

Przepusty w infrastrukturze komunikacyjnej – cz. 7

■ prof. UZ dr hab. inż. Adam Wysokowski, kierownik Zakładu Dróg i Mostów, Uniwersytet Zielonogórski
■ mgr inż. Jerzy Howis, konstruktor, Infrastruktura Komunikacyjna sp. z o.o., Żmigród

Z biegiem lat sposoby obliczeń konstrukcji przepustów i innych obiektów inżynierskich ulegają ciągłym udoskonaleniom. Wynika to w głównej mierze z dopracowywania metod obliczeniowych oraz wprowadzania metod numerycznych. Nie bez wpływu na ten stan rzeczy ma również użycie nowych rodzajów konstrukcji i materiałów. Ich charakterystyczną cechą jest różny sposób zachowania się pod obciążeniem eksploatacyjnym.

1. Wprowadzenie

Dawniej konstruowano głównie przepusty zachowujące się w sposób sztywny, gdzie głównym elementem nośnym była sama rura osłonowa. Większość obecnie wykonywanych przepustów to konstrukcje współpracujące z gruntem, tym samym podatne. Wymagają one innego podejścia obliczeniowego, a metody te są obecnie szeroko wprowadzane do światowej i polskiej praktyki inżynierskiej. Należy nadmienić, że Polska w zakresie metod obliczeń należy do przodujących krajów na świecie. Wynika to z faktu, że wielu krajowych specjalistów poświęciło tym zagadnieniom w ostatnim dziesięcioleciu dużo uwagi, przeprowadzając liczne analizy teoretyczne, badania i nowatorskie wdrożenia.

W niniejszym artykule zostaną omówione najistotniejsze zagadnienia związane z tytułową tematyką. Z uwagi na obszerność zagadnienia, temat obliczeń konstrukcji przepustów autorzy podzielili na trzy spójne części:

Część I – *Ogólne zasady obliczeń*

Część II – *Metody obliczeń*

Część III – *Obliczanie przepustów metodami MES.*

Dla przypomnienia oraz dla nowych czytelników, poniżej przytoczono spis wszystkich artykułów na temat przepustów, które sukcesywnie od ponad roku ukazują się w kolejnych edycjach „Nowoczesnego Budownictwa Inżynierskiego” [1]:

1. ARTYKUŁ WPROWADZAJĄCY
2. ASPEKTY PRAWNE PROJEKTOWANIA, BUDOWY I UTRZYMANIA PRZEPUSTÓW
3. PRZEPUSTY TRADYCYJNE
4. PRZEPUSTY NOWOCZESNE
5. PRZEPUSTY JAKO PRZEJŚCIA DLA ZWIERZĄT
6. MATERIAŁY DO BUDOWY PRZEPUSTÓW – CZ. I, CZ. II.

Zgodnie z wcześniejszymi informacjami, do omówienia zostało jeszcze wiele istotnych zagadnień, takich jak: obliczanie przepustów w aspekcie hydrologiczno-hydraulicznym, badania materiałów, badania laboratoryjne, badania terenowe (w tym próbne obciążenia), posadowienie, wykonawstwo przepustów, wyposażenie przepustów, wyposażenie przejść dla zwierząt, stan techniczny i utrzymanie przepustów, przeglądy przepustów, uszkodzenia i awarie przepustów, wzmocnianie przepustów, przepusty kolejowe, przepusty pod pasami startowymi, przepusty nietypowe, przepusty zabytkowe, estetyka przepustów.

2. Informacje podstawowe dotyczące obliczeń przepustów komunikacyjnych

Zasadniczym problemem przy projektowaniu konstrukcji zagłębionych w gruncie jest wyznaczenie wielkości oraz rozkładu obciążeń działających na ich powierzchnię zewnętrzną. Według [17] trudności te wynikają z losowego i reologicznego charakteru czynników mających wpływ na pracę konstrukcji zagłębionej w ośrodku gruntowym.

Stosowane obecnie metody obliczeniowe różnią się od siebie, co może być przyczyną przewymiarowania i utrudnia weryfikację wyników. Ośrodek gruntowy nie stanowi jedynie obciążenia budowli, ale w odpowiednich warunkach również element przenoszący obciążenia. Efektem współpracy konstrukcji z gruntem jest poprawa rozkładu obciążeń, a co za tym idzie obciążenie rozkłada się równomiernie wokół przekroju, w wyniku czego momenty zginające przyjmują mniejsze wartości. Projektowanie obiektów zagłębionych w gruncie opiera się przede wszystkim na doświadczeniach zebranych przy projektowaniu wcześniej wykonanych konstrukcji. Wielkość i rozkład naprężeń od obciążeń zewnętrznych, a przede wszystkim od ciężaru gruntu znajdującego się nad konstrukcją zależy od sztywności przepustu [14].

Konstrukcje zagłębione w gruncie możemy podzielić na konstrukcje podatne oraz sztywne. Przy projektowaniu konstrukcji zagłębionej w gruncie zakłada się płaski stan odkształceń. Założenie to powoduje pewne uproszczenie, polegające na nieuwzględnianiu pracy rury w kierunku podłużnym. Nie jest to zgodne ze stanem faktycznym, ponieważ jest oczywiste, że konstrukcja pracuje również w kierunku podłużnym. Klasyk teorii sprężystości Gorbunow podaje, że wpływ pracy w kierunku podłużnym praktycznie nie odgrywa istotnej roli przy wymiarowaniu elementów o długości do 2,0 m [17].

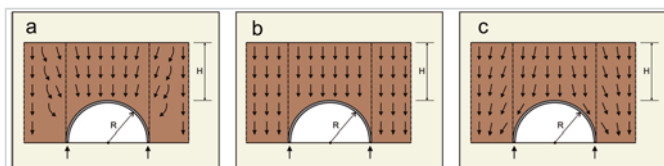
Rozróżnia się stałe i zmienne obciążenia działające na przepust. Obciążenie zmienne pochodzi od oddziaływania pieszych, pojazdów lub innego typu ruchu komunikacyjnego. Charakter tego obciążenia może być różny: skupiony, jak i rozłożony w sposób równomierny bądź nierównomierny. Obciążenie stałe pochodzi od gruntu znajdującego się wokół konstrukcji, a przede wszystkim od parcia naziomu na konstrukcję. Przy projektowaniu niejednorodność gruntu podlega ujednocnieniu, przyjmując przy tym odpowiednie normowe współczynniki bezpieczeństwa.

3. Zjawisko przesklepienia

Zjawisko przesklepienia występuje w momencie, gdy nad konstrukcją rury osłonowej i po jej bokach występuje przemieszczanie się gruntu. Zgodnie z [15] przesklepienie jest zjawiskiem redystrybucji obciążeń powłoki w wyniku powstania naprężeń stycznych, które przeciwstawiają się przemieszczeniom w masie gruntowej.

