

Andrzej Kulickowski

WYBRANE PROBLEMY PROJEKTOWANIA KONSTRUKCJI PRZEWODÓW KANALIZACYJNYCH

W ostatnim dziesięcioleciu pojawiło się za granicą szereg prac dotyczących problematyki projektowania konstrukcji przewodów rurowych. Uwzględnia się w nich wpływ wielu istotnych czynników, które dotychczas nie były uwzględniane w obliczeniach konstrukcji kanałowych. Należą do nich: wzajemna współpraca układu rura-grunt, z uwzględnieniem sztywności rury i gruntu wokół niej; wpływ parametrów gruntowych gruntu spoza wykopu na wielkość obciążeń konstrukcji; wpływ technologii budowy, w tym stopnia zagęszczenia gruntu; sposób posadowienia rury; rodzaj zastosowanego deskowania i sposób jego wyciągania z gruntu, itp.

Dokładne poznanie wpływu tych czynników na wielkość obciążeń konstrukcji rurowych powoduje, że już na etapie projektowania konstrukcji można ustalać korzystne dla niej technologie budowy, mające istotny wpływ na bardziej oszczędne projektowanie konstrukcji. W skrypcie monograficznym [1] przedstawiono metodykę projektowania konstrukcji przewodów wodociągowych i kanalizacyjnych, która została opracowana głównie na bazie prac niemieckich [2], austriackich [3, 6], szwajcarskich [4] oraz prac własnych.

Poniżej zaprezentowano najistotniejsze różnice proponowanej metody obliczeń w stosunku do metod stosowanych dotychczas.

Obciążenia

Sztywność układu rura-grunt

W kraju stosuje się przy sprawdzaniu stopnia sztywności rury (s_v) wzór Kleine (Voellmy'ego):

$$s_v = \frac{E_1}{E_k} \left(\frac{r_s}{s} \right)^3 \quad (1)$$

w którym:

- E_1 — moduł odkształcenia gruntu zasypowego znajdującego się bezpośrednio nad wierzchołkiem rury [MPa],
- E_k — współczynnik sprężystości materiału konstrukcyjnego rury [MPa],
- r_s — średni promień krzywizny rury [m],
- s — grubość konstrukcji rury [m].

Rurę uważa się za sztywną (bardziej sztywną niż otaczający ją grunt), jeżeli $s_v \leq 1$ oraz za podatną (mniej sztywną niż otaczający ją grunt), gdy $s_v > 1$.

Wzór (1) nie uwzględnia wpływu poziomego odkształcenia się rury na jej sztywność. Obniżeniu się wierzchołka rury towarzyszy jej odkształcenie na zewnątrz, które powoduje nacisk na grunt w kierunku poziomym. Nacisk ten zwiększa poziome parcie boczne, ono zaś dodatkowo usztywnia rurę, czyli powoduje zmniejszenie współczynnika sztywności rury. W przypadku nieuwzględnienia odkształcenia poziomego rury, obciążenie jej jest bardziej niekorzystne. Wzór (1) daje zatem pewien niepotrzebny zapas bezpieczeństwa. Stosowanie nadal współczynnika s_v uważa się za niewskazane z uwagi na fakt, że nie uwzględnia on odkształcenia się rury oraz innych czynników mających wpływ na sztywność rury.

Proponowane nowe sposoby obliczania współczynnika sztywności uwzględniają te czynniki. Przykładowo, tzw. systemowy współczynnik sztywności (s_s) oblicza się ze wzoru:

$$s_s = - \frac{E_k \cdot J_k}{E_h \cdot r_s^3} \quad (2)$$

w którym:

- J_k — moment bezwładności ścianki rury w kierunku poprzecznym [m⁴],
- E_h — poziomy moduł odkształcenia gruntu [MPa].

Rurę uważa się za sztywną, gdy $s_s \geq 0,1$ lub za podatną, gdy $s_s < 0,1$. Występujący we wzorze (2) poziomy moduł odkształcenia gruntu (E_h) jest funkcją modułu odkształcenia gruntu zasypowego z boku rurowości w wykopie i gruntu rodzimego poza wykopem oraz wymiarów wykopu i rury.

