

Zbigniew SIKORA, Rafał MICHALAK, Mariusz WYROŚLAK
Politechnika Gdańska

NOWA TECHNIKA POMIARÓW DEFORMACJI MATERIAŁU T-S

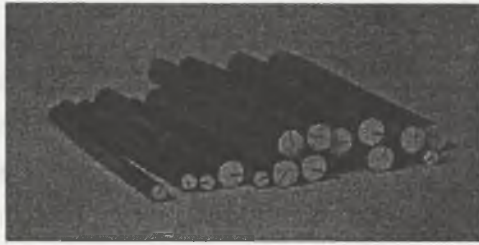
Streszczenie. W artykule przedstawiono treściwy opis wybranych elementów nowego stanowiska badawczego dla materiału Taylor-Schneebeli (T-S) w warunkach płaskiego stanu odkształcenia. Omówiono wykorzystywane systemy pomiarowe, w tym nowy oparty na rejestracji zdjęć cyfrowych. Analiza pomiarów związana jest z metodami cyfrowej interpretacji obrazów, co umożliwia śledzenie pola przemieszczenia i obrotów cząstek materiału modelowego.

A NEW MEASUREMENT METHOD OF T-S MATERIAL DEFORMATION

Summary. A brief description of a new Taylor-Schneebeli stand in plain strain conditions is presented. The measurement systems used as well as the new one based on digital recording technique is described. The analysis of measurement results is connected with a new technique of digital image processing procedure. Displacement and rotation of all the grains of the model material is possible on the basis of this new technology.

1. Materiał Taylor-Schneebeli jako ośrodek rozdrobniony

W badaniach laboratoryjnych mechaniki gruntów wykorzystuje się różne rodzaje ośrodka rozdrobnionego, ich wybór jest ściśle związany z programem podjętych badań. Materiał badawczy, zgodnie z ogólną zasadą, można podzielić w dwojaki sposób: na ośrodek pochodzenia naturalnego i na ośrodek analogowy. Jednym z istotnych i często stosowanym dwuwymiarowym materiałem badawczym jest ośrodek Taylor-Schneebeli (T-S), czyli wałeczki wykonane np. ze stopu aluminium (p. rys.1), drewna, *PVC* lub innych materiałów syntetycznych. Wałeczki układa się „jedne na drugich” w dwuwymiarowy stos o ustalonej strukturze. W Laboratorium Mechaniki Gruntów na Wydziale Budownictwa Wodnego i Inżynierii Środowiska Politechniki Gdańskiej od wielu lat wykorzystuje się przedstawiony na



Rys. 1. Aluminiowe wałeczki Taylor-Schneebeili ze znacznikami
Fig. 1. Taylor-Schneebeili aluminum rods with special markers

rys. 1 materiał T-S. Dwie charakterystyczne właściwości tego materiału są następujące [5]:
1) stos wałeczków stanowi strukturę dwuwymiarową, 2) mieszanina wałeczków (długość – 60 mm, średnice – 3 mm i 5 mm) o różnych średnicach tworzy ośrodek niespoisty o wartości kąta tarcia wewnętrznego w granicach $\phi = 23 \pm 3^\circ$.

Część wałeczków wyposażono w znaczniki (rys. 1), które wykorzystywane są w cyfrowej analizie obrotów i przemieszczeń poszczególnych cząstek T-S w obrębie formującego się pasa deformacji. Znaczniki wykonano w formie kółek o średnicy odpowiadającej średnicom wałeczków. Aby możliwa była analiza obrotów i przemieszczeń wałeczków (kółek), na znacznikach umieszczono promienie kółek o grubości 0.2 mm.

