

*Kornel Frydrych**

BADANIA NAD WPŁYWEM WSPÓŁCZYNNIKA PODATNOŚCI PODŁOŻA NA NOŚNOŚĆ OBUDOWY WYROBISKA PODZIEMNEGO

1. Wstęp

W obliczeniach projektowych konstrukcji inżynierskich można wyodrębnić dwa zasadnicze etapy:

- 1) obliczanie sił wewnętrznych przy założeniu obciążeń obliczeniowych,
- 2) określenie wymiarów projektowych dla obliczonych uprzednio wartości sił wewnętrznych w przekrojach niebezpiecznych.

Cechą wyróżniającą obudowy wyrobisk podziemnych (w tym tuneli) jest to, że obudowy te współpracują z górotworem, tzn. na kontakcie obudowy i górotworu powstają przemieszczenia, powodujące zaistnienie sił, które działają oprócz aktywnego parcia górotworu. Siły te zwane są odporem górotworu (zwykle: odporem sprężystym górotworu). Istnienie odporu sprężystego górotworu poważnie zwiększa nośność obudowy.

2. Wpływ odporu sprężystego górotworu na projektowany rozstaw odrzwi obudowy łukowej

Rozważmy zatem przykład obudowy łukowej podatnej z odrzwi czteroczęściowych posadowionych na stopach podporowych (ŁP10/V36/A), dla przypadku wykładki niestarannej ($E_z = 1,5$ MPa) i wykładki scalonej betonem natryskowym ($E_z = 40$ MPa).

Dane wyjściowe:

- szerokość wyrobiska przy spągu: $s_o = 550$ cm,
- głębokość zalegania wyrobiska: $H = 800$ m,
- współczynnik zwięzłości skał: $f = 3$.

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Wartość obciążenia $q_o = 0,17 \text{ MPa} = 170 \text{ kN/m}^2$ dla podanych wartości wyjściowych odczytano z nomogramu opracowanego przez b. OBR BG Budokop [9].

Dla umownego rozstawu łuku $d = 1,0 \text{ m}$ otrzymuje się obciążenie obudowy (na podstawie długości łuku) $q'_o = 170 \text{ kN/m}$.

Dla kształtownika V36 wykonanego ze stali 34GJ dobrano z normy PN-H-93441-1:1994 odpowiadające wielkości własności stali:

- granica plastyczności stali: $R_e = 340 \text{ MPa}$,
- wytrzymałość stali na rozciąganie: $R_m = 550 \text{ MPa}$.

Wielkości statyczne dla kształtownika V36 wg PN-H-93441-3:1994:

- promień bezwładności: $i_x = 4,58 \text{ cm}$,
- wskaźnik wytrzymałości: $W_x = 136,5 \text{ cm}^3$,
- pole powierzchni przekroju: $A = 45,7 \text{ cm}^2$.

Obliczenie wytrzymałości obliczeniowej stali f_d :

$$f_d = \frac{R_e}{\gamma_s} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

gdzie γ_s oznacza współczynnik materiałowy stali zależny od R_e ($\gamma_s = 1,15$ dla $R_e \leq 355 \text{ MPa}$ wg PN-90/B-03200)

$$f_d = \frac{340}{1,15} = 295,65 \text{ [MPa]} \quad (2)$$

Obliczenie smukłości odrzwi [9]:

$$\lambda = \frac{50 \cdot l}{i_x} = \frac{50 \cdot 3,70}{4,58} = 40,39 \quad (3)$$

Przy czym długość osi nie podpartej części odrzwi $l = 3,70 \text{ m}$ [9].

Dla wytrzymałości obliczeniowej stali $f_d = 295,65 \text{ MPa}$ dobrano smukłość porównawczą pręta λ_p wg PN-90/B-03200:

$$\lambda_p = 84 \sqrt{\frac{215}{f_d}} = 71,63 \quad (4)$$

oraz smukłość względną $\bar{\lambda}$:

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_p} = 0,564 \quad (5)$$

Współczynnik wybocheniowy φ dla obliczonej smukłości względnej wynosi [4]:

$$\bar{\lambda} = 0,564 \Rightarrow \varphi = 0,828$$

Obliczenie współczynnika n_1 :

$$n_1 = \frac{R_m - R_e}{R_e} = 0,618 \quad (6)$$

Z odpowiednich nomogramów [9] odczytano moment zginający M wywołany działaniem obciążenia $q_o = 100$ kN/m oraz wartość siły osiowej N wywołanej działaniem obciążenia $q_o = 100$ kN/m.

