

Barbara KLISZCZEWICZ<sup>1</sup>

## WERYFIKACJA NUMERYCZNEGO MODELU UKŁADU RURA-GRUNT NA PODSTAWIE BADAŃ LABORATORYJNYCH

W artykule przedstawiono przebieg i wyniki badań laboratoryjnych układu rura – grunt. Układ ten odwzorowuje rurociąg ułożony w gruncie, poddany działaniu ciężaru gruntu oraz obciążenia naziomu. Celem badań było określenie zasięgu stref współdziałania podatnego rurociągu z gruntem oraz oszacowanie deformacji rury. Przebieg badań rejestrowano fotograficznie, zaś fotografie poddano obróbce w technologii PIV (Particle Image Velocimetry). W efekcie otrzymano mapy przemieszczeń gruntu oraz wyznaczono deformację rury, zarejestrowane w trakcie badań. Wyniki badań posłużyły do weryfikacji konstytutywnego modelu gruntu Hardening Soil Small, użytego w numerycznej symulacji przebiegu badań laboratoryjnych.

**Słowa kluczowe:** badania laboratoryjne, podziemny rurociąg, PIV, MES

### 1. Wprowadzenie

Rurociąg ułożony w gruncie stanowi układ wzajemnie oddziałujących na siebie struktur (rurociąg – grunt). Konstrukcja rurowa przenosi obciążenia wynikające z faktu otoczenia jej gruntem, a także bardzo zróżnicowane obciążenia naziomu przekazywane przez warstwę gruntu zalegającą nad rurą. W wypadku rurociągów ciśnieniowych do tego złożonego układu obciążeń zewnętrznych dochodzi jeszcze wpływ ciśnienia wewnętrznego. W zależności od sztywności rurociągu, a ściślej od jego odkształcalności, rurociąg albo doznaje istotnego wyciężenia (rurociągi sztywne) albo odkształca się w takim zakresie, w jakim umożliwia to odkształcalność gruntu (rurociągi odkształcalne). O zakresie i charakterze deformacji rurociągu decyduje wówczas relacja sztywności układu rurociąg-grunt.

Oszacowanie wyciężenia podziemnego rurociągu lub jego deformacji wymaga sięgnięcia do jednej z metod analitycznych [2], [6] lub zastosowania współczesnych metod numerycznych (MES). W tym ostatnim przypadku należy

---

<sup>1</sup> Politechnika Śląska, Katedra Dróg i Mostów, Wydział Budownictwa, 44-100 Gliwice, ul. Akademicka 5, tel. + 48 (32) 237 22 57, e-mail: Barbara.Kliszczewicz@polsl.pl

podjąć decyzję o przyjęciu reprezentatywnego modelu obliczeniowego (model 2D lub 3D), wprowadzeniu właściwego odwzorowania parametrów materiałowych konstrukcji rurowej oraz parametrów geotechnicznych gruntu otaczającego rurociąg, a przede wszystkim wybrać odpowiedni konstytutywny model gruntu. Spośród szerokiej gamy takich modeli, od prostych modeli sprężystych, przez sprężysto-idealnie plastyczne po bardziej zaawansowane modele sprężysto-plastyczne o wzmocnieniu izotropowym czy izotropowo-kinematycznym, najczęściej wybierane są modele, których parametry są łatwo identyfikowalne. Należy do nich z pewnością sprężysto-idealnie plastyczny model Coulomba-Mohra. Model ten, mimo niewątpliwych zalet aplikacyjnych, nie odzwierciedla złożonych procesów zachodzących w gruncie, a szczególnie istotnych w zagadnieniach interakcji konstrukcji z gruntem. Należą do nich efekt zagęszczenia (zmniejszenie objętości porów na skutek deformacji plastycznych), wpływ historii obciążenia (efekt prekonsolidacji), plastyczne płynięcie, zależności sztywności od stanu naprężeń efektywnych (wzrost modułu sztywności wraz ze wzrostem głębokości lub stanu naprężeń), dylatacja (zmianę objętości podczas plastycznego płynięcia) a przede wszystkim silną zmianę sztywności gruntu (degradacja modułu  $G_0$ ), towarzyszącą wzrostowi amplitudy odkształcenia dewiatorowego w zakresie tzw. małych odkształceń rzędu  $10^{-6} \div 10^{-3}$  [1], [4], [11]. Realistyczne odwzorowanie tych złożonych efektów makroskopowych, obserwowanych w monotonicznie obciążonych gruntach jest możliwe przy zastosowaniu dwumechanizmowego, sprężysto-plastycznego modelu o wzmocnieniu izotropowym *Hardening Soil Small*, który jest wbudowany m.in. w geotechnicznie zorientowanym programie *Z\_Soil* [11]. Model ten nie był dotychczas stosowany w numerycznym modelowaniu interakcji rurociągu z gruntem. Zdecydowano się zatem na przeprowadzenie jego weryfikacji poprzez analizę zbieżności wyników specjalnie dla tych potrzeb przeprowadzonych badań laboratoryjnych z wynikami ich numerycznej symulacji, w której zastosowano model *Hardening Soil Small*.

