

Barbara KLISZCZEWICZ
Katedra Dróg i Mostów
Politechnika Śląska

NUMERYCZNE MODELOWANIE 3D WSPÓŁPRACY RUROCIĄGÓW Z GRUNTEM

W referacie przedstawiono możliwości numerycznego modelowania współpracy rurociągów z podłożem gruntowym, poddanych działaniu pionowych, równomiernie rozłożonych obciążeń. Podano ogólne zasady przestrzennego modelowania układu rura – grunt typu 3D, z uwzględnieniem czynników uniemożliwiających stosowanie analiz rurociągu w płaskim stanie odkształcenia. Zaprezentowano założenia, program i wyniki analizy 3D betonowego rurociągu ułożonego w gruncie, wykonanej w programie Z_Soil.

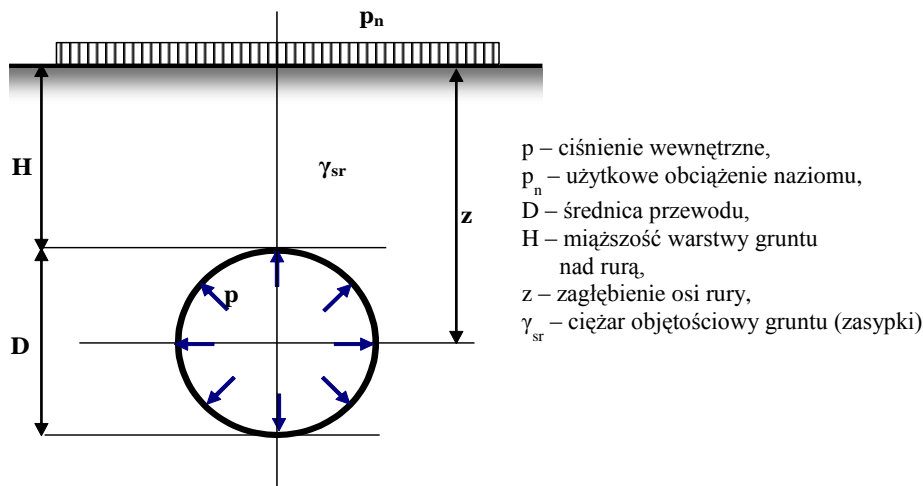
1. Wprowadzenie

Podziemne rurociągi, stanowiące jeden z ważniejszych elementów infrastruktury technicznej, budowane są z zastosowaniem bardzo zróżnicowanych materiałów. Wymienić można materiały tradycyjne (beton, żelbet, polimerobeton, stal, kamionka), szeroko obecnie stosowane tworzywa sztuczne (PVC, PE, PP) czy też rury GRP. Dobór rozwiązania materiałowego jest uwarunkowany funkcją rurociągu (przewody wodociągowe, kanalizacyjne, gazowe, inne), warunkami pracy (przewody ciśnieniowe, bezciśnieniowe) oraz działającymi obciążeniami. Parametry materiałowe i związana z nimi odkształcalność rur silnie rzutują na charakter zachowania się przewodu rurowego w przestrzeni gruntowej. Znajduje to odzwierciedlenie we współczesnych analitycznych metodach obliczeniowych. Jest rzeczą oczywistą, iż metody te, posługując się idealizacją w zakresie obciążeń, są dalekie od realizmu. Stosowane coraz częściej metody numeryczne w sposób bardziej realistyczny opisują zachowanie się rurociągu w przestrzeni gruntowej.

2. Charakterystyka analitycznych metod obliczeniowych podziemnych rurociągów

W analitycznych metodach obliczeniowych model obliczeniowy prowadzi się najczęściej do poprzecznego przekroju rury z obciążeniami rozłożonymi

w kierunku pionowym i poziomym, o stałej lub zmiennej intensywności. Pierścień rurowy analizowany jest zatem w płaskim stanie odkształcenia (rys. 1).