W toku dalszych obliczeń ustalających wielkość obciążeń konstrukcji, uwzględniany jest systemowy współczynnik sztywności (s_s) i ma on istotny wpływ na wielkość tych obciążeń.

Obciążenie pionowe od nadsypki gruntu

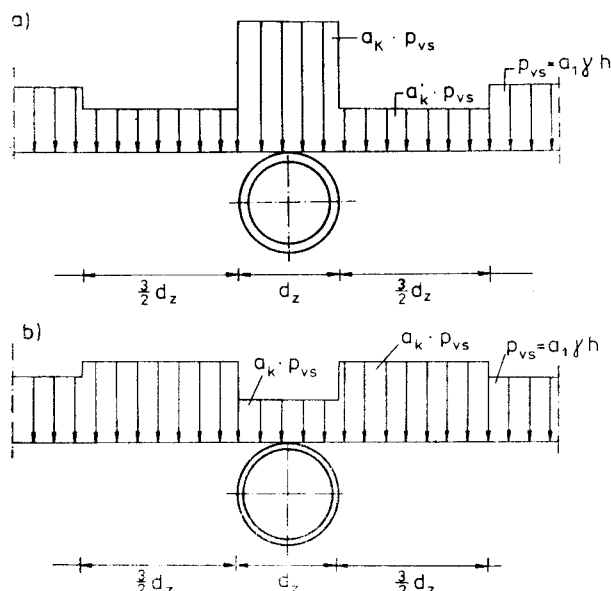
Pionowe obciążenie obliczeniowe (p_{vsl}) od nadsypki gruntu zaleca się obliczać ze wzoru:

$$p_{vsl} = \alpha_1 \cdot \alpha_l \cdot \alpha_k \cdot \gamma \cdot h \quad (3)$$

w którym:

- α_1 — współczynnik obciążenia,
- α_l — współczynnik odciażający uwzględniający tarcie gruntu zasypowego o ściany wykopu,
- α_k — współczynnik koncentracji obciążeń,
- γ — ciężar objętościowy gruntu [kN/m³],
- h — wysokość nadsypki gruntu nad wierzchołkiem rury [m].

W przypadku konstrukcji rurowych ułożonych w gruncie, w wykopie lub nasypie, część obciążeń nadsypki gruntu przenosi rura, a część grunt otaczający ją po bokach. Jednakowe obciążenie rury i gruntu obok w wykopie ma miejsce tylko wtedy, gdy sztywność rury i gruntu w wykopie jest jednakowa. Gdy sztywność rury jest większa niż sztywność otaczającego ją gruntu, co najczęściej ma miejsce, zwiększa się obciążenie rury, a zmniejsza obciążenie gruntu w wykopie obok rury (rys. 1a) i odwrotnie, gdy rura jest mniej sztywna niż otaczający ją grunt (np. rury z tworzyw sztucznych), grunt obok rury w wykopie przenosi wyższe obciążenia aniżeli rura (rys. 1b).



Rys. 1. Rozkład obciążeń pionowych od nadsypki gruntu w przypadku rury sztywnej (a) i podatnej (b).

Do ustalenia obciążeń nad konstrukcją rury służy m. in. współczynnik a_k . Jest to wielkość bezwymiarowa, określająca o ile obciążenie konstrukcji rury jest większe (lub mniejsze) od obciążenia, które byłoby w przypadku jednakowej sztywności konstrukcji rury i otaczającego ją gruntu. Fakt koncentracji obciążeń nad rurą jest obecnie uwzględniany w obliczeniach np. poprzez przyjmowanie obciążenia rury ciężarem całej nadsypki gruntu w wykopie, w przypadku gruntów nieprawidłowo zagęszczonych, a w przypadku gruntów dobrze zagęszczonych, ciężarem gruntu znad rurowciągu oraz połową ciężaru przypadającego na grunt w wykopie obok rury. Ten sposób uwzględniania koncentracji obciążeń jest zbyt uproszczony i nie uwzględnia innych (poza szerokością wykopu i średnicą rury) bardzo istotnych czynników mających wpływ na wartość rzeczywistego współczynnika koncentracji obciążeń. Powoduje on przyjmowanie do obliczeń w większości przypadków zbyt dużych obciążeń pionowych konstrukcji.

