ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1968
Seria: GÓRNICTWO z. 28 Nr kol. 217

KAZIMIERZ RUŁKA

METODA PROJEKTOWANIA OBUDOWY OSTATECZNEJ SZYBU PRZY ZASTOSOWANIU SIATKOBETONOWEJ OBUDOWY WSTĘPNEJ

Wstęp

Na przestrzeni ostatnich 6 lat, notujemy w krajowym budownictwie szybowym stały dynamiczny rozwój technologii wykonywania obudowy betonowej i to zarówno w szybach głębionych metodami zwykłymi, jak i z zastosowaniem metod specjalnych.

Wykonanie obudowy betonowej w szybach głębionych metodami zwykłymi (marki betonu 170 - 300 kG/cm^2) można uznać w chwili obecnej za rozwiązane.

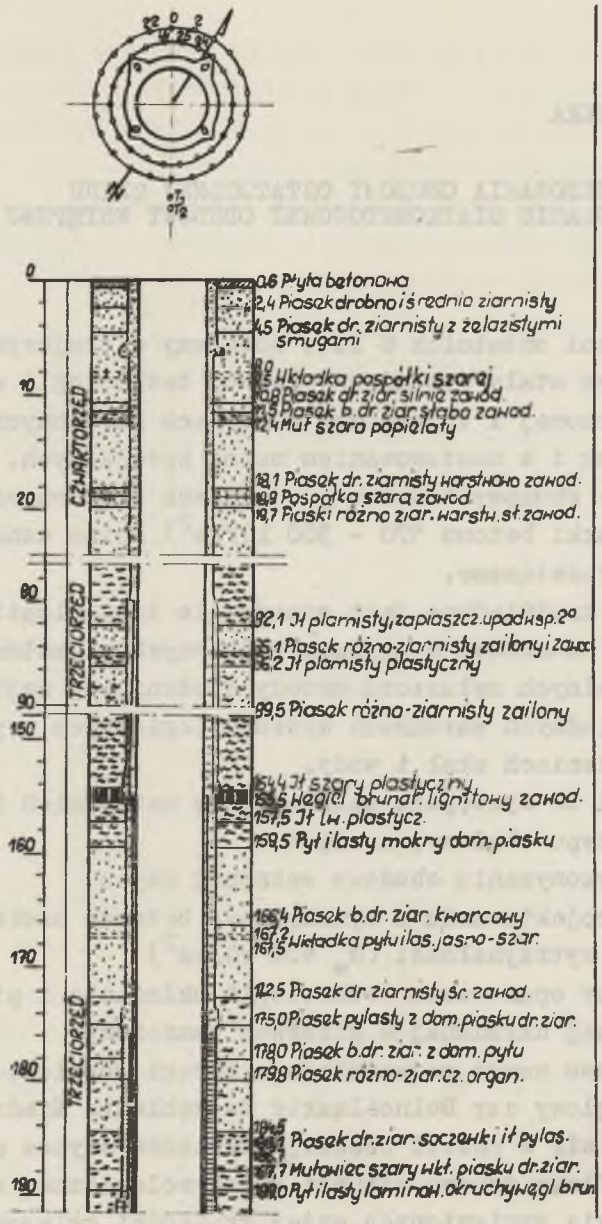
Znacznie trudniejsze jest opanowanie technologii wykonywania obudowy betonowej w szybach głębionych z zastosowaniem metod specjalnych zwłaszcza metody mrożeniowej najczęściej stosowanej w trudnych warunkach hydrogeologicznych (rys. 1) przy dużych ciśnieniach skał i wody.

Trudności te występują właściwie we wszystkich fazach realizacji tego typu obudowy, a więc:

- przy wykonywaniu obudowy wstępnej szybu,
- przy projektowaniu i wykonywaniu betonów szczelnych o wysokiej wytrzymałości (R_w 400 kG/cm^2)

wreszcie przy opanowaniu technologii układania i pielęgnowania masy betonowej układanej w górotwór zamrożony.

Jak wiadomo nasze najważniejsze okręgi górnicze jak Rybnicki Okręg Węglowy czy Dolnośląskie Zagłębienie Miedzionośne, gdzie głębi się w chwili obecnej większość szybów charakteryzują szczególnie trudne warunki hydrogeologiczne, stąd potrzeba rozwiązania wymienionych wyżej trudności związane z optymalizacją parametrów wytrzymałościowych obudowy betonowej szybów głębionych metodą mrożeniową stała się szczególnie pilna.



Rys. 1. Przykład szybu głębionego metodą mrożeniową w trudnych warunkach hydrogeologicznych

Wychodząc naprzeciw potrzebom przemysłu Zakład Badań i Doświadczeń Budownictwa Górniczego przy współpracy Katedry Budownictwa Podziemnego Kopalń w swej tematyce projektowo-badawczej podjął się rozwiązania wymienionych wyżej zagadnień.

Niniejszy artykuł jest trzecią z kolei publikacją z zakresu usprawnienia obudowy wstępnej szybu i stanowi zamknięcie pewnego cyklu badawczego obejmującego rozważania teoretyczne, badania wreszcie opracowania metody projektowania obudowy z zastosowaniem jako obudowy wstępnej elementów siatkobetonowych.

Obudowa wstępna szybów głębionych w skałach zamrożonych

W większości przypadków integralną część składową obudowy szybów głębionych w górotworze zamrożonym zwłaszcza przy dużych głębokościach zamrażania stanowi obudowa wstępna z cegły klinkierowej kl. "350" lub klinkieru drogowego o grubości 1 1/2 do 2 cegieł.

Oprócz mechanicznego zabezpieczenia ociosów w trakcie głębienia pozwala na wykonanie szczelnego płaszcza betonowej obudowy ostatecznej spełniając równocześnie rolę termosu poprawiającego warunki dojrzewania.

Wykonywana w obecnej postaci obudowa wstępna prócz bezspornych zalet, posiada także wiele wad, z których najważniejsze to:

- zwiększanie wyłomu szybu o około 15%,
- słabe wiązanie w temp. ujemnych zapraw, które nie zezwala uwzględnienie ich przy obliczaniu grubości płaszcza obudowy ostatecznej,
- wysoki koszt wykonywanej ręcznie obudowy wstępnej.

W poszukiwaniu doskonalszego rozwiązania to znaczy takiej obudowy wstępnej, która posiadałaby możliwie wszystkie zalety dotychczasowej przy równoczesnym wyeliminowaniu jej wad zainteresowano się nowym tworzywem jakim jest siatkobeton.

Dla wyjaśnienia podaję, że siatkobeton (zwany również ferrocementem od włoskiego "ferrocemento") jest materiałem budowlanym uzyskanym na drodze zbrojenia betonu drobnoziarnistego

siatkami rozmieszczonymi równomiernie w całym przekroju elementu [1]. Siatka nasyca równomiernie beton stalą, dając w efekcie tworzywo o wysokiej elastyczności, odporności na uderzenia i zarysowania. Postanowiono zatem zaprojektować na bazie siatkobetonu nowy typ obudowy wstępnej, którego ideę przedstawia (rys. 4).

Ze względu na brak w literaturze krajowej i zagranicznej gotowych metod projektowania oraz danych odnośnie własności wytrzymałościowych tego typu konstrukcji, opracowano w oparciu o teorię żelbetu metodę projektowania [2] po czym zaprojektowane elementy poddano sprawdzającym badaniom modelowym [3].

