

はじめに

本書は、筆者が生物系の学部でおこなった講義をもとにまとめてみたものである。

書名は構造力学となっているが、材料力学の初歩的事項を復習しながら、構造力学の問題に入り、トラス、ラーメンおよび半剛節をもつ骨組構造の力学的解析とそれに必要な計算機プログラミングを合わせて勉強する内容となっている。

したがって、この本を丁寧に読んでいただけるならば、上述の範囲で構造力学の基礎を理解し、またパソコンなどによる構造計算ができるようになる、と考えている。

ただ、お断りしなければならないことは計算機の使用言語として、ここでは Excel 環境下の Visual Basic を用いていることである。そのため、プログラムを作成あるいは理解するには、多少とも BASIC や Visual Basic の予備知識が必要である。

よく知られているように、Excel、Visual Basic のもつ機能は実に豊かつ多様であるが、ここではその中の極々一部を使用しているに過ぎない。したがって、これらの言語に初めての方は、それらの簡単な文法書あるいは解説書(後出 参考文献)を手許におき、必要の都度、参照されることをお願いしたい。また、本文中のプログラムについては、流れ図を一切使用していないが、これは、簡略化された流れ図を見るより、直接、プログラムを読み、行相互の関係を線で結ぶなどして、計算の流れを把握する方が、かえって分かり易いのではないか、と考えたからである。

さて、目次にもある本書の章分けをあげると、次のとおりである。

1. 序章
2. 平面トラスの構造解析
3. 平面ラーメンの構造解析
4. 半剛節平面骨組の構造解析
5. 半剛節立体骨組の構造解析
6. 棒の座屈
7. 半剛節平面骨組の非線形構造解析
8. 平面ラーメンの完全弾塑性構造解析
9. 半剛節平面骨組の弾塑性構造解析
10. 補編

すなわち、序章では、まず各章に共通する棒の引張・圧縮・せん断、構造物の定義や安定の意味、構造解析の目的など、必要最小限のことがらを簡単に説明する。次に、2章以下の本論では、各章ごとに章題の示す構造物の力学的な解析法を述べ、ついでその解法にしたがって計算機プログラムを作成し、最後にそのプログラムによる計算例を実行して、その結果を吟味するようになっている。なお、10章の補編はプログラム・その他の参考資料である。

ただし、6章における棒の座屈は、現象を力学的に解析するのみで、他の章とは別扱いとなっているが、構造設計上はこれでも十分役立つと考え、あえて設けたものである。また、序章で省略した棒の曲げとねじりに関しては、それぞれが必要となる3章と5章で触れることにした。なお、5章中の

角棒のねじりについては、誘導なしに単に公式のみをあげるにとどめた。公式の力学的な誘導には、弾性学の学習が必要になると考えたためである。

このように、本書で扱う構造力学の範囲はきわめて限られてたものであるが、他方、従来、必ずしも重視されているとはいえない、部材接合部の変形挙動を考慮に入れた半剛節骨組の構造解析をやや詳しく取り入れることを試みている。このような試みは、筆者の専攻する木質構造分野では、とくに必要かつ有益ではないかと考えるからである。7章の非線形構造解析や8、9章の弾塑性構造解析も、このような考えの延長線上にあるものとして設けたものである。

なお、書名に付した「生物系のための」の意味は、たまたま筆者が属していた生物系の学部では、建築向けに割り当てられる授業時間は比較的少なく、そのような人たちに手頃であればと願ったまでである。しかし、それとは関係なく、この分野に関心をもたれる若い人や関係方面の方々にも、広く親しんでいただけるならばと思っている。

以上、本書の構成や特色と思われるところを若干述べたが、広くて深い構造力学と計算機プログラミングの両分野を、このような小著の中で扱ったために、不十分なところが多くあるのではないかとおそれている。また、著者の独断や誤りもあるかもしれない。それらの点については、読者諸賢のご寛恕と忌憚のないご批判・ご教示をお願いする次第である。

