

*Stefan Galczyński**, *Andrzej Wojtaszek***

TEORETYCZNA ANALIZA MECHANIZMU PRZYSTOSOWANIA STATECZNOŚCI WYROBISK TUNELOWYCH

1. Wstęp

Tunele zbudowane na przełomie XIX i XX wieku oraz wiele współczesnych podatnych konstrukcji podziemnych jednoznacznie dowodzą, że ich nośność, a zwłaszcza ich schematy pracy statycznej przystosowały się samoczynnie albo zostały przystosowane technicznie do otaczającego je środowiska, czyli do górotworu naruszonego robotami geoinżynieryjnymi [2]. Teoretyczny opis mechanizmu przystosowania układu nośnego zabezpieczającego stateczność i bezpieczeństwo wyrobisk podziemnych zależy od bardzo wielu czynników i przebiega jako proces racjonalizacji tego układu. Takie zjawiska jak współpraca obudowy z górotworem czy sklepienie ciśnień — to niewątpliwie powszechnie znane przykłady procesu przystosowania racjonalnie prowadzonych robót podziemnych. Z kolei, zawały lub tąpnięcia górotworu — to wynik nieprzystosowania, nieracjonalności tych robót w istniejących, konkretnych warunkach geotechnicznych.

2. Czynniki przystosowawcze geoinżynieryjnych układów nośnych

Jednym z podstawowych czynników przystosowania górotworu jako ośrodka lub dowolnego układu nośnego do zmieniających się warunków ich wyężenia jest lokalna degradacja, częściowe naruszenie ich pierwotnej nośności. Na przykład, w procesie zwietrzenia obudowy tuneli dolnośląskich jej bloki, jako główne elementy nośne, zachowały swoją wysoką wytrzymałość na ściskanie, a degradacji uległa jedynie zaprawa w spoinach. Spowodowało to przekształcenie dwustronnych więzów wewnętrznych obudowy na jednostronne [1].

* Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wroclawska, Wroclaw

** Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Politechnika Wroclawska, Wroclaw

Obudowa zachowała nie tylko ciągłość, ale także znacznie podwyższoną sztywność i nośność w warunkach naprężeń ściskających, a pełne upodatnienie w polach naprężeń rozciągających. O nośności i podatności przy ścinaniu decydują siły tarcia wewnętrznego występujące na wzajemnych stykach niezespojonych bloków kamiennych.

Drugim ważnym czynnikiem jest zdolność naruszonego ośrodka albo układu nośnego do przekształcenia się w nowy, racjonalnie uformowany układ nośny. Sam proces przystosowania zarówno ośrodka, jako materiału konstrukcyjnego, jak i całego układu może przebiegać samoczynnie lub może być sterowany zabiegami technicznymi. Najczęściej obluźwane fragmenty masywu skalnego, bądź gruntowego tworzą, mimo swej masywności, podatny układ nośny. Jest on zdolny do dużych, a nawet nieciągłych przemieszczeń, co sprzyja redystrybucji sił wewnętrznych, czyli odprężenia w strefie rozluźnionej, a koncentracji naprężeń w strefie ściskania — zaklinowania górotworu lub obudowy. W strefie zwiększonego ściskania rosną siły tarcia wewnętrznego i wytrzymałość układu na ścinanie.

Do podstawowych czynników przystosowania układów geoinżynierskich należy również niekonserwatywność ich obciążeń, głównie deformacyjnego ciśnienia górotworu. W procesie jego odprężenia, wstępnie sprężonego ciśnieniem pierwotnym, mamy do czynienia z układem optymalnym, racjonalnie przystosowanym do obciążeń. Jak te ostatnie wzrastają, następuje upodatnienie podpór tych układów, co implikuje ich odciążenie, podobnie jak odciążenie podatnych łuków stalowych obudowy ŁP.

3. Mechanizm przystosowania

W otwartym układzie: górotwór — obudowa czynniki przystosowawcze decydują o przebiegu całego procesu modyfikacji, racjonalizacji nie tylko geometrii wyjściowych modeli (schematów) obliczeniowych, ale także oddziaływań ich otoczenia, głównie czynnych lub biernych sił (reakcji) jako obciążeń niekonserwatywnych. Optymalnie przystosowanym układem nośnym jest, więc niewątpliwie podatne sklepienie ciśnień jako:

- sklepienie paraboliczne w jednoosiowym stanie jego obciążenia (rys. 1),
- sklepienie eliptyczne (kołowe) przy dwuosiowym obciążeniu ściskającym (rys. 2).

