czterech podziałów. Jak widać, niezależnie od zastosowanego podziału obrazu na elementy, we wszystkich przypadkach dobrze widoczna jest lokalizacja odkształceń (zarówno postaciowych, jak objętościowych) w pasmach o skończonej szerokości. Układ tych pasm nie zależy od podziału zdjęcia, ale jego obraz wydaje się najbardziej 'ostry' w przypadku podziału na elementy o wymiarach 40x40 pikseli i właśnie ten podział został zastosowany do analizy badań modelowych w dalszej części pracy. Taka pełna (obejmująca każdy krok) analiza została wykonana dla wszystkich testów wymienionych w Tabeli 3.2 (razem przeanalizowano około 1000 zdjęć, co daje kilkakrotnie więcej par analizowanych przy użyciu różnych siatek).

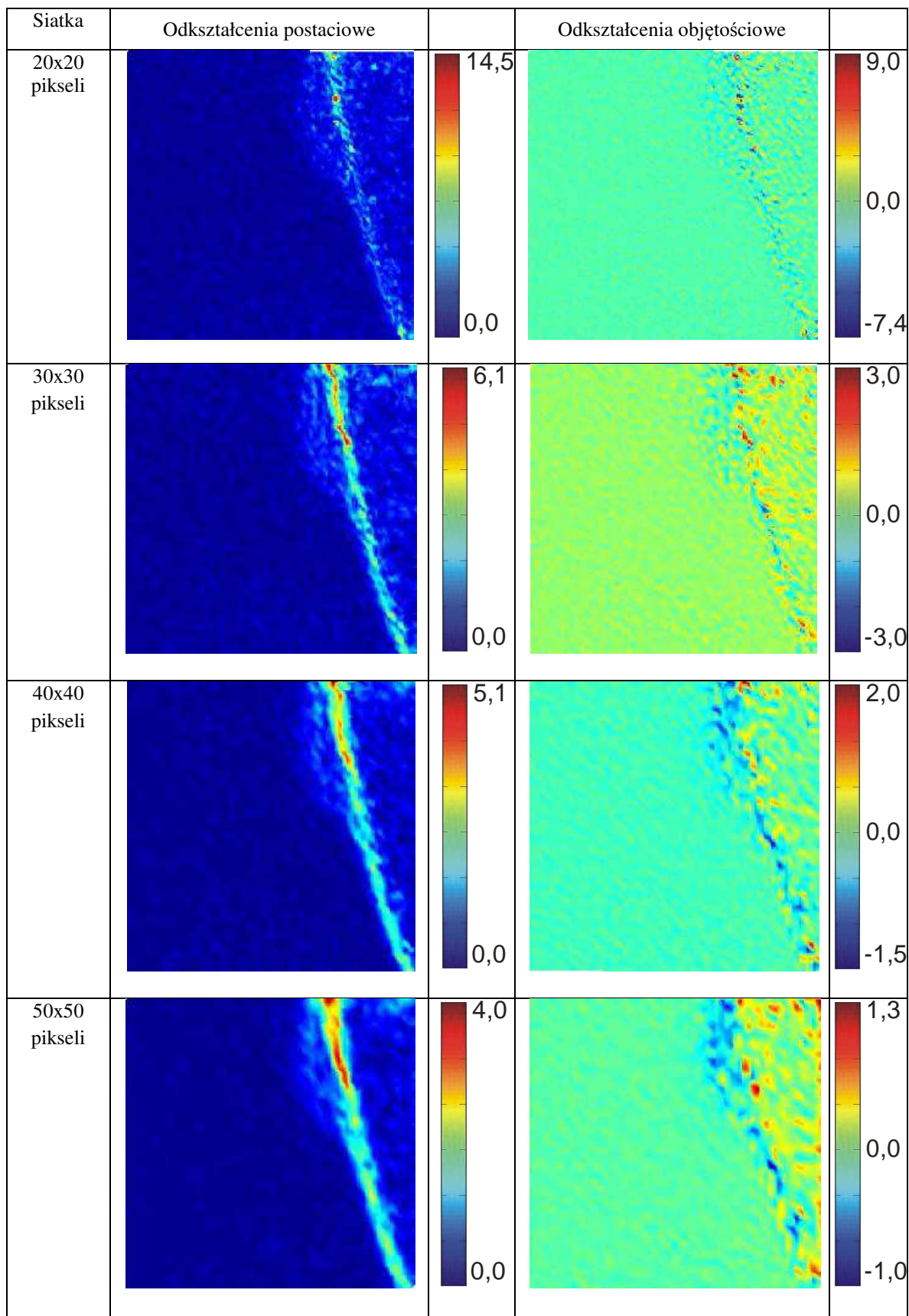
Wyniki analizy (mapy odkształceń postaciowych i objętościowych) dla siatki podstawowej (40x40) zamieszczono w Załączniku 2 (Tabele Z1-Z16). Ostatnią pozycję każdej tabeli zajmują odkształcenia skumulowane (zsumowane dla wszystkich kroków składających się na dany test).



Rys.4.5. Test siatki podziału na podstawie zdjęć 0069-0072 z Testu 4.



Rys.4.6. Test siatki podziału na podstawie zdjęć 0139-0142 z Testu 4.



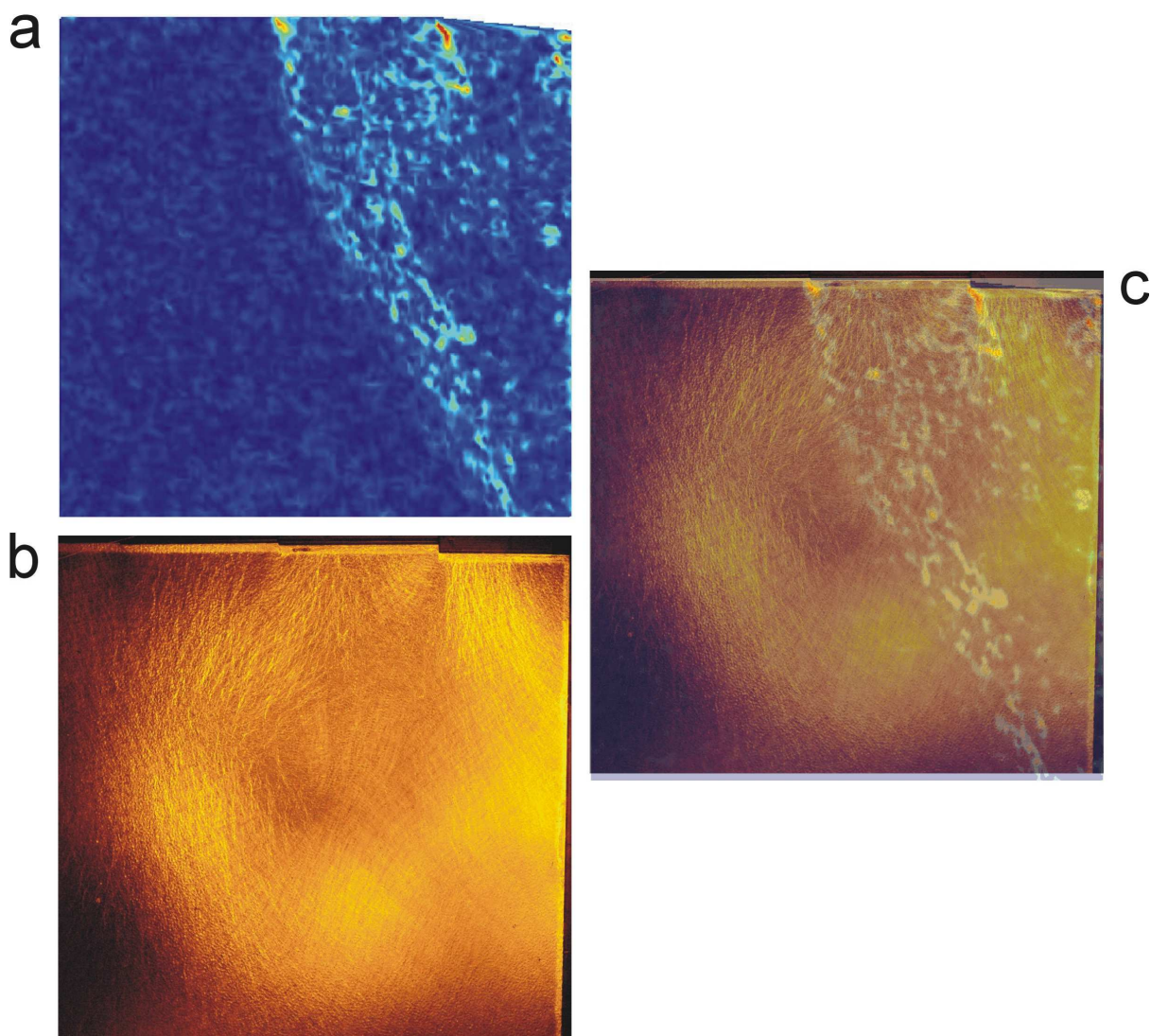
Rys.4.7. Test siatki podziału na podstawie zdjęć 0173-0176 z Testu 4.

Przemieszczenia postaciowe (ϵ_p) i objętościowe (ϵ_v) na Rys.4.5-4.7 i dalszych, zamieszczonych w tekście pracy i w Załączniku 2 (Tabele Z1-Z16) mają postać wyskalowanych map kolorów. Wielkość 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. Odkształcenia objętościowe mogą być różnych znaków: ujemne oznaczają wzrost objętości (dylatacja, rozciąganie), dodatnie spadek objętości (ściskanie), przy czym maksymalne rozciąganie jest ciemnoniebieskie, a maksymalne ściskanie czerwone. W ogólnym przypadku, dla danego kroku doświadczenia, maksymalne wartości ściskania i rozciągania nie są równe. Dla lepszej czytelności map odkształceń objętościowych przyjęto jednak na wykresach zamieszczonych w pracy równe granice wartości ściskania i rozciągania, tak, aby kolor zielony na rysunkach zawsze oznaczał brak zmian objętości.

4.2.2. Analiza zdjęć wykonanych w świetle spolaryzowanym

Jednym z celów pracy było znalezienie związków geometrycznych między polami odkształceń i naprężeń (sił działających między ziarnami) lub elementów wspólnych w tych polach. Aby to było możliwe, potrzebne jest opracowanie sposobu porównywania obu rodzajów pól, co, jak widać na Rys.4.8, może nastroić trudności przy posługiwaniu się oryginalnymi zdjęciami wykonanymi w świetle spolaryzowanym (Rys.4.8b, c).

Rys.4.8a pokazuje pole odkształceń postaciowych, otrzymane dla najmniejszego podziału obrazu siatką kwadratów (20x20), Rys.4.8b pole naprężeń całkowitych, składające się z łańcuchów obciążonych ziaren dla tego samego etapu doświadczenia, natomiast Rys.4.8c pole odkształceń nałożone na pole naprężeń. Jak wynika z tego rysunku, delikatna, ale bardzo rozbudowana struktura sieci 'łańcuchów obciążonych ziaren' w zestawieniu z bardziej, mimo drobnego podziału zdjęcia, zgrubnym obrazem przemieszczeń postaciowych, nie stwarza dobrych warunków do porównania. Leśniewska i Muir Wood (2009) oraz Muir Wood i Leśniewska (2010) zaproponowali wyodrębnienie z oryginalnych zdjęć wykonanych w świetle spolaryzowanym zmian efektu elastooptycznego, wywołanych przyrostem przemieszczenia ścianki za pomocą operacji arytmetycznych na obrazach cyfrowych, dostępnych w środowisku Matlab. Efekt jednej z takich operacji (w tym przypadku różnicy obrazów **1** i **2**, zamieszczonych na Rys.4.9a i b) jest pokazany (w powiększeniu) na Rys.4.9c.

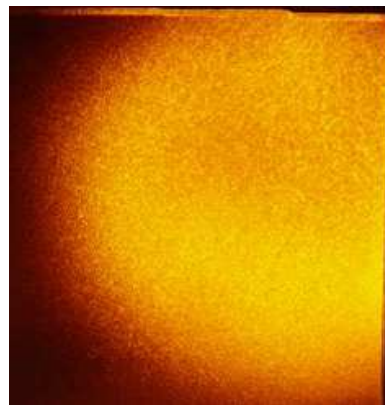


Rys.4.8. Przykład porównania pola odkształceń i pola naprężeń całkowitych dla granulek szklanych odpuszczonych termicznie: a) mapa odkształceń postaciowych, b) pole naprężeń całkowitych, widziane w świetle spolaryzowanym, reprezentowane przez łańcuchy obciążonych ziaren, c) nałożenie obu pól

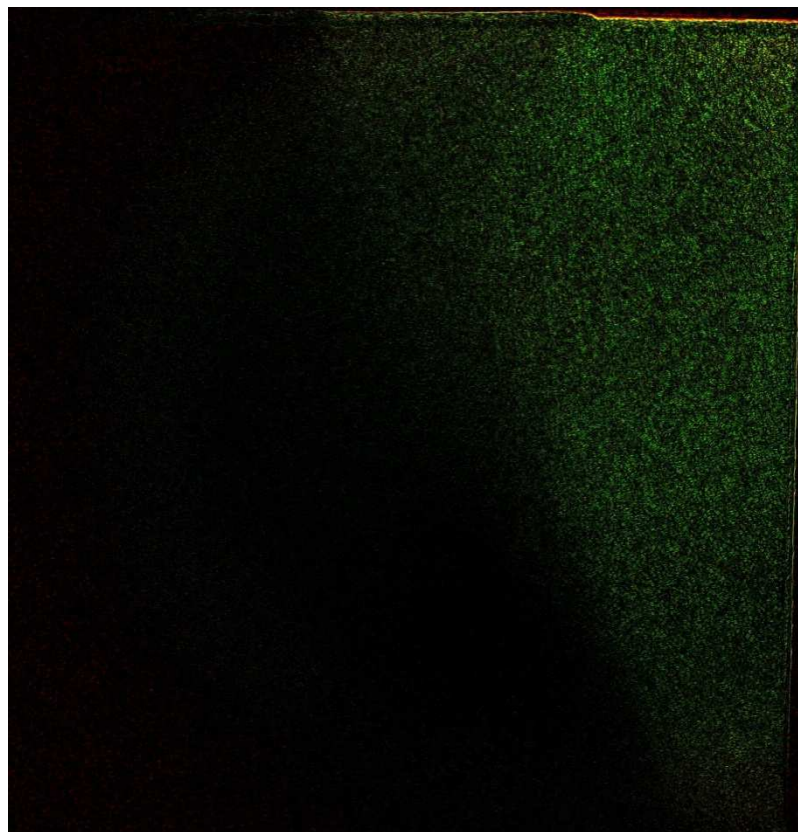
Gdyby obrazy **1** i **2** na Rys.4.9 były identyczne, w wyniku ich odjęcia otrzymalibyśmy obraz o tych samych rozmiarach, ale każdemu z pikseli przypisana zostałaby wartość 0, odpowiadająca kolorowi czernemu (w rezultacie uzyskalibyśmy obraz będący czarnym prostokątem). Obecność na Rys.4.9c kolorowych (w większości zielonych) pikseli oznacza zmianę intensywności efektu elastoptycznego, a więc lokalne zmiany jasności obrazu pod wpływem deformacji ośrodka. Wartość tych zmian jest dodatnia, a więc zgodnie z ustaleniami Muir Wood'a i Leśniewskiej (2010), odpowiada wzrostowi średniego naprężenia, czyli wzmocnieniu kontaktów między ziarnami (Rys.2.3, zdjęcia 5-10).



a) obraz 1



b) obraz 2



c) różnica obrazów 1 i 2 (2-1)

Rys.4.9. Efekt odjęcia dwóch obrazów, sfotografowanych w świetle spolaryzowanym i odpowiadających pojedynczemu przyrostowi poziomego przemieszczenia ścianki.

Jak widać na Rys.4.9c, położenie pikseli o zielonej barwie nie jest przypadkowe – wyraźnie wypełniają one obszar w kształcie klina, o dobrze znanej w mechanice gruntów geometrii (kąt nachylenia tego klina do pionu wynosi w przybliżeniu 27° co odpowiada, zgodnie z teorią Coulomba, kątowni tarcia wewnętrznej 36° , a więc wielkości bliskiej wartości kąta tarcia

wewnętrznego, wyznaczonej doświadczalnie w aparacie trójosiowego ściskania dla granulek szklanych Starlitbeads. Rys.4.9 tłumaczy w takim razie, dlaczego rzeczywisty mechanizm zniszczenia gruntu za murem oporowym polega na ruchu sztywnego klina – jego zwiększona sztywność jest związana z powstaniem silniejszych kontaktów między ziarnami. W dalszej części pracy do studiowania związków geometrycznych między polami odkształceń i naprężeń posłużą obrazy otrzymane w taki sam sposób, jak obraz z Rys.4.9c.

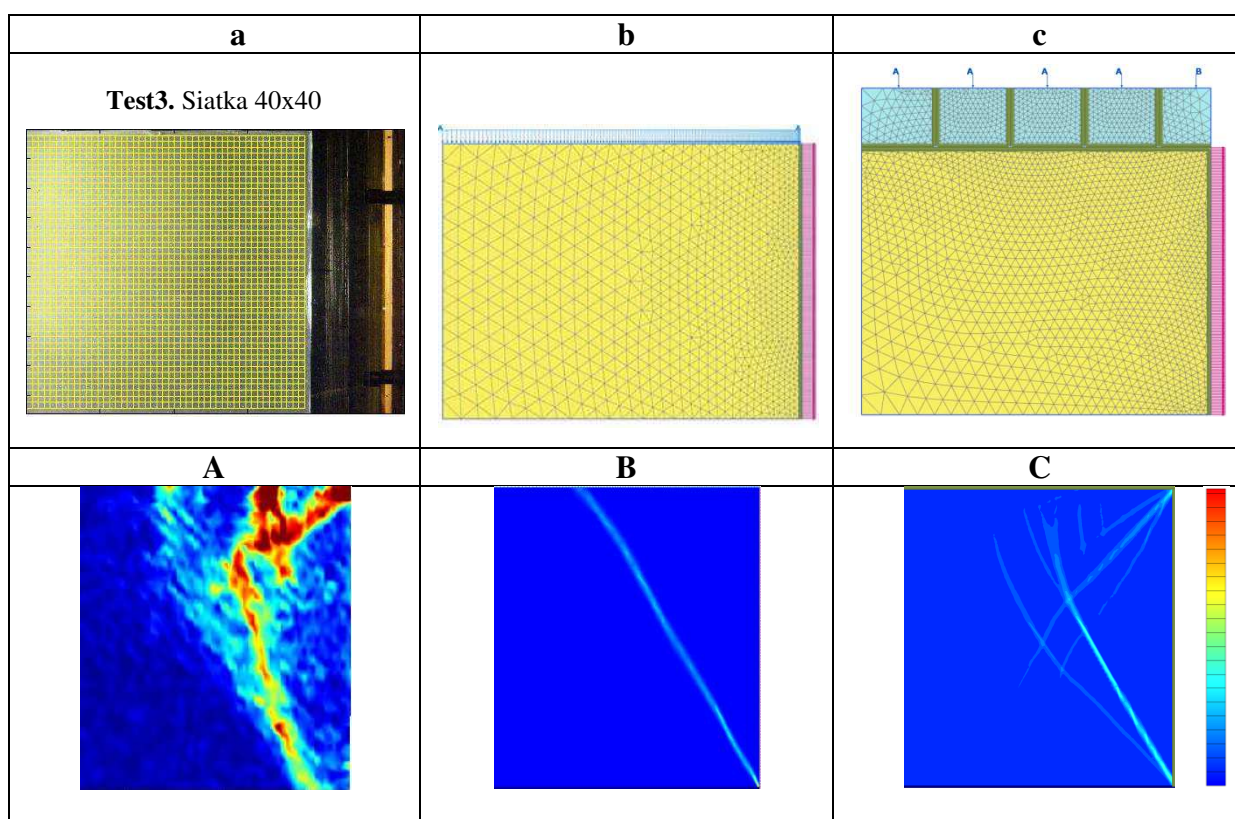
4.3. Symulacja badań modelowych przy użyciu metody elementów skończonych (program Plaxis)

W związku z koniecznością zastosowania w badaniach specyficznych warunków brzegowych – obciążenia zewnętrznego przekazywanego na model za pośrednictwem układu pięciu metalowych segmentów (Rys.3.1, Leśniewska i Muir Wood, 2009, Muir Wood i Leśniewska, 2010) powstał problem ich wpływu na pole deformacji. W związku z tym wykonano symulację badania modelowego dla dwóch sposobów przyłożenia obciążenia: jako obciążenie ciągłe (Rys.4.10b) oraz jako obciążenie skupione przyłożone do pięciu metalowych segmentów, tak, jak to miało miejsce w rzeczywistości (Rys.4.10c).

Rys.4.10b i c pokazuje podział modelu obliczeniowego na trójkątne elementy skończone (Plaxis Manual). Każdy z elementów zawiera w sumie 15 węzłów (3 zewnętrzne i 12 wewnętrznych). Gęstość podziału na elementy można porównać z podziałem stosowanym w analizie wyników doświadczenia metodą PIV (Rys.4.10a).

W obliczeniach przyjęto model Coulomba-Mohra. Ponieważ doświadczalnie wyznaczone kąty tarcia wewnętrznego mieściły się w przedziale 27° – 34° , obliczenia wykonano dla zakresu 25° – 40° . Ciężar objętościowy granulek przyjęto zgodnie z Tabelą 3.1.

Wartość modułu odkształcenia granulek szklanych przyjęto na podstawie testu trójosiowego ściskania (wynosił on 150 000 kPa). Dla segmentów obciążających założono sprężysty model materiału i przyjęto parametry dla stali, z której były wykonane.

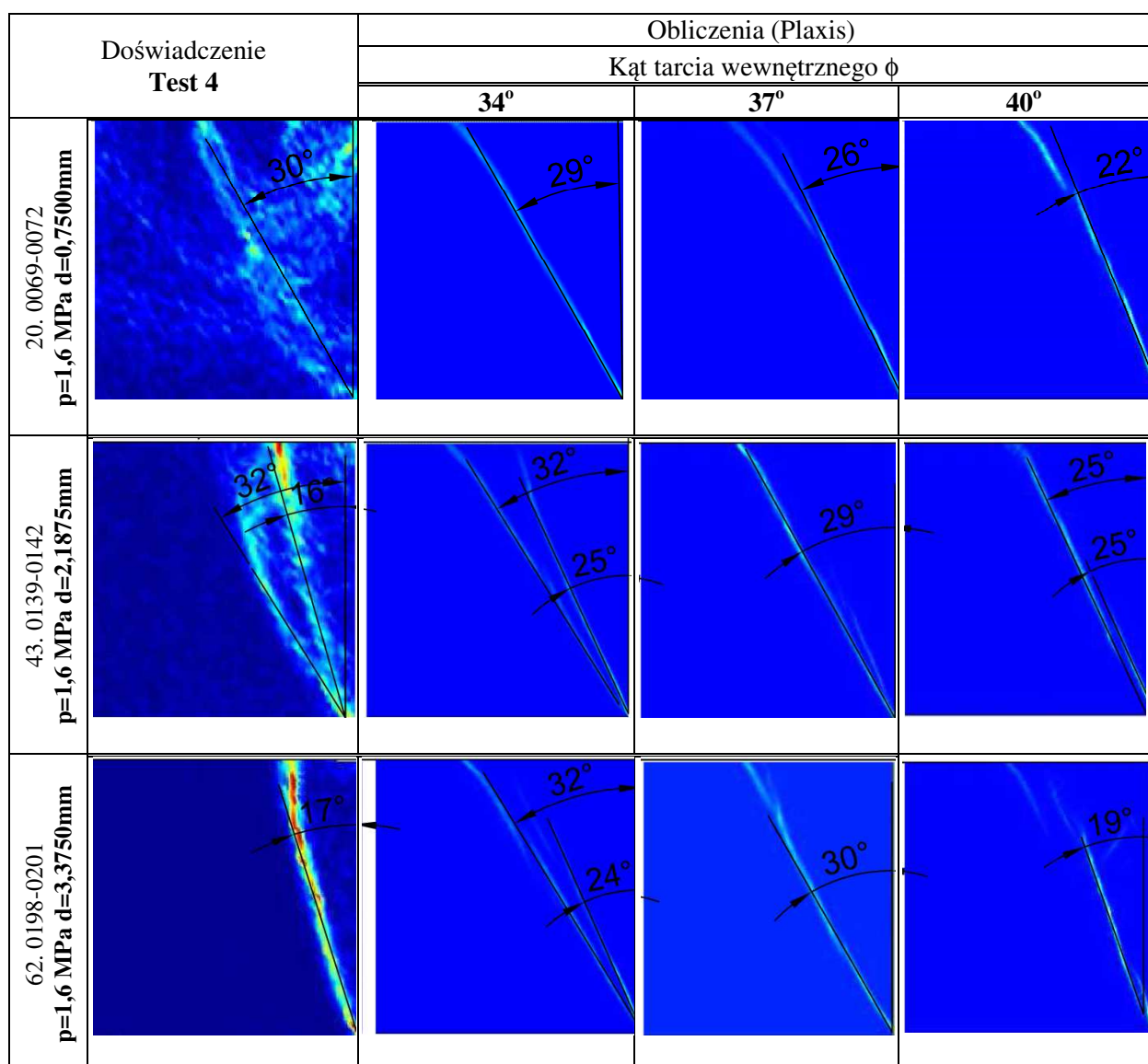


Rys.4.10. Przykład porównania doświadczonego i obliczonego metodą elementów skończonych pola odkształceń postaciowych: a) siatka używana w analizie doświadczenia metodą PIV, A) mapa odkształceń postaciowych otrzymana metodą PIV dla kroku 0269-0272 Testu 3, b) siatka elementów skończonych – obciążenie ciągłe, B) mapa przyrostów odkształceń postaciowych dla siatki z obciążeniem ciągłym, c) siatka elementów skończonych z rzeczywistym modelem systemu obciążającego, C) mapa przyrostów odkształceń postaciowych dla siatki c).

Do analizy w dalszej części pracy wybrano mapy przyrostów odkształceń postaciowych, które najlepiej wskazują lokalizacje odkształceń, jeżeli pojawiają się one w ośrodku. Przykłady takich map otrzymane dla obu pokazanych na Rys.4.10 sposobów obciążenia, pokazano na Rys.4.10B i C.

Z ich porównania można wyciągnąć wniosek, że obciążanie modelu systemem złożonym z segmentów sprzyja powstawaniu wielokrotnych lokalizacji odkształceń, a zwłaszcza pojawieniu się systemu przecinających się rodzin lokalizacji, tworzących dość regularną siatkę (Rys.4.10C).

Podobny układ lokalizacji odkształceń postaciowych odnaleziono dla jednego z etapów Testu 3 (Rys.4.10A) oraz Testu T2 (Załącznik 2).



Rys.4.11. Porównanie średniego nachylenia doświadczalnych i obliczeniowych (otrzymanych dla trzech wartości kąta tarcia wewnętrznego) lokalizacji odkształceń postaciowych

W związku z niepewnością wartości parametrów materiałowych ośrodka złożonego z granulek szklanych, zwłaszcza kąta tarcia wewnętrznego, wykorzystano również metodę elementów skończonych do oceny wpływu jego wartości na przebieg lokalizacji odkształceń, a dokładnie ich kąta nachylenia do pionu. Przykład takiej analizy dla trzech kroków Testu 4, z wykorzystaniem otrzymanych numerycznie map przyrostów odkształceń postaciowych, przedstawia Rys.4.11.

5. Dyskusja Wyników

Zasadniczym przedmiotem dyskusji zawartej w tym rozdziale są pola odkształceń (postaciowych i objętościowych), otrzymane w doświadczalnych badaniach modelowych za pomocą analizy obrazu (PIV). W odróżnieniu od wcześniejszych badań, znanych z literatury, w których badano końcowy efekt deformacji przy dużych przyrostach przemieszczeń ścianki (odkształcenia skumulowane), w pracy skoncentrowano się na dokładnym prześledzeniu procesu ewolucji pól deformacji, dlatego ich analizę przeprowadzono dla każdego kroku doświadczenia. Krok taki polegał albo na zadaniu przyrostu obciążenia zewnętrznego, albo przyrostu poziomego przemieszczenia modelu ściany oporowej w kierunku 'od gruntu' (Rys.3.1). Podstawowy przyrost przemieszczenia ścianki wynosił $\delta l = 0.0625\text{mm}$, czyli był o rząd wielkości mniejszy od średniej średnicy ziarna badanych materiałów ziarnistych. Stosunek tego przyrostu do wysokości ścianki wynosił w przybliżeniu 3.5×10^{-4} . Komplet pól odkształceń postaciowych i objętościowych otrzymanych metodą PIV dla wszystkich 16 analizowanych testów zamieszczono w Załączniku 2 w Tabelach Z-1-Z-16. We wszystkich przypadkach oprócz Testu 1, który polegał wyłącznie na obciążaniu modelu (bez przemieszczeń ścianki) zarówno pola odkształceń postaciowych, jak i objętościowych wykazują pewne podobieństwa, niezależnie od zastosowanego poziomu obciążenia, ale również pewne charakterystyczne różnice. Cechą wspólną jest na przykład pojawienie się poziomych lokalizacji odkształceń postaciowych i objętościowych w fazie czystego obciążania modelu oraz wyraźne linie poślizgu odcinające obszar materiału przylegający do przemieszczającej się ścianki, pojawiające się na niektórych etapach. Wspólna dla wszystkich badań wykonanych przy zastosowaniu minimalnego przemieszczenia ścianki jest również dobrze widoczna naprzemiennosc zachowania: momenty wystąpienia wyraźnej lokalizacji odkształceń przedzielone są krokami, w których odkształcenia są rozproszone, ale występują w obrębie wyznaczonego przez pasmo ścinania klina odłamu.

