

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur zweiten englischen Auflage XI

Formeln und Abkürzungen XV

Teil I Grundlegende Konzepte und Lösungstechniken 1

- 1 Einleitung** 3
 - 1.1 Ein einfaches Beispiel für nichtlineares Verhalten 3
 - 1.2 Wiederholung: Grundlagen der Linearen Algebra 5
 - 1.3 Vektoren und Tensoren 13
 - 1.4 Spannungs- und Dehnungstensor 19
 - 1.5 Elastizität 25
 - 1.6 Die PyFEM-Finite-Elemente-Bibliothek 27

- 2 Nichtlineare Finite-Elemente-Analyse** 33
 - 2.1 Gleichgewicht und virtuelle Arbeit 33
 - 2.2 Räumliche Diskretisierung mit finiten Elementen 35
 - 2.3 PyFEM-Programme für Ansatzfunktionen 40
 - 2.4 Inkrementell-iterative Analyse 44
 - 2.5 Lastkontrolle contra Verschiebungskontrolle 54
 - 2.6 PyFEM: ein linearer Finite-Elemente-Code mit Verschiebungskontrolle 57

- 3 Geometrische Nichtlinearität** 67
 - 3.1 Trägerelemente 68
 - 3.1.1 Total-Lagrange-Formulierung 72
 - 3.1.2 Updated-Lagrange-Formulierung 75
 - 3.1.3 Korotierende Formulierung 77
 - 3.2 PyFEM: der flache Träger 80
 - 3.3 Spannungs- und Dehnungsmaße in Kontinua 90
 - 3.4 Geometrisch nichtlineare Formulierung für Kontinuumselemente 97

3.4.1	Total- und Updated-Lagrange-Formulierung	97
3.4.2	Korotierende Formulierung	102
3.5	Lineare Knickanalyse	106
3.6	PyFEM: geometrisch nichtlineares Kontinuumselement	110
4	Lösungstechniken für quasistatische Analysen	119
4.1	Line-Search-Verfahren	119
4.2	Bogenlängenverfahren	122
4.3	PyFEM: Implementierung des Riks-Bogenlängen-Solvers	131
4.4	Stabilität und Eindeutigkeit in diskretisierten Systemen	136
4.4.1	Stabilität eines diskreten Systems	136
4.4.2	Eindeutigkeit und Bifurkation in einem diskreten System	138
4.4.3	Branch-Switching	142
4.5	Lastschrittweite und Konvergenzkriterien	143
4.6	Quasi-Newton-Methoden	146
5	Lösungsverfahren für die nichtlineare Dynamik	151
5.1	Semidiskrete Gleichungen	151
5.2	Explizite Zeitintegration	152
5.3	PyFEM: ein Solver mit expliziter Zeitintegration	157
5.4	Implizite Zeitintegration	162
5.4.1	Die Newmark-Familie	162
5.4.2	Die HHT- α -Methode	163
5.4.3	Alternative implizite Methoden	166
5.5	Stabilität und Genauigkeit bei Nichtlinearitäten	167
5.6	Algorithmen mit Energieerhaltung	171
5.7	Zeitschrittkontrolle und Element-Technologie	174
Teil II Material-Nichtlinearitäten		177
6	Schädigungsmechanik	179
6.1	Das Konzept der Schädigung	179
6.2	Isotrope elastische Schädigung	181
6.3	PyFEM: Ebene-Dehnung-Schädigungsmodell	185
6.4	Stabilität, Elliptizität und Gittersensitivität	189
6.4.1	Stabilität und Elliptizität	189
6.4.2	Gittersensitivität	193
6.5	Kohäsionszonenmodelle	197
6.6	Element-Technologie: Eingebettete Unstetigkeiten	202
6.7	Komplexe Schädigungsmodelle	210
6.7.1	Anisotrope Schädigungsmodelle	210
6.7.2	Mikroebenenmodelle	212
6.8	Rissmodelle für Beton und andere quasispröde Materialien	214
6.8.1	Elastizitätsbasierte verschmierte Rissmodelle	214

