

Spis treści

Przedmowa	13
<i>Tomasz Strzelecki, Andrzej Kaźmierczak</i>	
1. Podstawowe pojęcia z zakresu mechanika ośrodków porowatych	19
1.1. Modelowanie procesów w geoinżynierii	19
1.2. Metodologia budowy modelu	21
1.3. Rozwiązywanie zagadnień granicznych	27
1.3.1. Metoda analityczna poszukiwania rozwiązania	27
1.3.2. Metody obliczeń numerycznych	28
1.4. Literatura do rozdziału 1	31
<i>Anna Uciechowska-Grakowicz, Michał Strzelecki</i>	
2. Zastosowanie systemów informacji geograficznej w mechanice ośrodków porowatych	37
2.1. Budowa modeli geoprzestrzennych	37
2.2. Opis narzędzi informatycznych wykorzystanych w obliczeniach i przygotowaniu danych wyjściowych	40
2.3. Przykład wykonania numerycznego modelu terenu	41
2.4. Przykładowa budowa przestrzennego modelu geologicznego	48
2.5. Literatura do rozdziału 2	53
<i>Monika Bartlewska-Urban</i>	
3. Właściwości fizyczne gruntów i skał	55
3.1. Wprowadzenie	55
3.2. Parametry fizyczne szkieletu gruntowego	59
3.2.1. Podstawowe cechy fizyczne gruntów	59
3.2.1.1. Gęstość właściwa szkieletu gruntowego	59
3.2.1.2. Gęstość objętościowa gruntu	60
3.2.1.3. Wilgotność naturalna gruntu	62
3.2.2. Pochodne cechy fizyczne gruntów	64
3.2.2.1. Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego	64
3.2.2.2. Porowatość	64
3.3. Opis makroskopowy gruntu	68
3.3.1. Klasyfikacja gruntów gruboziarnistych według PN-EN ISO 14688-1:2006 ...	69
3.3.2. Klasyfikacja gruntów drobnoziarnistych według PN-EN ISO 14688-1:2006 ...	71
3.4. Wskaźniki konsystencji gruntu, klasyfikacja według PN-EN ISO 14688-2:2006	74

3.5. Określanie rodzaju gruntu na podstawie badań laboratoryjnych – skład granulometryczny	77
3.5.1. Powierzchnia właściwa	80
3.5.1.1. Oznaczanie powierzchni właściwej na podstawie składu ziarnowego	81
3.6. Cechy mechaniczne gruntów	83
3.6.1. Parametry ścisłości	83
3.6.2. Parametry wytrzymałości na ścinanie	87
3.6.2.1. Wyznaczanie parametrów wytrzymałościowych w aparacie trójosiowego ścinania ABS	88
3.7. Parametry filtracyjne ośrodka porowatego	89
3.7.1. Wznios kapilarny	89
3.7.2. Współczynnik filtracji	92
3.7.2.1. Laboratoryjne metody oznaczania współczynnika filtracji	93
3.8. Literatura do rozdziału 3	97

Michał Strzelecki, Tomasz Strzelecki

4. Podstawy teorii przepływu płynu przez ośrodek porowaty	101
4.1. Prawa rządzące przesączaniem wody przez pory ośrodka dwufazowego	101
4.1.1. Klasyczny model matematyczny teorii filtracji	103
4.1.1.1. Konstytutywne równania stanu	104
4.1.1.2. Równanie ciągłości przepływu	105
4.1.1.3. Klasyczny model matematyczny procesu filtracji	106
4.2. Proces homogenizacji filtracji płynu przez ośrodki porowate metodą zbieżności dwuskalowej	109
4.2.1. Definicja zagadnienia	109
4.2.2. Proces normalizacji równań	112
4.2.3. Proces homogenizacji	117
4.3. Model matematyczny teorii filtracji zgodny z założeniami teorii konsolidacji Biota	128
4.3.1. Założenia wstępne	128
4.3.2. Równanie ciągłości przepływu płynu	130
4.3.3. Równania zachowania pędu dla fazy płynnej	130
4.3.4. Równanie ruchu ściśliwego płynu przez nieodkształcalny szkielet ośrodka dwufazowego	131
4.3.5. Równania filtracji ściśliwego płynu przez ściśliwy szkielet ośrodka dwufazowego	132
4.4. Układ równań hydrodynamiki wód podziemnych w zagadnieniach płaskich	135
4.4.1. Funkcja potencjału prędkości	135
4.4.2. Funkcja prądu	136
4.4.3. Siatka hydrodynamiczna przepływu	141
4.5. Potencjał sił masowych filtracji	142
4.6. Teoria przepływu elektrokinetycznego	146
4.6.1. Sformułowanie problemu przepływu elektrokinetycznego	147
4.6.2. Rozwiązanie problemu przepływu elektrokinetycznego	150
4.6.3. Dysypacja energii w procesie przepływu elektrokinetycznego	160

