

Spis treści

PRZEDMOWA	11
1. WPROWADZENIE	12
1.1. Historia budownictwa podziemnego	12
1.2. Definicje związane z budownictwem podziemnym	17
1.3. Aktualne problemy budownictwa podziemnego	23
1.4. Czy budowa obiektów podziemnych (tuneli, metra) się opłaca?	35
1.5. Wymiary budowli podziemnych	38
1.6. Uwagi dotyczące wyboru trasy tunelu	40
1.7. Zakończenie	41
Literatura	42
2. PODSTAWY GEOINŻYNIERII. CHARAKTERYSTYKA MASYWÓW SKALNYCH PRZED I PO WYKONANIU BUDOWLI PODZIEMNEJ	44
2.1. Wprowadzenie	44
2.2. Problemy inżynierii skalnej	49
2.3. Górotwór, masyw, skała, materiał skalny	53
2.4. Charakterystyka masywów skalnych	57
2.5. Procesy fizyczne zachodzące w masywie skalnym na skutek wykonywania budowli podziemnych	58
Literatura	60
3. ROZPOZNANIE SKAŁ I MASYWÓW SKALNYCH PRZY PROJEKTOWANIU WYROBISK PODZIEMNYCH I TUNELI	62
3.1. Wstęp	62
3.2. Rozpoznanie geoinżynierskie masywu skalnego	62
3.2.1. Badania wstępne	66
3.2.2. Badania szczegółowe dla wykonania projektu budowli podziemnej	69
3.3. Rozpoznanie warunków wodnych	87
3.4. Prowadzenie obserwacji masywu skalnego w czasie wykonywania i użytkowania budowli podziemnych	90
Literatura	92
4. PIERWOTNY STAN NAPRĘŻENIA W MASYWIE SKALNYM	95
4.1. Wstęp	95
4.2. Teoretyczna ocena pierwotnego stanu naprężenia	96
4.2.1. Wpływ wybranych czynników na wartość pierwotnego stanu naprężenia	100

4.3. Analiza wyników pomiarów in-situ pierwotnego stanu naprężenia	109
4.4. Metody pomiaru pierwotnego stanu naprężenia	112
4.4.1. Pomiar kierunków i wielkości naprężeń za pomocą płaskiej sondy (flatjack)	113
4.4.2. Pomiar kierunków i wielkości naprężeń poprzez hydroszczelinowanie (hydraulic fracturing)	114
4.4.3. Pomiar kierunków i wielkości naprężeń poprzez nacinanie otworu wiertniczego (borehole slotter)	117
4.4.4. Pomiar kierunków i wielkości naprężeń poprzez trepanację węglbną (overcoring)	118
4.4.5. Ocena wielkości i kierunków naprężeń za pomocą emisji akustycznej (AE)	120
4.4.6. Ocena wielkości i kierunków naprężeń za pomocą analizy mechanizmu wstrząsu w ognisku	121
4.4.7. Ocena wielkości i kierunków naprężeń na podstawie obserwacji niszczenia otworów wiertniczych (borehole breakouts)	122
4.4.8. Inne metody pomiaru kierunków i wielkości naprężeń	124
4.5. Pomiary naprężenia a efekt skali	125
4.6. Wpływ kierunków i wielkości naprężeń poziomych na stateczność wyrobisk podziemnych	126
Literatura	135

5. CHARAKTERYSTYKA WYBRANYCH WŁASNOŚCI SKAŁ I ICH WPŁYW NA ZACHOWANIE SIĘ MASYWU SKALNEGO

5.1. Wstęp	140
5.2. Badania laboratoryjne wybranych własności fizycznych	141
5.2.1. Gęstość skały	141
5.2.2. Porowatość skały	142
5.2.3. Przepuszczalność skał	146
5.2.4. Wodochłonność a wilgotność skał	149
5.2.5. Elektryczny opór właściwy skał	152
5.2.6. Prędkość rozchodzenia się fal sprężystych	154
5.2.7. Zwiercalność skał	158
5.3. Badania laboratoryjne wybranych własności mechanicznych	161
5.3.1. Pęcznienie skał	161
5.3.2. Rozmywalność skał	163
5.3.3. Mrozoodporność	164
5.3.4. Rozmakalność	165
5.3.5. Wytrzymałość na rozciąganie	166
5.3.6. Wytrzymałość na ścinanie	173