W pracy [1] zamieszczono zalecany tok obliczeń współczynnika koncentracji obciążeń. Współczynnik ten jest funkcją następujących

parametrów: średnicy i grubości rury, współczynnika sprężystości rury, modułu odkształcenia gruntu nad, obok i pod konstrukcją rury, sposobu posadowienia rury oraz wymiarów geometrycznych wykopu.

Parcie poziome gruntu

Obecnie obliczeniowe parcie poziome gruntu (p_{h1}) wyznacza się ze wzoru:

$$p_{h1} = \alpha_2 \cdot K_1 \cdot p_{vs} \quad (4)$$

w którym:

α_2 — współczynnik obciążenia,

K_1 — współczynnik parcia poziomego gruntu,

p_{vs} — wielkość objaśniona na rys. 1, [kN/m²].

We wzorze (4) przyjmuje się najczęściej wartość współczynnika granicznego (czynnego) parcia gruntu K_1 obliczaną ze wzoru:

$$K_1 = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi'}{2} \right) \quad (5)$$

gdzie:

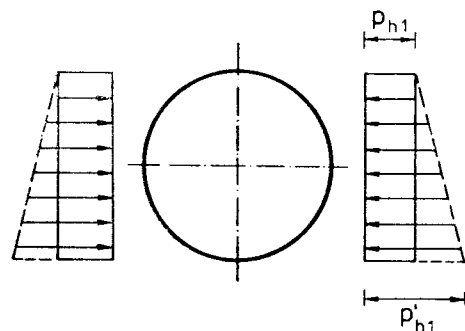
ϕ' — kąt tarcia wewnętrznego gruntu [rad].

W parciu poziomym gruntu obliczanym ze wzoru (4) nie uwzględnia się zatem wielu pozostałych istotnych czynników mających wpływ na jego wartość. W proponowanej metodyce obliczeń [1], parcie poziome gruntu wyznacza się w przypadku rur sztywnych ze wzoru:

$$p_{h1} = \alpha_2 \cdot K_1 \cdot a'_k \cdot p_{vs} \quad (6)$$

$$a'_k = \frac{4 - a_k}{3} \quad (7)$$

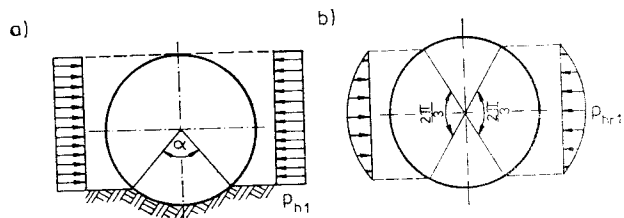
Z uwagi na fakt, iż współczynnik a'_k jest funkcją współczynnika koncentracji obciążeń a_k , zaproponowana metodyka obliczeń parcia poziomego uwzględnia zatem nie tylko kąt tarcia wewnętrznego gruntu, lecz także takie czynniki, jak średnicę i grubość rury, współczynnik sprężystości rury, moduł odkształcenia gruntu nad, obok i pod konstrukcją rury, sposób posadowienia rury oraz wymiary geometryczne wykopu. Wykres parcia poziomego w przypadku rur sztywnych pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Wykres parcia poziomego w przypadku rury sztywnej.

W przypadku rur podatnych ma miejsce odpór pośredni gruntu. Powstaje on jako reakcja na zagęszczenie gruntu obok rury wywołane jej odkształceniem się w kierunku poziomym. Wy-

kres parcia poziomego w przypadku rur podatnych pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Wykres parcia poziomego w przypadku rury podatnej: parcie pośrednie (a) i odpór pośredni (b).

