

WSPÓŁPRACA WIELKOŚREDNICOWYCH STALOWYCH RUROCIĄGÓW Z GRUNTEM

Barbara KLISZCZEWICZ*

Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice

Streszczenie: Stalowe rurociągi wielkich średnic pełnią rolę rurociągów tranzytowych lub magistralnych, transportując medium (woda, ropa, gaz) pod znacznym ciśnieniem. Ekonomiczne i społeczne konsekwencje awarii tego typu rurociągów są duże, zatem ocena bezpieczeństwa ich funkcjonowania jest zagadnieniem istotnym. W artykule przedstawiono analizę numeryczną 3D współpracy wielkośrednicowego, stalowego rurociągu ułożonego w gruncie o złożonym układzie warstw geotechnicznych, poddanego działaniu obciążenia naziomu. Celem tej analizy jest określenie stanu deformacji i wyteżenia rurociągu oraz określenie rozkładów naprężeń i odkształceń w bryle gruntu. Analizę wykonano w programie Z_Soil, stosując model sprężysto-idealnie plastyczny Coulomba-Mohra (bryła gruntu). Rurociąg modelowany jest w zakresie sprężystym.

Słowa kluczowe: podziemne rurociągi stalowe, analiza numeryczna, MES.

1. Wprowadzenie

Współczesne materiały konstrukcyjne stosowane do budowy podziemnej infrastruktury sieciowej miast są bardzo zróżnicowane (Madryas, 2007). Obecnie, w zależności od rodzaju sieci, stosuje się materiały ceramiczne (kamionka, cegła), betony (żelbet, beton sprężony), polimerobeton, tworzywa sztuczne i metale (stal, żeliwo). Z uwagi na wysokie parametry wytrzymałościowe do budowy przewodów ciśnieniowych stosowane są głównie rury stalowe. Transportowane nimi media to: gaz, ropa naftowa lub gorąca i zimna woda. Rury stalowe produkowane są w wersjach bez szwu i ze szwem, przy czym produkcja tych ostatnich stale wzrasta. Wynika to z niższych kosztów ich wytwarzania oraz możliwości stosowania bardziej zaawansowanych technologii. Wprowadzanie nowych wyrobów, w których zmodyfikowano parametry konstrukcyjne (podwyższona wytrzymałość stali, zwiększona grubość ścianki, podwyższona odporność na oddziaływanie wodoru) oraz stosowanie zewnętrznych i wewnętrznych powłok ochronnych (powłoki cementowe, epoksydowe lub poliuretanowe) znacznie podwyższających trwałość rur sprawia, iż rury stalowe należą do powszechnych stosowanych rozwiązań materiałowych w budowie podziemnych przewodów ciśnieniowych. Dodatkowym atutem tych wyrobów jest duży zakres średnic rur, dochodzących do 2020 mm w wypadku rur stalowych wzdłużnie spawanych.

Stalowe rury dużych średnic traktować można jako rury podatne. Ich odkształcalność silnie rzutuje na charakter zachowania się przewodu rurowego w przestrzeni gruntowej. Znajduje to odzwierciedlenie we współczesnych analitycznych metodach obliczeniowych. Trzeba jednak podkreślić, że metody te, posługują się idealizacją w zakresie obciążeń i nierealistycznie opisują przestrzeń gruntową. Najczęściej umożliwiają jedynie analizę pierścienia rurowego (płaski stan odkształcenia) obciążonego zestawem równomiernie rozłożonych obciążeń. W rzeczywistości odkształcalna (podatna) rura ułożona w przestrzeni gruntowej stanowi współpracujący układ, przy czym deformacja rury wywołana działającym obciążeniem zależy od relacji sztywności rury i gruntu. Analizę takiego przestrzennego układu rura – grunt przeprowadzić można metodami numerycznymi, które w sposób bardziej realistyczny opisują zachowanie się rurociągu w przestrzeni gruntowej.

