

Stefan Gałczyński, Andrzej Wojtaszek***

INŻYNIERSKIE KRYTERIA KSZTAŁTOWANIA WYROBISK PODZIEMNYCH

1. Wstęp

Jednym z podstawowych zadań działalności inżynierskiej w czasie drażenia i eksploatacji wyrobisk podziemnych musi być pełne bezpieczeństwo ludzi, ochrona wszelkich dóbr materialnych i naturalnych oraz optymalizacja ponoszonych kosztów. Realizacja takiego zadania stanie się możliwa jedynie wówczas, gdy będziemy mieli zidentyfikowany fizyczny model układu nośnego, gwarantującego stateczność nadkładu nad wyrobiskiem, a także calizny w jego ociosach i spągu. Szczególnym elementem tego układu jest sklepienie ciśnień, które równoważy obciążenie stropu wyrobiska i przekazuje je na wspomnianą caliznę.

Doskonałą fizyczną ilustracją sklepienia ciśnień jest kształtowanie konstrukcji mostu gruntowo-powłokowego wykonanego z materiałów miejscowych [3]. Co prawda, w inżynierii mostowej za zasadniczy element nośny uważa się stalową powłokę z blachy falistej, a zasypka — to jedynie enigmatyczne, pozorne jej odciążenie wywołane przesklepieniem gruntu. Łatwo można jednak wykazać, że to właśnie zasypka tworzy zasadniczy, trwały materialny układ nośny, a powłoka stanowi tylko element osłonowy, chroniący przed ubytkami zasypki, a znany w geoinżynierii jako obudowa osłonowa [1,2].

2. Sklepienie ciśnień w inżynierii ładowej

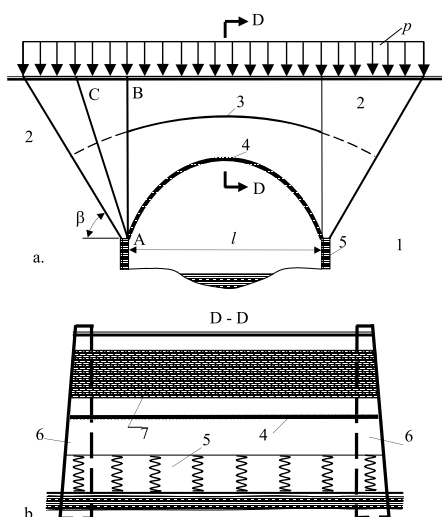
Fizyczne, materialne kształtowanie sklepienia ciśnień jako ustroju nośnego prześledzimy na przykładzie wykonawstwa małego mostu, formowanego z zagęszczonego piasku, swoistego miejscowego materiału konstrukcyjnego (rys. 1). W tym celu światło

* Instytut Geotechniki i Hydrotechniki, Wydział Budownictwa Ładowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska, Wrocław

** Instytut Górnictwa, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Politechnika Wrocławska, Wrocław

mostu przesłania się podatną powłoką, najczęściej z blachy falistej, a następnie układa pierwsze, mocno zagęszczone warstwy przyczółków i dobrze ustabilizowane początkowe fragmenty poboczy mostu. Nad przeszkodą mostową powstaje czasza z podatnym dnem i znacznie bardziej sztywnymi ścianami. Układana w niej i systematycznie zagęszczana warstwami zasypka ulega, na skutek tarcia, zaklinowaniu analogicznie do znanego zjawiska silosowego (Jansena).

Prawidłowo realizowany proces tworzenia i zasypywania czaszy, a szczególnie właściwe zagęszczenie piasku prowadzi do trwałego jego zaklinowania, zasklepienia nad pokonywaną przeszkodą. Powstaje niekonwencjonalny, specyficzny ustrój mostowy — strefa nośna skompresowanego piasku. Zwłaszcza w czasie przeciążenia mostu obciążeniem próbnym, w następstwie przekonsolidowania zasypki utrwala się w niej znane w geoinżynierii sklepienie ciśnień jako skuteczny ustrój nośny.