Składa się on z parcia pośredniego gruntu p_{h1} (rys. 3a), obliczonego jak dla rur sztywnych oraz z odporu p_{hr1} (rys. 3b) o rozkładzie parabolicznym, działającego na wysokości ustalonej przy założeniu kąta rozwarcia $2\pi/3$ (120°).

Pionowe obciążenie użytkowe od taboru samochodowego

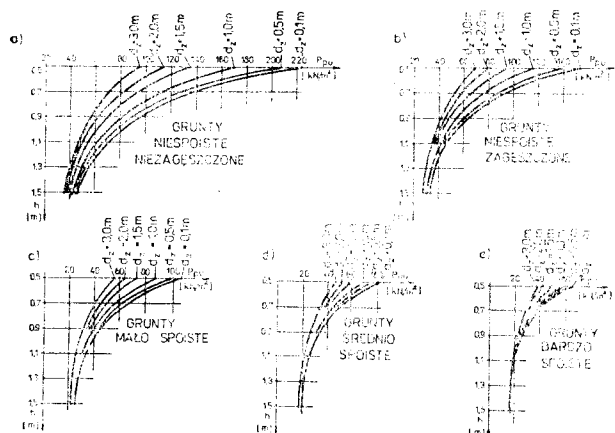
W pracy [1] zalecono obliczać obciążenie użytkowe od taboru samochodowego ze wzoru:

$$p_{vu1} = z_3 \cdot f_d \cdot f_n \cdot p_{pu} \quad (8)$$

w którym:

z_3 — współczynnik obciążenia,
 f_d — współczynnik dynamiczny,
 f_n — współczynnik redukcyjny uwzględniający wpływ sztywności nawierzchni na wielkość obciążenia konstrukcji rury ułożonej w gruncie pod nawierzchnią,
 p_{pu} — pionowe obciążenie rurociągu od taboru samochodowego [kN/m^2].

W pracy [1] zamieszczono opracowane oryginalne wykresy, z których można odczytywać wartości obciążeń p_{pu} jako funkcji rodzaju pojazdu, wysokości nadsypki gruntu nad rurą, średnicy rury oraz rodzaju gruntu. Wykresy te są nowością w polskiej literaturze technicznej z uwagi na fakt uwzględnienia w nich po raz pierwszy zależności wielkości obciążenia użytkowego od średnicy rury oraz rodzaju gruntu. Na rysunku 4 pokazano przykładowo wykresy obciążeń dla samochodu o ciężarze 300 kN,

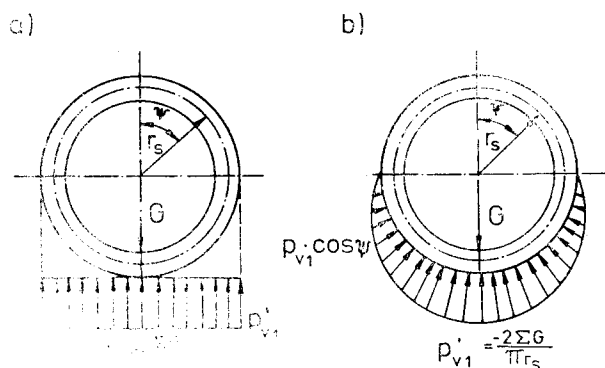


Rys. 4. Obciążenia użytkowe od samochodu o ciężarze 300 kN (I klasa obciążeń wg [5]) dla nadsypki gruntu $0,5 \leq h \leq 1,5$ m.

którego charakterystykę podano m. in. w normie [5]. Wpływ wielkości średnicy rury uwzględniany jest dla wysokości nadsypki gruntu do 1,5 m.