Rys. 1. Obliczeniowy model rurociągu w płaskim stanie odkształcenia

Obciążenia podziemnych rurociągów są głównie związane z funkcją rurociągu i jego ułożeniem w gruncie (ciśnienie wewnętrzne prowadzonego medium, ciężar gruntu i ewentualnie nawierzchni nad rurą, użytkowe, obciążenie naziomu, obciążenia komunikacyjne). W wypadku ułożenia rurociągu w zasięgu wpływów górniczych dodatkowe obciążenia wynikają ze współpracy rurociągu z górnictwo deformowanym podłożem gruntowym [6].

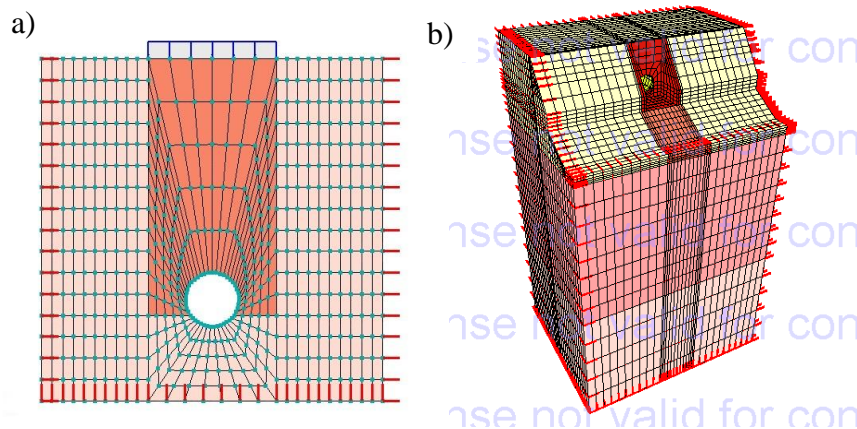
We współczesnych analitycznych metodach obliczeniowych uwzględniana jest sztywność rurociągów (rurociągi sztywne i podatne) i wynikające z tego zróżnicowane zachowanie się rury w gruncie oraz – w konsekwencji – zróżnicowane kryteria wymiarowania. Rury sztywne przenoszą obciążenia jako układy samonośne, zaś rury odkształcalne (podatne) współpracują z otaczającym je gruntem, przy czym charakter tej współpracy zależy od relacji sztywności rury i gruntu [7]. Tę zróżnicowaną reakcję rur sztywnych i podatnych na działające obciążenia uwzględniają metoda skandynawska [4] i metoda podana w niemieckich zbiorach reguł ATV [1]. Przegląd analitycznych metod obliczeniowych rur w płaskim stanie odkształcenia podano m.in. w [5], [7], [8].

Stosunkowo rzadko rurociągi analizowane są w kierunku wzdłużnym. W celu odwzorowania rurociągu stosowany jest wówczas model belkowy, zaś podłoże gruntowe reprezentowane jest przez układ sprężystych podpór (model Winklera) lub półprzestrzeń sprężystą.

3. Charakterystyka metod numerycznych

Coraz częściej analizy obliczeniowe podziemnych rurociągów prowadzone są z wykorzystaniem współczesnych pakietów obliczeniowych: Ansys, Plaxis,

HydroGeo, COSMOS czy Z_Soil [2], [3], [5], z zastosowaniem Metody Elementów Skończonych (MES). Typ analizy (2D lub 3D) dobierany jest w zależności od geometrii obiektu, rozkładu parametrów materiałowych i rozkładu działających obciążeń. Przykłady numerycznych modeli 2D i 3D podziemnych rurociągów pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Przykłady modeli układu rura – grunt: a) model typu 2D [6], b) autorski model wylotu kolektora typu 3D

W analizach numerycznych rozpatrywany jest wieloelementowy układ rura – grunt. Wymiary bryły gruntu dobierane są najczęściej w odniesieniu do wymiaru średnicy rury [2], z uwzględnieniem zróżnicowanych warunków gruntowych. Podział przestrzeni gruntowej na elementy prowadzony jest najczęściej nierównomiernie, z wyraźnym zagęszczeniem siatki wokół rurociągu.

