ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2004
Seria: GÓRNICTWO z. 261 Nr kol. 1650

Stanisław DUŻY
Politechnika Śląska, Gliwice

PROJEKTOWANIE BUDOWLI PODZIEMNYCH W ŚWIETLE TEORII NIEZAWODNOŚCI

Streszczenie. Do projektowania budowli podziemnych przyjmuje się szereg danych, które określane są z mniejszym lub większym przybliżeniem. Oszacowanie bezpieczeństwa konstrukcji budowli podziemnych jest możliwe przy założeniu probabilistycznego modelu analizy jej niezawodności. W artykule przedstawiono sposób zastosowania teorii bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji w projektowaniu budowli podziemnych.

DESIGNING OF UNDERGROUND BUILDINGS IN THE LIGHT OF RELIABILITY THEORY

Summary. A lot of data is needed to design underground buildings. The data have been defined with certain approximation. Estimate of safety of underground buildings construction is possible with the use of a probabilistic model of reliability analysis. The paper presents the applying method of constructions safety and reliability in underground buildings design.

1. Wprowadzenie

Zapewnienie stateczności budowli podziemnych wyrażającej się poprzez zachowanie w określonym czasie wymaganych gabarytów wyrobiska oraz zapewnienie bezpieczeństwa pracujących w nim ludzi, maszyn i urządzeń jest podstawowym zadaniem projektanta.

Problem oceny bezpieczeństwa i niezawodności użytkowania budowli podziemnych jest podstawowym zadaniem ich projektowania i realizacji.

Dobór obudowy budowli podziemnych wykonywany jest w przy wykorzystaniu metod deterministycznych. Do obliczeń przyjmuje się szereg danych określanych z mniejszym lub większym przybliżeniem bez uwzględniania np. zmienności budowy i własności

wytrzymałościowych i odkształceniowych górotworu w obrębie określonej bryły górotworu. Wyłom wyrobiska wykonywany jest z pewnym przybliżeniem, do wykonania obudowy stosuje się elementy wykonane z określoną dokładnością, a jakość wykonania obudowy również jest niejednorodna. Stan ten prowadzi do sytuacji, w której większość danych można traktować jako zmienne losowe o przyjętym rozkładzie prawdopodobieństwa.

W tej sytuacji celowe wydaje się zastosowanie w projektowaniu budowli podziemnych probabilistycznych metod ich projektowania pozwalających na określenie dla przyjętej konstrukcji w danych warunkach geologiczno–górniczych prawdopodobieństwa bezpieczeństwa lub prawdopodobieństwa awarii.

2. Elementy teorii bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji

W modelach stosowanych najczęściej w projektowaniu inżynierskim wyróżnia się trzy podstawowe pojęcia, a mianowicie [15]:

- *niezawodność* – prawdopodobieństwo, że konstrukcja (system) nie ulegnie awarii w przyjętym czasie jej eksploatacji (przy założeniu, że w chwili odbioru nie ma wad),
- *bezpieczeństwo* – prawdopodobieństwo, że konstrukcja (system) nie ulegnie zniszczeniu w okresie jej realizacji i eksploatacji,
- *jakość* – prawdopodobieństwo, że konstrukcja (system) lub jej elementy (podsystemy) w chwili odbioru nie mają wad.

Niezawodność związana jest z pojęciem awarii, która jest pewnym stanem umownym zależnym od konstrukcji i środowiska, w którym jest eksploatowana.

Awaria jest pojęciem związanym z przekroczeniem przez zmienne określające zachowanie się konstrukcji (systemu) pewnej a priori zadanej granicy. Może to być niepożądane ze względu na stan samej konstrukcji z uwagi na szkodliwe oddziaływanie na ludzi, czy też związane z rozpatrywaną konstrukcją inne urządzenia [15]. W odniesieniu do wyrobisk górniczych przez awarię rozumie się stan wystąpienia nadmiernego zaciskania wyrobiska prowadzącego m.in. do trudności w zachowaniu wymaganych parametrów wentylacyjnych, wymaganych przepisami odległości ruchowych.