Wartość momentu ekstremalnego obliczono ze wzoru:

$$M_{ekstr} = M \cdot \frac{q'_o}{q_o} \quad (7)$$

a wartość odpowiadającej siły osiowej ze wzoru:

$$N_{odp} = N \cdot \frac{q'_o}{q_o} \quad (8)$$

Rozstaw odrzwi ustalono ze wzoru:

$$d = \frac{f_d \cdot (m + n_1)}{\left(\frac{M_{ekstr}}{W_x} + \frac{N_{odp}}{A \cdot \varphi} \right)} \cdot m_1 \quad (9)$$

gdzie:

m — współczynnik uwzględniający kształt kształtownika (dla kształtowników typu V, $m = 1,4$),

m_1 — współczynnik warunków pracy obudowy, zaleca się przyjmować $m_1 = 1,5$.

Obliczone wartości zestawiono w tabeli 1.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń można zauważyć, jak bardzo odpór sprężysty wpływa na projektowany rozstaw odrzwi obudowy: dla przypadku obudowy łukowej z wykładką scaloną betonem natryskowym obliczony rozstaw odrzwi jest ponad dwa razy większy niż w przypadku obudowy z wykładką niestaranną (brak odporu sprężystego lub jego ograniczone działanie).

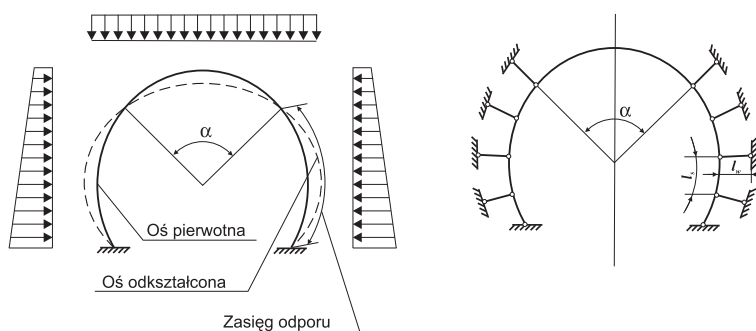
TABELA 1

Wyniki obliczeń rozstawu obudowy dla przypadku wykładki niestarannej i scalonej

Rodzaj wykładki	M , kN·m	M_{ekstr} , kN·m	N , kN	N_{odp} , kN	d , m
niestaranna ($E_z = 1,5$ MPa)	55,5	94,35	133	226,1	0,53
scalona betonem natryskowym ($E_z = 40$ MPa)	21,5	36,55	108,5	184,0	1,25

3. Odpór sprężysty górotworu w ujęciu normy PN-G-05020:1997

Zaobserwowane fakty spowodowały, że zgodnie ze stosowaną obecnie normą PN-G-05020:1997 w obliczeniach sił wewnętrznych należy uwzględnić odpór sprężysty górotworu. Obudowy sklepione należy obliczać jako konstrukcje łukowe, ramowo-łukowe lub pierścieniowe, współpracujące z otaczającym górotworem. Współpracę górotworu z obudową należy uwzględnić, przyjmując w schemacie statycznym ciągłe lub punktowe sprężyste rozparcia (wahacze). Rozparcia te należy przyjmować w odcinkach obwodu obudowy, w których oś odkształcona ustroju podstawowego statycznie wyznaczalnego przemieszcza się jak na rysunku 1. Współpracę z górotworem można pominąć w skałach ciekłych (kurzawkowych) i mało spoiowych.

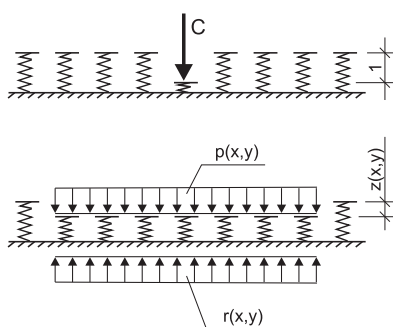


Rys. 1. Schemat statyczny do obliczeń sił wewnętrznych (PN-G-05020:1997)

Odpór sprężysty górotworu w ujęciu normy PN-G-05020:1997 opiera się na koncepcji sprężystego podłoża według Winklera, która jest wykorzystywana w obliczeniach belek na sprężystym podłożu.

