

ANALIZA NUMERYCZNA RURY O PRZEKROJU GARDZIELOWYM UŁOŻONEJ W GRUNCIE



tekst: **dr hab. inż. BARBARA KLISZCZEWICZ, prof. PŚI**, Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa, Katedra Geotechniki i Dróg

Żelbetowe rury o przekroju gardzielowym znajdują szerokie zastosowanie jako elementy odwodnienia lotnisk, przepusty komunikacyjne oraz przejścia dla małych ssaków i płazów. Rury te, ułożone w gruncie, nieraz na stosunkowo małych głębokościach, poddawane są działaniu intensywnych obciążeń. Do obliczania takich konstrukcji rurowych stosowane są metody analityczne, w których otoczenie gruntowe reprezentowane jest przez układ pionowego i poziomego parcia. Współcześnie stosowane są także metody numeryczne, które umożliwiają zarówno wariantową analizę wytrzymałościową rur o dowolnym, w tym niekołowym przekroju, jak i badanie zjawisk zachodzących w gruntowym otoczeniu tych rur.

Wstęp

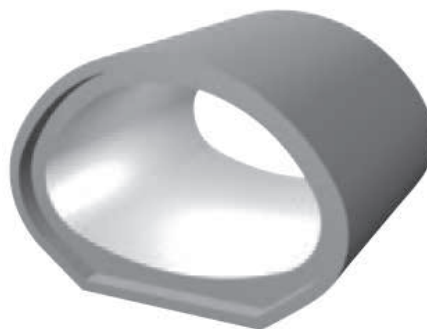
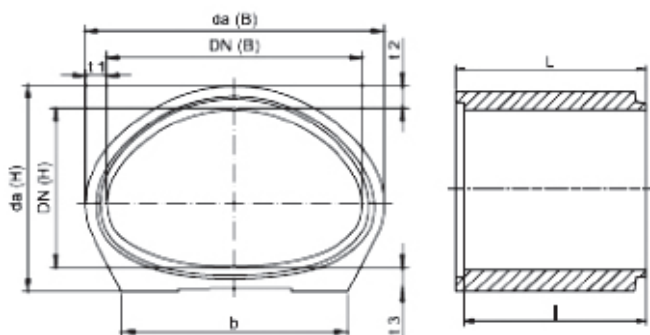
Rurociągi ułożone w gruncie są konstrukcjami przenoszącymi złożone układy obciążeń. Obliczenia statyczne najczęściej odnoszą się do rur o przekroju kołowym, przy czym rozpatrywanym w obliczeniach reprezentantem tych liniowych konstrukcji jest jednostkowy odcinek rury, analizowany w płaskim stanie odkształcenia. Obliczenia statyczne prowadzone są najczęściej metodami analitycznymi, w których otoczenie gruntowe rury traktowane jest jako układ pionowego i poziomego parcia. Efektem tych obliczeń są wartości obwodowych sił normalnych i momentów zginających. Obliczenia mogą być prowadzone z uwzględnieniem sztywności (podatności) rury [6, 7, 8]. Ten sposób postępowania odnosi się także do rur pełniących rolę przepustów komunikacyjnych, elementów odwodnienia lub przejść dla zwierząt. Przegląd takich konstrukcji wraz z szerokim omówieniem metod ich obliczania podano w serii artykułów [13].

Szczególnym przypadkiem rozwiązania przepustów są betonowe i żelbetowe rury o przekroju gardzielowym (ryc. 1) [2], produkowane według DIN EN 1916/DIN V 1201 MF-FM.

Przykładem zastosowania rur o przekroju gardzielowym może być budowa przepustu dla płazów i małych ssaków na

Trasie Świętokrzyskiej, prowadzona przez Przedsiębiorstwo Budowlano-Instalacyjne PEBIS. Rury zostały ułożone na warstwie filtracyjnej ze żwiru o frakcji 2–16 mm oraz na ławie fundamentowej z betonu C15/20. Kolejne etapy budowy tego przepustu pokazano na rycinie 2.