Obliczenia statyczne

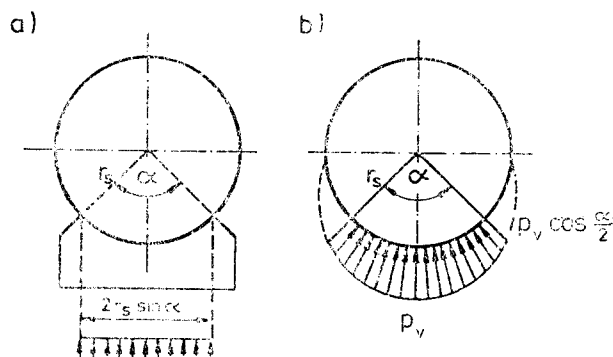
W pracy [1] zamieszczono wzory Marguardta do obliczania sił wewnętrznych w przekroju rury dla dwu możliwych rozkładów oporu gruntu: przy założeniu stałego odporu p'_{v1} na szerokości pasa zajętego przez rurociąg (rys. 5a) i przy założeniu odporu p'_{v1} opisanego funkcją $p_{v1} \cdot \cos \Psi$ i rozłożonego na połowie obwodu rury (rys. 5b).



Rys. 5. Rozkłady odporu gruntu dla których opracowano wzory Marguardta.

W pracy [1] zamieszczono także tablice Marguardta opracowane dla dwu posadowień rury pokazanych na rysunku 6 oraz możliwych kątów posadowień: $\pi/6$, $\pi/3$, $\pi/2$, $2\pi/3$, π .

Sposób posadowienia pokazany na rysunku 6a dotyczy rur ze stopką lub bez stopki ale posadowionych na sztywnym odpowiednio wyprofilowanym podłożu, natomiast sposób pokazany na rysunku 6b dotyczy rur posadowionych na podłożu sprężystym. Wzory i tablice Marguardta dotyczą wyłącznie przekrojów kołowych.



Rys. 6. Posadowienia rury, dla których opracowano tablice Marguardta.

W pracy [1] zamieszczono także niedawno opublikowane tablice Netzera [6] opracowane nie tylko dla przekrojów kołowych, lecz także dla przekrojów jajowych i dzwonowych. Tablice te uwzględniają, co stanowi nowość, wpływ sztywności konstrukcji rurowych na wielkość

sił wewnętrznych. Jest to niezwykle istotne szczególnie w przypadku dużych przekrojów kanałowych.

Nowością jest również podany w oparciu o normę niemiecką [2] tok obliczeń sił wewnętrznych dla rurociągów podatnych. Prezentacja tego toku obliczeń jest niezwykle istotna z uwagi na coraz szersze stosowanie rur podatnych w sieciach zewnętrznych. Praca zawiera także metodykę obliczania sił wewnętrznych dla przekrojów prostokątnych oraz metodykę obliczeń statycznych rur wykonywanych metodą bezodkrywkową, w tym realizowanych za pomocą przecisku.

Obliczenia wytrzymałościowe

Obliczenia wytrzymałościowe rurociągów można przeprowadzać dwoma sposobami. Pierwszy polega na wyznaczeniu momentów zginających i sił osiowych w charakterystycznych przekrojach konstrukcji (najbardziej wyężonych) dla obciążeń obliczeniowych, a następnie obliczeniu naprężeń w tych przekrojach i porównaniu ich z określonymi w normach (lub podawanymi przez producenta) wytrzymałościami obliczeniowymi na rozciąganie i ściskanie przy zginaniu, dla materiału z którego wykonana jest konstrukcja. Przy porównaniu tych wielkości uwzględnia się współczynnik materiałowy, współczynnik konsekwencji zniszczenia konstrukcji oraz dwa częściowe współczynniki bezpieczeństwa, uwzględniające sposób wykonania podłoża pod rurą oraz sposób zagęszczenia gruntu i wbudowania rury. Przedstawiona metodyka obliczania naprężeń uwzględnia wpływ krzywizny rury na wielkość naprężeń skrajnych przy zginaniu konstrukcji po jej zewnętrznej i wewnętrznej stronie. Przedstawiono także metodykę obliczania odkształceń konstrukcji oraz sprawdzania stateczności konstrukcji w przypadku rur podatnych. Sposób ten stosuje się wtedy, gdy podane są wytrzymałości materiału konstrukcyjnego rury, czyli np. w przypadku rur azbestowo-cementowych, stalowych, lub z tworzyw sztucznych.