Powstało wiele teorii starających się wytłumaczyć zjawisko przesklepienia. Badania nad tym zagadnieniem zapoczątkował w 1882 r. Philipp Forchheimer, który zajmował się rozkładem ciśnienia gruntu nad konstrukcjami tuneli. Najbardziej powszechna jest teoria Karla Terzagiego. Rozważył on problem równowagi fragmentu gruntu umieszczonego pomiędzy dwiema pionowymi płaszczyznami poślizgu.

Zjawisko przesklepienia gruntu nabiera szczególnego znaczenia w pracy konstrukcji podatnych (ryc. 1). Polega ono na tym, że w wyniku deformacji kolumna gruntu znajdująca się nad obiektem, pod wpływem pionowych sił tarcia występujących na styku z kolumnami pobocznymi, ma stosunkowo małą możliwość przemieszczania się i utrzymuje równowagę z otaczającym gruntem. Pozytywnym skutkiem opisywanego zjawiska jest zwiększenie nośności konstrukcji. W odróżnieniu od przepustów podatnych, w konstrukcjach sztywnych obserwuje się przeciwne zjawisko, a mianowicie przesklepienie negatywne (ryc. 1a). Kolumna gruntu znajdującego się nad przepustem jest dociążana w wyniku tarcia na styku z zasypką znajdującą się poza konstrukcją. Spowodowane jest to różnicami osiadań gruntu wokół przepustu i bezpośrednio nad nim. Właśnie ze względu na to zjawisko obiekty sztywne posiadające tę samą geometrię co podatne są bardziej obciążone.



Ryc. 1. Zjawisko przesklepienia: a) negatywne przesklepienie b) brak przesklepienia c) pozytywne przesklepienie

4. Zasady obliczania przepustów sztywnych

Przepusty sztywne wykonuje się z takich materiałów, jak np. beton, żelbet, kamionka. Ułożone w gruncie praktycznie nie odkształcają się pod wpływem działającego na nie obciążenia. Brak współpracy przekroju powoduje silną koncentrację naprężeń w górnej i dolnej części rury. Taki rozkład sił występuje w szczególności, gdy grunt znajdujący się w bocznych strefach wykopu został słabo zagęszczony. Początkowo teorie obliczeniowe dotyczyły konstrukcji sztywnych wykonanych z betonu lub cegły, gdyż innych wówczas materiałów nie znano. Prekursorami tych badań byli Anson Marston i Merlin Spangler, którzy wyznaczyli przypadkowe parcie G gruntu na rurę sztywną ułożoną w wykopie (ryc. 2). Wypadkowe obciążenia gruntem G obliczono według wzoru [17]:

$$G = c\gamma B^2 \quad (1)$$

gdzie:

- B – szerokość wykopu
- γ – ciężar objętościowy gruntu
- c – współczynnik redukcyjny zależny od właściwości gruntu oraz od stosunku H/B

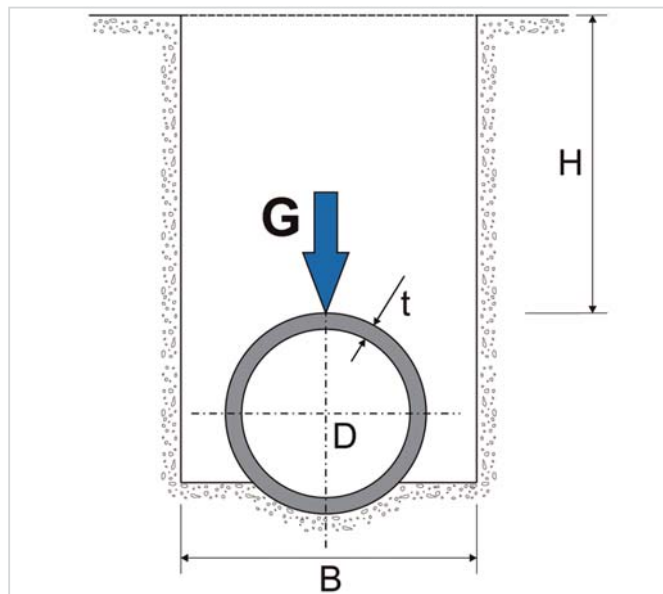
$$c = \frac{1 - \exp\left[-2\lambda_c \frac{H}{B} \operatorname{tg}\varphi\right]}{2\lambda_c \operatorname{tg}\varphi} \quad (2)$$

gdzie:

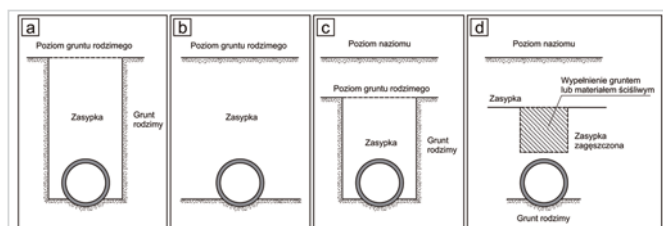
- $\lambda_c = \operatorname{tg}^2\left[\pi/4 - \phi/2\right]$ – równanie Rankina
- ϕ – kąt tarcia zewnętrznego
- φ – kąt tarcia pomiędzy gruntem zasypki a ścianą wykopu

Teoria Marstona – Spanglera opiera się na założeniu, że ciężar gruntu znajdującego się nad konstrukcją jest redukowany poprzez przesklepienie i jego część jest przekazywana na sąsiadujący grunt. Założenie to powoduje, że w niektórych przypadkach obciążenie przekazywane na przepust może być mniejsze niż ciężar gruntu zalegającego bezpośrednio nad nim.

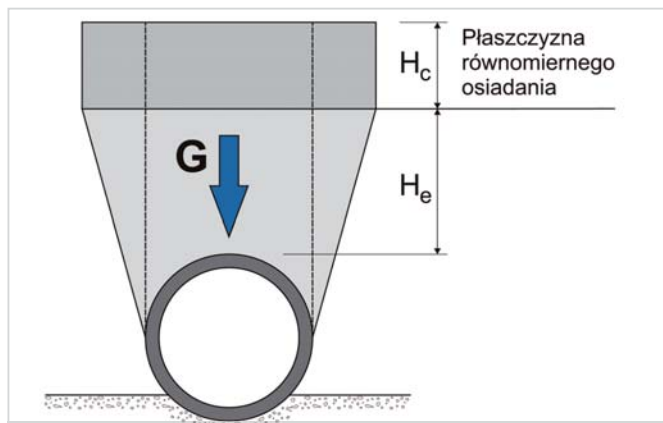
W innych przypadkach obciążenie konstrukcji różnie wskutek negatywnego przesklepienia, w którym obciążenie pochodzące od sąsiadującego gruntu jest przekazywane na grunt leżący bezpośrednio nad rurą osłonową [14].