本書を著すにあたっては、既刊の成書・論文等に多くを依存している。それらの著者に対して、この場をかりて深甚の敬意と謝意を表す。巻末に、とくにお世話になった著作を参考文献として、いくらか掲げさせていただくことにした。なお、掲載したプログラム例は、いずれも Microsoft Excel 2000 を使用したもので、Microsoft Windows XP, 98 の環境下で動作することを確かめている。プログラムの動作確認にご協力いただいた山崎真理子博士(岐阜工業高等専門学校)にお礼申し上げる。

最後に本書の出版を快諾された海青社 代表 宮内 久氏、編集担当の福井将人氏のおふたりには、貴重なご意見と編集に関して多大な骨折りをいただいた。記して厚くお礼申し上げます。

平成 21 年 2 月

竹 村 富 男

生物系の ための 構造力学

構造解析とExcelプログラミング

目 次

はじめに	1
1. 序 章	11
1.1 棒の引張りと圧縮	11
1.2 棒のせん断	14
1.3 構造物と骨組	16
1.4 構造物の安定	17
1.5 構造解析	18
2. 平面トラスの構造解析	21
2.1 部材の剛性方程式	21
2.2 剛性マトリックスの座標変換	23
2.3 トラスの全体剛性方程式	26
2.4 剛性マトリックス法によるトラスの解法	29
(1) 節点変位と反力の算出	29
(2) 材端力、応力、ひずみの計算	31
2.5 連立一次方程式の数値解法	31
(1) ガウスの消去法	32
(2) 逆マトリックス法	34
(3) ガウス-ザイデル法(反復法)	35
2.6 平面トラスの構造解析プログラム(ガウスの消去法)	(prog1) 37
(1) プログラムの作成方針	37
(2) データの入出力	38
(3) プログラムの作成画面	39
(4) プログラムの概要	40
(5) プログラムリスト	(prog1) 42
(6) 計算例 1	47
2.7 平面トラスの構造解析プログラム(ガウス-ザイデル法)	(prog2) 49
(1) プログラムの作成方針	49
(2) プログラムの概要	49
(3) プログラムリスト	(prog2) 51
(4) 計算例 2	54
2.8 骨組変位図の作図プログラム	(prog1f) 56
(1) プログラムの作成方針	56
(2) プログラムの概要	57
(3) プログラムリスト	(prog1f) 60
(4) 実行結果	63
3. 平面ラーメンの構造解析	65
3.1 棒の曲げ	65

(1) 棒の曲げにおけるせん断力と曲げモーメント	65
(2) 曲げ応力	68
(3) 曲げモーメントによるたわみ	71
(4) せん断力による応力とたわみ	72
3.2 部材の節点角	74
(1) 材端の曲げモーメントによる節点角	74
(2) 中間荷重による節点角	75
(3) 部材角による節点角	77
3.3 たわみ角法の基本式	77
3.4 部材の剛性方程式	79
3.5 座標変換と部材の剛性方程式	82
3.6 平面ラーメンの構造解析プログラム(ガウスの消去法)	(prog3) 85
(1) プログラムの作成方針	85
(2) プログラムの概要	85
(3) プログラムリスト	(prog3) 86
(4) 計算例 3	91
3.7 平面ラーメン応力図の作図プログラム	(prog3f) 94
(1) プログラムの作成方針	94
(2) プログラムの概要	94
(3) プログラムリスト	(prog3f) 98
(4) 実行結果	102
4. 半剛節平面骨組の構造解析	105
4.1 部材の平衡条件式	105
4.2 部材の剛体変位	106
4.3 部材の変形とたわみ性マトリックス	107
4.4 半剛性節点の変形とたわみ性マトリックス	109
4.5 半剛節部材の剛性方程式	110
4.6 半剛節平面骨組の構造解析プログラム(ガウス-ジョルダン法)	(prog4) 114
(1) プログラムの作成方針	114
(2) プログラムの概要	115
(3) プログラムリスト	(prog4) 115
(4) 計算例 4	121
(5) 半剛節平面骨組の応力図の作図プログラム	(prog4f) 124
5. 半剛節立体骨組の構造解析	125
5.1 丸棒のねじり	125
5.2 角棒(長方形断面)のねじり	128
(1) 等方性体のばあい	128
(2) 直交異方性体のばあい	130

