

Witold Pytel

**GEOMECHANICZNE PROBLEMY
DOBORU OBUDOWY KOTWOWEJ
DLA WYROBISK GÓRNICZYCH**



KGHM CUPRUM sp. z o.o. –
Centrum Badawczo-Rozwojowe

Wrocław 2012 r.

SPIS TREŚCI

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | MIEJSCE GEOMECHANIKI W NAUKACH GÓRNICZYCH | 9 |
| 1.1 | Wprowadzenie | 9 |
| 1.2 | Zarys rozwoju geomechaniki w ujęciu historycznym | 12 |
| 1.3 | Ogólny model geomechaniczny kopalni podziemnej | 23 |
| 1.4 | Stan naprężeń w górotworze naruszonym eksploatacją górnictw | 27 |
| 1.4.1 | Stan naprężeń pierwotnych | 27 |
| 1.4.2 | Stan naprężeń w górotworze naruszonym eksploatacją górnictw | 30 |
| 1.4.3 | Dołowe przejawy działania naprężeń poziomych o znacznej intensywności i sposoby zmniejszenia zagrożenia zawałami generowanymi działaniem poziomych naprężeń tektonicznych | 34 |
| 1.4.4 | Metody identyfikacji składowych tensora naprężeń głównych w górotworze | 38 |
| 2 | METODY OBLICZENIOWE W GEOMECHANICE | 49 |
| 2.1 | Przedmiot klasycznych badań geomechaniki | 49 |
| 2.2 | Przegląd zagadnień rozwiązywanych metodami geomechaniki | 53 |
| 2.3 | Istota metod numerycznych | 55 |
| 2.4 | Dyskretny liniowy układ mechaniczny | 57 |
| 2.5 | Zarys metod numerycznych wykorzystywanych do modelowania górotworu | 58 |
| 2.5.1 | Wprowadzenie | 58 |
| 2.5.2 | Metoda Elementów Skończonych (MES) | 60 |
| 2.5.3 | Metoda Różnic Skończonych (MRS) | 63 |
| 2.5.4 | Metoda Elementów Brzegowych | 68 |
| 2.5.5 | Metoda Elementów Dyskretnych (MED) | 70 |
| 2.5.6 | Model hybrydowy MES/MED/FM wykorzystujący zasady mechaniki pęknięcia skał (Fracture Mechanics) | 74 |
| 2.5.7 | Błędy obliczeń numerycznych | 77 |
| 3 | SYNTEZA TEORII SPRĘŻYSTOŚCI | 78 |
| 3.1 | Opis stanu naprężenia w teorii sprężystości (podstawowe informacje) | 78 |
| 3.2 | Opis stanu odkształcenia w teorii sprężystości (podstawowe informacje) | 80 |
| 3.3 | Równania podstawowe teorii sprężystości | 81 |
| 3.3.1 | Równania statyczne lub dynamiczne | 81 |
| 3.3.2 | Związki geometryczne | 81 |
| 3.3.3 | Równania sprężystości | 82 |
| 3.3.4 | Rozwiązanie zadania teorii sprężystości w przemieszczeniach (równania Lamego) | 82 |
| 4 | WŁASNOŚCI SKAŁ ORAZ SPOSOBY ICH MODELOWANIA | 84 |
| 4.1 | Wprowadzenie | 84 |
| 4.2 | Własności górotworu oraz prawa konstytutywne dla utworów geologicznych | 85 |
| 4.3 | Podstawowe modele matematyczne ośrodka skalnego | 87 |
| 4.3.1 | Ciało liniowo-sprężyste – Model Hooke’a | 87 |
| 4.3.2 | Ciało nieliniowo-sprężyste | 91 |
| 4.3.3 | Ciało doskonale plastyczne | 96 |
| 4.3.4 | Ciała sprężysto-lepkie | 101 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 5 | ZNISZCZENIE MASYWU SKALNEGO | 108 |
| 5.1 | Wprowadzenie | 108 |
| 5.2 | Teorie zniszczenia materiałów | 110 |
| 5.2.1 | Hipotezy wytrzymałościowe dla materiałów konstrukcyjnych (stal) | 110 |
| 5.2.2 | Klasyczne hipotezy wytrzymałościowe dla materiałów skalnych | 113 |
