

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

PROCES SAMOPRZYSTOSOWANIA NARUSZONEGO GÓROTWORU W GEOINŻYNIERYJNY UKŁAD NOŚNY

1. Wstęp

Zjawiska, jakie zachodzą w górotworze po wyczerpaniu granicznej nośności masywów skalnych lub gruntowych, są typowymi przykładami fizycznej istoty teorii przystosowania układów nośnych do zmieniających się warunków ich pracy statycznej. Zawały wyrobisk podziemnych albo lawinowe osuwiska skarp czy zboczy — to niewątpliwe przypadki wytrzymałościowego zniszczenia elementu po pełnym, globalnym wyczerpaniu jego nośności. Z kolei obwały bądź osuwiska lokalne są przykładami jedynie początku szerszego, bardziej ogólnego procesu niszczenia układu, z możliwością jego przystosowania do zmieniających się warunków pracy. Zapoczątkowany proces może zakończyć się [6]:

- nieprzystosowaniem, gdy potencjał energii dyssypacji osiąga nieskończoność ($w_p = \infty$) i wówczas następuje globalne zniszczenie (zawał lub lawinowe osuwisko),
- przystosowaniem z ograniczonym potencjałem energii dyssypacji ($w_p < \infty$) i ostatecznym samozrównoważeniem układu (np. zaklinowaniem lub zasklepieniem górotworu).

Na ogół w robotach podziemnych z nagłym zniszczeniem układu nośnego wiążą się zjawiska dynamiczne (wstrząsy, tąpnięcia), a samo zniszczenie ma charakter katastrofy górniczej lub budowlanej. Podobny charakter mają lawinowe osuwiska skarp czy zboczy. Próba uniknięcia tego typu katastrof jest związana z koniecznością wykonania solidnej, często masywnej konstrukcji nośnej, z reguły bardzo kosztownej, ale niestety nie zawsze skutecznej.

Wobec tego bardziej racjonalnym, optymalnym działaniem w geoinżynierii jest wykonywanie robót ziemnych i podziemnych z wykorzystaniem efektu samoprzystosowania górotworu do zmieniającego się stanu jego zalegania, zwłaszcza jego degradacji.

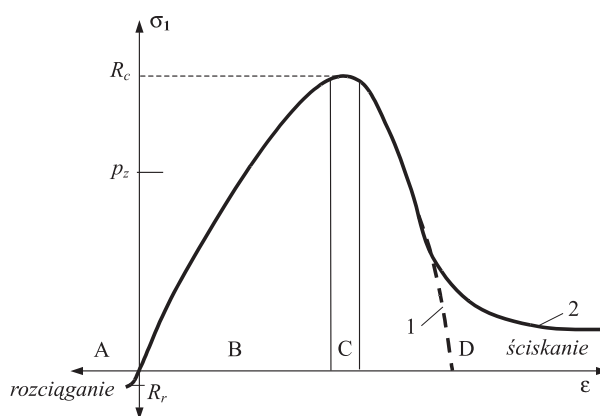
* Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska, Wrocław

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

Opis i zrozumienie teorii przystosowania jako niekonwencjonalnego działu mechaniki górotworu naruszonego — to jedyna gwarancja maksymalnie bezpiecznego prowadzenia robót geoinżynierskich z możliwością minimalizacji ich ogromnych kosztów. Końcowym efektem takiego działania, zarówno w masywie skalnym, jak i gruntowym, musi być racjonalny, optymalny układ nośny, najczęściej podatne sklepienie ciśnień zdolne do przystosowania się do przenoszenia czynnego i biernego oddziaływania górotworu. Będzie to rodzaj obudowy (konstrukcji) podatnej współpracującej z górotworem, a więc skuteczny, o umiarkowanych kosztach układ nośny: obudowa (konstrukcja) — górotwór.

2. Analiza czynników teorii przystosowania w nośności granicznej

Głównym, wiodącym czynnikiem decydującym o nośności górotworu jest rodzaj i stan jego wyciężenia. Ilustruje to pełny zakres ścieżki równowagi statycznej przeciętnej próby górotworu (rys. 1).