W odróżnieniu od metod analitycznych, w metodach numerycznych zdecydowanie bardziej realistycznie modelowany jest obszar gruntu otaczającego rurę. Cechy gruntu i jego reakcję na działające obciążenia opisują modele konstytutywne, wbudowane w pakietach komputerowych. Szczególnie geotechniczne zorientowane pakiety komputerowe, np. Z_Soil, zawierają bogaty zestaw konstytutywnych modeli gruntu (m. in. sprężysty, Coulomba-Mohra, CamClay, Duncana-Changa, typu *cap*, Hoeka-Browna, Rankina), uwzględniające plastyczność gruntu [9].

Analizy numeryczne umożliwiają wprowadzenie zestawów obciążeń dowolnie usytuowanych względem przewodu rurowego i symulowanie ich działania w zadanych przedziałach czasowych.

4. Przykład analizy typu 3D podziemnego rurociągu

W celu przedstawienia możliwości i zalet numerycznego modelowania typu 3D podziemnych rurociągów zbudowano w programie Z_Soil (academic version 11.03) przestrzenny model układu rura – grunt.

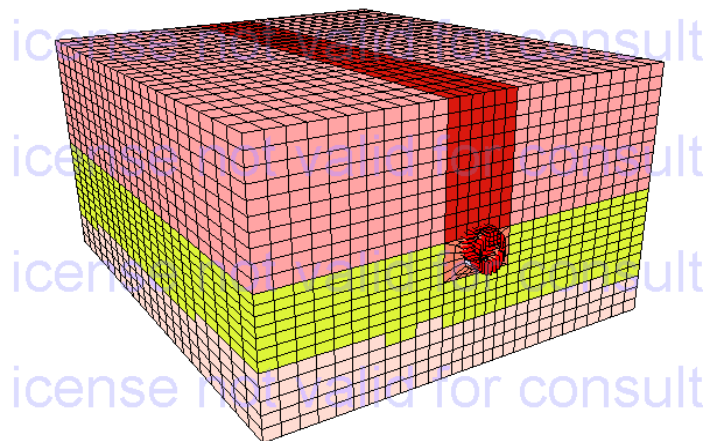
Model układu obejmuje bryłę gruntu o wymiarach 10,0 x 6,0 x 12,0 m, w której wyodrębniono strefę wykopu o głębokości 3,77 m (miąższość warstwy gruntu przykrywającego rurę 3,0 m). W wykopie, na warstwie podsypki o grubości 0,2 m, ułożona jest betonowa rura o średnicy 500 mm i grubości ścianki 0,08 m. W modelu uwzględniono nierównomierne przewarstwienia gruntu otaczającego wykop, wprowadzając zróżnicowane parametry poszczególnych warstw przy użyciu opcji *Boreholes*. Ogólny widok modelu oraz widok w płaszczyźnie *x, y* przedstawiono na rys. 3, zaś parametry materiałowe warstw gruntu, zasypki i rury zestawiono w tabeli 1. W programie analizy przewidziano przesuwanie na górnej powierzchni modelu równomiernie rozłożonego obciążenia, o intensywności 25,0 kN/m². Pole powierzchni, na której przyłożone jest obciążenie ma wymiar 1,8 m x 2,25 m. Obciążenie jest przesuwane skokowo, prostopadłe do osi rury. W analizie rozpatrzono dziewięć położów obciążenia względem osi rury (rys. 4).

W modelowaniu bryły gruntu użyto prostopadłościennych, ośmiowzłowych elementów typu *Continuum*, natomiast powłokę rury modelowano elementami typu *Shell*. Model składa się z 14 344 elementów (w tym 13 904 typu *Continuum* i 440 elementów typu *Shell*) i 15 916 węzłów. Warunki brzegowe umożliwiają swobodny przesuw wzdłuż pionowych płaszczyzn modelu oraz podparcie i uniemożliwienie przesuwu w jego dolnej płaszczyźnie (2950 węzłów typu *Boundary conditions*).