Zgodnie z informacją podaną przez producenta [2], rury o przekroju gardzielowym powinny być analizowane obliczeniowo we wszystkich przypadkach projektowych. Zasady obliczeń statycznych sztywnych kanałów o przekroju niekołowym (np. dzwonowym, normalnym, w których B:H = 2:1,5, i spłaszczonym, w których B:H = 2:1,25) podał Netzer [8], a szczegółowo opisał Kuliczkowski [6]. Metoda ta uwzględnia zarówno wpływ przekroju poprzecznego na rozkład obciążeń kanału, współpracę rury z ośrodkiem gruntowym, jak i sprężyste właściwości materiału rury oraz jej grubość. W obliczeniach rozpatrywanych jest osiem przypadków obciążenia (w tym obciążenie pionowym i poziomym parciem gruntu, obciążenie ciężarem własnym rury oraz wewnętrznym ciśnieniem medium). Dla każdego przypadku podano wzory do obliczania sił wewnętrznych i ugięć oraz zamieszczono tabele umożliwiające odczytanie wartości współczynników występujących we wzorach.



Ryc. 1. Rura gardzielowa ze stopką, łączona na uszczelkę: a) geometria rury, b) widok segmentu rurowego [2]



Ryc. 2. Etapy budowy przepustu z rur o przekroju gardzielowym, za: www.pebis.com.pl

Metoda Netzera może być stosowana do obliczania rur o przekroju gardzielowym, który dla rur o wymiarach 1200/900 odpowiada przekrojowi dzwonowemu normalnemu, a dla pozostałych rur (o wymiarach 2000/1250, 2400/1500, 3200/2000, 3600/2250) odpowiada przekrojowi dzwonowemu spłaszczonemu [6].

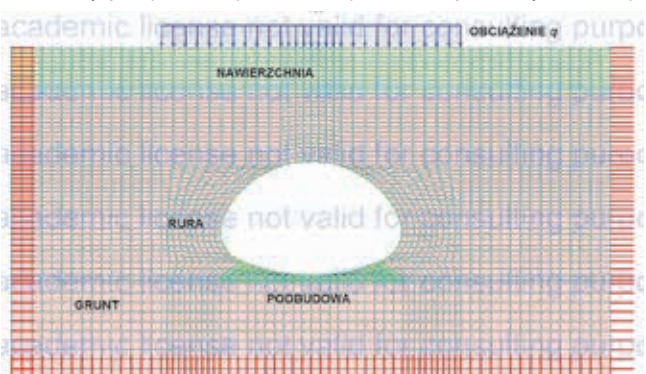
Alternatywą do obliczeń analitycznych są metody numeryczne, bazujące głównie na metodzie elementów skończonych (MES). W metodzie tej analizowany obiekt reprezentowany jest przez model dyskretny, składający się z zespołu elementów połączonych w węzłach, o stosunkowo prostych kształtach i o skończonej liczbie stopni swobody. Oprócz geometrii modelu dyskretyzacji podlegają także wszystkie wielkości fizyczne modelu, takie jak obciążenia, naprężenia, przemieszczenia czy utwierdzenia.

W numerycznych analizach podziemnych rurociągów rozpatrywany jest układ rurociąg – podłoże gruntowe [3], w którym przewód rurowy otoczony jest prostokątnym obszarem gruntu (model 2D) lub prostopadłościenną bryłą gruntu (model 3D). Decyzja odnośnie do typu modelu wynika z analizy warunków pracy analizowanego rurociągu. W wypadku długiego, prostoliniowego odcinka przewodu o niezmiennych na jego długości parametrach geometrycznych, obciążeniu i warunkach gruntowo-wodnych przyjmowany jest model 2D, odwzorowujący pierścień rurowy o jednostkowej długości (płaski stan odkształcenia). Model 3D odwzorowuje powłokę rury przenoszącej zróżnicowane jej długości obciążenia (w tym m.in. oddziaływania górnicze), usytuowanej w zmiennych warunkach gruntowo-wodnych. Zalecenia dotyczące budowy numerycznych modeli 2D i 3D układu rurociąg o przekroju kołowym – grunt podano m.in. w [3, 4].

