

*Andrzej Wichur**, *Elżbieta Łuczejko***

NOMOGRAMY DO OKREŚLANIA WARTOŚCI SIŁ WEWNĘTRZNYCH W OBUDOWIE SKLEPIONEJ BETONOWEJ

1. Wstęp

W związku z rozpowszechnieniem obudowy powłokowej spadło w ostatnim okresie zainteresowanie zastosowaniem obudowy sklepionej w podziemnych zakładach górniczych [9]. Zgodnie z normą [6] obudowę tę zaleca się stosować w długotrwałych wyrobiskach korytarzowych i komorowych:

- zlokalizowanych w górotworze zawodnionym lub silnie gazonośnym,
- płytko zalegających,
- w innych przypadkach technicznie uzasadnionych.

Do wspomnianych w normie [6] przypadków technicznie uzasadnionych można zaliczyć przede wszystkim długotrwałe podziemne wyrobiska korytarzowe i komorowe (górnice i niegórnice), w których ewentualna obudowa powłokowa będzie posiadać za małą nośność w stosunku do występujących obciążeń (np. w warunkach skał słabych zawodnionych) lub zbyt dużą odkształcalność (np. w warunkach płytkiego zalegania wyrobiska) — przypadki takie występują znacznie częściej w budownictwie tunelowym. Projektowanie obudowy sklepionej dla takich warunków wymaga często przeprowadzenia pracochłonnych obliczeń statycznych, których w wielu przypadkach można uniknąć, dysponując odpowiednimi nomogramami.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie zasadniczych wyników badań nad opracowaniem nomogramów do określania wartości sił wewnętrznych w obudowie sklepionej betonowej, potrzebnych do sprawdzenia nośności tej obudowy zgodnie z normami [5, 6].

* Emerytowany profesor zwyczajny, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

2. Tok projektowania obudowy sklepionej

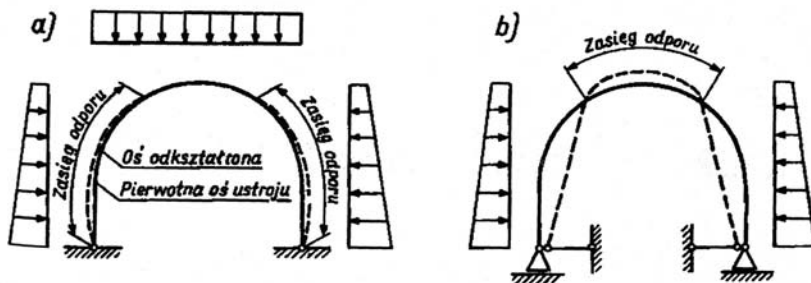
Przed przystąpieniem do projektowania obudowy określa się założenia wstępne, czyli:

- rodzaj i przeznaczenie wyrobiska,
 - wymagania użytkowe,
 - lokalizację wyrobiska,
 - występowanie wpływów eksploatacyjnych na krawędzie, filary i sąsiednie wyrobiska [2].
- Następnie projektowanie przeprowadza się w następujących etapach [6, 9]:
- określenie obciążenia,
 - dobór kształtu obudowy i wstępny dobór wymiarów,
 - wybór schematu statycznego oraz wyznaczenie reakcji i przemieszczeń pod wpływem obciążenia,
 - uwzględnienie odporu sprężystego,
 - obliczenie całkowitych wartości sił wewnętrznych,
 - określenie oraz sprawdzenie przekrojów niebezpiecznych.

Konstrukcje podziemne stanowią ustroje przestrzenne, ale z reguły nie zmieniają w znaczący sposób swoich kształtów i wymiarów. Obciążenia działające wzdłuż obudowy wyrobiska nie zmieniają się lub dzieje się to bardzo wolno. W związku z tym konstrukcje podziemne można traktować jako układy płaskie; podczas ich obliczania analizuje się odcinki o jednostkowej długości, z reguły jednometrowe, wzdłuż podłużnej osi wyrobiska. W zakres obliczeń wchodzi wyznaczenie całkowitych wartości sił wewnętrznych w obudowie i sprawdzenie jej nośności w przekrojach o największym wyężeniu. Sprawdzenie nośności konstrukcji podziemnej obejmuje nie tylko obliczenia wytrzymałościowe, ale należy również uwzględnić współpracę z otaczającym górotworem [3, 6, 8, 9].