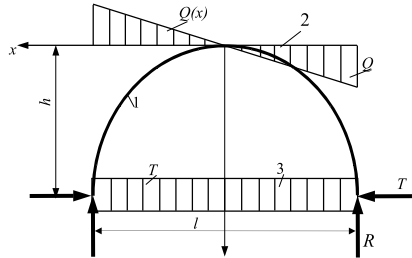
Rys. 1. Mały most gruntowo-powłokowy: a — profil podłużny, b — przekrój poprzeczny,
 1 — stałe podłoże, 2 — sztywne przyczółki z zasypki, 3 — sklepienie ciśnień, 4 — powłoka z blachy,
 5 — podatne ściany-fundamenty, 6 — sztywne pobocza mostu, 7 — rdzeń zagęszczonej zasypki,
l — prześwit mostu, *p* — zastępcze obciążenie użytkowe, (A–B) i (A–C) — potencjalne powierzchnie
 ścięcia węzłowi mostu: pionowa i najmniejszego oporu na ścinanie,
 β — kąt nachylenia powierzchni ścięcia

Jest to zaklinowany między przyczółkami rdzeń wstępnie sprężonej zasypki tworzący racjonalne, bezmomentowe sklepienie w stanie płaskich odkształceń (rys. 1). Jego schematem obliczeniowym jest łuk statycznie wyznaczalny, o umownej szerokości 1 m, z parabolicznym obrysem osi, wynikającym z równania momentów tożsamościowo równych zero (rys. 2):

$$M(x) = Tz - \frac{px^2}{2} \equiv 0 \quad (1)$$

gdzie:

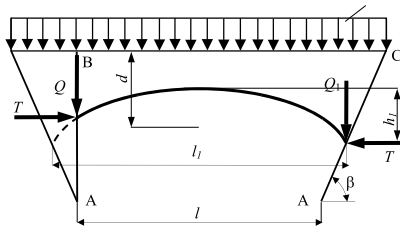
- p — obciążenie pionowe,
- T — rozpór łuku,
- x, z — współrzędne.



Rys. 2. Schemat sklepienia ciśnień: l — rozpiętość sklepienia, h — strzałka sklepienia, T — rozpór, R — reakcja pionowa, $Q(x)$ — pionowa siła ścinająca ($Q = R$), 1 — oś łuku, 2 i 3 — wykresy sił ścinających i prostego ściskania poziomego

Charakterystyczną cechą tego ustroju jest proste poziome jego ściskanie zrównoważonym rozporom oraz ścinanie pionowymi siłami obciążenia użytkowego. Po zaklinowaniu między przyczółkami rdzenia gruntowego, rozpór traci właściwości sił konserwatywnych i staje się siłą wstępnego, stałego sprężenia łuku. Zdjęcie pionowych obciążeń użytkowych spowoduje więc jedynie pionowe odprężenie ustroju w zakresie naprężeń ścinających. W tej sytuacji, po ponownym obciążeniu łuku siłami mniejszymi od obciążenia próbnego, ustrój można uznać za klasyczną konstrukcję liniowo-sprężystą.

Dopiero w przypadku, gdybyśmy chcieli przekroczyć wartość obciążeń próbnych, musimy oszacować zarówno nośność powstałego sklepienia jak i możliwość jego samoczynnego przystosowania się do nowych, zmienionych warunków pracy statycznej. Z rozkładu sił wewnętrznych (rys. 2) i rozpiętości światła mostu wynikają fizyczne, materialne wymiary sklepienia ciśnień (rys. 3).



Rys. 3. Materiałny schemat sklepienia ciśnień: l — światło mostu pod sklepieniem, l_1 — max. rozpiętość sklepienia, h_1 — strzałka sklepienia, d — grubość sklepienia w kluczu, T — rozpór sklepienia, p — obciążenie sklepienia, Q — max. siła ścinania na powierzchni pionowej (A-B), Q_1 — max. siła ścinania na powierzchni najmniejszego oporu (A-C), β — kąt nachylenia powierzchni (A-C).

W pierwszej kolejności jego grubość w kluczu d , przy 1 m jego szerokości, powinna spełniać warunek granicznej nośności na proste ściskanie i wynosić:

$$d \geq \frac{T}{R_c} \quad (2)$$

gdzie:

d — grubość łuku w kluczu,
 R_c — wytrzymałość zasypki w trójosiowym stanie naprężenia,
 T — rozpór łuku.

Drugi podstawowy warunek wytrzymałościowy powinien zapewnić właściwą nośność węzłowi sklepienia na ich ścięciu, poślizg po powierzchniach pionowych (rys. 2):

$$Q = \frac{pl}{2} \leq T \tan \phi \quad (3)$$

gdzie:

l — rozpiętość sklepienia w świetle mostu,
 Q — maksymalna siła ścinająca,
 ϕ — kąt tarcia wewnętrznego zasypki.