W konstrukcji siatkobetonowej obudowy wstępnej (rys. 2) można rozróżnić żebra pierścieniowe i pierścienie cienkościenne.

Zewnętrzne obciążenia radialne działające na obudowę rozkłada się na żebra pierścieniowe oraz pierścienie cienkościenne proporcjonalnie do ich sztywności.

Wykładnik tej proporcji określono wychodząc z założenia równości przemieszczeń radialnych włókien zewnętrznych żebra pierścieniowego i pierścienia cienkościennego.

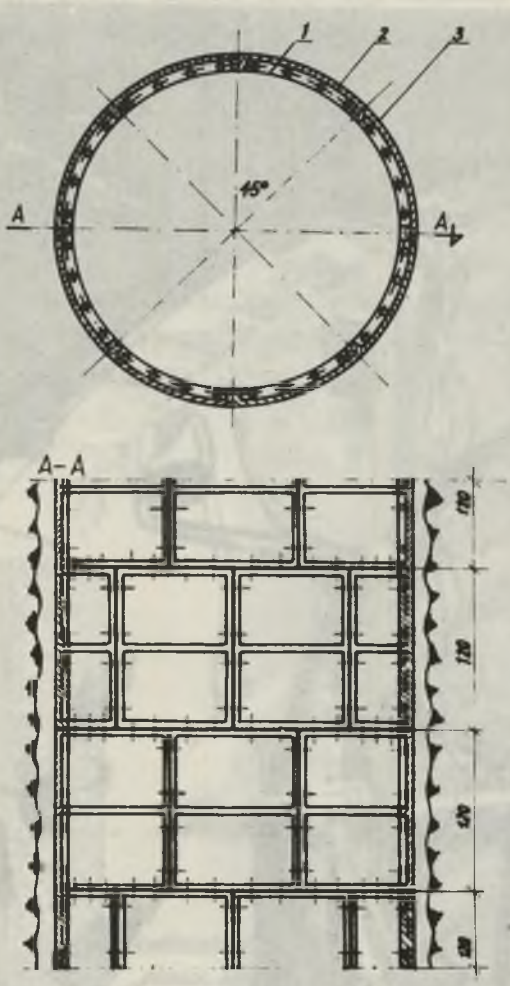
Po opracowaniu metody projektowania prefabrykowanej siatkobetonowej obudowy wstępnej wykonano projekt techniczno-roboczy serii informacyjnej do badań modelowych oraz technologię wykonania.

Badania nad ustaleniem parametrów wytrzymałościowych prefabrykowanej siatkobetonowej obudowy wstępnej obejmowały:

- badania wyjściowe,
- badania pojedynczych elementów pierścienia obudowy,
- badania pełnego pierścienia obudowy o średnicy 2,6 m (rys. 3).

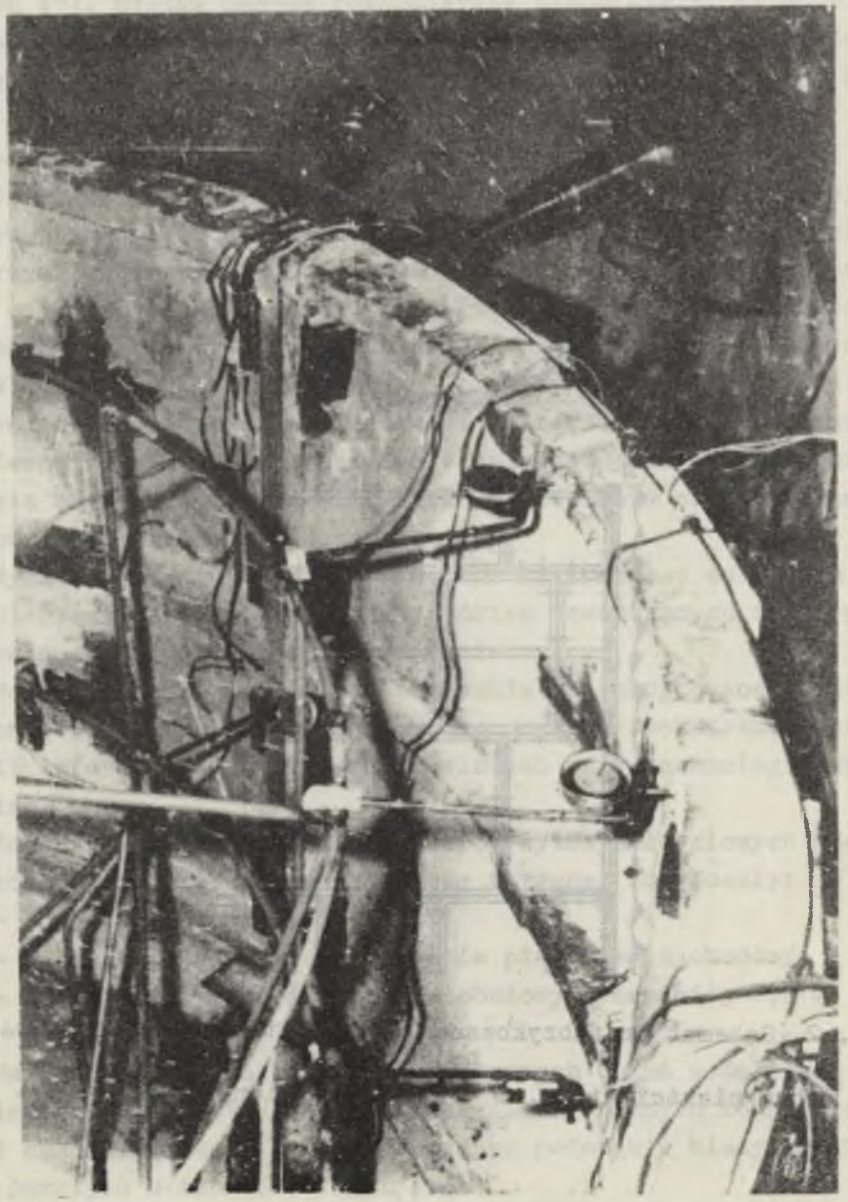
Na podstawie wyników przeprowadzonych badań modelowych stwierdzono, że wytrzymałość rzeczywista badanych konstrukcji jest znacznie wyższa od obliczonej na podstawie klasycznych wzorów opartych o teorię żelbetu [3].

Jak to już wspomniano wyżej, klasyczna obudowa wstępna z cegły klinkierowej z uwagi na słabe wiązanie zapraw w temperaturach ujemnych nie wchodzi w rachubę przy ustalaniu grubości płaszcza obudowy ostatecznej.