4.6.4. Podsumowanie uzyskanych rezultatów dla przepływu elektrokinetycznego	162
4.7. Literatura do rozdziału 4	165

Michał Strzelecki, Andrzej Kaźmierczak

5. Rozwiązania zagadnień przepływu płynu przez ośrodek porowaty	169
5.1. Metody rozwiązywania równań hydrodynamiki wód podziemnych płaskich zagadnień przepływów ustalonych metodami analitycznymi	169
5.1.1. Zastosowanie funkcji potencjału zespolonego filtracji	169
5.1.2. Sposób rozwiązywania płaskich zagadnień przepływu metodą przekształceń konforemnych	173
5.1.3. Wykorzystanie funkcji potencjału zespolonego filtracji do rozwiązywania zagadnień dwuwymiarowych przepływu filtracyjnego	180
5.2. Rozwiązania zagadnień brzegowych ze zwierciadłem swobodnym	181
5.2.1. Szczelina drenażowa w warstwie nieprzepuszczalnej (parabola Limasseta)	181
5.2.2. Szczelina drenażowa w warstwie przepuszczalnej	186
5.2.3. Przepływ przez grodzę ziemną posadowioną na podłożu o nieograniczonej miąższości	191
5.3. Zagadnienia przepływu wody pod ciśnieniem	201
5.3.1. Płaski fundament zapory wodnej na warstwie o nieskończonej miąższości	201
5.3.2. Opływ fundamentu budowli piętrzącej z rurą drenażową	214
5.3.3. Ścianka szczelna w gruncie przepuszczalnym o nieskończonej głębokości	222
5.4. Rozwiązanie płaskich zagadnień przepływu filtracyjnego metodami numerycznymi	230
5.4.1. Rozwiązanie zagadnień metodą elementów skończonych	231
5.4.1.1. Płaski fundament zapory wodnej na podłożu o ograniczonej miąższości	235
5.4.1.2. Opływ ścianki szczelnej	241
5.5. Rozwiązania analityczne przepływów niustalonych	247
5.5.1. Zagadnienie Bousinessqa	247
5.5.1.1. Płaskie zadanie teorii Bousinessqa	251
5.5.1.2. Osiowo symetryczne zagadnienie przepływu niustalonego	260
5.6. Literatura do rozdziału 5	267

Michał Strzelecki

6. Proces termofiltracji płynów przez ośrodek porowaty	269
6.1. Założenia wstępne teorii termofiltracji	269
6.2. Równanie ciągłości przepływu płynu	269
6.3. Równanie zachowania pędu płynu	270
6.4. Związki konstytutywne dla procesów nieizotermicznych	272
6.4.1. Pierwsze prawo termodynamiki	272
6.4.2. Bilans entropii	274
6.5. Układ równań termofiltracji	284
6.6. Model numeryczny termofiltracji w okolicy gazogeneratora	285
6.6.1. Podziemne zgazowanie węgla – koncepcja, rys historyczny	285
6.6.2. Budowa modelu numerycznego zgazowania węgla	288
6.6.2.1. Opis warunków geologicznych i hydrogeologicznych wybranego obszaru	289

6.6.2.2.	Budowa modelu przestrzennego złoża i warstw otaczających złożo ...	293
6.6.2.3.	Warunki graniczne przyjęte w obliczeniach termofiltracji	298
6.6.2.4.	Wyniki obliczeń procesu termofiltracji	300
6.7.	Przykład zastosowania modelu termofiltracji do analizy zjawiska ruchomych piasków na terenach pustynnych	310
6.8.	Literatura do rozdziału 6	321