Ryc. 2. Podstawowy schemat obliczeniowy dla rury sztywnej



Ryc. 3. Klasy przepustów według teorii Marstona – Spanglera [14]: a) przepust w rowie, b) przepust w wykopie otwartym, c), d) przepusty w wykopach nieidealnych



Ryc. 4. Kształt klina gruntu działającego na rurę sztywną

5. Sztywność przepustu

Sztywność przepustu (sztywność obwodowa) wyznacza się doświadczalnie. Wynikiem tego jest odporność na ugięcia obwodowe, uzyskane poprzez iloraz siły działającej na próbkę oraz jej długość. Wartość ugięcia określa się wzorem [14]:

$$S = \frac{F \times f}{L \times dv} \quad (3)$$

gdzie:

- S – sztywność przepustu
- F – siła działająca na jednostkę długości
- L – długość próbki

dv – ugięcie

f – współczynnik ugięcia zdeformowanego przepustu wyznaczony ze wzoru [11]:

$$f = 10^{-5} (1860 + 2500 \, dv/dm) \quad (4)$$

d_m – uśredniona średnica przepustu

Do projektowania przyjmuje się różne wartości sztywności obwodowej, w zależności od norm i zaleceń stosowanych w danym kraju. Normy ISO sztywność obwodową definiują następująco [14]:

$$S = \frac{EI}{d_m^3} \quad (5)$$

gdzie:

E – moduł sprężystości materiału, z którego wykonany jest przepust

I – moment bezwładności przekroju ścianki przepustu

Według [14] badanie sztywności obwodowej zgodnie z normą PN-EN ISO 9969 polega na ściskaniu próbki ułożonej między dwiema równoległymi płytami. Badanie wykonuje się na trzech próbkach o tej samej średnicy. Sztywność obwodową wyznacza się w kiloniutonach jako średnią arytmetyczną z obciążeń trzech próbek, korzystając z następującej zależności:

$$S_i = \frac{0,0186 + 0,025 \times Y_i \times F_i}{D_w \times L_i \times Y_i} \quad (6)$$

gdzie:

F_i – siła odpowiadająca 3% deformacji średnicy przewodu dla i -tej próbki [kN]

L_i – długość i -tej próbki [m]

D_w – średnica wewnętrzna [m]

Y_i – odkształcenie odpowiadające 3% ugięciu [m]

Często stosowanym kryterium do klasyfikacji przepustów ze względu na ich sztywność jest kryterium Kleina, które wyrażone jest następującą zależnością [14]:

$$n = \frac{E_g \times r_m^3}{E \times e^3} \quad (7)$$

gdzie:

E_g – moduł odkształcalności gruntu

E – moduł Younga materiału, z którego wykonany jest przewód

r_m – średni promień rury

e – grubość ścianki rury

W przypadku rur sztywnych przyjmuje się wartość $n < 1$.

Według norm niemieckich DIN sztywność obwodową wyznacza się z następującej zależności [26]:

$$S_R = \frac{EI}{r_m^3} \quad (8)$$

gdzie:

r_m – średni promień przewodu $r_m = (D_w + D_z)/2$

D_w – średnica wewnętrzna

D_z – średnica zewnętrzna

E – moduł sprężystości materiału, z którego wykonany jest przepust

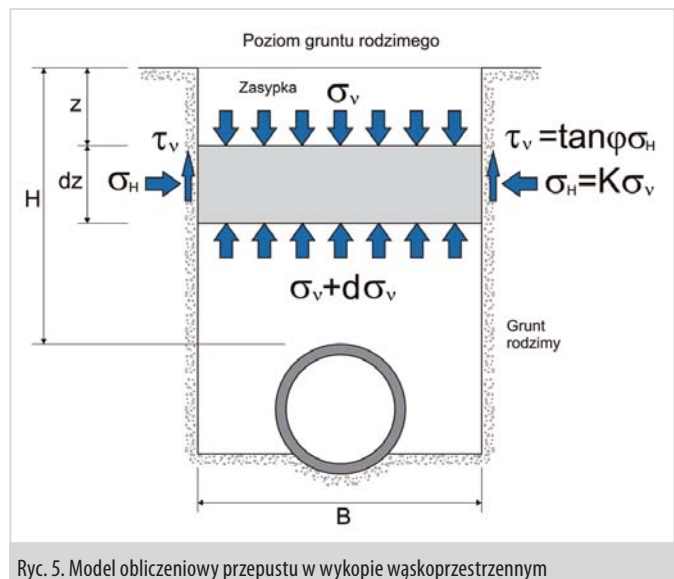
I – moment bezwładności przekroju ścianki przepustu

Tab. 1. Porównanie sztywności obwodowej SN według norm ISO i DIN [26]

SN [kN/m ²] wg ISO9969	SN [kN/m ²] wg DIN16961
2	7,6
4	15,2
6	22,8
8	30,4
10	38,0
15	57,0

5.1. Zasady obliczania przepustów sztywnych ułożonych w wykopie wąskoprzestrzennym

Twórcą tej teorii był w 1913 r. Anson Marston, bazując na teorii silosów Janssena. Wyodrębnił on element zasyпки, na którą działa siła ścinająca wywołana ciężarem gruntu.



Ryc. 5. Model obliczeniowy przepustu w wykopie wąskoprzestrzennym

Naprężenia ścinające τ_v , działające na obrzeżach wykopytu są proporcjonalne do naprężeń normalnych pionowych σ_v , na całej szerokości wykopytu:

$$\tau_v = K \times tg(\varphi) \times \sigma_v \quad (9)$$

gdzie:

σ_v – naprężenia normalne pionowe

φ – kąt tarcia wewnętrznej zasyпки

K – współczynnik parcia czynnego gruntu wyrażony zależnością:

$$K = tg^2 \times \left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) = \frac{1 - \sin(\varphi)}{1 + \sin(\varphi)} \quad (10)$$

Z tego wynika, że współczynnik tarcia pomiędzy zasypką a gruntem rodzimym jest równy $tg(\varphi)$. Pionowe i boczne naprężenia są naprężeniami głównymi, bez uwzględniania naprężeń ścinających. Ostatecznie siłę działającą na przepust wyznacza się następująco [17]:

$$W_c = C_D \times \gamma \times B^2 \quad (11)$$

gdzie:

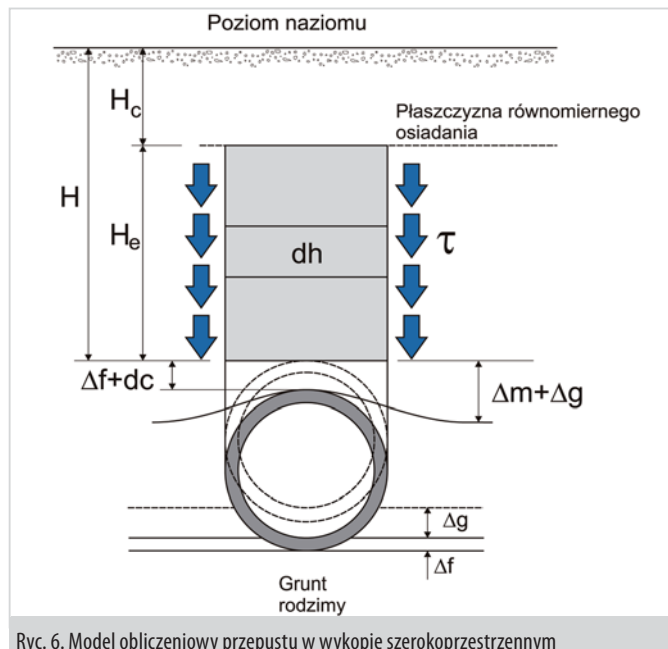
γ – ciężar zasyпки

B – szerokość wykopytu

C_D – współczynnik obliczeniowy

5.2. Zasady obliczania przepustów sztywnych ułożonych w wykopie szerokoprzestrzennym [14]

Marston wyprowadził równanie równowagi dla konstrukcji pracującej w wykopie całkowicie odsłoniętym (szerokoprzestrzennym). Naprężenia ścinające τ , działające w dół, powodują, że rura jest bardziej obciążona niż ciężar gruntu znajdującego się bezpośrednio nad nią. Sytuację tę pokazano na rycinie 6.



Ryc. 6. Model obliczeniowy przepustu w wykopie szerokoprzestrzennym

Obciążenie wyrażone jest zależnością:

$$W = C \times \gamma \times B^2 \tag{12}$$

gdzie:

- B – średnica zewnętrzna przewodu
- γ – kąt tarcia wewnętrznej zasypki
- C – współczynnik obliczeniowy:

$$C = \frac{e^{2K \times \gamma \times g(\varphi) \times \frac{H}{B}} - 1}{2K \times \gamma \times g(\varphi)} \tag{13}$$

Jeżeli rura osłonowa ułożona jest pod odpowiednio wysokim naziemem, naprężenia ścinające zanikają na pewnej głębokości nad przepustem, dla którego wielkość osiadania jest równomierna. Zjawisko to zachodzi, ponieważ nie występują przemieszczenia pomiędzy sąsiadującym gruntem, czego wynikiem jest brak sił ścinających w obrębie przepustu.

W przypadku gdy odległość od górnej krawędzi przepustu do poziomu płaszczyzny równomiernych osiadań (H_c) jest mniejsza niż wysokość nasypu, występuje tzw. płaszczyzna osiadań równomiernych. Jeżeli sytuacja jest odwrotna (czyli odległość H_c jest większa od wysokości nasypu), płaszczyzna osiadań równomiernych nie występuje, czyli przepust pracuje w warunkach wykopu całkowitego. Na całej wysokości H działają siły ścinające. Względne przemieszczenia, czyli ich kierunek oraz wielkość pomiędzy gruntem znajdującym się bezpośrednio nad przepustem (szary prostokąt na rycinie 6) a sąsiadującym gruntem, zależne są przede wszystkim od osiadań samego przepustu i gruntu przyległego do niego. Osiadanie to wyraża się tzw. współczynnikiem osiadań:

$$r_{sd} = \frac{(\Delta m + \Delta g) - (\Delta f + d_c)}{\Delta m} \tag{14}$$

gdzie:

- r_{sd} – współczynnik osiadań
- Δm – osiadanie powstałe od obciążenia gruntu bocznego
- Δg – osiadanie płaszczyzny gruntu rodzimego
- Δf – osiadanie podstawy przepustu
- d_c – różnica średnicy pionowej przepustu

Wyznaczenie wartości współczynnika osiadania jest niezwykle trudne, a wręcz niemożliwe. W konsekwencji jego wartość jest dobierana na podstawie obserwacji eksploatowanych obiektów.

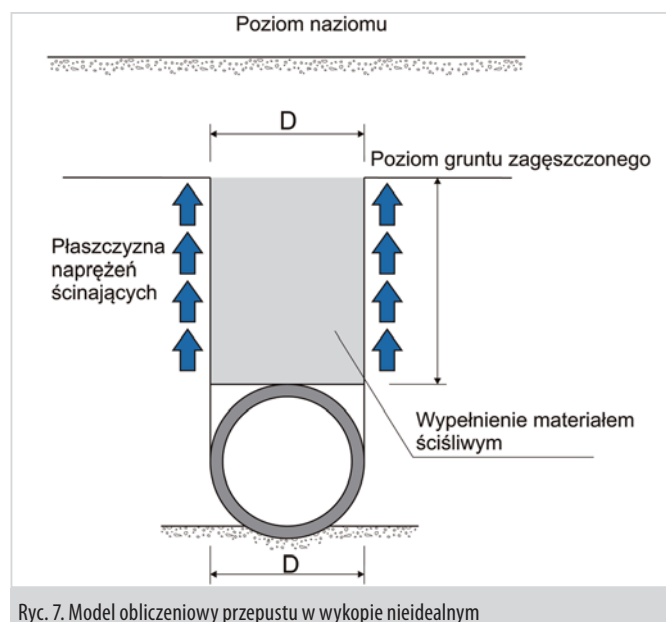
5.3. Zasady obliczania przepustów sztywnych ułożonych w wykopie nieidealnym [14]

Aby wyeliminować wzrost obciążenia na przepust odsłonięty, na który obciążenie było do 95% większe niż ciężar gruntu zalegającego nad przepustem, stworzono metodę obliczeń przepustu w wykopie nieidealnym. Według [14] celem tej metody jest spowodowanie większego osiadania wewnętrznej przyzmy gruntu w stosunku do przyzmy zewnętrznej, aby wytworzyć naprężenia ścinające, skierowane w górę wzdłuż boków przyzmy wewnętrznej. Dzięki temu zmaleje wynikowe obciążenie przepustu. Wzór określający obciążenia w wykopie:

$$W_c = C_N \times \gamma \times D^2 \tag{15}$$

gdzie:

- C_N – współczynnik obciążeniowy będący funkcją współczynnika określonego stosunkiem wysokości naziomu do szerokości wykopu i współczynnika osiadania r_{sd}
- D – średnica zewnętrzna przewodu
- γ – kąt tarcia wewnętrznej zasypki

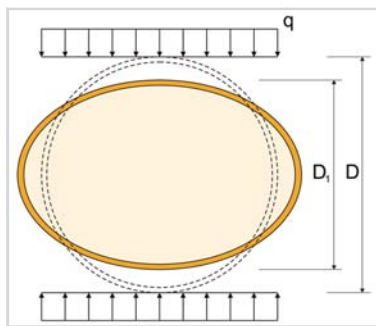


Ryc. 7. Model obliczeniowy przepustu w wykopie nieidealnym

6. Zasady obliczania konstrukcji przepustów podatnych

Przepusty podatne charakteryzują się małą sztywnością a tym samym skłonnością do dużych deformacji. Otoczone odpowiednio zaprojektowaną i ułożoną zasypką mają zdolność przenoszenia dużych obciążeń dzięki współpracy z gruntem.