Wyobraźmy sobie belkę podpartą na całej swej długości w małych równych odstępach jednakowymi sprężynami. Gdy taką belkę obciążymy, to podpory sprężyste ugną się, a ich ugięcie, które jest zarazem ugięciem belki w przekroju nad sprężyną, jest proporcjonalne do

nacisku na sprężystą podporę, a więc również do reakcji tej podpory. Gdy odstępy podpór maleją, a ich liczba rośnie, przy czym sprężyny nie przestają działać niezależnie, czyli nie zaczepiają o siebie nawzajem, to można je zastąpić ciągłym podłożem sprężystym. Takie podłoże nazywane jest podłożem Winklera (por. [3]). Jest to oczywiście podłoże fikcyjne, gdyż w podłożach rzeczywistych ugięcie każdego obranego przekroju belki jest zależne nie tylko od reakcji podłoża pod tym przekrojem, ale także od reakcji sąsiednich i dalszych części podłoża. Ugięcie bowiem podłoża w pewnym miejscu nie jest możliwe bez odkształceń części sąsiadujących, tak jak przyjęto to w podłożu Winklera. Cechy sprężyste tego modelu podłoża określone są jednym parametrem (rys. 2), zwanym współczynnikiem podatności podłoża — jest to naprężenie wywołujące jednostkowe przemieszczenie powierzchni elementarnej.



Rys. 2. Model sprężystego podłoża według Winklera [8]

Przy obciążeniu podłoża powstaje w nim stan naprężeń określony wzorem [8]:

$$r(x, y) = C \cdot z(x, y) \quad (10)$$

gdzie:

$r(x, y)$ — stan naprężeń wywołany obciążeniem podłoża,

$z(x, y)$ — stan przemieszczeń płaszczyzny posadowienia,

C — współczynnik podatności podłoża.

Z równania (10) wynika, że współczynnik C jest wyrażony wzorem:

$$C = \frac{p(x, y)}{z(x, y)} \quad (11)$$

gdzie:

C — współczynnik podatności podłoża, MN/m (MPa/m),

$p(x, y)$ — obciążenie podłoża, MPa,

$z(x, y)$ — ugięcie (przemieszczenie) podłoża, m.

Wartość sztywności ściskania wahaczy (rys. 1) zgodnie z PN-G-05020:1997 należy obliczać ze wzoru:

$$D_w = (EF)_w = \frac{E_g}{1 + \nu_g} \frac{l_w \times l_s}{r_w} \quad (12)$$

w którym:

- D_w — sztywność ściskania wahaczy, MN,
- E_g — współczynnik sprężystości górotworu, MPa,
- ν_g — liczba Poissona górotworu,
- r_w — promień wyrobiska w wyłomie, m,
- l_s — odległość wahaczy, m,
- l_w — długość wahacza, m.

Wzór ten został wyprowadzony na podstawie analizy tarczy sprężystej z obudowanym otworem obciążonym ciśnieniem równomiernym na obwodzie otworu.

Sposób zaproponowany przez normę posiada dwie zasadnicze wady:

- 1) nie uwzględnia wpływu konstrukcji obudowy na wartość współczynnika podatności podłoża,
- 2) nie uwzględnia zmienności wartości współczynnika podatności podłoża wynikającej ze zmienności promienia wyrobiska w wyłomie (r_w).