2. Deformacja podatnych rur ułożonych w gruncie

Wielkośrednicowe stalowe rury zaliczane są do rur podatnych, tworzących wraz otaczającym je gruntem współpracujący układ. Kryterium podatności rur podawane jest najczęściej w postaci wzoru Kleina (Kuliczkowski, 2004):

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: barbara.kliszczewicz@polsl.pl

$$n = \frac{E_g \cdot r_m^3}{E \cdot e^3} \quad (1)$$

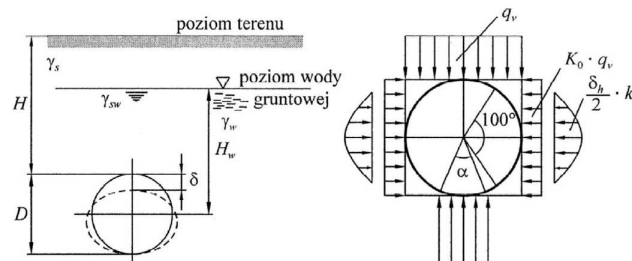
gdzie: E_g jest modułem odkształcenia gruntu w MPa, E jest modułem sprężystości materiału rury w MPa, r_m jest średnim promieniem rury w mm, zaś e jest grubością ścianki rury w mm.

W wypadku rur podatnych współczynnik n przyjmuje wartość większą od 1,0. Rurociągi stalowe dużych średnic, o stosunkowo cienkich ściankach (dla rur o średnicy 1200 mm grubość ścianki jest rzędu 8,0-17,5 mm) i jednocześnie wysokim module sprężystości (210 GPa), w ośrodku gruntowym zachowują się jak rury podatne. Przykładowo, w przypadku podanych wyżej wymiarów rury, przy module odkształcenia gruntu o wartości $E_g = 80$ MPa, współczynnik n przybiera wartości 15,4-161.

Działające na rurę obciążenia zewnętrzne – głównie ciężar warstwy gruntu przykrywający rurę, obciążenie naziomu, obciążenia komunikacyjne – deformują ją, powodując jej owalizację (rys. 1). Skutkiem tego aktywuje się boczne parcie gruntu, zachodzi więc zjawisko interakcji układu rura – grunt, charakterystyczne dla rur podatnych. W konsekwencji, oprócz obwodowych sił ściskających, w pierścieniu rurowym pojawiają się obwodowe momenty zginające, proporcjonalne do różnicy pionowego i poziomego parcia gruntu. Analityczne metody opisu deformacji rur podatnych ułożonych w gruncie opisane są między innymi przez Kuliczkowskiego (2004), Kliszczewicz (2010), Whiddena i in. (2009) oraz w ATV127 (2000). Uwzględniając obciążenia rurociągu ułożonego w gruncie (rys. 1), względną deformację rury wywołaną całkowitym obciążeniem pionowym q , pochodzącym od gruntu, naporu wody gruntowej i ruchu kołowego, określa się według tak zwanej metody skandynawskiej (Kuliczkowski, 2004) jako:

$$\left(\frac{\delta}{D}\right)_q = \frac{0,083 \cdot q}{16S_R + 0,122 \cdot E'_s} \quad (2)$$

gdzie: S_R jest sztywnością obwodową rury, a E'_s jest współczynnikiem poziomej reakcji gruntu.



Rys. 1. Rozkład obciążeń rurociągu i jego deformacja według metody skandynawskiej (Kuliczkowski, 2004).

Z uwagi na symetrię obciążenia względem pionowej osi przekroju rury, przewidywana jej deformacja jest również symetryczna. Wzór nie umożliwia oszacowania

deformacji przy innym położeniu obciążenia względem osi rury.