5.4. Zachowanie się przed- i pozniszczeniowe skał w jednoosiowym stanie naprężenia	174
5.5. Charakterystyka przed- i pozniszczeniowa skał w złożonym stanie naprężenia	179
5.6. Wpływ czynnika czasu na zachowanie się skał	185
Literatura	191
6. BADANIA POŁOWE WYBRANYCH WŁASNOŚCI MASYWÓW SKALNYCH	198
6.1. Badania parametrów wytrzymałościowych	198
6.2. Badania parametrów odkształceniowych	208
Literatura	224
7. MODELE GEOINŻYNIERSKIE SKAŁ I MASYWÓW SKALNYCH	229
7.1. Wprowadzenie	229
7.2. Modele fizyczne	229
7.2.1. Modele geofizyczne	229
7.2.2. Modele geostrukturalne i modele spękań (Thiel, Zabuski, 1988)	232
7.2.3. Modele wodochłonności	233
7.3. Modele geoinżynierskie	234
7.3.1. Wstęp	234
7.3.2. Proste i złożone modele mechaniczne skał i masywów skalnych	234
7.3.3. Modele budowy geologicznej masywu skalnego	245
7.3.4. Modele geoinżynierskie dla celów projektowania	251
7.4. Obliczanie metodami numerycznymi obciążenia na obudowę wyrobisk podziemnych i tuneli	253
7.4.1. Wstęp	253
7.4.2. Metoda Elementów Skończonych	255
7.4.3. Metoda Różnic Skończonych	257
7.4.4. Metoda Elementów Brzegowych	258
7.4.5. Metoda Elementów Odrębnych (Distinct Element Method)	261
7.4.6. Metoda Bloków Goodmana i Shi	266
7.4.7. Przykłady określenia stanu naprężenia i przemieszczenia w otoczeniu kołowego tunelu zlokalizowanego w nieciągłym masywie skalnym	268
Literatura	280
8. MECHANIKA ZNISZCZENIA SKAŁ I MASYWÓW SKALNYCH	293
8.1. Wprowadzenie	293
8.2. Kryteria wytrzymałościowe dla gruntów i skał	295
8.2.1. Ogólne rozważania o kryteriach wytrzymałościowych	295

8.2.2. Kryterium wytrzymałościowe Coulomba–Mohra (wg Izicki, 1975)	304
8.2.3. Zmodyfikowane kryterium wytrzymałościowe Coulomba–Mohra (wg Izicki, 1975)	309
8.2.4. Kryterium wytrzymałościowe Burzyńskiego	313
8.2.5. Kryterium wytrzymałościowe Hoeka–Browna	317
8.3. Wpływ wybranych czynników na wytrzymałość skał	317
8.4. Kryteria wytrzymałościowe dla skał anizotropowych	318
8.4.1. Kryterium Jaegera (pojedynczej płaszczyzny nieciągłości)	318
8.4.2. Rozszerzone kryterium wytrzymałościowe Hoeka–Browna	320
8.4.3. Kryterium wytrzymałościowe Bartona	320
Literatura	321
9. WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCINANIE MASYWÓW SKALNYCH	324
9.1. Wstęp	324
9.2. Własności odkształceniowe spękań	328
9.3. Wytrzymałość na ścinanie wzdłuż płaskiej powierzchni	329
9.4. Wytrzymałość na ścinanie dla szorstkiej powierzchni spękania	332
9.4.1. Laboratoryjne badania Pattona (1966)	332
9.4.2. Doświadczalne oszacowanie wytrzymałości na ścinanie	333
9.4.3. Określanie JRC przy pomocy metody nachylania bloczków skalnych	340
9.5. Dylatacja spękanych skał	342
9.6. Wytrzymałość na ścinanie nieciągłości wypełnionych innym materiałem	347
9.7. Model spękanego masywu skalnego	351
Literatura	353
10. OPIS ZACHOWANIA SIĘ MASYWU SKALNEGO W OTOCZENIU WYROBISK PODZIEMNYCH NA PODSTAWIE WYNIKÓW POMIARÓW IN-SITU. METODA OBSERWACYJNA WYKONYWANIA TUNELI	355
10.1. Pomiary prowadzone podczas wykonywania budowli podziemnej	355
10.2. Wykorzystanie metody obserwacyjnej do drążenia tuneli	362
10.3. Zachowanie się masywu skalnego w otoczeniu budowli podziemnej w świetle przeprowadzonych pomiarów	367
Literatura	380
11. WYKORZYSTANIE KLASYFIKACJI SKAŁ I GRUNTÓW DO PROGNOZOWANIA STATECZNOŚCI OBUDOWY WYROBISK PODZIEMNYCH	382
11.1. Wprowadzenie	382
11.2. Klasyfikacje dla gruntów	382