5.3	部材の平衡方程式	131
5.4	部材の剛体変位	132
5.5	部材の変形とたわみ性マトリックス	134
5.6	半剛性節点の変形とたわみ性マトリックス	135
5.7	半剛節部材の剛性マトリックス	136
5.8	立体剛性マトリックスの座標変換	145
	(1) 平面図形の図心	145
	(2) 断面二次モーメントと主軸	146
	(3) 立体座標の座標変換	149
	(4) 剛性マトリックスの座標変換	152
5.9	立体の直投影	154
	(1) 直投影図と座標変換	154
	(2) 視線の方向と直投影図	155
	(3) 等測投影と2軸測投影の例	157
5.10	半剛節立体骨組の構造解析プログラム(逆マトリックス法)	(prog5) ... 158
	(1) プログラムの作成方針	159
	(2) プログラムの概要	159
	(3) プログラムリスト	(prog5) ... 160
	(4) 計算例 5	167
5.11	立体骨組変位図の作図プログラム	(prog5f) ... 170
	(1) プログラムの作成方針	170
	(2) プログラムの概要	170
	(3) プログラムリスト	(prog5f) ... 171
	(4) 実行結果	173
5.12	立体骨組の応力図の作図プログラム	(prog5f2, prog5f3) ... 174
	(1) プログラムの作成方針	174
	(2) プログラム prog5f2 (AFD, SFD) の概要	175
	(3) プログラムリスト	(prog5f2) ... 177
	(4) 実行結果	(prog5f2) ... 183
	(5) プログラム prog5f3 (BMD, TMD) の概要	183
	(6) プログラムリスト	(prog5f3) ... 184
	(7) 実行結果	(prog5f3) ... 190
6.	棒の座屈	191
6.1	一端固定・他端自由の棒	191
	(1) 中心荷重のばあい	191
	(2) 偏心荷重のばあい	194
6.2	両端支持および両端固定の棒	196
	(1) 両端支持の棒	197
	(2) 両端固定の棒	197

6.3	一端固定・他端支持(回転)の棒	197
6.4	棒の座屈の相互比較	199
7.	半剛節平面骨組の非線形構造解析	201
7.1	材料の非線形挙動	201
	(1) 材料の荷重—変形曲線	201
	(2) 増分による荷重—変形曲線の近似	202
	(3) ニュートン-ラプソン法による荷重—変形曲線の近似	203
	(4) 近似値の誤差	205
7.2	半剛節平面骨組の非線形構造解析	207
	(1) 非線形解析の前提	207
	(2) 線形挙動を示す部材の剛性方程式	207
	(3) 増分で用いる部材と骨組全体の剛性方程式	208
	(4) ニュートン-ラプソン法による非線形構造解析	209
	(5) 接合部の荷重—変形曲線の近似式	212
7.3	半剛節平面骨組の非線形構造解析プログラム(ガウス-ジョルダン法)	(prog7) ... 213
	(1) プログラムの作成方針	214
	(2) プログラムの概要	214
	(3) プログラムリスト	(prog7) ... 219
	(4) 計算例 7	226
8.	平面ラーメンの完全弾塑性構造解析	231
8.1	完全弾塑性の材料と骨組	231
	(1) 完全弾塑性材料の応力—ひずみ曲線	231
	(2) 完全弾塑性骨組の荷重—変形曲線と崩壊	231
8.2	塑性ヒンジと部材の剛性マトリックス	233
	(1) 塑性ヒンジ	233
	(2) 塑性ヒンジをもつ部材の剛性マトリックス	234
8.3	増分による完全弾塑性骨組の構造解析	237
	(1) 弾性域における増分解析	237
	(2) 塑性域における増分解析	238
	(3) 崩壊の判定	239
	(4) プログラミングに関する 2, 3 の問題	240
8.4	連立一次方程式の解法(コレスキー法)	241
	(1) 対称マトリックスの LU 分解(三角分解)	241
	(2) 連立一次方程式の解法(コレスキー法)	243
	(3) 対称な剛性マトリックスの境界条件処理	243
8.5	平面ラーメンの完全弾塑性構造解析プログラム	(prog8) ... 244
	(1) プログラムの作成方針	244
	(2) プログラムの概要	244