Bezpieczna eksploatacja obiektu zależy również od jakości wykonania, przy czym jakość konstrukcji lub jej elementu określa się w chwili odbioru budowli, natomiast bezpieczeństwo i niezawodność konstrukcji odnoszone są do całego okresu jej użytkowania.

3. Obciążenie i podporność obudowy jako wielkości losowe

Losowy charakter obciążenia obudowy odrzwiowej stalowej podatnej oparto na następujących przesłankach [11]:

- własności wytrzymałościowe i odkształceniowe skał budujących masyw w rejonie analizowanej budowli podziemnej określane są z pewnym przybliżeniem na podstawie badań w punktach rozproszonych,
- wielkości i rozkład naprężeń w masywie w rejonie analizowanej budowli określane są z pewnym przybliżeniem na podstawie badań w punktach rozproszonych,
- wyłom wyrobiska wykonywany jest z pewnym przybliżeniem,
- do obliczeń obciążenia obudowy stosuje się metody oparte na uproszczonych modelach.

Losową podporność obudowy stalowej podatnej charakteryzuje się przy przyjęciu następujących założeń [12]:

- podporność obudowy wyrażana jest jako graniczne obciążenie obudowy, jakie może przenieść obudowa bez utraty stateczności przy przyjętych modelach jej obciążenia,
- podporność obudowy określana jest jako mniejsza wartość kryterium wytrzymałości profilu oraz kryterium nośności zamka,
- odrzwia obudowy poddane są procesowi mimośrodowego ściskania,
- elementy, z których wykonana jest obudowa, wykonane są z materiału o parametrach mieszczących się w pewnym przedziale,
- obudowa wykonana jest z pewnym przybliżeniem dopuszczanym przez normy.

W efekcie analizy statystycznej jako dane wejściowe do doboru obudowy stalowej podatnej np. wg [11, 12] uzyskuje się między innymi następujące wielkości:

- średnia wartość i odchylenie standardowe wytrzymałości na ściskanie określonego pakietu skał,
- średnia wartość i odchylenie standardowe modułu sprężystości określonego pakietu skał,
- średnia wartość i odchylenie standardowe naprężeń w górotworze otaczającym wyrobisko,
- średnie wartości i odchylenia standardowe gabarytów wyłomu wyrobiska,
- średnie wartości i odchylenia standardowe sił wewnętrznych w najbardziej wytężonym przekroju na obwodzie odrzwi obudowy,

- średnia wartość i odchylenie standardowe wskaźnika zginania przekroju odrzwi obudowy,
- średnia wartość i odchylenie standardowe współczynnika wyboczenia,
- średnia wartość i odchylenie standardowe powierzchni przekroju poprzecznego kształtownika odrzwi obudowy,
- średnia wartość i odchylenie standardowe wytrzymałości materiału odrzwi obudowy,
- średnia wartość i odchylenie standardowe nośności zamka odrzwi obudowy ŁP,

Zakładając, że obciążenie obudowy $q_0(\omega)$ i jej podporność $P_0(\omega)$ wyrażoną jako graniczne obciążenie, jakie może przenieść obudowa bez utraty stateczności, są zmiennymi losowymi wielowymiarowymi określanymi w oparciu o n przyjmowanych danych traktowanych jako zmienne losowe również o rozkładach normalnych $x_i(\omega)$ i $y_i(\omega)$, zależności obciążenia i podporności obudowy można określić za pomocą wzorów [1]:

$$q_0(\omega) = f[x_1(\omega), x_2(\omega), \ldots, x_n(\omega)] \tag{1}$$

$$P_0(\omega) = g[y_1(\omega), y_2(\omega), \ldots, y_n(\omega)] \tag{2}$$

Wartości średnie obciążenia i podporności obudowy można określić ze wzorów aproksymacyjnych jako wartości obciążenia i podporności obudowy określone dla średnich wartości poszczególnych danych:

$$\overline{q}_0 = f(\overline{x}_1, \overline{x}_2, \ldots, \overline{x}_n) \tag{3}$$

$$\overline{P}_0 = g(\overline{y}_1, \overline{y}_2, \ldots, \overline{y}_n) \tag{4}$$

Odchylenia standardowe obciążenia i podporności obudowy jako zmiennych losowych o rozkładzie normalnym obliczyć można z zależności:

$$s_{q_0} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot s_{x_i}^2} \tag{5}$$

$$s_{P_0} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial g}{\partial y_i} \right)^2 \cdot s_{y_i}^2} \tag{6}$$

Ze wzorów (5) i (6) wynika, że odchylenie standardowe obciążenia obudowy będzie zawsze większe od odchyleń standardowych poszczególnych danych wejściowych.