11.3. Klasyfikacje dla masywów skalnych i ich wykorzystanie przy wykonywaniu tuneli	388
11.3.1. Klasyfikacja gruntów Terzagiego	388
11.3.2. Klasyfikacja Deere (RQD)	392
11.3.3. Klasyfikacja Wickhama (RSR)	397
11.3.4. Klasyfikacja Bieniawskiego	399
11.3.4.1. Oszacowanie modułu odkształcenia masywu skalnego oraz jego parametrów wytrzymałościowych na podstawie wartości RMR	402
11.3.4.2. Dobór obudowy wstępnej na podstawie klasyfikacji Bieniawskiego	404
11.3.5. Klasyfikacja Bartona, Liena i Lunde (Q)	405
11.3.5.1. Prognoza zachowania się masywu skalnego w otoczeniu prognozowanego wyrobiska podziemnego na podstawie wartości Q	411
11.3.5.2. Wstępny dobór obudowy prognozowanego tunelu na podstawie wartości Q	414
11.3.6. Korelacje pomiędzy klasyfikacją RMR Bieniawskiego a klasyfikacją Q Bartona	416
11.3.7. Klasyfikacja Hoeka–Brown (GSI)	417
11.3.8. Klasyfikacja Palmströma (R _{Mi})	424
11.3.9. Klasyfikacje masywów fliszowych KF i KFG (Thiel, 1995)	428
Literatura	431
12. STAN NAPRĘŻENIA I ODKSZTAŁCENIA W OTOCZENIU WYROBISK PODZIEMNYCH	437
12.1. Analityczne obliczanie stanu naprężeń i odkształceń	437
12.1.1. Wprowadzenie	437
12.1.2. Wyrobisko podziemne wykonane w masywie skalnym, którego zachowanie opisuje model sprężysty	437
12.1.3. Tunel wykonany w masywie skalnym, którego zachowanie opisuje model sprężysto-plastyczny (Brady, Brown 1994; Hoek, 2000)	452
12.2. Wzajemny wpływ dwóch wyrobisk podziemnych na siebie	456
12.3. Wpływ płaszczyzn osłabienia na rozkład naprężeń	459
12.4. Skrzyżowania wyrobisk podziemnych	463
12.5. Wzrost wytrzymałości masywu skalnego w otoczeniu tuneli	468
Literatura	472
13. DAWNE I WSPÓŁCZESNE METODY BUDOWY TUNELI	474
13.1. Tradycyjne (górnictwo) metody drążenia tuneli	474
13.1.1. Metoda belgijska	475
13.1.2. Metoda austriacka	479