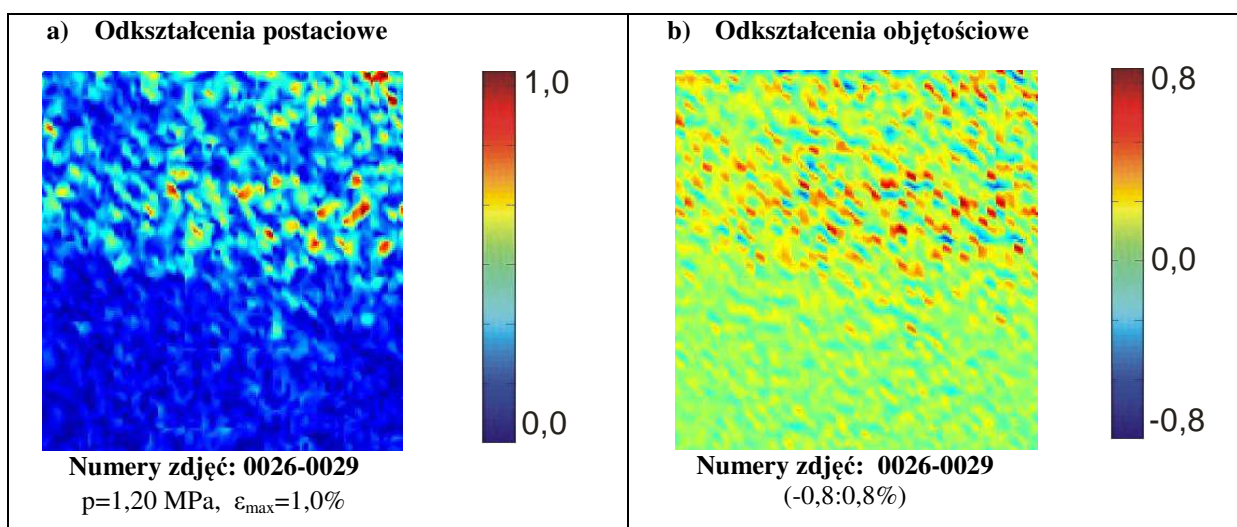
Taką naprzemiennosc (cykliczność) zachowania modelu widać bardzo wyraźnie w Teście 4 (Załącznik 2, Tabela Z-4A i B), dlatego zostanie on użyty do bardziej szczegółowego opisu charakterystycznych cech deformacji. Patrząc na pełny przebieg Testu 4 w Tabeli Z-4A i B można zauważyć, że przemieszczenie ścianki potrzebne do wystąpienia kolejnych epizodów zlokalizowanej deformacji wynosiło $3-4\delta l$, czyli około $0,25\text{mm}$ (a więc w przybliżeniu $\frac{1}{4}$ średniej średnicy ziarna).

5.1. Omówienie pól odkształceń na przykładzie Testu 4

Z pełnego przebiegu Testu 4, zamieszczonego w Tabeli Z-4A do szczegółowego omówienia wybrano pola przemieszczeń postaciowych i objętościowych, zamieszczone na Rys.5.1, 5.3-5.5, 5.7-5.9. Uzupełnione są one wybranymi polami przemieszczeń pochodzącymi z innych testów, które zestawiono na Rys.5.2, 5.6, 5.10, 5.12-5.13, i stanowią ilustrację kilku charakterystycznych procesów, zaobserwowanych w przebiegu praktycznie wszystkich doświadczeń. Należą do nich: reakcja na obciążenie zewnętrzne w fazie bez przemieszczeń ścianki, cykliczny charakter lokalizacji odkształceń, nałożony na schemat postępującego rozwoju deformacji oraz niecykliczne schematy lokalizacji.

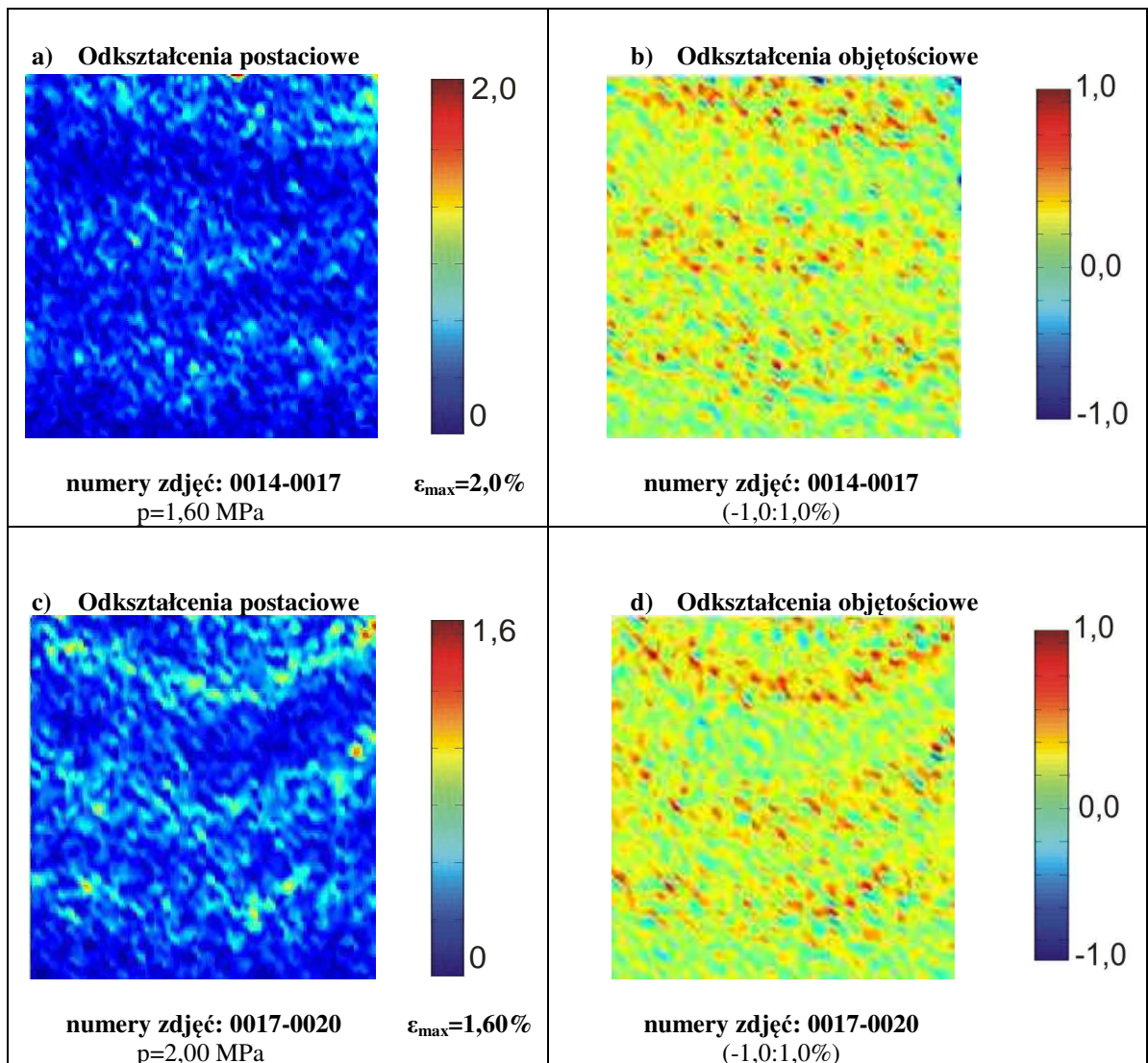
5.1.1. Wpływ obciążenia zewnętrznego na pole deformacji

W pierwszej fazie Testu 4 model stopniowo obciążano do wielkości 1,6 MPa, stosując przyrost równy 0,2 MPa, przy unieruchomionej ściance. W wyniku tego obciążenia, pomimo braku przemieszczeń ścianki, zaobserwowano lokalne rozproszone zmiany w polach odkształceń postaciowych i objętościowych, związane z zagęszczaniem się granulek pod obciążeniem (Rys.5.1). Jak widać na Rys.5.1a, mimo, że obciążanie polegało na jednoosiowym ścisaniu od góry, w badanym ośrodku pojawiły się lokalne odkształcenia postaciowe, co ma oczywisty związek z ziarnistą strukturą materiału. Struktura ta jest również odpowiedzialna za niewielką rozproszoną dylatację, którą można zauważyć na Rys.5.1b (kolor niebieski), mimo, że w skali makro próbka jest wyłącznie ściskana.



Rys.5.1. Etap początkowy: efekt nakładania obciążenia zewnętrznego

Jak widać na Rys.5.1b, przeważa jednak jej zagęszczanie (kolor żółty i czerwony), tak więc uśredniona reakcja próbki może być opisywana zgodnie z założeniami mechaniki ośrodków ciągłych. Badając analogiczne pola odkształceń dla pozostałych testów w fazie początkowego obciążania można było zaobserwować nie tylko ciągły obszar rozproszonej deformacji, jak na Rys.5.1, ale również wyraźne periodyczne pasma (Rys.5.2). W przypadku dobrze utwierdzonej ścianki były to pasma poziome - jak się okazało w trakcie analizy obrazu, w niektórych doświadczeniach początkowe utwierdzenie ścianki było zbyt słabe, co spowodowało jej niewielkie spontaniczne przemieszczenia w trakcie obciążania. W zaobserwowanych pasmach, jak widać na Rys.5.2b, przeważało zagęszczanie ośrodka (kolor żółty i czerwony), co sugeruje, że można by je sklasyfikować jako dobrze znane, m.in. z mechaniki skał, pasma zagęszczenia.

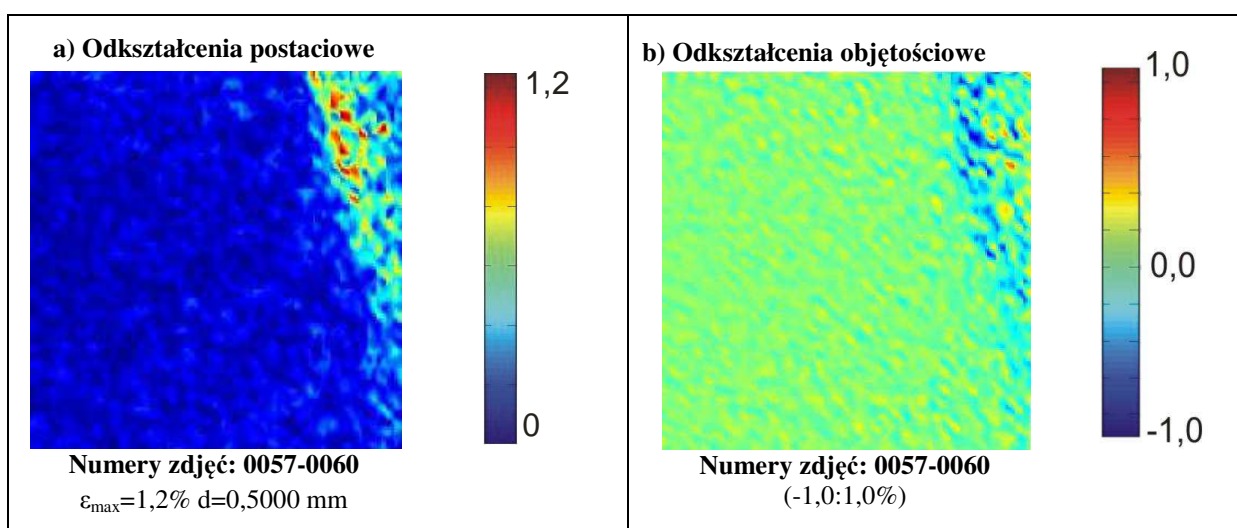


Rys.5.2. Przykłady podobnego zachowania się materiału w różnych testach: regularne pasma zagęszczania, widoczne na mapach odkształceń objętościowych (kolor czerwony – ściskanie) w trakcie wstępnego obciążania modelu: a, b) **Test 6**, c,d) **Test 7**.

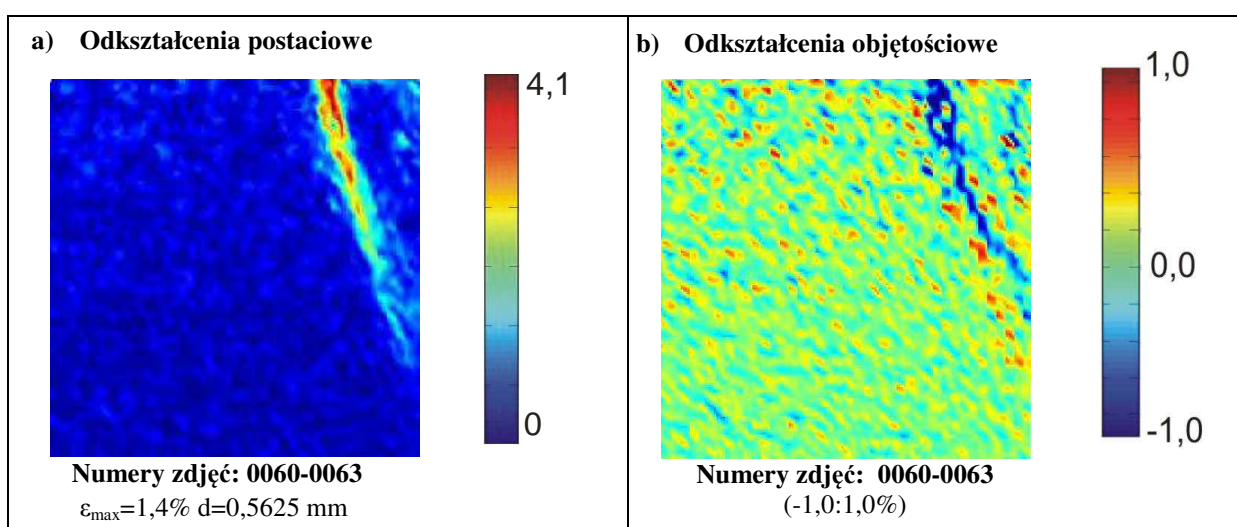
5.1.2. Cykle deformacji

Po osiągnięciu docelowego poziomu obciążenia, w dalszym przebiegu Testu 4 zadawano przemieszczenia ścianki, stosując ich jednostkowy przyrost δl , równy 0,0625 mm. Reakcja materiału na poziomy ruch ścianki przy ustalonym obciążeniu zewnętrznym cechowała się wyraźną powtarzalnością. Można było wyróżnić jej następujące fazy:

- **Faza 1:** *Stadium poprzedzające pierwszą lokalizację* (Rys.5.3), wykazujące rozproszone odkształcenia postaciowe i objętościowe w obszarze tworzącym wyraźny prostoliniowy klin (Rys.5.3a). Na obrzeżu tego klina przeważa rozproszona dylatacja (Rys.5.3b, kolor niebieski), natomiast w jego wnętrzu dominuje rozproszone ściskanie (kolor żółty i czerwony).

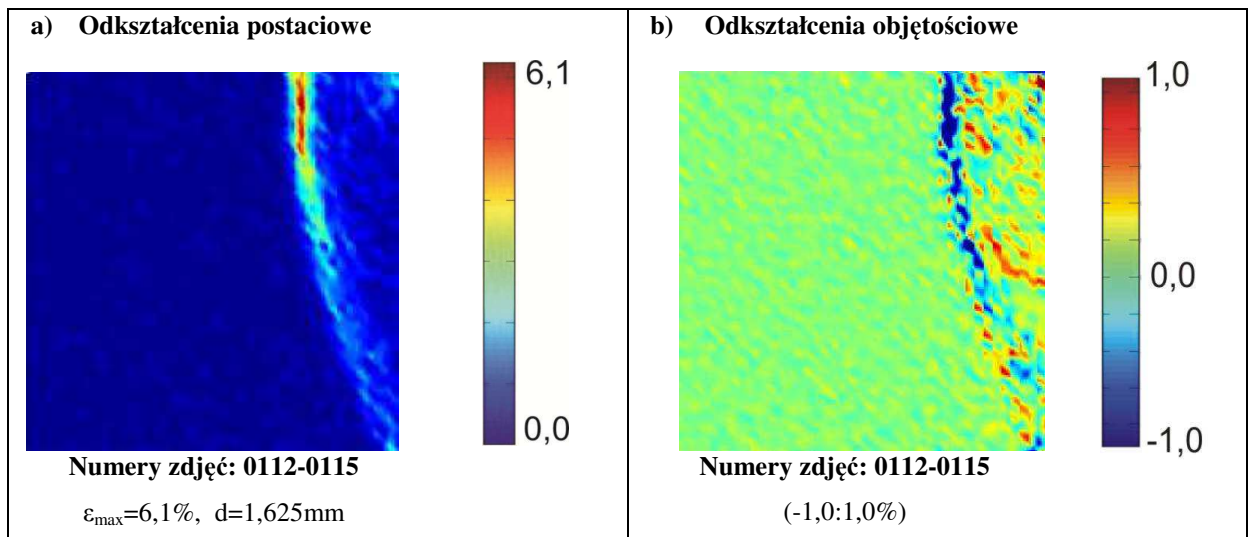


Rys.5.3. Stadium poprzedzające epizod lokalizacji: rozproszone odkształcenia w obszarze tworzącym klin (a). (b) Przewaga rozciągania (kolor niebieski) na obrzeżu klina i ściskania w jego wnętrzu (kolor czerwony).



Rys.5.4. Epizod lokalizacji: odkształcenia skoncentrowane wewnątrz pasma ścinania (a). Wzrost objętości (b), na całej długości lokalizacji (kolor niebieski), ściskanie (kolor czerwony) na jej obrzeżach.

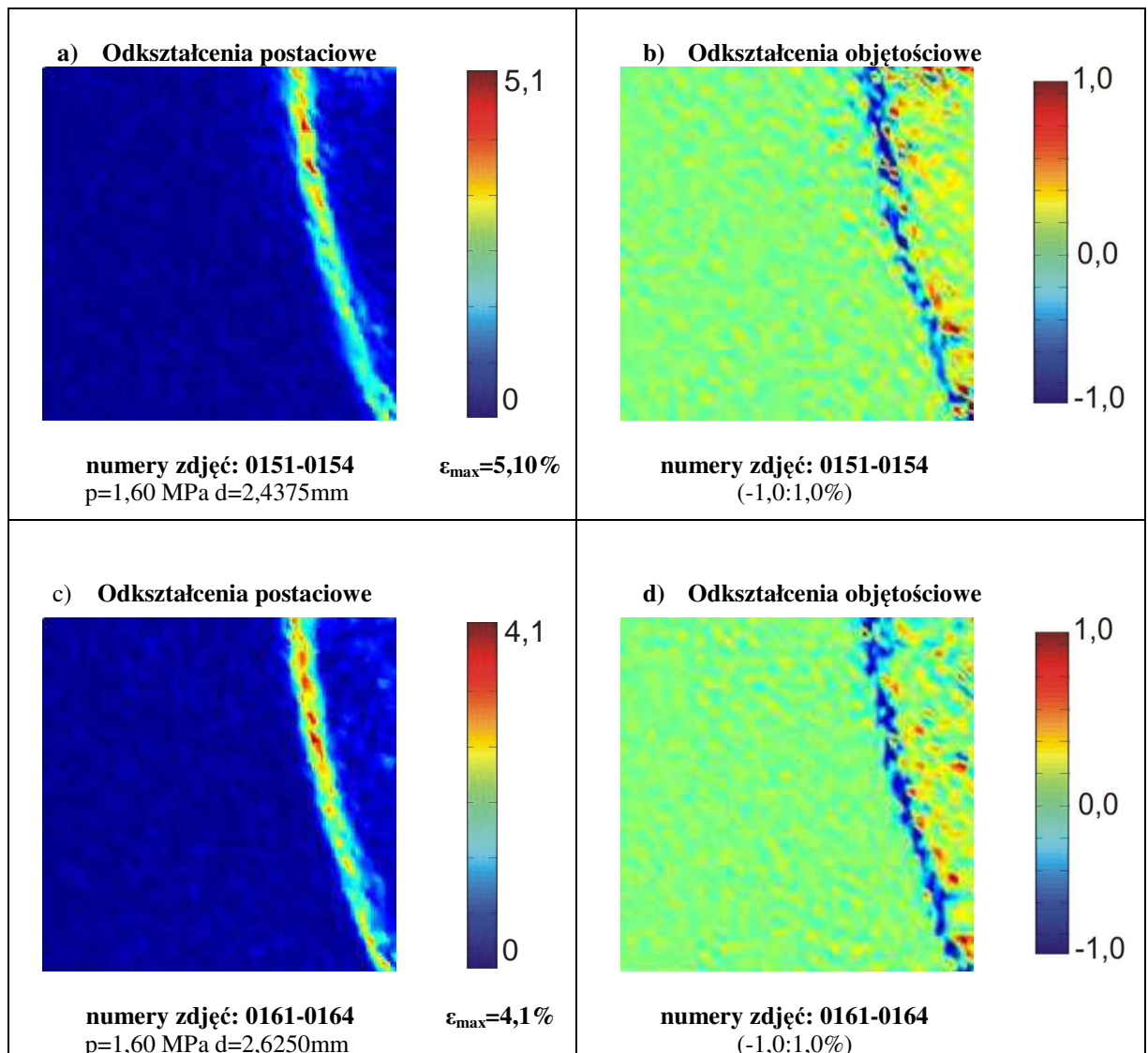
- **Faza 2: I epizod lokalizacji – początkowe pasmo ścinania** (Rys.5.4): odkształcenia koncentrują się wewnątrz prostego pasma ścinania, które nie obejmuje zasięgiem całej wysokości modelu. Na Rys.5.4b można zaobserwować wzrost objętości (dylatacja, kolor niebieski) na całej długości tej lokalizacji, a ściskanie (kolor czerwony) na jej obrzeżach – wewnątrz klina nie ulega znaczącej deformacji (Rys.5.4a).



Rys.5.5. Epizod lokalizacji: lokalizacja rozwijająca się - odkształcenia skoncentrowane wewnątrz pasma ścinania (a), ich wielkość zależy od położenia wewnątrz pasma (największe na górze). (b) Wzrost objętości (kolor niebieski) na całej długości lokalizacji, ściskanie (kolor żółty i czerwony) we wnętrzu klina odłamu.

- **Faza 3: II epizod lokalizacji – powstaje główne pasmo ścinania o krzywoliniowym przebiegu, obejmujące zasięgiem całą wysokość modelu** (Rys.5.5): Odkształcenia ośrodka skoncentrowane są wewnątrz tego pasma, we wnętrzu klina odłamu widać pozostałości pierwotnego pasma ścinania, widocznego na Rys.5.4. Wielkość odkształceń zależy od położenia wewnątrz głównego pasma (największe wartości występują w jego górnej części, w sąsiedztwie obciążonego brzegu). Wzrost objętości (kolor niebieski) występuje na całej długości lokalizacji, ściskanie (żółty i czerwony) we wnętrzu klina odłamu i po zewnętrznej stronie pasma ścinania (Rys.5.5b).

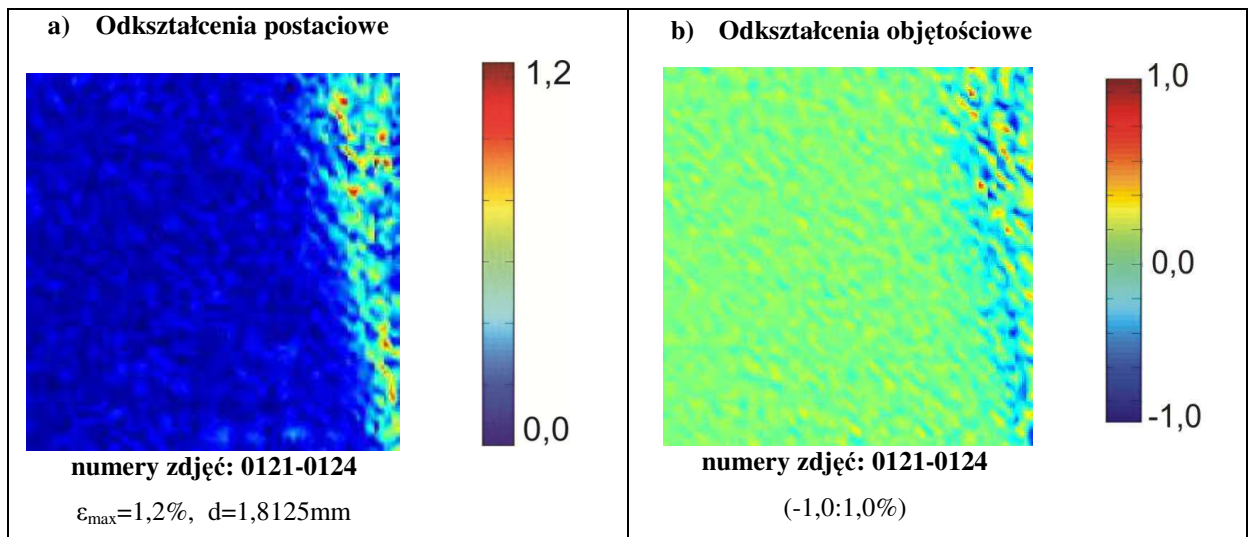
Przy dalszym postępie deformacji wartości odkształceń postaciowych i objętościowych wewnątrz pasma ścinania wyrównują się, co pokazuje Rys.5.6 – przy przemieszczeniu ścianki wynoszącym około 2.5mm (mniej więcej dwie średnie średnice ziarna) zarówno odkształcenia postaciowe jak i dylatacja osiągają maksymalne wartości na całej długości lokalizacji. Ta faza kończy rozwój pojedynczej lokalizacji odkształceń w obszarze za ścianką. Wnętrze klina jest na tym etapie równomiernie ścisłane (kolor żółty i czerwony, Rys.5.6b i d).



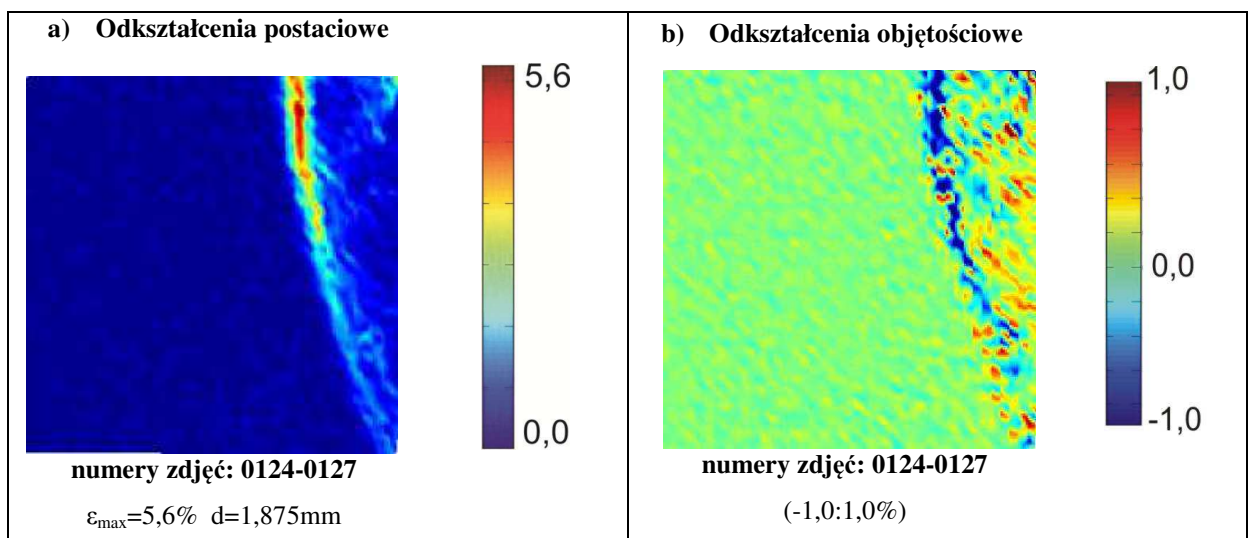
Rys.5.6. Test 4: Wyrównywanie się wielkości odkształceń w miarę rozwoju pasma ścinania.

- **Faza 4:** *Stadium po II epizodzie lokalizacji* (Rys.5.7): Można zaobserwować równomiernie rozłożone odkształcenia w obszarze tworzącym krzywoliniowy klin, obejmujący wewnątrz obszaru ograniczonego pasmem ścinania z Rys.5.5 i 5.6.

W obszarze tym przeważa dylatacja (wzrost objętości, kolor niebieski), jednak wzdłuż pewnych kierunków można również zaobserwować ściskanie (kolor czerwony). Faza 4 jest analogiczna do Fazy 1, różni się jedynie zasięgiem strefy rozproszonej deformacji (większy klin, obejmujący całą wysokość modelu).



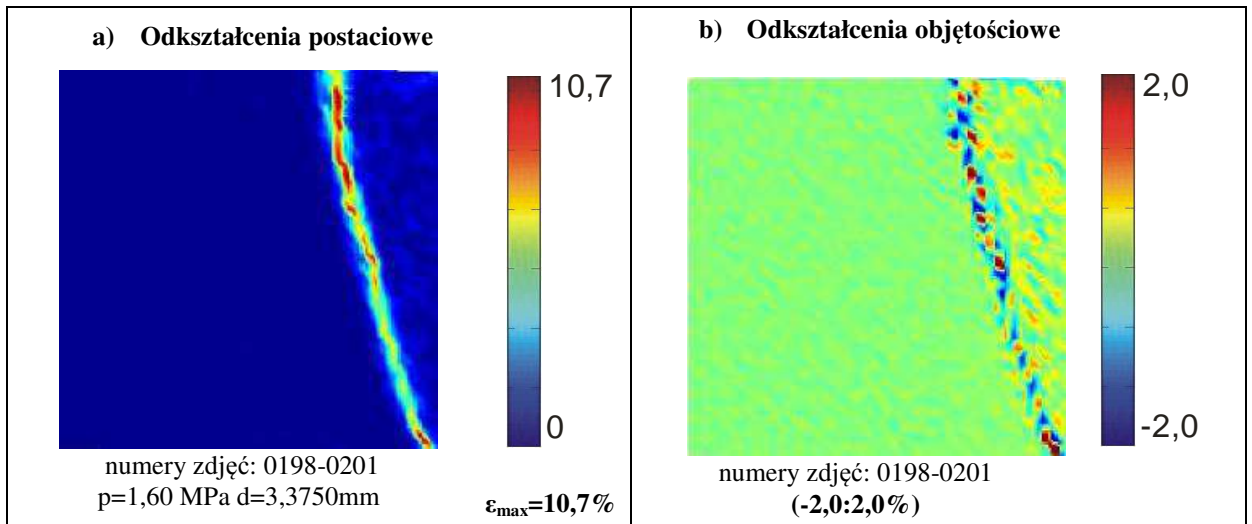
Rys.5.7. Stadium po lokalizacji: rozproszone odkształcenia w obszarze tworzącym klin. (b) Przewaga dylatacji (wzrost objętości, kolor niebieski) we wnętrzu klina odłamu.



