

OPIS MECHANIZMU POWSTAWANIA LOKALIZACJI ODKSZTAŁCEŃ
WEWNĄTRZ MATERIAŁU SYPKIEGO PODCZAS OPRÓŻNIANIA SILOSU
NA PODSTAWIE POMIARÓW METODĄ PIV
(PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY)

Maciej Niedostatkiewicz

Katedra Podstaw Budownictwa i Inżynierii Materiałowej,
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
e-mail: mniedost@pg.gda.pl

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych nad mechanizmem powstawania lokalizacji odkształceń wewnątrz wypływającego z silosu materiału sypkiego. Pomiarów dokonano dla przyściennej warstwy piasku przemieszczającej się w silosie z przepływem masowym oraz kominowym. Doświadczenia przeprowadzono dla zróżnicowanego zagęszczenia początkowego materiału sypkiego oraz zmiennej szorstkości ścian. Przeanalizowano różne przypadki prędkości opróżniania silosu (wplywy grawitacyjny oraz kontrolowany). Poddano analizie wpływ parametrów zmiennych na kolejność, kształt oraz szerokość lokalizacji powstających zarówno w strefie przyściennej, jak również wewnątrz wypływającego materiału sypkiego.

Słowa kluczowe: silos, lokalizacje, PIV, zagęszczenie

WSTĘP

Metoda Particle Image Velocimetry (PIV) jest optoelektroniczną metodą pomiarową umożliwiającą wizualizację pola przemieszczeń analizowanego ośrodka (Adrian 1991). Metoda ta wynaleziona i zastosowana została pierwotnie do badań doświadczalnych z płynami i gazami (Raffel i Willert 1998), jednak podczas stosowania tej metody w analizie deformacji ośrodków ciekłych i gazowych konieczne jest stosowanie markerów. W przypadku stosowania metody PIV w materiałach sypkich nie zachodzi konieczność aplikacji markerów wprowadzających zaburzenie do struktury materiału, gdyż ziarna materiału sypkiego są markerami same dla siebie ze względu na zróżnicowanie zarówno kolorów, jak również kształtu samych ziaren. Duża rozdzielczość obrazów będących wynikiem

analizy metodą PIV jest uzyskiwana poprzez przetwarzanie cyfrowych zdjęć wykonywanych sekwencyjnie ze stałym krokiem czasowym. Dzięki dużej dokładności metoda ta mogła zostać zastosowana do analizy i opisanie lokalizacji odkształceń występujących w postaci stref ścinania w materiałach sypkich (Nubel 2002, Kohse 2002). Metoda PIV stosowana była dotychczas do identyfikacji lokalizacji odkształceń (DeJong i inni 2006) podczas testów w różnych aparatach geotechnicznych: w aparacie dwuosiowego ściskania (Kohse 2002), w modelu z wertykalną mobilną ścianą (Nubel 2002), w aparacie z wyciąganą wertykalną płytą (Słominski 2003, Słominski i inni 2006, 2007) oraz w modelu ze ścianą oporową (Niedostatkiwicz i inni 2010).

Niedostatkiwicz i Tejchman (2005), Niedostatkiwicz i inni (2006) oraz Słominski i inni (2006, 2007) zastosowali metodę PIV do analizy lokalizacji odkształceń w silosie z przepływem masowym oraz kominowym. Porównali oni wyniki wyznaczonych zmian objętościowych w silosie prostokątnym uzyskane z zastosowaniem metody PIV z wynikami zmian koncentracji otrzymanymi podczas doświadczeń z zastosowaniem metody Rtg (promieniowanie rentgenowskie). Uzyskane w czasie doświadczeń wyniki stanowiły materiał porównawczy do analizy zgodności wyników z otrzymanymi podczas eksperymentów z zastosowaniem bezinwazyjnej metody pomiarowej ECT (Niedostatkiwicz i inni 2009).

Ponadto metoda PIV znalazła zastosowanie w analizie rozkładu pola prędkości podczas grawitacyjnego, jak również kontrolowanego opróżniania silosów (Sielamowicz i inni 2005, Buick i inni 2004, 2005, Ostendorf i Schwedes 2005).

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wyników analizy mechanizmu powstawania lokalizacji odkształceń w wypływającym z silosu materiale sypkim. Analizę przeprowadzono dla przypadku silosu z przepływem masowym oraz kominowym, opróżnianych grawitacyjnie oraz w sposób kontrolowany. Uwzględniono zróżnicowany stopień zagęszczenia początkowego materiału sypkiego, jak również zmienną szorstkość ścian. Analizie poddano lokalizacje powstające wewnątrz materiału sypkiego

METODA PIV (PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY)

Stosowane w metodzie PIV zdjęcia cyfrowe składają się z pojedynczych elementów zwanych pikselami. W wyniku rejestracji obrazu każdy z pikseli uzyskuje numer odpowiadający skali szarości, proporcjonalny do ilości światła odbitego od zobrazowanego przedmiotu. Metoda PIV analizuje różnice w intensywności światła zarejestrowane w każdym z pikseli przy pomocy aparatu cyfrowego, prowadzone dla określonego obszaru analizy (*Area of Interest-AOI*). Analizy porównawcze wykonywane są w podobzszarach przeszukiwań (*interogation cells*), których wymiar wnosi zazwyczaj od 8×8 pikseli do 64×64 piksele. Jeden wektor



przemieszczenia jest obliczany dla pojedynczego podobszaru przeszukiwań, jest to wektor uśrednionych przemieszczeń dla wszystkich cząstek występujących w podobszarze przeszukiwań. Metoda PIV opiera się na opisie elementów przy użyciu współrzędnych Eulera. W kolejnym kroku obliczeniowym względne przemieszczenia zamieniane są na przemieszczenia w opisie we współrzędnych Lagrange'a, podające całkowite przemieszczenie układu w odniesieniu do początkowej konfiguracji.