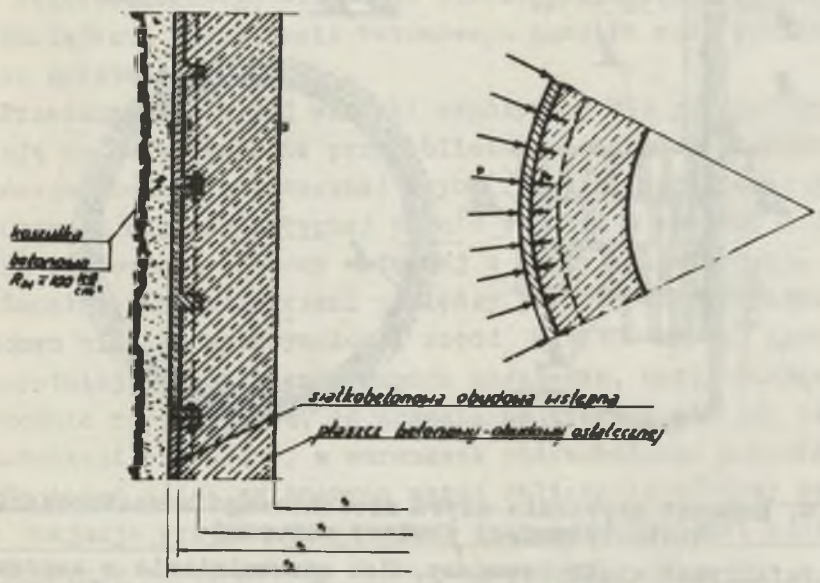
Rys. 2. Schemat prefabrykowanej siatkobetonowej obudowy wstępnej szybu

1 - żebro pierścieniowe, 2 - pierścień cienkościenny, 3 - złącza śrubowe

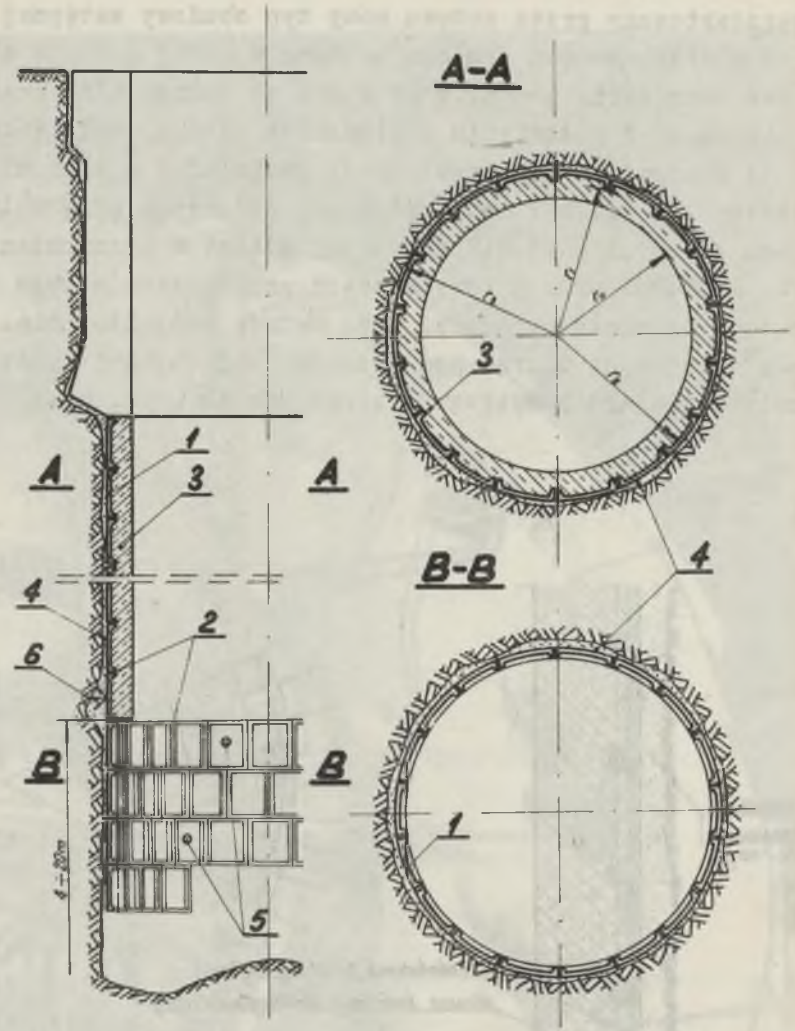


Rys. 3. Fragment pełnego pierścienia siatkobetonowej obudowy wstępnej poddanego badaniom

Zaprojektowany przez autora nowy typ obudowy wstępnej mianowicie siatkobetonowa obudowa wstępna w samej istocie eliminuje ten zasadniczy powód, gdyż usuwa na dalszy plan czynnik determinujący. W połączeniu z płaszczem obudowy ostatecznej (rys. 4) stanowi rodzaj konstrukcji zespolonej a więc stanowi jej integralną część i może być brana pod uwagę przy obliczaniu jego grubości gdyż bierze czynny udział w przenoszeniu obciążeń. Ponieważ brak gotowych metod projektowania tego rodzaju obudowy należało opracować nową metodę projektowania. Metodę taką opracowano biorąc pod uwagę rodzaj obudowy pokazany schematycznie jako konstrukcja zespolona na (rys. 5).



Rys. 5. Schemat obudowy szybu jako konstrukcji zespolonej



Rys. 4. Schemat głębienia szybu mrożeniowego z zastosowaniem siatkobetonowej obudowy wstępnej

1 - prefabrykat siatkobetonowy, 2 - uszczelnienie z zaprawy poliestrowej, 3 - płaszcz obudowy beton., 4 - koszulka betonowa, 5 - otwory do układania koszulki, 6 - kotwie

Teoria projektowania ostatecznej obudowy betonowej w nowym układzie

1. Określenie warunków pracy obudowy

Ostateczną obudowę szybową stanowi płaszcz betonowy współpracujący z prefabrykowanym pierścieniem siatkobetonowym, który w pierwszej fazie głębienia stanowił obudowę wstępną.

Współpracę obydwu pierścieni zapewnia przyczepność betonu, powiększona o mechaniczne ich powiązanie dzięki zastosowaniu układu żeber podłużnych i obwodowych w pierścieniu siatkobetonowym, a także dzięki prętom zbrojeniowym spełniającym w fazie obudowy wstępnej rolę łączników pionowych podwieszanych elementów prefabrykowanych.

Usytuowanie izolacji wodnej (powłoka hydroizolacyjna) na bazie emulsji asfaltowo-lateksowych [4] na zewnątrz pierścienia siatkobetonowego eliminuje niebezpieczeństwo bezpośredniego obciążenia pierścienia betonowego parciem wody po rozmrożeniu górotworu.

Przedstawione wyżej warunki współpracy obu pierścieni pozwalają na uwzględnienie przy obliczaniu grubości płaszcza betonowego obudowy ostatecznej szybu również pierścienia siatkobetonowego obudowy wstępnej co nie wchodzi w rachubę w przypadku stosowania obudowy wstępnej z cegły klinkierowej.

Zapełnienie przestrzeni pomiędzy górotworem a obudową szybu betonem niskiej wytrzymałości rzędu $R_w \leq 100$ kG/cm^2 zapewnia korzystniejsze rozłożenie naporu górotworu, usztywniając równocześnie rurę szybową, co pozwala na traktowanie jej jako konstrukcji pracującej w warunkach nieswobodnego podparcia.

Ponieważ żadna ze znanych metod obliczania obudowy szybowej nie obejmuje przytoczonego wyżej przypadku zachodzi konieczność opracowania nowej metody obliczeniowej co czyni autor w następnych punktach omawianego rozdziału niniejszej pracy.

2. Rozkład naprężeń w obudowie ostatecznej

Jak wiadomo napór wody p_n i parcie górotworu p_s na obudowę szybową wywołuje naprężenie styczne σ_t i radialne σ_r w obydwu pierścieniach.