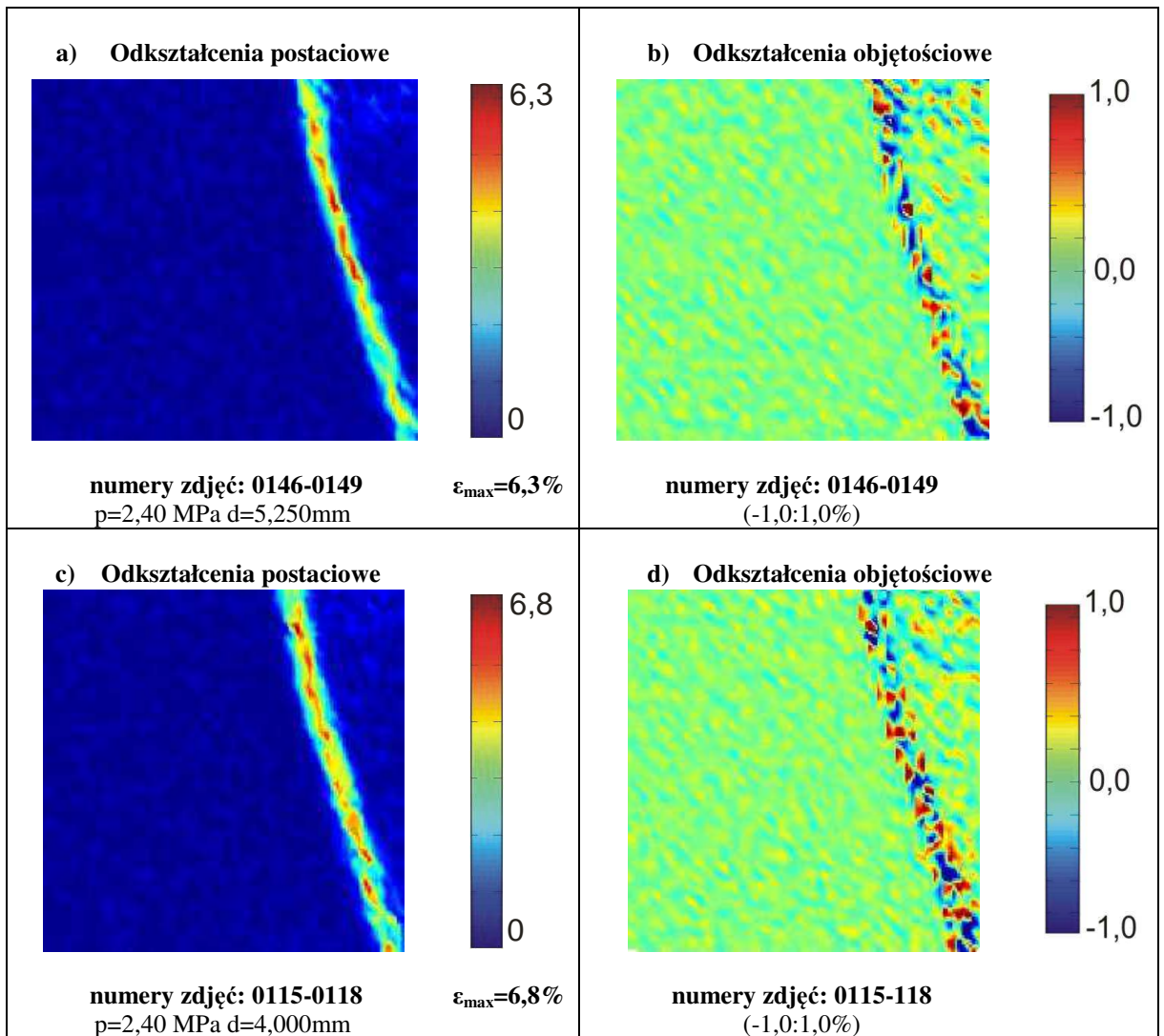
Rys.5.8. Trzeci epizod lokalizacji: oprócz głównego pasma ścinania pojawiają się słabsze, dzielące klin odłamu na sztywne segmenty (ściskane – kolor czerwony, Rys.5.8b). W przebiegu głównego pasma pojawiają się wyraźne miejsca, gdzie występuje ściskanie (kolor czerwony) zamiast rozciągania (kolor niebieski).

- **Faza 5a: III epizod lokalizacji** (Rys.5.8): oprócz głównego pasma ścinania o przebiegu podobnym do lokalizacji I i II pojawiają się słabsze, dzielące klin odłamu na sztywniejsze segmenty (kolor czerwony - ściskanie, Rys.5.8b).

W przebiegu głównego pasma pojawiają się miejsca, gdzie wyraźnie występuje ściskanie (kolor czerwony) zamiast rozciągania (kolor niebieski), co jest najprawdopodobniej związane z uaktywnieniem się rodziny dodatkowych słabszych lokalizacji we wnętrzu klina, które przecinają pod kątem pasmo główne.



Rys.5.9. Zaawansowana deformacja: w przybliżeniu jednorodny rozkład odkształceń postaciowych (Rys.5.9a) oraz naprzemiennie występujące ściskanie (czerwony) i rozciąganie (niebieski, Rys.5.9b) wewnątrz pasma ścinania.



Rys.5.10. Test 8: Przykłady podobnego zachowania się materiału w różnych testach: naprzemiennie ściskanie i dylatacja materiału wewnątrz pasma ścinania w zaawansowanej fazie deformacji. a, b) d = 5.25mm, c,d) d = 4,00mm.

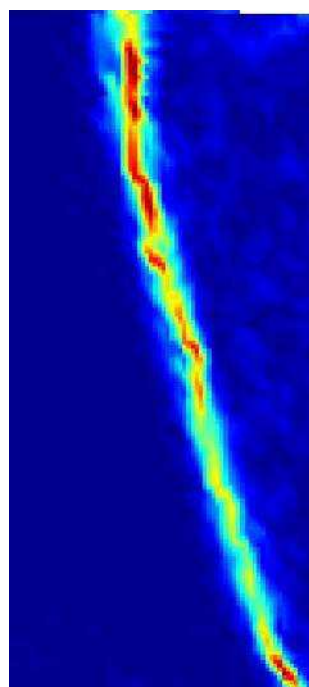
- **Faza 5b: III epizod lokalizacji** (Rys.5.9): stan zaawansowanej deformacji wewnątrz pasma ścinania – można zaobserwować jednorodny w przybliżeniu rozkład odkształceń postaciowych (Rys.5.9a) oraz naprzemiennie występujące ściskanie (czerwony) i rozciąganie wewnątrz pasma ścinania (niebieski, Rys.5.9b), potwierdzone wynikami z innych testów (Rys.5.10).

Na Rys.5.11 pokazano w powiększeniu obszar obejmujący pasmo ścinania z Rys.5.9, aby dokładniej przedstawić naprzemiennie występujące obszary ściskania i rozciągania we wnętrzu pasma. Takie zjawisko zostało już wcześniej odnotowane w literaturze (Leśniewska i Muir Wood, 2009, Rechenmacher, 2011), jednak wcześniej nie udało się uzyskać tak dokładnego jego obrazu.

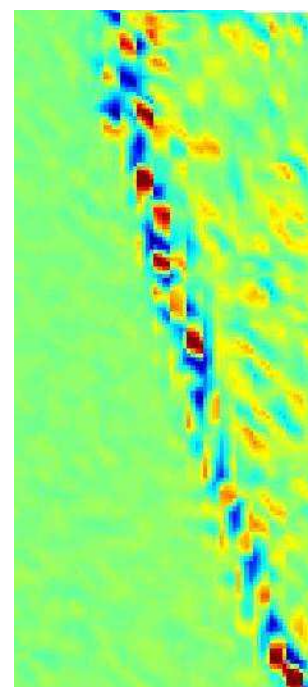
W całym Teście 4 można wyróżnić 13 cykli, zachodzących według schematu opisanego wyżej. Jeżeli za początek cyklu przyjmujemy np. II Epizod lokalizacji, po nim następuje faza rozproszonej deformacji, jak w Fazie 4, która utrzymuje się w czasie kilku elementarnych przesunięć ścianki, aż do następnego epizodu lokalizacji (Załącznik 2).

a) Odkształcenia postaciowe

b) Odkształcenia objętościowe

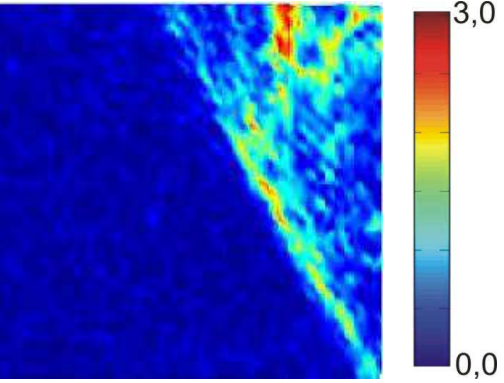
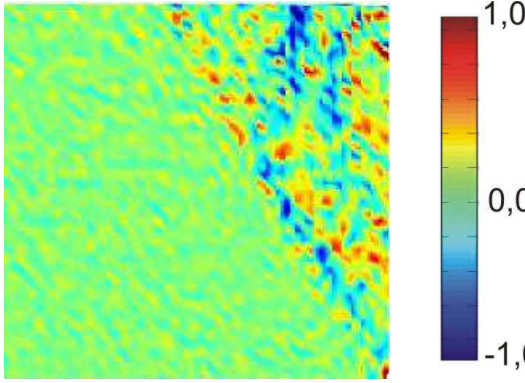
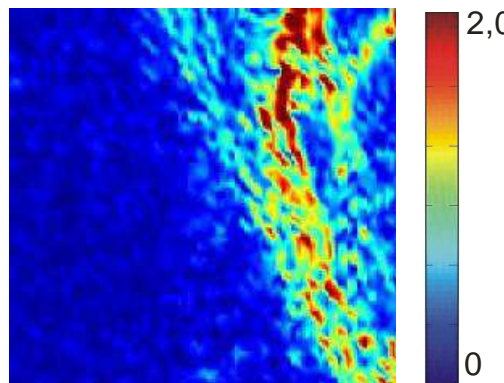
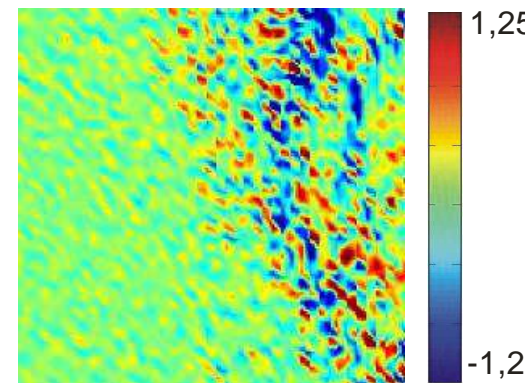
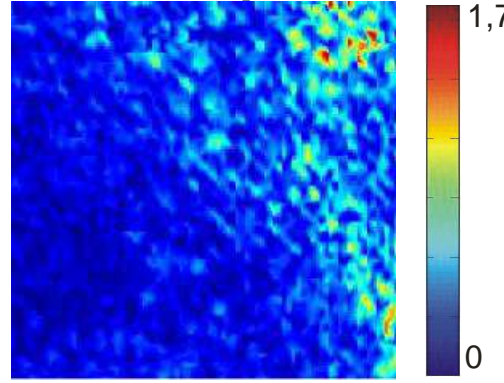
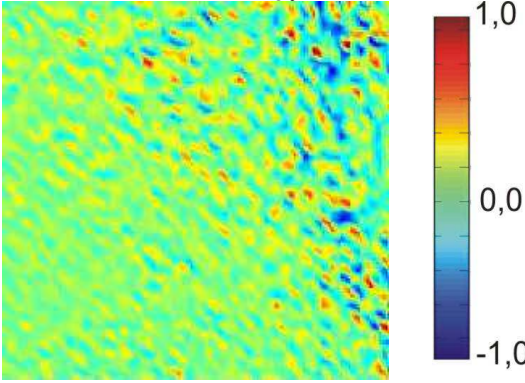


$\epsilon_{\max}=10,7\%$

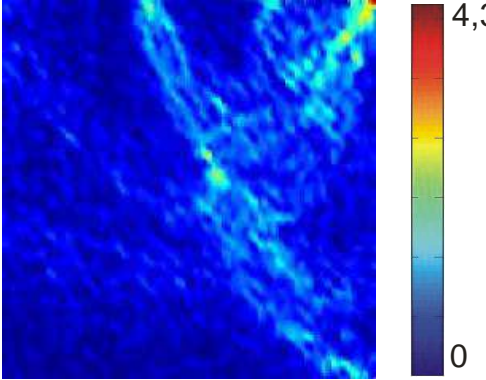
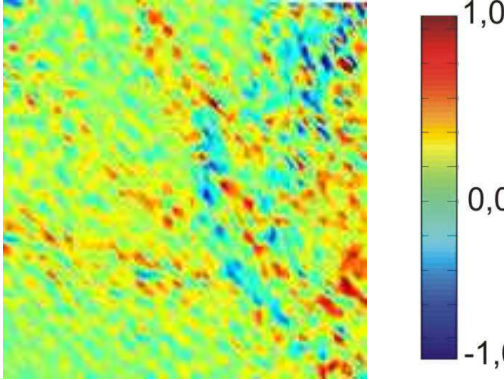
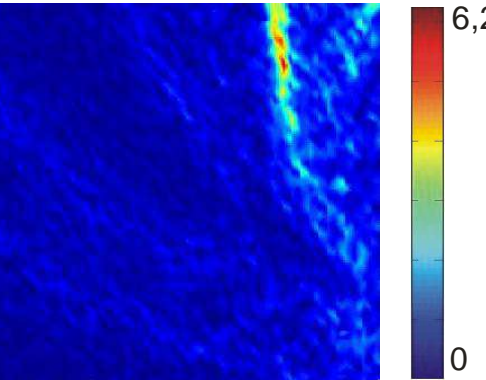
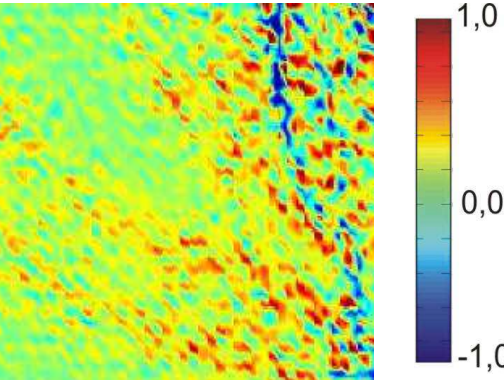
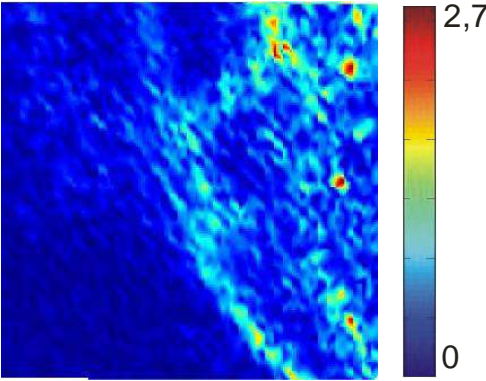
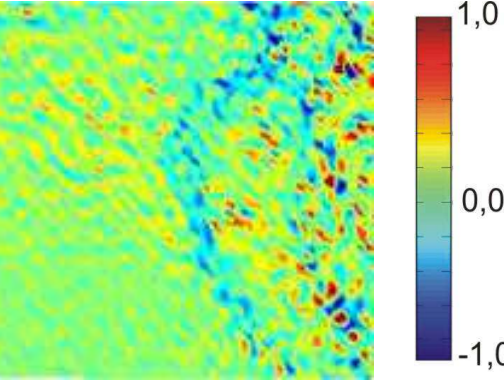


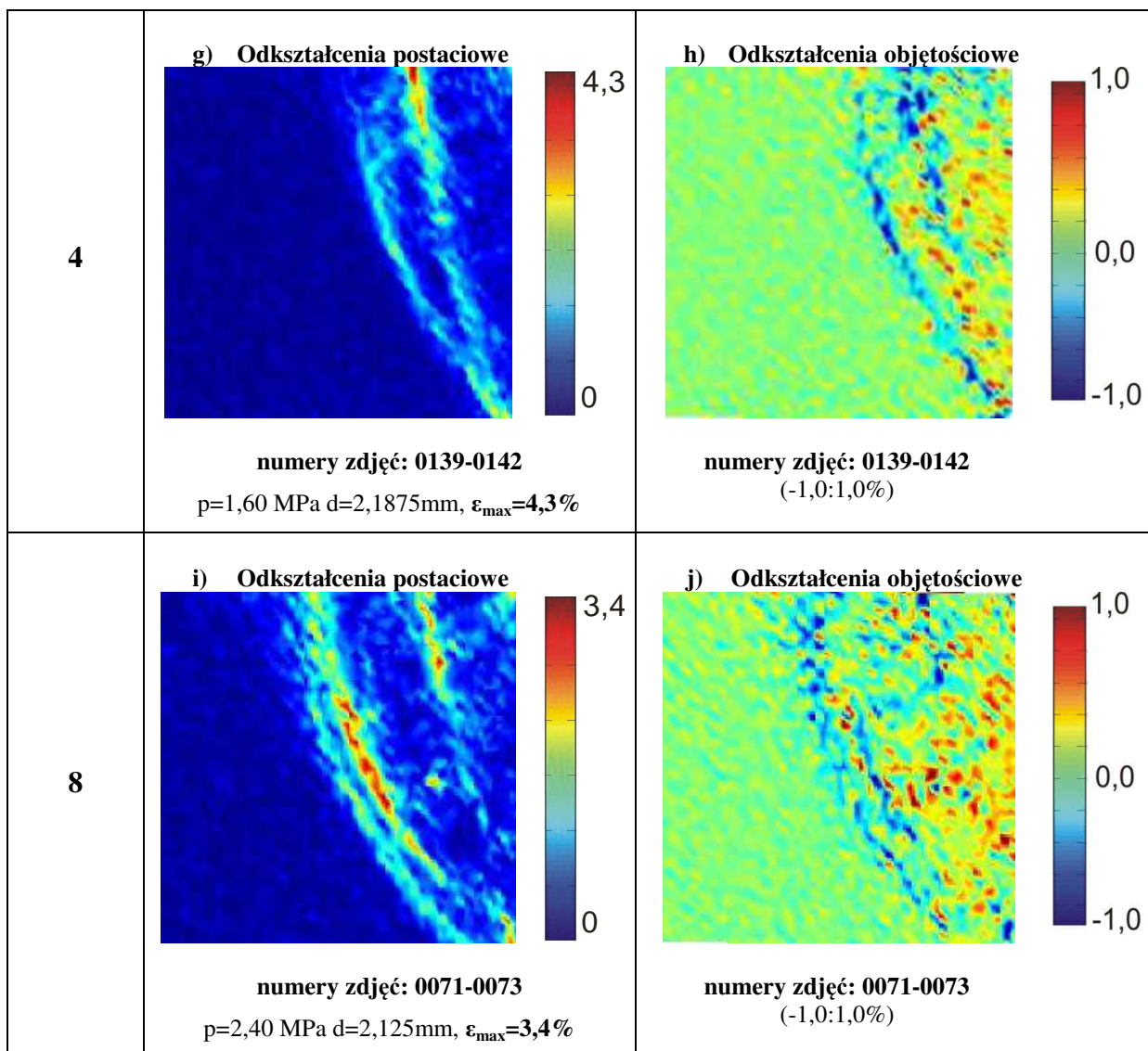
$(-2,0;2,0\%)$

Rys.5.11. Test 4: zbliżenie lokalizacji odkształceń w fazie zaawansowanej deformacji: jednorodny w przybliżeniu rozkład odkształceń postaciowych (Rys.5.11a) oraz naprzemiennie występujące ściskanie (czerwony) i rozciąganie (niebieski, Rys.5.11b) wewnątrz pasma ścinania (zdjęcia 0198-0201).

Numer testu	a) Odkształcenia postaciowe	b) Odkształcenia objętościowe
8	 <p>numery zdjęć: 0035-0038 $p=2,40$ MPa $d=0,625$mm, $\epsilon_{\max}=3,0\%$</p>	 <p>numery zdjęć: 0035-0038 $(-1,0:1,0\%)$</p>
2	 <p>numery zdjęć: 0097-0100 $p=1,60$ Mpa $d=0,500$mm, $\epsilon_{\max}=2,0\%$</p>	 <p>numery zdjęć: 0097-0100 $(-1,25:1,25\%)$</p>
9	 <p>numery zdjęć: 0453-0456 $p=0,40$ MPa $d=0,5000$mm, $\epsilon_{\max}=1,7\%$</p>	 <p>numery zdjęć: 0453-0456 $(-1,0:1,0\%)$</p>

Rys.5.12. Przykłady podobnego zachowania się materiału w różnych testach: duży klin deformacji o złożonej strukturze. Nachylenie klina bliskie nachyleniu Coulomba. a, b) **Test 8**, c,d) **Test 2**, e, f) **Test 9**.

Numer testu	a) Odkształcenia postaciowe	b) Odkształcenia objętościowe
4	 <p>numery zdjęć: 0069-0072 $p=1,60$ MPa $d=0,7500$mm, $\epsilon_{\max}=4,3\%$</p>	 <p>numery zdjęć: 0069-0072 $(-1,0;1,0\%)$</p>
5	 <p>numery zdjęć: 0097-0100 $p=1,60$ MPa $d=1,1250$mm, $\epsilon_{\max}=6,2\%$</p>	 <p>numery zdjęć: 0097-0100 $(-1,0;1,0\%)$</p>
5	 <p>numery zdjęć: 0106-0110 $p=1,60$ MPa $d=1,3750$mm, $\epsilon_{\max}=2,75\%$</p>	 <p>numery zdjęć: 0106-110 $(-1,0;1,0\%)$</p>

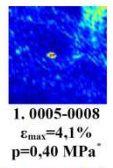
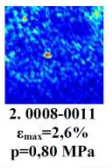
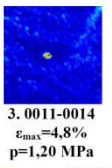
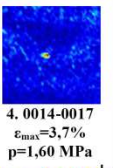
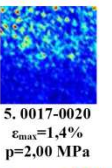
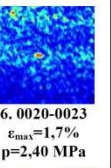
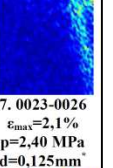
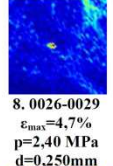
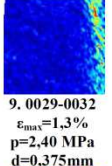
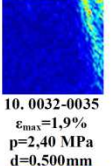
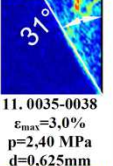
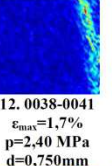
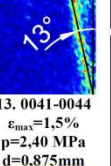
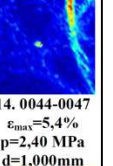
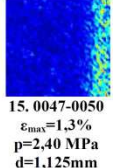
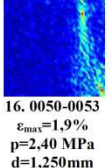

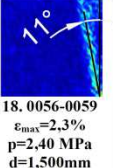
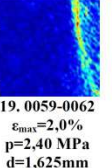
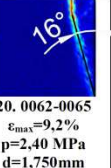
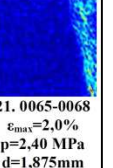
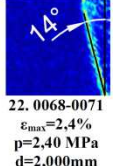
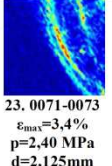
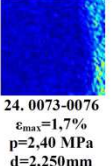
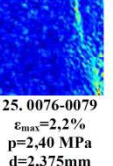
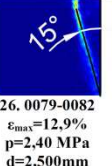
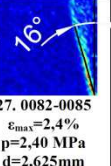

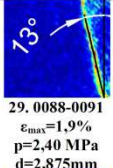
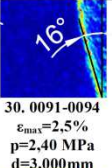
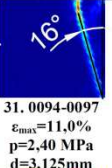
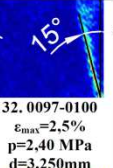
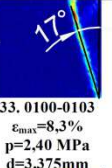
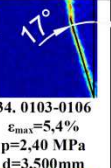
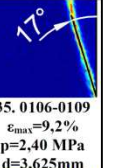
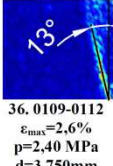
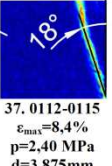
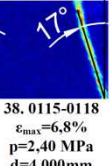
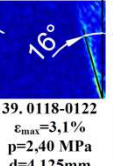
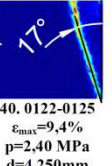
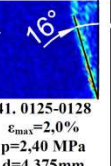
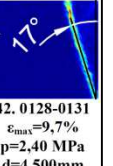
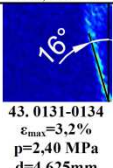
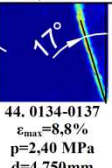
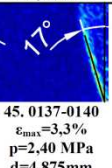
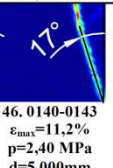
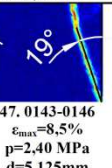
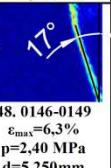
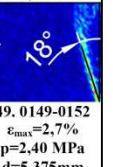
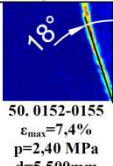

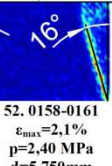
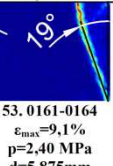
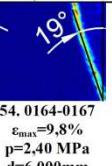
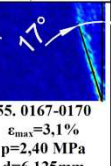
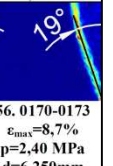
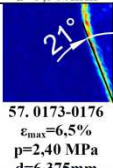
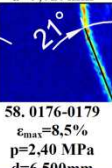
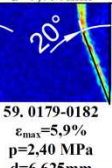
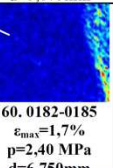
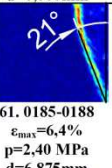
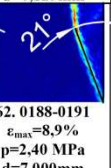
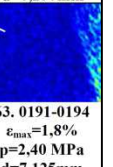
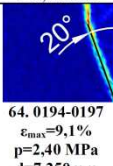
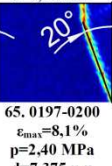
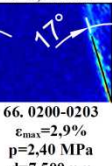
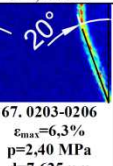



Rys.5.13. Złożone układy lokalizacji odkształceń, zaobserwowane w niektórych testach: a, b) Test 4, c,d) Test 5, e, f) Test 5, g, h) Test 4, i, j) Test 8.

5.1.3. Zjawiska niecykliczne

Oprócz opisanych w punkcie 5.1.2 naprzemiennie występujących faz zlokalizowanej i rozproszonej deformacji, zachodzących na obrzeżu i we wnętrzu klina odłamu, którego zasięg i przebieg nie ulegają znacznym zmianom w trakcie badania, praktycznie w każdym teście można odnaleźć o wiele mniej stabilne mechanizmy lokalizacji odkształceń, które ujawniają się tylko dla pojedynczych przyrostów przemieszczenia ścianki. Mają one na ogół większy zasięg, bardziej złożoną budowę i zajmują obszar klina o nachyleniu zbliżonym do nachylenia klasycznego klina Coulomba. Przykłady takich mechanizmów, zaczerpnięte z kilku różnych testów, zebrano na Rys.5.12 i 5.13.

Tabela 5.1. Test 8 – pomiar kątów nachylenia głównego pasma ścinania dla poszczególnych kroków doświadczenia (pozycje 1 – 67 tabeli) oraz uśredniony kąt dla odkształceń skumulowanych (pozycja 68).

 1. 0005-0008 $\epsilon_{max}=4,1\%$ $p=0,40$ MPa	 2. 0008-0011 $\epsilon_{max}=2,6\%$ $p=0,80$ MPa	 3. 0011-0014 $\epsilon_{max}=4,8\%$ $p=1,20$ MPa	 4. 0014-0017 $\epsilon_{max}=3,7\%$ $p=1,60$ MPa	 5. 0017-0020 $\epsilon_{max}=1,4\%$ $p=2,00$ MPa	 6. 0020-0023 $\epsilon_{max}=1,7\%$ $p=2,40$ MPa	 7. 0023-0026 $\epsilon_{max}=2,1\%$ $p=2,40$ MPa $d=0,125$ mm
 8. 0026-0029 $\epsilon_{max}=4,7\%$ $p=2,40$ MPa $d=0,250$ mm	 9. 0029-0032 $\epsilon_{max}=1,3\%$ $p=2,40$ MPa $d=0,375$ mm	 10. 0032-0035 $\epsilon_{max}=1,9\%$ $p=2,40$ MPa $d=0,500$ mm	 11. 0035-0038 $\epsilon_{max}=3,0\%$ $p=2,40$ MPa $d=0,625$ mm	 12. 0038-0041 $\epsilon_{max}=1,7\%$ $p=2,40$ MPa $d=0,750$ mm	 13. 0041-0044 $\epsilon_{max}=1,5\%$ $p=2,40$ MPa $d=0,875$ mm	 14. 0044-0047 $\epsilon_{max}=5,4\%$ $p=2,40$ MPa $d=1,000$ mm
 15. 0047-0050 $\epsilon_{max}=1,3\%$ $p=2,40$ MPa $d=1,125$ mm	 16. 0050-0053 $\epsilon_{max}=1,9\%$ $p=2,40$ MPa $d=1,250$ mm	 17. 0053-0056 $\epsilon_{max}=5,6\%$ $p=2,40$ MPa $d=1,375$ mm	 18. 0056-0059 $\epsilon_{max}=2,3\%$ $p=2,40$ MPa $d=1,500$ mm	 19. 0059-0062 $\epsilon_{max}=2,0\%$ $p=2,40$ MPa $d=1,625$ mm	 20. 0062-0065 $\epsilon_{max}=9,2\%$ $p=2,40$ MPa $d=1,750$ mm	 21. 0065-0068 $\epsilon_{max}=2,0\%$ $p=2,40$ MPa $d=1,875$ mm
 22. 0068-0071 $\epsilon_{max}=2,4\%$ $p=2,40$ MPa $d=2,000$ mm	 23. 0071-0073 $\epsilon_{max}=3,4\%$ $p=2,40$ MPa $d=2,125$ mm	 24. 0073-0076 $\epsilon_{max}=1,7\%$ $p=2,40$ MPa $d=2,250$ mm	 25. 0076-0079 $\epsilon_{max}=2,2\%$ $p=2,40$ MPa $d=2,375$ mm	 26. 0079-0082 $\epsilon_{max}=12,9\%$ $p=2,40$ MPa $d=2,500$ mm	 27. 0082-0085 $\epsilon_{max}=2,4\%$ $p=2,40$ MPa $d=2,625$ mm	 28. 0085-0088 $\epsilon_{max}=8,6\%$ $p=2,40$ MPa $d=2,750$ mm
 29. 0088-0091 $\epsilon_{max}=1,9\%$ $p=2,40$ MPa $d=2,875$ mm	 30. 0091-0094 $\epsilon_{max}=2,5\%$ $p=2,40$ MPa $d=3,000$ mm	 31. 0094-0097 $\epsilon_{max}=11,0\%$ $p=2,40$ MPa $d=3,125$ mm	 32. 0097-0100 $\epsilon_{max}=2,5\%$ $p=2,40$ MPa $d=3,250$ mm	 33. 0100-0103 $\epsilon_{max}=8,3\%$ $p=2,40$ MPa $d=3,375$ mm	 34. 0103-0106 $\epsilon_{max}=5,4\%$ $p=2,40$ MPa $d=3,500$ mm	 35. 0106-0109 $\epsilon_{max}=9,2\%$ $p=2,40$ MPa $d=3,625$ mm
 36. 0109-0112 $\epsilon_{max}=2,6\%$ $p=2,40$ MPa $d=3,750$ mm	 37. 0112-0115 $\epsilon_{max}=8,4\%$ $p=2,40$ MPa $d=3,875$ mm	 38. 0115-0118 $\epsilon_{max}=6,8\%$ $p=2,40$ MPa $d=4,000$ mm	 39. 0118-0122 $\epsilon_{max}=3,1\%$ $p=2,40$ MPa $d=4,125$ mm	 40. 0122-0125 $\epsilon_{max}=9,4\%$ $p=2,40$ MPa $d=4,250$ mm	 41. 0125-0128 $\epsilon_{max}=2,0\%$ $p=2,40$ MPa $d=4,375$ mm	 42. 0128-0131 $\epsilon_{max}=9,7\%$ $p=2,40$ MPa $d=4,500$ mm
 43. 0131-0134 $\epsilon_{max}=3,2\%$ $p=2,40$ MPa $d=4,625$ mm	 44. 0134-0137 $\epsilon_{max}=8,8\%$ $p=2,40$ MPa $d=4,750$ mm	 45. 0137-0140 $\epsilon_{max}=3,3\%$ $p=2,40$ MPa $d=4,875$ mm	 46. 0140-0143 $\epsilon_{max}=11,2\%$ $p=2,40$ MPa $d=5,000$ mm	 47. 0143-0146 $\epsilon_{max}=8,5\%$ $p=2,40$ MPa $d=5,125$ mm	 48. 0146-0149 $\epsilon_{max}=6,3\%$ $p=2,40$ MPa $d=5,250$ mm	 49. 0149-0152 $\epsilon_{max}=2,7\%$ $p=2,40$ MPa $d=5,375$ mm
 50. 0152-0155 $\epsilon_{max}=7,4\%$ $p=2,40$ MPa $d=5,500$ mm	 51. 0155-0158 $\epsilon_{max}=7,0\%$ $p=2,40$ MPa $d=5,625$ mm	 52. 0158-0161 $\epsilon_{max}=2,1\%$ $p=2,40$ MPa $d=5,750$ mm	 53. 0161-0164 $\epsilon_{max}=9,1\%$ $p=2,40$ MPa $d=5,875$ mm	 54. 0164-0167 $\epsilon_{max}=9,8\%$ $p=2,40$ MPa $d=6,000$ mm	 55. 0167-0170 $\epsilon_{max}=3,1\%$ $p=2,40$ MPa $d=6,125$ mm	 56. 0170-0173 $\epsilon_{max}=8,7\%$ $p=2,40$ MPa $d=6,250$ mm
 57. 0173-0176 $\epsilon_{max}=6,5\%$ $p=2,40$ MPa $d=6,375$ mm	 58. 0176-0179 $\epsilon_{max}=8,5\%$ $p=2,40$ MPa $d=6,500$ mm	 59. 0179-0182 $\epsilon_{max}=5,9\%$ $p=2,40$ MPa $d=6,625$ mm	 60. 0182-0185 $\epsilon_{max}=1,7\%$ $p=2,40$ MPa $d=6,750$ mm	 61. 0185-0188 $\epsilon_{max}=6,4\%$ $p=2,40$ MPa $d=6,875$ mm	 62. 0188-0191 $\epsilon_{max}=8,9\%$ $p=2,40$ MPa $d=7,000$ mm	 63. 0191-0194 $\epsilon_{max}=1,8\%$ $p=2,40$ MPa $d=7,125$ mm
 64. 0194-0197 $\epsilon_{max}=9,1\%$ $p=2,40$ MPa $d=7,250$ mm	 65. 0197-0200 $\epsilon_{max}=8,1\%$ $p=2,40$ MPa $d=7,375$ mm	 66. 0200-0203 $\epsilon_{max}=2,9\%$ $p=2,40$ MPa $d=7,500$ mm	 67. 0203-0206 $\epsilon_{max}=6,3\%$ $p=2,40$ MPa $d=7,625$ mm	 68. 0005-0206 $\epsilon_{max}=221\%$		