Obudowy sklepione oblicza się jako konstrukcje łukowe, ramowo-łukowe lub pierścieniowe, współpracujące z otaczającym górotworem. Współpracę górotworu z obudową zapewnia się poprzez przyjęcie w schemacie statycznym ciągłych lub punktowych sprężystych rozparć — wahaczy. Rozparcia te umieszcza się w odcinkach obwodu obudowy, w których oś odkształcona ustroju podstawowego statycznie wyznaczalnego przemieszcza się w kierunku do górotworu (rys. 1) [6].

W pracy przyjęto do obliczeń, że obudowa sklepiona jest ramą przegubowo — nieprzesuwnie podpartą w miejscu zetknięcia ze spągami, oraz rozpartą do nieodkształcalnego podłoża przy użyciu wahaczy zamocowanych przegubowo do ramy i do podłoża.



Rys. 1. Zasięg odporu na podstawie przemieszczeń układu podstawowego:
a) w ociosach wyrobiska, b) w stropie wyrobiska [6]

3. Założenia do opracowania nomogramów

Nomogramy wykonano zgodnie z zasadami obliczeń zawartymi w normie [6], przy czym, biorąc pod uwagę pilotażowy charakter nomogramów, przyjęto trzy podstawowe rodzaje skał, którym przyporządkowano następujące parametry:

- łupek ilasty (iłowiec) o podzielności płytowej, wskaźniku zwięzłości Protodiakonowa $f = 1,5$ oraz rozmakalności $0,5 \leq r \leq 0,8$,
- łupek piaszczysty (mułkowiec) o podzielności blokowej, wskaźniku zwięzłości $f = 3,0$ oraz rozmakalności $0,5 \leq r \leq 0,8$,
- piaskowiec o podzielności masywnej, wskaźniku zwięzłości $f = 5,0$ oraz rozmakalności $r \geq 0,8$.

Pozostałe parametry geotechniczne skał przyporządkowane określonej wartości wskaźnika zwięzłości f wg Protodiakonowa dobrano zgodnie z załącznikiem do normy [1], a wartości parametrów geotechnicznych górotworu — wg normy [6]. Jako model obciążenia przyjęto model III (model Cymbariewicza) wg normy [6].

Konstrukcję obudowy przyjęto jako obudowę sklepioną z murami prostymi i sklepieniem kołowym, przy czym wysokość murów prostych ustalono na 2 m, a wartości promieni łuków sklepienia i wysokości strzałki sklepienia przyjęto na podstawie normy [7], w zależności od wartości wskaźnika zwięzłości skał. Wartości parametrów sprężystych betonu obudowy przyjęto wg normy (PN-B-03264:2002), a wartości współczynnika podatności podłoża wg Winklera — wg wzoru wynikającego z rozważenia układu płaskiego sprężystej tarczy z otworem [por. 4]

$$C_p = \frac{E_g}{(1 + \nu_g)r_w} \quad (1)$$

gdzie:

- E_g — współczynnik sprężystości górotworu, MPa,
- ν_g — liczba Poissona górotworu otaczającego wyrobisko,
- r_w — promień wyrobiska w wyłomie, m.