Anna Uciechowska-Grakowicz

7.	Teoria porospężystości	323
7.1.	Klasyczna teoria konsolidacji Terzagiego	323
7.1.1.	Podstawowe założenia teorii konsolidacji Terzagiego	323
7.1.2.	Równanie ruchu płynu	326
7.1.3.	Równanie ruchu szkieletu	327
7.2.	Teoria porospężystości Biota–Darcy’ego	329
7.2.1.	Zarys teorii porospężystości	329
7.2.2.	Naprężenia efektywne w teorii konsolidacji Biota	332
7.2.3.	Alternatywne podejścia do teorii porospężystości	333
7.2.4.	Równania ciągłości przepływu	336
7.2.5.	Zasada zachowania pędu	340
7.3.	Teoria porospężystości w świetle teorii homogenizacji	342
7.4.	Teoria porospężystości w świetle termodynamiki	354
7.4.1.	Pierwsza zasada termodynamiki	354
7.4.2.	Druga zasada termodynamiki	356
7.4.3.	Związki konstytutywne dla ośrodka dwufazowego składającego się z ciała stałego i płynu	359
7.5.	Konsolidacja układu ciało stałe–gaz	364
7.6.	Literatura do rozdziału 7	373

Anna Uciechowska-Grakowicz

8.	Modele termoporospężystości ośrodka dwufazowego	381
8.1.	Termokonsolidacja ośrodków porowatych zbudowanych ze sprężystego szkieletu i cieczy	383
8.1.1.	Przypadek I – przepływ ciepła przez ośrodek w stanie lokalnej równowagi termicznej	383
8.1.2.	Przypadek II – przepływ przez każdą z faz oddzielnie	385
8.1.3.	Równania przewodnictwa cieplnego dla ośrodka złożonego ze sprężystego szkieletu i cieczy	390
8.1.4.	Układ równań termokonsolidacji ośrodków porowatych zbudowanych ze sprężystego szkieletu i cieczy	393
8.2.	Termokonsolidacja ośrodków porowatych zbudowanych ze sprężystego szkieletu i gazu	395
8.2.1.	Związki konstytutywne	395
8.2.1.1.	Związki konstytutywne przy założeniu, że ciepło rozchodzi się przez ośrodek jednofazowy	395
8.2.1.2.	Związki konstytutywne przy założeniu, że przepływ ciepła odbywa się w obu fazach ośrodka niezależnie	396

8.2.2.	Równania przewodnictwa cieplnego	397
8.2.3.	Układ równań termoporosprężystości ośrodków porowatych zbudowanych ze sprężystego szkieletu i gazu	398
8.3.	Model numeryczny termoporosprężystości	401
8.3.1.	Założenia dotyczące geometrii obszaru i scenariusza zmian warunków brzegowych	401
8.3.2.	Porównanie funkcjonowania modeli matematycznych w przypadku, gdy płynem porowym jest woda	406
8.3.2.1.	Model ośrodka dwufazowego	406
8.3.2.2.	Model ośrodka w lokalnej równowadze termicznej	410
8.3.3.	Porównanie modeli termokonsolidacji dla gazu	414
8.3.3.1.	Wyniki dla modelu dwufazowego	414
8.3.3.2.	Wyniki dla modelu „jednofazowego”	417
8.3.4.	Podsumowanie modeli numerycznych termokonsolidacji próbek	420
8.4.	Literatura do rozdziału 8	421

Monika Bartlewska-Urban

9.	Modele reologiczne ośrodków porowatych	425
9.1.	Wprowadzenie	425
9.2.	Modele reologiczne	427
9.3.	Model Biota ze szkieletem reologicznym Kelvina–Voigta	433
9.3.1.	Założenia modelu Biota ze szkieletem reologicznym Kelvina–Voigta	434
9.3.2.	Związki konstytutywne modelu Biota ze szkieletem reologicznym Kelvina–Voigta dla procesu izotermicznego	435
9.3.3.	Równania konsolidacji ciała Biota ze szkieletem Kelvina–Voigta	444
9.3.4.	Rozwiązanie analityczne równania konsolidacji ciała Biota ze szkieletem Kelvina–Voigta	445
9.3.5.	Numeryczne rozwiązanie konsolidacji Biota ze szkieletem reologicznym dla próbki 3D	455
9.4.	Literatura dla rozdziału 9	460

Monika Bartlewska-Urban

10.	Określanie parametrów modelu Biota ze szkieletem reologicznym	465
10.1.	Badania laboratoryjne	465
10.1.1.	Założenia teoretyczne	465
10.1.2.	Stanowisko pomiarowe i przebieg badań	467
10.1.3.	Wyniki testu konsolidacji	472
10.2.	Określanie parametrów modelu Biota ze szkieletem reologicznym Kelvina–Voigta metodą optymalizacyjną	473
10.2.1.	Kalibracja modelu	474
10.2.2.	Funkcja celu	474
10.2.3.	Metoda optymalizacyjna	475
10.2.4.	Identyfikowalność modelu – podstawy matematyczne	476
10.2.5.	Obliczenia	480
10.3.	Określanie parametrów modelu Biota ze szkieletem reologicznym Kelvina–Voigta z zastosowaniem algorytmów genetycznych	487

