ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2001
Seria: BUDOWNICTWO z. 93 Nr kol.1514

Krzysztof AŁYKOW*
Politechnika Wrocławska

SKOTWIONY GÓROTWÓR JAKO MIEJSCOWY MATERIAŁ KONSTRUKCYJNY OBIEKTÓW PODZIEMNYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono zależności umożliwiające określenie minimalnej miąższości skotwionego stropu wyrobiska, dla której obudowa kotwiowa zapewnia wytworzenie się naturalnego sklepienia ciśnień. W przeprowadzonym rozumowaniu jest ono elementem przenoszącym oddziaływania górotworu, zaś kotwie stanowią jedynie narzędzie wymuszające ukształtowanie się w górotworze sklepienia o odpowiedniej geometrii.

BOLTING ROCK AS LOCAL STRUCTURAL MATERIAL OF UNDERGROUND SHAFTS

Summary. The paper deals with dependences enabling determination of minimum depth of bolted rock, for which is guaranted creation natural pressure arch. The natural pressure arch shifting pressure of the rock mass and the bolts are only a tool forcing the formation of the arch of adequate geometry.

1. Wprowadzenie

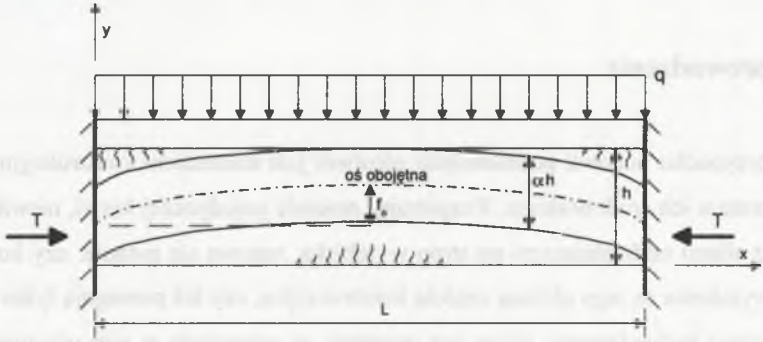
W przypadku budowli podziemnych górotwór jest materiałem konstrukcyjnym, który jest jednocześnie ich środowiskiem. Rozpatrując nośność pojedynczej kotwi, niewielką w porównaniu z siłami oddziałującymi na strop wyrobiska, nasuwa się pytanie: czy kotwie, spinając strop wyrobiska są jego główną częścią konstrukcyjną, czy też pomagają tylko miejscowemu materiałowi budowlanemu, jakim jest górotwór, w zaistnieniu w nim odpowiednich warunków do redystrybucji naprężeń i wytworzenia się naturalnego układu nośnego? Analizy i obserwacje prowadzone przy określaniu nośności obiektów podziemnych, np. wykonywanych nową metodą austriacką [1], czy podczas wykonywania prac zabezpieczających wyrobiska górnicze, wskazują na inne zachowywanie się obiektów z obudową kotwiową niż można byłoby się tego spodziewać stosując klasyczne podejście do zagadnienia nośności konstrukcji

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż Stefan Gałczyński.

tego typu. Niniejszy artykuł stanowi próbę określenia sposobu wciągnięcia górotworu do pracy poprzez wykorzystanie kotwi zadających mu zupełnie inną rolę, niż to było przyjmowane dotychczas.

2. Określenie warunków dla bezawaryjnej stabilizacji wyrobiska podziemnego

Rozpatrzmy przypadek wyrobiska podziemnego o kształcie prostokątnym. W wyniku jego powstania górotwór w bezpośrednim sąsiedztwie ulega odprężeniu, czego widocznym efektem są spękania oraz zaciskanie się wyrobiska. Spękania stropu powstające w środkowej jego części, będące efektem naprężeń rozciągających, powodują przesunięcie osi obojętnej nośnej części stropu w głąb górotworu do wartości f_o w środku rozpiętości. Ich rozwój może doprowadzić do ubytków materiału, zjawiska niekorzystnego pociągającego za sobą zmianę geometrii nośnej części stropu. Poprzez wprowadzenie kotwi w górotwór, generujemy proces wydzielenia z niego pewnej części, w której zachodzą procesy redystrybucji naprężeń. Wymuszamy wytworzenie się w nim elementu nośnego, rodzaj konstrukcji o określonej geometrii [2]. Po wykonaniu skotwienia zabezpieczamy strop wyrobiska przed lokalną utratą stateczności w obszarach pomiędzy kotwiami siatką bądź obrzutką z torkretu.