(3) プログラムリスト	(prog8) ... 247
(4) 計算例 8	255
8.6 完全弾塑性解析の応力・崩壊機構図の作図プログラム	(prog8f) ... 258
(1) プログラムの作成方針	258
(2) プログラムの概要	258
(3) プログラムリスト	(prog8f) ... 259
(4) 実行結果	264
9. 半剛節平面骨組の弾塑性構造解析	267
9.1 部材の塑性化と骨組崩壊の前提	267
9.2 塑性ヒンジと部材のタイプ	267
(1) 部材のタイプ	267
(2) 塑性ヒンジの条件と接合剛性係数	268
9.3 塑性ヒンジをもつ部材の剛性マトリックス	269
(1) タイプ 0 (両端半剛節)のばあい	269
(2) タイプ 1 (左端塑性ヒンジ・右端半剛節)のばあい	269
(3) タイプ 2 (左端半剛節・右端塑性ヒンジ)のばあい	270
(4) タイプ 3 (両端塑性ヒンジ)のばあい	271
9.4 増分による半剛節骨組の弾塑性構造解析	271
(1) 弾性域における増分解析	272
(2) 塑性域における増分解析	272
(3) 崩壊の判定	273
(4) 計算の効率化・その他	273
9.5 半剛節平面骨組の弾塑性構造解析プログラム	(prog9) ... 274
(1) プログラムの作成方針	274
(2) プログラムの概要	274
(3) プログラムリスト	(prog9) ... 275
(4) 計算例 9	283
9.6 半剛節弾塑性解析の応力・崩壊機構図の作図プログラム	(prog9f) ... 286
(1) プログラムの作成方針とプログラムリスト	(prog9f) ... 286
(2) 実行結果	288
10. 補 編	289
10.1 接合剛性係数の推算(評価)	289
(1) 両端節点の接合剛性係数が異なるばあい	289
(2) 両端節点の接合剛性係数が等しいばあい	291
(3) 計算例	291
10.2 プログラムリスト(補遺)	293
(1) 半剛節平面骨組の応力図の作図プログラム	(prog4f) (付表 4.2, 4.3) ... 293
(2) 半剛節弾塑性解析の応力・崩壊機構図の作図プログラム	(prog9f) ... 299

10.3 補 注	305
(1) クラメール(Cramer)の公式 (p. 32)	305
(2) せん断力による、はりのたわみ式 (p. 74)	305
参考文献	307
索引	309