## 2. Badania laboratoryjne układu rura-grunt

### 2.1. Uwagi wstępne

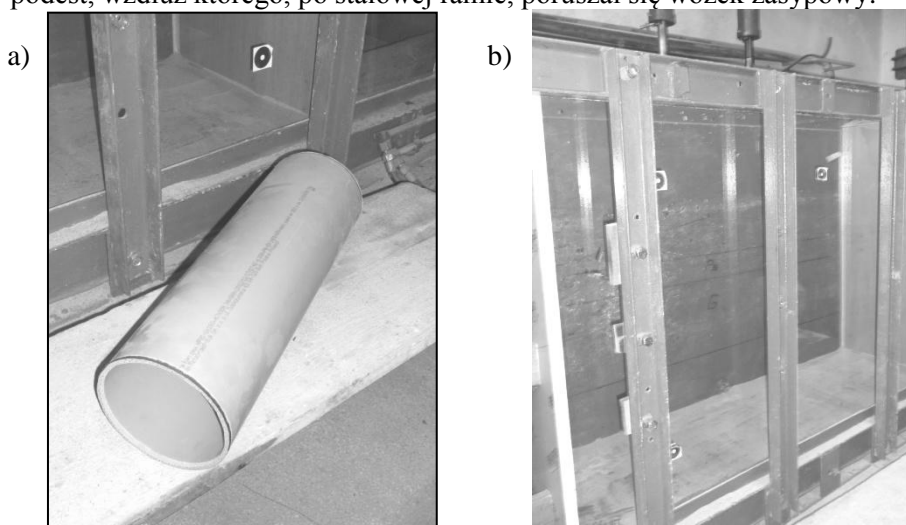
Badania doświadczalne rurociągów są zazwyczaj prowadzone przez uprawnione jednostki w celu określenia ich parametrów wytrzymałościowych lub dla potwierdzenia możliwości stosowania prostych odcinków rur, kształtek lub łączników w określonych warunkach funkcjonowania (atestowanie wyrobów). Inną klasę badań stanowią pomiary o charakterze monitorującym skutki specyficznych zjawisk zachodzących w gruncie, np. wpływ eksploatacji górniczej [8], symulowanie wpływu uskoków terenowych czy trzęsień ziemi [3], [9]. Sporadycznie wykonywane są także badania rurociągów ułożonych w gruncie, w naturalnej skali, poddanych działaniu obciążeń komunikacyjnych [5]. W badaniach

tych uwaga skupiona jest na odcinku rury, natomiast nie jest badana interakcja rurociągu z gruntem, szczególnie istotna w wypadku odkształcalnych rurociągów. Badania laboratoryjne układu rura-grunt wymagają użycia specjalnego stanowiska badawczego, w którym odwzorowane zostaną naturalne warunki pracy podziemnego rurociągu. Wykonanie takich badań było możliwe w Laboratorium Katedry Geotechniki, Geologii i Budownictwa Morskiego Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej, dysponującym stanowiskiem badawczym, wykorzystywanym głównie do przeprowadzanych tam badań współpracy modeli fundamentów z gruntem [12].

## 2.2. Opis stanowiska badawczego

Przedmiotem badań był odcinek odkształcalnej rury, ułożony w gruncie, w specjalnym stanowisku badawczym. Model rury (rys. 1a) użyty do badań wykonano z gładkościennej rury z PVC-U o litej ścianie, o wymiarach: średnica rury  $D = 160$  mm, grubość ścianki  $s = 4,7$  mm i parametrach katalogowych: SN8, klasa S, SDR 34. Długość odcinka rury  $l = 500$  mm dostosowano do szerokości stanowiska badawczego.