Przy stadium sprężystym pracy materiału (a z takim w praktyce szybowej mamy jedynie do czynienia, jako że od stanu zniszczeniowego zabezpieczamy się wysokimi współczynnikami pewności) napór zewnętrzny $p = p_s + p_n$ rozkłada się proporcjonalnie do sztywności obydwu pierścieni.

Wychodząc z warunku równości przemieszczeń radialnych punktów wspólnych obydwu pierścieni możemy wyznaczyć wykładnik tej proporcji.

Schematyczny przekrój nowego typu obudowy oraz rozkład obciążeń pokazano na (rys. 5).

Naprężenie w punkcie "2" od strony pierścienia siatkobetonowego:

$$\sigma_r = \frac{p_x \cdot r_2^2 - p \cdot r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} - \frac{(p_x - p) \cdot r_2^2 \cdot r_3^2}{r_2^2 (r_3^2 - r_2^2)} = \sigma_r = - p_x \qquad (1)$$

$$\sigma_t = \frac{p_x \cdot r_2^2 - p \cdot r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} + \frac{(p_x - p) \cdot r_2^2 \cdot r_3^2}{r_2^2 (r_3^2 - r_2^2)} =$$

$$\sigma_t = \frac{p_x (r_3^2 + r_2^2) - 2 p \cdot r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} . \qquad (2)$$

Odpowiadające przemieszczenie wynosi:

$$u_s = \frac{r_2}{E_s} \left[\sigma_t - \nu(\sigma_r + \sigma_z) \right] = \frac{r_2}{E_s} \left[\frac{p_x (r_3^2 + r_2^2) - 2 p r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} + \nu \cdot p_x - \nu \cdot \sigma_z \right] . \qquad (3)$$

Naprężenie w punkcie "2" od strony pierścienia betonowego:

$$\sigma_r = \frac{-p_x \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_o} \left(1 - \frac{r_o^2}{r_2^2}\right)$$

po redukcji

$$\sigma_r = -p_x \tag{4}$$

$$\sigma_t = \frac{-p_x \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_o^2} \quad 1 + \frac{r_o^2}{r_2^2} = \frac{-p_x (r_2^2 + r_o^2)}{r_2^2 - r_o^2} \tag{5}$$

odpowiadające przemieszczenie

$$u_b = \frac{r_2}{E_b}\left[\sigma_t - \nu(\sigma_r + \sigma_z)\right] = \frac{r_2}{E}\left[\frac{-p_x(r_2^2 + r_o^2)}{r_2^2 - r_o^2} + \nu \cdot p_x - \nu \cdot \sigma_z\right]. \tag{6}$$

Warunek równości odkształceń:

$$u_s = u_b. \tag{7}$$

Podstawiając zależności (3) i (6) do warunku (7) otrzymamy:

$$\frac{r_2}{E_s}\left[\frac{p_x(r_3^2+r_2^2)-2\,p\,r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} + \nu \cdot p_x + \nu \cdot \sigma_z\right] = \frac{r_2}{E_b}\left[\frac{-p_x(r_2^2+r_o^2)}{r_2^2 - r_o^2} + \nu \cdot p_x + \nu\sigma_z\right.$$

stąd po podstawieniu wyrażenia:

$$n = \frac{E_b s}{E_b} \tag{8}$$

$$\frac{p_x(r_3^2+r_2^2)-2\,p\,r_3^2}{r_3^2-r_2^2}+\frac{p_x(r_2^2+r_o^2)}{r_2^2-r_o^2}\cdot n=n\cdot\nu\cdot p_x-\nu\cdot p_x+\nu\cdot\sigma_z-n\cdot\nu\cdot\sigma_z$$

$$p_x\left[\frac{r_3^2+r_2^2}{r_3^2-r_2^2}+\frac{r_2^2+r_o^2}{r_2^2-r_o^2}\cdot n+\nu(1-n)\right]=\nu\cdot\sigma_z\,(1-n)+\frac{2p_x\cdot r_3^2}{r_2^2-r_o^2}$$

skąd

$$p_x=\frac{\dfrac{2p\cdot r_3^2}{r_3^2-r_2^2}+\nu\sigma_z\cdot(1-n)}{\dfrac{r_3^2+r_2^2}{r_3^2-r_2^2}+\dfrac{r_2^2+r_o^2}{r_2^2-r_o^2}\cdot n+\nu(1-n)}\,. \tag{9}$$

Z uwagi na niską wartość naprężeń σ_z i σ_r w porównaniu z wielkością σ_t a także na niską wartość iloczynu $\nu\cdot(1-n)$, który w granicznym przypadku zastosowania w pierścieniu siatkobetonowym betonu marki $R_w = 400$ kG/cm^2 a w pierścieniu betonowym marki $R_w = 170$ kG/cm^2 osiąga swą wartość maksymalną równą:

$$\frac{1}{6}\left(1-\frac{380}{260}\right)=0{,}244$$

możemy wyrażenie (9) uprościć do postaci (10), przy czym błąd nie przekroczy w tym przypadku nawet jednego procentu.
Tak więc

$$p_x=\frac{\dfrac{2\cdot p\cdot r_3^2}{r_3^2-r_2^2}}{\dfrac{r_3^2+r_2^2}{r_3^2-r_2^2}+\dfrac{r_2^2+r_o^2}{r_2^2-r_o^2}\cdot n}\,. \tag{10}$$

Naprężenia w dowolnym punkcie pierścienia siatkobetonowego będą opisane następującymi funkcjami:

$$\sigma_r = \frac{p_x \cdot r_2^2 - p \cdot r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} - \frac{(p_x - p) \cdot r_2^2 \cdot r_3^2}{r^2 (r_3^2 - r_2^2)} \tag{11}$$

$$\sigma_t = \frac{p_x \cdot r_2^2 - p \cdot r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} + \frac{(p_x - p) \cdot r_2^2 \cdot r_3^2}{r^2 (r_3^2 - r_2^2)} \tag{12}$$

$$\sigma_z = - \gamma_{bs} \cdot h , \tag{13}$$

gdzie:

r - promień dowolnego punktu pierścienia (cm),

γ_{bs} - ciężar objętościowy siatkobetonu (kG/cm^3),

h - odległość punktu od poprzedniego wieńca podstawowego (cm).

Naprężenia w dowolnym punkcie pierścienia betonowego opisują nam następujące zależności:

$$\sigma_r = - \frac{p_x \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_o^2} \left(1 - \frac{r_o^2}{r^2}\right) \tag{14}$$

$$\sigma_t = - \frac{p_x \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_o^2} \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2}\right) \tag{15}$$

$$\sigma_z = - \gamma_b \cdot h \tag{16}$$

γ_b - ciężar objętościowy betonu (kG/cm^3).