Metody obliczeń stosowane przy projektowaniu rur sztywnych nie znajdują zastosowania przy projektowaniu konstrukcji z materiałów podatnych. W przypadku rur podatnych konieczne jest uwzględnienie udziału gruntu znajdującego się wokół przepustu



Ryc. 8. Schemat do analizy sztywności układu rura – ośrodek gruntowy

w przenoszeniu obciążeń. Miarą tej współpracy rury osłonowej z otaczającym gruntem jest stosunek deformacji pionowej przekroju obciążonej rury do pionowego odkształcenia przylegającej warstwy zasypki (ryc. 8) [14].

W przypadku gdy przekrój rury deformuje się bardziej niż warstwa gruntu, układ traktujemy jako podatny, czyli współpracujący, natomiast gdy występuje sytuacja odwrotna – jako sztywny, czyli niewspółpracujący.

Podatne konstrukcje przepustów projektuje się, sprawdzając stan graniczny użytkowania oraz stan graniczny nośności. Zniszczenie obiektu może być wynikiem uplastycznienia ścianki konstrukcji lub też jej wybozczeniem, czyli nadmierną deformacją, bądź też utratą nośności gruntu wokół konstrukcji – uszkodzeniem naziomu [9].

Przy projektowaniu przepustów podatnych stosuje się trzy główne kryteria projektowe: kryterium ugięcia, kryterium siły obciążającej ściankę przepustu, kryterium wybozczeniowe.

W tabeli 2 przedstawiono podstawowe założenia projektowe zależne od rodzaju sztywności [17].

Tab. 2. Podstawowe założenia projektowe zależne od rodzaju sztywności [17]

Rodzaj przepustu	Czynniki określające nośność	Charakterystyka statyczna układu	Dopuszczalne odkształcenia względne
SZTYWNE	Wytrzymałość materiału rury	Przepust stanowi samodzielny układ statyczny	~0%
PODATNE	Wytrzymałość materiału rury i wytrzymałość gruntu	Przepust i grunt stanowią współpracujący układ statyczny	> 0%

Rozkład obciążeń działających na rurę podatną charakteryzuje się dużą równomiernością, a rozkład sił wewnętrznych jest korzystny dla analizowanej konstrukcji. Wynikiem tego jest fakt, że ekstremalne momenty zginające znacznie się zmniejszają w odróżnieniu od rur sztywnych. Według [17] podstawą interakcji układu rura – grunt jest deformacja przekroju obciążonej budowli i odpowiadająca jej reakcja gruntu. Pod wpływem nacisków pionowych pierwotny przekrój kołowy przekształca się w elipsę, co wiąże się z powiększeniem średnicy poziomej przewodu. Odkształcenie się rury nie jest jednak procesem swobodnym, gdyż ośrodek gruntowy otaczający rurociąg ogranicza wielkość deformacji przekroju. Ograniczenie to jest tym większe, im sztywniejszy jest grunt w strefach bocznych rury, co zależy od rodzaju gruntu i stopnia jego zagęszczenia. Odpowiedzią na nacisk stref bocznych rury na grunt jest parcie bierne, czyli opór gruntu. Wartość odkształcenia zagłębionej rury z tworzyw sztucznych jest zatem zależna nie tylko od parametrów wytrzymałościowych materiału konstrukcyjnego, ale także od parametrów wytrzymałościowych otaczającego ją gruntu.

Parametry ośrodka gruntowego w przypadku konstrukcji podatnych są jednym z najistotniejszych elementów przy projektowaniu. Niezbędne do uwzględnienia, mające istotny wpływ na pracę konstrukcji są: wskaźnik zagęszczenia I_s , stopień zagęszczenia I_d , wskaźnik uziarnienia gruntu, stopień plastyczności, kąt tarcia wewnętrzznego, gęstość właściwa, gęstość objętościowa, porowatość, ściśliwość, zagęszczalność i wytrzymałość gruntu na ścinanie [11].

Stopień zagęszczenia I_d jest to stosunek zagęszczenia gruntu w stanie naturalnym do największego możliwego zagęszczenia, wyrażony wzorem [24]:

$$I_d = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} = \frac{\rho_d (\rho_d - \rho_{d min})}{\rho_d (\rho_d max - \rho_d min)} \quad (16)$$

gdzie:

- e_{max} – wskaźnik porowatości maksymalnej przy najluźniejszym ułożeniu ziaren gruntu suchego, któremu odpowiada $\rho_{d min}$
- e_{min} – wskaźnik porowatości minimalnej przy najluźniejszym ułożeniu ziaren gruntu suchego, któremu odpowiada $\rho_{d max}$
- e – porowatość naturalna, czemu odpowiada ρ_d

Zgodnie z zaleceniami [10] zasypka otaczająca rurę powinna mieć wskaźnik zagęszczenia większy bądź równy 0,95 w strefie bezpośrednio przy obiekcie, natomiast w pozostałej części większy bądź równy 0,98.

Kolejnym, ważnym parametrem jest kąt tarcia wewnętrzznego. Jest to parametr zależny od wymiaru ziaren i cząstek, a także ich kształtu, składu mineralnego oraz stopnia zagęszczenia. Jest on wyznaczany w warunkach laboratoryjnych przy użyciu aparatu bezpośredniego ścinania albo aparatu trójosiowego ścinania.

Moduł sieczny gruntu jest definiowany jako tangens nachylenia prostej łączącej na krzywej σ - ϵ gruntu punkt o współrzędnych 0,0 z punktem na krzywej odpowiadającym danej wielkości odkształcenia (naprężenia). Parametr ten jest również nazywany modułem podatności gruntu i zależy od modułu Younga oraz współczynnika Poissona. Moduł sieczny opisany jest wzorem:

$$E_s = \frac{E}{(1 - \nu^2)} \quad (17)$$

6.1. Zasady modelowania obciążeń przepustów podatnych

Przy projektowaniu konstrukcji podatnych należy wziąć pod uwagę wiele parametrów losowych, występujących przede wszystkim z uwagi na obciążenia statyczne, dynamiczne oraz wywołane eksploatacją.

Stosowane normy do modelowania konstrukcji posiadają wiele niedoskonałości i są ciągle modyfikowane w miarę ustalania nowych faktów podczas projektowania, a także dzięki obserwacji już istniejących konstrukcji.