Rys. 1. Ścieżka równowagi statycznej badanej próby górotworu: A, B, C i D — przedziały rozciągania, przedniszczeniowy przy ściskaniu, nośności granicznej i pozniszczeniowy z możliwością przystosowania, 1 i 2 — wykresy nieprzystosowania ($w_p = \infty$) i przystosowania ($w_p < \infty$), R_r i R_c — wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie, p_z — pionowe ciśnienie pierwotne, wstępna kompresja górotworu

W praktycznych obliczeniach oszacowania technicznej nośności górotworu, jego podporności, należy uwzględnić następujące okoliczności charakteryzujące górotwór jako materiał konstrukcyjny:

- przedział (A) bardzo niepewnej wytrzymałości na rozciąganie najlepiej pominąć w oszacowaniu, co wpłynie na wzrost bezpieczeństwa robót inżynierskich, a strefę górotworu „rozciąganego” potraktować jako balast, czyli obciążenie statyczne;

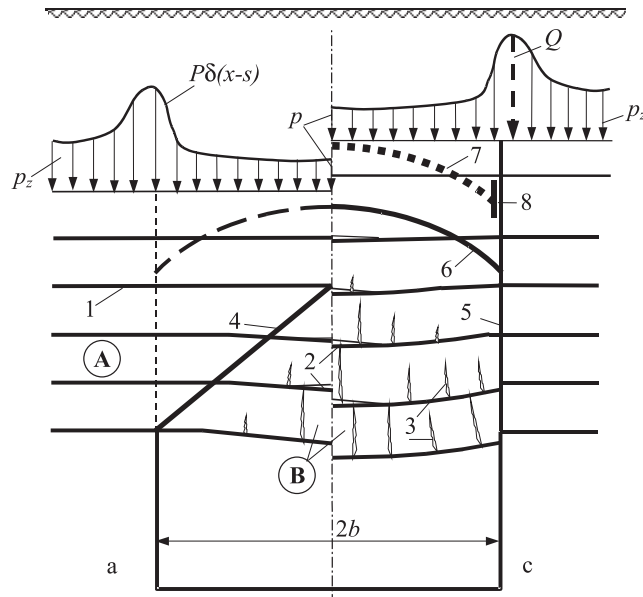
- w przedziale nośności przedniszczeniowej (B) stosować konwencjonalne metody obliczeń ośrodków czy układów ciągłych, uwzględniając obciążenia deformacyjne;
- szczególnie ważnym elementem teoretycznej analizy przedziału nośności granicznej (C) musi być bieżący monitoring w otoczeniu wykonywanych robót, aby rozpoznać charakter zbliżającego się zniszczenia górotworu i wyeliminować gwałtowne zawały lub lawinowe osuwiska; jeśli trzeba, muszą być zastosowane zabiegi technologiczne gwarantujące rozciągnięcie w czasie procesu niszczenia istniejącego układu nośnego, czyli długości przedziału;
- tak posterować przystosowaniem górotworu naruszonego w przedziale pozniszczeniowej nośności granicznej (D), aby uformował się stabilny, ale jednocześnie podatny układ nośny: obudowa (konstrukcja) — górotwór.

2.1. Proces przystosowania degradującego się górotworu po naruszeniu jego pierwotnej nośności

Niezależnie od tego, w jakim stanie wyjściowym znajduje się górotwór tworzący masyw, panuje w nim pierwotny stan naprężeń, a więc wstępne sprężenie ściskające. Po wykonaniu wyrobiska podziemnego w masywie obserwujemy przede wszystkim pionowe przemieszczenie i odprężenie nadkładu bezpośrednio w jego stropie. Szczególnie wyraźnie zjawisko to występuje w górotworze uwarstwionym.