プログラムリスト：

本書で紹介した以下のプログラムは付属の CD-ROM に収録している。

prog1 平面トラスの構造解析プログラム(消去法)	(prog1.xls - Module1)	43
prog2 平面トラスの構造解析プログラム(反復法)	(prog2.xls - Module1)	51
prog1f 平面トラス変位図の作図プログラム	(prog1f.xls - Module1)	61
prog3 平面ラーメンの構造解析プログラム	(prog3.xls - Module1)	86
prog3f 平面ラーメン応力図の作図プログラム	(prog3f.xls - Module1)	98
prog4 半剛節平面骨組の構造解析プログラム	(prog4.xls - Module1)	116
prog5 半剛節立体骨組の構造解析プログラム	(prog5.xls - Module1)	160
prog5f 立体骨組変位図の作図プログラム	(prog5f.xls - Module1)	171
prog5f2 立体骨組応力図(AFD, SFD)の作図プログラム	(prog5f2.xls - Module1) ..	177
prog5f3 立体骨組応力図(BMD, TMD)の作図プログラム	(prog5f3.xls - Module1) ..	184
prog7 半剛節平面骨組の非線形構造解析プログラム	(prog7.xls - Module1)	219
prog8 平面ラーメンの完全弾塑性構造解析プログラム	(prog8.xls - Module1)	247
prog8f 完全弾塑性解析の応力・崩壊機構図の作図プログラム ...	(prog8f.xls - Module1)	259
prog9 半剛節平面骨組の弾塑性構造解析プログラム	(prog9.xls - Module1)	275
prog4f 半剛節平面骨組の応力図の作図プログラム	(prog4f.xls - Module1)	293
prog9f 半剛節弾塑性解析の応力・崩壊機構図の作図プログラム	(prog9f.xls - Module1)	299

Excel 操作の小見出し：

本文中にある主な Excel 操作の小見出しをまとめて下に示す。

1. (2) データの入出力	38
2. (3) プログラムの作成画面	39
3. (4) プログラムの概要	40
4. [入力データの確認]	41
5. [プログラムの実行と再実行]	42
6. [注釈行の設定]	42
7. [Sheet の複数利用]	42
8. [行ラベル]	50
9. [変数の共通領域]	40
10. [変数の型宣言]	40
11. [変数の宣言を強制する]	213

12. [四角形の描き方と属性](マクロの記録)	57
13. [出力図形に関する補注](図枠の取り外し、文字挿入)	60
14. [コマンドボタンの使い方]	96
15. [コマンドボタンの設定法]	96
16. [InputBox 関数とその使い方]	175
17. [関数プロシージャ](Functionの定義)	217
18. [Excel の作図機能(グラフウィザード)に関する補注](荷重-変形曲線の描画)	229

作図プログラムの中のサブルーチン例：

作図プログラムでよく用いたサブルーチン例をまとめて下に示す。

1. Sub 図枠スケール (prog1f)	62
2. Sub 骨組表示 (prog1f)	62
3. Sub 変位表示 (prog1f)	63
4. Sub 図の消去 (prog1f)	63
5. Sub 図域削除 (prog4f)	299
6. Sub 応力図 (prog3f：AFD, SFD, BMD 平面図)	101
7. Sub 変位図 (prog5f：立体図)	172
8. Sub 応力図 (prog5f2：AFD, SFD 立体図)	180
9. Sub 応力図 (prog5f3：TMD, BMD 立体図)	187
10. Sub 崩壊機構図 (prog8f, prog9f：平面図)	263, 303
11. Sub drawcircle(x, y, r) (prog8f)	264

1. 序 章

構造解析に入るまえに、材料力学や構造力学で用いられる用語や約束ごとを簡単に説明する。

1.1 棒の引張りと圧縮

図 1.1 のように棒の両端を引っ張ると、棒の長さは元の長さ l より長くなる。棒の伸びを Δl 、引張りの力(force)を P とすると、 P と Δl のあいだには、ある範囲で、比例関係が成立する。

$$P \propto \Delta l \quad (\text{フックの法則}) \quad (1.1)$$

この関係は物理・天文学者ロバート・フック (Robert Hooke) (1687) によって発見され、しばしば「フックの法則」(Hooke's law) とよばれる。いま、棒の断面積を A として、上式の両辺を A でわり、比例定数を E とおけば、フックの法則は次のようにも表すことができる。

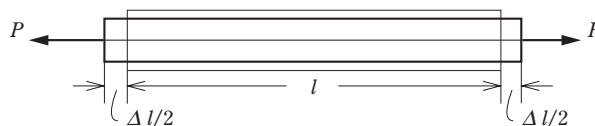
$$\begin{aligned} P/A = \sigma &= E \Delta l/l \\ &= E\varepsilon \end{aligned} \quad (1.2)$$

