

Stefan GAŁCZYŃSKI

Marek LESZCZYŃSKI

Instytut Geotechniki
Politechnika Wrocławska

TEORETYCZNE PODSTAWY PROJEKTOWANIA OBUDOWY CHODNIKÓW NA DUŻEJ GŁĘBOKOŚCI

Streszczenie. W artykule dokonano analizy współpracy z górotworem obudów górniczych stosowanych w podziemnych wyrobiskach korytarzowych i komorowych. W analizie i obliczeniach uwzględniono konieczność wykorzystania naturalnej wytrzymałości górotworu przy rozpatrywaniu stateczności wyrobisk - w układzie obudowa i skały otaczające na obrysie wykomu danego wyrobiska.

W obliczeniach przyjęto konstrukcję obudowy jako układ wielokrotnie statycznie niewyznaczalny z uwzględnieniem pełnej jej współpracy z górotworem przy niekorzystnym jednokierunkowym wywieraniu na nią nacisku od strony otaczających ją skał.

Przedstawiono sposób obliczeń pod względem wytrzymałościowym obudowy górniczej przyjętej jako łuk dwuprzegubowy i trójprzegubowy z uwzględnieniem aktywnego i pasywnego oddziaływania na nią górotworu.

Obliczenia przeprowadzono przy wykorzystaniu metody sił oraz teorii Winklera w zakresie sposobu ustalania oporu górotworu w miejscach dociskanej do niego obudowy pod wpływem aktywnego obciążenia jej łuku stropowego. Opracowano i przedstawiono w artykule wzory nr (3)-(16), stanowiące podstawę do obliczania wielkości oporu od strony skał otaczających obudowę oraz sił wewnętrznych w konstrukcji obudowy wykonywanej jako łuk dwu- i trójprzegubowy.

1. WSTĘP

W większości przypadków wyrobiska korytarzowe (chodniki) wykonywane na dużych głębokościach wymagają zabezpieczenia przed zniszczeniem obudową nośną. Wraz z głębokością pogarszają się warunki pracy obudowy chodników, rośnie ich obciążenie, powstają coraz to większe trudności w doborze właściwej konstrukcji obudowy. Konstrukcja wymaga więc zastosowania bardziej racjonalnych metod jej projektowania. W celu zapobieżenia wzrostowi kosztów obudowy należy dążyć do maksymalnego wykorzystania jej nośności i w maksymalnym stopniu wyeliminować jej awaryjność.

Cel ten można będzie osiągnąć po przeprowadzeniu teoretycznej analizy pracy obudowy wyrobisk korytarzowych wykonanych na dużych głębokościach. Analiza ta powinna wyjaśnić rolę niektórych czynników decydujących o nośności obudowy, zwłaszcza rolę oporu górotworu. Na dużych głębokościach trzeba więc mówić już nie o nośności obudowy a o nośności układu obudowa-górotwór.

2. WARUNKI WSPÓŁPRACY OBUDOWY Z GÓROTWOREM

W świetle dotychczasowych doświadczeń w zakresie stateczności wyrobisk na dużych głębokościach celowe staje się wykorzystanie naturalnej wytrzymałości górotworu w ocenie nośności układu obudowa-górotwór.

Najbardziej skutecznie współpracującą obudową z górotworem jest konstrukcja łukowa (sklepiona) lub kołowa. W obudowie tego typu przeważające pionowe ciśnienie powoduje rozpór, który prowadzi do przemieszczenia bocznych części obudowy w kierunku górotworu, powodując jego odpór. Skrępowana górotworem obudowa ulega mniejszym odkształceniom, a zatem mniejszemu wyteżeniu niż konstrukcja swobodnie odkształcalna (rys. 1).