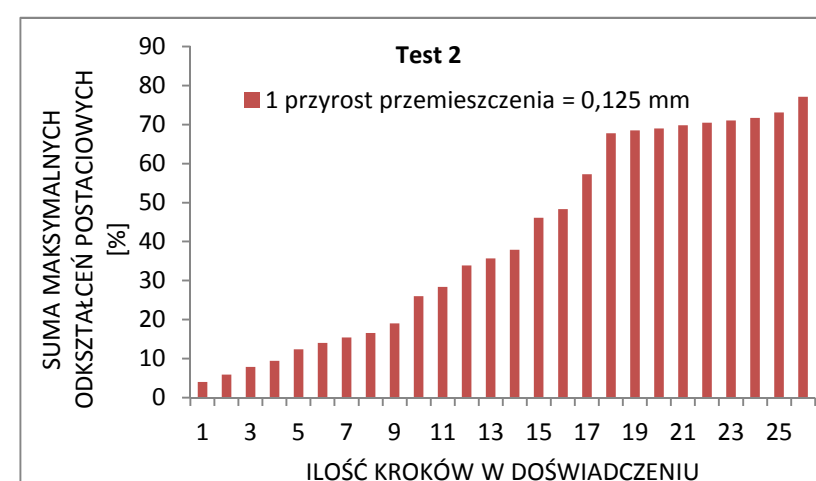
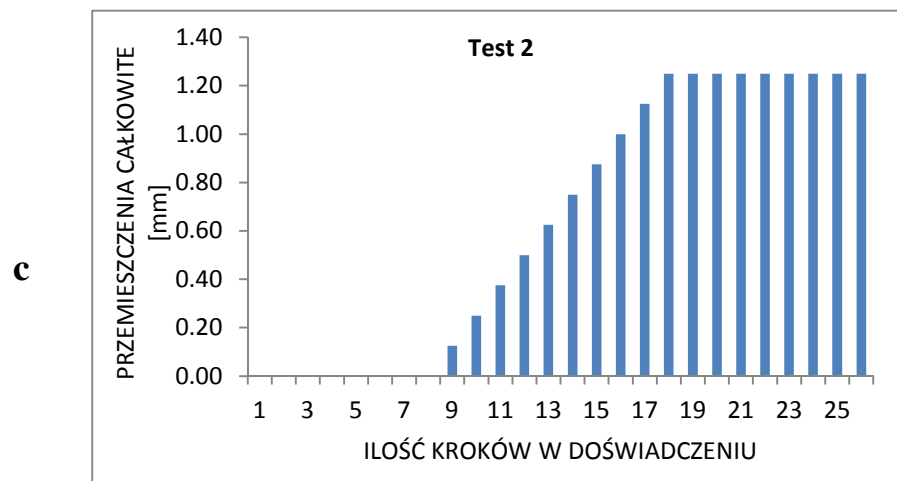
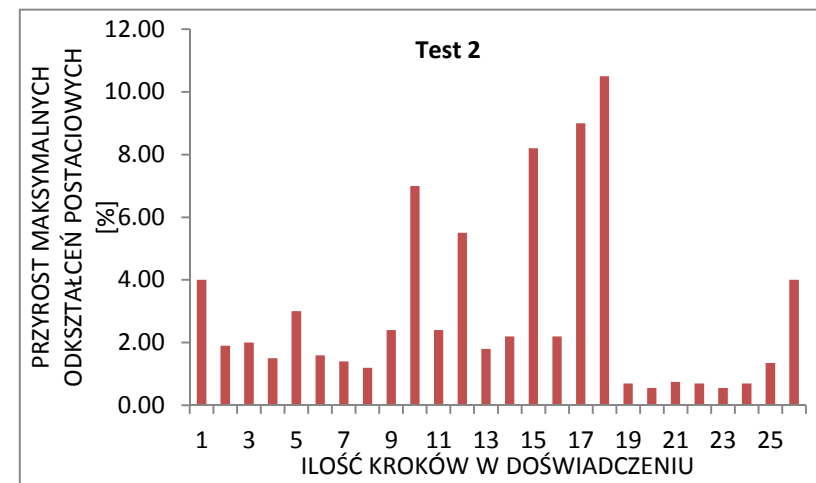
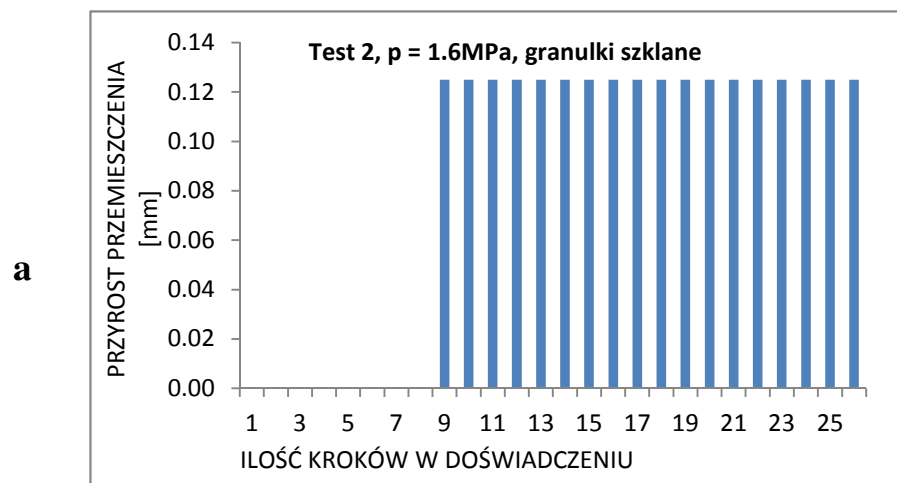
W Tabeli 5.1 natomiast podano kąty nachylenia głównych pasm ścinania w całym przebiegu Testu 8. Pomijając nietypowe kliny (pozycja 11 i 23 Tabeli 5.1) można na tej podstawie stwierdzić, że w trakcie doświadczenia średnio nachylenie to wzrasta o około 5° . Należy przy tym zauważyć, że pomierzone nachylenia do pionu (za wyjątkiem pozycji 11 i 23 Tabeli 5.1) są zdecydowanie mniejsze (o kilkanaście stopni) od teoretycznego nachylenia klina Coulomba ($45^\circ - \phi/2$), które zgodnie z wartością kąta tarcia wewnętrznego otrzymaną doświadczenie dla granulek szklanych powinno wynosić około 30° .

5.2. Odształcenia wewnątrz pasm ścinania

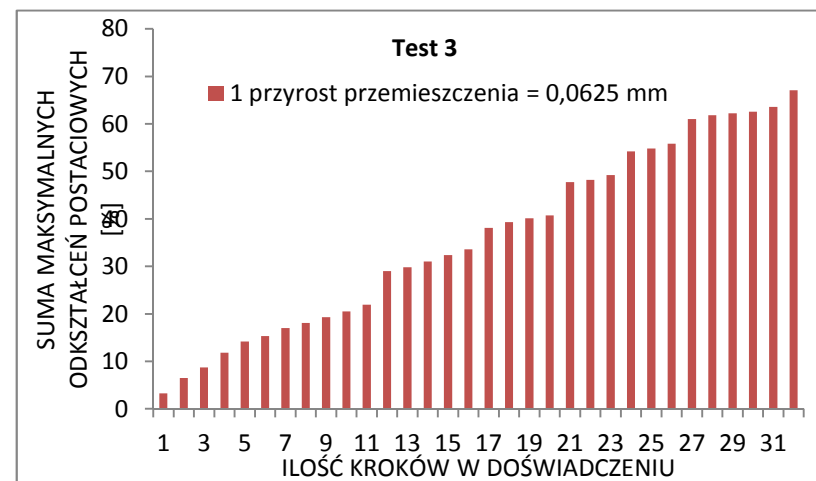
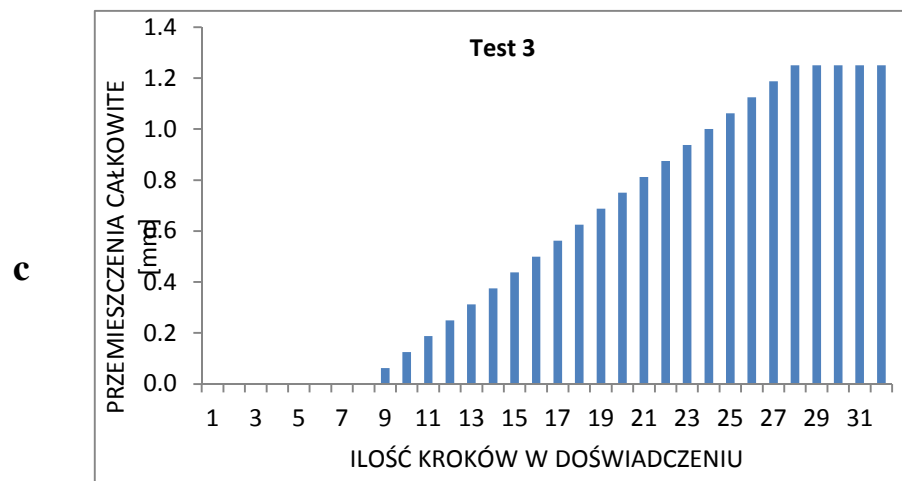
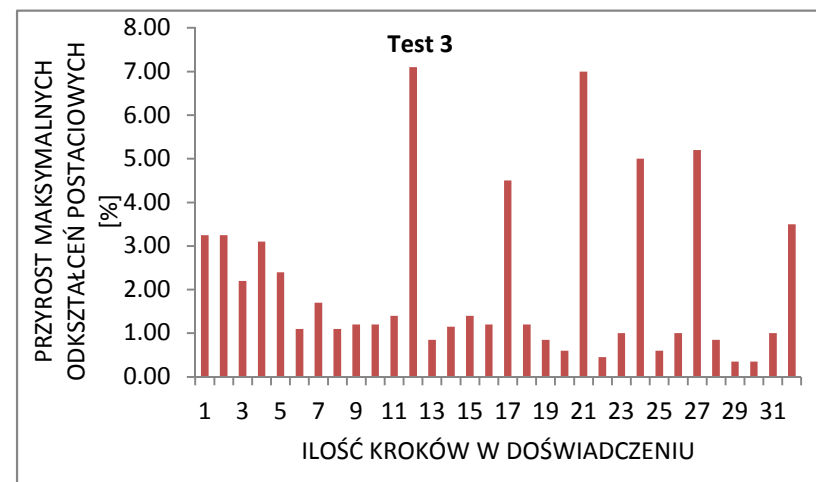
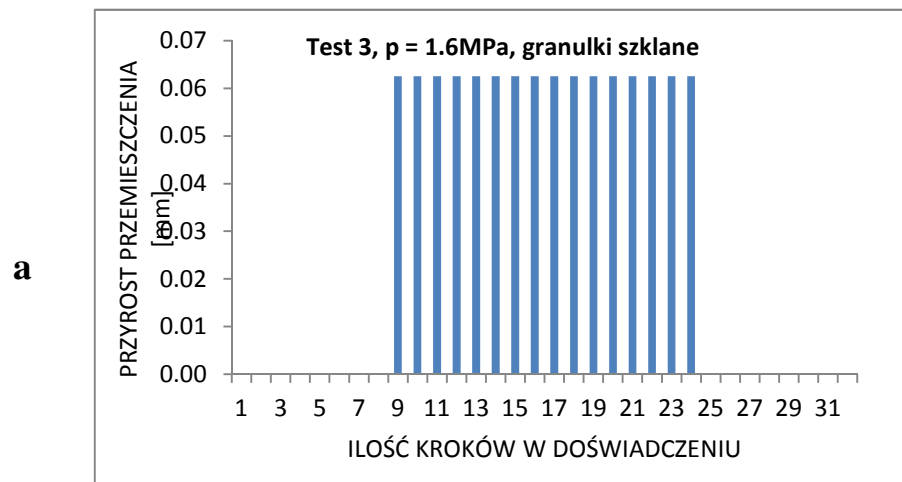
Dokładna inspekcja pól odształceń otrzymanych dla poszczególnych testów sugerowała, że również wewnątrz pasm ścinania zachodzą cykliczne zmiany procesu deformacji. Aby to sprawdzić, przyjęto, że miarą odształcenia wewnątrz pasma ścinania jest maksymalna wartość odształcenia postaciowego i dla wszystkich testów (oprócz Testu 1) sporządzono wykresy jej zmienności w trakcie przemieszczania się ścianki.

Wykresy te zamieszczono na Rys.5.14 – 5.28 w dwóch wersjach: jako wykresy maksymalnego odształcenia postaciowego w każdym kolejnym kroku przemieszczenia ścianki (Rys.5.14b-5.28b) albo jako odształcenie skumulowane: sumę odształceń po określonej liczbie przemieszczeń ścianki (Rys.5.14d-5.28d). Na Rys.5.14a-5.28a podano wartość jednostkowego przemieszczenia ścianki (stałą dla danego testu), dla porównania z Rys.5.14b-5.28b, natomiast na Rys.5.14c-5.28c skumulowaną wartość przemieszczenia ścianki, czyli sumę przemieszczeń po określonej liczbie kroków, dla porównania z Rys.5.14d-5.28d).

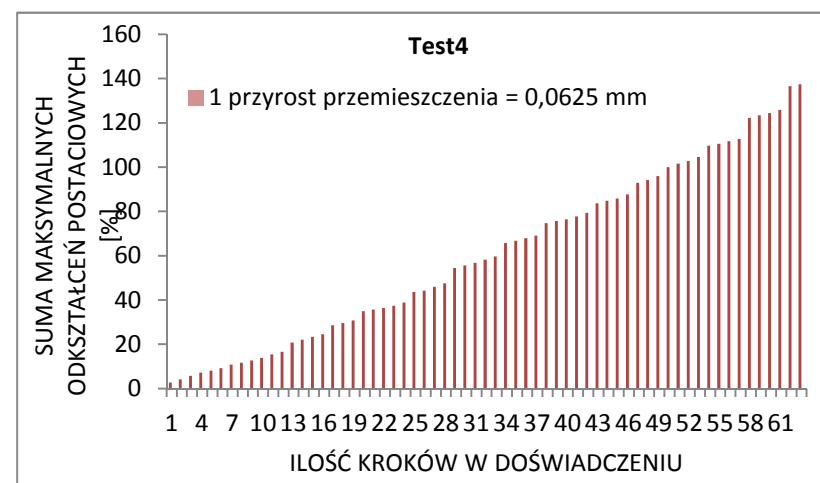
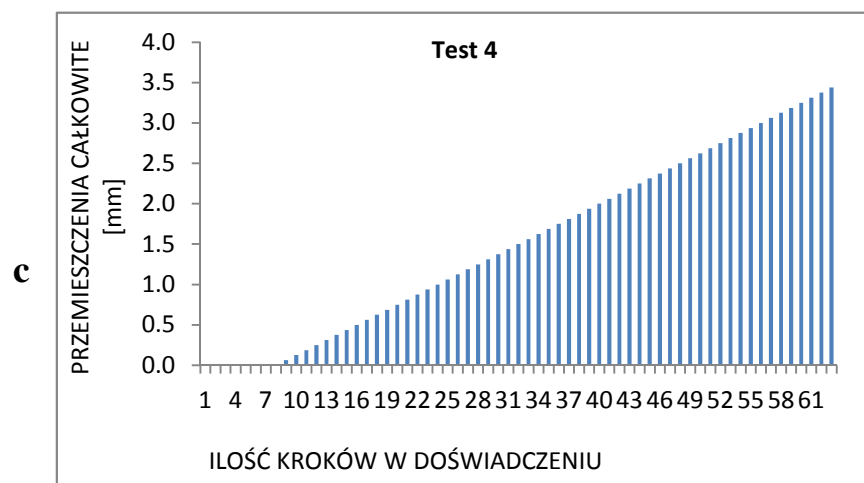
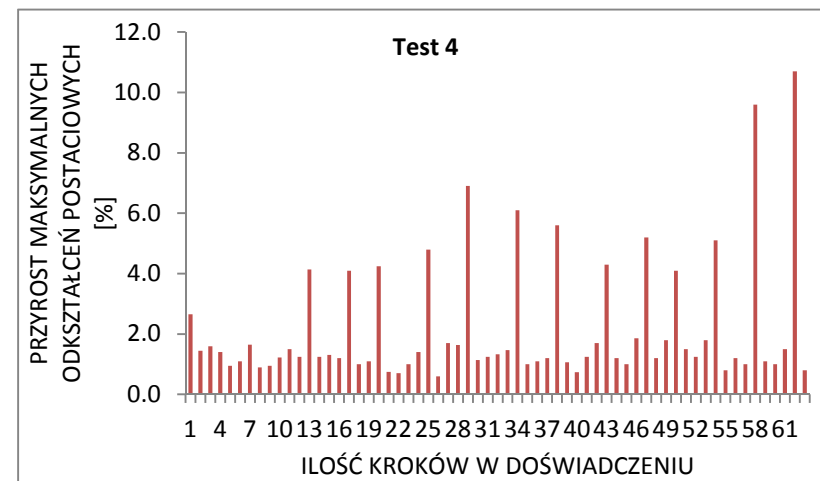
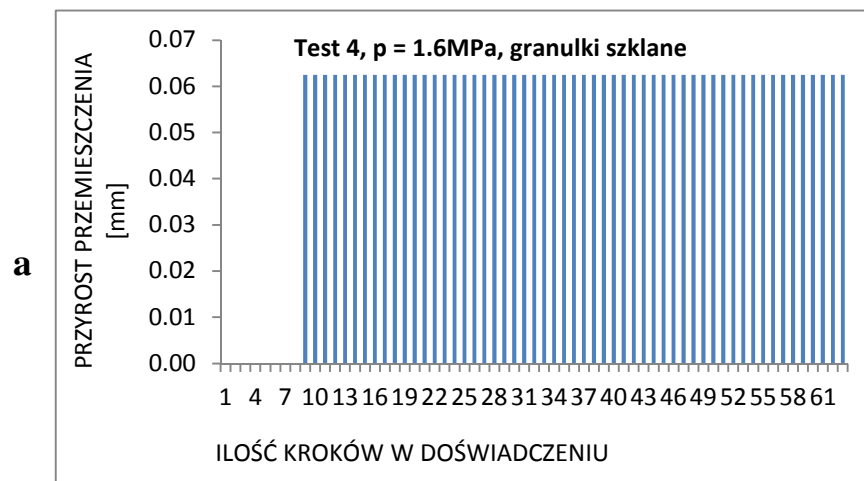
Charakter zmian, jakie zachodzą wewnątrz pasma ścinania, najlepiej można opisać na przykładzie Rys.5.16 (Test 4). Obciążenie zewnętrzne w trakcie tego testu wynosiło 1,6MPa (Tabela 3.2), a więc było dosyć wysokie. Wykres przyrostów odształceń postaciowych w trakcie poszczególnych kroków (Rys.5.16b), który odpowiada stałej wartości jednostkowego przesunięcia ścianki (Rys.5.16a) pokazuje wyraźne cykliczne zmiany. Średnio co 4 przyrosty przemieszczenia ścianki pojawia się stromy pik maksymalnego odształcenia, dokładnie odpowiadający kolejnym epizodom lokalizacji widocznym w polach odształceń (Załącznik 2, str.Z2-7). Niewielkie odształcenia pomiędzy pikami, stanowiące ich tło, odpowiadają natomiast fazom rozproszonej deformacji.



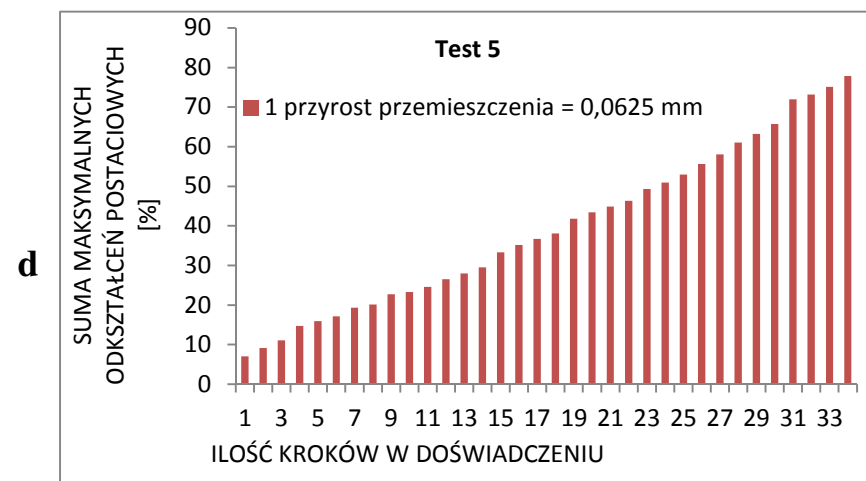
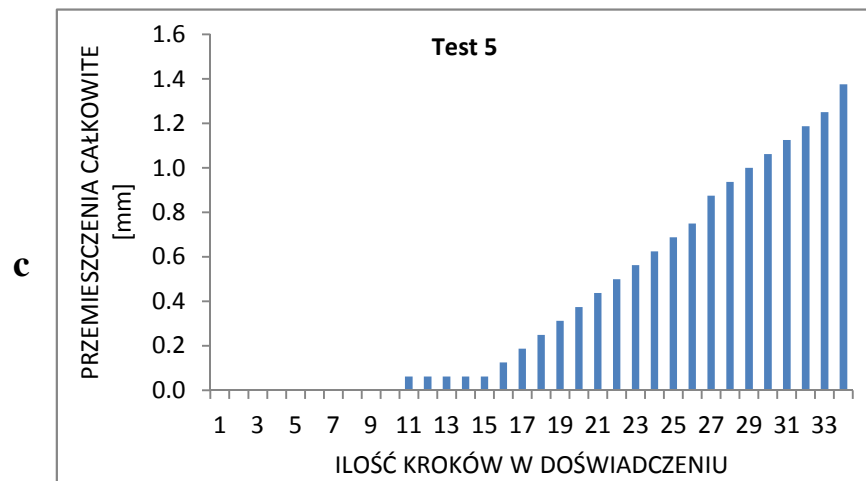
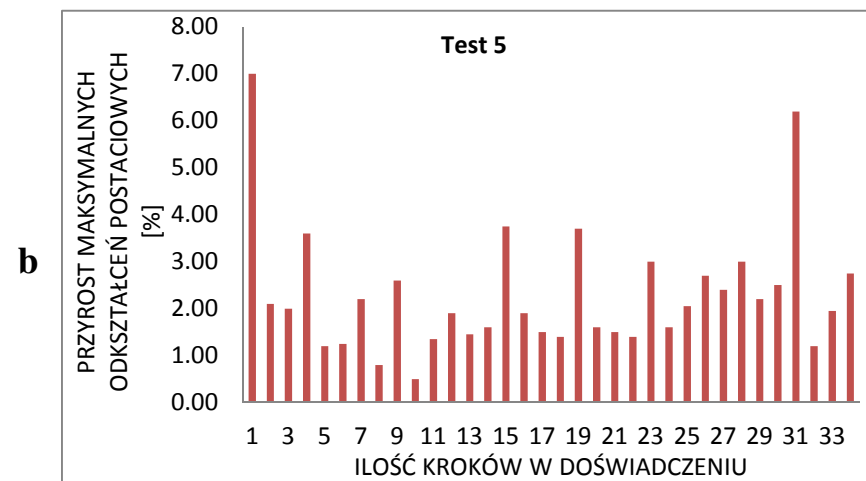
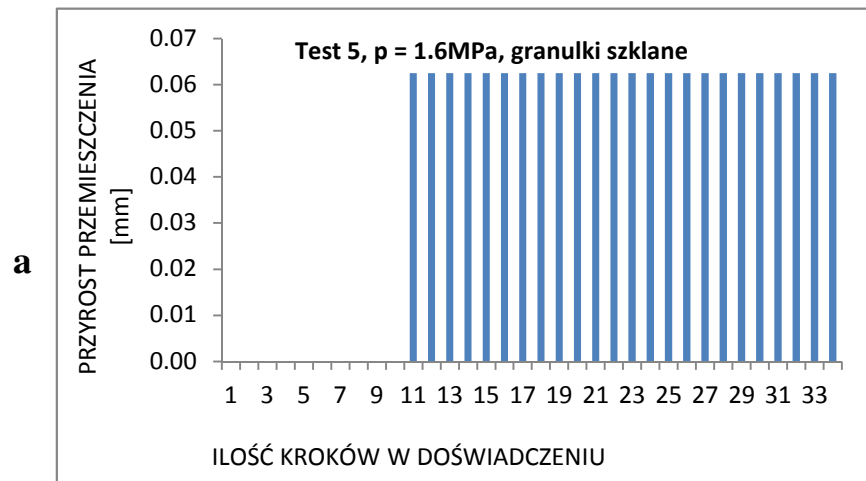
Rys.5.14. Test 2 - maksymalne odkształcenia postaciowe wewnątrz pasma ścinania, wywołane przemieszczeniem ścianki: **a)** przyrosty przemieszczeń ścianki w poszczególnych krokach doświadczenia, **b)** przyrosty odkształceń postaciowych w poszczególnych krokach doświadczenia, **c)** sumaryczne przemieszczenie ścianki po danej liczbie kroków doświadczenia, **d)** suma maksymalnych odkształceń postaciowych po danej liczbie kroków doświadczenia.



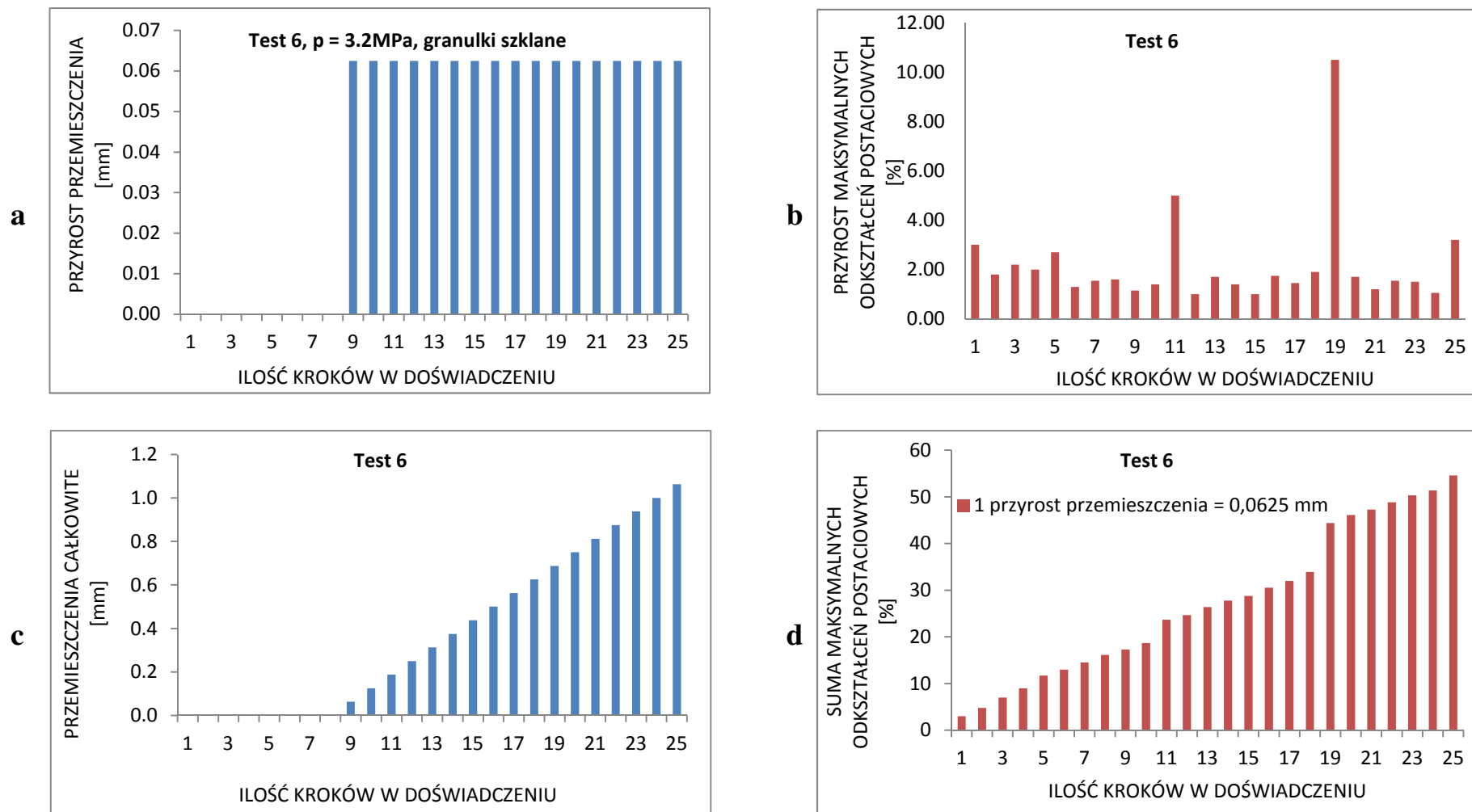
Rys.5.15. Test 3 - maksymalne odkształcenia postaciowe wewnątrz pasma ścinania, wywołane przemieszczeniem ścianki: **a)** przyrosty przemieszczeń ścianki w poszczególnych krokach doświadczenia, **b)** przyrosty odkształceń postaciowych w poszczególnych krokach doświadczenia, **c)** sumaryczne przemieszczenie ścianki po danej liczbie kroków doświadczenia, **d)** suma maksymalnych odkształceń postaciowych po danej liczbie kroków doświadczenia.