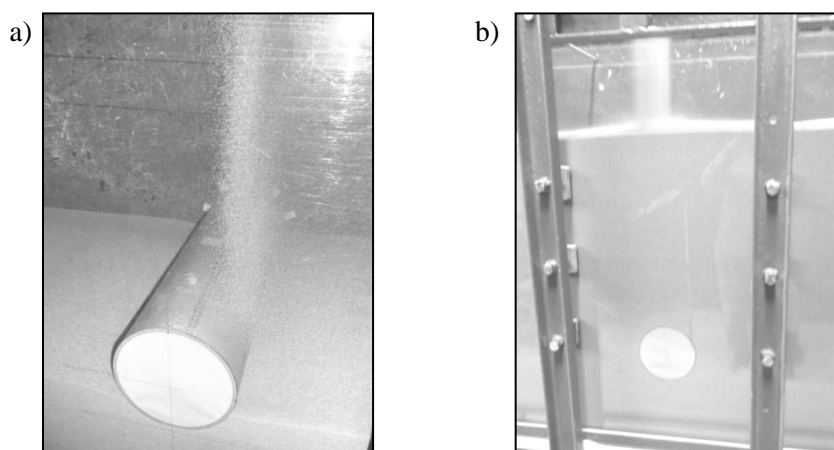
Stanowisko badawcze składało się z prostopadłościowej skrzyni z przezroczystą ścianą frontową, wykonaną z hartowanego szkła, wzmocnioną podłużnymi i poprzecznymi stalowymi belkami (rys. 1b). Nad skrzynią usytuowano podest, wzdłuż którego, po stalowej ramie, poruszał się wózek zasypowy.



Rys. 1. Widok stanowiska badawczego przed rozpoczęciem badań: a) model rury, b) skrzynia stanowiska badawczego

Fig. 1. View of the laboratory station before testing: a) pipe model, b) laboratory station box

W ramach przygotowania stanowiska do badań skrzynię napełniano piaskiem w stanie powietrzno-suchym, który w postaci kurtyny piaskowej był wysypywany ze stałej wysokości przez szczelinę w wózku zasypowym. W początkowej fazie napełniania skrzyni uformowano warstwę podsypki piaskowej, na której ułożono model rury. Następnie kontynuowano napełnianie skrzyni piaskiem, aż do pokrycia modelu rury warstwą o grubości 60 cm (rys.2).

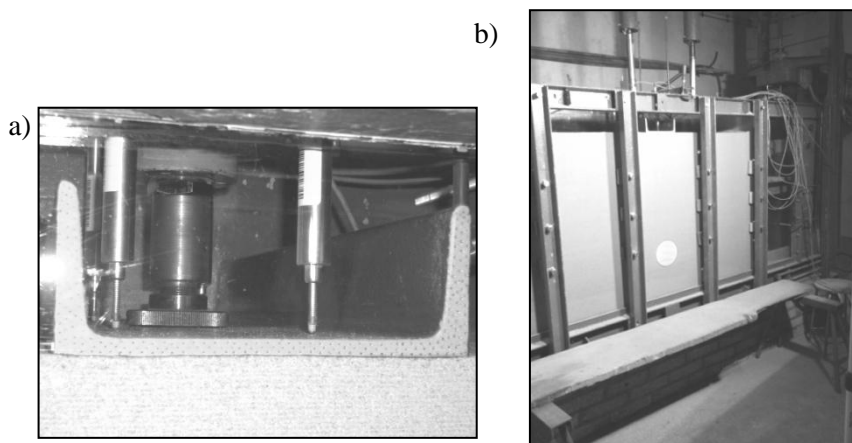


Rys. 2. Formowanie zasypki: a) obsypywanie modelu rury, ułożonego na podsypce piaskowej b) końcowa faza wykonywania zasypki

Fig. 2. Raising of the sand: a) initial phase - the pipe model rests on the sand layer, b) final phase of raising

Po takim przygotowaniu stanowiska przeprowadzono właściwe badanie, polegające na pośrednim obciążaniu warstwy gruntu za pomocą siłownika, zainstalowanego na stalowej ramie nad stanowiskiem badawczym. Obciążenie przekazywane było na grunt przez specjalnie przygotowany odcinek stalowego ceownika o szerokości 200 mm i długości 500 mm, ustawiony na powierzchni zasypu piaskowego. Odcinek ceownika w niniejszym opisie nazwano roboczo modelem fundamentu. Widok modelu fundamentu wraz z układem obciążającym i zainstalowanymi na modelu czujnikami przemieszczeń pokazano na rys. 3. W trakcie procesu obciążania na stanowisku komputerowym, za pomocą programu *DasyLab8*, prowadzona była automatyczna rejestracja wartości siły i pionowych przemieszczeń modelu fundamentu. Jednocześnie prowadzono fotograficzną rejestrację przemieszczeń modelu fundamentu, zmian zachodzących w ośrodku gruntowym oraz rejestrację deformacji rury. Zdjęcia wykonywano z częstotliwością 1 zdjęcia na minutę.