Wartości współczynnika sprężystości materiału wahaczy określono wg wzoru, wynikającego z normy [6]

$$E_{wah} = C_p l_{wah} \quad (2)$$

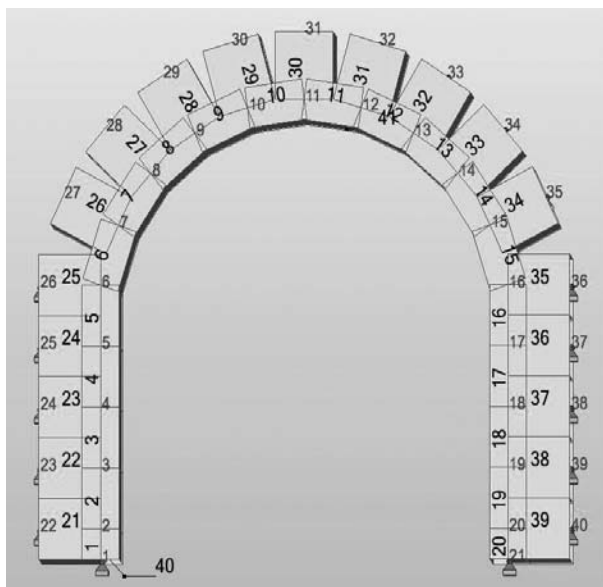
gdzie:

- E_{wah} — współczynnik sprężystości wzdłużnej materiału wahaczy, MPa,
- C_p — współczynnik podatności podłoża, MN/m³,
- l_{wah} — długość wahacza, m.

Obliczenia przeprowadzono na 135 modelach obliczeniowych powstałych z kombinacji następujących wartości:

- wysokość murów prostych: 2 m,
- szerokość wyrobiska: 2 m, 3 m, 4 m, 5 m oraz 5,5 m,
- grubość obudowy: 15 cm, 30 cm, 45 cm,
- klasa betonu: C12/15, C16/20, C20/25,
- wskaźnik zwięzłości skał: $f = 1,5$; $f = 3,0$ oraz $f = 5,0$.

Wartości obciążeń obliczono zgodnie z normą [6] wg wzorów dla modelu III (Cymbarewicz). Wartości sił wewnętrznych obliczono z wykorzystaniem programu Robot Millennium, przyjmując odległość między wahaczami ok. 0,5 m oraz ich długość 0,5 m. Profil obudowy zdefiniowano jako belkę o wymiarach $b \times h$, gdzie $b = 100$ cm, natomiast h to grubość obudowy. Pręty wahaczy zamodelowano jako słupy o wymiarach $b \times h$, gdzie $b = 100$ cm, zaś h jest równe odległości między wahaczami (rys. 2). Ciężar objętościowy wahaczy pominięto oraz założono, że pracują wyłącznie na ściskanie.

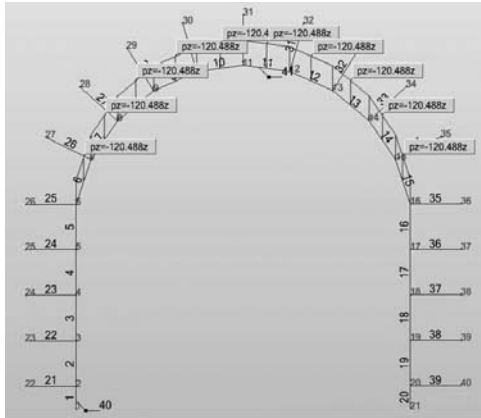


Rys. 2. Profile prętów obudowy i wahaczy (przykład)

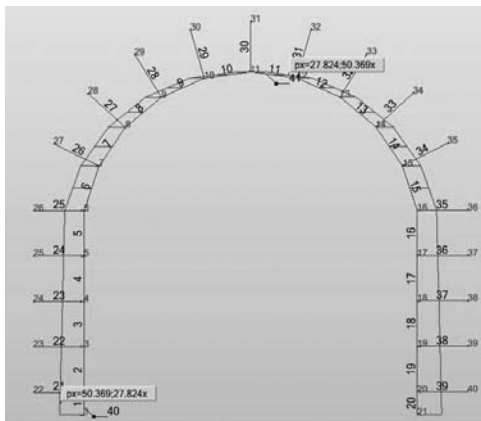
Obciążenia zostały zadane jako:

- ciężar własny obudowy,
- ciśnienie statyczne pionowe — obciążenie jednorodne rzutowane (rys. 3),
- ciśnienie statyczne działające na ociosy — jako obciążenie trapezowe rzutowane (rys. 4).