3. Siła obwodowa i jej mimośród

Siłę obwodową działającą w pierścieniu siatkobetonowym określamy:

$$T_s = \int_{r_2}^{r_3} \sigma_t \cdot dr \cdot 1 = \int_{r_2}^{r_3} \left[\frac{p_x \cdot r_2^2 - p \cdot r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} + \frac{(p_x - p) r_2^2 \cdot r_3^2}{r^2 (r_3^2 - r_2^2)} \right] \cdot dr \cdot 1$$

po przekształceniu otrzymamy wyrażenie

$$T_s = p_x \cdot r_2 - p \cdot r_3 . \tag{17}$$

Podobnie siła obwodowa działająca w pierścieniu betonowym

$$T_b = \int_{r_o}^{r_2} \sigma_t \cdot dr \cdot 1 = \int_{r_o}^{r_2} - \frac{p_x \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_o^2} \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2}\right) dr \cdot 1.$$

Po scałkowaniu otrzymujemy wyrażenie:

$$T_b = - p_x \cdot r_2 . \tag{18}$$

Mimośród siły obwodowej w pierścieniu betonowym

$$e_b = \frac{r_2 - r_o}{2} - \frac{M_w^{stat}}{T_b} , \tag{19}$$

gdzie:

M_w^{stat} - moment statyczny naprężeń obwodowych względem wewnętrznych włókien skrajnych.

Wielkość tego momentu określa równanie:

$$M_w^{stat} = \int_{r_o}^{r_2} \sigma_t \cdot dr\,(r - r_o) \cdot 1\,m \int_{r_o}^{r_2} \frac{-p_x \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_o} \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2}\right) r - r_o / dr$$

$$= \frac{-p_x \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_o^2} \left[\frac{r_2^2 - r_o^2}{2} + r_o^2(\ln r_2 - \ln r_o) - r_o(r_2 - r_o) - r_o^3\left(-\frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_o}\right) \right]$$

Po przekształceniach otrzymamy:

$$M_w^{stat} = \frac{-p_x \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_o^2} \left[r_o^2(\ln r_2 - \ln r_o) + \frac{(r_2^2 - r_o^2)(r_2 - 2r_o)}{2\,r_2} \right] . \quad (19a)$$

Podstawiając (19a) do (19) wyrażenie na e_b przyjmie postać:

$$e_b = \frac{r_2 - r_o}{2} + \frac{\dfrac{p_x \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_o^2} \left[r_o^2 (\ln r_2 - \ln r_o) + \dfrac{(r_2^2 - r_o^2)(r_2 - 2r_o)}{2\,r_2} \right]}{p_x \cdot r_2}$$

i po odpowiednim przekształceniu:

$$e_b = \frac{r_o}{2} - \frac{r_2 \cdot r_o^2}{r_2^2 - r_o^2} (\ln r_2 - \ln r_o). \quad (20)$$

Mimośród siły obwodowej w pierścieniu siatkobetonowym

Z uwagi na skomplikowaną funkcję wyrażającą naprężenia styczne, mimośród wyznaczono rozbijając obciążenie na "p_x" i "p". I tak od obciążenia "p"

$$\sigma_t = \frac{-p \cdot r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} - \frac{p \cdot r_2^2 \cdot r_3^2}{r^2(r_3^2 - r_2^2)} = \frac{-p \cdot r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} \left(1 + \frac{r_2^2}{r^2}\right) \quad (21)$$

$$M_w^{stat} = \int_{r_2}^{r_3} \frac{-p \cdot r_3^2}{r_2^2 - r_2^2} \left(1 + \frac{r_2^2}{r^2}\right) \cdot (r - r_2)\, dr \cdot 1 =$$

$$= \frac{-p \cdot r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} \left[r_2^2 (\ln r_3 - \ln r_2) + \frac{(r_3^2 - r_2^2)(r_3 - 2r_2)}{2\, r_3} \right] \frac{1}{p \cdot r_3}. \tag{22}$$

Mimośród dla tego przypadku:

$$e_s^p = \frac{r_3 - r_2}{2} - \frac{p \cdot r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} \left[r_2^2 (\ln r_3 - \ln r_2) + \frac{(r_3^2 - r_2^2)(r_3 - 2r_2)}{r\, r_3} \right] \frac{1}{p r_3}$$

stąd

$$e_s^p = \frac{r_2}{2} - \frac{r_3 \cdot r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} (\ln r_3 - \ln r_2). \tag{23}$$

Od obciążenia "p_x"

$$\sigma_t = \frac{p_x \cdot r_x^2}{r_3^2 - r_2^2} + \frac{p_x \cdot r_2^2 \cdot r_3^2}{r^2 (r_3^2 - r_2^2)} = \frac{p_x \cdot r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} \left(1 + \frac{r_3^2}{r^2}\right) \tag{24}$$

$$M_w^{stat} = \int_{r_2}^{r_3} \frac{p_x \cdot r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} \left(1 + \frac{r_3^2}{r_2}\right) \cdot (r - r_2)\, dr =$$

$$= \frac{p_x \cdot r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} \left[r_3^2 (\ln r_3 - \ln r_2) - \frac{r_3^2 - r_2^2}{2} \right] \tag{25}$$

mimośród dla tego przypadku:

$$e_s^{p_x} = \frac{r_3 - r_2}{2} - \frac{\frac{p_x \cdot r_2^2}{r_3^2 - r_2^2}\left[r_3^2 (\ln r_3 - \ln r_2) - \frac{r_3^2 - r_2^2}{2}\right]}{p_x \cdot r_2}$$

i po przekształceniu

$$e_s^{px} = \frac{r_3}{2} - \frac{r_2 \cdot r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} (\ln r_3 - \ln r_2). \qquad (26)$$

Mimośród siły wypadkowej $T_s = p_x \cdot r_2 - p \cdot r_3$

$$e_s = \frac{p \cdot r_3 \cdot e_s^p - p_x \cdot r_2 \cdot e_s^{px}}{p_x \cdot r_2 - p \cdot r_3}$$

po podstawieniu:

$$e_s = \frac{p \cdot r_3 \left[\frac{r_2}{2} - \frac{r_3 \cdot r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} (\ln r_3 - \ln r_2)\right] - p_x \cdot r_2 \left[\frac{r_3}{2} - \frac{r_2 \cdot r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} (\ln r_3 - \ln r_2)\right]}{p_x \cdot r_2 - p \cdot r_3}$$

oraz odpowiednim przekształceniu:

$$e_s = \frac{(p - p_x) \cdot r_2 \cdot r_3 \cdot \left[0{,}5 - \frac{r_2 \cdot r_3}{r_3^2 - r_2^2} (\ln r_3 - \ln r_2)\right]}{p_x \cdot r_2 - p \cdot r_3}. \qquad (27)$$

4. Projektowanie obudowy

Podstawą do określenia wymiarów i zbrojenia pierścienia cienkościennego w prefabrykowanej obudowie wstępnej była siła obwodowa:

$$T_1 = - p_1 \cdot r_3 \ (\mathrm{kG/cmb})$$

działająca na mimośrodzie określonym wzorem

$$e_1 = \frac{r_2}{2} - \frac{r_3 \cdot r_2^2}{r_3^2 \cdot r_2^2} (\ln r_3 - \ln r_2),$$

który praktycznie przyjmuje wartość zbliżoną do zera.