W niniejszym artykule przedstawiono analizę numeryczną rurociągu o przekroju gardzielowym, ułożonego w gruncie, którą wykonano w geotechnicznie zorientowanym programie Z_Soil, acad. ver. 11.15 [12].

Numeryczny model rury o przekroju gardzielowym ułożonej w gruncie

Przedmiotem analizy jest układ rurociąg o przekroju gardzielowym – grunt. Układ ten rozpatrywany jest w płaskim stanie odkształcenia (2D). Wymiary rurociągu, przyjęte według katalogu [2], wynoszą: średnica nominalna $DN(B) = 2400$ mm, średnica nominalna $DN(H) = 1500$ mm, grubość ścianki $t_1 = t_2 = 250$ mm, długość elementu $L = 2,65$ m (wszystkie oznaczenia zgodne z ryc. 1). Rurociąg ułożony jest na profilowanej podbudowie betonowej. Miąższość warstwy gruntu nad górnym punktem rury wynosi $h_1 = 0,84$ m, nad którą zlokalizowana jest warstwa reprezentująca nawierzchnię, o sumarycznej grubości $h_2 = 0,60$ m. Jej górna powierzchnia jest na pewnym odcinku obciążona równomiernie obciążeniem o intensywności $q = 60,0$ kN/m². Na potrzeby budowy modelu MES z otoczenia gruntowego wydzielono prostokątny obszar o wymiarach: $L_x = 8,0$ m, $H_y = 4,4$ m. Model MES rozpatrywanego układu (ryc. 3) zbudowany jest z 3444 elementów, w tym 3378 elementów typu *quad* (continuum) oraz 66 elementów typu *beam* (przekrój gardzielowego rurociągu). Elementy połączone są w 3655 węzłach. Na pionowych krawęd-



Ryc. 3. Widok modelu układu rurociąg o przekroju gardzielowym – grunt

dziach modelu wprowadzono podpory przegubowo-przesuwne (możliwy przesuw na kierunku pionowym), zaś na jego dolnej krawędzi – podpory przegubowo-nieprzesuwne. Na styku rury i podbudowy z gruntem wprowadzono elementy typu *interface*.

W modelu wprowadzono cztery strefy materiałowe (rura, podbudowa, nawierzchnia i grunt). Trzy pierwsze (rura, podbudowa, nawierzchnia) modelowano w zakresie liniowo-sprężystym. Jest to dopuszczalne przy założeniu, że w warunkach rzeczywistych elementy z materiałów konstrukcyjnych pracują w zakresie sprężystym. Wartości przyjętych parametrów materiałowych poszczególnych stref modelowanych w zakresie liniowo-sprężystym zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Parametry materiałowe stref modelowanych w zakresie liniowo-sprężystym

Strefa materiałowa	Moduł Younga E [GPa]	Ciężar objętościowy γ [kN/m ³]	Współczynnik Poissona ν [-]
Rurociąg	27,0	24,0	0,16
Podbudowa	20,0	24,0	0,16
Nawierzchnia	10,3	25,0	0,30