Nadmierna deformacja pierścienia rurowego, obok wybożenia lub złamania ścianki rury, zaliczana jest do czynników ograniczających stosowanie rur podatnych. Należy jednak podkreślić, że deformacja rury nie jest tożsama z jej uszkodzeniem. Stanowi jednak istotne utrudnienie w eksploatacji rurociągów, na przykład przy stosowaniu tłoków czyszczących. Może być także powodem ewentualnego uszkodzenia cementowej wykładziny wewnętrznej lub rozszczenia przewodu. Sformułowane przez Spanglera (Whidden i in., 2009) zalecenie ogranicza maksymalną deformację rury do 5%. Obecnie wartość ta odnoszona jest najczęściej do etapu budowania rurociągu, kiedy pusta rura obciążana jest gruntem. Właściwe zagęszczenie obsypki w bezpośrednim otoczeniu rury ogranicza występującą wówczas deformację. Deformacja rury zmniejsza się w normalnych warunkach użytkowania rury, gdyż wewnętrzne ciśnienie medium wypełniającego rurę powoduje częściowy powrót przekroju do kołowego kształtu jej przekroju poprzecznego.

W opisanych powyżej klasycznych metodach analizy podatnych rur ułożonych w gruncie rozpatrywany jest pierścień rurowy w płaskim stanie odkształcenia. Jest to uproszczenie możliwe do stosowania jedynie wówczas, gdy z uwagi na jednolite warunki obciążenia i podparcia rury można wyodrębnić reprezentatywny, charakterystyczny przekrój i dla niego przeprowadzić analizę obliczeniową. W rzeczywistości rurociąg jest ustrojem przestrzennym, często ułożonym w zróżnicowanych warunkach gruntowych. Obciążenia rurociągu związane z działaniem wewnętrznego ciśnienia, różnicy temperatur czy wpływami podziemnej eksploatacji (poziome odkształcenia o charakterze rozciągającym i ściskającym lub/i górnicza krzywizna terenu) powodują powstanie naprężeń w kierunku wzdłużnym. Również niewłaściwie wykonane ułożenie rurociągu (brak ciągłości podparcia), możliwość wystąpienia w strefie ułożenia rury pustek czy deformacji nieciągłych w postaci lejów czy zapadlisk sprawiają, iż w pewnych strefach rurociągu wystąpić mogą momenty zginające na kierunku wzdłużnym. Naprężenia wzdłużne wraz z naprężeniami obwodowymi tworzą dwukierunkowy stan wyężenia przewodu, który w klasycznych metodach obliczeniowych wymaga posłużenia się naprężeniami zredukowanym przy sprawdzaniu nośności przewodu. Natomiast przestrzenna deformacja rurociągu, która wystąpi w opisanych powyżej sytuacjach może być wyznaczona jedynie przy zastosowaniu metod numerycznych i budowie wirtualnych modeli 3D układu rura - grunt.

3. Analiza numeryczna

W analizie numerycznej rozpatrzono podatną, pustą stalową rurę ułożoną w gruncie, obciążoną równomiernie rozłożonym obciążeniem powierzchniowym (obciążenie naziomu) i ciężarem gruntu nad rurą. Numeryczny