Mając określoną średnią wartość obciążenia obudowy wyrobiska oraz jego odchylenie standardowe można określić prawdopodobieństwo wystąpienia wartości obliczeniowej obciążenia obudowy jako dystrybuanty $F(q_0)$:

$$F(q_0)=\frac{1}{s_{q_0}\cdot\sqrt{2\cdot\pi}}\int_0^{\infty}e^{\frac{-(q_0-\overline{q}_0)^2}{2\cdot s^2_{q_0}}}\,dq_0 \tag{7}$$

$$F(P_0)=\frac{1}{s_{P_0}\cdot\sqrt{2\cdot\pi}}\int_0^{\infty}e^{\frac{-(P_0-\overline{P}_0)^2}{2\cdot s^2_{P_0}}}\,dP_0, \tag{8}$$

gdzie: $\overline{q}_0$ – średnia wartość obciążenia obudowy dla danego obszaru,

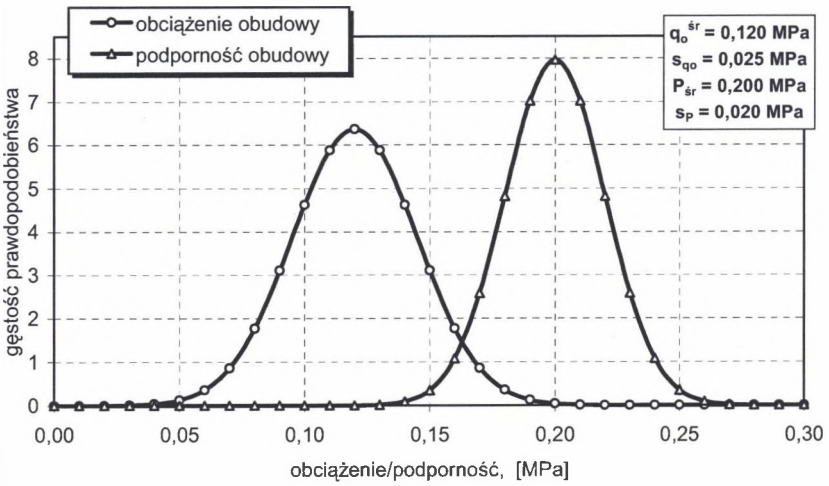
q_0 – obliczeniowa wartość obciążenia obudowy dla projektowanego wyrobiska,

s_{q_0} – odchylenie standardowe obciążenia obudowy,

$\overline{P}_0$ – średnia wartość podporności obudowy,

P_0 – obliczeniowa wartość podporności obudowy dla projektowanego wyrobiska,

s_{P_0} – odchylenie standardowe podporności obudowy,



Rys. 1. Przykład rozkładu obciążenia i podporności obudowy jako zmiennych losowych o normalnym rozkładzie prawdopodobieństwa

Fig. 1. Example of distribution of lining load and support as random variable of normal probability distribution

4. Miary niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji budowli podziemnych

4.1. Szacowanie bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji metodą deterministyczną poziomu I

Miarą bezpieczeństwa konstrukcji w rozwiązaniach deterministycznych jest współczynnik bezpieczeństwa wyrażany w postaci [1, 15]:

$$n = \frac{P_0}{q_0} > 1{,}0, \tag{9}$$

gdzie: P_0 – podporność obudowy,

q_0 – obciążenie obudowy.

4.2. Szacowanie bezpieczeństwa konstrukcji metodą probabilistyczną poziomu II

W metodzie tej bezpieczeństwo konstrukcji określa się za pomocą tzw. warunku zapasu bezpieczeństwa, który można zapisać w postaci [15]:

$$F = P_0 - q_0 \leq 0, \tag{10}$$

gdzie: F - zapas bezpieczeństwa,

P_0 - podporność obudowy,

q_0 - obciążenie obudowy.