| 5.2.3 | Empiryczne hipotezy zniszczenia ośrodka skalnego | 119 |
| 6 | RODZAJE SYSTEMÓW OBUDOWY WYROBISK GÓRNICZYCH I METODY ICH DOBORU / PROJEKTOWANIA | 137 |
| 6.1 | Uwagi ogólne | 137 |
| 6.2 | Rodzaje systemów obudowy wyrobisk podziemnych | 142 |
| 7 | CHARAKTERYSTYKA ELEMENTÓW OBUDOWY WYROBISK PODZIEMNYCH | 144 |
| 7.1 | Wprowadzenie | 144 |
| 7.2 | Niepodatne systemy obudowy punktowej (kotwienie) | 144 |
| 7.2.1 | Kotwy rozprężne | 144 |
| 7.2.2 | Kotwy wklejane | 145 |
| 7.2.3 | Kotwy rozprężno-wklejane, kotwy rurowe | 146 |
| 7.2.4 | Kotwy linowe | 146 |
| 7.3 | Podatne systemy obudowy punktowej (tzw. kotwy dynamiczne) | 149 |
| 7.4 | Systemy obudowy powierzchniowej | 156 |
| 7.4.1 | Opinki linowe | 156 |
| 7.4.2 | Opaski i taśmy | 157 |
| 7.4.3 | Siatki stalowe (ekrany siatkowe) | 159 |
| 7.4.4 | Natrysk cementowy (torkret) | 159 |
| 7.4.5 | Membrany – TSL (Thin Spray-On Liner) | 161 |
| 8 | IDYTYFIKACJA MOŻLIWYCH MECHANIZMÓW ZNISZCZENIA STROPU ORAZ WSKAZANIE ŚRODKÓW MINIMALIZUJĄCYCH PRAWDOPODOBIEŃSTWO WYSTĄPIENIA ZAWAŁÓW | 162 |
| 8.1 | Wprowadzenie | 162 |
| 8.2 | Zawały spowodowane istniejącym układem nieciągłości w górotworze otaczającym wyrobiska | 170 |
| 8.3 | Ocena skuteczności kotwienia ukośnego w aspekcie przeciwdziałania pojawianiu się zarysowań/pęknięć stropu na skutek występowania naprężeń głównych o znacznych wartościach | 175 |
| 9 | OBLICZANIE OBCIĄŻEŃ DZIAŁAJĄCYCH NA OBUDOWĘ WYROBISK GÓRNICZYCH | 184 |
| 9.1 | Uwagi ogólne | 184 |
| 9.2 | Obciażenie działające na obudowę podporową | 184 |
| 9.2.1 | Obciażenie wg teorii Cymbarewicza | 184 |
| 9.2.2 | Obciażenie wg teorii Protodiakonowa | 185 |
| 9.2.3 | Model uwzględniający wypiętrzanie spagu | 187 |
| 9.2.4 | Model „ciśnień deformacyjnych” | 188 |
| 9.2.5 | Model Bierbaumera | 189 |
| 9.2.6 | Model Airey’a | 190 |
| 9.2.7 | Model Terzaghiego | 191 |
| 9.2.8 | Inne sposoby określania ciśnienia górotworu działającego na zakrzywione sklepienie wyrobiska | 192 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 9.3 | Obciążenie działające na obudowę powłokową podziemnych wyrobisk górniczych | 194 |
| 9.3.1 | Wprowadzenie | 194 |
| 9.3.2 | Obliczanie obciążeń działających na obudowę powłokową | 195 |
| 9.4 | Obciążenie działające na układ: kotwa – otoczenie skalne | 199 |
| 9.4.1 | Wprowadzenie | 199 |
| 9.4.2 | Kotwa mechaniczna/rozprężna/ekspansywna | 200 |
| 9.4.3 | Kotwa wklejana | 201 |
| 10 | PODSTAWY PROJEKTOWANIA OBUDÓW KOTWOWYCH | 205 |
| 10.1 | Wprowadzenie | 205 |
| 10.2 | Podstawowe wyzwania | 211 |
| 10.3 | Parametry obudowy pozwalające skutecznie przeciwdziałać niestatecznościom | 212 |
| 11 | METODY ANALITYCZNE OCENY STANU GÓROTWORU I ICH ZASTOSOWANIE DO PROJEKTOWANIA/DOBORU OBUDOWY | 215 |
| 11.1 | Wprowadzenie | 215 |
| 11.2 | Metoda podwieszania słabej warstwy | 217 |