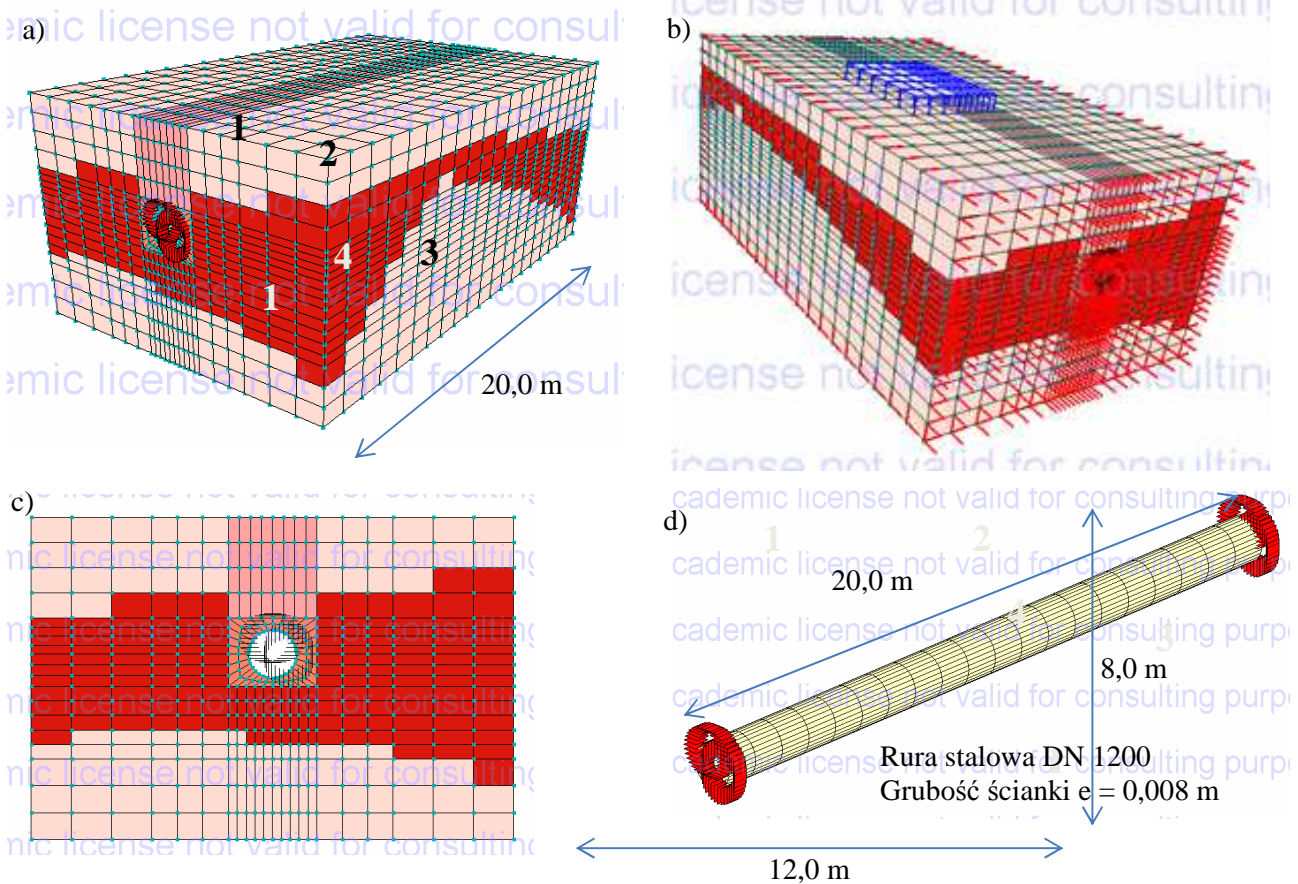
przestrzenny model układu rura – grunt (3D) zbudowano w programie Z_Soil – academic version 11.03. Z uwagi na nierównomierne uwarstwienie podłoża gruntowego oraz specyficzne usytuowanie powierzchniowego, równomiernie rozłożonego obciążenia model obejmuje całość tego układu.

Model układu obejmuje bryłę gruntu o wymiarach $12,0 \times 8,0 \times 20,0$ m, w której wyodrębniono strefę wykopu o szerokości 2,2 m i głębokości 4,20 m. W wykopie, na warstwie podsypki o grubości 0,2 m, ułożona jest stalowa rura o średnicy DN1200 mm i grubości ścianki 0,008 m. Miąższość warstwy gruntu przykrywającego rurę wynosi 3,0 m. W obszarze wykopu wprowadzono dwie strefy materiałowe. W bezpośrednim otoczeniu rury przewidziano obsypkę piaskową, przy czym grubość tej warstwy nad górnym punktem rury wynosi 0,3 m. Pozostała część wykopu wypełniona jest gruntem zasypany. W modelu uwzględniono nierównomierne przewarstwienia gruntu otaczającego wykop, wprowadzając zróżnicowane parametry poszczególnych warstw przy użyciu opcji *Boreholes*.

Podstawowe obciążenie bryły gruntu, a pośrednio także rurociągu, stanowi obciążenie równomiernie rozłożone, o intensywności 140,0 kPa. Obciążenie przyłożone zostało na górnej powierzchni modelu, niesymetrycznie względem poprzecznego przekroju rury.