Dokładna ocena wyteżenia obudowy współpracującej z górotworem nie jest jednak rzeczą łatwą. Kłopoty występują już na etapie określenia czynnego parcia górotworu, a tym bardziej jego odporu będącego funkcją sztywności układu obudowa-górotwór. Ze względu na odpór układ jest nieskończenie statycznie niewyznaczalny. Na jego wysokości występuje wzajemna zależność przemieszczenia obudowy od wielkości odporu i odwrotnie - wielkość odporu zależy od przemieszczenia obudowy.

Według najprostszej liniowej teorii Winklera zależność odporu od przemieszczenia opisuje wzór:

$$g = C \delta, \quad (1)$$

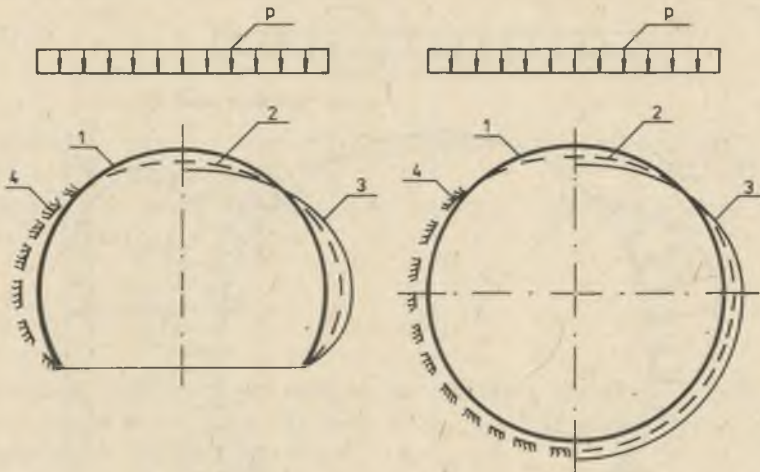
gdzie:

- g - odpór górotworu,
- C - współczynnik odporu,
- δ - przemieszczenie obudowy.

Wpływ tak zdefiniowanego odporu na wyteżenie obudowy łukowej prześledzono na przykładzie owalnej obudowy ciągłej lub łuku, np. obudowy ŁP (przy różnych schematach statycznych).

3. ANALIZA WYTEŻENIA ŁUKU OBUDOWY CHODNIKOWEJ

Analizę przeprowadzono na uproszczonym łuku umożliwiającym wyrażenie jego sił wewnętrznych ogólnymi wyrażeniami wynikającymi ze sztywności obudowy i górotworu. Zamieniono w tym celu kołową oś łuku linią łamaną, a ciągły odpór - odporem zmieniającym się skokowo (rys. 2). Są to zabiegi znacznie ułatwiające obliczenia i tylko nieznacznie wpływające na wielkość sił wewnętrznych działających w obudowie. Obliczenia wykonano dla łuku trójprzegubowego i dwuprzegubowego.



Rys. 1. Odkształcenie obudów rozporowych

1 - oś obudowy, 2 - oś odkształconej obudowy z uwzględnieniem działania odporu, 3 - oś swobodnie odkształcającej się obudowy, 4 - strefa działania odporu

Fig. 1. Deformations of sprag supports

1 - support axis, 2 - deformed support axis considering rock resistance, 3 - axis of freely deforming support, 4 - resistance zone

3.1. Łuk trójprzegubowy

Statycznie wyznaczalny łuk trójprzegubowy staje się statycznie niewyznaczalny na skutek odporu górotworu. Zależność (1) i podstawowy schemat statyczny łuku pozwalają na wyznaczenie nieznanego odporu górotworu (rysunek 2):

$$\delta_1 = \delta_{1g} g_m + \delta_{1p} p + \delta_{1q} k p = - \frac{g_m}{\sigma}, \quad (2)$$

gdzie:

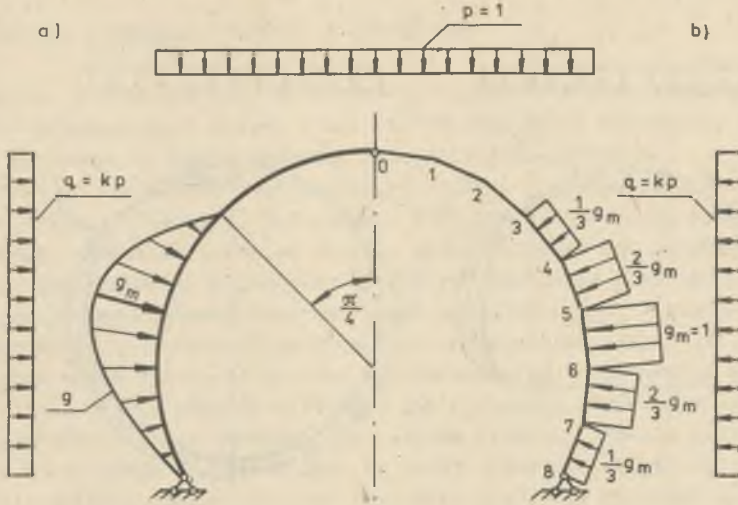
g_m - maksymalny odpór górotworu,

p - pionowe ciśnienie górotworu,

k - współczynnik parcia boczno górotworu,

δ_{1s} - przemieszczenia układu podstawowego od sił jednostkowych (pierwszy indeks oznacza miejsce i kierunek, drugi - przyczynę przemieszczenia).

W celu obliczenia wartości przemieszczeń układu podstawowego można posłużyć się którymkolwiek ze sposobów znanych z wytrzymałości materiałów. Zwykle korzysta się ze wzoru Maxwella - Mohra [1]. Praktycznie układ pod-



Rys. 2. Schemat łuku trójprzegubowego
a) schemat statyczny, b) schemat podstawowy

Fig. 2. Scheme of three-hinged arch
a) static scheme, b) basic scheme

stawowy obciąża się kolejno jednostkowymi wartościami nadliczbowych niewiadomych oraz zadany obciążeniem zewnętrznym w celu określenia (wykreślaniami i ewentualnie równaniami) potrzebnych wartości sił wewnętrznych, oddzielnie dla każdego z poszczególnych obciążeń. Następnie oblicza się wartości całek odpowiadające poszczególnym prętom, po czym sumuje się je dla wszystkich prętów rozpatrywanej konstrukcji. Przy wyliczaniu wartości całek z iloczynu momentów, w przypadku prętów prostoliniowych o stałych przekrojach, najczęściej korzysta się z tzw. sposobu Wereszczagina [1], z wykorzystaniem zapisu macierzowego w maksymalnym stopniu przystosowanego do potrzeb ETO.

Z równania (2) wynika zależność odporu skał od sztywności obudowy i górotworu oraz od ciśnienia, jakie górotwór wywiera na obudowę:

$$\varepsilon_m = - \frac{(\delta_{1p} + \delta_{1q}k)C_p}{\delta_{1g}^c + 1} \quad (3)$$

Podobnie można wyznaczyć dowolną siłę wewnętrzną w jakimkolwiek przekroju łuku j [1]:

$$S_j = - S_{j\varepsilon} \frac{(\delta_{1p} + \delta_{1q}k)C_p}{\delta_{1g}^c + 1} + (S_{jp} + S_{jq}k)p, \quad (4)$$

gdzie:

S_{js} - siła wewnętrzna w układzie podstawowym w przekroju j od obciążenia jednostkowego s .

Zmienność odporu górotworu, a tym samym poszczególnych sił wewnętrznych, ilustrują wykresy (rys. 3).