Dane są wielkości losowe podporności obudowy i jej obciążenia o normalnym rozkładzie prawdopodobieństwa w postaci [1]:

$$f(P) = \frac{1}{s_P \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{P - \overline{P}}{2 \cdot s_P}\right) \tag{11}$$

$$f(q_0) = \frac{1}{s_q \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{q_0 - \overline{q}}{2 \cdot s_q}\right), \tag{12}$$

gdzie: $\overline{P}, \overline{q}$ - średnie wartości podporności obudowy i jej obciążenia,

s_P, s_q - odchylenia standardowe wartości podporności obudowy i jej obciążenia.

Jako wskaźnik bezpieczeństwa przyjmuje się współczynnik niezawodności Cornella t:

$$t = \frac{\overline{P} - \overline{q}}{\sqrt{s_P^2 + s_q^2}} \tag{13}$$

Wartość dystrybuanty współczynnika niezawodności $p(t)$ oznacza prawdopodobieństwo bezpieczeństwa konstrukcji obudowy, natomiast wartość $[1-p(t)]$ oznacza prawdopodobieństwo awarii konstrukcji. Prawdopodobieństwo awarii można zatem określić ze wzoru:

$$P_a = \Pr[F \leq 0] = \int_{-\infty}^{0} p(f)\ df, \tag{14}$$

gdzie $p(f)$ – gęstość rozkładu zmiennej losowej F tzw. zapasu bezpieczeństwa.

4.3. Szacowanie bezpieczeństwa konstrukcji metodą probabilistyczną poziomu III

W metodzie tej bezpieczeństwo konstrukcji określa się z warunku [15]:

$$P_a \leq p, \tag{15}$$

gdzie: P_a – prawdopodobieństwo awarii,

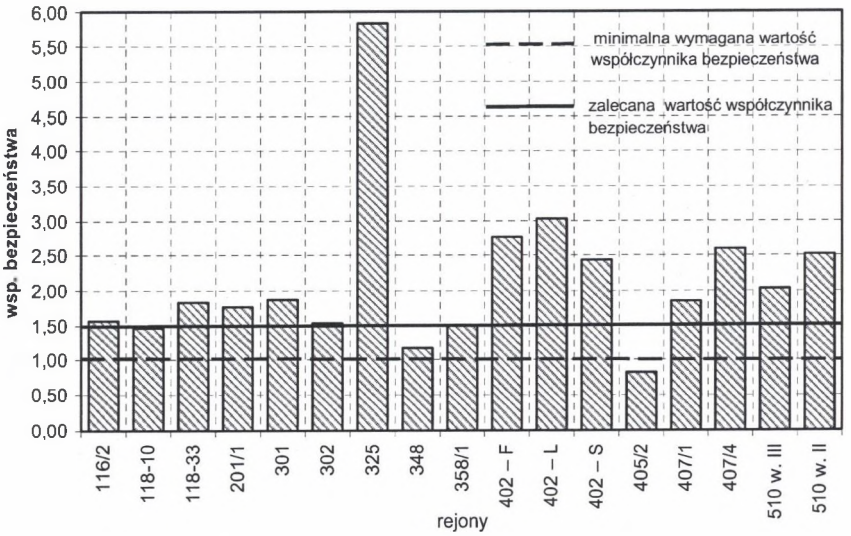
p – akceptowany poziom prawdopodobieństwa awarii.

W zależności od rodzaju warunku oceny stopnia bezpieczeństwa konstrukcji jako akceptowany poziom prawdopodobieństwa awarii stosuje się wielkości rzędu :

- dla warunków wytrzymałościowych – $10^{-4} \div 10^{-6}$,
- dla warunków użyteczności konstrukcji – $10^{-2} \div 10^{-4}$.