Model bryły gruntu zbudowano z prostopadłościennych, ośmiowęzłowych elementów typu *Continuum*, natomiast powłokę rury modelowano elementami typu *Shell*. Model składa się z 8720 elementów (w tym 8080 typu *Continuum* i 640 elementów typu *Shell*) i 9660 węzłów. Warunki brzegowe umożliwiają swobodny przesuw wzdłuż pionowych płaszczyzn modelu oraz podparcie i uniemożliwienie przesuwu w dwóch kierunkach w jego dolnej płaszczyźnie (2143 węzłów typu *Boundary conditions*). Grunt modelowany jest z zastosowaniem konstytutywnego modelu sprężysto-idealnie plastycznego Coulomba-Mohra, natomiast rurociąg modelowany jest w zakresie sprężystym. Program analizy obejmuje symulowanie działania równomiernie rozłożonego obciążenia w dwudziestu krokach czasowych. Parametry materiałowe warstw gruntu zastosowane w poszczególnych strefach materiałowych oraz stalowej rury zestawiono w tablicy 1.

W celu przedstawienia zróżnicowanej miąższości działania obciążenia naziemu ogólny widok modelu układu rura – grunt pokazano w dwóch różnych ujęciach aksonometrycznych (rys. 2 a i b) oraz w widoku w płaszczyźnie x, y (rys. 2 c). Na rysunku 2d przedstawiono także widok modelu stalowego rurociągu.



Rys. 2. Ogólny widok modelu układu rura – grunt: a) aksonometryczny widok modelu rura – grunt z zaznaczeniem stref materiałowych, b) aksonometryczny widok modelu rura – grunt z węzłami zewnętrznymi i obciążeniem naziemu, c) przekrój modelu w płaszczyźnie x, y dla $z = 0$, d) widok modelu stalowego rurociągu