| 11.3 | Metoda spinania warstw stropowych | 220 |
| 11.3.1 | Istota metody | 220 |
| 11.3.2 | Teoria Panka | 222 |
| 11.3.3 | Metoda Panka-Salustowicza | 224 |
| 11.3.4 | Metoda Langa i Bischoffa | 225 |
| 11.3.5 | Empiryczna metoda Stillborga | 226 |
| 11.4 | Wskazówki do projektowania | 227 |
| 12 | METODY EMPIRYCZNE OCENY STANU GÓROTWORU I ICH ZASTOSOWANIE DO PROJEKTOWANIA/DOBORU OBUDOWY | 228 |
| 12.1 | Wprowadzenie | 228 |
| 12.2 | Wskaźnik jakości skały – RQD (Rock Quality Designation Index) | 229 |
| 12.3 | Klasyfikacja strukturalna masywu skalnego – RSR (Rock Structure Rating) | 229 |
| 12.4 | Klasyfikacja geomechaniczna RMR (Rock Mass Rating) – Klasyfikacja Bieniawskiego | 231 |
| 12.5 | Nowa Metoda Austriacka budowy tuneli (NATM – New Austrian Tunneling Method) | 235 |
| 12.6 | Liczba N dla Ośrodka Skalnego z Oceną Warunków Geomechanicznych RCR (Rock Condition Rating) | 235 |
| 12.7 | Klasyfikacja MRMR (Mining Rock Mass Rating) dla skał spękanych | 236 |
| 12.7.1 | Skorygowana Wartość Wytrzymałości Niejednorodnej Skały Niespękanej IRS (Intact Rock Strength) | 236 |
| 12.7.2 | Wytrzymałość blokowa skały niespękanej RBS (Rock Block Strength) – Ocena wpływu skali | 237 |
| 12.7.3 | Obecność szczelin | 240 |
| 12.7.4 | Warunki na kontakcie szczelin: zaszeregowanie (JC) | 241 |
| 12.7.5 | Charakterystyka skał w złożu (in-situ) | 243 |
| 12.7.6 | Zaszeregowanie górotworu wg klasyfikacji MRMR (Mining Rock Mass Rating) | 244 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 12.7.7 | Obliczeniowe zaszeregowanie i obliczeniowa wytrzymałość | 248 |
| 12.7.8 | Zastosowanie oceny RMR do mapowania obszarów górniczych pod względem zagrożenia geomechanicznego | 248 |
| 12.7.9 | Dobór rodzaju systemu obudowy na podstawie parametru wiodącego DRMS | 249 |
| 12.8 | RMI – Rock Mass Index – Tabelaryczna metoda doboru obudowy wyrobisk górniczych | 252 |
| 12.8.1 | Ścieżka I – Materiał o strukturze blokowej | 256 |
| 12.8.2 | Ścieżka II – materiał o strukturze ciągłej | 257 |
| 12.9 | Klasyfikacja Q (Rock Tunelling Quality Index) | 261 |
| 12.10 | Klasyfikacja CMMR (Coal Mine Roof Rating) | 266 |
| 12.11 | Ocena skłonności stropu do zawału na podstawie wskaźnika – RFRI | 266 |
| 12.12 | Przydatność metod klasyfikacyjnych w projektowaniu/doborze obudowy wyrobisk podziemnych | 269 |
| 13 | UWAGI W ZAKRESIE PRAWIDŁOWEGO WYBORU OBUDÓW WYROBISK GÓRNICZYCH NA DUŻYCH GŁĘBOKOŚCIACH | 271 |
| 14 | DOŚWIADCZENIA POLSKIEGO GÓRNICTWA MIEDZI W ZAKRESIE ROZWIĄZAŃ OBUDÓW KOTWOWYCH, SYSTEMÓW I TECHNOLOGII KOTWIENIA ORAZ PROFILAKTYKI ZAWAŁOWEJ | 280 |
| 14.1 | Wprowadzenie | 280 |
| 14.2 | Charakterystyka skał stropowych w obszarach górniczych kopalń rud miedzi LGOM | 281 |
| 14.3 | Zasady doboru obudowy wyrobisk stosowane w kopalniach miedzi LGOM | 284 |