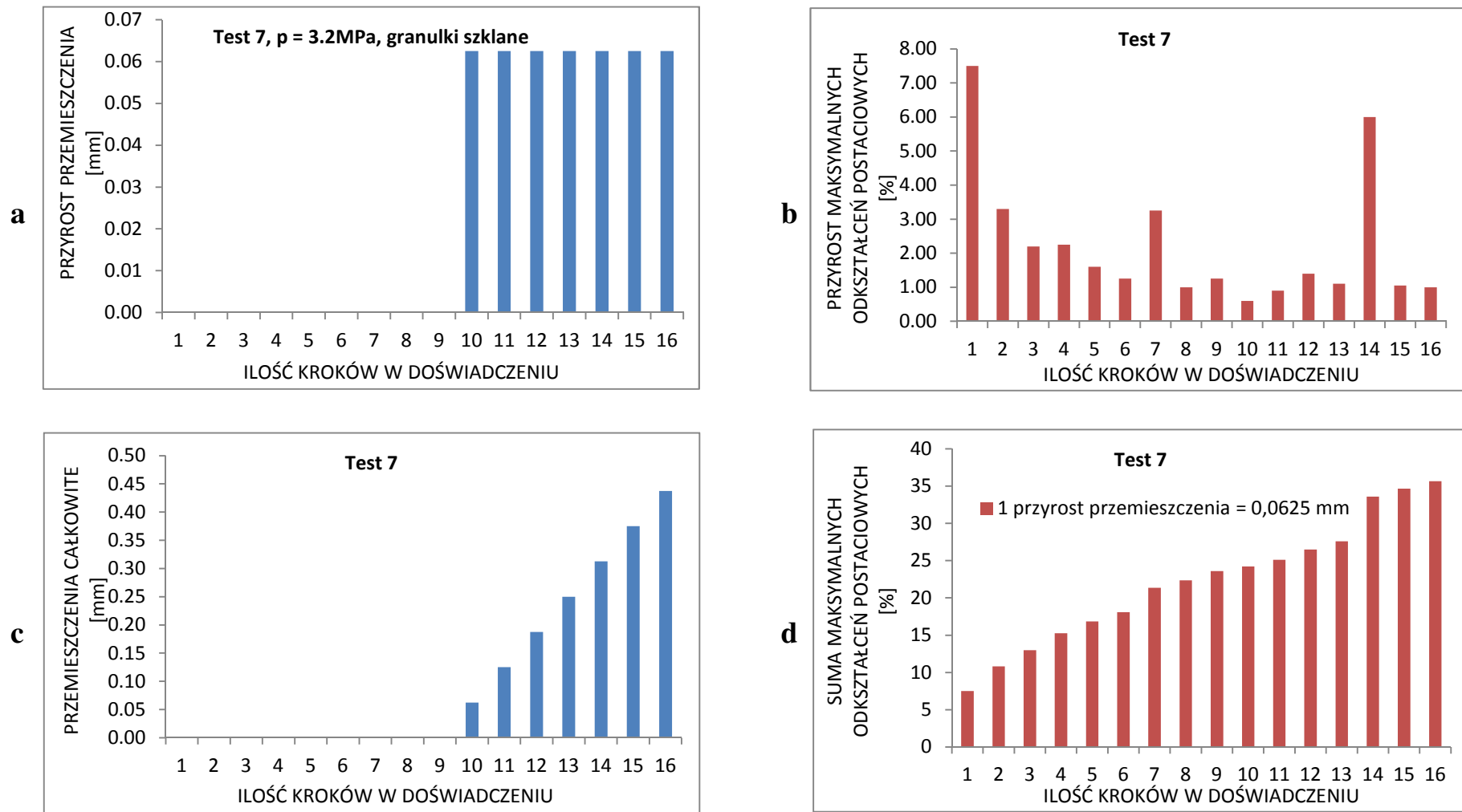
Rys.5.16. Test 4 - maksymalne odkształcenia postaciowe wewnątrz pasma ścinania, wywołane przemieszczeniem ścianki: **a)** przyrosty przemieszczeń ścianki w poszczególnych krokach doświadczenia, **b)** przyrosty odkształceń postaciowych w poszczególnych krokach doświadczenia, **c)** sumaryczne przemieszczenie ścianki po danej liczbie kroków doświadczenia, **d)** suma maksymalnych odkształceń postaciowych po danej liczbie kroków doświadczenia



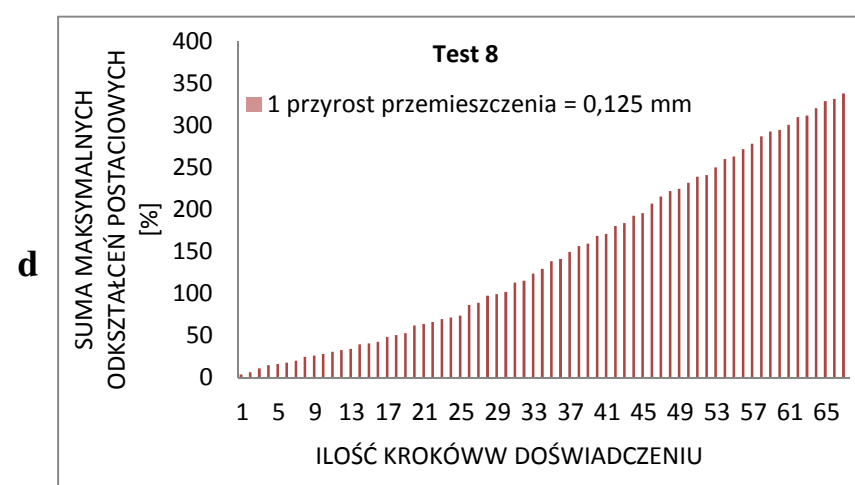
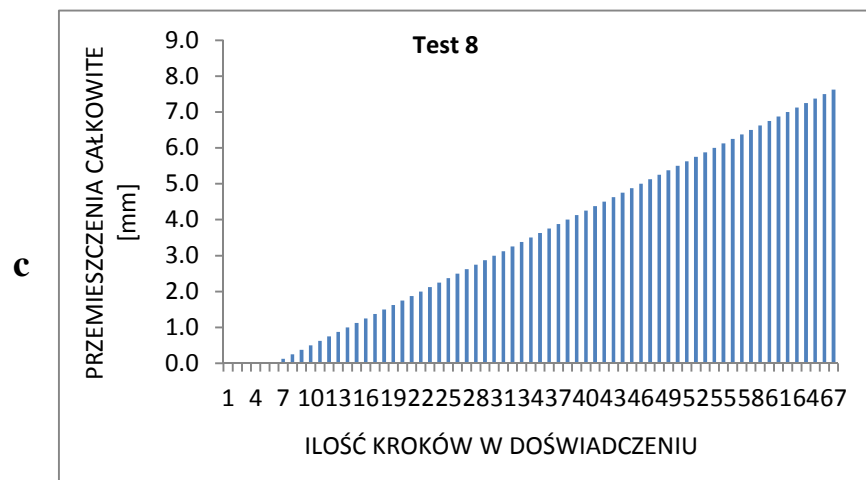
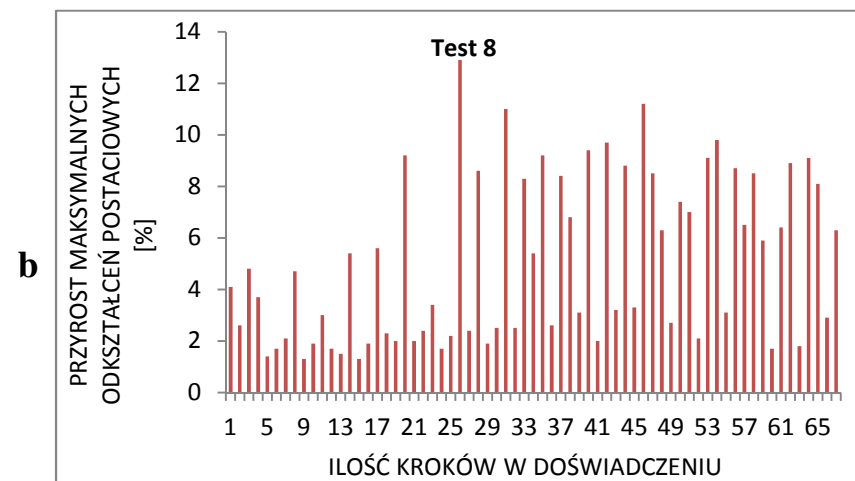
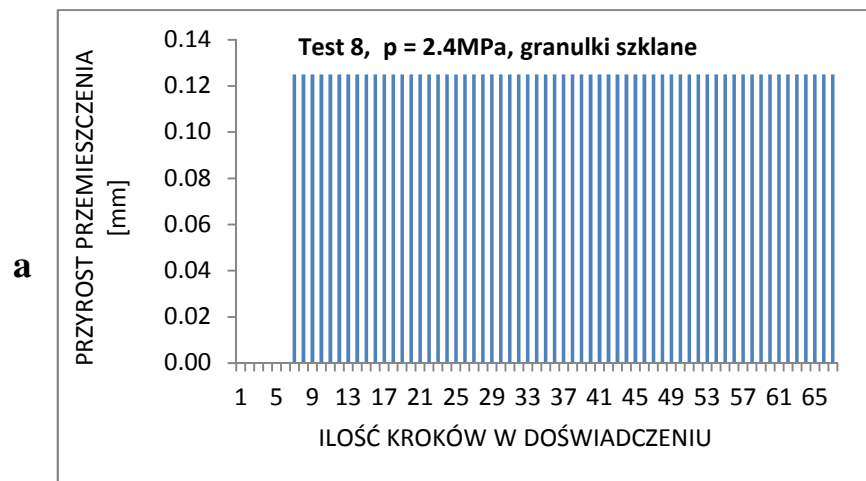
Rys.5.17. Test 5 - maksymalne odkształcenia postaciowe wewnątrz pasma ścinania, wywołane przemieszczeniem ścianki: **a)** przyrosty przemieszczeń ścianki w poszczególnych krokach doświadczenia, **b)** przyrosty odkształceń postaciowych w poszczególnych krokach doświadczenia, **c)** sumaryczne przemieszczenie ścianki po danej liczbie kroków doświadczenia, **d)** suma maksymalnych odkształceń postaciowych po danej liczbie kroków doświadczenia.



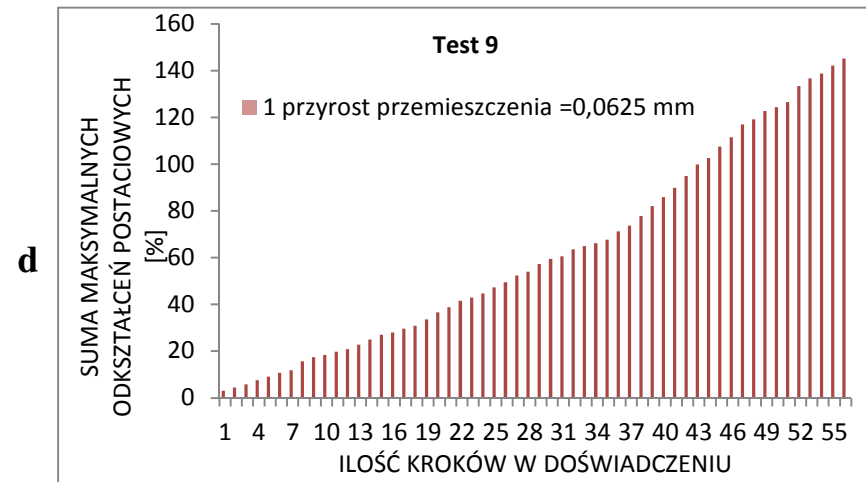
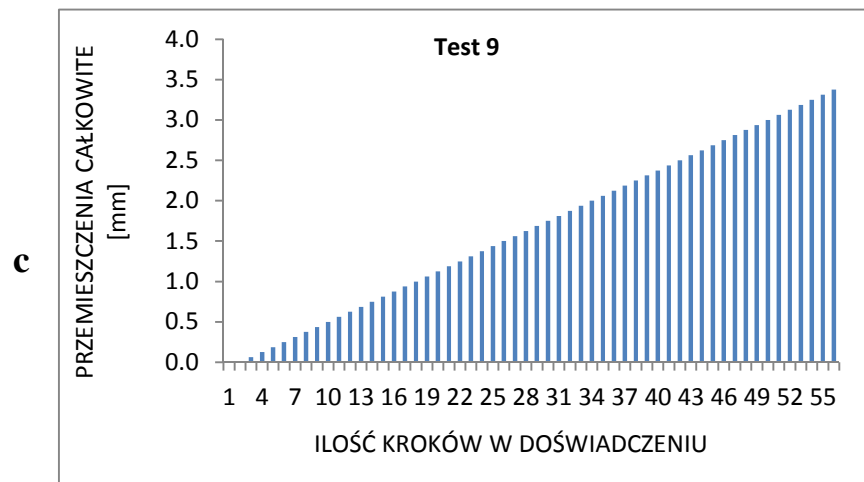
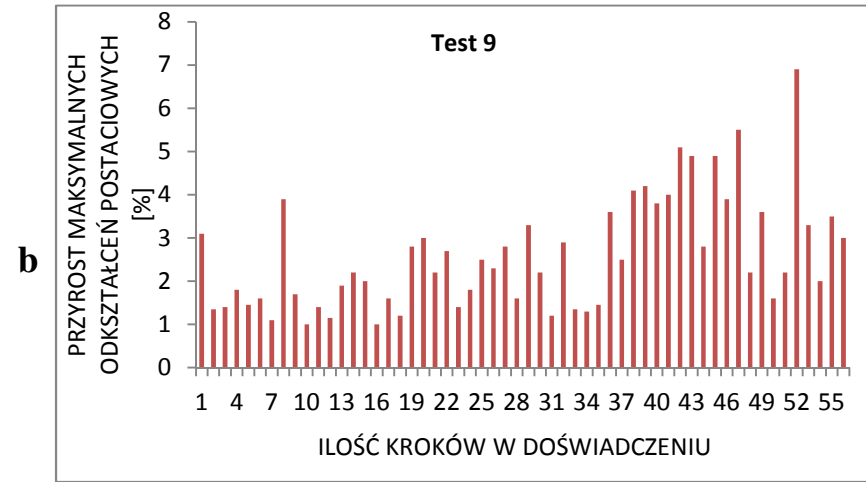
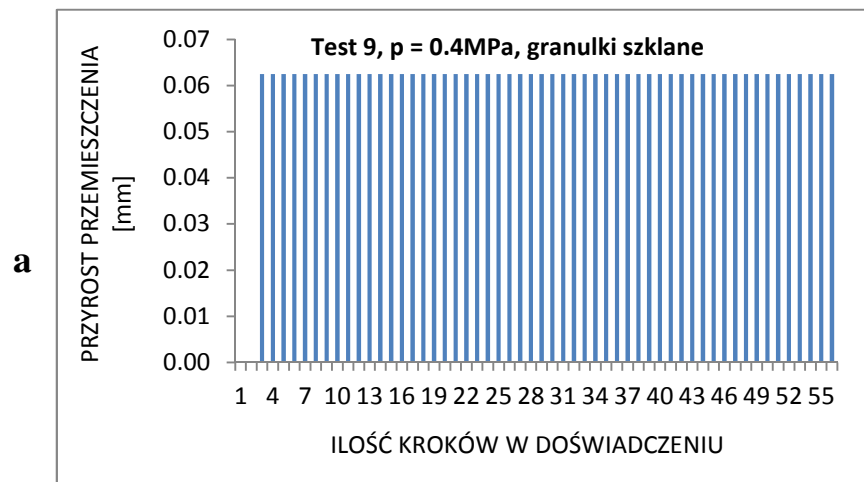
Rys.5.18. Test 6 - maksymalne odkształcenia postaciowe wewnątrz pasma ścinania, wywołane przemieszczeniem ścianki: **a)** przyrosty przemieszczeń ścianki w poszczególnych krokach doświadczenia, **b)** przyrosty odkształceń postaciowych w poszczególnych krokach doświadczenia, **c)** sumaryczne przemieszczenie ścianki po danej liczbie kroków doświadczenia, **d)** suma maksymalnych odkształceń postaciowych po danej liczbie kroków doświadczenia.



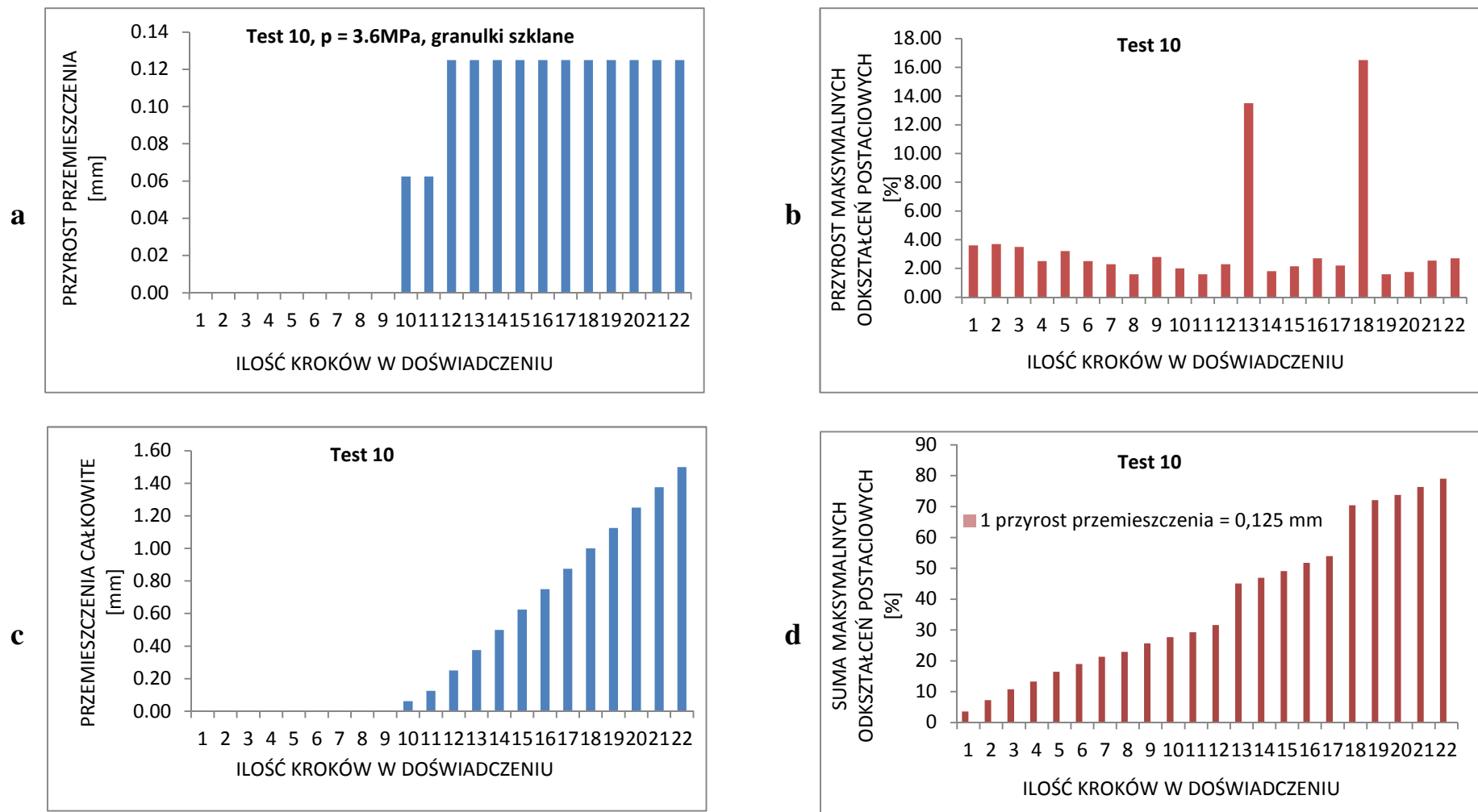
Rys.5.19. Test 7 - maksymalne odkształcenia postaciowe wewnątrz pasma ścinania, wywołane przemieszczeniem ścianki: **a)** przyrosty przemieszczeń ścianki w poszczególnych krokach doświadczenia, **b)** przyrosty odkształceń postaciowych w poszczególnych krokach doświadczenia, **c)** sumaryczne przemieszczenie ścianki po danej liczbie kroków doświadczenia, **d)** suma maksymalnych odkształceń postaciowych po danej liczbie kroków doświadczenia.



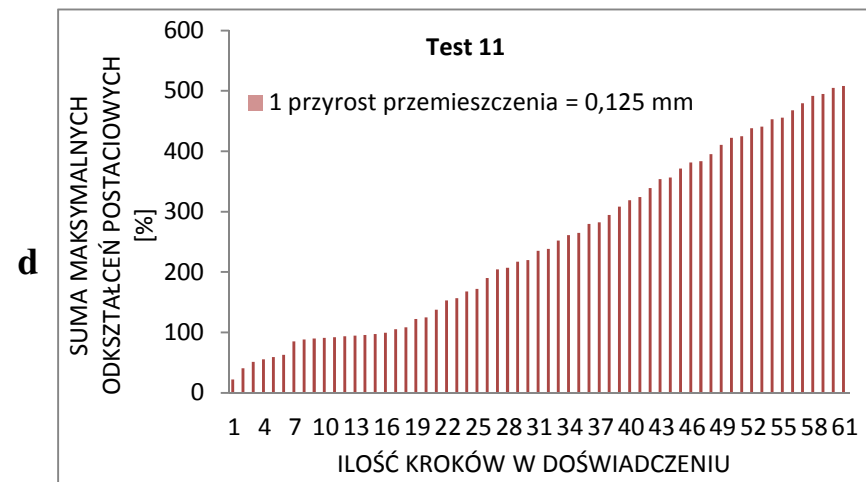
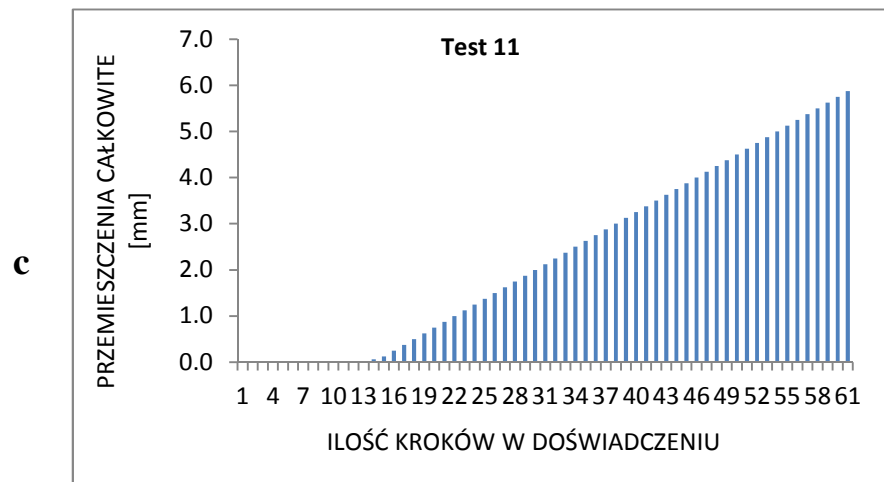
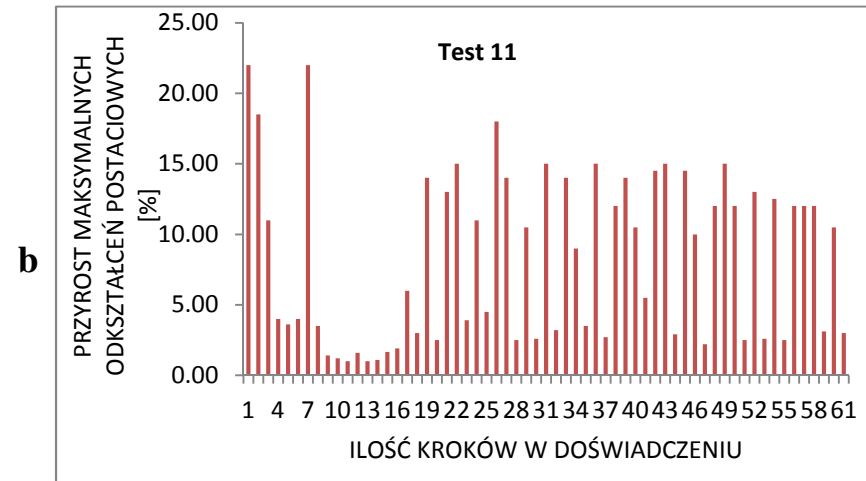
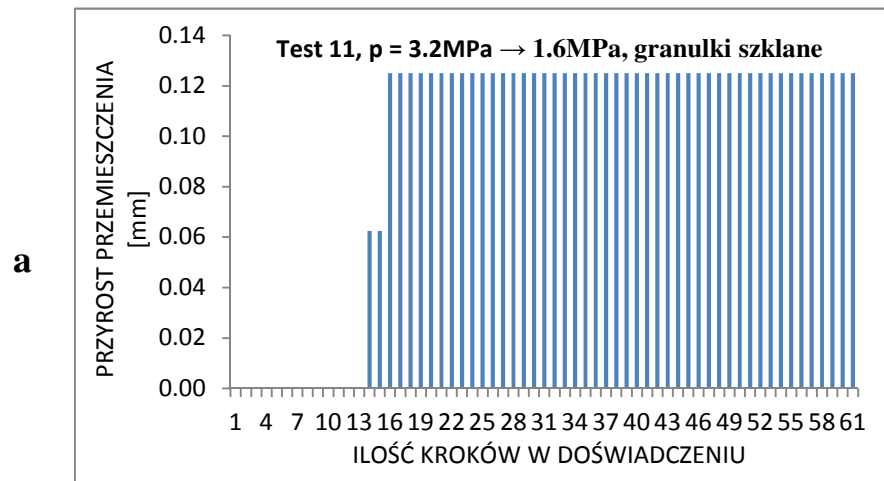
Rys.5.20. Test 8 - maksymalne odkształcenia postaciowe wewnątrz pasma ścinania, wywołane przemieszczeniem ścianki: **a)** przyrosty przemieszczeń ścianki w poszczególnych krokach doświadczenia, **b)** przyrosty odkształceń postaciowych w poszczególnych krokach doświadczenia, **c)** sumaryczne przemieszczenie ścianki po danej liczbie kroków doświadczenia, **d)** suma maksymalnych odkształceń postaciowych po danej liczbie kroków doświadczenia.