Tab. 1. Zestawienie parametrów materiałowych gruntu i rur

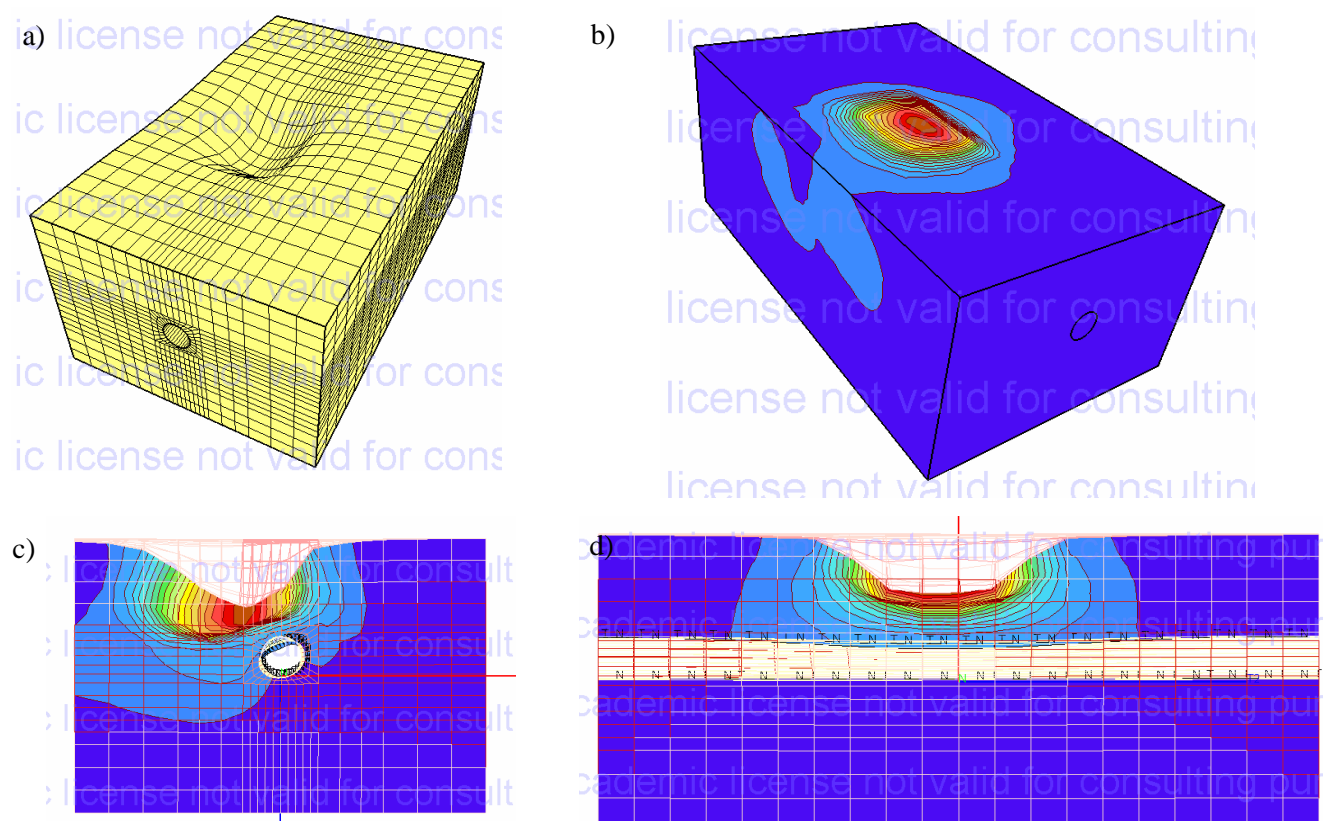
| Materiał | Moduł odkształcenia (sprężystości) [MPa] | Współczynnik Poissona | Kąt tarcia wewnętrzznego ϕ [°] | Kohezja [kPa] | Ciężar objętościowy [kN/m ³] |
|-----------------|--|-----------------------|-------------------------------------|---------------|--|
| Grunt rodzimy 1 | 21,0 | 0,30 | 15,0 | 16,0 | 20,0 |
| Grunt rodzimy 2 | 15,0 | 0,30 | 12,0 | 12,0 | 20,0 |
| Grunt rodzimy 3 | 8,5 | 0,30 | 8,5 | 6,5 | 20,0 |
| Grunt obsypki 4 | 33,5 | 0,30 | 33,0 | 3,0 | 18,0 |
| Stal | $2,07 \times 10^5$ | 0,30 | - | - | 78,0 |

Skutki działania obciążenia naziemu przedstawiono na rysunku 3, zawierającym wygenerowane w programie Z_Soil przestrzenne wizualizacje zdeformowanej siatki modelu układu rura – grunt oraz barwne mapy 3D rozkładu deformacji wraz z charakterystycznymi przekrojami modelu w dwóch płaszczyznach – prostopadłej i równoległej do osi rury.

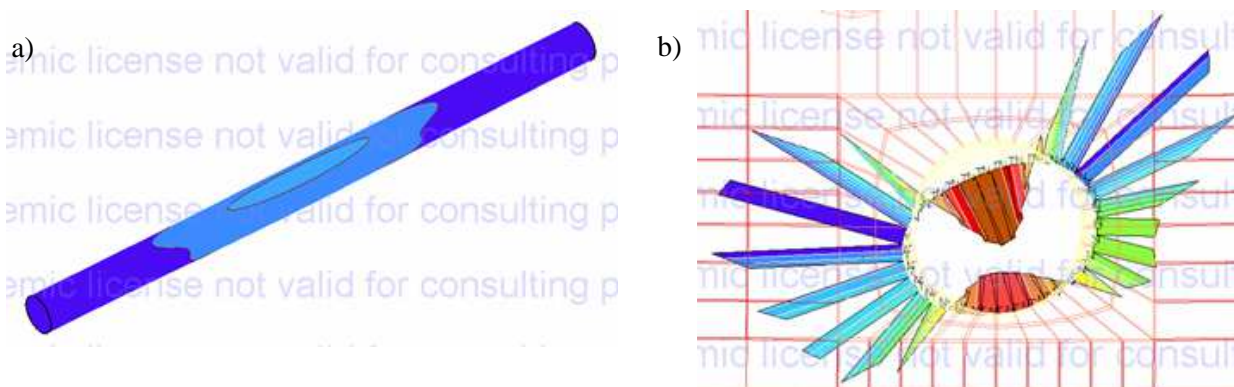
Zasięg wpływu obciążenia naziemu na model rurociągu obejmuje środkową jej część (rys. 4a). Największe deformacje występują w strefie bezpośrednio pod obciążeniem. Wytyczenie nierównomiernie zdeformowanej rury obrazuje między innymi wykres obwodowego momentu zginającego (rys. 4b).