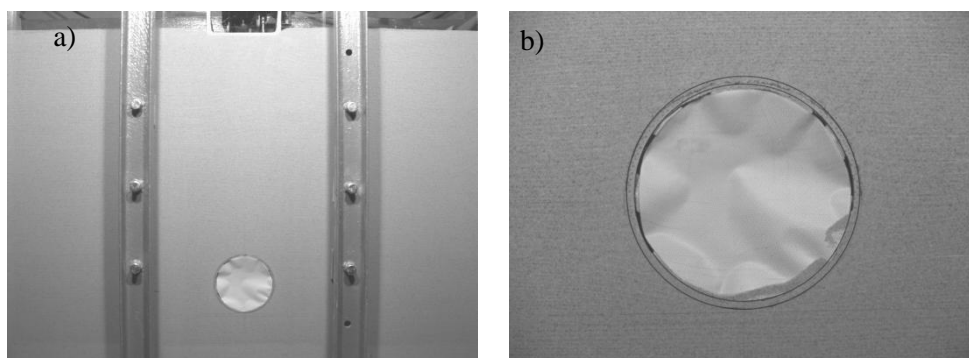
Metodykę i przebieg badań opisano szczegółowo w [7].



Rys. 3. Widok stanowiska badawczego przygotowanego do badań: a) model fundamentu, układu obciążającego i czujników przemieszczeń, b) skrzynia stanowiska badawczego wraz z modelem rury, wypełniona piaskiem

Fig. 3. View of the laboratory station ready for tests: a) the model of foundation with the servomotor and displacements sensors

W sumie wykonano cztery pełne cykle badań, obejmujące każdorazowo etapy przygotowania stanowiska i obciążania zasypu piaskowego wraz z rejestracją wyników. W poszczególnych badaniach wykonano  $22 \div 28$  zdjęć. Przykładowe fotografie stanowiska badawczego (badanie nr 3) oraz bezpośredniego otoczenia rury (badanie nr 4) pokazano na rys. 4.



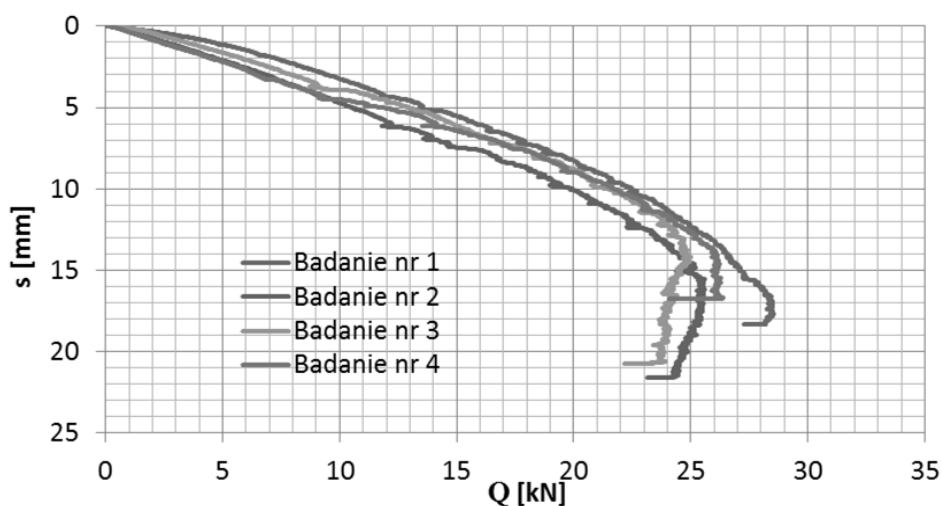
Rys. 4. Przykłady rejestracji fotograficznej, wykonanej w trakcie badań: a) obraz całego stanowiska badawczego, b) bezpośrednio otoczenie badanej rury

Fig. 4. Example photography records of the conducted tests: a) view of entire laboratory station, b) view of pipe's surroundings

### 2.3. Prezentacja wyników badań laboratoryjnych

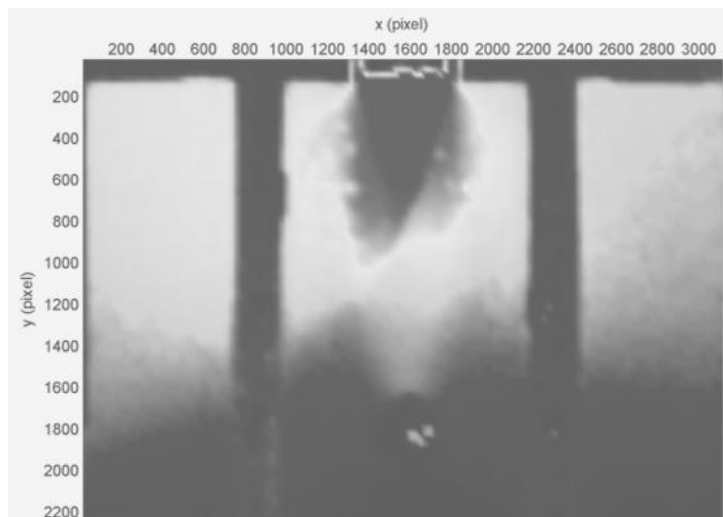
Na podstawie zarejestrowanych w programie *DasyLab8* wartości obciążeń modelu fundamentu i jego przemieszczeń, dla wszystkich czterech cykli badań opracowano charakterystyki obciążenie – osiadanie (rys. 5), obrazujące pionowe przemieszczenia modelu fundamentu wywołane monotonicznie narastającym obciążeniem, aż do osiągnięcia stanu granicznego w gruncie.