W takim przypadku możemy wyróżnić następujące etapy procesu naruszenia wyjściowego zalegania warstw skalnych:

- 1) Ugięcie warstw stropowych i całkowite pionowe sprężyste odprężenie nadkładu nad wyrobiskiem. Pojawia się koncentracja naprężeń w narożach lub wezłowiach wyrobiska, implikując pierwsze zagrożenia dla nośności skał. Samozrównoważone naprężenia poziome zachowują wstępne sprężenie stropu.
- 2) W wyniku ugięcia warstw skalnych następuje ich rozwarstwienie i spękanie po stronie rozciągania (rys. 2). Są to pierwsze przejawy lokalnej degradacji górotworu i początek bardzo intensywnej chaotycznej redystrybucji jego sił wewnętrznych (naprężeń). Pojawiają się lokalne nieciągłości upodabniające masyw skalny do rumoszu, masywu gruntowego. Dyslokacje po powierzchniach nieciągłości generują bierne siły tarcia, które ograniczają wielkość potencjału dyssypowanej energii ($w_p < \infty$) i sprzyjają zaklinowaniu, zasklepieniu się naruszonego górotworu. Zaczyna się proces jego samoczynnego przystosowania do nowych warunków jego zalegania i pracy statycznej.
- 3) Dalszy rozwój degradacji górotworu i redystrybucji sił wewnętrznych, zwłaszcza wspomagany właściwymi zabiegami technologicznymi, powinien doprowadzić do ukształtowania się racjonalnego układu nośnego, czyli podatnego sklepienia ciśnień. Będzie to optymalna konstrukcja w pełni przystosowana do oddziaływania górotworu zarówno w zakresie obciążeń statycznych, jak i deformacyjnych.



Rys. 2. Proces degradacji górotworu uwarstwionego i redystrybucja jego sił wewnętrznych:
a — początek degradacji jego stropu, b — połowa rozpiętości wyrobiska, c — koniec procesu przystosowania górotworu naruszonego, A i B — strefy nienaruszonego i naruszonego górotworu,
 p_z i p — pierwotne i wtórne ciśnienie górotworu, $P\delta(x-s)$ i Q — dystrybucyjna koncentracja ciśnienia i siła ścinania w stropie wyrobiska, 1 — uwarstwienie, 2 — rozwarstwienia, 3 — spękania, 4 — kliny odłamu, 5 — powierzchnia poślizgu nieciągniętego, 6 — sklepienie ciśnień, 7 — podatne sklepienie ciśnień, 8 — jego podpora „łyżwa”

Niewątpliwie część obciążeń statycznych musi być równoważona odpowiednimi zabiegami technicznymi (obudowa osłonowa, kotwienie, narzut betonowy itd.), ale obciążenia deformacyjne ulegają samoczynnej redukcji w wyniku odprężenia górotworu nad upodmiotowującym się sklepieniem. O równowadze układu sklepienie–górotwór zadecyduje tarcie na powierzchni poślizgu wezłowi sklepienia ciśnień.

Wielkość siły tarcia w polu naprężeń ściskających określa rozpór sklepienia wygenerowany jego niekonserwatywnym, zmniejszającym się obciążeniem (odciążeniem) i wielkością współczynnika tarcia suchego:

$$F = Tf \geq Q \quad (1)$$

gdzie:

- F i Q — siły tarcia i ścinania,
- T — rozpór,
- f — współczynnik tarcia.

2.2. Teoretyczna analiza procesu przystosowania nośności górotworu naruszonego

Matematyczny opis redystrybucji sił wewnętrznych naruszonego górotworu wymaga zastosowania metod rachunku dystrybucyjnego, za pomocą którego [5] przebieg procesu redystrybucji sił w naruszonej górotworze można przedstawić w dwóch wirtualnie zdefiniowanych etapach (rys. 3):

- 1) Całkowite pionowe obciążenie fragmentu nienaruszonego górotworu o rozpiętości l wynosi $l \cdot p_z$, a potencjał jego energii dyssypacji sięga nieskończoności ($w_p = \infty$). W wyniku degradacji ośrodka obciążenie ciągle przekształca się w sumę losowo rozłożonych sił skupionych, czyli:

$$lp_z = \sum_{i=1}^m P_i \delta(x - s_i) \quad (2)$$

gdzie:

- l — rozpiętość strefy naruszonej,
- p_z — ciśnienie pierwotne,
- P_i — siła skupiona w punkcie i ,
- i — kolejne numery sił,
- m — ich liczba,
- s_i — punkty przyłożenia sił,
- $\delta(x - s_i)$ — impulsowa funkcja Diraca.