Przy $C = 0$ odpór nie występuje $\varepsilon_m = 0$, a przy $C \rightarrow \infty$ odpór przyjmuje wartość stałą:

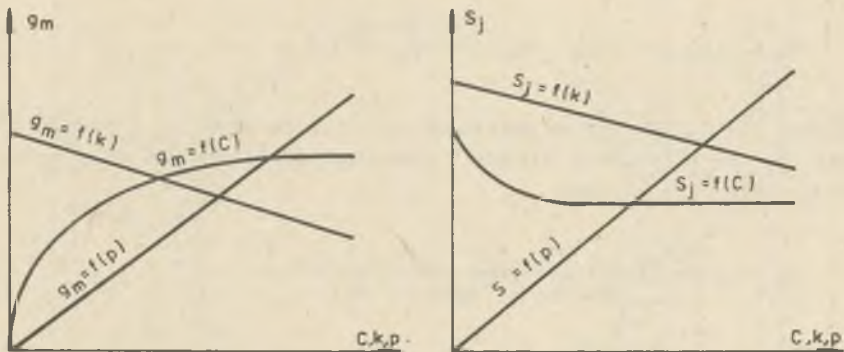
$$\varepsilon_m = - \frac{\delta_{1p} + \delta_{1q}k}{\delta_{1g}} p \quad (5)$$

Wielkość odporu zależy również od wielkości ciśnienia bocznego górotworu. Ponieważ $\delta_{1p} < 0$, $\delta_{1q} > 0$ i $\delta_{1g} > 0$, to warunkiem wystąpienia odporu $\varepsilon_m > 0$ będzie zależność:

$$\delta_{1p} + \delta_{1g} k < 0, \quad (6)$$

skąd wynika, że:

$$k < \left| \frac{\delta_{1p}}{\delta_{1q}} \right|, \quad (7)$$



Rys. 3. Zmienność odporu górotworu i sił wewnętrznych od współczynnika odporu i parcia bocznego oraz obciążenia pionowego

Fig. 3. Dependence of rock resistance and inner forces on resistance and side pressure coefficients and vertical load

co oznacza, że współczynnik parcia bocznego górotworu powinien być mniejszy od stosunku sztywności przy obciążeniu pionowym do sztywności obudowy przy obciążeniu poziomym. Zachowanie zależności (7) zapewni współpracę obudowy z górotworem. Eliminując z obliczeń obudowy ciśnienie boczne, nie zmieniamy schematu jej pracy. Zmieni się tylko wielkość odporu, co nie-

znacznie wpływa na wielkość sił wewnętrznych, wobec tego w obliczeniach praktycznych możemy przyjąć $k = 0$.

3.2. Łuk dwuprzegubowy

Schemat podstawowy do obliczeń łuku na obciążenie symetryczne względem osi y przedstawiono na rysunku 4. Równanie kanoniczne metody sił, wynikające z warunku niemożliwości wzajemnych przemieszczeń przekroju ustroju w kierunku nadliczbowej siły X_1 , przybiera postać:

$$\delta_{11}X_1 + \delta_{1g} g_m + \delta_{1p} p + \delta_{1q} kp = 0 \quad (8)$$

Obciążono układ podstawowy siłami X_2 przyłożonymi normalnie do osi łuku w punktach przyłożenia maksymalnych odporów g_m . Przez δ_{21} i δ_{2g} oznaczono przemieszczenia w kierunku siły X_2 od obciążenia jednostkowego X_1 i jednostkowego odporu górotworu, a przez δ_{1p} i δ_{1q} - od zadanych jednostkowych obciążeń zewnętrznych. Całkowite przemieszczenie w kierunku działania siły X_2 wynosi wówczas:

$$\delta_2 = \delta_{21}X_1 + \delta_{2g} g_m + \delta_{2p} p + \delta_{2q} kp, \quad (9)$$

skąd na podstawie zależności (1) otrzymano:

$$\delta_{21}X_1 + (\delta_{2g} - \frac{1}{0})g_m + \delta_{2p} p + \delta_{2q} kp = 0 \quad (10)$$