W celu wyeliminowania błędów występujących pod postaciami tzw. *szumów częstotliwościowych* w metodzie PIV stosuje się filtry wygładzające (tzw. *filtry post processingowe*). Filtr oblicza nową wartość odcienia szarości dla każdego z pikseli poprzez nałożenie specjalnej siatki na siatkę z wartościami początkowymi – wartości początkowe są mnożone przez wartości z filtra, a następnie dodawane jeden do drugiego. Siatka filtra jest zawsze kwadratowa, a ilości kolumn i wierszy są jednakowe. Do najczęściej stosowanych filtrów należą filtr liniowy oraz filtr Gaussa.

Główną wadą metody PIV jest fakt, że odkształcenia mogą być wyznaczone jedynie na podstawie analizy zachowania się próbki materiału sypkiego w strefie przyściennej. Odkształcenia zachodzące wewnątrz materiału sypkiego nie są uwzględniane i nie wpływają na ostateczny wynik analizy. Ponadto wadą metody jest fakt, że poddawana analizie próbka nie może być dużej powierzchni ze względu na wydłużający się progresywnie (logarytmicznie) czas trwania obliczeń (White i in. 2003).

W skrócie całą procedurę pomiarową z zastosowaniem metody PIV można przedstawić następująco (White i in. 2003, Nubel 2002, Hutter i Kuerchner 2003, Słominski i in. 2006, 2007):

- a) wyznaczenie obszaru analizy (AOI),
- b) wyznaczenie podobszarów przeszukiwań (*interrogation cells*),
- c) wyznaczenie pola intensywności dla chwil czasowych t i $t+\Delta t$ dla pojedynczego pola przeszukiwań,
- d) wyznaczenie korelacji pomiędzy pojedynczymi polami przeszukiwań na sąsiednich zdjęciach,
- e) powtórzenie procedury obliczeniowej dla wszystkich wyznaczonych obszarów przeszukiwań,
- f) zamiana opisu pola odkształceń we współrzędnych Eulerowskich na opis we współrzędnych Lagrangea,
- g) obliczenie tensora odkształceń. Odkształcenia objętościowe ε_v i odkształcenia postaciowe ε_p wyznaczone są jako:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} \quad \text{oraz} \quad \varepsilon_p = \sqrt{\varepsilon_{ij}^* \varepsilon_{ij}^*}, \quad \varepsilon^* = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk} \delta_{ij}, \quad (1)$$

gdzie: ε_{ij}^* – tensor odkształceń, ε_{kk} – tensor odkształceń, δ_{ij} – delta Kroneckera.



STANOWISKO BADAWCZE

Badania modelowe zostały przeprowadzone dla prostokątnych modeli silosu z przepływem masowym oraz z przepływem kominowym. Silosy składały się z części równoległej oraz z leja. Zarówno w przypadku silosu z przepływem masowym, jak również kominowym leje były graniastosłupowe. Wysokość silosu z przepływem masowym wynosiła $h = 0,32$ m, szerokość $b = 0,09$ m, natomiast głębokość $d = 0,07$ m. Wymiary silosu z przepływem masowym wynosiły odpowiednio $h = 0,29$ m, $b = 0,15$ m, $d = 0,07$ m. Grubość ścian modeli wynosiła $t = 0,008$ m.

Opróżnianie silosów odbywało się grawitacyjnie oraz w sposób kontrolowany, przez otwór listowy o szerokości $s = 0,0005$ m wykonany na całej głębokości modeli, prostopadle do szerszej ściany modeli. Zarówno dla wypływu grawitacyjnego, jak również dla wypływu kontrolowanego doświadczenia przeprowadzono dla przypadku materiału sypkiego w stanie luźnym oraz zagęszczonym. Doświadczenia przeprowadzono z piaskiem średnioziarnistym ze średnią średnicą ziarna $d_{50} = 0,8$ mm. Materiał w stanie luźnym ($\gamma = 14,15$ kN·m⁻³, $e_o = 0,87$) uzyskano poprzez napełnianie przez rurę ustawioną bezpośrednio nad materiałem sypkim i podnoszoną sukcesywnie w miarę napełniania modelu. Materiał w stanie zagęszczonym uzyskano stosując napełnianie metodą *deszczu rozproszonego* (przez sito umieszczone na stałe na górze silosu) ($\gamma = 17,0$ kN·m⁻³, $e_o = 0,56$).

Doświadczenia przeprowadzono dla ścian gładkich oraz bardzo szorstkich. Podwyższenie szorstkości ściany uzyskano poprzez wyklejenie wewnętrznej części silosu papierem ściernym 60 ($r_w \approx d_{50}$). Podwyższenie ścian wykonano zarówno wzdłuż ścian części równoległej silosu, jak również wzdłuż ścian w leju. Doświadczenia ze ścianami szorstkimi wykonano zarówno dla przypadku przepływu masowego, jak również kominowego. Każdy z eksperymentów badawczych powtarzany był 2 razy, niezależnie od sposobu zagęszczenia początkowego materiału sypkiego jak również niezależnie od stopnia szorstkości ściany oraz rodzaju wypływu. Wszystkie eksperymenty badawcze przeprowadzone zostały w klimatyzowanym pomieszczeniu laboratoryjnym o stałej temperaturze powietrza 18-20°C i wilgotności względnej nie przekraczającej 55%.