Jest to etap dyssypacji energii z możliwością ograniczenia jej potencjału.

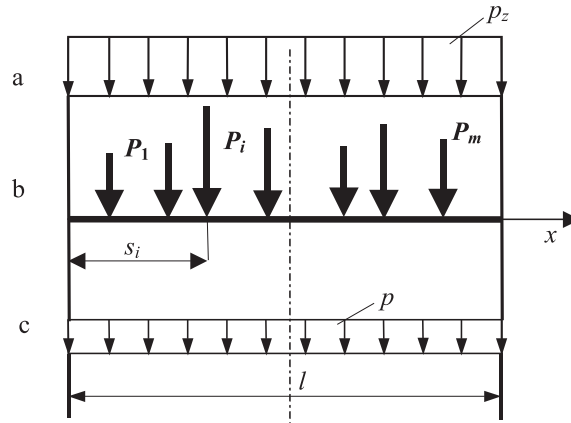
- 2) Probabilistyczny proces rozwoju degradacji naruszonego górotworu przetwarza układ sił adekwatnie do uogólnionych, często nieciągłych, odkształceń jego bloków, brył lub ziarn, co pozwala na przekształcenie sumy (2) w całkę, gdy m zdąży do nieskończoności:

$$p_z > \frac{1}{l} \sum_{i=1}^{m \rightarrow \infty} P_i \delta(x - s_i) \Delta s = \frac{1}{l} \int_{-\infty}^{\infty} P(s) \delta(x - s) ds = \frac{1}{l} P(x) = p \quad (3)$$

gdzie p oznacza ciągle obciążenie końcowego układu nośnego.

W wyniku procesu redystrybucji sił wewnętrznych i właściwie przebiegającego procesu przystosowania naruszonego górotworu, otrzymujemy samorzównoważony układ nośny — podatne sklepienie ciśnień obciążone zredukowanym ciśnieniem pionowym p . Zadecydowały o tym dwa czynniki:

- ograniczenie potencjału energii dyssypacji w uformowanym układzie ($w_p < \infty$),
- ponowna pełna jego stabilizacja.



Rys. 3. Proces redystrybucji sił w górotworze naruszonej: a — stan wyjściowy (pierwotny), b — redystrybucja, c — stan końcowy (ustabilizowany), p_z i p — pierwotne i wtórne obciążenie, P_i — siły skupione, l — rozpiętość strefy naruszonej, s_i — punkty przyłożenia sił, m — ich liczba

2.3. Analiza sztywności naruszonego górotworu

Pierwotnie i wtórnie spękanе warstwy uginającego się stropu wyrobiska są źródłem znacznego zmniejszenia sztywności giętej uwarstwionego górotworu. W ujęciu rachunku dystrybucyjnego można to sformułować następująco (2):

$$EI - \rho(x) \sum_{i=1}^m r_i \delta(x - s_i) = M(x) \rho(x) \quad (4)$$

gdzie:

- EI — sztywność giętna górotworu nienaruszonego,
- ρ — promień krzywizny,
- r_i — współczynniki przystosowania naruszonego górotworu,
- s_i — miejsca spękań,
- $i = 1 \dots m$ — ilość spękań,
- $M(x)$ — moment zginania.