Szczególnie niebezpieczna jest odpowiedź powłoki na boczne parcie gruntu zasypowego. Cienka konstrukcja bez wykonanej zasypki nie ma jeszcze właściwej nośności, którą osiągnie dopiero po pewnym czasie eksploatacji. I to właśnie faza robót związana z zasypywaniem jest największym problemem przy tego typu konstrukcjach. Wynika to z możliwości powstania wielu form wybozczenia i utraty stateczności. Konstrukcje podatne, podobnie jak inne obiekty inżynierskie, poddawane są działaniu obciążeń stałych i zmiennych. Obciążenia stałe pochodzą od gruntu otaczającego konstrukcję, a przede wszystkim od parcia naziomu na klucz konstrukcji. Obciążenia zmienne

to obciążenia drogowe lub kolejowe, ustalone zgodnie z obowiązującymi normami. Oczywiście, grunt znajdujący się wokół konstrukcji jest niejednorodny, ale do obliczeń zostaje on ujednolicony. Obciążenia użytkowe konstrukcji przepustów dzielą się na trzy podstawowe kategorie zależne od rodzaju infrastruktury: drogowe obciążenia użytkowe, kolejowe obciążenia użytkowe, obciążenia użytkowe ruchem lotniczym.

Przy obliczeniach statycznych przepustów trzeba uwzględnić działanie następujących obciążeń i wpływów:

- ciężar własny przepustu oraz (jeśli jest niekorzystny) ciężar przepływającej wody przez przepust,
- parcie zasyпки wywołane jej ciężarem oraz obciążeniem ruchomym (użytkowym) ustawionym na naziemiu,
- wpływ odkształceń przepustu,
- wpływ nierównomiernych osiadań przepustu,
- wpływ sił działających wzdłuż osi przepustu (np. składowych sił od osiadania zasyпки oraz składowych obciążeń pionowych przy przepustach w spadku podłużnym),
- obciążenie wywołane tzw. nadsypką, czyli gruntem, którym zasypano wykop niezbędny do wbudowania przepustu,
- hamowanie,
- obciążenie nawierzchnią i urządzeniami pomocniczymi drogi.

6.2. Reologiczne właściwości układu rura – ośrodek gruntowy w przypadku przepustów podatnych [17]

Badania przepustów ułożonych i eksploatowanych przez wiele lat w ośrodku gruntowym wykazały, że istniała możliwość przyłożenia większego obciążenia nad konstrukcją niż zakładano pierwotnie. Stwierdzono, że obciążenia działające na rurę zmieniły swój rozkład. Obciążenie wyrównało się wokół przekroju rury osłonowej, co wpłynęło korzystnie na pracę całej konstrukcji. Jednak określenie rezerwy nośności, wynikającej ze zmian parametrów gruntu, wymaga bardzo wnikliwej analizy procesów zachodzących podczas zasypywania rury i do tej pory jest zjawiskiem dokładnie nierozpoznanym.

Gruntami zalecanymi przy zasypywaniu są piaski grube i średnie, ponieważ charakteryzują się one bardzo dobrymi parametrami, mającymi znaczenie przy pracy tego typu konstrukcji. Przy właściwym zagęszczeniu grunty te nie zmniejszają swojej objętości pod wpływem działających obciążeń, charakteryzują się dużym tarcieniem wewnętrznym oraz brakiem spójności. W momencie występowania drgań wywołanych dynamiką, czyli obciążeniem od pojazdów oraz wszelkiego rodzaju urządzeń mechanicznych, może wystąpić całkowity brak tarcia

wewnętrznego, po czym ośrodek gruntowy będzie charakteryzował się właściwościami cieczy lepkiej (by uniknąć takiego zjawiska, grunty piaszczyste są szczególnie zalecane ze względu na znaczną przesiąkliwość). Mimo tak dobrych właściwości, zjawiska reologiczne obserwowane są także w takich gruntach, jak piasek suchy.

Już w latach 60. zaczęto analizować zjawiska reologiczne prowadzące do korzystnej zmiany rozkładu obciążeń działających na rurę sztywną. Rozpatrywano pracę rury w dwóch fazach, a mianowicie: faza I – bezpośrednio po zasypaniu konstrukcji w wykopie, gdy występują naprężenia styczne wskutek tarcia między gruntem a ścianami wykopu oraz pomiędzy zasypką a powierzchnią zewnętrzną rury (ryc. 9). W tej fazie obciążenia są najbardziej niekorzystne dla pracy przewodu.

W fazie II, w której nie występują już naprężenia, ścinająco działa jedynie ciśnienie radialne. W tejże fazie następuje odtworzenie się naturalnej struktury gruntu, czyli grunt rodzimy oraz ten użyty do zasypywania wykopu można potraktować jako materiał jednorodny. Powstaje strefa znajdująca się wokół przewodu, w której parcie gruntu zmienia swój kierunek na radialny (ryc. 9). Równanie opisujące przebieg linii ograniczającej tę strefę ma następującą postać:

$$h_{\alpha} = R \times \left[\left(\frac{1}{A} \times \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha \right)^{-0.5} - 1 \right] \quad (18)$$

gdzie:

h_{α} – rzędna linii ograniczającej strefę

R – promień rury

$A = 1,0 - 4,0$ – współczynnik zależny od właściwości gruntu

Wartość radialnego parcia gruntu p_r działającego na powierzchnię zewnętrzną rury opisuje wzór:

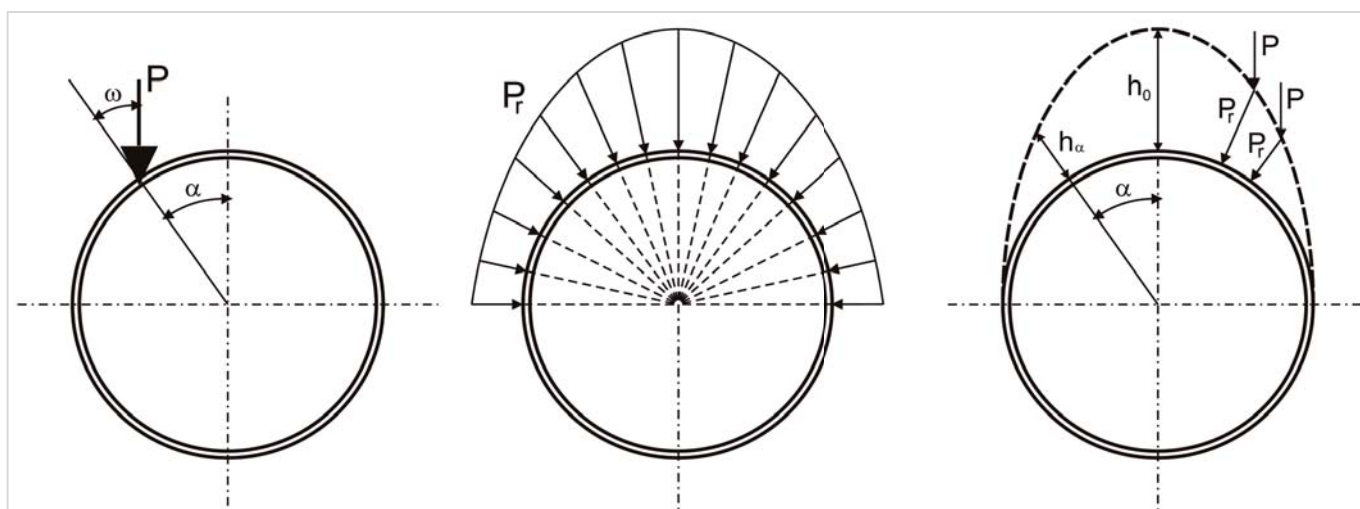
$$p_r = \frac{\gamma \times H}{A \times (A^{-1} \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha)^{1.5}} \times \chi \quad (19)$$

gdzie:

γ – ciężar objętościowy gruntu

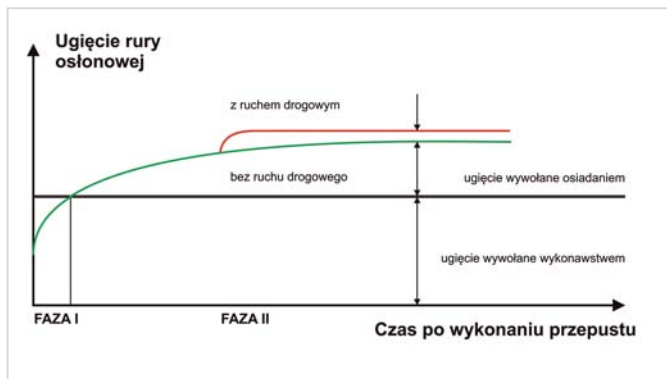
H – grubość warstwy nad rurą

χ – współczynnik redukcji zależny od właściwości gruntu, uwzględniający rozkład obciążeń wokół przekroju (0,38–1,0)



Rys. 9. Obciążenia działające na rurę ułożoną w gruncie w fazie I oraz w fazie II [17]

W przypadku rur z tworzyw sztucznych zjawiska reologiczne przejawiają się również w zmianach właściwości materiałów konstrukcyjnych w czasie. W obiektach z tworzyw termoplastycznych są one dobrze rozpoznane. Należą one do grupy materiałów o właściwościach lepkosprężystych. W termoplastach zachodzą takie zjawiska, jak pełzanie i relaksacja. Dzięki temu po pewnym czasie następuje zatrzymanie się deformacji obciążonego przewodu i zmniejszenie się naprężeń w ściankach rury, co zapobiega powstawaniu uszkodzeń. Następuje stabilizacja rury w ośrodku gruntowym. Stabilizacja ta jest przyspieszona na skutek oddziaływania wielu czynników, jak drgania i obciążenia dynamiczne, a także od ciężaru gruntu. Na rycinie 10 pokazano zmiany ugięcia rury podatnej w czasie.



Ryc. 10. Zmiany ugięcia rury podatnej w czasie [8]

6.3. Stosowane modele obliczeniowe przy wyznaczaniu sił wewnętrznych w konstrukcji przepustów

Aby zamodelować konstrukcję umieszczoną w gruncie, należy odwzorować stan rzeczywisty elementu, jak również

jego otoczenie. Prawidłowe zamodelowanie w dużej mierze zależy od przewidywanej metody rozwiązania zadania. Istnieje wiele czynników, które należy uwzględnić na wstępnym etapie wyboru metody obliczania: geometrię, materiał, a przede wszystkim obciążenia. Problem można rozwiązać analitycznie bądź numerycznie, analizując konstrukcję statycznie i dynamicznie.

Przepust może być wykonany z materiału izotropowego, którego właściwości są takie same we wszystkich kierunkach, bądź anizotropowym, którego własności mogą się różnić.

Modelowanie materiału sprowadza się z reguły do dwóch zagadnień: modelowania fizycznego typu materiału oraz przyjęcia parametrów fizycznych do opisu modelu. Klasyycznym sposobem modelowania fizycznego typu materiału jest opisanie rzeczywistych zależności pomiędzy naprężeniami i odkształceniami w momencie, gdy materiał jest obciążony. Możemy mieć do czynienia z modelem liniowo lub nieliniowo-sprężystym, sprężysto-plastycznym, a także lepkosprężystym. Natomiast przyjęcie parametrów fizycznych wiąże się z określeniem cech fizycznych modelowanego materiału. Do stałych fizycznych należą takie parametry, jak współczynnik Poissona, moduł sprężystości, współczynnik rozszerzalności cieplnej, odkształcenia graniczne itp. Zwykle do obliczeń stosuje się najprostszy model liniowo-sprężysty.

Przyjmowanie nieliniowej funkcji naprężeń spowoduje skomplikowanie obliczeń, a co za tym idzie zwiększenie wymagań sprzętu stosowanego do analiz.

Faktem jest, że uproszczenia te przestają być praktyczne, gdy dotyczą nośności granicznej. W przypadku konstrukcji betonowych materiał ten traktuje się jako izotropowy, czyli jednorodny. Efekty reologiczne zostają uwzględnione na podstawie obowiązujących norm, wykorzystując modele uproszczone [43].

Modelowanie obciążeń działających na konstrukcję polega na odzwierciedleniu obciążeń rzeczywistych.

Obciążenia w postaci sił skupionych, modelujących pojazdy samochodowe lub kolejowe oraz obciążeń równomiernie rozłożonych definiowanych w mostowych normach obciążeniowych.

W przypadku obciążeń obiektów mostowych należy uwzględnić wszystkie rodzaje obciążeń, które podaje norma PN-85/S-10030 [25]. Przy projektowaniu przepustów należy brać pod uwagę także mającą wkrótce obowiązywać normę europejską dotyczącą obciążeń, a mianowicie PN-EN 1991 *Oddziaływania na konstrukcje*.

Modele obliczeniowe są podstawowym ele-

Tab. 3. Założenia projektowe dla różnych typów rur umieszczonych w gruncie [8]

Schemat	SZTYWNE	PÓL-SZTYWNE	ELASTYCZNE
Rozkład naprężeń			
Czynniki określające wytrzymałość układu	Wytrzymałość materiału rury osłonowej	Odporność na naprężenia rury oraz sztywność gruntu	Sztywność obwodowa rury oraz sztywność gruntu
Charakterystyka statyczna układu	Rura stanowi samodzielny układ statyczny		Rura i grunt stanowią układ statyczny
Możliwość przenoszenia odkształcenia względnego	~ 0 %	~ 0,5 %	> 5 %
Przykłady materiałów rur osłonowych	Beton, żelbet, polimerobeton, ceramika	Stal, aluminium, GRP	PE, PP, PEHD, PCV
Kryteria projektowe	Naprężenia	Naprężenia oraz odkształcenia względne	Ugięcie i stabilność

mentem potrzebnym do projektowania konstrukcji, a w efekcie do wyznaczenia rozkładu sił wewnętrznych, deformacji obiektu, a także do analizy przepustu pod względem dynamicznym.

W tabeli 3 przedstawiono podstawowy schemat, który pokazuje główne różnice w założeniach do projektowania rur różnych typów: sztywne, półelastyczne i elastyczne [8].

