

*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  $\gamma_s$  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  $\lambda_p$  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 wyboczeniowy  $\varphi$  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).

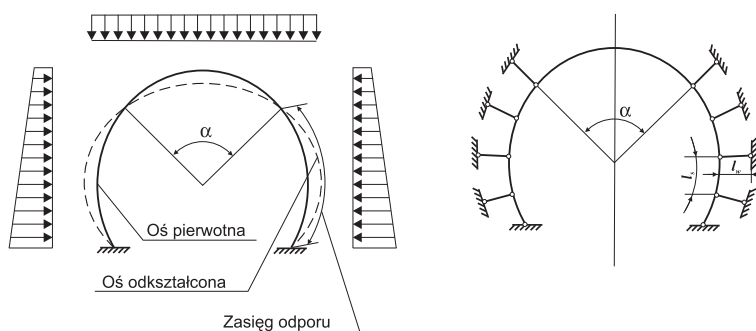
TABELA 1

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.

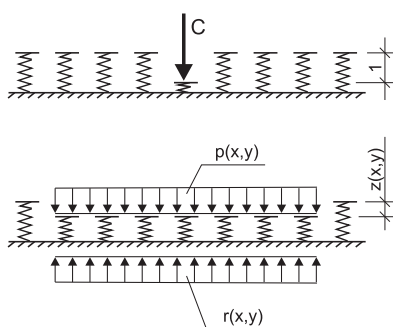


Rys. 1. Schemat statyczny do obliczeń sił wewnętrznych (PN-G-05020:1997)

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 odstępów 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,
- $\nu_g$  — 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 ( $r_w$ ).

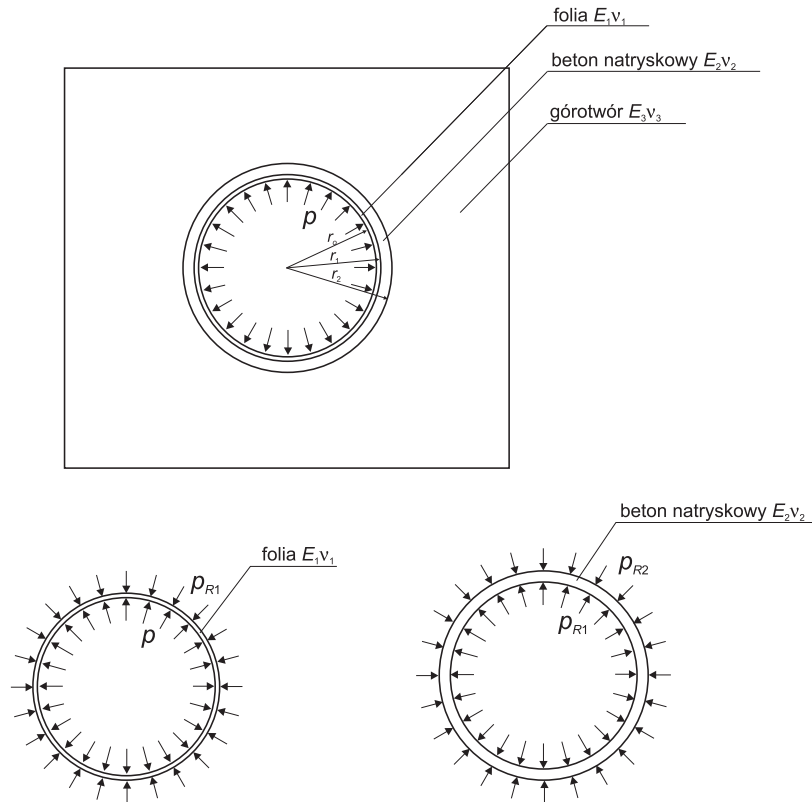
#### 4. Wpływ konstrukcji obudowy na wartość współczynnika podatności podłoża

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  $\nu_1$ ) 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  $\nu_2$ ) 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  $\sigma_r$ , o kierunku zgodnym z kierunkiem promienia bieżącego, wychodzącego ze środka tarczy z pierścieniem,
- naprężenie obwodowe  $\sigma_t$ , o kierunku prostopadłym do kierunku promienia bieżącego,
- naprężenia podłużne  $\sigma_l$  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 przekrojowi 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*