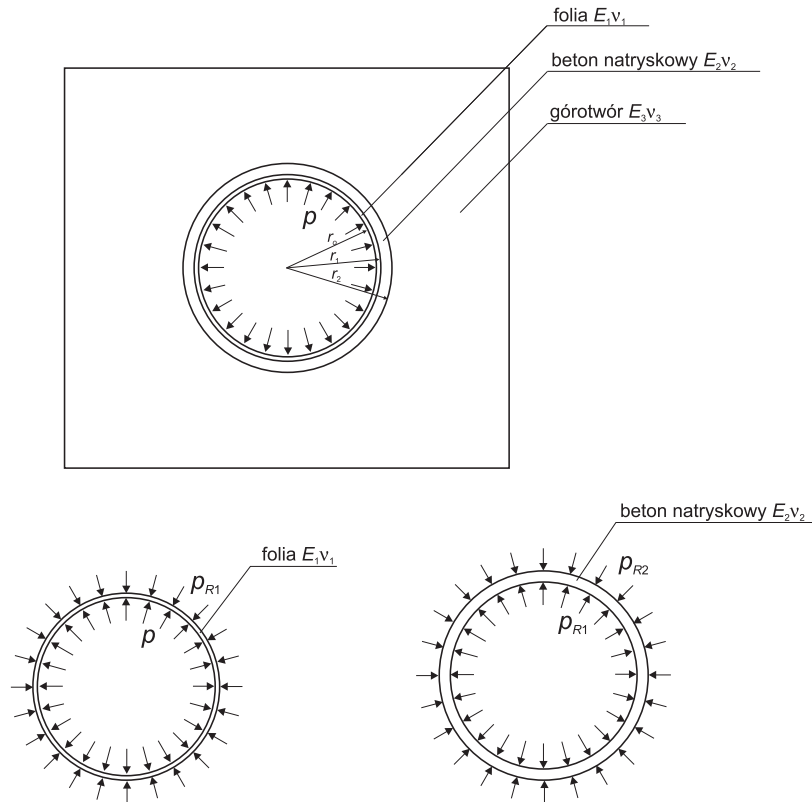
4. Wpływ konstrukcji obudowy na wartość współczynnika podatności podłoża

W obudowach tuneli występuje często folia hydroizolacyjna pomiędzy obudową wstępną i obudową ostateczną, która może wpływać na wartość współczynnika podatności podłoża. Analizę wpływu grubości folii na wartość współczynnika podatności podłoża przeprowadzono dla modelu tunelu w obudowie wstępnej z folią hydroizolacyjną [2].

Rozważono środkowo-symetryczne zadanie teorii sprężystości (rys. 3) nieważkiej tarczy z otworem z umieszczonymi w nim bez luzu i wcisku dwoma nieważkimi pierścieniami:

- pierścień wewnętrzny (folia hydroizolacyjna o współczynniku sprężystości wzdłużnej E_1 i liczbie Poissona ν_1) o promieniach r_0, r_1 ($r_1 > r_0$),
- pierścień zewnętrzny (obudowa wstępna tunelu wykonana z materiału o współczynniku sprężystości wzdłużnej E_2 i liczbie Poissona ν_2) o promieniach r_1, r_2 ($r_2 > r_1$).

Brzegi tarczy są wolne od obciążeń, natomiast na wewnętrznej powierzchni pierścienia wewnętrznego działa ciśnienie p (docisk od obudowy ostatecznej), które generuje powstawanie odporu sprężystego górotworu (por. [1]).



Rys. 3. Szkic do modelu tunelu w obudowie wstępnej z folią hydroizolacyjną

Stan naprężenia w pierścieniach i tarczy charakteryzowany jest następującymi składowymi tensora naprężenia (naprężeniami głównymi):

- naprężenie radialne σ_r , o kierunku zgodnym z kierunkiem promienia bieżącego, wychodzącego ze środka tarczy z pierścieniem,
- naprężenie obwodowe σ_t , o kierunku prostopadłym do kierunku promienia bieżącego,
- naprężenia podłużne σ_l o kierunku prostopadłym do płaszczyzny rysunku (zakłada się płaski stan odkształcenia).

Stan przemieszczenia charakteryzowany jest wektorem przemieszczenia u o kierunku promieniowym.

Przy rozwiązywaniu zadania wykorzystano klasyczne rozwiązanie Lamégo dla sprężystego pierścienia kołowego o promieniach (odpowiednio wewnętrznym i zewnętrznym) $a < b$, obciążonego ciśnieniem wewnętrznym p_a oraz zewnętrznym p_b .