Nierównomierną deformację pierścienia rurowego występującą w strefie działania obciążenia (przekrój dla $z = 10$ m) analizowano w czterech głównych punktach przekroju rury (rys. 5a). Charakter deformacji pokazano na rysunku 5b, zaś wykresy przemieszczeń głównych punktów rury na kierunku poziomym i pionowym zestawiono na rysunkach 5c i 5d.

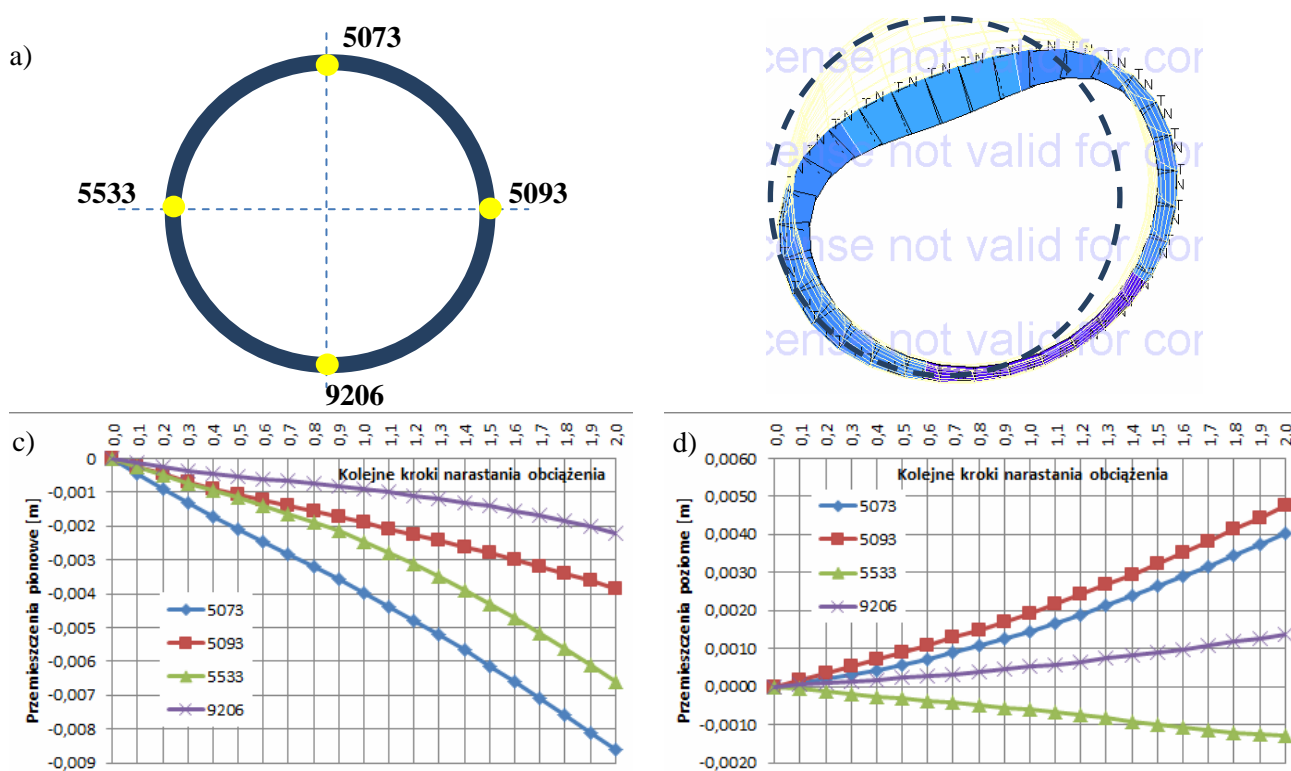
Maksymalne pionowe przemieszczenia punktu wierzchołkowego (punkt 5073) wynoszą około 9 mm, towarzyszą im poziome przesunięcia rzędu 4 mm. Maksymalne poziome przemieszczenia bocznego punktu rury (punkt 5093) wynoszą prawie 5 mm, zaś pionowe przemieszczenia tego punktu wynoszą 4 mm.