Rys. 1. Geometria sklepienia ciśnień w stropie górotworu
Fig. 1. Geometry of a vault of the forces

3. Określenie miąższości warstwy stropu sprężonej kotwami w celu wytworzenia się w niej sklepienia ciśnień

W efekcie procesów opisanych wyżej w stropie ukształtowuje się płaskie sklepienie ciśnień. Powstanie sklepienia uwarunkowane jest możliwością zaistnienia reakcji poziomych w

obrębie rozpatrywanego układu statycznego. Chodzi o to, aby niespękana część przekroju, która zapewnia jego nośność, miała sztywne oparcie w kierunku poziomym, umożliwiające poziome jej sprężenie. Istotne jest też, aby miała odpowiednią wytrzymałość na ściskanie zapewniającą stateczność sklepienia ciśnień. W rozpatrywanym przez nas przypadku elementami, na których wspiera się sklepienie ciśnień są ociosy wyrobiska. Geometrię sklepienia ciśnień określają zależności:

z warunku na ściskanie

$$q \leq 2 \cdot \left(\frac{h}{L}\right)^2 \cdot R_c \tag{1}$$

z warunku na ścinanie

$$\frac{2 \cdot h}{L} \leq tg\phi \tag{2}$$

gdzie:

h – wysokość sklepienia ciśnień,
L – szerokość wyrobiska,
ϕ – kąt tarcia wewnętrznego,
R_c – wytrzymałość na ściskanie,
q – obciążenie sklepienia ciśnień.

Ponieważ niemożliwe jest dokładne określenie spójności górotworu w obrębie kształtującego się w sposób niekontrolowany sklepienia ciśnień, przyjmujemy je równe zero. W ten sposób jesteśmy po stronie bezpiecznej, zachowując dodatkowy, bliżej nieokreślony, zapas bezpieczeństwa [3].

Reakcja pozioma w miejscu oparcia sklepienia ciśnień na ociosie wynosi:

$$T = \frac{q \cdot L^2}{8 \cdot f_o} \tag{3}$$

W przypadku gdy rozpatrujemy układ jako rzeczywiste sklepienie ciśnień ($M = 0$),

$$f_o = h - \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot h - \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot h = (1 - \alpha) \cdot h \tag{4}$$

stąd:

$$T = \frac{q \cdot L^2}{8 \cdot (1 - \alpha) \cdot h} \tag{5}$$

Zasięg sklepienia ciśnień możemy ograniczyć wprowadzając kotwie. Ze względów ekonomicznych niezbędne jest określenie minimalnej długości kotwi, dla której zapewniona jest nośność sklepienia [4]. Naprężenia w miejscu oparcia sklepienia na ociosach przyjmują wartość:

$$\sigma = \frac{T}{F} \tag{6}$$

gdzie pole przekroju poprzecznego sklepienia na 1 mb długości wyrobiska:

$$F = \alpha \cdot h \tag{7}$$

Stateczność sklepienia ciśnień będzie zapewniona, gdy spełniony będzie warunek:

$$\frac{q \cdot L^2}{8 \cdot (1-\alpha)\alpha \cdot h^2} \leq R_c \tag{8}$$

Po podstawieniu (6) otrzymujemy zależność:

$$\chi_1 \geq \frac{1}{(1-\alpha) \cdot \alpha} \tag{9}$$

gdzie:

$$\chi_1 = R_c \frac{8h^2}{qL^2} \tag{10}$$

Rozwiązaniem nierówności (9) jest przedział stosowalności α

$$\alpha \in \left[\frac{1-\sqrt{1-\frac{4}{\chi_1}}}{2}, \frac{1+\sqrt{1-\frac{4}{\chi_1}}}{2} \right] \tag{11}$$

dla $\chi_1 \geq 4$, co określa minimalną wysokość sklepienia ciśnień jak w zależności (1).

$$R_c \frac{8h^2}{qL^2} \geq 4 \tag{12}$$

$$h \geq L \cdot \sqrt{\frac{q}{2 \cdot R_c}} \tag{13}$$

Wzory (13) oraz (2) określają graniczne wysokości bezmomentowego sklepienia ciśnień, dla których zapewniona jest jego nośność

$$L \cdot \sqrt{\frac{q}{2 \cdot R_c}} \leq h \leq \frac{\mathrm{tg}\phi}{2} \cdot L \tag{14}$$