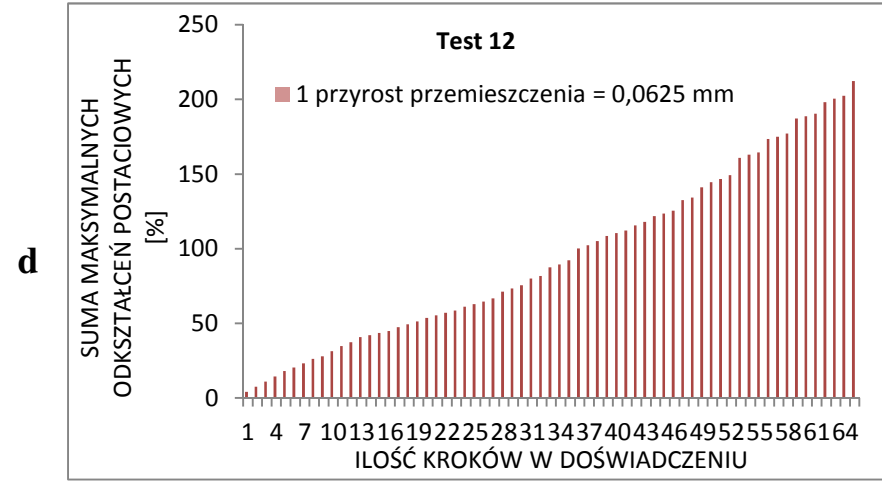
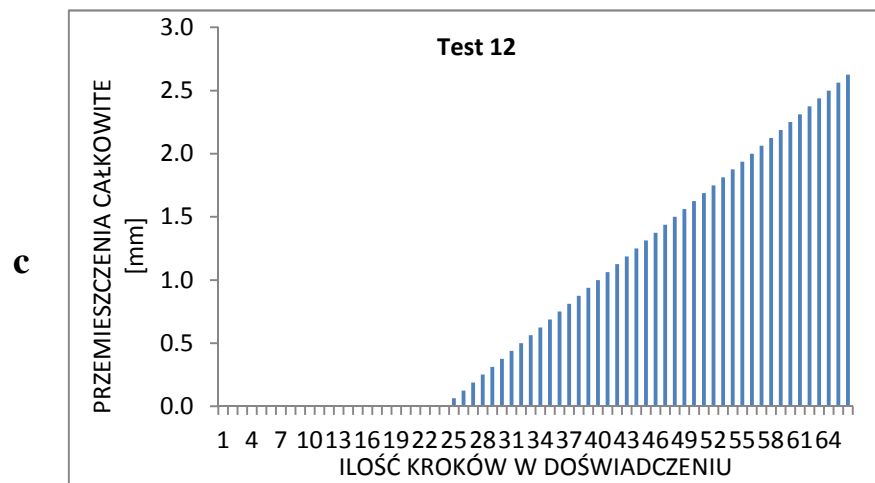
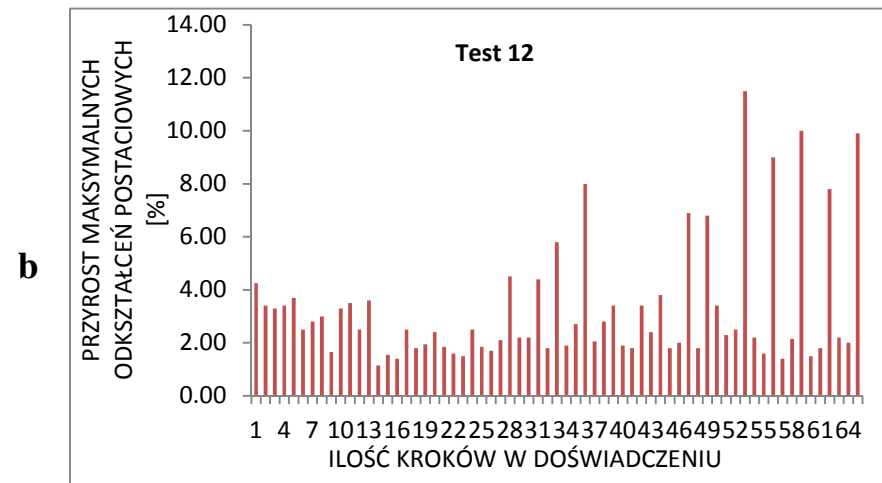
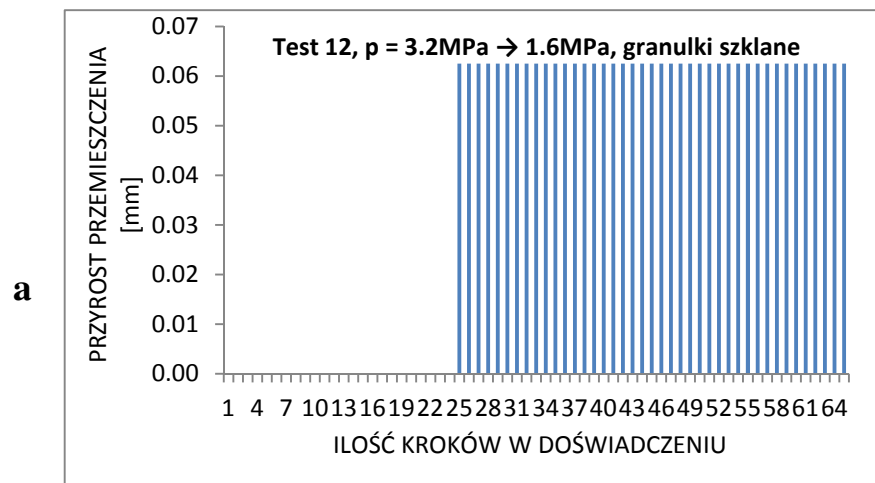
Rys.5.21. Test 9 - maksymalne odkształcenia postaciowe wewnątrz pasma ścinania, wywołane przemieszczeniem ścianki: **a)** przyrosty przemieszczeń ścianki w poszczególnych krokach doświadczenia, **b)** przyrosty odkształceń postaciowych w poszczególnych krokach doświadczenia, **c)** sumaryczne przemieszczenie ścianki po danej liczbie kroków doświadczenia, **d)** suma maksymalnych odkształceń postaciowych po danej liczbie kroków doświadczenia.



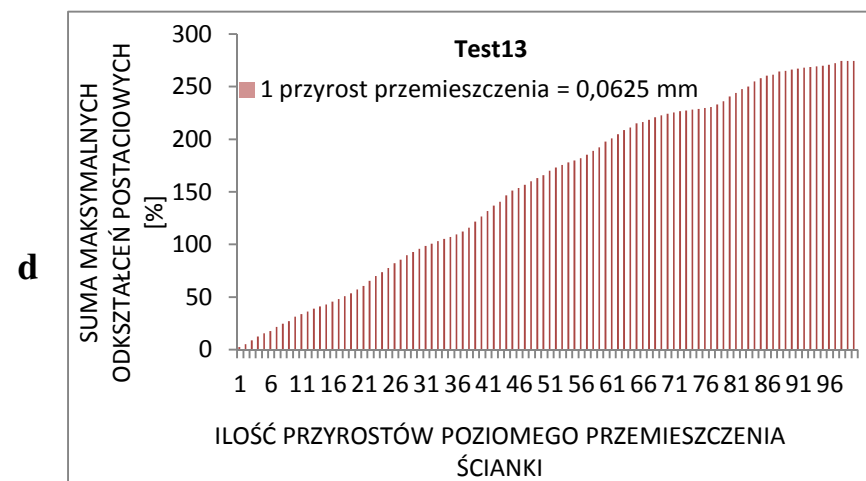
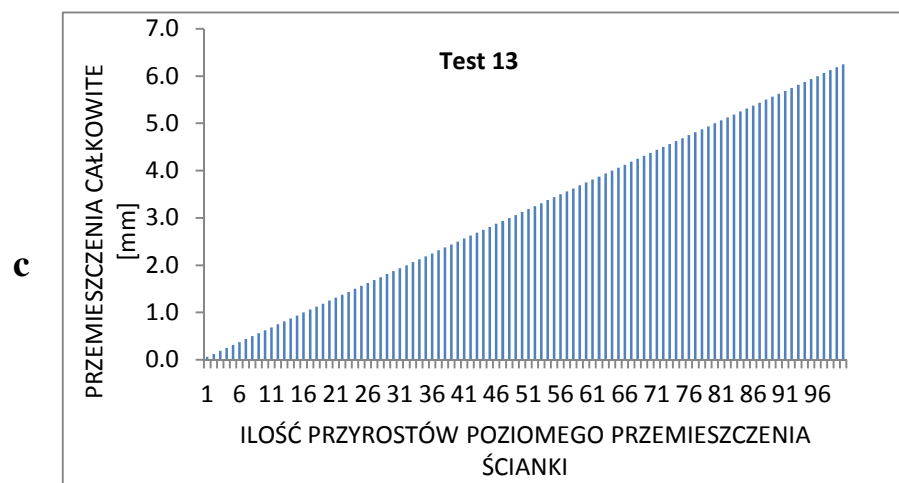
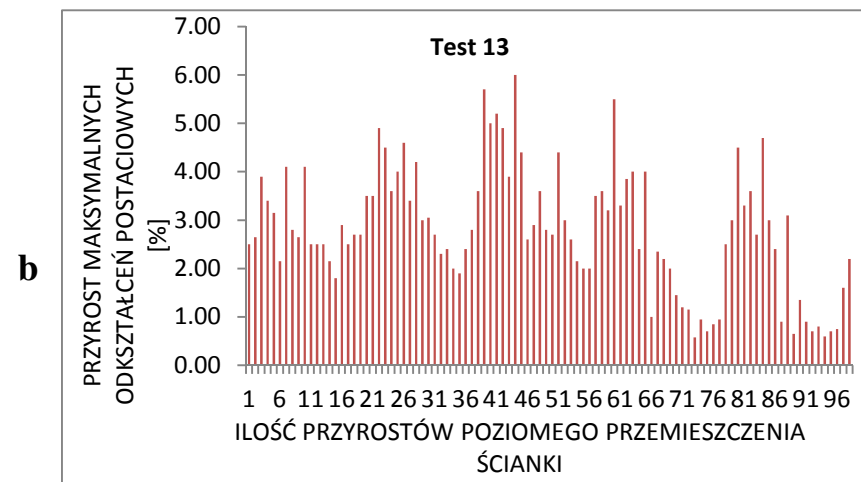
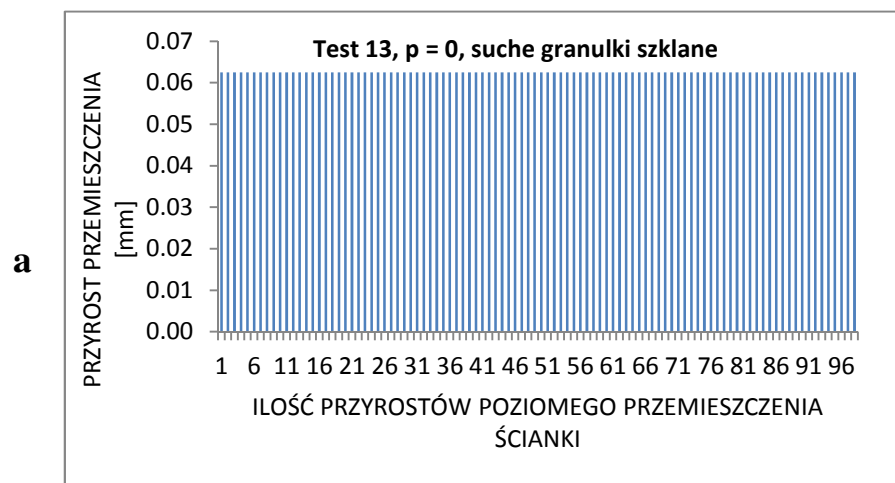
Rys.5.22. Test 10 - maksymalne odkształcenia postaciowe wewnątrz pasma ścinania, wywołane przemieszczeniem ścianki: **a)** przyrosty przemieszczeń ścianki w poszczególnych krokach doświadczenia, **b)** przyrosty odkształceń postaciowych w poszczególnych krokach doświadczenia, **c)** sumaryczne przemieszczenie ścianki po danej liczbie kroków doświadczenia, **d)** suma maksymalnych odkształceń postaciowych po danej liczbie kroków doświadczenia.



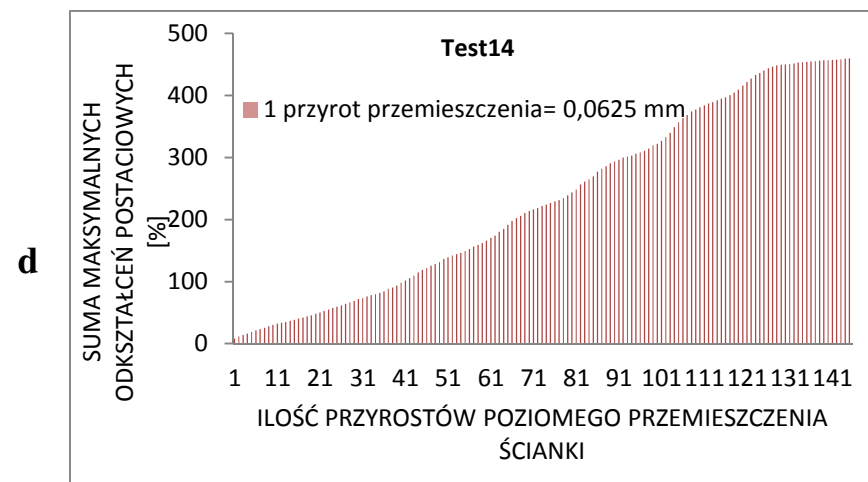
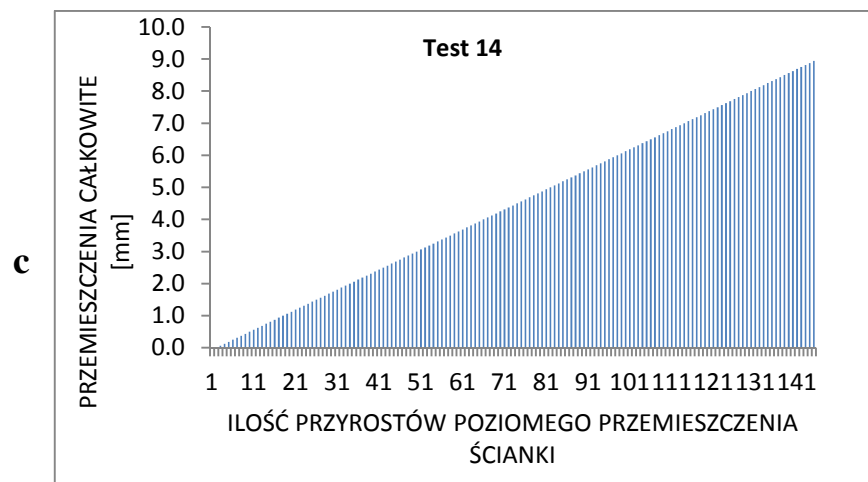
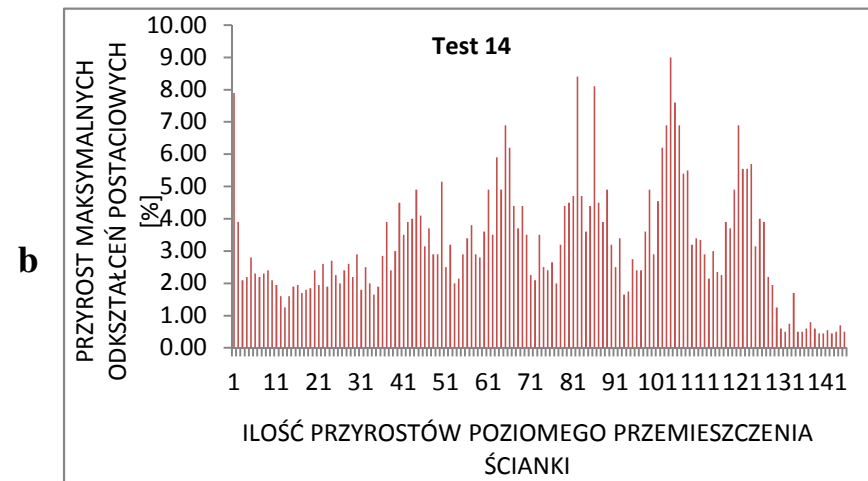
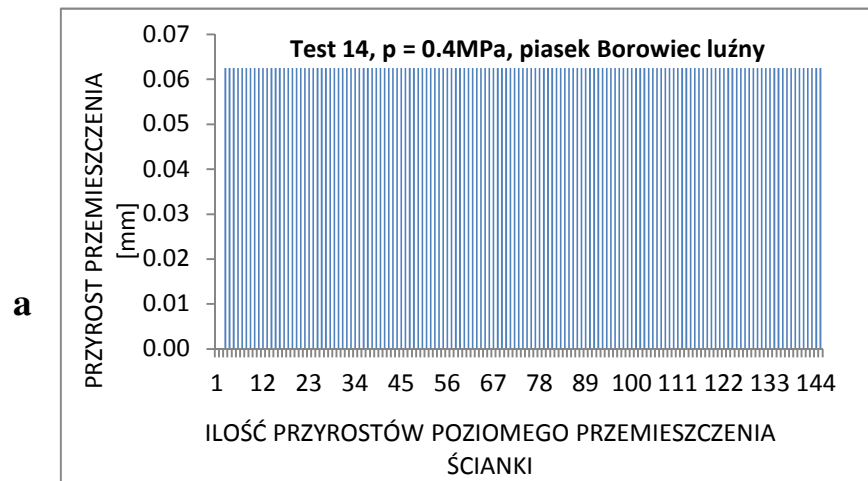
Rys.5.23. Test 11 - maksymalne odkształcenia postaciowe wewnątrz pasma ścinania, wywołane przemieszczeniem ścianki: **a)** przyrosty przemieszczeń ścianki w poszczególnych krokach doświadczenia, **b)** przyrosty odkształceń postaciowych w poszczególnych krokach doświadczenia, **c)** sumaryczne przemieszczenie ścianki po danej liczbie kroków doświadczenia, **d)** suma maksymalnych odkształceń postaciowych po danej liczbie kroków doświadczenia.



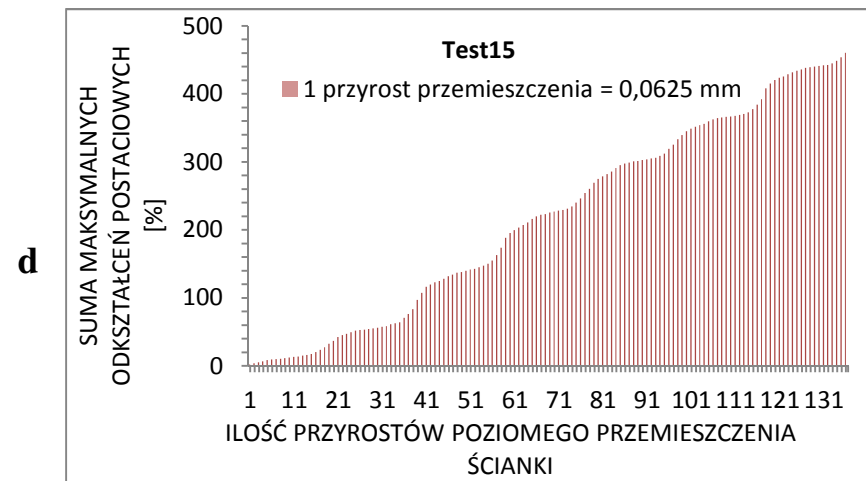
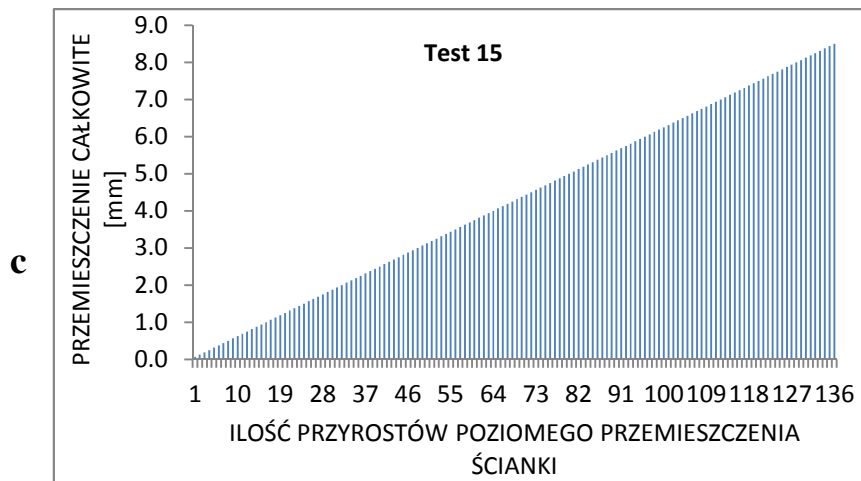
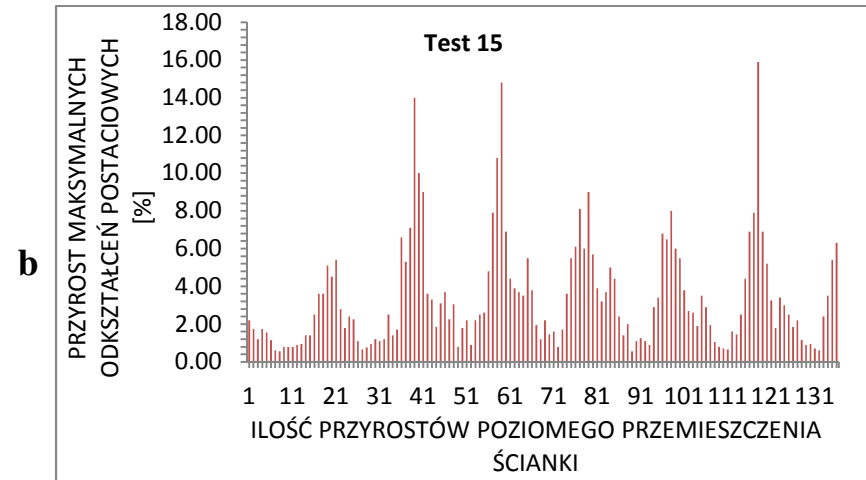
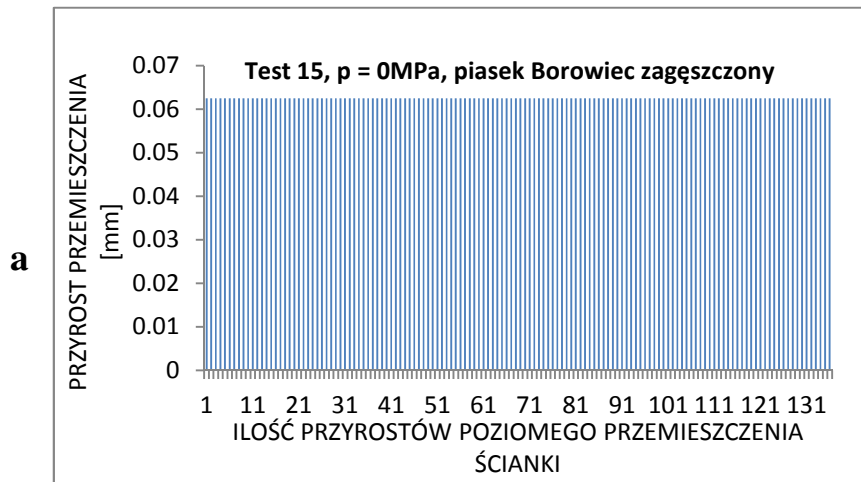
Rys.5.24. Test 12 - maksymalne odkształcenia postaciowe wewnątrz pasma ścinania, wywołane przemieszczeniem ścianki: **a)** przyrosty przemieszczeń ścianki w poszczególnych krokach doświadczenia, **b)** przyrosty odkształceń postaciowych w poszczególnych krokach doświadczenia, **c)** sumaryczne przemieszczenie ścianki po danej liczbie kroków doświadczenia, **d)** suma maksymalnych odkształceń postaciowych po danej liczbie kroków doświadczenia.



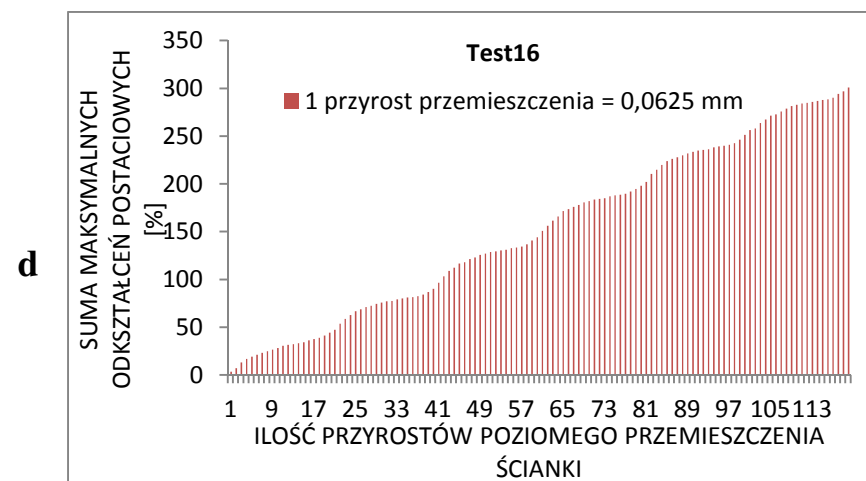
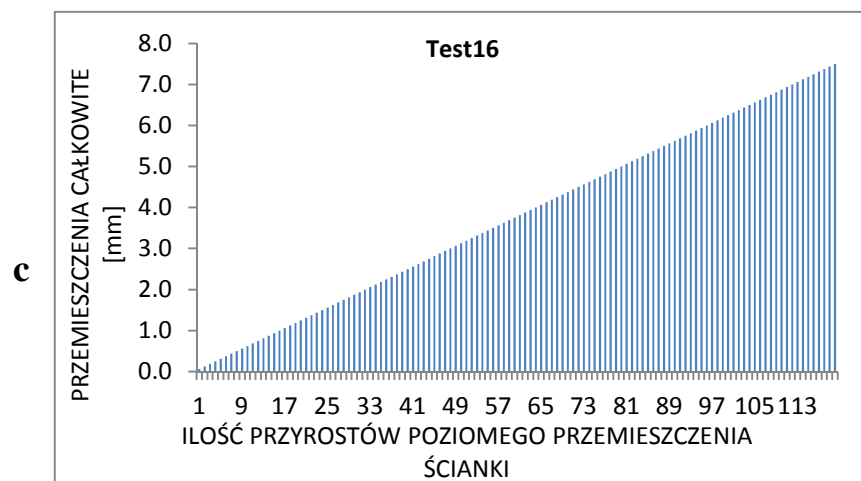
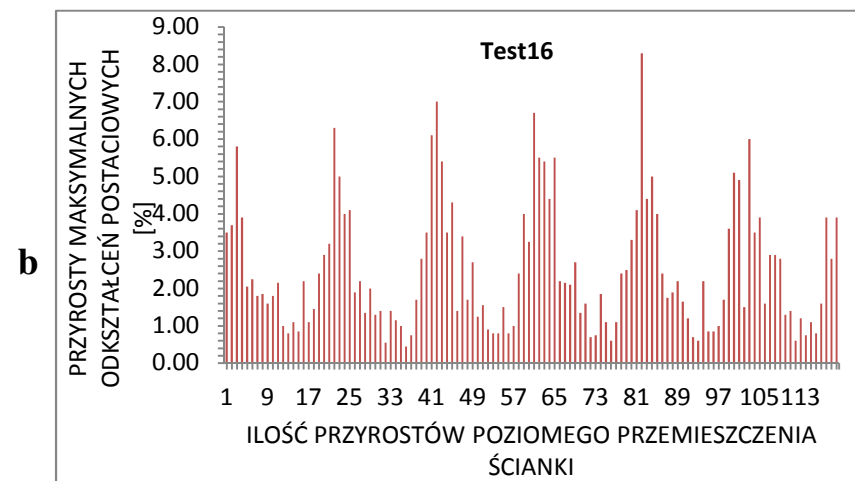
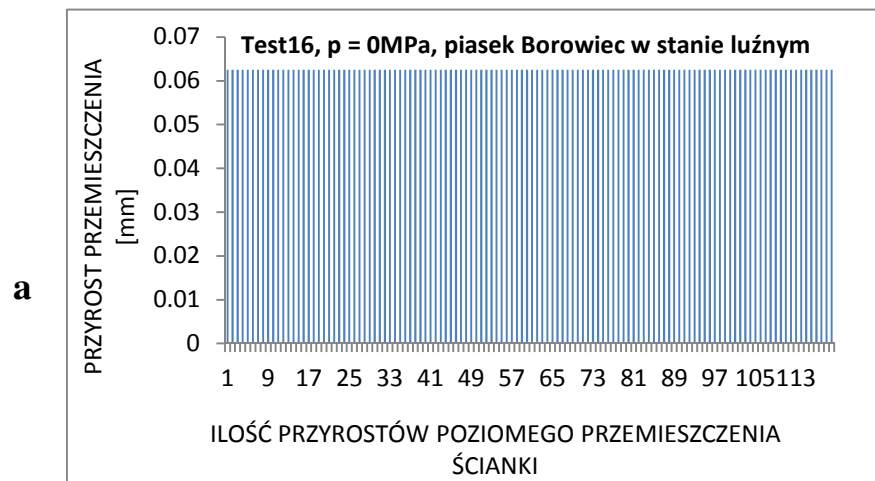
Rys.5.25. Test 13 - maksymalne odkształcenia postaciowe wewnątrz pasma ścinania, wywołane przemieszczeniem ścianki: **a)** przyrosty przemieszczeń ścianki w poszczególnych krokach doświadczenia, **b)** przyrosty odkształceń postaciowych w poszczególnych krokach doświadczenia, **c)** sumaryczne przemieszczenie ścianki po danej liczbie kroków doświadczenia, **d)** suma maksymalnych odkształceń postaciowych po danej liczbie kroków doświadczenia.



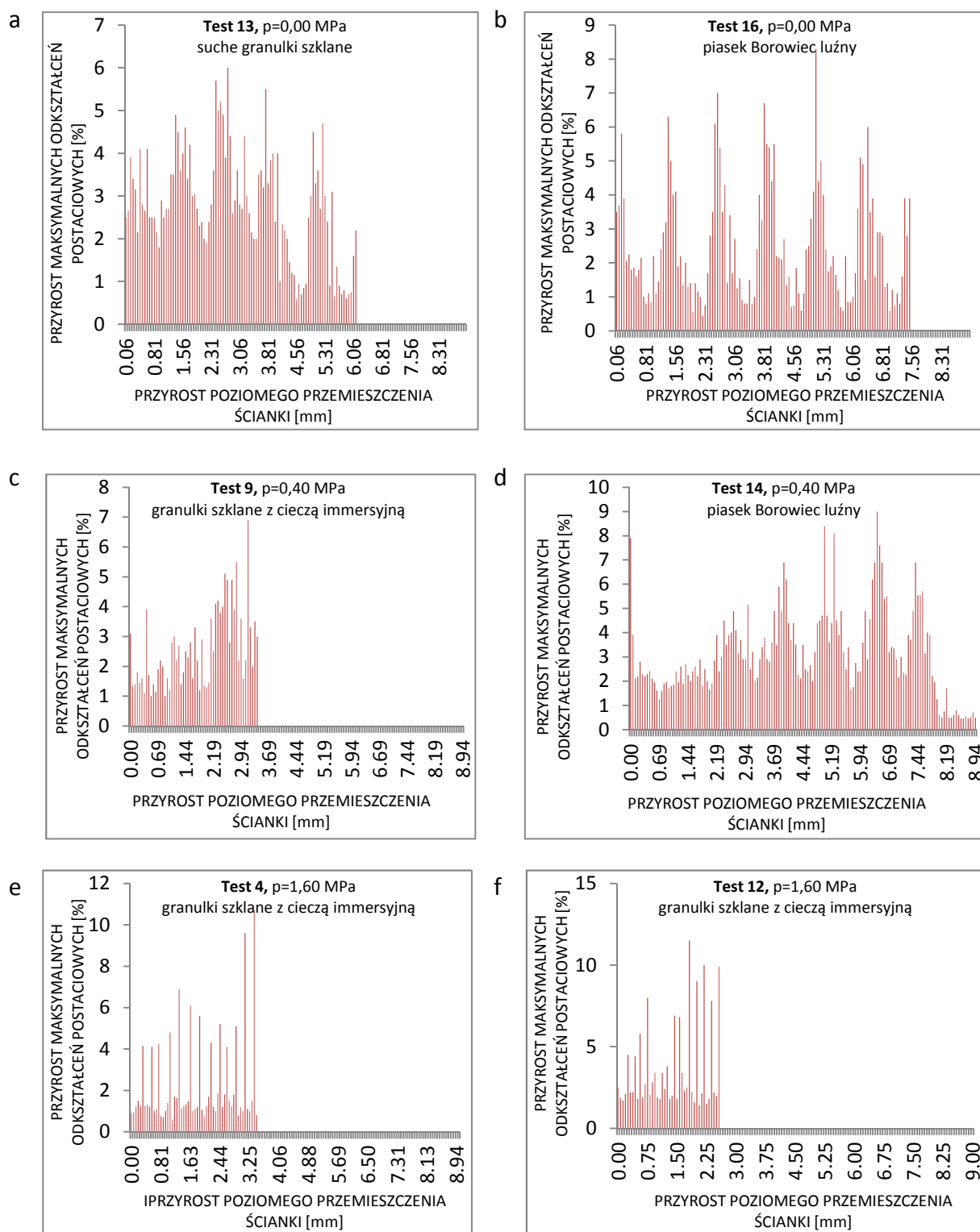
Rys.5.26. Test 14 - maksymalne odkształcenia postaciowe wewnątrz pasma ścinania, wywołane przemieszczeniem ścianki: **a)** przyrosty przemieszczeń ścianki w poszczególnych krokach doświadczenia, **b)** przyrosty odkształceń postaciowych w poszczególnych krokach doświadczenia, **c)** sumaryczne przemieszczenie ścianki po danej liczbie kroków doświadczenia, **d)** suma maksymalnych odkształceń postaciowych po danej liczbie kroków doświadczenia.