Do wykonania zdjęć podczas doświadczeń zastosowano laboratoryjny aparat fotograficzny o rozdzielczości 1280×960 pixeli. Zdjęcia były zapisywane w formacie *.bmp. Wielkość obszaru AOI była zróżnicowana: w modelu silosu z przepływem masowym wynosiła $\approx 0,09 \times 0,2$ m², natomiast w modelu z przepływem kominowym wynosiła $\approx 0,15 \times 0,2$ m². Obszary przeszukiwań (*interrogation cell*) na podstawie wstępnie przeprowadzonych analiz zostały określone jako obszary o wymiarach 64×64 piksele przy założeniu przesunięcia środka obszaru przeszukiwań pomiędzy jednym a drugim zdjęciem o 12 pikseli. Zdjęcia wykonywane były w sposób

kontynuálny (ciągła projekcja kamery przemysłowej) z częstotliwością 40 klatek na sekundę ($\Delta t = 0,025$ s). W czasie doświadczeń aparat fotograficzny ustawiony był w odległości $s = 0,5$ m od stanowiska badawczego. W celu wyeliminowania efektu cienia modele oświetlane były 300W lampami żarowymi ustawionymi w odległości 1,2 m pod kątem 45° . Ze względu na dużą rozdzielczość uzyskanych zdjęć (1280×960) nie stwierdzono występowania tzw. *efektu kompresji wstecznej*.

WYNIKI BADAŃ

W pracy przedstawiono jedynie wizualizację odkształceń postaciowych ε_p materiału sypkiego podczas opróżniania silosu. Wartości odkształceń, jednakowe dla wszystkich analizowanych przypadków wyznaczone w skali kolorów dołączone zostały do wykresów. Wzrost deformacji oznaczony został znakiem (+), skala liczbowa została dołączona do skali kolorów.

Przepływ masowy

W czasie przepływu masowego piasku luźnego w silosie ze ścianami gładkimi nie zaobserwowano pojawienia się lokalizacji odkształceń w postaci stref ścinania wzdłuż ścian w części równoległej silosu. Nie stwierdzono również występowania łukowatych lokalizacji w leju, natomiast zarówno w fazie początkowej, jak również podczas przepływu zaawansowanego na podstawie odkształceń postaciowych ε_p widoczne były deformacje materiału sypkiego w leju (rys. 1a).

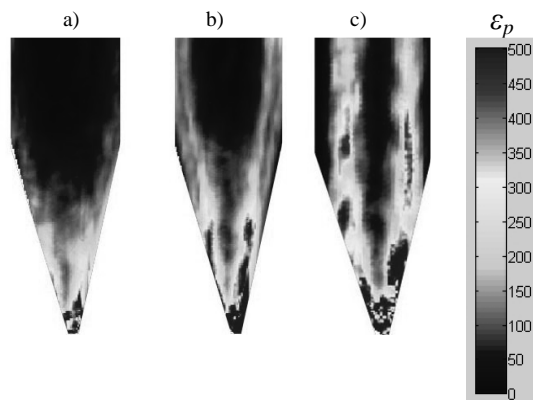
Zwiększenie zagęszczenia początkowego materiału sypkiego wpłynęło na zmianę mechanizmu przepływu. Od początku opróżniania silosu na podstawie odkształceń postaciowych ε_p zaobserwowano powstające bezpośrednio nad lejem symetryczne linie lokalizacji, które propagowały ku górze, krzyżując i przenikając się wzajemnie (rys. 2). Lokalizacje docierały do ścian leja i odbijały się od nich. Lokalizacje zanikały w przepływającym materiale sypkim w chwili dotarcia do miejsca przejścia części równoległej silosu w lej. Wyznaczona szerokość lokalizacji odkształceń wzdłuż ścian równoległych silosu w czasie zaawansowanego przepływu materiału sypkiego wynosiła $t_p = 8$ mm ($10 \times d_{50}$). Podobne zachowanie się materiały sypkiego zostało zaobserwowane przez Michałowski (1984, 1990) podczas doświadczeń z materiałem w stanie zagęszczonym w silosie ze ścianami gładkimi oraz potwierdzone przez Niedostatkiewicz (2009) (rys. 3).

W czasie przepływu masowego piasku luźnego w silosie ze ścianami bardzo szorstkimi materiał w leju ulegał intensywnej dylatacji bezpośrednio od chwili rozpoczęcia opróżniania silosu. Podobnie jak w przypadku doświadczeń ze ścianami gładkimi nie zaobserwowano powstawania łukowatych lokalizacji propagujących z leja w kierunku części silosu ze ścianami równoległymi. Na podstawie odkształceń postaciowych ε_p widoczne były wyraźne lokalizacje od-



kształceń w postaci stref ścinania zarówno wzdłuż ścian w części równoległej silosu, jak również w leju (rys. 1b). Szerokość lokalizacji wzdłuż ścian części równoległej silosu wynosiła $t_p = 18$ mm ($22 \times d_{50}$) i była w praktyce stała w czasie przepływu zaawansowanego.

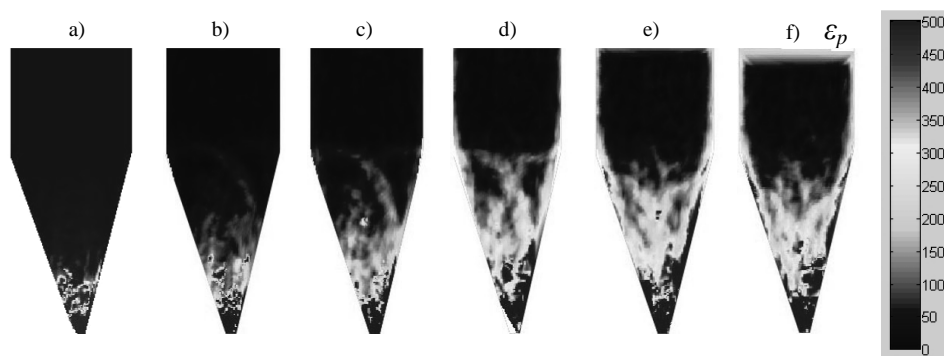
W czasie przepływu masowego piasku zagęszczonego w silosie ze ścianami bardzo szorstkimi bezpośrednio od chwili rozpoczęcia opróżniania silosu wytworzył się kanał przepływu. Na podstawie odkształceń postaciowych ε_p nie zaobserwowano powstających nad lejem symetrycznych, przenikających się linii lokalizacji, jak miało to miejsce w przypadku doświadczeń z piaskiem zagęszczonym i ścianami gładkimi (rys. 1c). Wyznaczona szerokość lokalizacji odkształceń wzdłuż ścian równoległych silosu w czasie zaawansowanego przepływu materiału sypkiego wynosiła $t_p = 14$ mm ($17 \times d_{50}$). Podobne zachowanie materiału sypkiego zaobserwował Michałowski (1984, 1990) podczas doświadczeń z materiałem w stanie zagęszczonym w silosie ze ścianami bardzo szorstkimi. Podczas doświadczeń przeprowadzonych Niedostatkiwicza (2009) zaobserwowano tworzenie się łukowatych lokalizacji, które odbijały się od ścian leja.