Są to niekonwencjonalne układy nośne, które wychodzą poza klasę układów Clapeyrona. Ich specyficzną cechą są podpory typu „łyżew”, czyli styk wezłowia sklepienia ze ścianami lub fundamentami na zasadzie docisku i tarcia na wzór styku dwóch bloków skalnych (kamiennych).

Nośność tego typu podpory określa zależność:

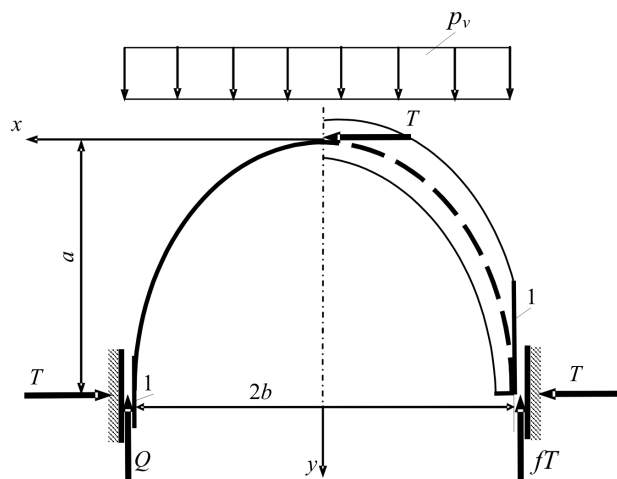
$$0 \leq Q \leq fT \quad (1)$$

gdzie:

Q — siła ścinająca, pionowa reakcja sklepienia R ;

f — współczynnik tarcia;

T — rozpór sklepienia ciśnień.



Rys. 1. Paraboliczne podatne sklepienie ciśnien:
 a — strzałka sklepienia, b — połowa jego rozpiętości, h — jego grubość, p_v — obciążenie,
 T — rozpór, fT — siła tarcia podpory, 1 — podpora „łyżwa”, Q — siła ścinająca

Podstawową cechą tak zdefiniowanej podpory jest potrzeba wstępnego sprężenia sklepienia w celu wzbudzenia sił tarcia przed jego obciążeniem. Samozrównoważony rozpór sklepienia — to właśnie rękojmia zachowania nośności podpór w ustalonym przedziale (1).

Wstępne sprężenie jest szczególnie ważnym czynnikiem w przypadku parabolicznego sklepienia ciśnien, w którym rozpór, jako reakcja pozioma, pojawia się dopiero po obciążeniu układu. Bez wstępnego rozporu układ ten byłby, więc w momencie przyłożenia obciążeń pionowych układem statycznie zmiennym. Nieco inaczej wygląda stan sklepienia eliptycznego lub kołowego przy dwuosowym obciążeniu ściskającym, gdzie składowa pozioma reakcji (rozpór) jest składową tego obciążenia. Wreszcie, sklepienia eliptyczne lub kołowe mogą tworzyć samoistne, zamknięte układy nośne zanurzone w górotworze na wzór pływających jednostek podwodnych [1].

Niezwykle ciekawym przypadkiem jest stan prawostronnej równowagi (równości) warunku (1). W tym stanie sklepienia stają się układami podatnymi zdolnymi przenosić tylko takie stałe, co do ich wielkości, obciążenia pionowe, których reakcje nie przekraczają sił tarcia. Każdy większy przyrost tego obciążenia zamienia układ w mechanizm, którego trwałą równowagę może zapewnić jedynie obciążenie niekonserwatywne zapewniające jego odciążenie w czasie osiadania stropu wyrobiska. Cechą przystosowania tego układu stają się rzeczywiście takie czynniki jak [3]:

- degradacja pierwotnej sztywności obudowy lub jej otoczenia, co sprzyja redystrybucji zarówno obciążeń jak i sił wewnętrznych (stanu naprężenia),
- upodatnienie i niesprężyste, czy wręcz nieciągłe odkształcenia (przemieszczenia) układu z możliwością lokalnego rozluźnienia bądź zagęszczenia górotworu, co umożliwia rozwój zrównoważonych stref parcia czynnego i biernego.

Ogólnie można stwierdzić, że samoprzystosowanie geoinżynierskiego układu nośnego polega na przystosowaniu stanu jego wyężenia do optymalnej nośności granicznej. Tę ostatnią łatwo oszacować wykorzystując maksymalne, niezawodne charakterystyki wytrzymałościowe górotworu i obudowy — ich wytrzymałości na ściskanie i ścinanie w warunkach trójosiowego ściskania. Można natomiast zaniechać spójność i wytrzymałość na rozciąganie jako wielkości małe i niestabilne, ponieważ ich pojawienie zwiększy jedynie bezpieczeństwo robót geoinżynierskich.