W rozważanym modelu do obliczeń przyjęto tunel o średnicy w świetle obudowy $D = 6,0$ m, w obudowie wstępnej grubości 15 cm z betonu klasy B15 z folią hydroizolacyjną

o grubości od 2 do 20 mm, wobec braku danych obliczeniowych wartości współczynnika sprężystości wzdłużnej folii (E_f) przyjęto, że wahają się one w przedziale od 0,01 do 500 MPa. Z obliczeń wynika (Frydrych 2005), że grubość folii i jej współczynnik sprężystości wzdłużnej nie wpływają znacząco na wartość współczynnika podatności podłoża według Winklera. Dla podanych założeń wartość tego współczynnika lokuje się w przedziale od 2220,85 do 2249,90 MPa/m, a zatem różnica wynosi zaledwie 1,29%. Wpływ folii na wartość współczynnika podatności podłoża w powszechnie spotykanych konstrukcjach wielowarstwowych możemy zatem pominąć.

Przeprowadzono również badania dla tunelu o średnicy w świetle obudowy $D = 6,0$ m w obudowie wstępnej grubości 15 cm z betonu klasy B15 bez folii hydroizolacyjnej oraz dla tunelu o średnicy w świetle obudowy $D = 6,0$ m bez obudowy wstępnej [2]. Jeśli porówna się wartości otrzymane dla tych modeli, można zauważyć, że dla tych samych wartości współczynnika sprężystości wzdłużnej górotworu ($E_3 = 7000$ MPa) wartość współczynnika podatności podłoża według Winklera jest o ok. 21% większa w przypadku tunelu z obudową wstępną.

5. Podsumowanie

Analizując wyniki uzyskane z dotychczasowych obliczeń możemy zauważyć, jak wielki wpływ odgrywa obecność odporu sprężystego w procesie projektowania obudowy. W projektowanym rozstawie odrzwi obudowy, dla przypadku obudowy łukowej z wykładką scaloną betonem natryskowym oraz obudowy z wykładką niestaranną, gdzie praktycznie nie występuje odpór sprężysty, różnica jest dwukrotna. Obliczenia wykazały niewielki wpływ obecności folii hydroizolacyjnej w konstrukcji obudowy na wartość współczynnika podatności podłoża. Dla zadanych parametrów wyjściowych różnica wyniosła zaledwie 1,29%, co oznacza, że możemy pominąć wpływ folii w obliczeniach współczynnika podatności podłoża w obudowach wielowarstwowych. W dalszym ciągu badań zamierza się przeprowadzić analizę zmienności wartości współczynnika podatności podłoża na obwodzie obudowy poprzez wykonanie odpowiednio zaprojektowanych obliczeń dla płaskiej sprężystej tarczy z obudowanym otworem o kształcie przekroju odpowiadającym przekrojom tuneli stosowanym w praktyce. Rezultatem badań będą zalecenia dotyczące przyjmowania wartości współczynnika podatności podłoża dla różnych przekrojów wyrobiska, z uwzględnieniem jego zmienności.

LITERATURA

- [1] *Mateja J.*: Studium nad ustaleniem nośności stalowych odrzwi obudowy łukowej w wyrobiskach udostępniających nienarażonych na bezpośredni wpływ ciśnień eksploatacyjnych. Mysłowice, Prace Naukowo-Badawcze OBR BG „Budokop”, 1982
- [2] *Frydrych K.*: Wpływ konstrukcji obudowy tunelu o przekroju kołowym na wartość współczynnika podatności podłoża. *Górnictwo i Geoinżynieria*, r. 29, z. 3/1, 2005, s. 225–235
- [3] *Huber M.T.*: Stereomechanika techniczna. Warszawa, PWN 1958

- [4] PN-90/B-03200:1990: Konstrukcje — Obliczenia statyczne i projektowanie
- [5] PN-G-05020:1997: Podziemne wyrobiska korytarzowe i komorowe — Obudowa sklepiona — Zasady projektowania i obliczeń statycznych
- [6] PN-H-93441-1:1994: Kształtowniki stalowe walcowane na gorąco dla górnictwa — Ogólne wymagania i badania
- [7] PN-H-93441-3:1994: Kształtowniki stalowe walcowane na gorąco dla górnictwa — Kształtowniki typu V — Wymiary
- [8] *Rossiński B. (et al.): Budownictwo betonowe. Fundamenty. T. IX. Warszawa, Arkady 1963*
- [9] *Rulka K., Wypchol N., Mateja J., Gruszka R.: Zasady projektowania, obliczania i doboru obudów dla długotrwałych wyrobisk korytarzowych i komorowych. Mysłowice, Prace Naukowo-Badawcze OBR BG „Budo-kop”, 1983*