4. Sklepienie jako proces redystrybucji sił wewnętrznych

Analogicznie do poprzedniego przypadku postępujemy, gdy rozpatrujemy sklepienie jako proces redystrybucji sił w belce sztywno utwierdzonej ($M \neq 0$). Strzałkę osi obojętnej określamy:

$$f_o = h - \frac{1}{3} \cdot \alpha \cdot h - \frac{1}{3} \cdot \alpha \cdot h = (1 - \frac{2}{3}\alpha) \cdot h \tag{15}$$

Podstawiając do (3) otrzymujemy:

$$T = \frac{q \cdot L^2}{8 \cdot \left(1 - \frac{2}{3}\alpha\right) \cdot h} \tag{16}$$

Podobnie jak poprzednio, określamy zasięg sklepienia ciśnień. Naprężenia w miejscu oparcia sklepienia na ociosach mają wartość:

$$\sigma = \frac{T}{F} + \frac{M}{W} \tag{17}$$

gdzie pole przekroju poprzecznego sklepienia na 1 mb długości określone jest zależnością (7), zaś wskaźnik wytrzymałości na zginanie sklepienia W oraz moment podporowy zginający sklepienie M na 1 mb długości opisują wzory:

$$W = \frac{(\alpha \cdot h)^2}{6} \tag{18}$$

$$M = \frac{T \cdot \alpha \cdot h}{6} \tag{19}$$

Stateczność sklepienia ciśnień będzie zapewniona, gdy spełniony będzie warunek:

$$\frac{2 \cdot T}{\alpha \cdot h} \leq R_c \tag{20}$$

Po podstawieniu (16) otrzymujemy zależność:

$$-\frac{2}{3} \cdot \chi_2 \cdot \alpha^2 + \chi_2 \cdot \alpha - 1 \geq 0 \tag{21}$$

gdzie:

$$\chi_2 = \frac{4 \cdot R_c \cdot h^2}{q \cdot L^2} \tag{22}$$

Rozwiązaniem nierówności (21) jest przedział stosowalności $\alpha \in [0,1]$ w zależności od χ_2:

$$\alpha \in \left[\frac{3}{4} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{8}{3\chi_2}}\right), \frac{3}{4} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \frac{8}{3\chi_2}}\right)\right] \tag{23}$$

Z założenia $0 \leq \alpha \leq 1$, wobec tego w rozwiązaniu (23) parametr χ_2 musi spełniać zależność:

$$\frac{8}{3} \leq \chi_2 \leq 3 \tag{24}$$

Stąd otrzymujemy przedział zmienności długości kotwi:

$$L \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot q}{3 \cdot R_c}} \leq h \leq L \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot q}{4 \cdot R_c}} \tag{25}$$

Uwzględniając warunek na ścinanie (2) otrzymujemy dodatkową zależność na wysokość skotwienia stropu wyrobiska, zapewniającą stateczność utworzonego w nim samoistnego sklepienia ciśnień:

$$h \leq \frac{L \cdot tg\phi}{2} \tag{26}$$

5. Sklepienie jako analogia belki wstępnie sprężonej

Rozpatrzmy strop wyrobiska jako wydzieloną belkę, swobodnie podpartą, o jednostkowej szerokości i stałej sztywności sprężystej w przekroju. W takim przypadku reakcję poziomą w miejscu oparcia belki na ociosie T określoną wzorem (3) możemy potraktować jako siłę sprężającą, zaś tak zdefiniowany układ – jako belkę wstępnie sprężoną. Konsekwencją takiego podejścia jest konieczność określenia linii ciśnienia w „belce" od momentu zginającego.

Przeprowadzamy analizę analogicznie do przypadku sklepienia jako procesu redystrybucji sił wewnętrznych. Strzałkę osi obojętnej określamy:

$$f_o = h - \frac{1}{3} \cdot \alpha \cdot h - \frac{R_c + 2\sigma_c}{3(R_c + \sigma_c)} \cdot \alpha \cdot h = (1 - \alpha \cdot x_o) \cdot h \tag{27}$$

gdzie:

$\sigma_c > 0$ – wartość naprężeń ściskających w środku rozpiętości stropu

$$x_o = \frac{2R_c + 3\sigma_c}{3(R_c + \sigma_c)} \tag{28}$$

dla przedziału stosowalności $x_o \in \left[\frac{2}{3}, \frac{5}{6}\right]$.

Podstawiając (27) do (3) otrzymujemy:

$$T = \frac{q \cdot L^2}{8 \cdot h \cdot (1 - \alpha \cdot x_o)} \tag{29}$$

Podobnie jak poprzednio, określamy zasięg sklepienia ciśnień. Wartości naprężeń w miejscu oparcia sklepienia na ociosach, wskaźnik wytrzymałości na zginanie sklepienia W oraz moment podporowy zginający sklepienie M na 1 mb długości opisują wzory (17), (18) oraz (19). Stateczność sklepienia ciśnień będzie zapewniona, gdy spełniony będzie warunek (20).