Graniczna nośność jednometrowego wycinka parabolicznego sklepienia ciśnien wynika zarówno z nośności podpór (1), jak i z dwóch znanych cech jego racjonalnej osi:

— momentu tożsamościowo równego zero

$$M = Ty - \frac{p_v x^2}{2} \equiv 0 \quad (2)$$

— równomiernego osiowego wyężenia sklepienia na ściskanie w jego kluczu

$$0 \leq \frac{T}{h} \leq R_c \quad (3)$$

gdzie:

- x, y — współrzędne,
- h — grubość sklepienia w kluczu,
- p_v — obciążenie pionowe,
- R_c — wytrzymałość na ściskanie,
- T — rozpór sklepienia.

Z warunków (1), (2) i (3) otrzymujemy oszacowanie nośności sklepienia parabolicznego:

— na ścinanie (1), z czego wynika maksymalnie dopuszczalna jego strzałka przy zadanej rozpiętości

$$a \leq \frac{fb}{2} \quad (4)$$

— na ściskanie (3) ograniczające maksymalne jego obciążenie po spełnieniu warunku (4)

$$p_n \leq \frac{f}{b} h R_c \quad (5)$$

gdzie:

- a — strzałka sklepienia,
- b — połowa jego rozpiętości,
- p_n — nośność odpowiadająca obciążeniu p_v .

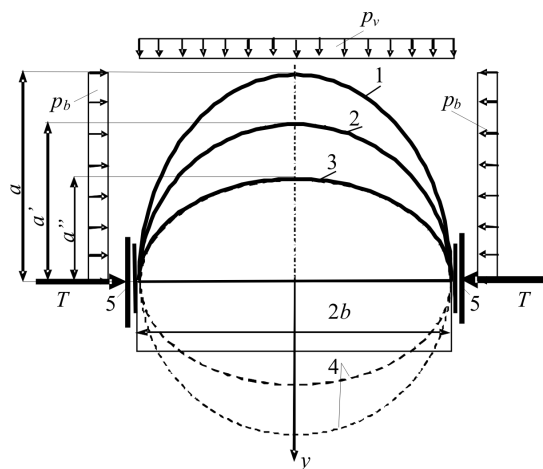
Otrzymaliśmy bardzo proste, klarowne warunki (4) i (5) określające graniczną nośność sklepienia parabolicznego z uwypukleniem tych elementów, które podlegają procesowi przystosowania:

- strzałka (a) jest regulowana procesem degradacji sztywności materiału tworzącego sklepienie; jego spękaniami, rozwarstwieniem lub rozluźnieniem,
- grubość sklepienia (h) powstaje najczęściej jako efekt komprymacji rzeczywistej obudowy jak i górotworu, który staje się materiałem konstrukcyjnym; strefa bierna podpierająca strefę parcia czynnego,
- iloczyn (hR_c) jest liczbowym czynnikiem przystosowującym wytrzymałość sklepienia (R_c) do potrzeb przenoszonego obciążenia p_v .

W przypadku sklepienia eliptycznego lub kołowego wyrażenia na moment (2) przyjmuje postać:

$$Ty - \frac{p_v x^2}{2} - \frac{K p_v y^2}{2} \equiv 0 \quad (6)$$

gdzie K — stosunek obciążenia bocznego do pionowego ($K = p_b/p_v = 0 \div \infty$).



Rys. 2. Eliptyczne (kołowe) sklepienie ciśnień: 1 — „stojące”, 2 — kołowe, 3 — „leżące”, 4 — zamknięte sklepienia, 5 — podpory — „łyżwy”, b — połowa rozpiętości wyrobiska, a — strzałki sklepień, p_v, p_b — pionowe i boczne obciążenia, T — rozpór

Warunek wytrzymałości na ścinanie nieco się komplikuje i można go zapisać następująco:

$$a \left(1 - \frac{fK}{2} \frac{a}{b} \right) \leq \frac{fb}{2} \quad (7)$$

ale nośność pozostaje niezmienna i wyraża się zależnością (5). W tym przypadku przystosowanie się układu do otoczenia zależy nie tylko od współczynnika tarcia górotworu i rozpiętości sklepienia, ale jeszcze od dwóch zależności proporcjonalnych:

- obciążenia bocznego do pionowego (K),
- stosunku strzałki sklepienia do połowy jego rozpiętości (a/b).