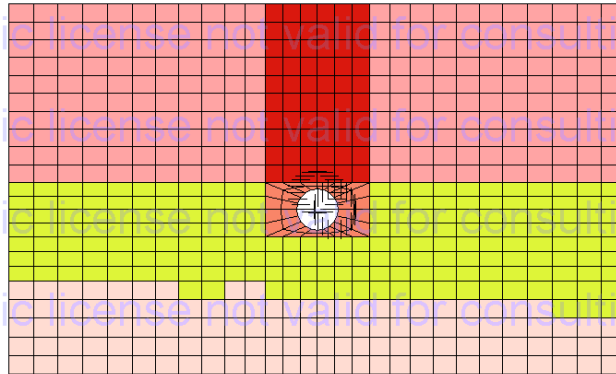
Grunt modelowany jest w zakresie sprężysto-plastycznym (konstrytuwny model sprężysto-idealnie plastyczny Coulomba-Mohra, ze stowarzyszonym prawem płynięcia).

Wyniki przeprowadzonej analizy umożliwiają zarówno ocenę wyężenia przewodu rurowego jak i zmian zachodzących w przestrzeni gruntowej w wyniku działania przesuwającego się obciążenia.

a)



b)

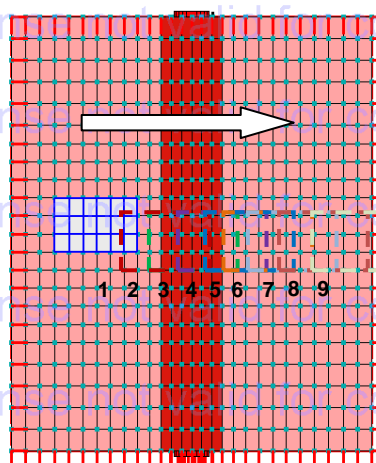


Rys. 3. Model układu rura - grunt: a) ogólny widok modelu, b) widok modelu w płaszczyźnie x, y

Tabela 1. Zestawienie parametrów materiałowych modelu układu rura – grunt

Materiał	Moduł odkształcenia (sprężystości) [MPa]	Współczynnik Poissona	Kąt tarcia wewn. [$^{\circ}$]	Kohezja [kN/m ²]	Ciężar objętościowy [kN/m ³]
Grunt rodzimy 1	54,4	0,25	30,9	5,0	16,2
Grunt rodzimy 2	3,3	0,40	5,3	8,8	14,7
Grunt rodzimy 3	81,3	0,25	33,1	5,0	18,1
Grunt obsypki	33,5	0,30	29,6	5,0	15,7
Grunt zasypki	66,9	0,25	32,4	5,0	18,1
Beton	30 000	0,17	-	-	24,0

**KIERUNEK
RUCHU OB-
CIĄŻENIA**



Rys. 4. Schemat przesuwania obciążenia (widok górnej powierzchni modelu)

W celu pokazania różnorodnych możliwości prezentacji uzyskanych wyników poniżej zestawiono wizualizacje typu 3D (mapy naprężeń na tle zdeformowanej siatki modelu dla wybranego położenia obciążenia), wizualizacje typu 2D (mapy naprężeń w wybranych płaszczyznach przekrojowych dla wybranego położenia obciążenia, wykresy przyrostów osiadań górnej powierzchni modelu w kolejnych położeniach obciążenia i wykres sumy osiadań górnej powierzchni modelu), wykresy uogólnionych sił wewnętrznych w wybranych płaszczyznach przekrojowych oraz wizualizacje typu 3D wyteżonej powłoki rury.