Po podstawieniu (29) otrzymujemy zależność:

$$-x_o \cdot \chi_2 \cdot \alpha^2 + \chi_2 \cdot \alpha - 1 \geq 0 \tag{30}$$

gdzie χ_2 określa wzór (22).

Rozwiązaniem nierówności (30) jest przedział stosowalności $\alpha \in [0,1]$ w zależności od χ_2 oraz x_o:

$$\alpha \in \left[\frac{1-\sqrt{1-4x_o \frac{1}{\chi_2}}}{2x_o} , \frac{1+\sqrt{1-4x_o \frac{1}{\chi_2}}}{2x_o} \right] \tag{31}$$

Z założenia $0 \le \alpha \le 1$, wobec tego w rozwiązaniu (31) parametr χ_2 musi spełniać zależność:

$$\frac{1}{2-x_o} \le \chi_2 \tag{32}$$

Po uwzględnieniu warunku na ścinanie (2) dającego dodatkową zależność na wysokość skotwienia stropu wyrobiska określoną wzorem (26) taką, aby utworzone w nim samoistne sklepienie ciśnień zapewniło jego stateczność, otrzymujemy przedział zmienności długości kotwi:

$$L \cdot \sqrt{\frac{q}{R_c} \cdot \frac{2R_c + 3\sigma_c}{3(R_c + \sigma_c)}} \le h \le L \cdot \frac{\mathrm{tg}\phi}{2} \tag{33}$$

Łatwo zauważyć, że dla $\sigma_c = 0$ otrzymujemy dla lewej strony nierówności (33) ograniczenie takie jak w przypadku (25). Jednak w przypadku wystąpienia w stropie wyrobiska naprężeń sprężających, otrzymujemy bardziej restrykcyjną zależność na minimalną długość kotwi, niż to wynikało z rozumowania przeprowadzonego dla przypadku sklepienia jako procesu redystrybucji sił wewnętrznych.

6. Wnioski

Zależności przedstawione w artykule umożliwiają określenie minimalnej miąższości stropu wyrobiska, dla której zapewnione jest wytworzenie się naturalnego sklepienia o odpowiedniej nośności. W przeprowadzonym rozumowaniu jest ono elementem przenoszącym oddziaływania górotworu, zaś kotwie stanowią jedynie narzędzie wymuszające ukształtowanie się w górotworze sklepienia o odpowiedniej geometrii. Sposoby zabezpieczenia stropu przed miejscowymi ubytkami materiału, niedopuszczalnymi z punktu widzenia niezmienności geometrii całości konstrukcji, stanowią odrębne zagadnienie, związane z dodatkowymi zabezpieczeniami stropu wyrobiska siatką, torkretem itp.

LITERATURA

1. Schubert W.: Grundlagen der New Austrian Tunnelling Method. Technische Universität Gratz, Gratz 1996.
2. Gałczyński S., Mrozek K., Wojtaszek A.: Kryteria doboru nośności obudowy kotwiowej w wyrobiskach podziemnych, Konferencja 24. Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu, Lądek Zdrój, 12-16 marca 2001, s. 197-204.
3. Wojtaszek A.: Ocena obciążeń obudów wyrobisk górniczych z wykorzystaniem kryteriów Hoeka-Browna i Coulomba-Mohra, w stateczności podziemnych wyrobisk górniczych i zjawiska dynamiczne w górotworze, seria Konferencje nr 35, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 1994, s. 269-280.
4. Łydżba D., Ałykow K.: Dobór obudowy kotwiowej kołowych wyrobisk tunelowych i korytarzowych w ujęciu teorii kompozytów, Konferencja 23. Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu, Bukowina Tatrzańska, 13-17 marca 2000, s. 229-238.
5. Łydżba D., Ałykow K., Sus P., Projektowanie i określanie własności zastępczych geokompozytów w oparciu o teorię homogenizacji. Konferencja 21. Międzynarodowe Sympozjum Naukowe Studentów i Młodych Pracowników Nauki, Zielona Góra, 8-9 maja 2000, T. Budownictwo i inżynieria środowiska, s 209-221.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jerzy Kwiatek

Abstract

The paper deals with dependences enabling determination of minimum depth of bolted rock, for which is guaranted creation natural pressure arch. The natural pressure arch shifting pressure of the rock mass and the bolts are only a tool forcing the formation of the arch of adequate geometry.