Jeśli uwzględnimy właściwości racjonalnej osi sklepienia (1), gdy przy $x = l/2$, rzędna $z = h$ i staje się jego strzałką, to z zależności (2) i (3) otrzymujemy ogólny warunek nośności tego sklepienia:

$$\frac{pl}{2 \tan \phi} \leq \frac{pl^2}{8h} \leq R_c d \quad (4)$$

gdzie:

h — strzałka sklepienia,
 p — ośność sklepienia.

Teoretycznym potwierdzeniem oszacowanej nośności (4) jest adekwatna równowaga przyczółków sklepienia. Ich zagrożeniem byłoby niewątpliwie ścięcie po powierzchniach najmniejszego oporu na ścinanie (A–C) (rys. 3). Nowy układ nośny, przedłużone sklepienie oparte na powierzchniach ścięcia przyczółków (Coulomba) musi spełniać więc dodatkowy warunek równowagi na tych powierzchniach:

$$\frac{lp}{2} \sin \beta - T \cos \beta \leq \left(T \sin \beta + \frac{lp}{2} \cos \beta \right) \tan \phi \quad (5)$$

Po uwzględnieniu równania (1) przyjmuje on postać (rys. 3):

$$\frac{\tan \beta - \tan \phi}{1 + \tan \beta \tan \phi} \leq \frac{l_1}{4h_1} \quad (6)$$

gdzie:

h_1 — strzałka sklepienia,

l_1 — rozpiętość przedłużonego sklepienia,

$\beta=45^\circ+\phi/2$ — kąt nachylenia powierzchni ścinania.

Niezależność warunku (6) od obciążeń potwierdza stabilność, usztywnienie przyczółków mostu oraz zdolność całego układu nośnego do samoczynnego przystosowywania się do dowolnie zmiennych obciążeń statycznych. Przy określonym stopniu zagęszczenia piasku sklepienie ciśnień może przybierać różne kształty, zmieniając rozpiętość l_1 lub strzałkę sklepienia h_1 . Zgodnie z teorią Coulomba, fizyczną interpretację sklepienia ciśnień w inżynierii lądowej możemy zatem zdefiniować następująco (rys. 3): „sklepienie ciśnień — to racjonalne przesło mostowe zaklinowane dwoma usztywnionymi klinami (ABC) między krytycznymi powierzchniami poślizgu przyczółków, skutecznie ustabilizowanych poprzez zagęszczenie zasyпки”.

Ogólnie można stwierdzić, że w inżynierii lądowej kształtujemy konstrukcję nośną nad przestrzenią użytkową, a w geoinżynierii, podczas robót podziemnych, kształtujemy wyrobisko jako przestrzeń użytkową tak, aby powstał nad nim adekwatny ustrój nośny. W obydwu przypadkach chodzi więc o układ nośny zabezpieczający niżej położoną przestrzeń użytkową.

Kształtowane układy nośne można dodatkowo stabilizować poprzez takie zabiegi techniczne, jak:

- zwiększanie obciążeń próbnych w celu przekonsolidowania zasyпки i podwyższenia stopnia jej zagęszczenia,
- wzmacnianie zasyпки cementacją, silikatyzacją, bitumizacją itp.,
- zbrojenie wykonywanej zasyпки lub zakotwienie po jej wykonaniu itd.

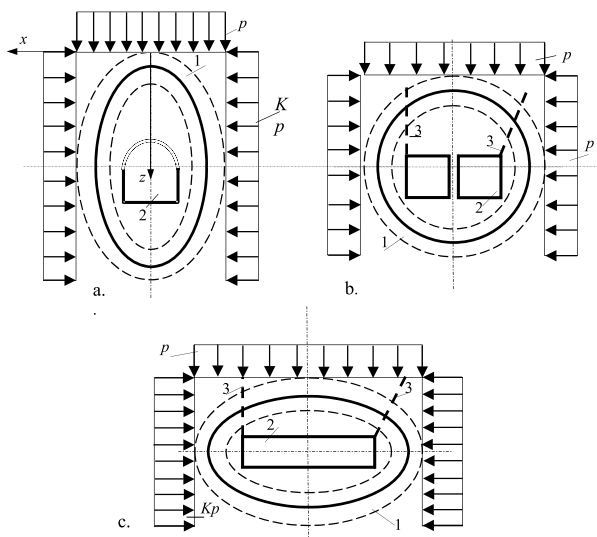
3. Zasady kształtowania wyrobisk podziemnych w geoinżynierii