W obudowie ostatecznej obciążenie przypadające na pierścień siatkobetonowy wywołuje w nim siłę obwodową:

$$T_s = p_x \cdot r_2 - p \cdot r_3$$

działającą na mimośrodzie określonym wzorem (27). O ile więc wykorzystaliśmy materiał w obudowie wstępnej wymiarując ją na siłę T_1 to dla pracy pierścienia siatkobetonowego w obudowie ostatecznej musi być zachowany następujący warunek:

$$T_s \leqslant T_1 . \tag{28}$$

W granicznym przypadku równości tych wielkości otrzymamy:

$$p_x \cdot r_2 - p \cdot r_3 = - p_1 \cdot r_3 , \tag{29}$$

gdzie:

p_1 - ciśnienie przypadające na pierścień cienkościenny obudowy wstępnej

stąd:

$$p_x = (p-p_1) \frac{r_3}{r_2} . \tag{30}$$

<u>Nośność pierścienia betonowego</u> w kierunku obwodowym

$$P_n \geqslant S \cdot T_b , \tag{31}$$

gdzie:

s - współczynnik pewności wg PN . S = 3
wg najnowszych danych szybowych S = 2,5

przy czym

$$P_n = F_b \cdot R_s = 1 \cdot (r_2 - r_o) R_s , \tag{32}$$

gdzie:

R_s - wytrzymałość betonu w pierścieniu betonowym na ściskanie.

Podstawiając (32) i (18) do (31) otrzymamy:

$$(r_2 - r_o) \cdot R_s = s \cdot p_x \cdot r_2$$

stąd

$$r_2 = \frac{r_o}{1 - \frac{s \cdot p_x}{R_s}} . \tag{33}$$

Nośność pierścienia siatkobetonowego w kierunku obwodowym

$$P_n \geqslant s \cdot T_1 \tag{34}$$

przy czym

$$P_n = F_b \cdot R'_{ss} + \mu \cdot F_b \cdot Q_r = R'_{ss} \cdot F_b(1+\mu\beta r_s) \tag{35}$$

stąd

$$R_{ss}(1 + \mu \cdot \beta_{rs}) \cdot (r_3 - r_2) \cdot 1 = s \cdot p_1 \cdot r_3$$

oznaczając wyrażenie

$$R'_{ss}(1 + \mu \cdot \beta_{rs}) = \varrho \tag{36}$$

otrzymamy

$$r_3 = \frac{r_2}{1 - \frac{s \cdot p_1}{\varrho}} . \tag{37}$$

Układ równań:

$$\left.\begin{aligned} p_x &= (p - p_1)\,\frac{r_3}{r_2} \\ r_2 &= \frac{r_o}{1 - \frac{s \cdot p_x}{R_s}} \\ r_3 &= \frac{r_2}{1 - \frac{s \cdot p_1}{\varrho}} \end{aligned}\right\} \tag{38}$$

pozwala na łatwe wyznaczenie wielkości p_x, r_2 i r_3 przy danych wartościach r_o, p, p_1 i znanych parametrach materiałowych.

Po rozwiązaniu układu równań otrzymamy:

$$\boxed{p_x = (p - p_1)\,\frac{r_3}{r_o}\left(1 - \frac{s \cdot p_x}{R_s}\right)} \tag{39}$$

$$\boxed{r_3 = \frac{r_o}{\left(1 - \frac{s \cdot p_x}{R_s}\right)}\left(1 - \frac{s \cdot p_1}{\varrho}\right)} \tag{40}$$

podstawiając (40) do (39) otrzymamy wzory końcowe na wymiarowanie obudowy

$$\boxed{p_x = \frac{p - p_1}{1 - \frac{s \cdot p_1}{\varrho}}} \tag{41}$$

analogicznie

$$\boxed{r_2 = \frac{r_o}{1 - \frac{s}{R_s} \cdot \frac{p - p_1}{\left(1 - \frac{s \cdot p_1}{\varrho}\right)}} = \frac{r_o}{1 - \frac{s}{R_s} \cdot p_x}} \tag{42}$$

$$\boxed{r_3 = \frac{r_o}{1 - \frac{s \cdot p_1}{\varrho} - \frac{(p - p_1) \cdot s}{R_s}}} \qquad (43)$$

5. Tok postępowania przy projektowaniu obudowy betonowej szybów głębionych metodą zamrażania skał z zastosowaniem prefabrykowanej siatkobetonowej obudowy wstępnej

Dane:

średnica szybu w świetle: r_o

ciśnienie (napór) na obudowę: $p = p_s + p_h$

parametry materiałowe pierścienia siatkobetonowego:

R_{ws} - marka betonu,

R'_{ss} - wytrzymałość słupowa betonu,

ν - współczynnik Poissona,

E_{bs} - moduł sprężystości betonu,

γ_{bs} - ciężar objętościowy siatkobetonu.

Wyznaczenie wielkości promieni r_2 i r_3

Przyjmując obciążenie obudowy wstępnej $p_o = 2 - 3$ atn oraz współczynniki $\delta = 0,3$ i $\beta = 0,1$ wyznaczamy p_1 i p_2 wg wzoru (9a) (10a) (patrz obliczenie obudowy wstępnej [2]).
Następnie określając wielkość ϱ ze wzoru (36) oblicza się wartość p_x ze wzoru (41) a następnie r_2 ze wzoru (42) i r_3 ze wzoru (43).

Projektowanie obudowy wstępnej wg [2]

- Przyjmujemy ze względów konstrukcyjnych "1" oraz "a"
- Obliczamy siły T_1 i T_2 wg wzorów (11) i (12),
- Obliczamy g_1 i g_2 wg wzorów (19) i (21).

Mając określone wymiary obudowy wstępnej obliczamy faktyczną wartość współczynnika δ, ze wzoru (7) i skorygowane wartości p_1, p_2 oraz T_1, T_2.

Dla skorygowanych wartości sił obwodowych T_1 i T_2 określamy przekrój stali zbrojeniowej w pierścieniu cienkościennym $F_{ż1}$ wg wzoru (20) oraz przekrój stali w żebrze pierścieniowym $F_{ż2}$ wg wzoru (22).

Następnie określamy przekrój stali zbrojeniowej z uwagi na działanie sił rozciągających $F_ż$ wg wzoru (23) sprawdzając dodatkowo warunek (24).

6. Sprawdzenie naprężeń w obudowie ostatecznej

Ze wzoru (10) obliczamy wartość p_x a następnie wg zależności (11), (12) i (13) obliczamy naprężenia σ_r, σ_t i σ_z w poszczególnych punktach pierścienia siatkobetonowego oraz wg zależności (14), (15) i (16) naprężenia σ_r, σ_t, i σ_z w poszczególnych punktach pierścienia betonowego.

Wyznaczone naprężenia σ_t nie powinny w zasadzie przekraczać wartości

$$\frac{R_s}{S}.$$

Przykład liczbowy

Dane:

$$r_o = 3{,}0 \text{ m} = 300 \text{ cm}$$

$$p_h = 12 \text{ kG/cm}^2$$

$$p_s = 3 \text{ kG/cm}^2.$$

A. Pierścień siatkobetonowy

Beton marki 400

Wytrzymałość na ściskanie $R'_{ss} = 260 \text{ kG/cm}^2$

" "rozciąganie $R_{rs} = 27 \text{ kG/cm}^2$

- współczynnik Poissona $\nu = 1/6$

- moduł sprężystości $E_{bs} = 380\ 000\ kG/cm^2$
- ciężar objętościowy $\gamma_{bs} = 2300\ kG/m^3$.

Stal

- siatka podtynkowa Rabitza z drutu Ø 1 mm o oczkach 10 x 10 cm
- granica plastyczności $Q_{rs} = 2200\ kG/cm^2$
- stal prętowa STOS o $Q_r = 2500\ kG/cm^2$.