Rys. 1. Zmiana odkształceń postaciowych ε_p w piasku średnioziarnistym $d_{50} = 0,8$ mm w silosie z przepływem masowym po 3 s opróżniania: a) piasek luźny, ściana gładka, b) piasek luźny, ściana bardzo szorstka, c) piasek zagęszczony, ściana bardzo szorstka (wypływ grawitacyjny)

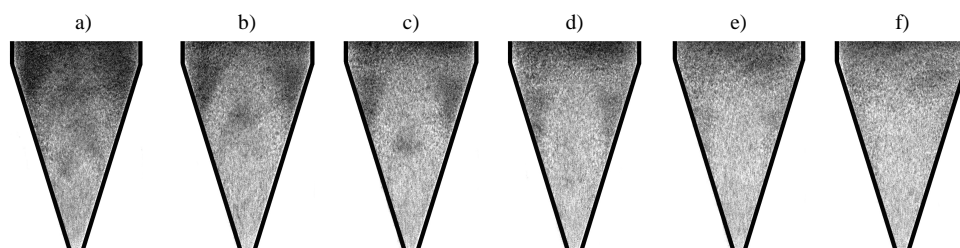
Fig. 1. Evolution of the deviatoric strain ε_p in sand with the main grain diameter $d_{50} = 0,8$ mm in a silo with mass flow after 3 s of silo emptying: a) loose sand, smooth walls, b) loose sand, very rough walls, c) dense sand, very rough walls (gravitational emptying)

Zmiana prędkości wypływu poprzez wprowadzenie wypływu kontrolowanego nie wpłynęła na zmianę kształtu i szerokości lokalizacji odkształceń: zarówno wzdłuż ścian części równoległej silosu, jak również w leju dla przypadku ścian gładkich i bardzo szorstkich.



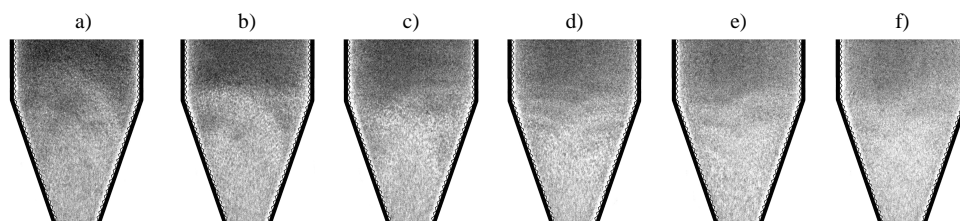
Rys. 2. Zmiana odkształceń postaciowych ε_p w zagęszczonym piasku średnioziarnistym $d_{50} = 0,8$ mm w silosie ze ścianami gładkimi i przepływem masowym: a) 1 s, b) 2 s, c) 3 s, d) 5 s, e) 7 s, f) 8 s (wypływ grawitacyjny)

Fig. 2. Evolution of the deviatoric strain ε_p in dense sand with the main grain diameter $d_{50} = 0.8$ mm in a silo with smooth walls and mass flow at: a) 1 s, b) 2 s, c) 3 s, d) 5 s, e) 7 s, f) 8 s (gravitational emptying)



Rys. 3. Radiografy przepływu masowego piasku średnioziarnistego $d_{50} = 0,8$ mm w stanie zagęszczonym w modelu silosu ze ścianami gładkimi: a) 1 s, b) 2 s, c) 3 s, d) 5 s, e) 7 s, f) 8 s (wypływ grawitacyjny)

Fig. 3. Radiographs of mass flow of sand with the main grain diameter $d_{50} = 0.8$ mm in a silo with smooth walls at: a) 1 s, b) 2 s, c) 3 s, d) 5 s, e) 7 s, f) 8 s (gravitational emptying)

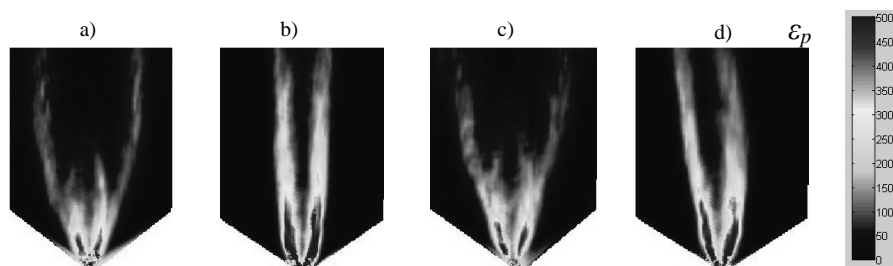


Rys. 4. Radiografy przepływu masowego piasku średnioziarnistego $d_{50} = 0,8$ mm w stanie zagęszczonym w modelu silosu ze ścianami bardzo szorstkimi: a) 1 s, b) 2 s, c) 3 s, d) 5 s, e) 7 s, f) 8 s (wypływ grawitacyjny)

Fig. 4. Radiographs of mass flow of sand with the main grain diameter $d_{50} = 0.8$ mm in a silo with very rough walls at: a) 1 s, b) 2 s, c) 3 s, d) 5 s, e) 7 s, f) 8 s (gravitational emptying)

Przepływ kominowy

W czasie przepływu kominowego piasku luźnego w silosie ze ścianami gładkimi nie zaobserwowano pojawienia się lokalizacji odkształceń w postaci stref ścinania wzdłuż ścian w części równoległej silosu ze względu nie przemieszczanie się spoczywającego przy ścianach materiału sypkiego i tworzenie się tzw. *stref martwych*. Szerokość kanału w czasie przepływu zaawansowanego wyznaczona na podstawie odkształceń postaciowych ε_p wynosiła ≈ 108 mm ($135 \times d_{50}$) (rys. 5a). W końcowej fazie opróżniania kąt pochylenia kanału przepływu wnosił $\approx 58^\circ$.