7. Podsumowanie

Pełne podsumowanie na temat obliczeń konstrukcji przepustów autorzy planują zamieścić po całościowym przedstawieniu tytułowego zagadnienia, czyli na zakończenie części trzeciej. Niemniej jednak już obecnie, bazując na przedstawionych w artykule zagadnieniach, można zauważyć dużą różnicę w zachowaniu się konstrukcji sztywnych w stosunku do konstrukcji podatnych współpracujących z gruntem. Znajduje to swoje odbicie również w coraz liczniejszych metodach obliczeń tego typu konstrukcji. Uwzględniają one bądź pomijają wiele parametrów. Dlatego też zagadnienia te wymagają szerszego omówienia w kolejnych artykułach. Jest to tym istotniejsze, że obserwuje się – o czym wspomniano już we wstępie – stałe udoskonalanie metod obliczeń, które stosunkowo szybko wdrażane są do krajowej praktyki inżynierskiej.

TRADYCYJNIE ZAPRASZAMY DO ZAPOZNANIA SIĘ Z NASTĘPNYM ARTYKUŁEM, KTÓRY ZOSTANIE ZAMIESZCZONY W KOLEJNYM NUMERZE „NOWOCZESNEGO BUDOWNICTWA INŻYNIERYJNEGO” I BĘDZIE STANOWIŁ KONTYNUACJĘ TEMATYKI PODJĘTEJ W NINIEJSZYM ARTYKULE.

Literatura

- Wysokowski A., Howis J.: *Przepusty w infrastrukturze komunikacyjnej – cz. 1. Artykuł wprowadzający*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynierskie” 2008, nr 2 (17), s. 52–56; cz. 2. *Aspekty prawne projektowania, budowy i utrzymania przepustów*, nr 3 (18), s. 68–73; cz. 3. *Przepusty tradycyjne*, nr 4 (19), s. 54–59; cz. 4. *Przepusty nowoczesne*, nr 5 (21), s. 84–88; cz. 5. *Przepusty jako przejścia dla zwierząt*, 2009, nr 1 (22), s. 70–75; cz. 6. *Materiały do budowy przepustów – cz. I*, nr 3 (24), s. 99–104; cz. II., nr 5 (26), s. 36–43.
- Antoniszyn G.: *Mostowe konstrukcje gruntowo-powłokowe. Siły wewnętrzne w powłokach mostów gruntowo-powłokowych typu SUPER-COR*. „Geoinżynieria. Drogi, Mosty, Tunele” 2008, nr 3.
- Bęben D., Mańko Z.: *Problemy projektowe i wykonawcze związane z gruntowo-stalowymi obiektami mostowymi*. „Geoinżynieria. Drogi, Mosty, Tunele” 2009, nr 1.
- Bęben D., Mańko Z.: *Mosty, przepusty i tunele: obiekty wykonywane jako konstrukcje gruntowo-stalowe (projektowanie, budowa, badania)*. Materiały konferencyjne VII Międzynarodowej Konferencji INŻYNIERIA 2009, Tomaszowice, czerwiec 2009.
- Biblioteka Systemu Gospodarki Mostowej 3.0. Instrukcja opisu przepustów*. GDDP – IBDiM. Wrocław 1996.
- Czudek H., Radomski W.: *Podstawy mostownictwa*. PWN. Warszawa 1974.
- Frydrychowska K., Kosińska K.: *Metody wzmacniania przepustów komunikacyjnych*. Praca magisterska w specjalności drogowo-mostowej wykonana pod kierunkiem prof. UZ A. Wysokowskiego. Uniwersytet Zielonogórski. Zielona Góra 2009.
- Janson L., Molin J.: *Projektowanie i wykonawstwo sieci zewnętrznych z tworzyw sztucznych*. Wavin Metalplast-Buk. Buk 2007.
- Janusz L., Madaj A.: *Obiekty inżynierskie z blach falistych. Projektowanie i wykonawstwo*. WKŁ. Wrocław 2007.
- Jasiński W., Łęgosz A., Nowak A., Pryga-Szulc A., Wysokowski A.: *Zalecenia projektowe i technologiczne dla podatnych drogowych konstrukcji inżynierskich z tworzyw sztucznych*. GDDKiA – IBDiM. Żmigród 2006.
- Katalog konstrukcji przepustów i przejść dla zwierząt w infrastrukturze komunikacyjnej firmy Hobas*. Raport nr R/01708/W. Infrastruktura Komunikacyjna sp. z o.o. Żmigród, czerwiec 2008.
- Kaufman S.: *Analysis of elliptical rings for monocoque fuselages*. “Journal of the Aeronautical Sciences” 1958, vol. 2.
- Kolonko A., Madryas C.: *Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe prefabrykowanych rur betonowych*. Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej. Raport serii SPR 11/2004. Wrocław 2004.
- Kunecki B.: *Zachowanie się ortotropowych powłok walcowych w ośrodku gruntowym pod statycznym i dynamicznym obciążeniem zewnętrznym*. Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska. Wrocław 2006.
- Machelski C.: *Modelowanie mostowych konstrukcji gruntowo-powłokowych*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław 2008.
- Madaj A.: *Wpływ zasyпки na nośność i trwałość konstrukcji podatnej z blach falistych*. „Materiały Budowlane” 2009, nr 4.
- Madryas C., Kolonko A., Wysocki L.: *Konstrukcje przewodów kanalizacyjnych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2002.
- Madryas C.: *Uwagi o obliczeniach statyczno-wytrzymałościowych przewodów przepustów*. Referat wygłoszony podczas VIII Żmigrodzkiej Świątecznej Drogowo-Mostowej Sesji Naukowej. Żmigród 2007.
- Obliczenia rurociągów. Obliczenia przewodów z tworzyw sztucznych*. Pipelife Polska SA, 2008.
- Pettersson L.: *Full scale tests and structural evaluation of steel flexible culverts with low height of cover*. Rozprawa doktorska, Division of Structural Design and Brigdes. “TRITA-BKN Bulletin” 2007, vol. 93.
- Rowińska W., Wysokowski A., Pryga A.: *Zalecenia projektowe i technologiczne dla podatnych konstrukcji inżynierskich z blach falistych*. GDDKiA – IBDiM. Żmigród 2004.
- Sawicki W.: *Wyznaczanie sił wewnętrznych w stalowej konstrukcji podatnej nowoczesnego przepustu z blach falistych*. Praca magisterska w specjalności drogowo-mostowej wykonana pod kierunkiem prof. UZ A. Wysokowskiego. Uniwersytet Zielonogórski. Zielona Góra 2006.
- Vaslestad J.: *Soil structure interaction of buried culverts*. Rozprawa doktorska, Institutt For Geoteknikk, Universitetet I Trondheim 1990.
- PN-81/B – 0320 *Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie*.
- PN-85/S – 10030 *Obiekty mostowe – obciążenia*.
- PN-EN ISO 9969:1997 *Rury z tworzyw termoplastycznych – oznaczanie sztywności obwodowej*.
- Materiały ze stron WWW.