Po dwukrotnym zróżniczkowaniu zależności (4) otrzymujemy zmodyfikowane równanie różniczkowe belki o stałej początkowej sztywności, a obciążonej równomiernie ciśnieniem p :

$$EI \frac{d^4 z}{dx^4} = p + \sum_{i=1}^m r_i \delta_{xx}(x - s_i) \quad (5)$$

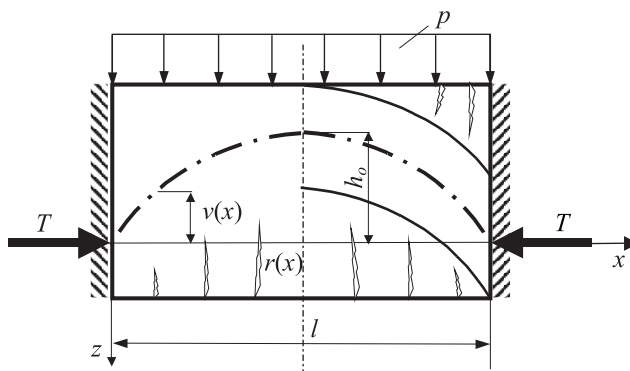
Łatwo zauważyć, że w rezultacie całkowitego, ciągłego spękania belki, gdy liczba rys zdąży do nieskończoności ($m \rightarrow \infty$), sumę możemy zastąpić całką i zapisać w postaci:

$$\frac{1}{l} \sum_{i=1}^{\infty} r_i \delta(x - s_i) \Delta s = \int_0^l r(s) \delta(x - s) ds = r(x) \quad (6)$$

gdzie:

- l — długość belki,
- $r(x)$ — współczynnik, jako funkcja przystosowania naruszonego górotworu.

Współczynnik przystosowania górotworu naruszonego $r(x)$ jest funkcją i spełnia rolę momentu reaktywnego przeciwdziałającego rozwarciu rys (szczelin). Źródłem takiego momentu są zrównoważone poziome siły podłużne ściskające belkę, czyli siły jej wstępnego sprężenia rozporom T . Podobnie jak tarcie (1), $r(x)$ jest uogólnioną siłą (momentem) bierną ograniczającą wielkość potencjału energii dyssypacji ($w_p < \infty$). Ograniczenie spękań jest więc niezbędnym czynnikiem procesu przystosowania układu nośnego do zmieniających się warunków jego pracy statycznej. W konstrukcjach taką rolę pełni zbrojenie, kotwienie, wstępne sprężenie, zaklinowanie itd.



Rys. 4. Utwierdzona warstwa (belka) spękanego górotworu: $r(x)$ — spękania jako funkcyjny współczynnik przystosowania, T — rozpór, $v(x)$ — jego ramię (oś sklepienia), p — obciążenie, l — rozpiętość belki, h_0 — strzałka sklepienia

Po uwzględnieniu zależności (6) we wzorze (5) można zapisać niekonwencjonalne równanie różniczkowe belki spękanej (rys. 4):

$$EI \frac{d^4 z}{dx^4} = p + \frac{d^2 r(x)}{dx^2} \quad (7)$$

Łatwo zauważyć, że jest to równanie belki obciążonej nie tylko poprzecznie, ale również stałą siłą podłużną ze zmiennym ramieniem, na przykład w postaci:

$$r(x) = Tv(x) \quad (8)$$

gdzie:

- T — siła podłużna,
- $v(x)$ — jej zmienne wzdłuż belki ramię.

W tych warunkach równanie (7) można przekształcić następująco:

$$EI \frac{d^4 z}{dx^4} = p + T \frac{d^2 v(x)}{dx^2} \quad (9)$$

Z ostatniego zapisu równania widać, że belka pozostanie w równowadze, mimo spękań, jeśli siła T będzie siłą ściskającą i spowoduje ograniczenie propagacji rys. Musi więc nastąpić ograniczenie potencjału energii dyssypacji ($w_p < \infty$) i pełna stabilizacja układu, co będzie możliwe po całkowitym wyeliminowaniu momentu zginania $M = 0$, czyli po dwukrotnym scałkowaniu zależności (9) i rozwiązaniu tej tożsamości otrzymujemy ogólne równanie osi sklepienia ciśnień:

$$v(x) = -\frac{px^2}{2T} - \frac{Ax}{T} - \frac{B}{T} \quad (10)$$

gdzie A i B oznaczają stałe całkowania.