Z kolei serie cyfrowych zdjęć, o bardzo wysokiej rozdzielczości, wykonane w trakcie badań, zostały przetworzone za pomocą technologii *PIV* (*Particle Image Velocimetry*) [13]. Umożliwiło to wygenerowanie obrazów izopól i trajektorii przemieszczeń cząstek gruntu oraz oszacowanie deformacji poprzecznego przekroju rury, wywołanych obciążeniem. Przykładowe mapy izopól przemieszczeń (badanie nr 3) w końcowym etapie obciążania, przed osiągnięciem granicznego stanu gruntu w obszarze całego stanowiska badawczego oraz w bezpośrednim otoczeniu rury pokazano na rys. 6.



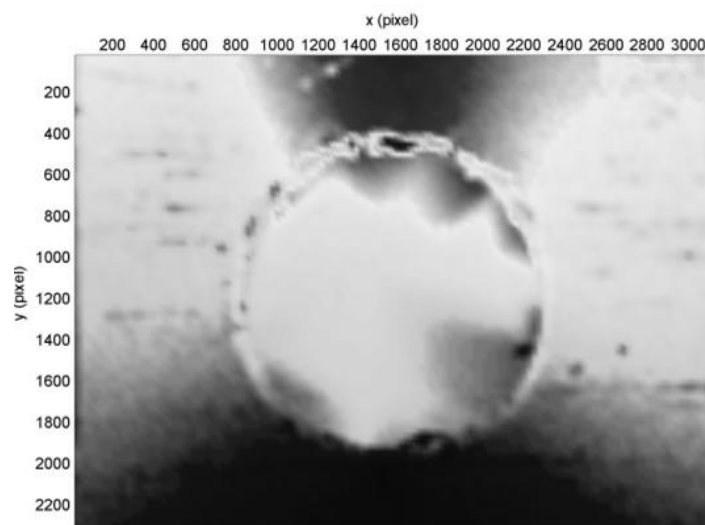
Rys. 5. Charakterystyki obciążenie – osiadanie uzyskane na podstawie rejestracji przemieszczeń modelu fundamentu

Fig. 5. The characteristics of loading – settlement obtained from the recorded model foundation's displacements



Rys. 6. Izopola przemieszczeń cząstek gruntu w stanowisku badawczym (badanie nr 3)

Fig. 6. Isoplots of displacements of sand particles in the laboratory station (test No 3)



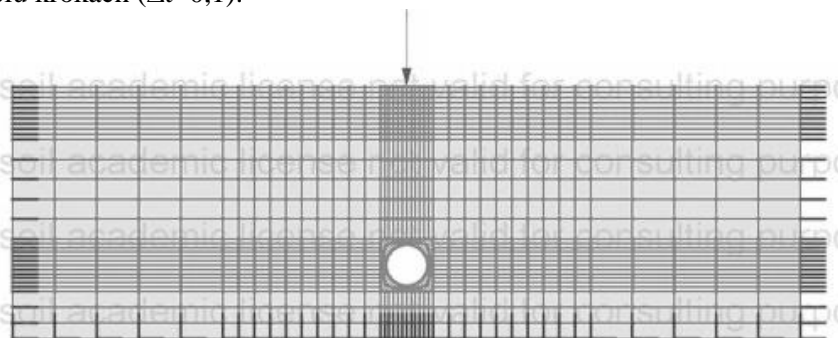
Rys. 7. Izopola przemieszczeń cząstek gruntu w otoczeniu rury (badanie nr 4)

Fig. 7. Isoplots of displacements of sand particles in pipe's surrounding (test No 4)