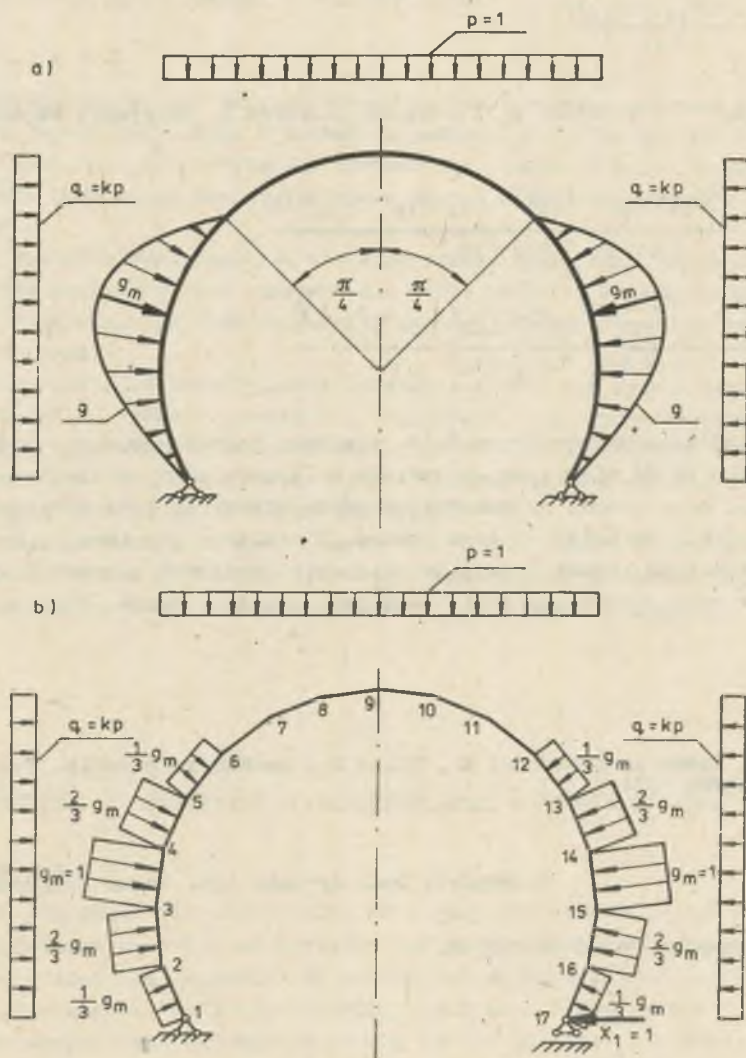
Z równań (8) i (10) wynika zależność odporu górotworu g_m i siły nadliczbowej X_1 od sztywności obudowy i górotworu oraz od ciśnienia, jakie górotwór wywiera na obudowę:

$$g_m = - \frac{\sigma_p [\delta_{11} (\delta_{2p} + \delta_{2q} k) - \delta_{21} (\delta_{1p} + \delta_{1q} k)]}{C (\delta_{11} \delta_{2g} - \delta_{1g} \delta_{21}) - \delta_{11}}, \quad (11)$$

$$X_1 = \frac{p \{ C [\delta_{1g} (\delta_{2p} + \delta_{2q} k)] - (\delta_{2g} - 1) (\delta_{1p} + \delta_{1q} k) \}}{C (\delta_{11} \delta_{2g} - \delta_{1g} \delta_{21}) - \delta_{11}} \quad (12)$$

Dowolna siła wewnętrzna w jakimkolwiek przekroju łuku j wynosi [1]:

$$S_j = S_{j1}X_1 + S_{jg} g_m + (S_{jp} + S_{jq}k)p \quad (13)$$



Rys. 4. Schemat łuku dwuprzegubowego
 a) schemat statyczny, b) schemat podstawowy