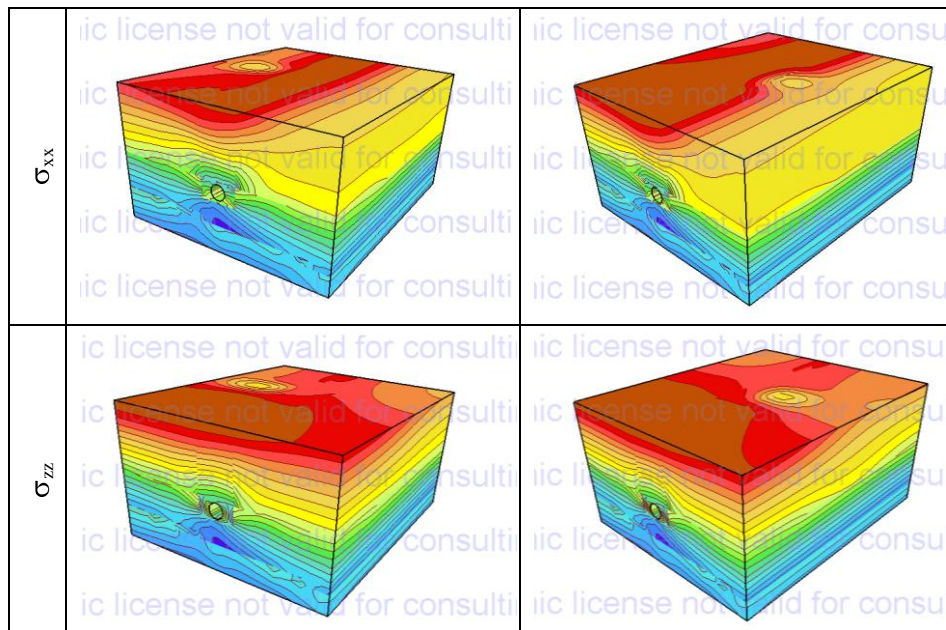
Poniżej zestawiono wybrane wyniki przeprowadzonej przestrzennej analizy układu rura – grunt odnoszące się do dwóch położen obciążenia (nr 1 i nr 6):

- wizualizacja 3D map wypadkowych przemieszczeń (ABS), naprężeń poziomych σ_{xx} i σ_{zz} oraz pionowych σ_{yy} w bryle gruntu (rys. 5),
- wizualizacja 2D map naprężeń σ_{xx} i σ_{zz} w płaszczyźnie $x, y, z = -6,5 \text{ m}$ (rys. 6).

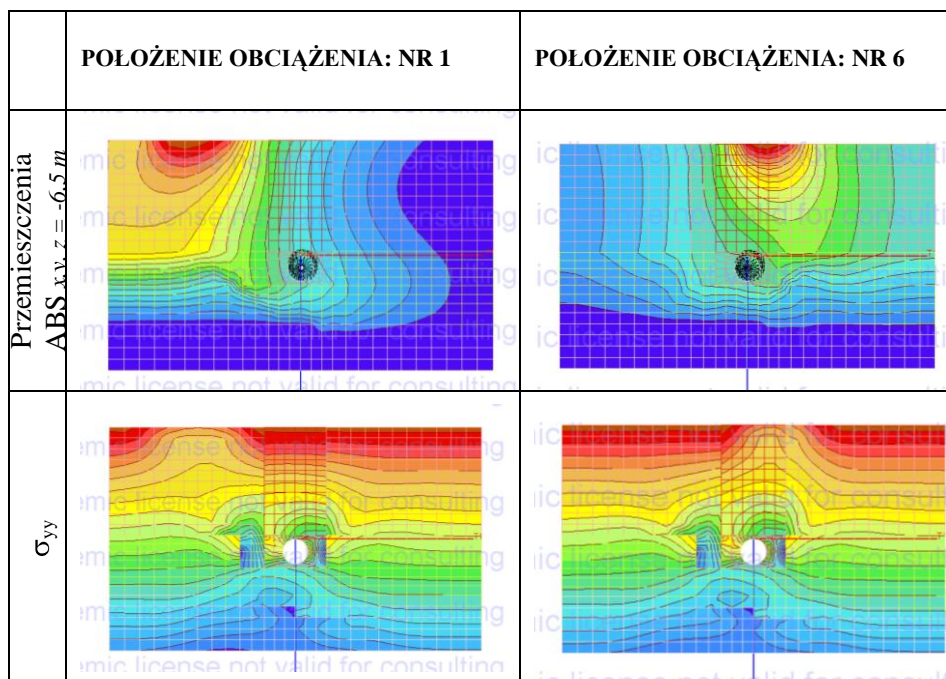
Z kolei dla wybranego położenia obciążenia (nr 1) przedstawiono:

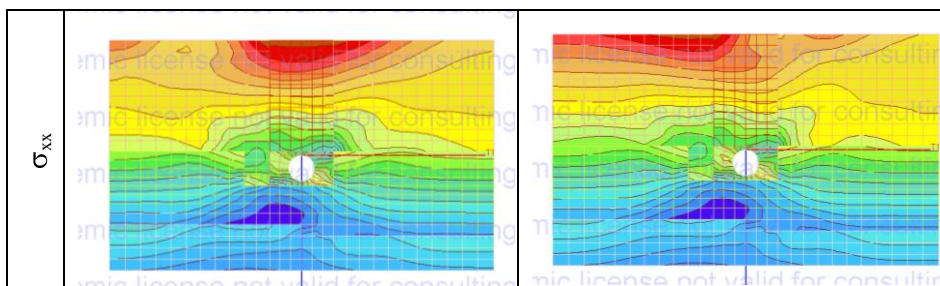
- wykresy obwodowych momentów zginających i obwodowych sił normalnych (rys. 7). Płaszczyzna przekrojowa x, y , w której prezentowane są te wyniki przechodzi przez środek strefy działania obciążeń (płaszczyzna prostopadła do osi rury, $z = -6,5 \text{ m}$),
- wizualizację 3D rozkładu obwodowych sił normalnych wzdłuż odcinka rury (rys. 8).

	POŁOŻENIE OBCIĄŻENIA: NR 1	POŁOŻENIE OBCIĄŻENIA: NR 6
Przemieszczenia ABS		
σ_{yy}		

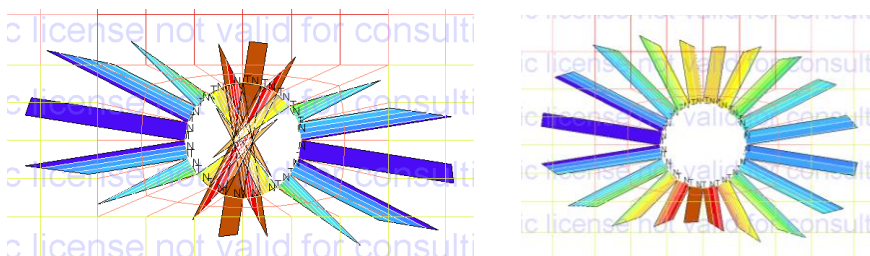


Rys. 5. Wizualizacja 3D rozkładu przemieszczeń ABS oraz naprężeń σ_{yy} , σ_{xx} , i σ_{zz} przy dwóch położeniach obciążenia (nr 1 i nr 6)

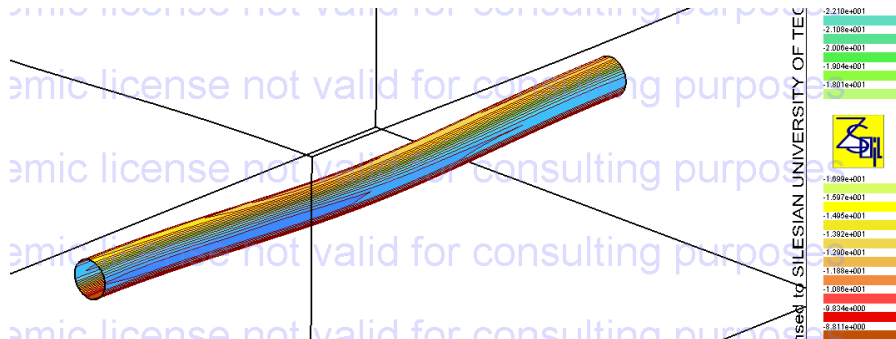




Rys. 6. Rozkład przemieszczeń ABS oraz naprężeń σ_{yy} i σ_z w płaszczyźnie x, y ($z = -6,5 \text{ m}$) przy dwóch położeniach obciążenia (nr 1 i nr 6)