### 3. Badanie zgodności wyników badań doświadczalnych i analiz numerycznych układu rurociąg – grunt

#### 3.1. Numeryczna symulacja badań laboratoryjnych

Numeryczną symulację badań doświadczalnych wykonano w programie Z\_Soil acad. ver. 11.03, przy użyciu modelu MES (2D), uwzględniającego zarówno geometrię stanowiska badawczego, jak i przebieg doświadczalnego badania układu rurociąg – grunt (rys. 8). Wymiary modelu MES dostosowano do wymiarów skrzyni z piaskiem, pokazanej w pkt. 2.2 na rys. 1a (szerokość  $B = 3,0$  m, wysokość  $H = 0,96$  m). W środkowej części modelu, na głębokości  $H_1 = 0,76$  m usytuowano model rury PVC-U o średnicy  $D = 160$  mm i grubości ścianki  $s = 4,7$  mm. Ceownik, pełniący w badaniach rolę swoistego fundamentu, przez który obciążano powierzchnię gruntu w skrzyni, opisany w rozdz. 3, modelowano jest jako odcinek belki o długości  $L = 0,2$  m i grubości  $s_l = 8,5$  mm. Model stanowiska badawczego zbudowano z 1212 elementów. Na dolnej krawędzi struktury MES umieszczono podpory nieprzesuwne a na krawędziach bocznych podpory umożliwiające przesuw w kierunku pionowym. Model obciążono siłą skupioną o wartości narastającej od 0 ( $t=0$ ) do 30 kN ( $t=1$ ), w dziesięciu krokach ( $\Delta t=0,1$ ).



Rys. 8. Numeryczny model stanowiska badawczego

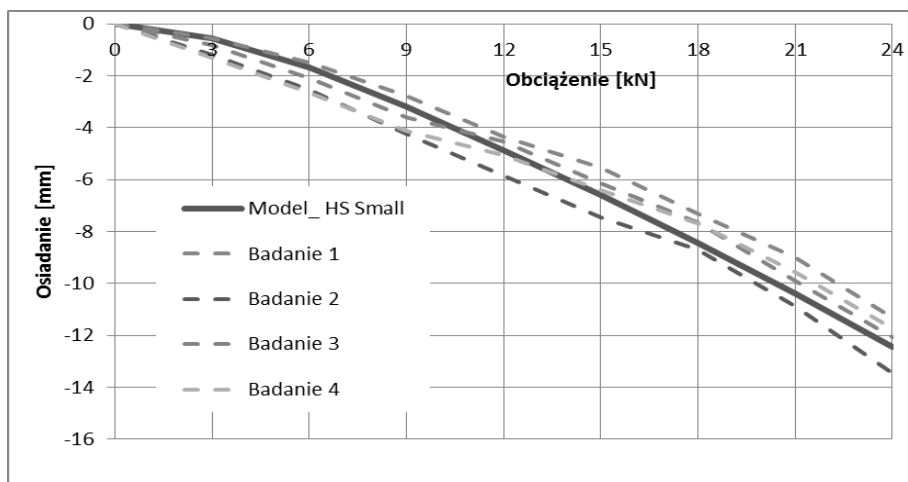
Fig. 8. Numerical model of the laboratory station

Do modelowania piasku w skrzyni stanowiska badawczego zastosowano model sprężysto-plastyczny o wzmocnieniu izotropowym Hardening Soil Small, zaś rurociąg i fundament modelowano w zakresie liniowo sprężystym (parametry materiałowe rurociągu: moduł Younga  $E=4000$  MPa, ciężar objętościowy  $\gamma=14$  kN/m<sup>3</sup>; parametry modelu fundamentu: moduł Younga  $E=300000$  MPa, ciężar objętościowy  $\gamma=78$  kN/m<sup>3</sup>). Model Hardening Soil Small wymaga wyspecyfikowania dwudziestu ośmiu parametrów, które po wprowadzeniu charakterystyki gruntu (rodzaj gruntu, historia naprężenia, zagęszczenie, kształt cząstek

gruntu, uziarnienie i stan wilgotności) mogą być automatycznie wygenerowane w programie Z\_Soil. Wybrane parametry materiałowe modelu piasku znajdującego się w skrzyni stanowiska badawczego, są następujące: moduł Younga przy odciążeniu/obciążeniu  $E_{ur}^{ref} = 55000 \text{ kN/m}^2$ , początkowy moduł Younga  $E_0^{ref} = 108\,669 \text{ kN/m}^2$ , kąt dylatacji  $\psi = 0,8125$ . Do obliczeń wprowadzono ponadto wartości ciężaru objętościowego gruntu ( $\gamma = 17,0 \text{ kN/m}^3$ ) i kąta tarcia wewnętrznego ( $\phi = 39^0$ ), wyznaczone w trakcie badań laboratoryjnych układu rurociąg – grunt. Z uwagi na możliwości prowadzenia obliczeń w programie Z\_Soil wprowadzono minimalną wartość kohezji  $c = 2,5 \text{ kN/m}^2$ .

### 3.2. Analiza zgodności wyników

Analizę zgodności wyników symulacji numerycznej i wyników badań laboratoryjnych w dwóch zakresach. Pierwszy z nich dotyczy porównania wartości i rozkładu osiadań modelu fundamentu w trakcie narastania wartości obciążenia, wyznaczonych w trakcie badań laboratoryjnych i w analizie numerycznej. Wynik porównania wartości i rozkładu osiadań dla kolejnych kroków obciążenia pokazano na rys. 9.