Rys. 3. Deformacja modelu układu rura – grunt: a) deformacja powierzchni modelu, b) mapa przemieszczeń ABS, c) mapa przemieszczeń ABS w przekroju (płaszczyzna x, y, dla $z = -10$ m) bezpośrednio w strefie działania obciążenia, d) mapa przemieszczeń ABS w przekroju (płaszczyzna y, z, dla $x = 0$,) bezpośrednio w strefie działania obciążenia.



Rys. 4. Wpływ obciążenia naziemu na model stalowej rury: a) mapa przemieszczeń ABS, b) rozkład obwodowych momentów zginających w płaszczyźnie x, y, dla $z = -10$ m, bezpośrednio w strefie działania obciążenia.



Rys. 5. Deformacja poprzecznego przekroju modelu stalowej rury: a) rozmieszczenie głównych punktów rury, b) obraz deformacji w płaszczyźnie x, y, dla $z = -10$ m, c) wykres pionowych przemieszczeń głównych punktów rury, d) wykres poziomych przemieszczeń głównych punktów rury.

4. Podsumowanie

Wykonana analiza numeryczna 3D pozwoliła na oszacowanie wyężenia i deformacji stalowego, wielkośrednicowego rurociągu ułożonego w gruncie i niesymetrycznie obciążonego (równomiernie rozłożone obciążenie naziemu). Deformacja rurociągu obejmuje środkową część przewodu rurowego i może stanowić utrudnienie w czynnościach eksploatacyjnych (użycie tłoków czyszczących). Jednocześnie w analizie wyznaczono rozkłady deformacji i naprężeń w bryle gruntu, stanowiącej wraz z rurociągiem wzajemnie współpracujący układ. W rozkładach tych widoczny jest wpływ słabej warstwy gruntowej o silnie zmiennej

miąższości oraz wpływ niesymetrycznego przyłożenia odciążenia naziemu.

Literatura

- ATV-DVWK – A127P (2000). Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe kanałów i przewodów kanalizacyjnych. *Wyd. Seidel-Przywecki*.
- Kliszczewicz B. (2010). Numeryczna analiza wpływu eksploatacji górniczej na podatne rurociągi podziemne. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 5-6/2010, 323-325.
- Kuliczkowski A. (2004). Rury kanalizacyjne, T. II. Projektowanie konstrukcji. *Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej*, Kielce.

Madryas C. (2007). Współczesne materiały konstrukcyjne w podziemnej infrastrukturze sieciowej miast. *Materiały Budowlane*, Nr 2/2007, 15-21.

Whidden P.E. i in. (2009). Buried Flexible Steel Pipe. Design and Structural Analysis. *ASCE*.

LARGE-DIAMETER STEEL PIPELINES – SOIL INTERACTION

Abstract: Large-size steel pipelines perform an important role as they are widely used in water, gas and petroleum transportation systems. Economic and social consequences of their damage are significant, so analysis of their safety is an important problem. This paper is focused on the behavior and safety of buried large-size steel pipelines which are modeled with a finite element model that makes use of full three-dimensional geometry and elasto-plastic soil behaviour. The results of the analysis (Z_Soil) show distributions of deformations and stresses of soil and pipes.