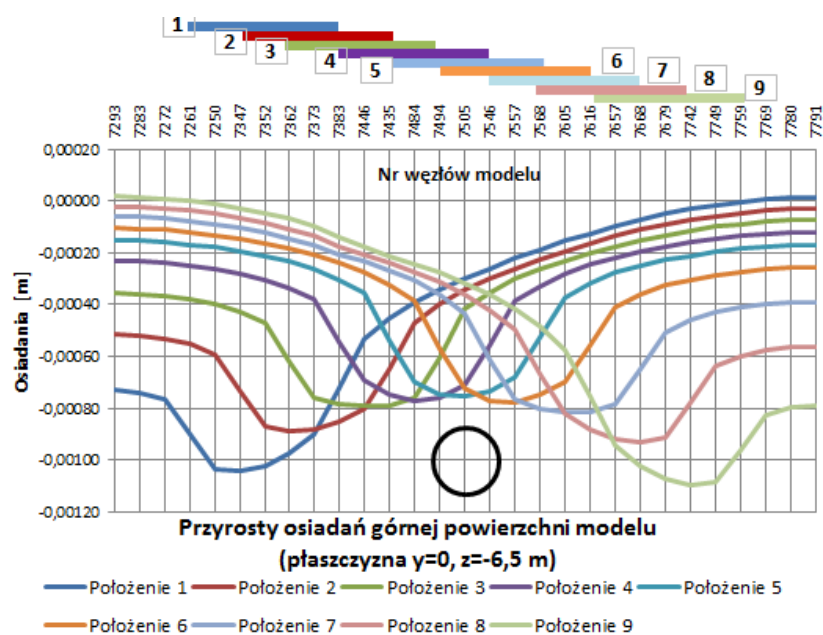


Rys. 7. Wykresy uogólnionych sił wewnętrznych (położenie obciążenia nr 1) w płaszczyźnie $x, y, z = -6,5 \text{ m}$: a) obwodowy moment zginający, b) obwodowa siła normalna



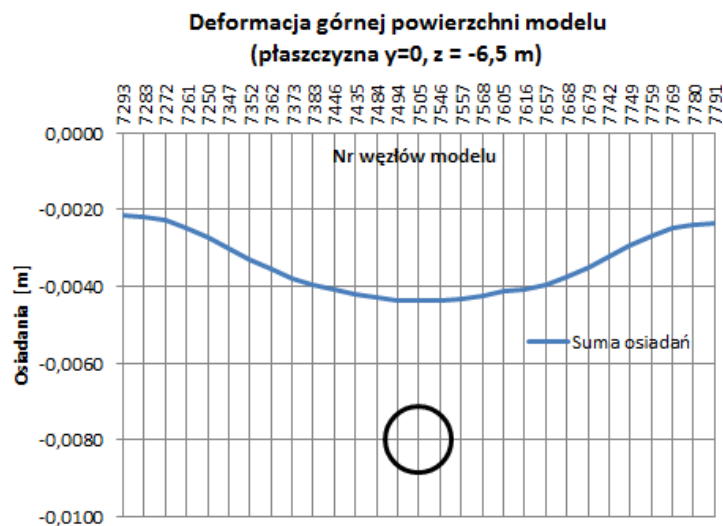
Rys. 8. Wizualizacja 3D rozkładu obwodowych sił normalnych wzdłuż odcinka rury (położenie obciążenia nr 1)

Przesuwające się obciążenie, wywierając nacisk na górną powierzchnię modelu, powoduje jej lokalne osiadania. Przyrosty osiadań są zróżnicowane zależne od położenia obciążanego obszaru względem rurociągu. Przykładowo, wykres przyrostów osiadań w płaszczyźnie x, y (przy $y = 0$ i $z = -6,5 \text{ m}$) pokazano na rys. 9.



Rys. 9. Wykres przyrostów osiadań górnej powierzchni modelu w trakcie przesuwania się obciążenia

Sumaryczne osiadania górnej powierzchni modelu w analogicznej płaszczyźnie przekrojowej, występujące po dziewięciu etapach przesuwania obciążenia pokazano na rys. 10.



Rys. 10. Wykres sumarycznego osiadania górnej powierzchni modelu w trakcie przesuwania się obciążenia

5. Podsumowanie

Analizy numeryczne stanowią współczesne narzędzie do badań złożonych zagadnień inżynierskich. Stosunkowo szeroka dostępność pakietów obliczeniowych, duża moc obliczeniowa komputerów oraz przyjazny dla użytkownika *interface* sprawiają, iż coraz częściej sięgamy do analiz typu 3D. Dzięki nim analizować można zagadnienia bez nadmiernych uproszczeń, prowadzić analizy wielowariantowe, symulować procesy technologiczne czy wreszcie uwzględniać oddziaływania o złożonym charakterze (np. wpływy górnicze).