Jest to dość złożony mechanizm racjonalnego przystosowywania się układu, ale jest w pełni możliwy, gdy mamy do czynienia z otwartym układem masywnym. Górotwór pełniąc rolę nie tylko obciążenia, ale także materiału konstrukcyjnego, może nawet wielokrotnie powodować zmianę dowolnego układu wyjściowego. Pełna identyfikacja rzeczywistego układu nośnego będzie, więc możliwa jedynie za pomocą właściwie prowadzonego monitoringu. Całość robót geoinżynierskich wymaga niewątpliwie umiejętnego sterowania ich przebiegiem pod ciągłym nadzorem technicznym.

4. Wnioski praktyczne

Z przeprowadzonej pod kątem teorii przystosowania analizy wyrobisk podziemnych wynikają następujące wnioski praktyczne:

- 1) Bezpieczeństwo obiektów geoinżynierskich wymaga, aby już na etapie ich projektowania przewidzieć możliwość zmiany i przystosowania się wyjściowego układu nośnego do zmieniających się warunków jego pracy statycznej. Należy więc oprócz klasycznych obliczeń statycznych i wytrzymałościowych modelu (schematu) wyjściowego dokonać oszacowania granicznej nośności sklepienia ciśnien z podatnymi podporami — łyżwami (1).
- 2) Wyboru sklepienia należy dokonać intuicyjnie na podstawie eksperckiego doświadczenia i systematycznie je weryfikować za pomocą fachowego monitoringu w czasie wykonywanych robót geoinżynierskich. Orientacyjne przesłanki można uzależnić od głębokości założenia wyrobiska podziemnego w zależności od parametrów wzoru (7) [3]:
 - na małych głębokościach, gdy można uznać, że $K = 0$, przyjmujemy sklepienie paraboliczne,
 - na średnich głębokościach, gdy $K < 1$ (stan czynny), a strzałka sklepienia większa od połowy rozpiętości wyrobiska ($a > b$), przyjmujemy „stojące” sklepienie eliptyczne,
 - na dużych głębokościach, gdy $K = 1$ i $a = b$, mamy sklepienie kołowe,
 - na bardzo dużych głębokościach, gdy $K > 1$ (stan bierny), a strzałka sklepienia większa od połowy rozpiętości wyrobiska ($a < b$), zakładamy „leżące” sklepienie eliptyczne.
- 3) Wyniki monitoringu (pomiarów i obserwacji) muszą być na bieżąco interpretowane w celu skonstatowania, czy zachodzący proces przemian układu nośnego jest zgodny

z przewidywaniami, czy nie. W razie niezgodności należy podjąć decyzję w dwóch kierunkach:

- uznać, że proces można skorygować poprzez zastosowanie właściwych zabiegów technologicznych,
- wstrzymać prace w celu uniknięcia awarii i opracować nowy wariant realizacji robót geoinżynierskich.

Zarówno wstrzymanie robót, jak i zastosowanie wszelkich zabiegów technicznych musi być prowadzone na podstawie projektu gwarantującego właściwe warunki BHP.

- 4) Spośród znanych zabiegów technicznych należy wybierać te najbardziej skuteczne w konkretnych warunkach *in situ* i najmniej kosztowne lub uciążliwe dla środowiska. Można je sklasyfikować następująco:
- odprężenie górotworu wokół wyrobiska lub jego obudowy,
 - kotwienie górotworu, w razie potrzeby z osłoną z siatki, torkretu, okładziny itp.,
 - iniekcyjne wzmocnienie górotworu cementacją, silikatyzacją, bitumizacją itd.,
 - zastosowanie tymczasowej lub stałej obudowy nośnej, zwłaszcza podatnej zdolnej do przystosowania się do działających obciążeń.

LITERATURA

- [1] Dobrociński S.: Stabilność rozwiązań zagadnień odporności udarowej konstrukcji. A.M.W., Gdynia, 2000
- [2] Galczyński S.: Przykłady stateczności wyrobisk tunelowych w świetle teorii ich przystosowania do górotworu. XXXII ZSMGiG, 2009, w materiałach
- [3] Galczyński S., Wojtaszek A.: Nośność podatnych zespolonych konstrukcji podziemnych. XXVIII ZSMGiG, Oficyna Wyd. PWr, Wrocław, 2005, str. 159–168
- [4] Żukowski S.: Ocena bezpieczeństwa płaskich konstrukcji prętowych w aspekcie teorii przystosowania. Oficyna Wyd. PWr, Wrocław, 2006