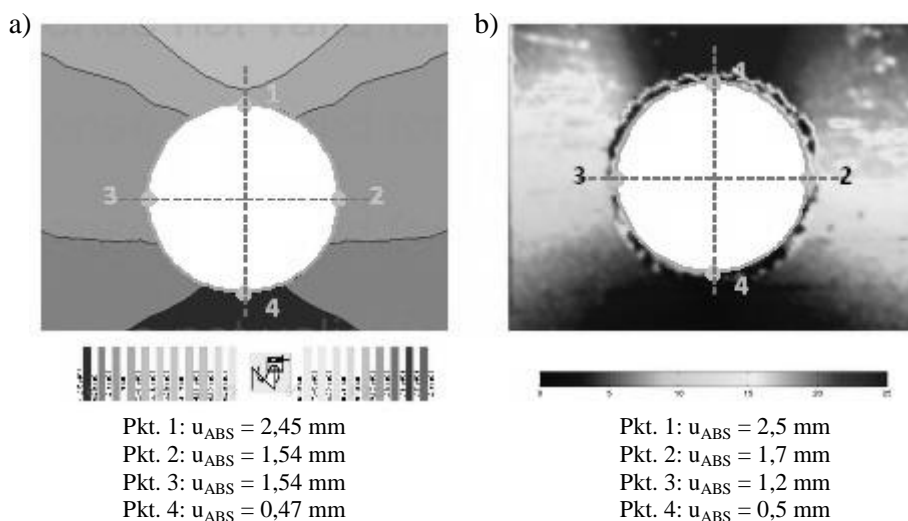


Rys. 9. Porównanie osiadań modelu fundamentu wyznaczonych w badaniach laboratoryjnych (Badanie 1 ÷ 4) i w analizie numerycznej (Model Hardening Soil Small)

Fig. 9. Comparison of the model foundation's settlements obtained from tests (No 1 – 4) and from numerical analysis (Hardening Soil Small)

W drugim zakresie badania zbieżności poddano analizie porównawczej mapy izopól przemieszczeń, opracowane w technologii *PIV* (wynik badań laboratoryjnych) i mapy przemieszczeń wygenerowane w programie Z\_Soil (wynik ana-

lizy numerycznej modelu stanowiska badawczego). Porównywane obrazy pokazano na rys. 10.



Rys. 10. Porównanie map przemieszczeń cząstek gruntu: a) wyznaczonych w analizie numerycznej (model HS Small), b) izopola przemieszczeń - badanie 4

Fig. 10. Comparison of the soil particle displacements maps: a) obtained from the numerical analysis (Hardening Soil Small), b) displacement isoplots from test No 4

Wykresy osiadań modelu fundamentu przedstawione na rys. 9 wskazują na dobre dopasowanie rozkładu i wartości osiadań wyznaczonych w badaniach laboratoryjnych z wartościami osiadań wyznaczonych w analizie numerycznej, wykonanej z zastosowaniem modelu Hardening Soil Small. Zbieżność rozkładu przemieszczeń cząstek gruntu widoczna jest także na mapie przemieszczeń, stanowiącej efekt analizy numerycznej (rys. 10a) i mapie izopól przemieszczeń (rys. 10b), będącej przykładem opracowania wyników badań laboratoryjnych w technologii *PIV*.

#### 4. Podsumowanie

Badania laboratoryjne układu rura – grunt, wykonane w warunkach odwzorowujących naturalne warunki pracy podziemnego rurociągu mogą stanowić podstawę kalibracji i weryfikacji modeli gruntu, używanych w analizach numerycznych. Jest to szczególnie istotne wówczas, gdy do numerycznych analiz zagadnień brzegowych wprowadzany jest konstytutywny model gruntu, stosunkowo mało znany i dotychczas nie stosowany w tej kategorii problemów.

Opisane w pracy badania laboratoryjne układu rurociąg – grunt, z uwagi na zakres uzyskanych wyników - komputerowa rejestracja osiadań modelu fun-

damentu, fotograficzna rejestracja przebiegu badania i jej opracowanie w zaawansowanej technologii obróbki cyfrowych zdjęć o wysokiej rozdzielczości *PIV*

– stanowią dobrą podstawę do weryfikacji sprężysto-plastycznego modelu o wzmocnieniu izotropowym *Hardening Soil Small*.

Charakterystyki obciążenie – osiadanie wykonane na podstawie zarejestrowanych wyników badań laboratoryjnych i wyników analizy numerycznej, wykonanej z zastosowaniem modelu *Hardening Soil Small* wykazują wyraźną zbieżność.