B. Pierścień betonowy płaszcza obudowy ostatecznej

Beton marki "400"

- wytrzymałość na ściskanie $R_s = 260\ kG/cm^2$
- wytrzymałość na rozciąganie $R_r = 27\ kG/cm^2$
- współczynnik Poissona $\nu = 1/6$
- moduł sprężystości $E_b = 380\ 000$
- ciężar objętościowy $\gamma_b = 2300\ kG/m^3$.

Wyznaczenie promieni r_2 i r_3 (grub. obudowy)

Przyjęto:

$$p_o = 2\ kG/cm^2$$

$$\delta = 0{,}3 \qquad \beta = \frac{a}{l} = 0{,}1$$

$$p_1 = p'_o \frac{\delta}{\delta(1-\beta)+\beta} = 2 \cdot \frac{0{,}3}{0{,}3\,(1-0{,}1)+0{,}1} = 1{,}62\ kG/cm^2$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\delta} = \frac{1{,}62}{0{,}3} = 5{,}4\ kG/cm^2.$$

Współczynnik obliczeniowy

$$\varrho = R_{ss}\,(1 + \mu\,\beta_{rs}),$$

gdzie:

$$\beta_{rs} = \frac{Q_{rs}}{R_{ss}} = \frac{2200}{260} = 8,5$$

$$\mu = 0,005$$

$$\varrho = 260\ (1 + 0,005 \cdot 8,5) = 271.$$

przyjmując wg najnowszych danych komórki projektowej Przedsiębiorstwa Budowy Szybów współczynnik bezpieczeństwa S = 2,5 otrzymamy:

$$p_x = \frac{p - p_1}{1 - \frac{s \cdot p_1}{\varrho}} = \frac{15 - 1,62}{1 - \frac{2,5 \cdot 1,62}{271}} = 13,6\ kG/cm^2$$

$$r_2 = \frac{r_o}{1 - \frac{S}{R_s} \cdot p_x} = \frac{300}{1 - \frac{2,5}{260} \cdot 13,6} = \underline{345\ cm}$$

$$r_3 = \frac{r_o}{1 - \frac{s \cdot p_1}{\varrho} - \frac{(p-p_1)S}{R_s}} = \frac{300}{1 - \frac{2.5.1.62}{271} - \frac{(15-1,62)2,5}{260}}$$

$$r_3 = \underline{350\ cm}.$$

Projektowanie obudowy wstępnej

Przekrój projektowanego żebra pokazano schematycznie na rys. 5. Przyjęto

$$l = 80\ cm$$

$$a = 8\ cm$$

$$\beta = \frac{a}{l} = \frac{8}{80} = 0,1$$

$$b_p = l - a = 80 - 8 = 72\ cm.$$

Siła obwodowa w pierścieniu cienkościennym o wysokości "b_p"

$$T_1 = - b_p \cdot r_3 \cdot p_1 = - 72 \cdot 350 \cdot 1{,}62 = \underline{41000\ kG}.$$

Siła obwodowa w żebrze pierścieniowym o wysokości "a"

$$T_2 = - a \cdot r_3 \cdot p_2 = 8 \cdot 350 \cdot 5{,}4 = - \underline{15.100\ kG}.$$

Grubość pierścienia cienkościennego wyniesie więc:

$$g_1 = \frac{T_1 \cdot S}{b_p \cdot R'_{ss}\,(1+\mu \cdot \beta_{rs})} = \frac{41.000 \cdot 2{,}5}{72 \cdot 260\,(1 + 0{,}005 \cdot 8{,}5)} =$$

$$g_1 = 5{,}2\ cm$$

Przyjęto $g_1 = \underline{5\ cm}$.

Grubość żebra pierścieniowego

$$g_2 = \frac{T_2 \cdot S}{a \cdot R_{ss}(1 + \mu_2 \cdot \beta_{rs})} = \frac{15.100 \cdot 2{,}5}{8 \cdot 620\,(1 + 0{,}015 \cdot 9{,}6)} = 15\ cm,$$

gdzie:

$$\mu_2 = 0{,}015$$

$$\beta_{rs} = \frac{Q_r}{R_s} = \frac{2500}{260} = 9{,}6.$$

Ostatecznie przyjęto

$g_1 = 5$ cm

$g_2 = 15$ cm

$r_1 = r_3 - g_2 = 350 - 15 = 335$ cm.

Faktyczna wartość współczynnika „δ" wynosi

$$\delta = \frac{r_3^2 - r_2^2}{r_3^2 - r_1^2} \cdot \frac{r_3^2 (1 - \nu) + r_1^2 (1 + \nu)}{r_3^2 (1 - \nu) + r_2^2 (1 + \nu)} =$$

$$= \frac{3{,}5^2 - 3{,}45^2}{3{,}5^2 - 3{,}35^2} \cdot \frac{3{,}5^2 (1 - \frac{1}{6}) + 3{,}35^2 (1 + \frac{1}{6})}{3{,}5^2 (1 - \frac{1}{6}) + 3{,}45^2 (1 + \frac{1}{6})} = 0{,}325$$

ponieważ $\delta = 0{,}325 \neq 0{,}3$

skorygowano wartości

$$p_1 = 2 \frac{0{,}325}{0{,}325 (1-01) + 0{,}1} = 1{,}66 \text{ kG/cm}^2$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\delta} = \frac{1{,}4}{0{,}325} = 5{,}0 \text{ kG/cm}^2$$

$$T_1 = - 72 \cdot 350 \cdot 1{,}66 = - 40.000 \text{ kG}$$

$$T_2 = - 8 \cdot 350 \cdot 5{,}0 = - 14.000 \text{ kG}.$$

Przekrój stali zbrojeniowej w pierścieniu cienkościennym

$$F_{ż1} = \frac{T_1 \cdot S - b_p \cdot \sigma_1 R_{ss}}{Q_{rs}} = \frac{40.000 \cdot 2{,}5 - 72 \cdot 5 \cdot 260}{2200}$$

$$F_{ż1} = \frac{100.000 - 93600}{2200} = 3{,}0 \text{ cm}^2.$$

Ze względów konstrukcyjnych przyjęto 5 warstw siatek z drutu Ø 1 mm o oczkach 10 x 10 mm o $F_ż = 2,83\ cm^2 = F_{ż1} = 3,0\ cm^2$.

Przekrój stali zbrojeniowej w żebrze pierścieniowym

$$F_{ż2} = \frac{T_2 \cdot S - a \cdot g_2 \cdot R_{ss}}{Q_r^{śr}} = \frac{1400 \cdot 2,5 - 8 \cdot 15 \cdot 260}{2350} =$$

$$= \frac{29500 - 31000}{2350} < 0.$$

Ze względów konstrukcyjnych przyjęto 4 Ø 6 o $F_ż = 1,132$ oraz 4 warstwy siatki Ø 1 mm o oczkach 10 x 10 cm o $F_ż = 0,38\ cm^2$.

Sprawdzenie naprężeń w obudowie ostatecznej

Naprężenia pionowe

Maksymalne naprężenia tego typu mogą wystąpić przed kolejnym wieńcem oporowym

$$\sigma_z = - h \cdot \gamma_b,$$

gdzie:

$\gamma_b = 0,0023\ kG/cm^3$

$h = 3000$ cm – długość jednorazowa zgłębianego odcinka szybu

$\sigma_z = - 0,0023 \cdot 3000 = - 6,9\ kG/cm^2$.