Warunki wewnętrznej stabilizacji spękanej belki oznaczają, że przy:

$$\begin{aligned} x = 0, \quad v(0) = 0 \quad \text{ i } \quad B = 0 \\ x = l, \quad v(l) = 0 \quad \text{ a } \quad A = -\frac{pl}{2} \end{aligned} \quad (11)$$

wobec tego równanie osi przyjmuje postać:

$$v(x) = \frac{p}{2T}(lx - x^2) \quad (12)$$

Jest to paraboliczna oś sklepienia ciśnień o znanych parametrach:

— strzałce h_o

$$h_o = \frac{pl^2}{8T} \quad (13)$$

— rozporze T

$$T = \frac{pl^2}{8h_0} \quad (14)$$

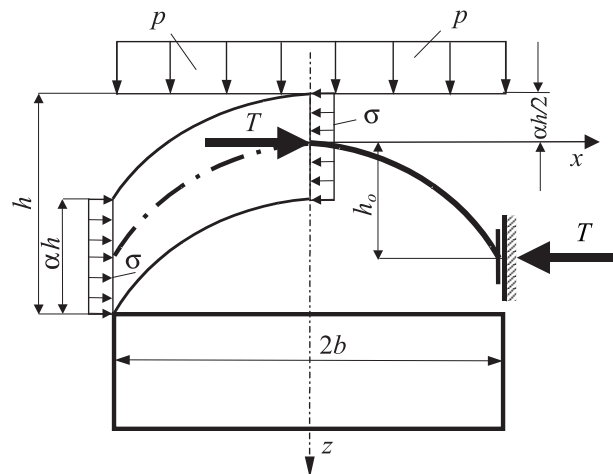
Jeżeli przeniesiemy początek układu współrzędnych do klucza sklepienia przyjmując za $v(x) = v(l/2) - v(x)$, a $x = l/2 + x$, to otrzymamy równanie paraboli Protodiakonowa wyprowadzone dla ośrodka rozdrobnionego, czyli masywu gruntowego:

$$v(x) = \frac{px^2}{2T} \quad (15)$$

Ostateczne zrównoważenie całego układu zależy od nośności i możliwości jego updatnienia.

3. Oszacowanie nośności upodatnionego sklepienia ciśnien

Aby się przekonać o możliwości przystosowania się naruszonego górotworu do zmieniających się warunków jego zalegania w wyniku postępującej degradacji, musimy ukształtować końcowy układ nośny i oszacować jego nośność graniczną. Z dotychczasowej analizy wynika, że oszacowaniu należy poddać podatne sklepienie ciśnien, które może się uformować w dowolnym górotworze: od zwięzłego, poprzez zaburzony, do rozdrobnionego (rys. 5).



Rys. 5. Schemat obliczeniowy podatnego sklepienia ciśnien: h i b — wysokość i połowa szerokości strefy naruszonego górotworu, α — współczynnik zasięgu strefy nośnej naruszonego górotworu, h_0 — strzałka sklepienia podatnego, σ — równomierne wyężenie sklepienia

Ostatecznie ukształtowane sklepienie musi spełniać dwa podstawowe warunki nośności:

— wytrzymałości na ścinanie (1)

$$bp \leq Tf \quad (16)$$

— wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie

$$\sigma = \frac{T}{\alpha h} \leq R_c \quad (17)$$

gdzie:

αh — przekrój pionowy sklepienia o szerokości 1 m,

α — współczynnik zasięgu strefy nośnej naruszonego górotworu,

R_c — wytrzymałość górotworu w strefie naruszonej,

h — wysokość tej strefy.

Wprowadzając do zależności (14) strzałkę sklepienia jako funkcję współczynnika α (rys. 5), otrzymamy dla $l = 2b$:

$$T = \frac{pb^2}{2(1-\alpha)h} \quad (18)$$

a ze związku (17) ogólne wyrażenie na oszacowanie nośności sklepienia na jednoosiowe ściskanie:

$$p \leq 2(1-\alpha)\alpha R_c \left(\frac{h}{b}\right)^2 \quad (19)$$

Z warunku optymalizacji tej funkcji względem współczynnika α ($dp/d\alpha = 0$) otrzymujemy jego wartość ($\alpha = 0,5$), a następnie maksymalną nośność sklepienia:

$$p \leq \frac{R_c}{2} \left(\frac{h}{b}\right)^2 \quad (20)$$

Zależności (16), (18) i (20) pozwalają na sformułowanie optymalnego zasięgu h strefy naruszonego górotworu:

$$b\sqrt{\frac{2p}{R_c}} \leq h \leq bf \quad (21)$$

W czasie wykonywania robót podziemnych musi być monitorowany zasięg strefy naruszenia górotworu, zwłaszcza jego rozwarstwienia bądź rozluźnienia, aby nie naruszyć warunku (21). Znak równości w prawostronnej części tego warunku będzie oznaczał upodatkowanie sklepienia i przyrost pionowego zaciskania stropu wyrobiska. Stan ten wymaga specjalnego eksperckiego nadzoru.

4. Wnioski

Z przeprowadzonej analizy stanu zalegania górotworu naruszonego robotami geoinżynierskimi wynikają następujące wnioski teoretyczne i praktyczne:

- 1) Każdy maszyn gruntowy lub skalny po naruszeniu jego pierwotnego stanu zalegania zamienia się w materiał konstrukcyjny umożliwiając kształtowanie się racjonalnej konstrukcji nośnej, która w dużym stopniu samoistnie zabezpiecza miejsce prowadzonych robót geoinżynierskich i sprzyja minimalizacji ich kosztów. W warunkach niekonserwatywnych obciążeń powstały układ nośny może się przystosować do zmieniających się warunków jego pracy statycznej.
- 2) W przypadku robót podziemnych racjonalnym układem nośnym jest niewątpliwie sklepienie ciśnień upodatkowane w węzłach lub ociosach wyrobiska, względnie w jego spagu. Takie sklepienie jest doskonale przygotowane jako obudowa podatna do skutecznego przenoszenia ciśnienia odprężającego się górotworu. Znaczne nieciągłe przemieszczenia podatnego sklepienia — to gwarancja jego odciążenia i pełnego przystosowania do zmieniających się warunków pracy statycznej, a w końcowym efekcie dobre zabezpieczenie stropu wyrobiska przed zawałem.
- 3) W celu minimalizacji ryzyka prowadzenia robót geoinżynierskich należy przewidzieć co najmniej dwa warianty projektu wykonawstwa tych robót:
 - racjonalny, najtańszy wariant uwzględniający zjawisko (proces) przystosowania ($w_p < \infty$),
 - jeśli nie następuje samoprzystosowanie ($w_p = \infty$), wariant droższy przewidujący metody wzmocnienia lub zabezpieczenia górotworu w otoczeniu wykopów lub wyrobisk podziemnych kotwieniem, torkretowaniem, obudową osłonową lub podporową itp.

Decyzja o tym, który wariant stosować, musi być podejmowana na podstawie bieżącego monitoringu po oszacowaniu stanu zagrożenia obwałami lub lokalnymi osuwiskami, które sygnalizują początek procesu zawałów bądź lawinowych osuwisk.

LITERATURA

- [1] *Galczyński S.*: Podstawy budownictwa podziemnego. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2001
- [2] *Galczyński S., Wojtaszek A.*: Charakterystyka nośności zakotwionego stropu płaskiego jako podatnej niekonwencjonalnej obudowy podziemnej. ZSMGiG XXIX, Krynica, 2006, s. 465–476

- [3] *Galczyński S., Wojtaszek A.*: Charakterystyka nośności zakotwionego stropu jako podatnego sklepienia ciśnienia. ZSMGiG XXIX, Krynica, 2006, s. 477–485
- [4] *Galczyński S., Wojtaszek A.*: Projektowanie obudowy kotwiowej wyrobisk podziemnych. UWND AGH, Górnictwo i Geoinżynieria, r. 31, z. 3/1, 2007, s. 187–198
- [5] *Trajdos-Wróbel*: Matematyka dla inżynierów — kurs wyższy, Warszawa, WNT 1965
- [6] *Żukowski S.*: Ocena bezpieczeństwa płaskich konstrukcji prętowych w aspekcie teorii przystosowania, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2006