Przedstawiona w pracy analiza typu 3D współdziałania konstrukcji rurowej z podłożem gruntowym obciążonym na pewnej powierzchni, usytuowanej niesymetrycznie względem rurociągu umożliwiła ocenę wyężenia rury oraz zmian zachodzących w bryle gruntu. W programie analizy uwzględniono dziewięć położów równomiernie rozłożonego obciążenia, symulując w ten sposób jego przesuwanie względem podziemnego rurociągu. Symulacja ta może być traktowana jako odwzorowanie działania obciążeń komunikacyjnych.

Z uwagi na uwarstwienie podłoża gruntowego, z warstwą słabego gruntu o zmiennej grubości oraz na fakt zróżnicowanych parametrów materiałowych w strefach najgłębiej zalegającego gruntu rodzimego, obsypki i zasypki w wykopie oraz gruntu rodzimego, w strefie przypowierzchniowej zaobserwować można wyraźne zaburzenia w rozkładzie naprężeń zarówno w bezpośrednim otoczeniu rury (wykop) jak i strefach dalszych. Wpływ obciążenia jest szczególnie widoczny w przypowierzchniowych warstwach gruntu, bezpośrednio w obszarze jego działania. Można także zidentyfikować strefę rozchodzenia się naprężeń wywołanych tym obciążeniem w bryle gruntu i otoczeniu rurociągu. Specyficzne usytuowanie obciążenia, w przesunięciu względem rury sprawia, iż wyraźnie widoczne jest nierównomierne wyężenie poboczniczy rury.

Literatura

- [1] ATV-DVWK-A127P – Obliczanie statyczno-wytrzymałościowych kanałów i przewodów kanalizacyjnych. Wyd. Seidel-Przywecki. Warszawa, 2000 r.
- [2] Gerscovich D.M.S., Sieira A.C.C.F., Fereira A.M. – Numerical Simulation of the Mechanical Behavior of Buried Pipes in Trench. The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), India, Goa, 2008 r.
- [3] Goltabar A. M.; Shekarachi M. – Investigation of Traffic Load on the Buried Pipeline by Using of Real Scale Experiment and Plaxis-3D Software. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 2(2), 2010 r., s. 107-113.
- [4] 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.

- [5] Kliszczewicz B.: Przegląd metod obliczeniowych podatnych rurociągów zlokalizowanych na terenach górniczych. III Konferencja Naukowo-Szkoleniowa „Bezpieczeństwo i ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych”. GIG, Ustroń, 2010 r., s. 143 – 154.
- [6] Kliszczewicz B.: Numeryczna analiza wpływu eksploatacji górniczej na podatne rurociągi ziemne. Inżynieria i Budownictwo, Nr 5 – 6/ 2010 r., s. 323 – 326.
- [7] Kulickowski A. Rury kanalizacyjne. Tom II. Projektowanie konstrukcji. Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej, Monografie, Studia, Rozprawy – nr 42, 2004 r.
- [8] Madryas C., Kolonko A., Wysocki L.: Konstrukcje przewodów kanalizacyjnych, Oficyna Wydawnicza Pol . Wr., Wrocław, 2002 r.
- [9] ZSOIL.PC 2011 User Manual. Zace Services Ltd, Software engineering. Lausanne, Switzerland, 2011 r.

NUMERICAL ANALYSIS 3D OF BURIED PIPES AND SOIL INTERACTION

S u m m a r y

This paper investigates the behavior of concrete buried pipe under vertical loads using the Finite Element Method (FEM). The pipe-soil 3D model under different field condition and different backfill materials was analysed. For performing the numerical analysis a Z_Soil 2011 model was used. The results of this numerical analysis are presented as the maps of stresses in soil, diagrams of circumferential forces and bending moments in cross-section of pipe and in the 3D visualisation.