13.1.3. Metoda niemiecka	481
13.2. Nowa Austriacka Metoda Budowy Tuneli	482
13.3. Norweska Metoda Budowy Tuneli (Norwegian Method of Tunneling – skrót NMT)	504
13.4. Drążenie tuneli metodą dzielenia przodka na części	507
13.5. Wykonywanie tuneli przy pomocy maszyn tarczowych i maszyn wierzących TBM i TBMS	514
Literatura	522
14. PROJEKTOWANIE I WSPÓŁPRACA OBUDOWY TUNELU Z MASYWEM SKALNYM	524
14.1. Wprowadzenie	524
14.2. Obudowa budowli podziemnych	525
14.3. Projektowanie obudowy tuneli	529
14.4. Metoda sterowania konwergencją w tunelach	534
14.4.1. Krzywa reakcji masywu skalnego (GRC) i współpraca obudowy z masywem skalnym	535
14.4.2. Krzywa charakteryzująca obudowę (SCC)	539
14.4.3. Przemieszczenia konturu tunelu wzdłuż przekroju przechodzącego przez oś główną tunelu	544
14.5. Przykładowe obliczenia analityczne i numeryczne obudowy tuneli i jej współpracy z masywem skalnym	548
14.5.1. Obliczenia analityczne	549
14.5.2. Obliczenia numeryczne	554
14.6. Wpływ czasu na wielkość naprężeń normalnych do konturu tunelu	564
14.7. Numeryczne określanie wpływu czasu na zachowanie się skał w sąsiedztwie tunelu	573
Literatura	578
15. OBLICZANIE OBCIĄŻENIA NA OBUDOWĘ BUDOWLI PODZIEMNYCH I TUNELI	582
15.1. Wprowadzenie	582
15.2. Określenie obciążeń statycznych działających na obudowę ostateczną wytwarziska podziemnego (tunelu)	582
15.2.1. Teoria Cymbariewicza	582
15.2.2. Teoria Bierbaumera	586
15.2.3. Teoria Aireya	589
15.2.4. Teoria Sałustowicza i jej modyfikacje	590
15.2.5. Teoria Terzaghiego	595

15.2.6. Teoria Rabcewicza	597
15.2.7. Obliczanie obciążenia na obudowę za pomocą klasyfikacji Bieniawskiego	598
15.2.8. Obliczanie obciążenia na obudowę za pomocą klasyfikacji Bartona	600
15.3. Obliczanie obciążenia od spągu wyrobiska podziemnego	602
Literatura	610
16. OBUDOWA BETONOWA	612
16.1. Torkret i beton natryskowy	612
16.1.1. Wstęp	612
16.1.2. Skład i własności mechaniczne torkretu i betonu natryskowego	612
16.1.3. Torkretowanie na sucho i na mokro	615
16.1.4. Funkcje torkretu i betonu natryskowego	617
16.1.5. Torkret i beton natryskowy zbrojony	618
16.1.6. Projektowanie i stosowanie torkretu i betonu natryskowego	620
16.1.7. Wykorzystanie metod numerycznych do projektowania obudowy z torkretu lub betonu natryskowego	626
16.2. Inne obudowy betonowe	632
16.2.1. Obudowa prefabrykowana tuneli	633
16.2.2. Obudowa betonowa monolityczna	638
Literatura	640
17. OBUDOWA STALOWA I KOTWIOWA	644
17.1. Wprowadzenie	644
17.2. Typy kotwi stosowane dla obudowy wyrobisk podziemnych i warunki ich stosowania	646
17.3. Dobór parametrów obudowy kotwiowej dla masywu skalnego traktowanego jako ośrodek ciągły	655
17.4. Dobór parametrów obudowy kotwiowej dla masywu skalnego traktowanego jako ośrodek uwarstwiony	662
17.5. Określanie parametrów obudowy kotwiowej dla masywu skalnego nieciągłego, spękanego	672
17.6. Inne empiryczne metody określania parametrów kotwi	675
17.7. Wykorzystanie metod numerycznych do projektowania obudowy kotwiowej	676
17.8. Obudowa stalowa	679
Literatura	686
18. WPŁYW WYKONANIA TUNELU NA POWIERZCHNIĘ TERENU	697
18.1. Wprowadzenie	697

18.2. Wpływ budowy tunelu na powierzchnię terenu	698
18.3. Metody określania deformacji masywu skalnego wywołanych wykonaniem wzrobiska podziemnego (tunelu)	702
18.3.1. Metody analityczno-empiryczne	702
18.3.2. Metody analityczne	711
18.3.3. Przebieg deformacji w czasie	729
18.3.4. Metody numeryczne	731
18.4. Stan techniczny obiektów budowlanych w rejonie drążonego tunelu.	737
18.4.1. Budynki projektowane	739
18.4.2. Budynki istniejące	741
Literatura	744
19. PORTALE TUNELI	749
19.1. Zmiany w wyglądzie portali na przestrzeni wieków	749
19.2. Projektowanie portali tuneli	752
19.3. Problemy związane z osuwiskami w rejonie portali tuneli	757
Literatura	759