10.3.1. Opis metody	487
10.3.2. Badania laboratoryjne	489
10.3.3. Metodologia kalibracji	490
10.3.4. Wyniki kalibracji	490
10.4. Literatura do rozdziału 10	492

Liudmyla Overchenko, Tomasz Strzelecki

11. Budowa numerycznego modelu porosprężystości z wykorzystaniem narzędzi GIS na przykładzie istniejącego obiektu budowlanego	495
11.1. Zakres prac przy budowie modelu numerycznego	495
11.2. Wprowadzenie	496
11.2.1. Opis obiektu budowlanego	496
11.2.2. Lokalizacja Afrykarium	497
11.2.3. Warunki i badania geologiczne	498
11.2.4. Warunki hydrogeologiczne	499
11.2.5. Wybrane informacje dotyczące obiektu budowlanego	499
11.3. Model matematyczny Biota–Darcy’ego	502
11.4. Model numeryczny konsolidacji obiektu	503
11.4.1. Przestrzenne mapy numeryczne obszaru ZOO w narzędziu MicroStation	503
11.4.2. Numeryczny model terenu	505
11.4.3. Warunki brzegowe i początkowe zagadnienia	507
11.4.4. Siatka elementów skończonych	509
11.5. Obliczenia numeryczne metodą elementów skończonych	514
11.5.1. Określenie przemieszczeń poziomych i pionowych	514
11.5.2. Określenie osiadań	519
11.5.3. Określenie potencjału plastyczności Druckera–Pragera	526
11.5.4. Rozkład ciśnień porowych	528
11.5.5. Pole wektorowe prędkości filtracji	529
11.6. Podsumowanie i wnioski końcowe	530
11.7. Literatura do rozdziału 11	530

Tomasz Strzelecki

12. Stan graniczny w mechanice ośrodków porowatych	533
12.1. Modele matematyczne stanu granicznego	533
12.1.1. Model Coulomba dla ośrodków gruntowych	534
12.1.2. Warunek wytrzymałościowy Coulomba–Mohra	536
12.1.3. Inne znane z literatury warunki stanu granicznego	538
12.2. Sformułowanie zagadnienia stanu granicznego	541
12.2.1. Statyka stanu granicznego	541
12.2.2. Kinematyka stanu granicznego	547
12.2.3. Twierdzenia o nośności granicznej	550
12.3. Model matematyczny dwufazowego ośrodka porowatego sprężysto-lepko- plastycznego	552
12.3.1. Założenia wyjściowe do modelu matematycznego ośrodka sprężysto-lepko- plastycznego	553
12.3.2. Równania zachowania masy szkieletu i cieczy	553

12.3.3. Równania zachowania pędu	555
12.3.4. Równania konstytutywne w zakresie porosprężystości ośrodka dwufazowego	555
12.3.5. Równania konstytutywne ciała sprężysto-lepkoplastycznego	556
12.3.6. Zbiórca układ równań procesu odkształceń sprężysto-lepko-plastycznego ciała Perzyny–Biota	559
12.4. Rozwiązanie zagadnienia brzegowego 2D odkształceń sprężysto-lepko-plastycznych dla płaskiego stanu odkształcenia	561
12.4.1. Obciążenie $Q = 0 \text{ kN/m}^2$	562
12.4.1.1. Siatka elementów skończonych	562
12.4.1.2. Wyniki obliczeń numerycznych	563
12.4.2. Obciążenie $Q = 20 \text{ kN/m}^2$	579
12.4.2.1. Siatka elementów skończonych	580
12.4.2.2. Wyniki obliczeń numerycznych	580
12.5. Podsumowanie uzyskanych wyników obliczeń	601
12.6. Literatura do rozdziału 12	606

Tomasz Strzelecki

13. Obliczenie stateczności skarp i stateczności filtracyjnej	611
13.1. Blokowe metody inżynierskie określania stateczności skarp w mechanice gruntów ...	611
13.1.1. Metoda Felleniusa dla przypadku warstwy przepuszczalnej z uwzględnieniem filtracji cieczy	612
13.1.1.1. Potencjał sił masowych	612
13.1.1.2. Przykład liczbowy	615
13.1.2. Metoda blokowa Bishopa	620
13.2. Wyparcie gruntu na skutek siły unoszenia filtracji	622
13.3. Stateczność filtracyjna grodzia zbudowanej z materiału nieprzepuszczalnego na warstwie przepuszczalnej	632
13.4. Literatura do rozdziału 13	634