Rys.5.27. Test 15 - maksymalne odkształcenia postaciowe wewnątrz pasma ścinania, wywołane przemieszczeniem ścianki: **a)** przyrosty przemieszczeń ścianki w poszczególnych krokach doświadczenia, **b)** przyrosty odkształceń postaciowych w poszczególnych krokach doświadczenia, **c)** sumaryczne przemieszczenie ścianki po danej liczbie kroków doświadczenia, **d)** suma maksymalnych odkształceń postaciowych po danej liczbie kroków doświadczenia.

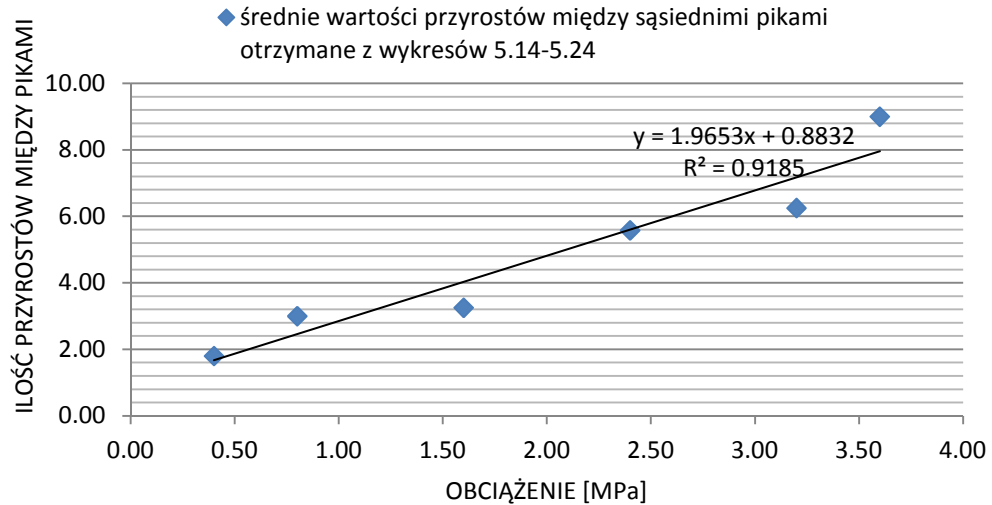


Rys.5.28. Test 16 - maksymalne odkształcenia postaciowe wewnątrz pasma ścinania, wywołane przemieszczeniem ścianki: **a)** przyrosty przemieszczeń ścianki w poszczególnych krokach doświadczenia, **b)** przyrosty odkształceń postaciowych w poszczególnych krokach doświadczenia, **c)** sumaryczne przemieszczenie ścianki po danej liczbie kroków doświadczenia, **d)** suma maksymalnych odkształceń postaciowych po danej liczbie kroków doświadczenia.



Rys.5.29. Przyrosty maksymalnych odkształceń postaciowych w zależności od całkowitego przemieszczenia ścianki, a) Test 13, b) Test 16, c) Test 9, d) Test 14, e) Test 4, f) Test 12.

Aproksymacja wyników doświadczeń



Rys.5.30. Zależność średniego minimalnego przemieszczenia potrzebnego do uaktywnienia epizodu silnej lokalizacji odkształceń w zależności od poziomu obciążenia zewnętrznego modelu.

Cykliczny charakter zmian wartości odkształcenia jest widoczny również na wykresie odkształceń całkowitych (Rys.5.16d) w postaci niewielkich regularnych skoków. Cykle o podobnym charakterze można zauważyć także w przypadku innych testów, zwłaszcza takich, które składały się ze stosunkowo dużej liczby kroków. Przykładem mogą być Testy 2 – 5 (obciążenie zewnętrzne $p = 1.6\text{MPa}$, Rys.5.14-5.17) czy Testy 6 i 7 ($p = 3.2\text{MPa}$, Rys.5.18 i 5.19). Z porównania Rys.5.14-5.28 można wyciągnąć wniosek, że odległość między sąsiednimi pikami jest funkcją wartości obciążenia zewnętrznego – im jest ono wyższe, tym większa wydaje się ta odległość. Obserwację tę potwierdza Rys.5.30, na którym odłożono średnią ilość przyrostów między sąsiednimi pikami maksymalnych odkształceń postaciowych, obliczoną na podstawie wykresów z Rys.5.14-5.24, w funkcji wielkości przyłożonego obciążenia. Jak widać z Rys.5.30, otrzymano wysoką liniową korelację między obiema wielkościami. Przedłużenie otrzymanej linii prostej do przecięcia z osią pionową daje 1 przyrost przemieszczenia ścianki dla braku obciążenia zewnętrznego ($p = 0\text{MPa}$), co dobrze zgadza się z wykresami otrzymanymi dla takiego przypadku, niezależnie od badanego materiału i jego stanu (Test 13, Rys.5.25, Test 14, Rys.5.27, Test 16, Rys.5.28). Testy te, które składały się z największej liczby kroków, pokazują dodatkowo cykliczne zmiany o większym zasięgu, charakteryzujące się okresem rzędu 20 jednostkowych przemieszczeń ścianki, bardzo wyraźne w przypadku Testów 15 i 16, a także 13 i 14. Wszystkie cztery testy składały się z dużej liczby kroków i wykonano je przy niskim obciążeniu 0.4 MPa lub jego całkowitym braku.

Aby ocenić, który z dwóch czynników jest odpowiedzialny za cykliczne zmiany o mniejszym zasięgu, maksymalne odkształcenia postaciowe dla testów 13 (granulki szklane, $p = 0$) i 14 (luźny piasek Borowiec, $p = 0$), testów 9 (granulki szklane, $p = 0.4\text{MPa}$) i 14 (luźny piasek Borowiec, $p = 0.4\text{MPa}$) oraz testów 4 i 5 (granulki szklane, $p = 1.6\text{MPa}$) wykreślono w tej samej skali (Rys.5.29). Widać z tego rysunku, że to wysokość obciążenia zewnętrznego decyduje o bardziej dyskretnym (z większymi odległościami między ostrymi pikami) charakterze deformacji wewnątrz pasma ścinania (Rys.5.29c i e). Jest to zrozumiałe, ponieważ wyższy poziom obciążenia oznacza silniejsze kontakty między ziarnami i większe tarcie między nimi – aby tarcie to mogło być pokonane, potrzebne jest większe przemieszczenie ścianki.

Porównanie Rys.5.29a i b oraz c i d z kolei pokazuje, że nie ma istotnej jakościowej różnicy pomiędzy zachowaniem ośrodka zbudowanego z granulek szklanych i piasku. Jedynie dla piasku luźnego bez obciążenia zewnętrznego obserwuje się stosunkowo niższy poziom ‘tła’ (Rys.5.29b i 5.28b), co daje wyjątkowo regularną zmienność widoczną bardzo wyraźnie również w przypadku odkształceń całkowitych (Rys.5.28d).

Rys.5.29e i f natomiast, odpowiadający dwóm testom na granulkach szklanych badanych w tych samych warunkach obciążenia (Test 4 i Test 12), pokazuje bardzo podobne wykresy maksymalnych odkształceń, co świadczy o dobrej powtarzalności wyników badań. Gdyby testy te mogły być prowadzone dłużej, być może wykazałyby również obecność cykliczności o większym okresie, ponieważ nawet w zakresie osiągniętych całkowitych przemieszczeń ścianki można dostrzec dwa maksima oddzielone od siebie co najmniej trzydziestoma jednostkowymi przemieszczeniami ścianki.

Dokładne wyjaśnienie zjawiska cykliczności odkształceń wewnątrz pasma ścinania w trakcie jednostajnych przemieszczeń ścianki wykracza poza zakres rozprawy i zostanie zbadane w ramach projektu NCN Nr DEC-2011/03/B/ST8/05865 zatytułowanego *Doświadczalne i teoretyczne badania zjawisk mikrostrukturalnych wewnątrz lokalizacji odkształceń w materiałach granulowanych*.

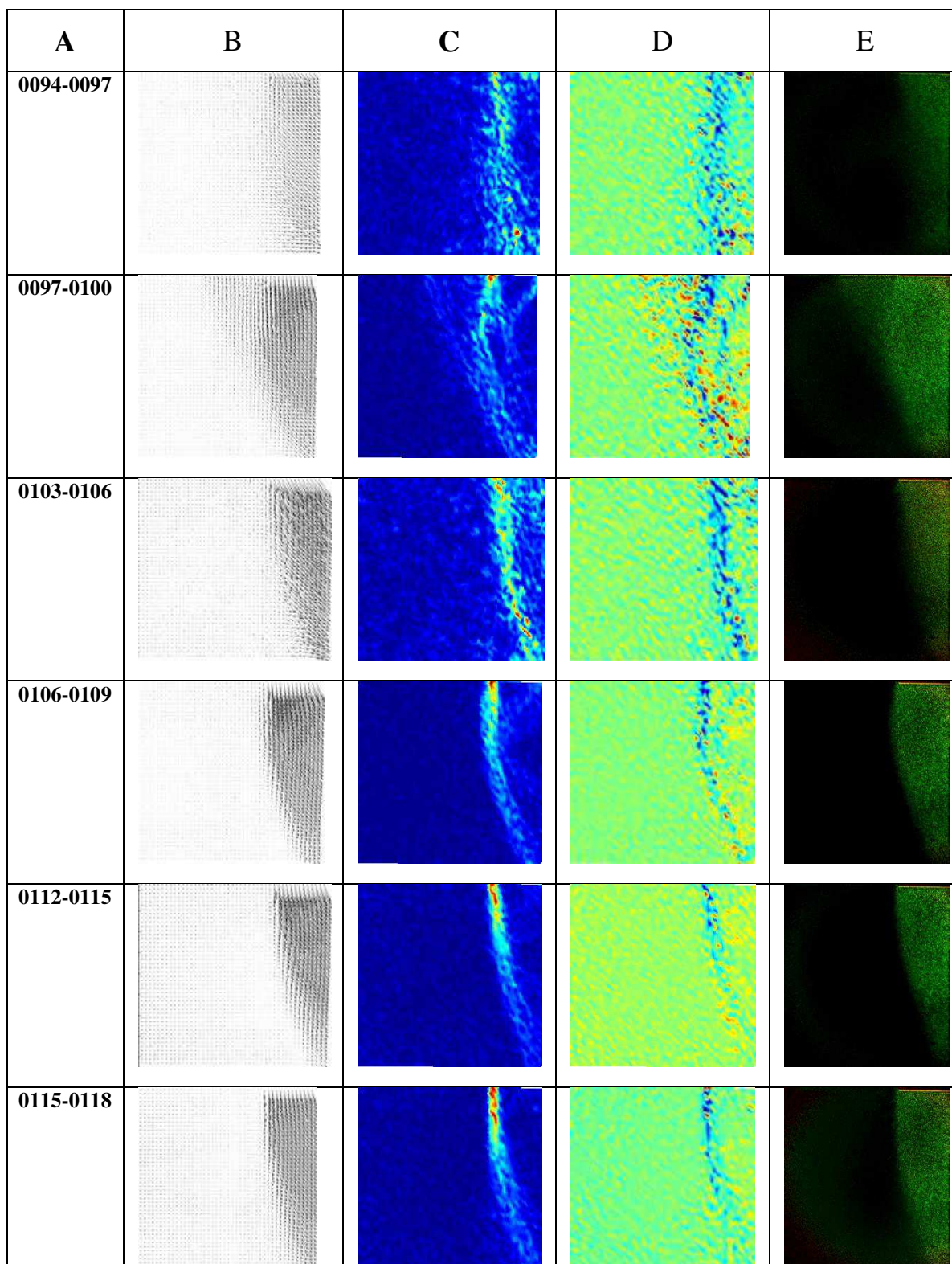
6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy badano pola deformacji ośrodka ziarnistego za ścianą oporową w trakcie jej prostej translacji w kierunku ‘od gruntu’ (parcie czynne) oraz, w mniejszym zakresie, geometryczny związek pomiędzy polem deformacji a wywołanymi przez tę deformację zmianami w polu naprężeń. W tym celu przeanalizowano różnymi metodami około 1000 zdjęć wykonanych w świetle spolaryzowanym i niespolaryzowanym, tworząc przy okazji bazę danych, która posłuży w przyszłości do dalszych badań.

Dla osiągnięcia celów założonych w rozprawie wykorzystano wyniki badań przeprowadzonych na fizycznym modelu konstrukcji oporowej w małej skali. Głównym narzędziem zastosowanym w pracy była metoda polegająca na połączeniu analizy obrazu i elastooptyki, zaproponowana przez Leśniewską i Muir Wooda (Leśniewska i Muir Wood, 2009, 2010, Muir Wood i Leśniewska, 2010). Oprócz tego do symulacji numerycznej niektórych badań zastosowano metodę elementów skończonych.

6.1. Pola odkształceń i naprężeń

Dla realizacji celów pracy wybrano testy, w których zastosowano najprostszy schemat ruchu ścianki – poziomą translację w kierunku ‘od gruntu’, ponieważ aktualnie dostępne metody pomiaru ‘pełnego pola’ (w tym metody analizy obrazu) umożliwiają rejestrację bardzo małych deformacji, które wcześniej uznano by za niemierzalne. W związku z tym wykorzystano doświadczenia, w których przyjęto bardzo małe (w porównaniu ze stosowanymi we wcześniejszych badaniach) przyrosty przemieszczeń ścianki, wynoszące ułamki milimetra. W pracy zastosowano metodykę badań, opisaną przez Leśniewską i Muir Wood’a (Leśniewska i Muir Wood, 2009, 2010, Muir Wood, Leśniewska, 2010). Polega ona na sprzężeniu techniki elastooptycznej z cyfrową korelacją obrazów (DIC), co umożliwia rezygnację z wprowadzania do badanej próbki markerów i otrzymanie pola przemieszczeń i odkształceń na podstawie naturalnej tekstury obrazu, przy jednoczesnym niezależnym zapisie pola naprężeń. Jednym z celów pracy było znalezienie związków geometrycznych pomiędzy polami odkształceń i naprężeń (sił działających między ziarnami) lub elementów wspólnych w tych polach. W tym celu posłużono się operacjami arytmetycznymi na obrazach cyfrowych, wykonanych w świetle spolaryzowanym kołowo (Leśniewska i Muir Wood, 2009 oraz Muir Wood i Leśniewska, 2010).



Rys.6.1. Porównanie pól przemieszczeń (A), odkształceń postaciowych (B) i odkształceń objętościowych (C) ze zmianami w polu naprężeń (D) dla różnych etapów Testu 2.

Okazało się, że obraz siatki 'łańcuchów obciążonych ziaren' ma do tego stopnia charakter dyskretny, że nie może być analizowany automatycznie, przy pomocy aktualnie dostępnych metod segmentacji obrazu, ponieważ dają one wyniki pozbawione sensu. Podjęto w związku z tym prace nad stworzeniem własnego algorytmu analizy, ale są one jeszcze w początkowym stadium. W takiej sytuacji jedynym sposobem skorelowania pól odkształceń i naprężeń jest wizualne porównanie map odkształceń otrzymanych metodą DIC (PIV) z obrazami będącymi efektem prostych operacji arytmetycznych na zdjęciach wykonanych w świetle kołowo spolaryzowanym.

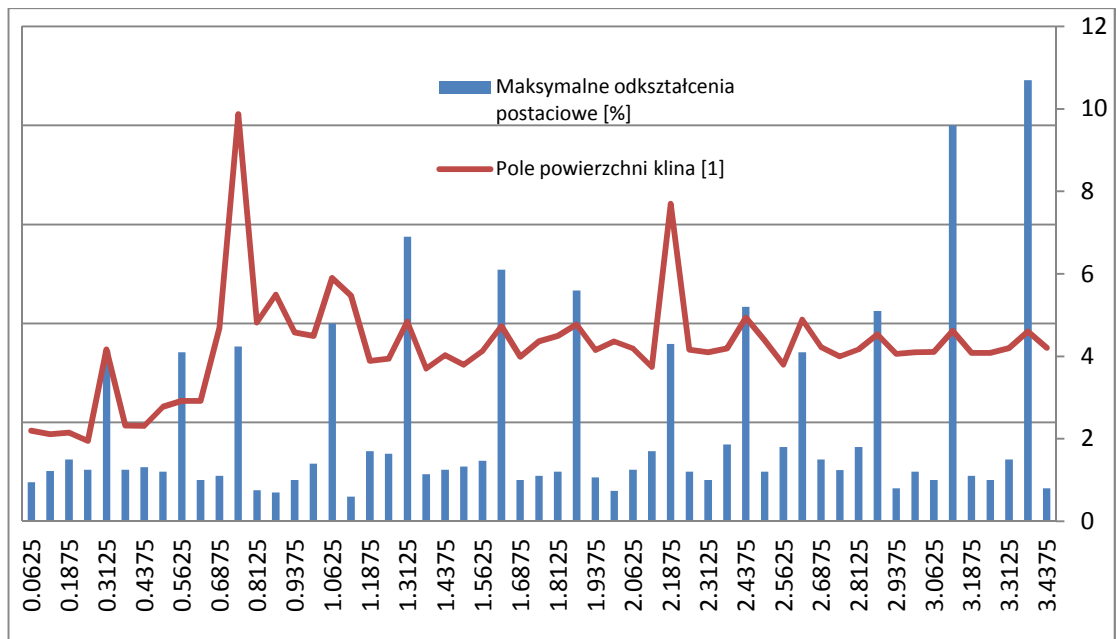
Przykłady takiego porównania można znaleźć na Rys.6.1, gdzie w kolumnie A zamieszczono numery kolejnych analizowanych par zdjęć, wykonanych w świetle zwykłym, w kolumnie B otrzymane dla nich pola przemieszczeń, w kolumnie C i D wynikające z nich mapy odkształceń postaciowych i objętościowych, natomiast w kolumnie E otrzymany niezależnie obraz różnicy efektu elastoptycznego, wywołanej ruchem ścianki, otrzymany przez odjęcie pary zdjęć wykonanych w świetle spolaryzowanym.

Porównując kolumny C, D i E rysunku.6.1, który stanowi podsumowanie zasadniczej części rozprawy w formie graficznej, można stwierdzić, że istnieje ścisła geometryczna korelacja między polem naprężeń (kolumna E) i polami odkształceń (kolumny C i D) o charakterze odwrotnym: rejonom małych odkształceń na mapach deformacji (np. wewnątrz klina odłamu) odpowiadają w polu naprężenia rozjaśnione obszary wzrostu efektu elastoptycznego (wzrostu naprężeń), natomiast tam, gdzie zachodzi koncentracja odkształceń, pojawia się spadek naprężeń.

Dodatkowo można zauważyć, że pasma ścinania przeniesione na obraz pola naprężeń leżałyby w strefie zaciemnionej (kolor czarny), co świadczy o tym, że stanowią one obszary odciążenia materiału.

6.2. Odkształcenia we wnętrzu pasma ścinania

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



Rys.6.2. Test 4 – porównanie względnego pola powierzchni klina odłamu w poszczególnych krokach doświadczenia z odpowiadającą im wartością maksymalnych odkształceń postaciowych.

Stosując taką miarę stwierdzono, że jest ona wystarczająca do zilustrowania zachodzących na kilku poziomach efektów cyklicznej deformacji, która była możliwa do zaobserwowania dzięki zastosowaniu w badaniach modelowych małych przyrostów przemieszczeń ścianki.

Rys.6.2 pokazuje, na przykładzie Testu 4, że istnieje wyraźna korelacja między pikami maksymalnych odkształceń postaciowych wewnątrz pasma ścinania (niebieskie słupki), a polem powierzchni ograniczonego tym pasmem klina odłamu (czerwona linia). Praktycznie każdy skok pola powierzchni klina pokrywa się z pikiem maksymalnego odkształcenia postaciowego, co oznacza, że każdemu epizodowi lokalizacji odkształceń towarzyszy niewielka dylatacja klina jako całości.

6.3. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych analiz wyciągnięto następujące, bardziej szczegółowe wnioski:

- Obserwacja mechanizmów deformacji w zakresie małych przemieszczeń pozwala na uchwycenie krótkotrwałych schematów lokalizacji odkształceń, które nie są jeszcze wystarczająco zbadane.

- 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.
- Cyfrowa korelacja obrazu w połączeniu z cyfrową elastooptyką i analizą obrazu dają zupełnie nowe możliwości badania materiałów sypkich zarówno w skali makro, jak w skali mikro oraz w skali meso.

7. LITERATURA

Aben H., Guillemet C. (1992) *Photoelasticity of glass*. Springer, Berlin.

Adrian R.J. (1991), Particle imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Annual review of fluid mechanics*. Vol. 23: 261-304

Albaraki S., Antony J., Arowosola B. (2013), Visualising shear stress distribution inside flow geometries containing pharmaceutical powder excipients using photo stress analysis tomography and DEM simulations, *AIP Conference Proceedings 1542 (Powders and Grains 2013)*, doi: 10.1063/1.4812029

Allersma H.G.B. (1987), *Optical analysis of stress and strain in photoelastic particle assemblies*. Delft University of Technology The Netherlands

Arthur J.R.F., Dunstan T., Al-Ani Q.A.J.L., Assadi A. (1977), Plastic deformation and failure in granular media, *Geotechnique* 27, No. 1, 53-74.

Arthur J.R.F., James R.G., Roscoe K.H. (1964), The determination of stress fields during plane strain of sand mass, *Geotechnique* Vol. XIV, No. 4, December, 283-308.

Arthur J.R.F., Roscoe K.H. (1965), An examination of the edge effects in plane-strain model earth pressure tests, *Proc. 6th Int. Conf. on Soil Mech. Found. Engineering*, Canada, University of Toronto Press, Vol.II, 363-367.

Balevičius R., Kačianauskas R., Mróz Z., Sielamowicz I. (2008), Discrete-particle investigation of friction effect in filling and unsteady/steady discharge in three-dimensional wedge-shaped hopper, *Powder Technology* 187, 159–174

Balevičius R., Kačianauskas R., Mróz Z., Sielamowicz I. (2011), Analysis and DEM simulation of granular material flow patterns in hopper models of different shapes, *Advanced Powder Technology* 22, 226–235

- Balevičius R., Sielamowicz I., Mróz Z., Kačianauskas R.** (2012), Effect of rolling friction on wall pressure, discharge velocity and outflow of granular material from a flat-bottomed bin, *Particuology* 10, 672–682
- Bang S.** (1985), Active earth pressure behind retaining walls, *Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE*, 111, 407-412.
- Bigoni D., Hueckel T.** (1989), Loss of uniqueness and shear band in associative and non-associative plasticity, *2nd International Workshop on Numerical Methods for Localization and Bifurcation of Granular Bodies*, Eds. E. Dembicki, G. Gudehus, Z. Sikora, 31-40.
- Bransby P.L., Milligan G.W.E.** (1975), Soil deformation near cantilever sheet pile walls, *Geotechnique* 25, No. 2, 175-195.
- Bolton M.D., Powrie W.** (1987), The collapse of diaphragm walls retaining clay, *Geotechnique* 37, No. 3, 335-353.
- Caquot A., Kerisel J.** (1948), *Tables for the Calculation of Passive Pressures, Active Pressures and Bearing Capacity of Foundations*, Gauthier-Villars, Paris.
- Cheng Y.M.** (2003), Seismic lateral earth pressure coefficients for c- ϕ soils by slip line method, *Computers and Geotechnics* 30, 661-670.
- Clark A.H., Mort P., Behringer R.P.** (2012), Coarse graining for an impeller-driven mixer system. *Granular Matter* 14: 283–288, DOI 10.1007/s10035-011-0306-z
- Coulomb C. A.** (1773), *Essai sur une Application des regles des Maximis et Minimis a quelques Problemes de Statique, relatives a l'Architecture*. Editions Science et Industrie, Paris. Reprint 1971
- Dantu P.** (1957), Contribution a l'etude mecanique et geometrique des milieux pulverulents, *Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Vol. 1. 144.

- De Borst R.** (1988), Bifurcations in finite element with a non-associated flow law, *Int. Jnl Num. Anal. Methods in Geomechanics*, 12, 99-116
- Dereszkiewicz R.S.** (1975), *Elastooptyka: stan i rozwój polaryzacyjno-optycznych metod doświadczalnej analizy naprężeń*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1975
- Desrues J.** (1990), Shear band initiation in granular material: experimentation and theory, in *Geomaterials: Constitutive Equations and Modelling* (Edited by F. Darve), Elsevier Applied Science, London, 283-310
- Desrues J., Chambon R., Mokni M. and Mazerolle F.** (1996), Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography. *Geotechnique* 46, 529–546.
- Dijkstra J.** (2009), *On the Modelling of Pile Installation*, PhD Thesis, Delft University of Technology The Netherlands
- Drescher A. & De Josselin de Jong G.** (1972), Photoelastic verification of a mechanical model for the flow of a granular material. *J. Mech. Phys. Solids*
- Drescher A. (1975), Drescher A. (1976)**, An experimental investigation of flow rules for granular materials using optically sensitive glass particles. *Géotechnique*, Vol. 26, 591 –601
- Dyer M.R.** (1985), *Observation of the stress distribution in crushed glass with applications to soil reinforcement*, PhD Thesis, University of Oxford
- Ehlers & Volk,** (1998), On theoretical and numerical methods in the theory of porous media based on polar and non-polar elasto-plastic solid materials, *Int. J. Solids Structures*, Vol.35, Nos 34-35, pp 4597-4617
- Fang Y.-S., Ishibashi I.** (1986), Static earth pressure with various wall movements, *Jnl of Geotechnical Eng. Division ASCE*, 317-333.

Fang Y.-S., Chen T.-J., Wu B.-F. (1994), Passive earth pressures with various wall movements, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 120, No. 8, August, 1307-1323

Fang Y.-S., Ho Y.-C., Chen T.-J. (2002), Passive earth pressure with Critical State concept, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, Vol. 128, No. 8, August, 651-659.

Finno R.J., Harris W.W., Mooney M.A., Viggiani G. (1996), Strain localization and undrained steady state of sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 6, 462-473.

Finno R.J., Harris W.W., Mooney M.A., Viggiani G. (1997), Shear bands in plane strain compression of loose sand, *Geotechnique* 47, No.1, 149-165.

Ganghoffer J.F., Sluys L.J., de Borst R. (1999), A reappraisal of non-local mechanics, *Eur. J. Mech. A/Solids* 18, 17-46.

Greco V.R. (2006a), Lateral earth pressure due to backfill subject to a strip of surcharge, *Geotechnical and Geological Engineering* 24, 615-636, DOI 10.1007/s10706-005-2009-x

Greco V.R. (2006b), Analytical calculation of active thrust due to partially submerged backfill, *Geotechnique* 56, No. 10, 701-704.

Greco V.R. (2007), Analytical earth thrust on walls with bilinear backface, *Geotechnical Engineering* 160, January, 23-29.

Gudehus, G. and Schwing, E. (1986), Standsicherheit historischer Stützwände. *Internal Report of the Institute of Soil and Rock Mechanics*, University Karlsruhe.

Hazarika H., Matsuzawa H. (1996), Wall displacement modes dependent active earth pressure analyses using smeared shear band method with two bands, *Computers and Geotechnics*, Vol.19, No. 3, 193-219.

Harr M.E. (1966), Foundations of Theoretical Soil Mechanics, *McGraw-Hill Book Co.*

Horodecki G.A. (1998), *Parcie gruntu na ścianę szczelinową wywołane obciążeniem dodatkowym w gruncie*, praca doktorska, Politechnika Gdańska

Houlsby G. T. and Wroth C. P. (1982), Direct solution of plasticity problems in soils by the method of characteristics. *Proc. 4th Int. Conf. on Num. Meth. in Geomech.*, Edmonton, Canada, 1059–1071.

Ichihara M., Matsuzawa H. (1973), Application of plane strain test to earth pressure, *Proc. 8th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Vol.1, 885-901

Ichikawa Y., Ito T., Mróz Z. (1990), A strain localization condition applying multi-response theory, *Ingenieur-Archiv*, 60, 542-552

Ikeda K., Murota K. (1997), Recursive bifurcation as sources of complexity in soil shearing behavior, *Soils and Foundations*, Vol. 37, No. 3, 17-29, September 1997.

Imposimato S., Nova R. (1998), An investigation on the uniqueness of the incremental response of elastoplastic models for virgin sand, *Mechanics of Cohesive and Frictional Materials*, Vol. 3, 65-87.

Ingold T.S. (1982), *Reinforced Earth*, Thomas Telford, London

Izbicki R., Mróz Z. (1976), *Metody nośności granicznej w mechanice gruntów i skał*, PWN, Warszawa 1976

James R.G., Bransby P.L. (1970), Experimental and theoretical investigations of a passive earth pressure problem, *Geotechnique* 20, No.1, 17-37.

James R.G., Bransby P.L. (1971), A velocity field for some passive earth pressure problems, *Geotechnique* 21, No. 1, 61-83.

Jewell R.A. (1990), Revised design charts for steep reinforced slopes, *Reinforced Embankments, Theory and Practice*, Thomas Telford, London, 1-30.