Tablica 1

Cechy fizyczne wałeczków

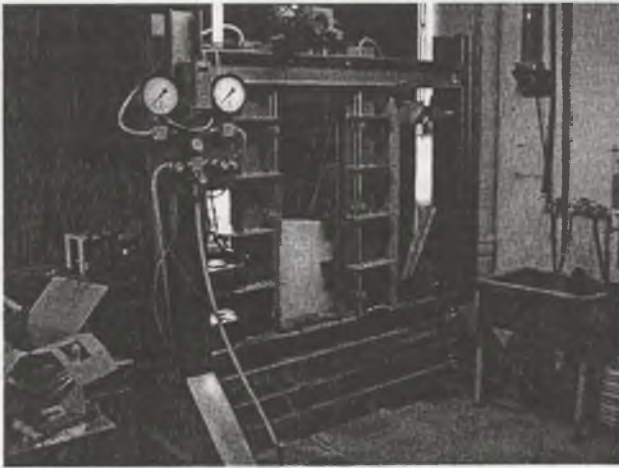
Rodzaj wałeczków	Średnia masa 1 szt. m [g]	Gęstość objętościowa maksymalnie zagęszczonego stosu ρ [g/cm ³]	Porowatość n [%]		Wskaźnik porowatości e [%]	
			max	min	max	min
$\Phi 3$	1.23	2.61	21.6	9.3	27.6	10.3
$\Phi 5$	3.08	2.4				
$\Phi 3+5$ mieszane w stosunku wagowym 1:1	-	2.25	18.4	-	22.6	-

Jednym z podstawowych zadań w ramach mechaniki ośrodków rozdrobnionych jest określenie zachowania się ośrodka w skali makro na podstawie właściwości ośrodka w mikroskali. Taki cel badań postawiono podczas budowy nowego stanowiska do badań modelowych [3], w którym analizowano deformację stosu T-S poddanego obciążeniu ściskającemu w warunkach płaskiego stanu odkształcenia. Istotnym elementem badań był

pomiar przemieszczenia i obrotów wałeczków T-S, w szczególności w obszarze strefy lokalizacji pasa deformacji.

2. Nowe stanowisko do badań modelowych T-S

W pracach projektowych nad nowym stanowiskiem badawczym punktem wyjścia była stosowna adaptacja istniejących urządzeń w Laboratorium Mechaniki Gruntów Katedry Geotechniki, opracowanych wcześniej koncepcji technicznych oraz wieloletnich doświadczeń w badaniach modelowych gruntu. Nowe stanowisko badawcze wymagało jednak opracowania wielu własnych autorskich rozwiązań technicznych [1]. Na rys. 2 przedstawiono ogólny widok stanowiska badań modelowych.

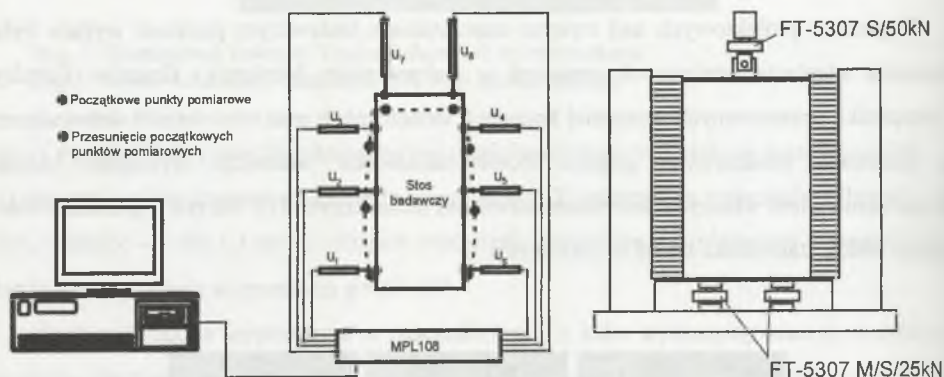


Rys. 2. Ogólny widok stanowiska badawczego dla materiału T-S
Fig. 2. General view of the experimental stand for T-S material

Podstawowy cel badawczy dotyczył śledzenia zjawisk lokalizacji obszarów deformacji w ośrodku rozdrobnionym. Kontrolę warunków brzegowych obciążenia w skali makro realizowano wykorzystując klasyczną technikę analogową.

Na rys. 3 przedstawiono ideowy schemat stanowiska badań modelowych wraz z rozmieszczeniem analogowych urządzeń pomiarowych przemieszczenia. Zastosowano analogowe przetworniki przemieszczenia *PSx100*, które mocowano do belki nośnej konstrukcji stanowiska, oraz mierniki siły: FT-5307 S/50kN, FT-5307 M/S/25kN (rys. 3).