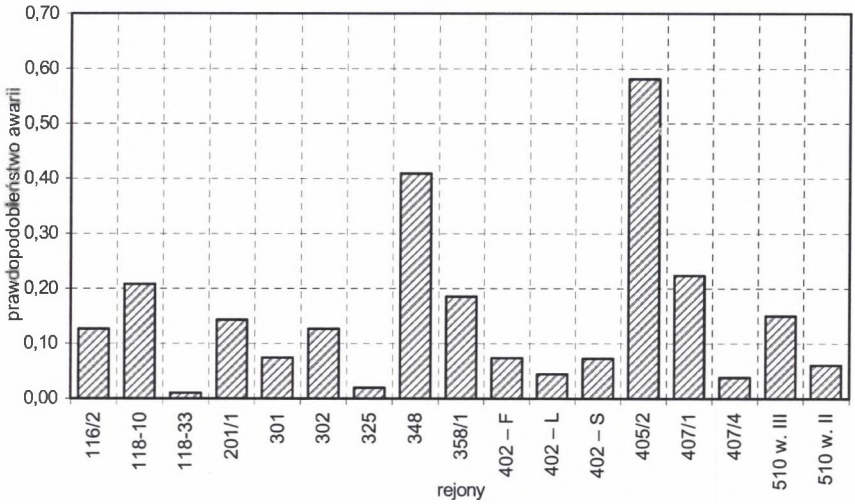
5. Badania stopnia bezpieczeństwa wyrobisk korytarzowych w kopalniach węgla kamiennego

Badania stopnia bezpieczeństwa wyrobisk korytarzowych przeprowadzono dla 178 wyrobisk zlokalizowanych w przyjętych do analizy 17 rejonach kopalń GZW. Stopień bezpieczeństwa wyrobisk korytarzowych określono za pomocą metody deterministycznej poziomu I oraz metody probabilistycznej poziomu II. Uogólnione wyniki przeprowadzonych analiz dla poszczególnych rejonów przedstawiono na rys. 2 i 3.



Rys. 2. Kształtowanie się średnich wartości współczynnika bezpieczeństwa dla poszczególnych rejonów w GZW

Fig. 2. Shape of medium value of the factor of safety for separate regions in GZW



Rys. 3. Kształtowanie się wartości średniej prawdopodobieństwa awarii w wyrobiskach korytarzowych dla poszczególnych rejonów w GZW
Fig. 3. Shape of medium value of the failure probability in headings for separate regions in GZW

6. Podsumowanie

Obiektywne oszacowanie bezpieczeństwa konstrukcji obudowy wyrobisk górniczych możliwe jest jedynie przy założeniu probabilistycznego modelu analizy jej niezawodności. Probabilistyczna analiza bezpieczeństwa elementów konstrukcyjnych obudowy górniczej jest możliwa na podstawie aktualnego stanu wiedzy. W tym celu należy znać losowe charakterystyki nośności elementów lub systemu konstrukcyjnego oraz rozkłady losowych obciążeń, które pozwolą wyznaczyć losowe siły wewnętrzne.

W warunkach budownictwa podziemnego znajomość danych wejściowych do procesu projektowania określana jest z pewnym przybliżeniem. Stosowanie metod probabilistycznych pozwala na określenie prawdopodobieństwa spełnienia warunków przyjętych do obliczeń.

Metody probabilistyczne, pozwalające na określenie prawdopodobieństwa utraty stateczności przez obudowę wyrobisk górniczych, mogą okazać się bardzo przydatne w warunkach trudnej sytuacji ekonomicznej kopalń, gdyż pozwolą na uzasadnienie konieczności zwiększenia nakładów na zabezpieczenie wyrobiska lub pozwolą na obniżenie kosztów przy niewielkim wzroście ryzyka.

Przeprowadzona w ramach pracy analiza 178 wyrobisk korytarzowych zlokalizowanych w 17 rejonach kopalń GZW wykazała, że zastosowana w nich obudowa charakteryzowała się zmiennym prawdopodobieństwem wystąpienia utraty stateczności.

Przedstawiony w pracy algorytm w celu jego dalszego uszczegółowienia, głównie w zakresie uwzględniania technologii i jakości wykonania wyrobiska i jego obudowy, wzbogacony został o wyniki badań jakości wykonania wyrobiska. Dane te uwzględniono w obliczeniach.