| 14.3.1 | Doświadczenia w zakresie zasad doboru obudów wyrobisk udostępniających i przygotowawczych | 284 |
| 14.3.2 | Doświadczenia w zakresie zasad doboru obudów wyrobisk eksploatacyjnych | 290 |
| 14.3.3 | Obecne zasady doboru obudowy wyrobisk w kopalniach LGOM | 291 |
| 14.4 | Tendencje rozwojowe w zakresie sposobu doboru obudowy kotwowej w kopalniach LGOM | 301 |
| 14.4.1 | Badania niestandardowych sposobów zabezpieczania skrzyżowań wyrobisk | 301 |
| 14.4.2 | System obudowy kotwowej o zróżnicowanych długościach żerdzi (kotwy dwupoziomowe) | 302 |
| 14.5 | Rozwój konstrukcji kotew stosowanych w kopalniach rud miedzi LGOM | 303 |
| 14.5.1 | Wprowadzenie | 303 |
| 14.5.2 | Kotwy rozprężne szczękowe | 304 |
| 14.5.3 | Kotwy wklejane ładunkiem żywicznym typu RM | 305 |
| 14.5.4 | Kotwy spoiwowe na bazie ładunków cementowych | 305 |
| 14.5.5 | Kotwy cierne | 306 |
| 14.5.6 | Podsumowanie | 307 |
| 14.6 | Nowatorskie konstrukcje kotew | 309 |
| 14.6.1 | Kotwy do zabezpieczania niskich wyrobisk | 309 |
| 14.6.2 | Zastosowanie kotew długich | 309 |
| 14.6.3 | Nowe konstrukcje podkładek kotwowych | 310 |
| 14.6.4 | Kotwy z głowicą gumową | 310 |
| 14.6.5 | Kotwy epoksydowe i z włókien szklanych | 311 |
| 14.7 | Kontrola stateczności stropu oraz skuteczności kotwienia | 315 |
| 14.7.1 | Stosowane metody i aparatura pomiarowa | 315 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 14.8 | Pomiary obciążenia obudowy kotwowej oraz rozwarstwienia stropu bezpośredniego za pomocą kotew oprzyrządowanych i ekstensometrów magnetycznych | 318 |
| 14.9 | Badania dołowe obciążeń kotew rozprężnych wywołanych wstrząsami sejsmicznymi | 322 |
| 14.10 | Mechanizacja w zagadnieniu obudowy kotwowej | 323 |
| 14.10.1 | Stan aktualny | 323 |
| 14.10.2 | Wozy kotwiące | 323 |
| 14.11 | Wiercenie otworów kotwowych | 328 |
| 14.11.1 | Wozy wierząco-kotwiące | 330 |
| 14.12 | Wykorzystanie techniki komputerowej do rozpoznania pracy skotwionego górotworu | 332 |
| 14.12.1 | Wprowadzenie | 332 |
| 14.12.2 | Określenie wpływu kształtu pola eksploatacyjnego i kierunku działania największej składowej poziomego ciśnienia tektonicznego na stateczność stropu bezpośredniego | 333 |
| 14.12.3 | Określenie zmienności obciążenia elementów obudowy kotwowej w funkcji odległości od frontu eksploatacyjnego | 336 |
| 14.12.4 | Analiza wpływu nachylenia stropu na jego bezpieczeństwo na podstawie modelowania numerycznego | 339 |
| 14.13 | Przykład analizy zachowania się stropu bezpośredniego w wybranych lokalizacjach oddziały wydobywczego na podstawie modelowania numerycznego za pomocą MES | 341 |
| 14.13.1 | Wstęp | 341 |
| 14.13.2 | Odwzorowanie pracy nadkładu jako analogu płytowego | 342 |
| 15 | ZNACZENIE ROZPOZNANIA GEOMECHANICZNEGO W ANALIZIE ZAGROŻENIA ZAWAŁAMI STROPU BEZPOŚREDNIEGO | 349 |
| 16 | WNIOSKI KOŃCOWE | 359 |
| 17 | LITERATURA | 363 |
| 18 | TABELA KOTWOWA | 386 |