- Jones C.J.F.P.** (1996), *Earth Reinforcement and Soil Structures*, Thomas Telford, London.
- Khen R., Desoyer T., Dragon A.** (1998), Objective localization criterion and behavior for finite deformation plasticity – a Lagrangian formulation, *Archive of Applied Mechanics* 68, 85-102.
- Kulczykowski M.** (2002), *Nośność graniczna i strefa zniszczenia konstrukcji z gruntu zbrojonego, Wpływ rozkładu zbrojenia*, Wydawnictwo IBW PAN w Gdańsku.
- Lade P.V., Yamamuro J.A., Skyers B.D.** (1996), Effects of shear band formation in triaxial extension tests, *Geotechnical Testing Jnl*, GTJODJ, Vol. 19, No. 4, 398-410.
- Lancelotta R.** (2002), Analytical solution of passive earth pressure, *Geotechnique* 52, No. 8, 617-619.
- Lee I.K., Herington J.R.** (1972), A theoretical study of the pressures acting on a rigid wall by a sloping earth or rock fill, *Geotechnique* 22, No.1, 1-26.
- Leśniewska D.** (2000), *Analysis of shear band pattern formation in soil*, Wydawnictwo IBW PAN w Gdańsku.
- Leśniewska D., Mróz Z.** (2000), Limit equilibrium approach to study the evolution of shear band systems in soils, *Geotechnique*, Vol. 50, No. 5, October, 521-536
- Leśniewska D., Mróz Z.** (2001), : Study of evolution of shear band systems in sand retained by flexible wall, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 25, nr 9, s. 909-932
- Leśniewska D.** (2001), : Analiza układów pasm ścinania w ośrodku gruntowym. *Działalność Naukowa PAN, Wybrane Zagadnienia*, nr 12, s. 116-118
- Leśniewska D., Mróz Z.** (2003), Shear bands in soil deformation processes. W: *Proceedings of the International Workshop on Bifurcations and Instabilities in Geomechanics*, IWBI 2002. Red. J. F. Labuz, A. Drescher, Lisse: A.A. Balkema, 2003, 109-119

Leśniewska D., Skłodowski M. (2005), Photoelastic investigation of localization phenomena in granular materials, *Powders and Grains 2005. Proceedings of the 5th International Conference on Micromechanics of Granular Media*, Red. R. Garcia-Rojo, H. J. Herrmann, S. McNorman, Rotterdam: A.A. Balkema, Vol. 1, s. 69-72

Leśniewska D., Muir Wood D. (2009), Observations of stresses and strains in a granular material, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 135, No. 9, 1038-1054

Leśniewska D., Muir Wood D., Pietrzak M. (2009), Particle scale features in shearing of glass ballotini, *Powders and Grains 2009, Proceedings of the 6th International Conference on Micromechanics of Granular Media*, Red. Masami Nakagawa, Stefan Luding, New York: American Institute of Physics, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1145, s. 335-338

Leśniewska D., Muir Wood D. (2010), Photoelastic and photographic study of a granular material, *Geotechnique*, Vol. 60, doi: 10.1680/geot.2010.60.00.1

Leśniewska D., Muir Wood D. (2011), 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

Maciejewski J. (2008), *Analiza procesów oddziaływania narzędzi maszyn roboczych na spójne ośrodki gruntowe*, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Malesiński K., Zadroga B. (2008), *Stateczność fundamentów bezpośrednich posadowionych na zboczu z gruntu zbrojonego*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej

Matsuzawa H., Hazarika H. (1996), Analyses of active earth pressure against rigid retaining wall subjected to different modes of movement, *Soils and Foundations* Vol. 36, No. 3, 51-65, September, 51-65.

Milligan G.W.E., Bransby P.L. (1976), Combined active and passive rotational failure of a retaining wall in sand, *Geotechnique* 26, No. 3, 473-494.

- Milligan G.W.E.** (1983), Soil deformations near anchored sheet-pile walls, *Geotechnique* 33, No. 1, 41-55.
- Mróz Z., Maciejewski J.** (1994), Post-critical response of soils and shear band evolution, *Proc. of the Third International workshop on Localisation and Bifurcation Theory for soils and rocks*, Chambon, Desrues, Vardoulakis (eds), Balkema, Rotterdam, 19-32.
- Muir Wood D., Leśniewska D.** (2010), Stresses in granular materials, *Granular Matter*, Vol. 13, DOI 10.1007/s10035-010-0237-0
- Mühlhaus H.-B., Vardoulakis I.** (1987), The thickness of shear bands in granular materials, *Geotechnique* 37, No.3, 271-283.
- Mühlhaus H.-B., Oka F.** (1994), A gradient elasticity model for granular materials, *Proc. of the Third International workshop on Localisation and Bifurcation Theory for soils and rocks*, Chambon, Desrues, Vardoulakis (eds), Balkema, Rotterdam, 201- 209.
- Nathanail C.P.** (1996), Kinematic Analysis of Active/Passive Wedge Failure Using Stereographic Projection, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.* Vol.33, No.4, 405-407.
- Niedostatkiewicz M., Leśniewska D., Tejchman J.** (2010), *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
- Oda M., Kazama H.** (1998), Microstructure of shear bands and its relation to the mechanisms of dilatancy and failure of dense granular soils, *Geotechnique* 48, No. 4, 465-481.
- Oka F., Adachi T., Yashima A.** (1994), Instability of an elasto-viscoplastic constitutive model for clay and strain localization, *Mechanics of Materials*, 18, 119-129

Pietruszczak S., Mróz Z. (1981), Finite element analysis of deformation of strain softening materials, *Int. Jnl Num. Methods in Engineering*, 17, 327-334

Papamichos E., Vardoulakis I. (1995), Shear band formation in sand according to non-coaxial plasticity model, *Geotechnique* 45, No. 4, 649-661.

Pietrzak M., Leśniewska D. (2009), Modelowe badania elastooptyczne pól odkształceń w ośrodku sypkim za ścianą oporową. *Problemy geotechniczne i środowiskowe z uwzględnieniem podłoży ekspansywnych*. Red. Eugeniusz Dembicki, Maciej Kumor, Zbigniew Lechowicz, Bydgoszcz: Wydawnictwa Uczelniane UTP, s. 59-65

Pietrzak M., Leśniewska D. (2012), Failure evolution in granular material retained by rigid wall in active mode *Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. XXXIV, No. 4, str. 69-77*

Pietrzak M. (2013), Doświadczalne studium zachowania się muru oporowego: badania elastooptyczne. *Inwestycja w wiedzę motorem rozwoju innowacyjności w regionie – materiały konferencyjne (w druku)*

Plaxis Manual 2010 i 2011 2D

Podsiadło R. (1967), *Kryteria podobieństwa mechanicznego w mechanice gruntów, Rozprawy Hydrotechniczne, Zeszyt 20*

Rechenmacher A.L., Abedi S., Chupin O., Orlando A.D. (2011), Characterization of mesoscale instabilities in localized granular shear using digital image correlation, *Acta Geotechnica* 6:205–217, DOI 10.1007/s11440-011-0147-2

Roscoe K. H. (1970), The influence of strains in soil mechanics. *Geotechnique* 20, 129–170.

Rudnicki, J.W., Rice, J.R.(1975), Conditions for the localisation of deformation in pressure sensitive dilatant materials, *Jnl of Mechanics and Physics of Solids*, 23, 371-394

Saada A.S., Bianchini G.F., Liang L. (1994), Cracks, bifurcation and shear bands propagation in saturated clays, *Geotechnique*, 44, No. 1, 35-64.

Saada A.S., Liang L., Figueroa J.L., Cope C.T. (1999), Bifurcation and shear band propagation in sands, *Geotechnique* 49, No. 3, 367-385.

Schaeffer D.G., Shearer M. (1997), The influence of material non-uniformity preceding shear band formation in a model for granular flow, *Euro. Jnl of Applied Mathematics*, vol. 8, 457-483.

Sherif M.A., Ishibishi I., Lee C.D. (1982), Earth pressure against rigid retaining walls, *Jnl of Geotechnical Engineering Division ASCE*, 108, 679-695

Sherif M.A., Fang Y.-S., Sherif R.I. (1984), KA and K0 behind rotating and non-yielding walls, *Journal of Geotechnical Engineering ASCE*, Vol. 110, No. 1, January, 41-56.

Sielamowicz I., Błonski S., Kowalewski T.A. (2006), Digital particle image velocimetry (DPIV) technique in measurements of granular material flows, Part 2 of 3-converging hoppers, *Chemical Engineering Science* 61 5307 – 5317

Sielamowicz I., Czech M., Kowalewski T.A. (2010), Empirical description of flow parameters in eccentric flow inside a silo model, *Powder Technology* 198, 381–394

Sielamowicz I., Czech M., Kowalewski T.A. (2011a), Empirical analysis of eccentric flow registered by the DPIV technique inside a silo model, *Powder Technology* 212, 38–56

Sielamowicz I., Czech M., Kowalewski T.A. (2011b), Empirical description of granular flow inside a model silo with vertical walls, *Biosystems engineering* 108, 334-344

Simpson B., Wroth C.P. (1972), Finite elements computations for a model retaining wall in sand, *Proc. 5-th European Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Madrid, 85-93.

Sokołowski W.W., (1958), Statyka ośrodków sypkich, *Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1958*

Soubra A.-H., Macuh B. (2002), Active and passive earth pressure coefficients by a kinematical approach, *Geotechnical Engineering* 155, April, Issue 2, 119-131.

Suchecki W. (2003), Badania modelowe przepływów w aparatach procesowych z wykorzystaniem cyfrowej anemometrii obrazowej, *Gazeta Cukrownicza* 5, 134-136.

Suchecki W., Alabrudziński S. (2003), Metody korekty wykresów pól prędkości w cyfrowej anemometrii obrazowej, *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 42 (34) Nr 3, 14-20

Szczepiński W. (1974), *Stany graniczne i kinematyka ośrodków sypkich*, Wydawnictwo PWN, Warszawa 1974.

Tejchman J., Gudehus G. (2001), Shearing of a narrow granular layer with polar quantities, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 25: 1 – 28

Tejchman J. (2008), FE Modeling of Shear Localisation in Granular Bodies With Micro-polar Hypoplasticity (W. Wu and R. Borja, Eds). *Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 1–316.

Terzaghi K.A. (1936), A fundamental fallacy in earth pressure computations, *Journal of Boston Society of Civil Engineers*, 23, 71-88

Widuliński Ł., Tejchman J., Kozicki J., Leśniewska D. (2011), Discrete simulations of shear zone patterning in sand in earth pressure problems of a retaining wall, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 48, No. 7-8, 1191-1209

Wakabayashi T. (1957), Photoelastic method for determination of stress in powdered mass. *Proc. 7th Jpn. Nat. Cong. Appl. Mech.*, 153

Wang Y.-Z., Tang Z.-P., Zheng B. (2004), Distribution of active earth pressure of retaining wall with wall movement of rotation about top, *Applied Mathematics and Mechanics*, English Edition, Vol.25, No.7, July, 761-767.

White D.J. & Take W.A. (2002), GeoPIV: Particle Image Velocimetry (PIV) software for use in geotechnical testing. Manual for GeoPIV. *Technical Report CUED/D-SOILS/TR322*, Cambridge University Engineering Department,

White D.J. (2002), *An investigation into the behaviour of pressed-in piles*, PhD Thesis, Churchill College, University of Cambridge.

White, D. J., Take, W. A. & Bolton, M. D. (2003), Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry, *Geotechnique* 53, No. 7, 619-631

White D.J., Randolph M., Thompson B., (2005), An image-based deformation measurement system for the geotechnical centrifuge. *Int. J. Phys. Modell. Geotech.*, 3, 1-12,

Vardoulakis I., Muhlhaus H.B., Aifantis E.C. (1991), Continuum models for localized deformations in pressure sensitive materials, *Proc. 7th Int. Conf. on Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Cairns, Australia, 441-448

Vardoulakis I., Sulem J. (1995), Bifurcation analysis in geomechanics, *Blackie Academic & Professional*, an imprint of Chapman and Hall, London.

Vardoulakis I. (1996a), Deformation of water-saturated sand: I. uniform undrained deformation and shear banding, *Geotechnique* 46, No. 3, 441-456.

Vardoulakis I. (1996b), Deformation of water-saturated sand: II. effect of pore water flow and shear banding, *Geotechnique* 46, No. 3, 457-472.

Vaziri H. (1996), Numerical study of parameters influencing the response of flexible retaining walls, *Can. Geotech. J.* 33, 290-308.

Vermeer P.A. (1982), A simple shear-band analysis using compliances, *Proc. IUTAM Conf. on Deformation and Failure of Granular Materials*, Delft, Holland, 493-499.

Vidal H. (1969), La terre armee, Realisations recentes, *Annales ITBTP*, No. 259-260, 1101-1156

Vo T., Russell A. (2013), Unsaturated soil interacting with a rotating model wall, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, accepted for publication

Yatomi C., Yashima A., Iizuka A., Sano I. (1989), Formation of shear bands by a noncoaxial Cam-clay model, *2nd International Workshop on Numerical Methods for Localization and Bifurcation of Granular Bodies*, Eds. E. Dembicki, G. Gudehus, Z. Sikora, 227 – 247.

Zadroga B., Malesiński K. (2005), Nowe techniki pomiaru przemieszczeń podłoża gruntowego w badaniach modelowych stateczności fundamentów. *Inżynieria Morska i Geotechnika* 3/2005, 208-218.

Zadroga B., Malesiński K. (2010), *Stateczność fundamentów bezpośrednich. Badania modelowe i analizy numeryczne*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej

Zhang H., Garga V.K. (1997), Strain localization and undrained steady state of sand (Discussion), *Jnl of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, September 1997.

Zhu D.-Y., Qian Q.-H., Lee C.F. (2001), Active and passive critical slip fields for cohesionless soils and calculation of lateral earth pressures, *Geotechnique* 51, No. 5, 407-423.

Zienkiewicz, O.C. (1972), *Metoda Elementów Skończonych*, Arkady, Warszawa

Zienkiewicz O.C., Huang M., Pastor M. (1995), Localization problems in plasticity using finite elements with adaptive remeshing, *Int. Jnl. For Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 19, 127-148.

Wykaz rysunków

Rys.1.1. Lokalizacja odkształceń widoczna na zdjęciach końcowej fazy badań modelowych w testach historycznych (b – J. Kwaśniewski, IBW PAN, lata 60-te XXw, c – G.W.E. Milligan, 1974, d) oraz wykonanych aktualnie na modelu konstrukcji z gruntu zbrojonego (a - badania M. Kulczykowskiego, IBW PAN).....	10
Rys.2.1. Etapy analizy obrazu w metodzie PIV, (White et al., 2003)	20
Rys.2.2. Stanowisko badawcze w trakcie przygotowania modelu, a) wypełnione suchymi granulami szklanymi, b) w trakcie napełniania od dołu cieczą immersyjną	23
Rys.2.3. Elasto-optyczna reakcja pojedynczej granulki szklanej o średnicy ~1.4mm na jednoosiowe ściskanie – widoczne prążki interferencyjne, których liczba rośnie wraz ze wzrostem obciążenia (Muir Wood i Leśniewska, 2010).....	24
Rys.2.4. Fragment obciążonej próbki wykonanej z pojedynczej warstwy płaskich walców o średnicach 3-4cm, sfotografowanej w świetle białym i polaryzacji kołowej (B. Behringer)	25
Rys.2.5. Układ optyczny polaryzatora transmisyjnego (polaryzacja kołowa) z dodatkowym źródłem światła białego (A) przeznaczonym do zdjęć służących do analizy deformacji metodą PIV (DIC)	28
Rys.3.1. Widok (a) i schemat (b) stanowiska pomiarowego po wypełnieniu granulami szklanymi i nałożeniu obciążenia.. ..	32
Rys.3.2. Widok obciążonego modelu umieszczonego w układzie optycznym polaryzatora. ...	33
Rys.3.3. Widok ziaren i krzywe przesiewu badanych materiałów ziarnistych	34
Rys.3.4. Przykładowy przebieg badania modelowego	37
Rys.4.1. Przykład oryginalnych zdjęć, zarejestrowanych na początku i końcu przyrostu przemieszczenia ścianki, a,b) fotografia w świetle niespolaryzowanym, c,d) fotografia w świetle spolaryzowanym	39
Rys.4.2. Fragment Testu 12 (Tabela 3.2, Załącznik 2), zarejestrowany w świetle zwykłym (niespolaryzowanym).	40
Rys.4.3. Fragment Testu 12 (Tabela 3.2, Załącznik 2), zarejestrowany w świetle kołowo spolaryzowanym	40
Rys.4.4. Pole przemieszczeń dla kilku wybranych kroków Testu 4 (Tabela 3.2, Załącznik 2)	42
Rys.4.5. Test siatki podziału na podstawie zdjęć 0069-0072 z Testu 4	44
Rys.4.6. Test siatki podziału na podstawie zdjęć 0139-0142 z Testu 4.	45
Rys.4.7. Test siatki podziału na podstawie zdjęć 0173-0176 z Testu 4	46
Rys.4.8. Przykład porównania pola odkształceń i pola naprężeń całkowitych dla granulek szklanych odpuszczonych termicznie: a) mapa odkształceń postaciowych, b) pole naprężeń całkowitych, widziane w świetle spolaryzowanym, reprezentowane przez łańcuchy obciążonych ziaren, c) nałożenie obu pól	48

- Rys.4.9.** Efekt odjęcia dwóch obrazów, sfotografowanych w świetle spolaryzowanym i odpowiadających pojedynczemu przyrostowi poziomego przemieszczenia ścianki. 49
- Rys.4.10.** Przykład porównania doświadczalnego i obliczonego metodą elementów skończonych pola odkształceń postaciowych: a) siatka używana w analizie doświadczalnej metodą PIV, A) mapa odkształceń postaciowych otrzymana metodą PIV dla kroku 0269-0272 Testu 3, b) siatka elementów skończonych – obciążenie ciągłe, B) mapa przyrostów odkształceń postaciowych dla siatki z obciążeniem ciągłym, c) siatka elementów skończonych z rzeczywistym modelem systemu obciążającego, C) mapa przyrostów odkształceń postaciowych dla siatki c).51
- Rys.4.11.** Porównanie średniego nachylenia doświadczalnych i obliczeniowych (otrzymanych dla trzech wartości kąta tarcia wewnętrznego) lokalizacji odkształceń postaciowych52
- Rys.5.1.** Etap początkowy: efekt nakładania obciążenia zewnętrznego.....54
- Rys.5.2.** Przykłady podobnego zachowania się materiału w różnych testach: regularne pasma zagęszczania, widoczne na mapach odkształceń objętościowych (kolor czerwony – ściskanie) w trakcie wstępnego obciążania modelu: a, b) **Test 6**, c,d) **Test 7**.55
- Rys.5.3.** Stadium poprzedzające epizod lokalizacji: rozproszone odkształcenia w obszarze tworzącym klin (a). (b) Przewaga rozciągania (kolor niebieski) na obrzeżu klina i ściskania w jego wnętrzu (kolor czerwony).56
- Rys.5.4.** Epizod lokalizacji: odkształcenia skoncentrowane wewnątrz pasma ścinania (a). Wzrost objętości (b), na całej długości lokalizacji (kolor niebieski), ściskanie (kolor czerwony) na jej obrzeżach..56
- Rys.5.5.** Epizod lokalizacji: lokalizacja rozwijająca się - odkształcenia skoncentrowane wewnątrz pasma ścinania (a), ich wielkość zależy od położenia wewnątrz pasma (największe na górze). (b) Wzrost objętości (kolor niebieski) na całej długości lokalizacji, ściskanie (kolor żółty i czerwony) we wnętrzu klina odłamu.....57
- Rys.5.6.** Test 4: Wyrównywanie się wielkości odkształceń w miarę rozwoju pasma ścinania58
- Rys.5.7.** Stadium po lokalizacji: rozproszone odkształcenia w obszarze tworzącym klin. (b) Przewaga dylatacji (wzrost objętości, kolor niebieski) we wnętrzu klina odłamu...59
- Rys.5.8.** Trzeci epizod lokalizacji: oprócz głównego pasma ścinania pojawiają się słabsze, dzielące klin odłamu na sztywne segmenty (ściskane – kolor czerwony, Rys.5.8b). W przebiegu głównego pasma pojawiają się wyraźne miejsca, gdzie występuje ściskanie (kolor czerwony) zamiast rozciągania (kolor niebieski).....59
- Rys.5.9.** Zaawansowana deformacja: w przybliżeniu jednorodny rozkład odkształceń postaciowych (Rys.5.9a) oraz naprzemiennie występujące ściskanie (czerwony) i rozciąganie (niebieski, Rys.5.9b) wewnątrz pasma ścinania.....60
- Rys.5.10.** Test 8: Przykłady podobnego zachowania się materiału w różnych testach: naprzemiennie ściskanie i dylatacja materiału wewnątrz pasma ścinania w zaawansowanej fazie deformacji. a, b) $d = 5.25\text{mm}$, c,d) $d = 4,00\text{mm}$60
- Rys.5.11.** Test 4: zbliżenie lokalizacji odkształceń w fazie zaawansowanej deformacji: jednorodny w przybliżeniu rozkład odkształceń postaciowych (Rys.5.11a) oraz naprzemiennie występujące ściskanie (czerwony) i rozciąganie (niebieski, Rys.5.11b) wewnątrz pasma ścinania (zdjęcia 0198-0201).61

Rys.5.12. Przykłady podobnego zachowania się materiału w różnych testach: duży klin deformacji o złożonej strukturze. Nachylenie klina bliskie nachyleniu Coulomba. a, b) Test 8 , c,d) Test 2 , e, f) Test 9	62
Rys.5.13. Złożone układy lokalizacji odkształceń, zaobserwowane w niektórych testach: a, b) Test 4 , c,d) Test 5 , e, f) Test 5 , g, h) Test 4 , i, j) Test 8	64
Rys.5.14. Test 2 - maksymalne odkształcenia postaciowe wewnątrz pasma ścinania, wywołane przemieszczeniem ścianki: a) przyrosty przemieszczeń ścianki w poszczególnych krokach doświadczenia, b) przyrosty odkształceń postaciowych w poszczególnych krokach doświadczenia, c) sumaryczne przemieszczenie ścianki po danej liczbie kroków doświadczenia, d) suma maksymalnych odkształceń postaciowych po danej liczbie kroków doświadczenia.	67
Rys.5.15. Test 3 - maksymalne odkształcenia postaciowe wewnątrz pasma ścinania, wywołane przemieszczeniem ścianki: a) przyrosty przemieszczeń ścianki w poszczególnych krokach doświadczenia, b) przyrosty odkształceń postaciowych w poszczególnych krokach doświadczenia, c) sumaryczne przemieszczenie ścianki po danej liczbie kroków doświadczenia, d) suma maksymalnych odkształceń postaciowych po danej liczbie kroków doświadczenia	68
Rys.5.16. Test 4 - maksymalne odkształcenia postaciowe wewnątrz pasma ścinania, wywołane przemieszczeniem ścianki: a) przyrosty przemieszczeń ścianki w poszczególnych krokach doświadczenia, b) przyrosty odkształceń postaciowych w poszczególnych krokach doświadczenia, c) sumaryczne przemieszczenie ścianki po danej liczbie kroków doświadczenia, d) suma maksymalnych odkształceń postaciowych po danej liczbie kroków doświadczenia	69
Rys.5.17. Test 5 - maksymalne odkształcenia postaciowe wewnątrz pasma ścinania, wywołane przemieszczeniem ścianki: a) przyrosty przemieszczeń ścianki w poszczególnych krokach doświadczenia, b) przyrosty odkształceń postaciowych w poszczególnych krokach doświadczenia, c) sumaryczne przemieszczenie ścianki po danej liczbie kroków doświadczenia, d) suma maksymalnych odkształceń postaciowych po danej liczbie kroków doświadczenia.	70
Rys.5.18. Test 6 - maksymalne odkształcenia postaciowe wewnątrz pasma ścinania, wywołane przemieszczeniem ścianki: a) przyrosty przemieszczeń ścianki w poszczególnych krokach doświadczenia, b) przyrosty odkształceń postaciowych w poszczególnych krokach doświadczenia, c) sumaryczne przemieszczenie ścianki po danej liczbie kroków doświadczenia, d) suma maksymalnych odkształceń postaciowych po danej liczbie kroków doświadczenia.	71
Rys.5.19. Test 7 - maksymalne odkształcenia postaciowe wewnątrz pasma ścinania, wywołane przemieszczeniem ścianki: a) przyrosty przemieszczeń ścianki w poszczególnych krokach doświadczenia, b) przyrosty odkształceń postaciowych w poszczególnych krokach doświadczenia, c) sumaryczne przemieszczenie ścianki po danej liczbie kroków doświadczenia, d) suma maksymalnych odkształceń postaciowych po danej liczbie kroków doświadczenia.	72
Rys.5.20. Test 8 - maksymalne odkształcenia postaciowe wewnątrz pasma ścinania, wywołane przemieszczeniem ścianki: a) przyrosty przemieszczeń ścianki w poszczególnych krokach doświadczenia, b) przyrosty odkształceń postaciowych w poszczególnych krokach doświadczenia, c) sumaryczne przemieszczenie ścianki po danej liczbie kroków doświadczenia, d) suma maksymalnych odkształceń postaciowych po danej liczbie kroków doświadczenia.	73

danej liczbie kroków doświadczenia, d) suma maksymalnych odkształceń postaciowych po danej liczbie kroków doświadczenia.	81
Rys.5.29. Przyrosty maksymalnych odkształceń postaciowych w zależności od całkowitego przemieszczenia ścianki, a) Test 13, b) Test 16, c) Test 9, d) Test 14, e) Test 4, f) Test 12.	82
Rys.5.30. Zależność średniego minimalnego przemieszczenia potrzebnego do uaktywnienia epizodu silnej lokalizacji odkształceń w zależności od poziomu obciążenia zewnętrznego modelu	83
Rys.6.1. Porównanie pól przemieszczeń (A), odkształceń postaciowych (B) i odkształceń objętościowych (C) ze zmianami w polu naprężeń (D) dla różnych etapów Testu2 .	86
Rys.6.2. Test 4 – porównanie względnego pola powierzchni klina odłamu w poszczególnych krokach doświadczenia z odpowiadającą im wartością maksymalnych odkształceń postaciowych	88

Wykaz tabel

Tabela 3.1. Parametry materiałowe granulek Starlitbeads1000 i piasku Borowiec	34
Tabela 3.2. Zestawienie analizowanych badań modelowych	36
Tabela 5.1. Test 8 – pomiar kątów nachylenia głównego pasma ścinania dla poszczególnych kroków doświadczenia (pozycje 1 – 67 tabeli) oraz uśredniony kąt dla odkształceń skumulowanych (pozycja 68).	65

Badanie pól odkształceń i naprężeń w ośrodku rozdrobnionym w stanie parcia czynnego

Przedmiotem rozprawy było badanie zmian zachodzących w polach odkształceń i naprężeń w ośrodku sypkim w stanie parcia czynnego, pod wpływem zmieniających się warunków brzegowych. Do analizy wykorzystano zdjęcia uzyskane w doświadczalnych badaniach modelowych, wykonanych w stanowisku pomiarowym, znajdującym się w IBW PAN w Gdańsku. Pola odkształceń i naprężeń otrzymano przy pomocy analizy obrazów, dzięki połączeniu zintegrowanej elastoptyki dla materiałów rozdrobnionych (pola naprężeń) oraz współczesnej metody korelacji obrazu (pola odkształceń). W trakcie badań sprawdzono przydatność analizy obrazu do wydobycia dodatkowych informacji ze zdjęć w świetle spolaryzowanym (pola naprężeń).

Zakres rozprawy obejmuje opis badań modelowych, ich opracowanie metodą analizy obrazu oraz porównanie z wynikami analizy numerycznej, wykonanej metodą elementów skończonych.

Zgodnie z przyjętym zakresem pracy, punktem wyjścia rozprawy doktorskiej jest problem parcia czynnego w gruncie. Parcie gruntu zależy od typu i schematu pracy konstrukcji oporowej oraz jej mechanizmów zniszczenia. Te ostatnie, mimo wielu prowadzonych w przeszłości badań, wciąż są niedostatecznie rozpoznane. Jedną z przyczyn tego stanu rzeczy są ograniczenia związane z badaniami doświadczalnymi, a w szczególności brak możliwości bezpośredniego porównania wyznaczonych z odpowiednią dokładnością pól odkształceń i naprężeń. Taką możliwość daje połączenie w badaniach modelowych najnowszych metod analizy obrazu i zintegrowanej elastoptyki.

Rozprawa składa się z dwóch zasadniczych części: (1) analizy doświadczalnych badań modelowych przeprowadzonych na reprezentujących ośrodek sypki granulach szklanych i piasku oraz (2) numerycznej analizy doświadczeń metodą cyfrowej korelacji obrazów oraz metodą elementów skończonych. Pierwsza część rozprawy zawiera pełne opracowanie (wraz z analizą obrazu) kilkunastu badań modelowych, z czego każde składa się z kilkudziesięciu kroków różniących się wartościami obciążenia i przemieszczenia ścianki. W ten sposób powstała baza danych, pozwalająca na opisanie procesu ewolucji mechanizmu zniszczenia gruntu za ścianą oporową w zależności od poziomego obciążenia ośrodka oraz ruchu ścianki. Baza ta posłużyła jako materiał do weryfikacji obliczeń numerycznych. Przy pomocy metody elementów skończonych otrzymano pola odkształceń i naprężeń, będące wynikiem rozmycia rzeczywistej ziarnistej struktury ośrodka sypkiego, które, poprzez porównanie z rzeczywistymi

polami naprężeń i odkształceń, pozwalają badać zakres stosowalności mechaniki ośrodków ciągłych w odniesieniu do materiałów sypkich.

Na podstawie przeprowadzonych analiz wyciągnięto następujące wnioski:

- Obserwacja mechanizmów deformacji w zakresie małych przemieszczeń pozwala na uchwycenie krótkotrwałych schematów lokalizacji odkształceń, które nie są jeszcze wystarczająco zbadane.
- 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.
- Cyfrowa korelacja obrazu w połączeniu z cyfrową elastooptyką i analizą obrazu dają zupełnie nowe możliwości badania materiałów sypkich zarówno w skali makro, jak w skali mikro oraz w skali meso.

Analysis of strain and stress fields within granular material in active earth pressure state

The subject of the research was to examine the changes taking place in the fields of stress and strain in a granular medium in active earth pressure state, under the influence of changing boundary conditions. The images taken during small scale experimental model tests were examined. The tests were performed in the apparatus, located in the PAS Institute of Hydro-Engineering in Gdansk. Stress and strain fields were obtained using combination of image analysis (strain field) and integrated photo-elasticity for particulate materials (stress field). During the study the usefulness of image analysis to extract additional information from the images in polarized light (stress field) was tested. The scope of the thesis includes a description of the model tests, their examining by image analysis and comparison with the results of numerical analysis, performed by finite element method. According to the scope of work, the starting point of the doctoral dissertation was the problem of active pressure in soil. Earth pressure depends on the type of retaining structure and its failure mechanism. The latter, despite many studies conducted in the past, are still insufficiently explored. One of the reasons for this are the limitations of experimental research, in particular the lack of a direct comparison of stress and strain fields with acceptable accuracy. This can be achieved by combining contemporary image analysis and integrated photo-elasticity.

The dissertation consists of two major parts: (1) the full analysis of experimental model tests carried out on substitute granular material - glass granules and sand, and (2) numerical analysis of the experiments using digital image correlation and finite element method.

The first part of the thesis contains the detailed analysis (along with image analysis) of several model tests, each of which consists of a few dozen steps of external load and wall displacement. In this way, the database was created, which allows to describe the process of evolution of failure mechanism of granular material retained by a rigid wall, depending on the external load level and wall movement. This database can be used to verify numerical calculations. The stress and strain fields, obtained by finite element method, are averaged over a number of individual grains - the comparison between calculated and real stress and strain fields allows to judge the applicability of continuum mechanics to describe real granular materials' behaviour. The final result of the project is the text of the doctoral dissertation .

On the basis of the analyzes I have come up with few conclusion:

First of all:

Observation of deformation mechanisms in the field of small displacement allows to capture short-term strain localization schemes.

Failure mechanism of the retaining structure model, which is the formation of strain localization in soil (a shear band) does not depend significantly on the level of external load.

The minimum movement of the retaining wall depends on the level of the external load, required to activate the strain localization - the higher the load, the greater the value of the minimum displacement .

Digital image correlation combined with photoelasticity and digital image analysis provide new opportunities to study granular materials at the macro scale, the micro and meso scale.