Fig. 4. Scheme of two-hinged arch
 a) static scheme, b) basic scheme

Przy $C = 0$ odpór nie występuje, $\varepsilon_m = 0$, a wyrażenie (12) na wielkość siły nadliczbowej X_1 przybiera postać:

$$X_1 = - \frac{p(\delta_{1p} + \delta_{1qk})}{\delta_{11}} \quad (14)$$

Natomiast przy $C \rightarrow \infty$ odpór ε_m i siła nadliczbowa X_1 przyjmują wartość stałą:

$$\varepsilon_m = - \frac{p[\delta_{11}(\delta_{2p} + \delta_{2qk}) - \delta_{21}(\delta_{1p} + \delta_{1qk})]}{\delta_{11} \delta_{2g} - \delta_{1g} \delta_{21}}, \quad (15)$$

$$X_1 = \frac{p[\delta_{1g}(\delta_{2p} + \delta_{2qk}) - \delta_{2g}(\delta_{1p} + \delta_{1qk})]}{\delta_{11} \delta_{2g} - \delta_{1g} \delta_{21}} \quad (16)$$

Podobną analizę można przeprowadzić dla łuku bezprzegubowego, jednak w tym przypadku ilość niewiadomych wzrasta do trzech przy założeniu symetrii układu, a wyrażenia na maksymalny odpór górotworu oraz siły nadliczbowe przyjmują bardziej złożoną postać. W praktyce górniczej z konstrukcjami tego typu rzadko ma się do czynienia, ponieważ sztywne utwierdzenie łuku w spągu wyrobiska jest technicznie skomplikowane.

LITERATURA

- [1] Dyląg Z., Krzemińska-Niemiec E., Filip F.: Mechanika budowli. Tom 1, PWN, Warszawa 1974.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Zenon Szczepaniak

Wpłynęło do Redakcji w marcu 1985 r.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КРЕПИ
ДЛЯ ШТРЕКОВ РАСПОЛОЖЕННЫХ НА ВОЛЬНОЙ ГЛУБИНЕ

Р е з ю м е

Приводится анализ взаимодействия крепей с горными породами окружающими места горных выработок. В анализе и расчётах устойчивости выработок необходимо учитывать естественное сопротивление, каким обладает горная порода. Расчёты приводятся для случая крепи и скал окружающих выемку в данной выработке.

В расчётах было принято, что конструкция крепи является многократно статически неопределимой системой при учёте полного её взаимодействия с горными породами, при неблагоприятной односторонней нагрузке со стороны окружающих скал.

Приводится методика расчёта прочности крепи, как дуги с двумя и тремя шарнирами. С учётом активной и пассивной нагрузки окружающих горных пород. Определение отпора горных пород в местах прижимаемой к ним крепи под влиянием активной нагрузки её свода, расчёты проводились с использованием правила сил и теории Винклера.

Представленные в статье формулы (3) - (16) являются основой для расчёта величины отпора со стороны скал окружающих крепь, а также внутренних сил в конструкции крепи исполненной в виде дуг с двумя шарнирами.

THEORETICAL FUNDAMENTALS OF DESIGNING ROAD SUPPORTS ON GREAT DEPTH

S u m m a r y

In the paper the cooperation of a rock and supports used in underground dog headings and chamber headings has been analyzed. In the analysis and calculations the necessity of making use of natural rock strength has taken into account while considering stability of headings - in the arrangement: support and surrounding rocks on the outline of a given heading break.

In the calculations the support structure has been assumed as a repeatedly statically indeterminable system considering cooperation of the support with a rock at unfavorable unidirectional pressing on the support from the side of surrounding rocks.

The way of calculations has been presented as far as support strength assumed as a two - and three-hinged arch is concerned taking into account active and passive rock influence on the support.

Calculations have been carried out making use the method of forces and Winkler's theory to determine rock resistance in the points of support pressing because of active load of support roof. The formulae (3)-(16) which are basic for calculation of rock resistance magnitude and inner forces in support structure made as two- and three-hinged arch have been worked out and presented.