W przypadku rur kamionkowych, betonowych i innych, dla których przepisy nie stawiają wymagań co do wytrzymałości materiału, a określają w zamian minimalne obciążenia próbne, przydatny jest drugi sposób. Polega on na porównaniu granicznej nośności

rury określonej przez producenta lub wyznaczonej w wyniku badań laboratoryjnych względnie poligonowych, z rzeczywistymi obciążeniami. W pracy [1] przedstawiono problematykę nośności rur badanych laboratoryjnie oraz nośności rur ułożonych w gruncie.

Uwagi końcowe

Nowością prezentowanej w pracy [1] metodyki obliczeń jest zastosowanie metody stanów granicznych do projektowania konstrukcji rurowych oraz fakt uwzględnienia wszystkich wcześniej wymienionych czynników mających wpływ na obciążenia i siły wewnętrzne konstrukcji, w tym także technologii budowy kanału. Metodyka ta umożliwia zatem ekonomiczne projektowanie przewodów rurowych.

Do chwili obecnej nie opracowano w Polsce normy dotyczącej zagadnień obliczania obciążeń, sił wewnętrznych, naprężeń oraz nośności rurociągów i kanałów ułożonych w gruncie. Wprawdzie ukazał się projekt takiej normy [7], ale nie został on dopuszczony do stosowania z uwagi na szereg niedoskonałości i błędów. Prezentowana wyżej problematyka stanowi zatem podstawę do dyskusji nad kształtem polskiej normy dotyczącej obciążeń, sił wewnętrznych i nośności przewodów wodociagowych i kanalizacyjnych ułożonych w gruncie. Do chwili jej opracowania, podana w nim metodyka obliczeń może być stosowana w praktyce projektowej.

LITERATURA

1. A. KULICZKOWSKI: Obliczanie konstrukcji przewodów wodociagowych i kanalizacyjnych ułożonych w gruncie. Skrypt monograficzny, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 1988.
2. ATV — Arbeitsblatt A 127: Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungskanälen und — Leitungen. GFA, 1984.
3. ÖNORM B 2538, Teil 2: Statische Berechnung erdverlegter Rohrleitungen für Wasserversorgungsanlagen. 1 Entwurf 1981.
4. SIA 190: Kanalisationen. Schweizerischer Ingenieur — und Architektenverein, 1977.
5. PN — 66/B-02015: Mosty, wiadukty i przepusty. Obciążenia i oddziaływania.
6. W. NETZER: Statische Berechnung erdverlegter Rohrleitungen mit genormten Querschnitten. Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin — München — Düsseldorf, 1980.
7. PN/B-03270, projekt: Rurociągi podziemne i przepusty rurowe. Obciążenia w obliczeniach statycznych.

SOME PROBLEMS DEALT WITH IN THE CONSTRUCTING OF SEWER SYSTEMS

Taking into account the state-of-the-art in this country and abroad (and making use of the results of his own study), a new approach has been suggested by the author. Compared to the methods that are in use now, the one proposed here includes a number of contributing factors which have been neglected so far (interaction of the pipe-soil system with the effect of pipe rigidity and of the adjacent soil; effect of soil parameters (outside the excavation) on the structure loading; degree of soil consolidation, foundation of the pipe; type of shuttering; removal

of shuttering, etc). The advantages of substituting the system stiffness factor for the degree of stiffness according to Klein are pointed out. The contribution by the author is the method of calculating the effective loads exerted by vehicles. Including such factors as the type of vehicle, the height of the overburden, the diameter of the pipe and the type of soil, the method enables static calculations for rigid and non-rigid pipes of an arbitrary shape (circular, rectangular, ovoid and bell-formed). Since Polish standards for the calculation of loading and internal forces acting in the sewer structures are lacking, the method presented here should be recommended for application in design offices.