Do opisu zachowania się gruntu w trakcie działania obciążenia użyto zaawansowanego modelu konstytutywnego Hardening Soil Small (model sprężysto-plastyczny o wzmocnieniu izotropowym) [1, 5, 9, 10, 11]. Zastosowanie tego modelu uzasadniają jego szerokie możliwości w zakresie realistycznego odwzorowania złożonych efektów makroskopowych, obserwowanych w monotonicznie obciążonych gruntach (efekt zagęszczenia, wpływ historii obciążenia, wzrost modułu sztywności wraz ze wzrostem głębokości lub poziomu naprężeń, dylatacja, silna zmiana sztywności gruntu towarzysząca wzrostowi amplitudy odkształcenia dewiatorowego w zakresie tzw. małych odkształceń, rzędu 10⁻⁶–10⁻³). Ma to niewątpliwie istotne znaczenie w zagadnieniach interakcji konstrukcji z gruntem. Parametry materiałowe modelu Hardening Soil Small, użyte w wykonanej analizie numerycznej, zestawiono w tabeli 2. Parametry te odpowiadają normalnie skonsolidowanym, średnio zagęszczonym, słabo uziarnionym piaskom i zostały wygenerowane z bazy danych programu Z_Soil [12].

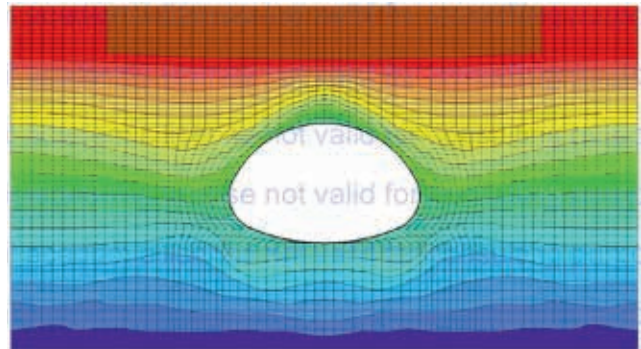
Wykonana analiza numeryczna ma charakter przyrostowo-iteracyjny. W kolejnych krokach analizy obciążenie narasta liniowo od wartości $q = 0$ kN/m² ($t = 0$) do wartości $q = 60$ kN/m² ($t = 5$).

Wyniki analizy MES

Wyniki analizy numerycznej układu rurociągu o przekroju gardzielowym – grunt przedstawiono w formie graficznej. Pierwszy zestaw wyników (ryc. 4) zawiera informacje dotyczące deformacji

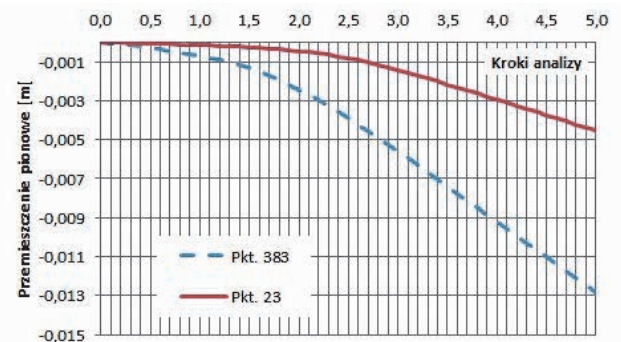
modelu: mapę wypadkowych przemieszczeń (ABS) oraz wykres obrazujący narastanie pionowych przemieszczeń wybranych węzłów modelu w trakcie wzrostu obciążenia (ryc. 5).

Na skutek działania obciążenia podłoże gruntowe ulega deformacji. Kumulacja deformacji gruntu występuje bezpośrednio nad rurą. Natomiast sztywna rura i betonowa podbudowa nie odkształcają się i, jak wskazuje przebieg izolinii wypadkowych przemieszczeń, stanowią inkluzję w gruncie, zaburzającą jego swobodną deformację. Po zakończeniu procesu obciążenia ($t = 5$) maksymalne pionowe przemieszczenie węzłów leżących na górnej krawędzi modelu wynosi 0,0128 m, zaś pionowe przemieszczenie górnego i dolnego punktu rury jest tego samego rzędu i wynosi 0,0045 m.