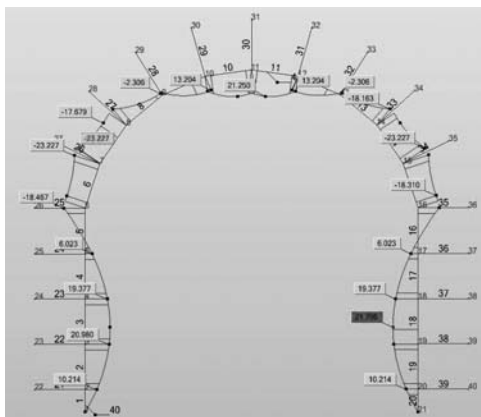
Przykładowe wykresy momentów zginających, sił podłużnych oraz sił poprzecznych, uzyskane z obliczeń, przedstawiono na rysunkach 5, 6 i 7.



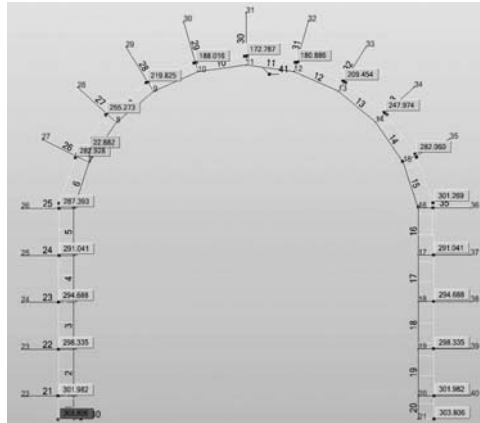
Rys. 3. Obciążenie pionowe (przykład)



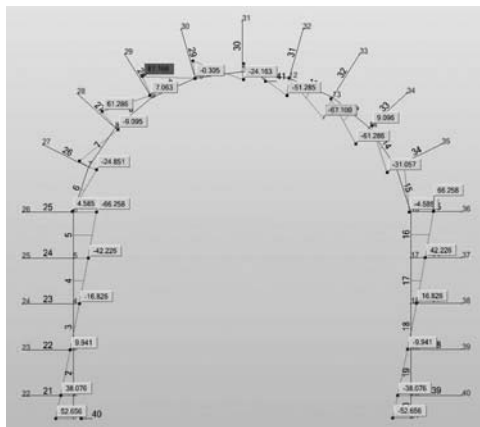
Rys. 4. Obciążenie poziome (przykład)



Rys. 5. Wykres momentów zginających (przykład)



Rys. 6. Wykres sił podłużnych (przykład)



Rys. 7. Wykres sił poprzecznych (przykład)