6.8.2	Bewehrung und Zugversteifung	220
6.9	Regularisierte Schädigungsmodelle	224
6.9.1	Nichtlokale Schädigungsmodelle	225
6.9.2	Gradienten-Schädigungsmodelle	226
7	Plastizität	231
7.1	Ein einfaches Gleitmodell	231
7.2	Fließtheorie der Plastizität	236
7.2.1	Die Fließfunktion	236
7.2.2	Fließregeln	241
7.2.3	Verfestigungsverhalten	245
7.3	Integration der Spannungs-Dehnungs-Relation	253
7.4	Tangenten-Steifigkeitsoperatoren	265
7.5	Multi-Fließflächen-Plastizität	268
7.5.1	Die Koiter'sche Verallgemeinerung	268
7.5.2	Rankine-Plastizität für Beton	270
7.5.3	Tresca- und Mohr-Coulomb-Plastizität	277
7.6	Bodenplastizität: Cam-Clay-Modell	285
7.7	Gekoppelte Schädigungs-Plastizitäts-Modelle	288
7.8	Element-Technologie: volumetrisches Locking	290
8	Zeitabhängige Stoffmodelle	297
8.1	Lineare Viskoelastizität	297
8.1.1	Eindimensionale lineare Viskoelastizität	298
8.1.2	Dreidimensionale Viskoelastizität	300
8.1.3	Algorithmische Aspekte	301
8.2	Kriechmodelle	304
8.3	Viskoplastizität	306
8.3.1	Eindimensionale Viskoplastizität	306
8.3.2	Integration der Ratengleichungen	309
8.3.3	Perzyna-Viskoplastizität	309
8.3.4	Duvaut-Lions-Viskoplastizität	312
8.3.5	Konsistenzmodell	314
8.3.6	Propagierende oder dynamische Instabilitäten	316
Teil III Elementare Bauteile		323
9	Balken und Bögen	325
9.1	Ein flacher Bogen	325
9.1.1	Kirchhoff-Formulierung	325
9.1.2	Scherdeformation: der Timoshenko-Balken	333
9.2	PyFEM: ein Kirchhoff-Balkenelement	336
9.3	Korotierende Elemente	340
9.3.1	Kirchhoff-Modell	341

9.3.2	Timoshenko-Balken-Modell	346
9.4	Isoparametrisches entartetes Kontinuums-Balkenelement in zwei Dimensionen	348
9.5	Isoparametrisches entartetes Kontinuums-Balkenelement in drei Dimensionen	354
10	Platten und Schalen	363
10.1	Flache-Schale-Formulierungen	364
10.2	Isoparametrisches entartetes Kontinuums-Schalenelement	372
10.3	Festkörperartige Schalenelemente	377
10.4	Plastizität bei Schalen: das Ilyushin-Kriterium	378

Teil IV Große Dehnungen 383

11	Hyperelastizität	385
11.1	Mehr Kontinuumsmechanik	385
11.1.1	Impulsbilanz und Spannungstensoren	385
11.1.2	Objektive Spannungsraten	389
11.1.3	Hauptstreckungen und Invarianten	394
11.2	Dehnungsenergiefunktionen	396
11.2.1	Inkompressibilität und Fastinkompressibilität	398
11.2.2	Dehnungsenergie als Funktion der Streckungsinvarianten	400
11.2.3	Dehnungsenergie als Funktion der Hauptstreckungen	404
11.2.4	Logarithmische Erweiterung der linearen Elastizität: das Hencky-Modell	409
11.3	Element-Technologie	411
11.3.1	u/p -Formulierung	412
11.3.2	Enhanced-assumed-Strain-Elemente	416
11.3.3	\bar{F} -Ansatz	419
11.3.4	Korotierender Zugang	421
12	Elastoplastizität großer Dehnungen	423
12.1	Euler-Formulierungen	424
12.2	Multiplikative Elastoplastizität	430
12.3	Multiplikative Elastoplastizität und Ratenformulierungen	434
12.4	Integration der Ratengleichungen	438
12.5	Exponentielle Return-Mapping-Algorithmen	442

Teil V Fortgeschrittene Diskretisierungskonzepte 449

13	Grenzflächen und Unstetigkeiten	451
13.1	Grenzflächenelemente	452
13.2	Unstetige Galerkin-Methoden	460

14	Gitterfreie Methoden und die Zerlegung der Eins	467
14.1	Gitterfreie Methoden	468
14.1.1	Die elementfreie Galerkin-Methode	469
14.1.2	Anwendung auf Bruchprozesse	473
14.1.3	Schädigungsmechanik höherer Ordnung	476
14.1.4	Volumetrisches Locking	477
14.2	Ansätze mit einer Zerlegung der Eins	479
14.2.1	Anwendung auf Bruchprozesse	483
14.2.2	Erweiterung auf große Deformationen	489
14.2.3	Bruchdynamik	494
14.2.4	Schwache Unstetigkeiten	497
15	Isogeometrische Finite-Elemente-Analyse	501
15.1	Basisfunktionen in der geometrischen Modellierung	501
15.1.1	Univariate B-Splines	503
15.1.2	Univariate NURBS	506
15.1.3	Multivariate B-Splines und NURBS-Patches	507
15.1.4	T-Splines	509
15.2	Isogeometrische finite Elemente	512
15.2.1	Bézier-Element-Darstellung	513
15.2.2	Bézier-Extraktion	515
15.3	PyFEM: Ansatzfunktionen für die isogeometrische Analyse	517
15.4	Isogeometrische Analyse in der nichtlinearen Festkörpermechanik	520
15.4.1	Design-through-Analysis für Schalenstrukturen	521
15.4.2	Schädigungsmodelle höherer Ordnung	527
15.4.3	Kohäsionszonenmodelle	531
	Literatur	539
	Stichwortverzeichnis	559