Rys. 5. Zmiana odkształceń postaciowych ε_p w piasku średnioziarnistym $d_{50} = 0,8$ mm w silosie z przepływem kominowym po 3 s opróżniania: a) piasek luźny, ściana gładka, b) piasek zagęszczony, ściana gładka, c) piasek luźny, ściana bardzo szorstka, d) piasek zagęszczony, ściana bardzo szorstka (wypływ grawitacyjny)

Fig. 5. Evolution of the deviatoric strain ε_p in sand with the main grain diameter $d_{50} = 0.8$ mm in a silo with funnel flow after 3 s of silo emptying: a) loose sand, smooth walls, b) dense sand, smooth wall, c) loose sand, very rough walls, d) dense sand, very rough walls (gravitational emptying)

Zwiększenie zagęszczenia początkowego materiału sypkiego wpłynęło w sposób istotny na zmniejszenie szerokości kanału przepływu. Szerokość kanału w czasie przepływu zaawansowanego wyznaczona na podstawie odkształceń postaciowych ε_p wynosiła ≈ 80 mm ($100 \times d_{50}$) (rys. 6b). Największe zmiany postaciowe występowały bezpośrednio nad otworem wylotowym. W końcowej fazie opróżniania kąt pochylenia kanału przepływu wnosił $\approx 82^\circ$.

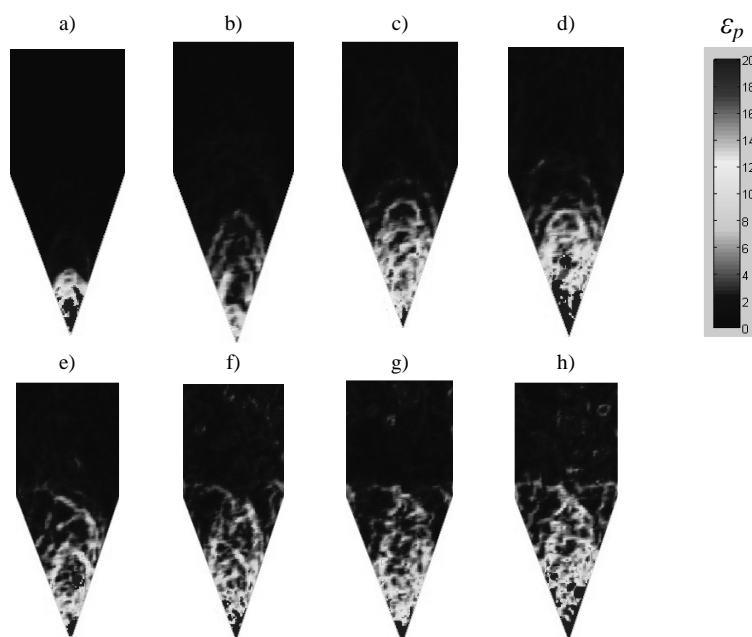
W czasie przepływu kominowego piasku luźnego w silosie ze ścianami bardzo szorstkimi materiał sypki zachowywał się podobnie jak w czasie doświadczeń ze ścianami gładkimi (rys. 5c). Podwyższenie szorstkości ścian nie wpłynęło na zmianę szerokości kanału przepływu oraz pochylenia kanału przepływu.

W czasie przepływu kominowego piasku zagęszczonego w silosie ze ścianami bardzo szorstkimi zachowanie materiału sypkiego było zbliżone do opisanego w przypadku doświadczeń ze ścianami gładkimi. Wzrost szorstkości ścian nie spowodował zmiany szerokości kanału przepływu, w czasie przepływu zaawansowanego wystąpił jednak brak symetrii przepływu (rys. 5d). Widoczny wzdłuż

kanału przepływu niesymetryczny wzrost kontraktancji materiału sypkiego spowodowany był zakrzywieniem kanału przepływu-wzrost kontraktancji miał miejsce od strony wewnętrznej zakrzywionego kanału przepływu.

ANALIZA MECHANIZAMU POWSTAWANIA LOKALIZACJI ODKSZTAŁCEŃ

Metoda PIV umożliwiła przeanalizowanie w sposób dokładny mechanizmu tworzenia się lokalizacji wewnątrz przepływającego materiału sypkiego. Przedstawiony na rysunku 2 rozwój lokalizacji na podstawie odkształceń postaciowych ε_p (dla przypadku piasku zagęszczonego, ścian gładkich i wypływu grawitacyjnego) umożliwił analizę tworzenia się łukowatych odbić propagujących z dolnej części silosu jako sumowanie odkształceń od początku opróżniania silosu, co powoduje, że części tworzących się lokalizacji ulega wzajemnemu zatarciu (tzw. *zamrożeniu*) w następujących po sobie krokach czasowych.