Określenie wartości p_x

wg wzoru (10)

$$p_x = \frac{\dfrac{2 \cdot 15 \cdot 3,50^2}{3,5^2 - 3,45^2}}{\dfrac{3,5^2 + 3,45^2}{3,5^2 - 3,45^2} + \dfrac{3,45^2 + 3,00^2}{3,45^2 + 3,00^2}} = 13,8\ kG/cm^2.$$

Naprężenia w pierścieniu siatkobetonowym

dla $r = r_3$

$$\sigma_r = \frac{p_x \cdot r_2^2 - p \cdot r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} - \frac{(p_x - p) r_2^2 \cdot r_3^2}{r_3^2 (r_3^2 - r_2^2)}$$

$$\sigma_r = \frac{13{,}8 \cdot 3{,}45^2 - 15 \cdot 3{,}5^2}{3{,}5^2 - 3{,}45^2} - \frac{(13{,}8-15)3{,}45^2}{(3{,}5^2-3{,}45^2)} = -15 \text{ kG/cm}^2$$

$$\sigma_t = \frac{p_x \cdot r_2^2 - p \cdot r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} + \frac{(p_x - p)\, r_2^2 \cdot r_3^2}{r_3^2 (r_3^2 - r_2^2)}$$

$$\sigma_t = \frac{13{,}8 \cdot 3{,}45^2 - 15 \cdot 3{,}5^2}{3{,}5^2 - 3{,}45^2} + \frac{(13{,}8-15) \cdot 3{,}45^2 \cdot 3{,}5^3}{3{,}5^2 (3{,}5^2 - 3{,}45^2)} = -97 \text{ kG/cm}^2$$

dla $r = r_2$

$$\sigma_r = \frac{13{,}8 \cdot 3{,}45^2 - 15 \cdot 3{,}5^2}{3{,}5^2 - 3{,}45^2} - \frac{(13{,}8 - 15) \cdot 3{,}5^2}{(3{,}5^2 - 3{,}45^2)}$$

$$\sigma_r = -13{,}8 \text{ kG/cm}^2$$

$$\sigma_t = \frac{13{,}8 \cdot 3{,}45^2 - 15 \cdot 3{,}5^2}{3{,}5^2 - 3{,}45^2} + \frac{(13{,}8-15) \cdot 3{,}45^2 \cdot 3{,}5^2}{3{,}45^2 (3{,}5^2 - 3{,}45^2)} = -98 \text{ kG/cm}^2.$$

Naprężenia w pierścieniu betonowym płaszcza obudowy

dla $r = r_2$

$$\sigma_r = -13{,}8 \text{ kG/cm}^2$$

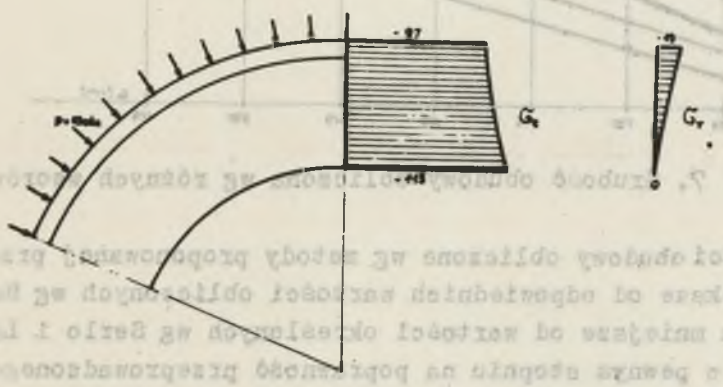
$$\sigma_t = -\frac{13{,}8 \cdot 3{,}45^2}{3{,}45^2 - 3{,}0^2}\left(1 + \frac{9{,}0}{11{,}9}\right) = -99{,}2 \text{ kG/cm}^2$$

dla $r = r_o$

$$\sigma_r = 0$$

$$\sigma_t = \frac{-13{,}8 \cdot 3{,}45}{3{,}45^2 - 3{,}0^2}(1 + 1) = -113 \text{ kG/cm}^2.$$

Rozkład naprężeń radialnych i stycznych w obudowie wstępnej i ostatecznej przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Rozkład naprężeń σ_r i σ_t w pierścieniu obudowy

7. Porównanie wyników

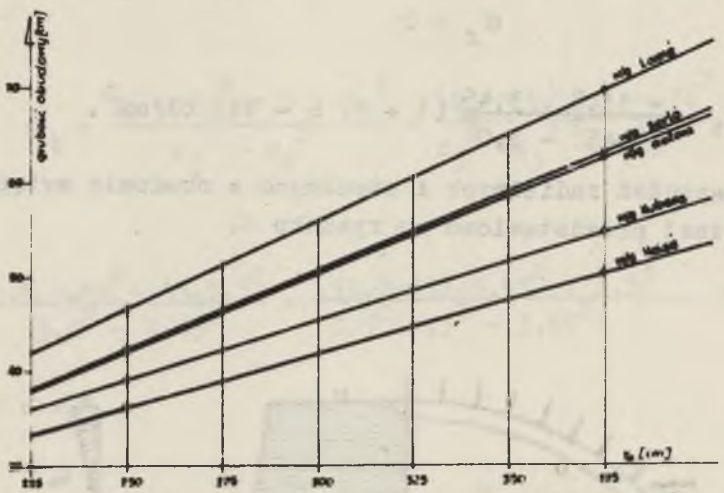
W celu sprawdzenia poprawności podanych rozważań przeprowadzono porównawcze obliczenia grubości obudowy ostatecznej przy po-

mocy wzorów Serlo, Heisé, Lamé i Hubera oraz wg metody podanej przez autora.

Obliczenia przeprowadzono dla następujących parametrów:

ciśnienie p = 15 atn, marka betonu R_w = 400 kG/cm^2, współczynnik pewności S = 2,5, promień wewnętrzny szybu r_o = = 2,50 m; 2,75 m; 3,00 m; 3,25 m; 3,50 m; 3,75 m.

Wyniki obliczeń przedstawiono na wykresie (rys. 7).



Rys. 7. Grubość obudowy obliczona wg różnych wzorów

Grubości obudowy obliczone wg metody proponowanej przez autora są większe od odpowiednich wartości obliczonych wg Heisé i Hubera, a mniejsze od wartości określonych wg Serlo i Lamé co wskazuje w pewnym stopniu na poprawność przeprowadzonego rozumowania.

LITERATURA

[1] Chudek M., Rułka K.: Analiza możliwości wykorzystania siatkobetonu w budownictwie podziemnym kopalń. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 1966. Górnictwo z. 18.

[2] Rułka K.: Metoda projektowania prefabrykowanej obudowy wstępnej z siatkobetonu. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 1966 r. z. 18.

[3] Rułka K.: Przyczynek do badań nad zastosowaniem siatkobetonu do obudowy wyrobisk górniczych. Przegląd Górniczy 1967 w druku.

[4] Majzner-Rułka H.: Wykorzystanie emulsji asfaltowo-lateksowych w budownictwie górniczym. Budownictwo Górnicze Nr 3, 1965 r.