ここで、 $\sigma (= P/A)$ は単位面積あたりの力を、また $\varepsilon (= \Delta l/l)$ は単位長さあたりの伸びを表し、それぞれ応力(stress)およびひずみ(strain)と呼ばれる。また、両者の間の比例定数 E はヤング係数(率)、弾性係数(率) (Young's modulus, modulus of elasticity) などと呼ばれる。フックの法則はすべての物体に当てはまるわけではないが、鉄・木材・コンクリート・プラスチック・岩石など多くの固体で、応力とひずみがあまり大きくない範囲で、近似的に成立することが知られている。

フックの法則は引張りのばあいだけでなく、圧縮のばあいにも成立する。ただし、圧縮では変形(deformation)は縮みとなり、その向きは力と共に、引張りのばあいと反対となる。このため、力と変形は引張りでは正、圧縮では負、の値で表す習わしとなっている。

このように、棒は力を受けると変形するが、フックの法則はまた力と変形が一對一に対応し、外からの一定の力に対して、棒は一定の伸びまたは縮みを生じて静止することを意味している。このとき、棒は平衡の状態にあるという。

しかし、棒の中の状態は力を受ける前と後では相異なる。その様子を調べるために、力を受け平衡



P : 引張りの力, A : 棒の横断面積
 Δl : 棒の伸び, l : 棒の元の長さ

図 1.1 引張りによる棒の変形(伸び)

このプレビューでは表示されないページがあります。

2. 平面トラスの構造解析

構造物のモデルとして最も簡単なものは平面トラス(plane truss)である。ここでは、マトリックス法を用いて、トラスの構造解析を行う。その手順は、まず部材の剛性方程式を作成、次いでこれを集積してトラス全体の剛性方程式をたて、これを変位について解き、さらに変位から節点や支点に働く力、部材の変形、ひずみ・応力を求めることになる。また、それに伴う構造解析プログラムの作成と計算例および骨組変位図を例示する。

2.1 部材の剛性方程式

前章では、長さ l 、断面一様な真直棒が、軸方向の引張力をうけると変形して、伸びまたは縮み Δl を生ずることをみた。このとき、変形量 Δl はフックの法則(1.1)を用いて、次のように示すことができる。

$$\sigma = P/A = E \varepsilon = E \Delta l / l \quad (1.1)$$

$$\therefore \Delta l = Pl / (EA) = P / (EA/l) \quad (2.1)$$

ここで右辺の l/EA を柔性(flexibility)という。柔性 l/EA は、上式から明らかなように、その値が大きいかほど部材は変形しやすく、反対に小さいほど変形しにくい。したがって、柔性の逆数 EA/l は、その値が大きくなるほど、逆に部材は変形し難いことになる。この意味で、柔性の逆数 EA/l を剛性(stiffness)という。なお、単に EA を剛性ということもある。

以下、構造物に作用する外力や重力などの力を慣例により荷重(load)とよぶ。先に用いた荷重もこの意味である。

トラスの節点はモーメントに抵抗しえないので、節点に荷重が作用しても、部材には軸方向の引張または圧縮力、すなわち軸方向力(軸力)(axial force)のみが作用することになる。そこで、ここでは次の前提をもうけることにする。

前提：トラスの荷重は節点のみに負荷し、節点間には負荷しない

この前提はもちろん便宜的なものであり、一般には、部材は節点間でも荷重をうける。そのばあい、負荷される荷重は部材両端の節点に配分するなどの方策がとられるが、本書では計算簡易化のため、この前提をおくことにする。

このようにして、トラスは荷重をうけて変形し、拘束を受けない節点は変位する。その様子を見るために、トラスの中の任意の一部材を選び、その変形と部材両端の変位、言い換えれば座標の変化との関係を考察する。そのばあい、座標に関して2種類の座標系を用いると便利である。図 2.1(a)(b)は両座標系を例示したものである。