Przed przystąpieniem do drążenia wyrobisk podziemnych, w pierwszej kolejności należy rozpoznać naturalne czynniki sprzyjające samoczynnemu ukształtowaniu się trwałego sklepienia ciśnień jako materialnego układu nośnego. Rodzaj górotworu, sposób jego zalegania, a przede wszystkim stan pierwotnych naprężeń decyduje o wielkości jego wstępnego sprężenia, o niekonserwatywnym charakterze sił wewnętrznych i, wreszcie, o predyspozycji nadkładu nad wyrobiskiem do zasklepienia i uformowania się trwałego sklepienia ciśnień. Należy wyróżnić dwa rodzaje sklepień:

- 1) omówione w punkcie 2 sklepienia paraboliczne w warunkach jednoosiowego, pionowego obciążenia, na ogół, nad wyrobiskami zlokalizowanymi na małych głębokościach (rys. 3),
- 2) sklepienia zamknięte eliptyczne lub kołowe w dwuosiowym stanie obciążeń (pionowych i poziomych), a więc otaczające wyrobiska zlokalizowane na odpowiednio dużych głębokościach (rys. 4).

W ostatnim przypadku należy wyróżnić trzy rodzaje sklepień w zależności od wielkości współczynnika parcia bocznego ($p_x/p_z = K$):

- w warunkach parcia czynnego, gdy $0 < K < 1$ oś sklepienia opisuje elipsa „stojąca” z pionową, większą średnicą główną,
- w przypadku parcia hydrostatycznego $K = 1$, osią sklepienia jest koło,
- w stanie parcia biernego, gdy $1 < K < \infty$ mamy elipsę „leżącą” z poziomą, większą średnicą główną.



Rys. 4. Zamknięte sklepienia ciśnien: a — eliptyczne „stojące”, b — kołowe, c — eliptyczne „leżące”, p i Kp — pionowe i boczne obciążenie sklepienia, 1 — strefa nośna, 2 — wyrobisko lub pole eksploatacyjne, 3 — potencjalne powierzchnie poślizgu sklepienia

Równania osi sklepień zamkniętych wynikają z uogólnionego równania momentów tożsamościowo równych zero (rys. 4):

$$M(x) = Tz - \frac{px^2}{2} - \frac{Kpz^2}{2} \equiv 0 \quad (7)$$

gdzie K — współczynnik czynnego, hydrostatycznego lub biernego parcia bocznego.

Mając koncepcyjny zarys zamkniętego układu nośnego, możemy podejmować decyzje o racjonalnym, optymalnym ukształtowaniu w jego wewnętrznej strefie pojedynczych, grupowych bądź eksploatacyjnych wyrobisk podziemnych. Po ich naszkicowaniu trzeba dokonać oszacowania nośności powstałej strefy nośnej, czyli zaklinowanego jej zaciskaniem, zamkniętego sklepienia ciśnien jako ustroju materialnego. Mamy więc przypadek bardzo stabilnego, całkowicie bezpiecznego ustroju nośnego, który chroni wyrobisko nie tylko od strony stropu, nadkładu, ale także od strony ociosów i jego spągu.

W tym przypadku zabezpieczenie przestrzeni użytkowej wyrobiska można porównać z podwodną jednostką pływającą [2] i w pełni uznać, że spełnia ono wymagania zadania inżynierskiego, sformułowanego we wstępie artykułu. Realne sklepienie ciśnień jest ustrojem nośnym spełniającym wszystkie warunki wytrzymałości konstrukcji podziemnych lub podwodnych.

4. Wnioski praktyczne

Z przeprowadzonych rozważań dotyczących możliwości bezpiecznego i ekonomicznie uzasadnionego wykonywania i eksploatacji wyrobisk podziemnych wynika szereg technicznie ważnych wniosków praktycznych:

- 1) Wyrobiska podziemne muszą być wykonywane i eksploatowane pod osłoną układów nośnych naturalnie uformowanych w zaciśniętej, skompresowanej warstwie górotworu. Warstwa ta, ukształtowana jako materialne sklepienie ciśnień zabezpiecza wyrobisko przed globalnym zawałem, głównie jego, podciętego robotami podziemnymi, stropu. Co prawda, roboty te naruszają ciągłość stropu bezpośredniego, często ociosów, a czasami nawet spagu wyrobiska, ale lokalne rozwarstwienie, spękanie czy rozluźnienie górotworu łatwo zabezpieczyć przed obwałami obudową kotwiovą lub osłonową różnego typu. W szczególnych przypadkach należy w tym celu wykonać kapitalną obudowę nośną.
- 2) Paraboliczne sklepienie ciśnień łatwo formuluje się w rozdrobionym ośrodku na małych głębokościach lub w kruchym masywie skalnym. Jest przystosowane do jednoosiowych obciążeń pionowych, między innymi, do zmiennych obciążeń naziomu na powierzchni terenu. Jego głównym elementem nośnym jest wytrzymałość na pionowe ścinanie, wynikająca z poziomego stałego sprężenia wstępnego, wywołanego samorozównanym rozporem. Wezłowania sklepienia muszą się opierać na nienaruszonej, sztywnej caliznie na wysokości ociosów lub spagu wyrobisk. Rozmieszczenie tych ostatnich pod sklepieniem nie może naruszać warunków jego podparcia i powinno chronić cały układ przed lokalnymi obwałami górotworu.
- 3) Sklepienie eliptyczne „stojące” tworzy się w warunkach czynnego parcia dwuosiowego i przystosowane jest do średnich głębokości zalegania mało naruszonego, nieprzeciążonego górotworu rozdrobionego lub skał skłonnych do uplastycznienia. Zagęszczona bądź skompresowana zamknięta strefa nośna „zanurzona” w górotworze stanowi skuteczne zabezpieczenie wyrobisk racjonalnie rozmieszczonych w jej wnętrzu. Tego typu ustrój nośny łatwo może się przystosować nie tylko do zmiennych obciążeń zewnętrznych, ale także do rozkładu i wielkości wyrobisk. Główne średnice elipsy mogą się zwiększać lub zmniejszać, stosownie do zmiany warunków pracy statycznej sklepienia nośnego. Oszacowane wytrzymałości sklepienia jako zamkniętej strefy nośnej na czyste ścinanie wydaje się wystarczającym testem globalnej stateczności zarówno stropu wyrobisk, ich ociosów jak i spagu.
- 4) Sklepienie kołowe to szczególnie przypadek osiowo symetrycznego układu nośnego ukształtowanego na dużych głębokościach w warunkach hydrostatycznego ciśnienia

i przekonsolidowania górotworu uplastycznionego. Promienie zaciśniętych, trwale sprężonych pierścieni nośnych mogą się swobodnie przystosować zarówno do wielkości obciążeń, jak i do wymiarów oraz rozmieszczenia wyrobisk. Dowolnej wielkości strefa nośna może „pływać” wewnątrz uplastycznionego górotworu.

- 5) Sklepienie eliptyczne „leżące” powstaje na bardzo dużych głębokościach w wyniku pełnego procesu przystosowania sklepienia ciśnień do zmieniających się warunków zalegania górotworu. Naruszony robotami podziemnymi górotwór staje się materiałem konstrukcyjnym, z którego samoczynnie tworzy się optymalne sklepienie ciśnień. Jest ono układem zamkniętym, maksymalnie poziomo sprężonym bocznym parciem biernym. Może chronić przed globalnym zawałem dużej rozpiętości wyrobiska, a nawet całe pola eksploatacyjne. Jest to trwały układ nośny – samoprzystosowalny w dowolnym ośrodku nieciąglym lub naruszonym. Wymaga jedynie lokalnych zabezpieczeń przed obwałami górotworu zdegradowanego, odspojonego od masywu. W ogólnym, trójosiowym stanie naprężeń i odkształceń nad wyrobiskami lub wokół nich tworzą się kopuły koliste lub odpowiednio w kształcie paraboloidy czy elipsoidy.

LITERATURA

- [1] *Galczyński S.*: Podstawy budownictwa podziemnego. Oficyna Wyd. PWr, Wrocław 2001
- [2] *Galczyński S., Wojtaszek A.*: Teoretyczna analiza mechanizmu przystosowania stateczności wyrobisk tunelowych. *Górnictwo i geoinżynieria*, Zeszyt 1, Kraków 2009, s. 201–207
- [3] *Machelski Cz.*: Modelowanie mostowych konstrukcji gruntowo-powłokowych. Dolnośl. Wyd. Ed., Wrocław 2008