Uzyskane dotychczas wyniki, jak i utylitarność zagadnienia potwierdzają celowość podjętej w ramach pracy tematyki. W celu stworzenia możliwości wykorzystania proponowanego algorytmu konieczne jest zweryfikowanie uzyskanych wyników w praktyce zarówno w zakresie weryfikacji modelu matematycznego, jak i dalszego uszczegółowienia poszczególnych zadań w nim rozwiązywanych.

LITERATURA

1. Biegus A.: Probabilistyczna analiza konstrukcji stalowych. PWN, Warszawa – Wrocław, 1999.
2. Chudek M.: Geomechanika z podstawami ochrony środowiska górniczego i powierzchni terenu. Wyd. Pol.Śl., Gliwice 2002.
3. Chudek M.: Obudowa wyrobisk górniczych. Cz. I. Obudowa wyrobisk korytarzowych i komorowych. Wyd. "Śląsk", Katowice 1986.
4. Duży S.: Designing the underground buildings with regard to unreliable information. IV International Conference "GEOTECHNICS 99", Ostrawa 1999.
5. Duży S.: Określenie własności masywu skalnego dla projektowania obudowy budowli podziemnych w oparciu o wyniki badań w punktach rozproszonych. Międzynarodowa Konferencja "IV Szkoła Geomechaniki", Gliwice- Ustroń 1999.
6. Duży S.: Określanie zakresu badań własności skał dla potrzeb projektowania budowli podziemnych. IX Międzynarodowe Sympozjum "Geotechnika '2000", Gliwice – Ustroń, 2000.
7. Duży S.: Analiza statystyczna wytrzymałości na ściskanie skał masywu dla potrzeb projektowania budowli podziemnych. IX Międzynarodowe Sympozjum "Geotechnika '2000", Gliwice – Ustroń 2000.
8. Duży S.: Prognozowanie własności skał w otoczeniu projektowanego wyrobiska na podstawie wyników badań w punktach rozproszonych. Budownictwo Górnicze i Tunelowe, 2000, nr 4.
9. Duży S.: Analiza zmienności własności wytrzymałościowych skał stropowych w aspekcie możliwości stosowania obudowy kotwiowej. Międzynarodowa Konferencja "Nowoczesne technologie górnicze 2001 - Kotwienie", Ustroń wrzesień 2001.
10. Duży S.: Własności wytrzymałościowe skał a badania dla potrzeb doboru obudowy wyrobisk. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, 2002, nr 8(96).

11. Duży S.: Oddziaływanie górotworu na obudowę wyrobisk korytarzowych w ujęciu probabilistycznym. Budownictwo Górnicze i Tunelowe, 2003, nr 3.
12. Duży S.: Probabilistyczna analiza podporności stalowej obudowy odrzwiowej podatnej wyrobiska korytarzowego. Wiadomości Górnicze, 2004, nr 1.
13. Duży S.: Probabilistyczna analiza stateczności budowli podziemnych. Przegląd Górniczy, 2004, nr 4.
14. Duży S.: Analiza niezawodności konstrukcji budowli podziemnych. International Conference "GEOTECHNICS 2004", Strybskie Pleso, 2004.
15. Szymczak Cz.: Elementy teorii projektowania. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Kazimierz Rułka

Abstract

Estimate of safety and reliability of underground buildings construction is the fundamental task of designing and realisation.

Many input data such as for example rock mass strength and deformation properties, massive tectonics, depth of roadway localisation, gabarit of roadway cross-section, building technology and support construction have been received to calculation. The parameters approximately have been defined and may be recognized as random variable. In this case rock mass influence and support capacity may be recognized as random variable.

Estimate of safety of underground buildings construction is possible with the use of a probabilistic model of reliability analysis. The paper presents the applying method of constructions safety and reliability in underground buildings design.

Applying deterministic methods obtains medium value of the factor of safety, and applying probabilistic methods obtains value of constructions safety and reliability as failure probability.

The paper presents results of safety analysis of 178 roadways located in 17 regions in GZW. The analysis show, that a failure probability in this roadways are variable.