図 2.1(a)の直角座標系 OXY は、トラス全体を表すための座標系で、これを全体座標系(overall coordinate system)あるいは絶対座標系(global coordinate system)という。これに対して、図 2.1(b)に

このプレビューでは表示されないページがあります。

3. 平面ラーメンの構造解析

平面内にあるラーメンを平面ラーメン(平面骨組, plane frame(rahmen))という。ラーメンはトラスと違い、節点がモーメントに抵抗する。したがって、部材は軸力・せん断力・モーメントの3作用を受け、また外的には多かれ少なかれ、曲げが認められる。ここでは、はじめにモーメントが部材にもたらす応力や変形について述べ、またせん断力の作用効果を明らかにする。次いで、部材の剛性方程式とラーメンの全体剛性方程式を導き、後者を剛性マトリックス法で解き、ラーメンの変形、反力、材端力などの算出について述べる。他方、構造解析に必要な構造解析プログラムと応力図(断面力図)(stress diagram)を描くためのプログラムを作成し、両プログラムの実行結果を計算例により確かめることにする。

3.1 棒の曲げ

棒が長軸に対して横方向の荷重を受けるとき、棒は一般に「はり」とよばれることを述べたが、はりにはモーメントとせん断力のために曲げの変形と応力を生ずる。ここでは、この変形と応力に関する公式をそれぞれ導くことにする。

(1) 棒の曲げにおけるせん断力と曲げモーメント

棒がせん断力を受けて曲げを生ずることは、1.2節で述べたが、このとき棒の断面Xには、せん断力とともにモーメントが作用している。図3.1はこのことを見るための模式図で、図中の直線ABは断面が一様なはりを表す。このはりは、支点A, Bで支えられ、かつ支点間の1点Cで下向きの鉛直荷重Pをうける。このとき、はりは鉛直下方にたわみ、いわゆる曲げを生ずる。その様子を x, y 座標を用いて表すために、図のように支点Aを原点とする x, y 軸を定め、また両軸の正の向きを、それぞれ水平右向きと鉛直下向きとする。

図では、断面Xは支点Aから距離 $x (> 0)$ の位置にあり、また荷重点Cは $x = a$ の位置にある。支点A, B間の距離 l は一般にスパン(span)と呼ばれる。荷重点Cから支点Bまでの距離を b とすれば、明らかに $b = (l - a)$ である。

いま、はりABは平衡の状態にあるとして、はりに作用する鉛直方向の力のつり合いを考えると、

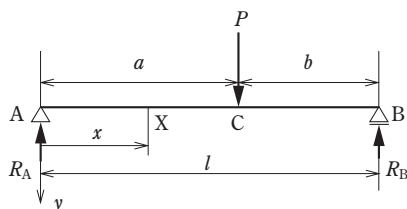


図 3.1 荷重を受けるはり

このプレビューでは表示されないページがあります。

4. 半剛節平面骨組の構造解析

節点が滑節と剛節の中間的なものを半剛節 (semi-rigid joint) という。以下では、そのような節点をもつ骨組を半剛節骨組 (semi-rigid jointed frame) とよぶ。半剛節骨組の構造解析は、ラーメンのばあいに準じた方法で行えばよいのであるが、部材の剛性マトリックスは半剛節の性質を組み入れた新しいものになる。その誘導は、前章で用いたたわみ角法によらず、平衡法とよばれる別の方法によることにする。その方が剛性マトリックス要素の算定が容易で、力学的な意味も明快と考えたからである。

4.1 部材の平衡条件式¹²⁾

半剛節は、剛節のように固くないが、軸力・せん断力・曲げモーメントのいずれに対しても抗しうる節点のことである。また、上述の平衡法は、材端の2節点間に働く力のつり合い関係を基に組み立てられる構造解析の1手法である。