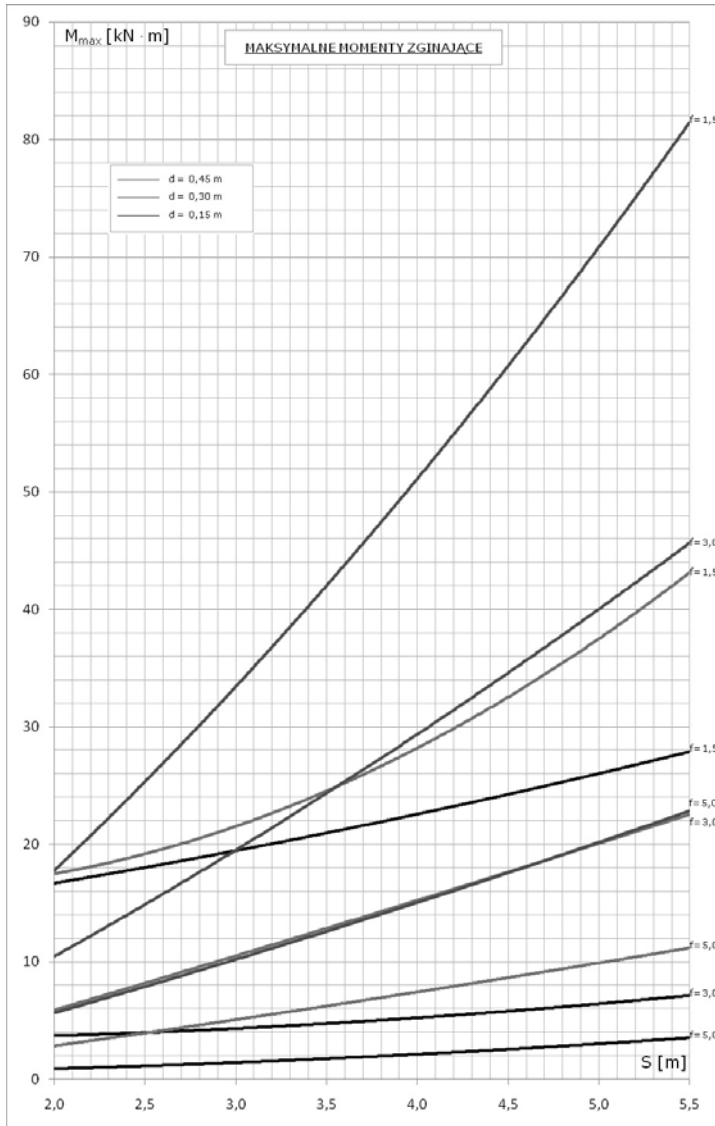
W oparciu o uzyskane wyniki wykonano nomogramy, korzystając z funkcji regresji kwadratowej. Przykład nomogramu do wyznaczania wartości maksymalnych momentów zginających przedstawiono na rysunku 8.

4. Podsumowanie

Celem badań było wyznaczenie wartości sił wewnętrznych w obudowie sklepionej betonowej z uwzględnieniem parametrów geotechnicznych skał za pomocą obliczeń przeprowadzonych w programie Robot Millennium oraz, na podstawie otrzymanych wyników, opracowanie nomogramów pozwalających na wyznaczenie wartości sił wewnętrznych.

Obliczenia przeprowadzono dla 135 modeli powstałych z kombinacji:

- stałej wysokości murów prostych równej 2 m,
- pięciu szerokości wyrobiska: 2 m, 3 m, 4 m, 5 m oraz 5,5 m,



Rys. 8. Przykład nomogramu do wyznaczania maksymalnej wartości momentu zginającego w obudowie sklepionej

- trzech grubości obudowy: 15, 30 i 45 cm,
- trzech wskaźników zwięzłości skał: $f = 1,5; 3,0; 5,0$,
- trzech klas betonu: C12/15, C16/20, C20/25.

Otrzymane wyniki pozwoliły stwierdzić, iż klasa betonu nie wpływa znacząco na wartość momentów zginających oraz odpowiadających im sił. Stąd wyniki uśredniono z trzech klas betonu i z takich danych opracowano nomogramy. Dla zależności wartości momentów

zginających i sił podłużnych od szerokości wyrobiska dobrano krzywą regresyjną o równaniu kwadratowym i współczynniku determinacji R^2 określonym za pomocą programu Microsoft Excel.

W wyniku obliczeń stwierdzono, że:

- dla momentów maksymalnych współczynnik determinacji R^2 dla otrzymanych zależności przyjmuje wartości od 0,999 do 0,995, co oznacza bardzo wysoki stopień korelacji wyników, a zależność wartości momentów maksymalnych od szerokości wyrobiska przyjmuje kształt bardzo zbliżony do funkcji kwadratowej,
- dla momentów minimalnych współczynnik determinacji R^2 przyjmuje wartości od 0,999 do 0,992 (oprócz przypadku dla wskaźnika zwięzłości $f = 1,5$ oraz $d = 15$ cm, gdzie R^2 jest równe 0,975), zatem w większości przypadków kształt wykresu prawidłowo przedstawia zależność wartości minimalnych momentów zginających od szerokości wyrobiska,
- dla sił podłużnych odpowiadających maksymalnym momentom zginającym wartości współczynnika determinacji R^2 zawierają się w przedziale od 1 do 0,946,
- dla sił podłużnych odpowiadających minimalnym momentom zginającym wartości współczynnika determinacji R^2 zawierają się przedziale od 1 do 0,997 — występuje zatem bardzo wysoki stopień korelacji wyników,
- wartości maksymalnych momentów zginających dla $d = 45$ cm i $f = 5,0$ są bardzo zbliżone do wartości momentów dla $d = 30$ cm i $f = 3,0$,
- wartości sił podłużnych odpowiadających maksymalnym momentom zginającym dla wskaźnika zwięzłości $f = 5,0$ dla wszystkich trzech grubości są bardzo zbliżone, oznacza to, że przy wysokim wskaźniku zwięzłości grubość obudowy praktycznie nie ma wpływu na wartość tych sił,
- najwyższą wartość współczynnika R^2 posiadają zależności (zarówno dla momentów jak i odpowiadających sił podłużnych) dla grubości $d = 45$ cm,
- ze wzrostem szerokości wyrobiska wzrasta wartość momentów zginających oraz odpowiadających sił podłużnych,
- momenty zginające osiągają najwyższe wartości dla najgrubszej obudowy oraz najmniejszego wskaźnika zwięzłości,
- odpowiadające siły podłużne osiągają największe wartości dla najcieńszej obudowy oraz najmniejszego wskaźnika zwięzłości.

Rezultatem przeprowadzonych obliczeń są następujące nomogramy:

- nomogram do wyznaczenia wartości maksymalnych momentów zginających,
- nomogram do wyznaczenia wartości minimalnych momentów zginających,
- nomogram do wyznaczenia wartości sił podłużnych odpowiadających maksymalnym momentom zginającym,
- nomogram do wyznaczenia wartości sił podłużnych odpowiadających minimalnym momentom zginającym.

Nie przeprowadzono analizy sił poprzecznych ze względu na ich pomijalność w procesie projektowania.

Uzyskane nomogramy mogą ułatwić projektowanie obudów sklepionych, poprzez umożliwienie odczytania działających momentów zginających i odpowiadających im sił podłużnych w zależności od zadanej szerokości wyrobiska i wskaźnika zwięzłości górotworu.

LITERATURA

- [1] BN-82/0434-07 Wyrobiska korytarzowe i komorowe — Obudowa powłokowa — Wytyczne projektowania i obliczeń statycznych
- [2] *Chudek M.*: Obudowa wyrobisk górniczych. Część 1. Wydawnictwo Śląsk, 1986
- [3] *Galczyński S.*: Podstawy budownictwa podziemnego. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2001
- [4] *Mateja J.*: Studium nad ustaleniem nośności stalowych odrzwi obudowy łukowej w wyrobiskach udostępniających nie narażonych na bezpośredni wpływ ciśnień eksploatacyjnych. Prace Naukowo-Badawcze OBR BG, Mysłowice 1982
- [5] PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone — Obliczenia statyczne i projektowanie
- [6] PN-G-05020:1997 Podziemne wyrobiska korytarzowe i komorowe — Obudowa sklepią — Zasady projektowania i obliczeń statycznych
- [7] PN-G-06010:1998 Wyrobiska korytarzowe poziome i pochyłe w zakładach górniczych — Przekroje poprzeczne symetryczne
- [8] *Wichur A.*: Zagadnienia projektowania obudowy długotrwałych wyrobisk podziemnych. Górnictwo i Geoinżynieria Kwartalnik AGH, R. 33, z. 3/1, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2009
- [9] *Wichur A., Gruszka R.*: Nowe normy projektowania obudowy długotrwałych podziemnych wyrobisk korytarzowych. Konferencja Naukowo-Techniczna Budownictwo Podziemne 2000. Kraków 25–27 września 2000. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2000