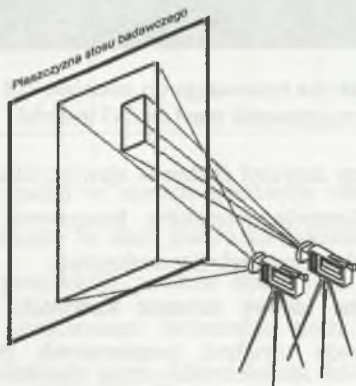
Pomiar przemieszczenia i obrotów poszczególnych wałeczków realizowano wykorzystując technikę rejestracji cyfrowego wideo DV. Dokładna analiza zjawiska lokalizacji deformacji wymaga wykonania badań na próbkach odpowiednio dużych rozmiarów. Stanowisko badawcze umożliwiło badanie próbek o maksymalnych wymiarach $(80-100) \times (50-100)$ cm (odpowiednio wysokość i szerokość) z możliwością łatwej ich zmiany [3].



Rys. 3. Schemat rozmieszczenia mierników przemieszczenia i siły
Fig. 3. A chart of the displacement and force measurement system

2.1. Schemat pomiarów cyfrowych

Celem rejestracji wideo był jakościowy opis zachowania się całego stosu badawczego oraz ilościowy opis przemieszczeń i obrotów wałeczków w wybranym obszarze formującego się pasa deformacji. W każdej serii badań rejestrowano deformację stosu za pomocą dwóch konwencjonalnych cyfrowych kamer wideo, tj. *SONY DCR-TRV20* oraz *JVC GR-DVL9600*.

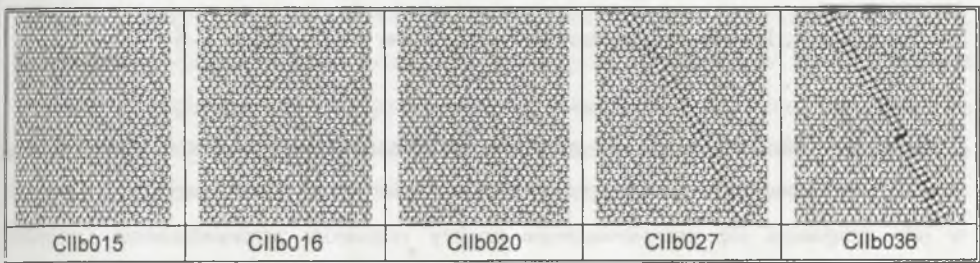


Rys. 4. System równoczesnej rejestracji deformacji stosu ośrodka T-S
Fig. 4. Simultaneous DV-recording system of T-S material deformation

Jedna z kamer rejestrowała obraz całego stosu, natomiast druga wybrany fragment stosu, w którym przewidywano pojawienie się pasma lokalizacji (rys. 4). Sprzężenie kamer z systemem rejestracji danych w skali makro następowało na podstawie parametru czasowego.

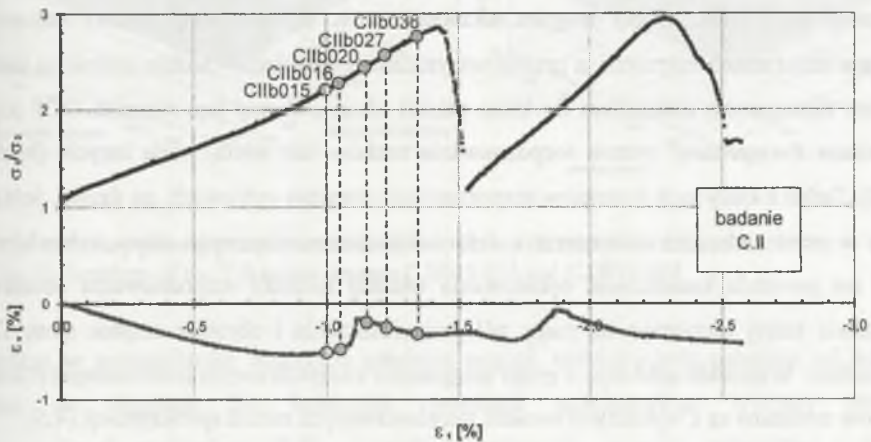
2.2. Prezentacja wybranej serii badań

Wykonano szeroki program badań modelowych [5]. W artykule omawia się jedynie jedno badanie z serii C.IIb (zgodnie z oryginalną numeracją w [5]), na podstawie którego można pokazać wybrane możliwości nowej techniki pomiarowej przemieszczenia i obrotów rejestrowanych wałeczków w wyselekcjonowanym fragmencie deformującego się stosu.