Ryc. 4. Mapa wypadkowych przemieszczeń ($t = 5$)

Narastanie obciążenia w czasie od $t = 0$ do $t = 5$ (przyrost $\Delta t = 0,1$) skutkuje wzrostem przemieszczeń węzłów modelu. Pokazano to na przykładzie pionowych przemieszczeń dwóch charakterystycznych punktów (węzłów) modelu, leżących na jego pionowej osi symetrii, tj. górnego punktu rury (pkt 23) i punktu leżącego na górnej krawędzi modelu (pkt 383). Narastanie deformacji ma nieliniowy charakter (ryc. 5), co świadczy o plastycznym zachowaniu się gruntu.



Ryc. 5. Wykres pionowych przemieszczeń charakterystycznych punktów leżących na pionowej osi modelu: pkt 23 – górny punkt rury, pkt 383 – punkt leżący na górnej krawędzi modelu

Tab. 2. Parametry materiałowe modelu Hardening Soil Small

Strefa materiałowa	E_{ur}^{ref} [MPa]	E_o^{ref} [MPa]	$E_{50ref} = E_{oed}^{ref}$ [MPa]	Ciężar obj. γ [kN/m ³]	Kąt tarcia wewn. ϕ [°]	Kąt dylatacji ψ [°]	OCR	Wsp. Poissona ν_{ur} [-]
Grunt	40,00	121,38	10,00	16,4	34,5	4,88	1,1	0,2

Oznaczenia parametrów podanych w tabeli 2: E_{50}^{ref} – sieczny moduł odpowiadający 50% wytrzymałości, E_{oed}^{ref} – referencyjny moduł edometryczny, E_{ur}^{ref} – referencyjny moduł odciążenia – obciążenia, ν_{ur} – współczynnik Poissona przy odciążeniu – obciążeniu. Dodatkowo, ze względów obliczeniowych, przyjęto wartość kohezji $c = 5,0$ kPa.

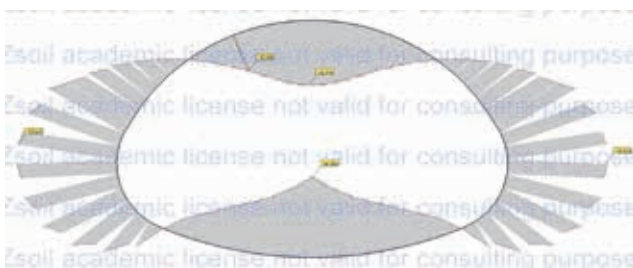
Ryc. 6. Mapa pionowych naprężeń w gruncie ($t = 5$)

Działanie obciążenia na górnej krawędzi modelu skutkuje powstaniem naprężeń w strefie gruntu. Obrazuje to m.in. mapa naprężeń pionowych (ryc. 6). Rozkład tych naprężeń jest nierównomierny, widoczna jest wyraźna strefa koncentracji naprężeń nad górną powierzchnią rury. Dostrzegalna jest także strefa zwiększonych naprężeń w strefie podparcia rury. Naprężenia pionowe bezpośrednio nad rurą wynoszą 104 kN/m^2 . Towarzyszą im naprężenia poziome o wartości 37 kN/m^2 .

Ułożona w gruncie sztywna rura o przekroju gardzielowym, stanowiąca samodzielny układ statyczny, ulega wyteżeniu w trakcie narastania obciążenia. W poprzecznym przekroju rury, analizowanym w płaskim stanie odkształcenia, powstają obwodowe momenty zginające M_z (ryc. 7) oraz obwodowe siły normalne N_x , o charakterze ściskającym (ryc. 8). Moment zginający M_z w górnym punkcie rury wynosi 23 kNm/m , a w punkcie bocznym – 34 kNm/m . Wartości siły normalnej N_x wynoszą odpowiednio: 41 kN/m (górnym punkcie rury) i 118 kN/m (bocznym punkcie rury).

