

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 Kontinuums-elemente 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