Rys. 5. Kolejne obrazy lokalizacji strefy deformacji w badaniu C.IIb

Fig. 5. Consecutive images of shear-band localization in experiment No. C.IIb



Rys. 6. Zależność naprężenie-odkształcenie z wydzielonymi punktami krzywej

Fig. 6. Stress-strain relationship with evidence of the deformation images

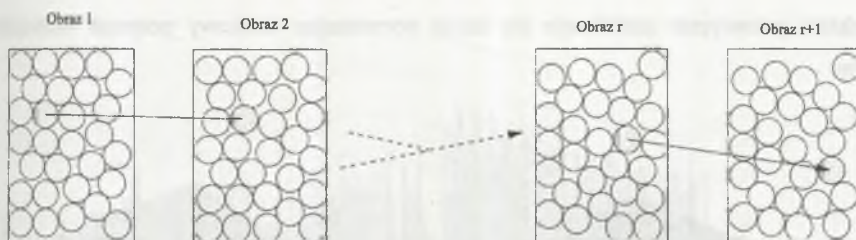
Przedmiotem badania (seria C.IIb) był stos wałeczków (T-S, $\Phi 5 \text{ mm}$) o wysokości 100 cm i szerokości 50 cm . Stałe naprężenie boczne wynosiło 200 kPa . Składową naprężenia pionowego, w badaniu dwuosowego ściskania, zadawano w sposób kinematyczny.

Na rys. 5 przedstawiono serię obrazów w momencie tworzenia się pasa deformacji, które są podstawą do ilościowego oszacowania obrotów i przemieszczeń wałeczków w strefie zlokalizowanej deformacji. Zależność naprężenie-odkształcenie, z zaznaczeniem punktów reprezentujących koincydencje wybranych obrazów z przebiegiem obciążenia całego stosu, przedstawiono na rys. 6.

3. Metoda pomiarów przemieszczeń i obrotów wałeczków T-S

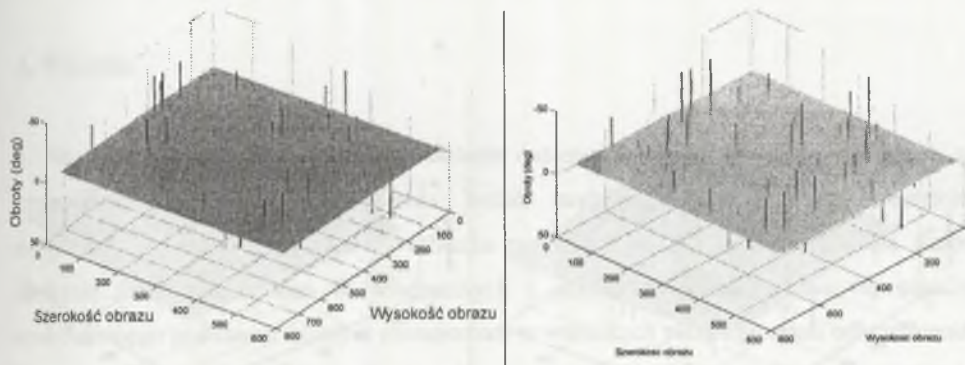
Ilościowy opis zachowania się materiału rozdrobnionego na poziomie mikro wymaga stosowania niestandardowego oprogramowania komputerowego. Należy zaznaczyć, że sposób, w jaki proponuje się przeprowadzenie analizy pomiarów przemieszczenia i obrotów wałeczków T-S, należy do unikatowych w skali obecnych badań materiałów rozdrobnionych. W literaturze znane są metody takie, jak na przykład: *PIV (Particle Image Velocimetry)*, której przedmiotem badań jest głównie mechanika płynów, *DIP (Digital Image Processing)* wykorzystujący rozbudowany program **MATHEMATICA 4**, który znajduje swe zastosowanie w wielu dziedzinach inżynierii, a przede wszystkim bioinżynierii – bazuje jednak na obrazach cząstek zajmujących maksimum do kilku pikseli obrazu. Znany jest również *OCR (Optical Character Recognition)*, system rozpoznawania znaków, lub wiele, wiele innych, (Michalak, 2002). Żaden z klasy tych systemów rozpoznawania obrazów cyfrowych, na dzisiaj, jednak nie służy w pełni zadaniom związanym z deformacją dwuwymiarowego stosu wałeczków T-S. Stąd też powstała konieczność opracowania własnej techniki rozpoznawania obrazów, na podstawie której otrzymuje się mapy pól przemieszczenia i obrotów cząstek stosu Taylor-Schneebeli. Wszystkie aplikacje z grupy programów komputerowych przetwarzających obrazy cyfrowe związane są z wykorzystywaniem zaawansowanych metod aproksymacji [4,5].

Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów do dyspozycji pozostaje baza danych w postaci zdjęć reprezentujących zapis przemieszczania się i obrotów wałeczków w obrębie formującego się pasa deformacji [3].



Rys. 7. Schemat serii obrazów deformacji stosu wałeczków Taylor-Schneebeli
 Fig. 7. A schematic image series of T-S material deformation

Ocena deformacji stosu następuje poprzez porównanie pozycji wałeczków na dwóch kolejnych obrazach zarejestrowanych podczas realizacji badania modelowego, p. rys. 7. Sprawdzeniu podlegają dane o lokalizacji poszczególnych wałeczków i nachyleniu ich znaczników względem osi odciętych. Metoda lokalizacji wałeczków (*de facto* ich znaczników) nie wymaga numeracji wałeczków, co z punktu widzenia zastosowań jest bardzo

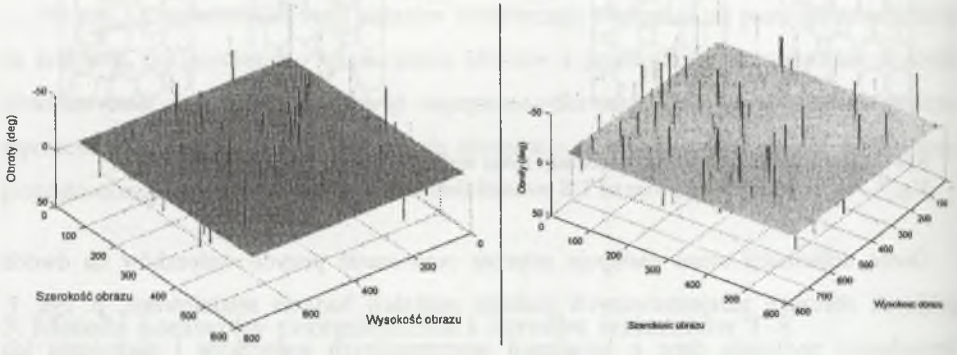


Rys. 8. Obroty poszczególnych wałeczków T-S; obrazy C.II015-016 i C.II015-020
 Fig. 8. Rotations of the T-S grains; images C.II015-016 and C.II015-020

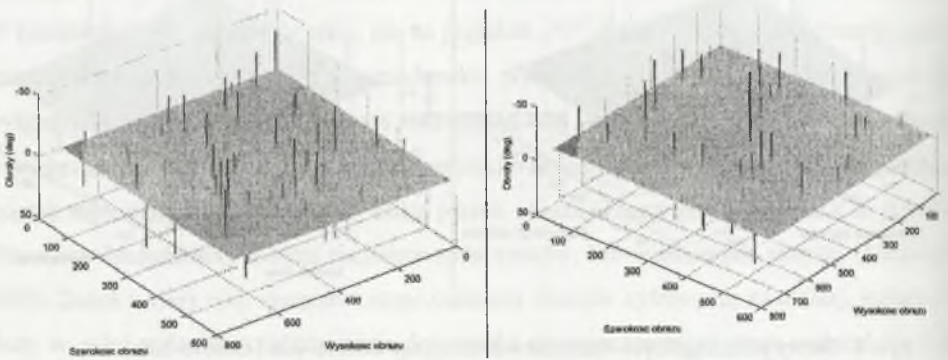
wygodne, w szczególności względem ustalania pozycji wałeczka przy przejściu od jednego obrazu do drugiego. Na kolejnych rysunkach przedstawiono wykresy obrotów poszczególnych wałeczków T-S w wyniku porównania pozycji wałeczków z dwóch wybranych obrazów zgodnie z numeracją na rys. 5.