Podsumowanie

Stosowanie metod numerycznych umożliwia wykonanie analizy wyteżenia podziemnych rurociągów o dowolnych kształtach przekroju poprzecznego. W analizach MES podziemny rurociąg

Ryc. 7. Wykres obwodowych momentów zginających M_z ($t = 5$)Ryc. 8. Wykres obwodowych sił normalnych N_x ($t = 5$)

jest rozpatrywany wraz z otaczającym go gruntem jako układ wzajemnie na siebie oddziałujący. Współczesne geotechnicznie zorientowane programy komputerowe, z różnorodnymi konstytutywnymi modelami gruntu, umożliwiają realistyczne modelowanie jego zachowania się w trakcie działania obciążenia. Niewątpliwym walorem analiz numerycznych są także stosunkowo łatwe ich wariantowanie oraz możliwość śledzenia zjawisk zachodzących w gruncie i analizowanej konstrukcji w ujęciu czasowym.

Ilustrację możliwości metod numerycznych stanowi przedstawiona w artykule przykładowa analiza MES układu rura o przekroju gardzielowym – grunt, w której zastosowano sprężysto-plastyczny model o wzmocnieniu izotropowym Hardening Soil Small. Wyniki analizy umożliwiają zarówno oszacowanie wyteżenia rurociągu w trakcie narastania obciążenia, jak i obrazują deformację i stan naprężenia w gruncie.

Literatura

- [1] Benz T.: *Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences*. Ph.D. Thesis. Mitteilung 55 des Instituts für Geotechnik, Universität Stuttgart, 2007.
- [2] *Rury o profilu gardzielowym*. Katalog firmy Haba-Beton.
- [3] Kliszczewicz B.: *Interakcja podziemnych rurociągów o różnych sztywnościach z gruntem*. Politechnika Śląska – monografia nr 534. Gliwice 2014.
- [4] Kliszczewicz B.: *Modelowanie numeryczne współczesnym narzędziem analizy statyczno-wytrzymałościowej podziemnych rurociągów*. Materiały konferencji *Nowe technologie w sieciach i instalacjach wodociągowych i kanalizacyjnych*. Politechnika Śląska, Instytut Inżynierii Wody i Ścieków. Gliwice 2016.
- [5] Kliszczewicz B.: *Konstytutywne modele gruntu stosowane w analizach MES interakcji rurociągów z gruntem*. Materiały konferencji *Nowoczesne miasta. Infrastruktura i środowisko. INFRAEKO 2016. V Międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna, Kraków*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów 2016.
- [6] Kuliczkowski A.: *Rury kanalizacyjne. T. 2. Projektowanie konstrukcji*. Politechnika Świętokrzyska – Monografie, Studia, Rozprawy, nr 42. Kielce 2004.
- [7] Madryas C., Kolonko A., Wysocki L.: *Konstrukcje przewodów kanalizacyjnych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2002.
- [8] Netzer W.: *Statische Berechnung erdverlegter Rohrleitungen mit genormten Querschnitten*. Verlag Ernst & Sohn. Berlin–München–Düsseldorf 1980.
- [9] Schanz T.: *Zur modellierung des mechanischen verhaltens von reinbungsmaterialien*. Mitteilung des Instituts für Geotechnik, Universität Stuttgart, 1998.
- [10] Truty A.: *Sztywność gruntów w zakresie małych odkształceń. Aspekty modelowania numerycznego*. „Czasopismo Techniczne” 2008, z. 3.
- [11] Truty A., Obrzud R.: *The Hardening Soil Model – a practical guidebook*. Zace Services Ltd, Software engineering. Lausanne 2011.
- [12] Truty A., Zimmermann T., Podleś K.: *ZSoil_PC 2011. User manual*. Zace Services Ltd. Lausanne 2011.
- [13] Wysokowski A., Howis J.: *Przepusty w infrastrukturze komunikacyjnej*, cz. 1–11. „Nowoczesne Budownictwo Inżynierijne” 2008–2011.