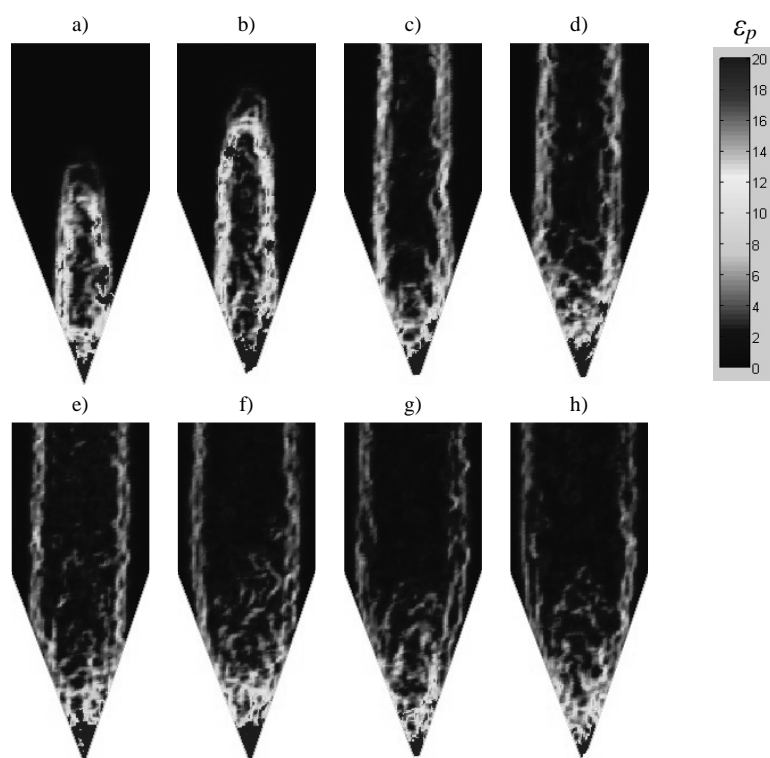


Rys. 6. Zmiana odkształceń postaciowych ε_p (nie sumowanych) w zagęszczonym piasku średnioziarnistym $d_{50} = 0,8$ mm w silosie ze ścianami gładkimi i przepływem masowym:

a) 0,25-0,30 s, b) 0,5-0,55 s, c) 0,625-0,675 s, d) 0,75-0,8 s, e) 0,875-0,925 s, f) 1,0-1,05 s, g) 1,125-1,175 s, h) 1,25-1,3 s (wypływ grawitacyjny)

Fig. 6. Evolution of the deviatoric strain ε_p (not summarised) in dense sand with the main grain diameter $d_{50} = 0,8$ mm in a silo with smooth walls and mass flow at: a) 0.25-0.30 s, b) 0.5-0.55 s, c) 0.625-0.675 s, d) 0.75-0.8 s, e) 0.875-0.925 s, f) 1.0-1.05 s, g) 1.125-1.175 s, h) 1.25-1.3 s (gravitational emptying)

Analiza wybranych chwil czasowych (bez sumowania odkształceń) pokazała, że w początkowej fazie wypływu lokalizacje występują w postaci łukowatych przeskoleń nad otworem wylotowym (rys. 6a-d), które podnoszą się ku górze przekształcając się w odbicia w leju po ≈ 1 s opróżniania silosu (rys. 6e-h). Ze względu na brak sumowania szerokości lokalizacji są węższe w porównaniu do szerokości lokalizacji analizowanych (sumowanych) od początku opróżniania silosu.



Rys. 7. Zmiana odkształceń postaciowych ε_p (nie sumowanych) w zagęszczonej piasku średnioziarnistym $d_{50} = 0,8$ mm w silosie ze ścianami bardzo szorstkimi i przepływem masowym:

a) 1,25-1,30 s, b) 1,75-1,80 s, c) 2,25-2,30 s, d) 2,75-2,80 s, e) 3,50-3,55 s, f) 4,0-4,05 s, g) 4,50-4,55 s, h) 5,0-5,55 s (wypływ grawitacyjny)

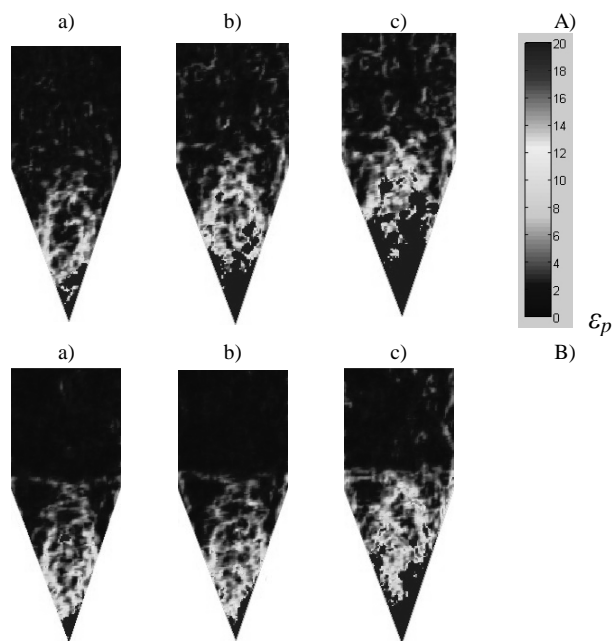
Fig. 7. Evolution of the deviatoric strain ε_p (not summarised) in dense sand with the main grain diameter $d_{50} = 0,8$ mm in a silo with very rough walls and mass flow at: a) 1.25-1.30 s, b) 1.75-1.80 s, c) 2.25-2.30 s, d) 2.75-2.80 s, e) 3.50-3.55 s, f) 4.0-4.05 s, g) 4.50-4.55 s, h) 5.0-5.55 s (gravitational emptying)

Metoda PIV umożliwiła potwierdzenie tezy, że mechanizm tworzenia się lokalizacji wewnątrz przepływającego materiału sypkiego jest niezależny od szorstkości ścian silosu. Przedstawiony na rysunku 1d rozwój lokalizacji na podstawie odkształceń postaciowych ε_p (dla przypadku piasku zagęszczonego,