Na rys. 8 i rys. 9 zauważa się, że wartości obrotów wałeczków w ścisłej strefie lokalizacji zwiększają i zmniejszają się na przemian w miarę obciążania stosu. Obroty są rozłożone na całym obszarze rejestrowanego fragmentu stosu. Wyrazne pasmo ścinania generuje się na zdjęciu CIIb015-CIIb027. Można zatem uznać, że w trakcie deformacji stosu między

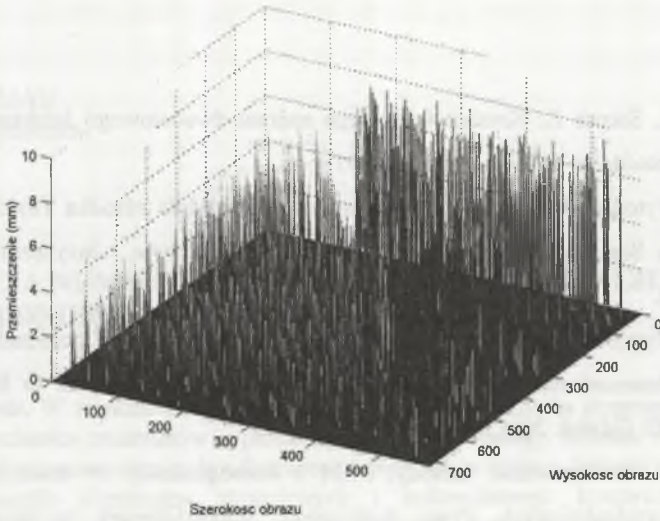
wałeczkami pulsacyjnie mobilizuje się tarcie wymuszając skokowy przyrost wzajemnych obrotów.



Rys. 9. Obrotu poszczególnych wałeczków T-S; obrazy C.Π015-027 i C.Π015-036
 Fig. 9. Rotations of the T-S grains; images C.Π015-027 and C.Π015-036



Rys. 10. Obrotu poszczególnych wałeczków T-S; obrazy C.Π016-020 i C.Π020-027
 Fig. 10. Rotations of the T-S grains; images C.Π016-020 and C.Π020-027



Rys. 11. Wypadkowe przesunięcie wałeczków T-S; obrazy C.II015-027
 Fig. 11. Displacement of the T-S grains; images C.II015-027

4. Wnioski

Na podstawie przykładu opisanego badania deformacji stosu T-S można stwierdzić, że opracowana metodologia prowadzenia badań modelowych na nowym stanowisku modelowym oraz nowa jakościowo technika pomiarów od skali mikro do skali makro stwarzają możliwości badań doświadczalnych i analitycznych zachowania się ośrodka rozdrobnionego poddanego różnym obciążeniom w warunkach płaskiego stanu odkształcenia. Cennym aspektem cyfrowej analizy zarejestrowanych obrazów jest fakt, że częstokroć żmudny i czasochłonny eksperyment można „powtarzać” praktycznie nieograniczoną ilość razy, za każdym razem zwracając uwagę na inny aspekt deformującego się stosu. Nowe aplikacje komputerowej analizy obrazu są narzędziem, za pomocą którego można bez trudu „dostać się do informacji każdego ziarna” materiału rozdrobnionego, w tym przypadku materiału Taylor-Schneebeli.

PODZIĘKOWANIA

Autorzy składają podziękowania KBN za wsparcie finansowe w ramach następujących projektów badawczych: 1578/T07/2001/20 oraz 7T07E/00418.

LITERATURA

1. Wyroślak M., Sikora Z.: Koncepcja nowego aparatu dwuosowego ściskania, *Inżynieria Morska i Geotechnika* 1999, nr 5, s. 236-241
2. Sikora Z., Wyroślak M.: Aparat dwuosowego ściskania dla ośrodka Taylor-Schneebeli. Jubileuszowa Sesja Naukowa: Geotechnika w Budownictwie i Inżynierii Środowiska, Gdańsk 2000.
3. Sikora Z., Wyroślak M.: A new Taylor-Schneebeli apparatus for localization problems. Proc. in V International Seminar on Renovation and Improvements to Existing Quay Structures, PG, Gdańsk 2001, s. 129-137.
4. Michalak R.: Zastosowanie metody DEM i homogenizacji w analizie równowagi materiałów rozdrobnionych. Praca dyplomowa *State-of-the-art*. w ramach Studium Doktoranckiego "Geotechnika i inżynieria środowiska", PG, Gdańsk 2002
5. Wyroślak M.: Analiza stref derormacji w modelowym ośrodku rozdrobnionym, praca doktorska, PG, XII 2002-12-10.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ryszard IZBICKI

Abstract

A brief description of selected elements of a new Taylor-Schneebeli stand in plain strain conditions is presented. The measurement systems used as well as the new one based on digital recording technique is described. The analysis of measurement results is connected with a new technique of digital image processing procedure. Displacement and rotation of all the grains of the model material is possible on the basis of this new technology.