Analiza porównawcza map wypadkowych przemieszczeń i ich składowych, dokumentujących wyniki analizy MES zagadnienia interakcji rury z gruntem z zastosowaniem modelu *Hardening Soil Small* z odpowiednimi mapami izopól przemieszczeń, uzyskanych w drodze przetworzenia za pomocą *PIV* obrazów cyfrowych dokumentujących badania modelowe pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- rozkłady wartości wypadkowych przemieszczeń cząstek gruntu uzyskane w wyniku analizy MES i badań modelowych wykazują zbliżony przebieg,
- mimo, iż wartości przemieszczeń wyznaczone z map izopól przemieszczeń mają charakter szacunkowy, są zbliżone do wartości przemieszczeń wyznaczonych w analizie numerycznej,
- zróżnicowane wartości przemieszczeń górnego i dolnego punktu rury świadczą o deformacji jej poprzecznego przekroju.

Wykazana zbieżność wyników badań laboratoryjnych z wynikami analizy numerycznej uzasadnia celowość i zasadność użycia sprężysto-plastycznego modelu o wzmocnieniu izotropowym *Hardening Soil Small* do modelowania zagadnień interakcji rurociągu z gruntem.

## Literatura

- [1] Atkinson J., Sallfors G.: Experimental determination of soil properties. Proc. 10th ECSMFE, vol. 3, Florence, 1991.
- [2] ATV-DVWK-A127P – Obliczanie statyczno-wytrzymałościowych kanałów i przewodów kanalizacyjnych. Wyd. Seidel-Przywecki. Warszawa, 2000 r.
- [3] Anderson C., Wijewickreme D., Ventura C., Mitchell A.: Full-Scale Laboratory Testing of Buried Polyethylene Gas Distribution Pipelines Subjected to Lateral Ground Displacement. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, 2013. <http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/>
- [4] Benz t.: Small-strain stiffness of soil and its numerical consequences. PhD, Universitst Stuttgart, 2007.
- [5] Goltbar A., M., Shekarchi M.: Investigation od Trffic Load on the Buried Pipeline by Using of Real Scale Expoyeriment and Plaxix-3D Software. Research Journal of Applied Science, Engineering and Technology 2(2); 107-113, 2010.

- [6] Janson L. E. – Rury z tworzyw sztucznych do zaopatrzenia w wodę I odprowadzania ścieków. Borealis. Wyd. IV. Polskie Towarzystwo Producentów Rur i Kształtek z Tworzyw Sztucznych, Toruń, 2010 r.
- [7] Kliszczewicz B.: Badania laboratoryjne układy rura – grunt. Materiały konferencyjne INFRAEKO 2014. Kraków-Rzeszów, 2014.
- [8] Kliszczewicz B., Mendec J., Wystrychowska M.: Geodezyjne monitorowanie pracy kinematycznej rurociągów w warunkach górniczej deformacji terenu. Materiały X Konferencji Katedr i Zakładów Geodezji Wydziałów Niegeodezyjnych. Sekcja Geodezji Przemysłowej KG PAN. Poznań, 1995.
- [9] Rofooei F. R., Jalali H. H., Attari N., K., Alavi M.: Full-Scale Laboratory Testing od Buried Pipelines Subjected to Permanent Groung Displacement Caused by Reverse Faulting. WCEE 2012, <http://www.academia.edu/2920888/>
- [10] Truty A., Obrzud R.: The Hardening soil model – a practical guidebook. Zace Services Ltd, Software engineering. Lausanne, 2011.
- [11] Schanz T., Vermeer P. A., Bonier P. G.: Formulation and verification of the Hardening Soil Model. Beyond 2000 in Computational Geotechnics, Rotterdam, 1999.
- [12] Zadroga B., Malesiński K.: Stateczność fundamentów bezpośrednich. Badania modelowe i analizy numeryczne. Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2010.
- [13] White D., Take W., Bolton M. D.: Soil deformation measurement using Particle Image Velocimetry (PIV) and photogrametry. Geotechnique 53, No. 7, 2003.

## VERYFICATION OF NUMERICAL MODEL OF PIPELINE – SOIL SYSTEM ON THE BASIS OF LABORATORY TESTING

### Summary

This article presents the process and results of pipeline-soil system laboratory tests. This system represents the buried pipelines, subjected of the loads of soil mass and uniformly distributed surface load. The goals of laboratory tests were determination of the range of pipeline-soil interaction areas. The process of laboratory tests was photographed. Isoplots of displacements as well as the deformation of the pipeline were determined using *PIV* (Particle Image Velocimetry technique). The outcomes of conducted tests are the basis of verification of an elasto-plastics model with isotropic hardening (Hardening Soil Small), which was used in numerical symulation of this test.

**Keywords:** laboratory tests, buried pipelines, displacement, *PIV*, MES

DOI:10.7862/rb.2014.50

*Przesłano do redakcji: lipiec 2014 r.*

*Przyjęto do druku: wrzesień 2014 r.*