ścian bardzo szorstkich i wypływu grawitacyjnego) nie wykazał tworzenia się łukowatych odbić w leju (widocznych na rysunku 2 dla przypadku ścian gładkich), a pozwolił jedynie na zaobserwowanie występowania lokalizacji odkształceń w postaci stref ścinania wzdłuż ścian w części równoległej. Analiza wybranych chwil czasowych (bez sumowania odkształceń) pokazała jednak, że dla przypadku ścian bardzo szorstkich mechanizm powstawania lokalizacji jest taki sam jak dla ścian gładkich: gromadzący się przy ścianach silosu materiał symuluje podatną ścianę silosu mamy więc do czynienia z przypadkiem *silosu w silosie*. W wewnętrznym silosie o ścianach równych w przybliżeniu grubości strefy ścinania w początkowej fazie wypływu lokalizacje występują w postaci łukowatych przesklepień nad otworem wylotowym (rys. 7a-d), które następnie przechodzą w łukowate odbicia (rys. 7e-h) – występuje więc tutaj pełna analogia do zachowania się materiału podczas opróżniania silosu ze ścianami gładkimi. Powyższe wyniki potwierdzają tezę, że mechanizm powstawania lokalizacji jest jednakowy, niezależnie od szorstkości ścian, natomiast wielkości lokalizacji są znacznie zaniżone ze względu na podatność ścian silosu wewnętrznego.

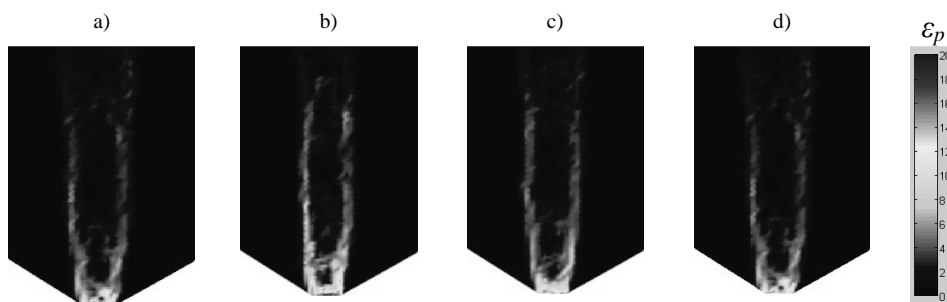
Metoda PIV umożliwiła również potwierdzenie tezy, że mechanizm tworzenia się lokalizacji wewnątrz przepływającego materiału sypkiego jest niezależny od prędkości wypływu materiału sypkiego z silosu. Analiza wybranych chwil czasowych (bez sumowania odkształceń) pokazała, że dla przypadku wypływu kontrolowanego w materiale sypkim również powstają łukowane odbicia (rys. 8A), zbliżone kształtem oraz zakresem występowania do pojawiających się w czasie wypływu grawitacyjnego (rys. 8B).

Metoda PIV umożliwiła ponadto potwierdzenie tezy, że mechanizm tworzenia się lokalizacji wewnątrz przepływającego materiału sypkiego jest niezależny od rodzaju wypływu. Przedstawiony na rysunku 5b rozwój lokalizacji na podstawie odkształceń postaciowych ε_p (dla przypadku piasku zagęszczonego, ścian gładkich i wypływu grawitacyjnego) nie wykazał tworzenia się łukowatych odbić wewnątrz kanału przepływu dla przypadku przepływu kominowego (widocznych na rysunku 2 dla przypadku przepływu masowego). W rzeczywistości w przypadku przepływu kominowego mamy do czynienia z sytuacją *silosu w silosie*, podobnie jak w przypadku przepływu masowego i ścian bardzo szorstkich. Analiza wybranych chwil czasowych (bez sumowania odkształceń) pokazała, że mechanizm powstawania lokalizacji w czasie przepływu kominowego jest taki sam jak w czasie przepływu masowego: tworzące się przy ścianach *strefy martwe* symulują podatną ścianę silosu, tak więc w wewnętrznym silosie o ścianach równych w przybliżeniu grubości *stref martwych* w początkowej fazie wypływu lokalizacje występują w postaci łukowatych przesklepień nad otworem wylotowym (rys. 9), które następnie przechodzą w słabo widoczne łukowate odbicia – występuje więc tutaj pełna analogia do zachowania się materiału podczas opróżniania silosu z przepływem masowym i ze ścianami gładkimi.



Rys. 8. Zmiana odkształceń postaciowych ϵ_p (nie sumowanych) w zagęszczonym piasku średnioziarnistym $d_{50} = 0,8$ mm w silosie ze ścianami gładkimi i przepływem masowym: A) wypływ kontrolowany: a) 12,5-13,75 s, b) 17,5-18,0 s, c) 22,5-23,0 s, B) wypływ grawitacyjny: a) 1,575-1,626 s, b) 1,70-1,75 s, c) 1,825-1,875 s

Fig. 8. Evolution of the deviatoric strain ϵ_p (not summarised) in dense sand with the main grain diameter $d_{50} = 0,8$ mm in a silo with smooth walls and mass flow at: A) controlled emptying: a) 12.5-13.75 s, b) 17.5-18.0 s, c) 22.5-23.0 s, B) gravitational emptying: a) 1.575-1.626 s, b) 1.70-1.75 s, c) 1.825-1.875 s



Rys. 9. Zmiana odkształceń postaciowych ϵ_p (nie sumowanych) w zagęszczonym piasku średnioziarnistym $d_{50} = 0,8$ mm w silosie ze ścianami gładkimi i przepływem kominowym:

a) 1.75-1.80 s, b) 2.0-2.05 s, c) 2.25-2.30 s, d) 2.5-2.55 s (wypływ grawitacyjny)

Fig. 9. Evolution of the deviatoric strain ϵ_p (not summarised) in dense sand with the main grain diameter $d_{50} = 0,8$ mm in a silo with smooth walls and mass flow at: a) 1.75-1.80 s, b) 2.0-2.05 s, c) 2.25-2.30 s, d) 2.5-2.55 s (gravitational emptying)

WNIOSKI

1. W czasie opróżniania silosu zawierającego piasek wstępnie zagęszczony występuje wzrost asymetrii wypływu. Sytuacja ta ma miejsce w czasie przepływu zaawansowanego niezależnie od szorstkości ścian, w praktyce zarówno dla przepływu masowego, jak również dla przepływu kominowego.

2. W przypadku przepływu masowego szerokość lokalizacji odkształceń w postaci przyściennej strefy ścinania wzrasta wraz ze wzrostem szorstkości ścian i zmniejszeniem zagęszczenia początkowego materiału sypkiego. W przypadku przepływu kominowego szerokość kanału przepływu maleje wraz ze wzrostem zagęszczenia początkowego materiału sypkiego.

3. Wewnętrzne lokalizacje w materiale sypkim podczas opróżniania występują jedynie dla przypadku materiału wstępnie zagęszczonego.

4. Mechanizm powstawania lokalizacji odkształceń w silosie wewnątrz przepływającego materiału sypkiego jest jednakowy, niezależnie od rodzaju przepływu-lokalizacje powstają w dolnej części silosu propagując ku górze.

5. Ocena migracji lokalizacji poprzez materiał sypki możliwa jest do oszacowania dzięki zastosowaniu analizy wybranych chwil czasowych przepływu silosowego.

PIŚMIENNICTWO

- Adrian R.J., 1991. Particle imaging technique for experimental fluid mechanics. *Ann. Rev. Fluid Mechanics*, 23, 261-304.
- Buick J.M., Chavez-Sagarnaga J., Zhing Z., Ooi J.Y., Pankaj D.M, Cambell D.M, Greated C.A., 2005. Investigation of silo-honking: slip-stick excitation and wall vibration. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 131, 3, 299-307.
- Buick J.M., Pankaj Y, Ooi J.Y, Chavez-Sagarnaga J., Pearce A., Houghton G., 2004. Motion of granular particles on the wall of a model silo and the associated wall vibrations. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 37, 2751-2760.
- DeJong J.T., White D.J., Randolph M.F., 2006. Microscale observation and modeling of soil-structure interface behavior using particle image velocimetry. *Soils and Foundations*, 46, 1, 15-28.
- Hutter K., Kuerchner N., 2003. PIV for granular avalanches. *Dynamical response of granular and powder materials in large and catastrophic deformations*. Springer.
- Kohse W.C., 2002. Experimentell Untersuchung von Scherfugenmustern in Granulaten, Diplomarbeit, Institute for Soil and Rock Mechanics, University of Karlsruhe, Karlsruhe, 1-42.
- Michalowski R.L., 1984. Flow of granular material through a plane hopper. *Powder Technology*, 39, 29-40.
- Michalowski R.L., 1990: Strain localization and periodic fluctuations in granular flow processes from hoppers. *Geotechnique* 40, 3, 389-403.
- Niedostatkiewicz M., 2009. Zastosowanie metody rentgenowskiej (promieniowania X) do analizy rozkładu lokalizacji w materiałach sypkich podczas opróżniania silosów. Raport wewnętrzny. Politechnika Gdańska, Gdańsk.



- Niedostatkiewicz M., Tejchman J., 2005. Application of a Particle Image Velocimetry technique for deformation measurements of bulk solids during silo flow. *Powder Handling & Processing*, 17, 4, 216-220.
- Niedostatkiewicz M., Tejchman J., Grudzień K., Chaniecki Z., 2009. Application of ECT to solid concentration measurements during granular flow in a rectangular model silo. *Chemical Engineering Research and Design*, (<http://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.01.034>).
- Nübel K., 2002. Experimental and numerical investigation of shear localisation in granular materials. Publication Series of the Institute of Soil and Rock Mechanics, University Karlsruhe, Karlsruhe, 62.
- Ostendorf M., Schwedes J., 2005. Application of Particle Image Velocimetry for velocity measurements during silo discharge. *Powder Technology*, 158, 69-75.
- Sielamowicz I., Kowalewski T., Błoński S., 2005. Application of digital particle image velocimetry in registrations of central and eccentric granular material flows. *Proceedings of International Conference Powder and Grains 2005*, 903-908.
- Słominski C., 2003. Experimental investigation of shear localization using a PIV method. Internal Report of the Institute for Rock- and Soil Mechanics, University of Karlsruhe, Karlsruhe.
- Słominski C., Niedostatkiewicz M., Tejchman J., 2006. Deformation measurements in granular bodies using a Particle Image Velocimetry technique. *Archives of Hydro-and Environmental Engineering*, 53, 1, 71-94.
- Słominski C., Niedostatkiewicz M., Tejchman J., 2007. Application of particle image velocimetry (PIV) for deformation measurement during granular silo flow. *Powder Technology*, 173, 1, 1-18.
- White D.J., Take W.A., Bolton M.D., 2003. Soil deformation measurements using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. *Geotechnique*, 53, 7, 619-631.

DESCRIPTION OF THE MECHANISM OF THE FORMATION
OF LOCALISED STRAIN INSIDE A BULK SOLID DURING SILO
EMPTYING ON THE BASIS OF PIV MEASUREMENT TECHNIQUE
(PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY)

Maciej Niedostatkiewicz

Department of Fundamentals of Building and Material Engineering,
Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdańsk University of Technology
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
e-mail: mniedost@pg.gda.pl

Abstract. The paper presents the results of experimental works aimed at providing an explanation of the mechanism of the formation of localised strain inside a bulk solid during silo emptying. The Particle Image Velocimetry (PIV) technique was used to explain the mechanism of the formation of localised strain in flowing sand during silo emptying, both along the silo walls and at the silo width. Experiments were performed for mass and funnel flow silos, for different initial densities and wall roughness. The influence of silo emptying velocity (gravitational and controlled flow) was taken into account. The results obtained indicated that the width of localised strain changes during silo emptying and that the mechanism of its formation is similar irrespective of the initial conditions and the shape of the silo.

Keywords: silo, localisation, PIV, density