図4.1は平衡法の基になる力のつり合いを説明するための模式図である。図中の太線は部材 l を表し、その材端 1, 2 には材端力、すなわち軸力 P_x 、せん断力 P_y 、曲げモーメント M の3力が作用するものとする。ただし、それらの力には、材端 1, 2 を区別する添字 1, 2 が付されている。

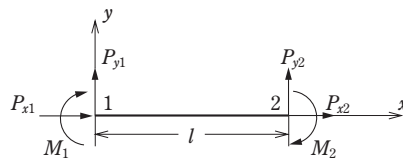


図 4.1 部材における材端力のつり合い

このように、部材 l は両端に材端力を受けるが、いま、平衡の状態にあるとすれば、部材は仮に剛体とみなしても差し支えないであろう。また、材端 1, 2 に作用する材端力をそれぞれ $\{P_1\}$, $\{P_2\}$ で表すことにすれば、それらはそれぞれ次式のようにおくことができる。

$$\{P_1\} = \{P_{x1} \ P_{y1} \ M_1\}^t, \quad \{P_2\} = \{P_{x2} \ P_{y2} \ M_2\}^t \quad (4.1)$$

また、部材は平衡の状態にあるから、材端力 $\{P_1\}$, $\{P_2\}$ の間には、明らかに次式が成立する。

$$\{P_1\} + \{P_2\} = 0$$

あるいは

$$\left. \begin{aligned} P_{x1} + P_{x2} &= 0 \\ P_{y1} + P_{y2} &= 0 \\ M_1 - lP_{y2} + M_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

このプレビューでは表示されないページがあります。

5. 半剛節立体骨組の構造解析

立体骨組 (space frame, solid rahmen) はその名のとおりに、三次元の広がりをもつので、これまでの二次元と異なり、新たに次の諸点を考慮する必要がある。

- ① 座標系が平面座標系から立体座標系に移る
- ② 平面の部材剛性マトリックスを拡張して立体の剛性マトリックスにする
- ③ その際、部材に加わるねじりモーメントの効果を反映させる
- ④ 骨組等の図形表示を立体化する

これらの中、②の立体剛性マトリックスでは、平面のばあいと同様、節点の半剛性をも含めた取り扱いとする。したがって、ここで扱う骨組は半剛節立体骨組 (space semi-rigid jointed frame) となる。また、④の図形表示では、なじみの深い直投影 (right projection) を用いることにする。

5.1 丸棒のねじり

平面骨組では、骨組とともにこれに作用する外力も、同一平面内にあることを前提とするが、立体骨組ではこの前提は必ずしも成立せず、外力は一般には任意の方向から作用することになる。例えば、**図 5.1** では外力モーメント M が部材 AB に作用するが、 M の方向は部材の長軸に合致せず、長軸に平行な成分 M_x のほかに、これと直交する 2 成分 M_y, M_z をもつ。

このばあい、部材は、 M_x により長軸を軸とするねじり (torsion, twist) をうけ、また M_y, M_z により、それぞれ y 軸、 z 軸回りの曲げを受ける。モーメント M_x はねじりを与えるので、ねじりモーメント (torsional moment, torque) とよび、曲げモーメント M_y, M_z と区別する。棒のねじりによる変形や応力の様子を厳密に知ることは意外に難しく、その詳細は専門書によらなければならない。ここでは、取り扱いが簡単な等方性丸棒のねじりについて述べる。

いま、**図 5.2** に示すような中実丸棒 (solid circular shaft) があると、その長さを l 、半径を r とする。また、棒の一端は固定され、他端の自由端には、ねじりモーメント T が加えられているとする。

このとき、棒の固定端には、ねじりモーメント T に対抗する逆向きのねじりモーメント $T' = -T$ が生ずる。また、棒の先端では、外表面円周上の任意の点 B が、棒の中心軸 x 軸の周りに回転し、円

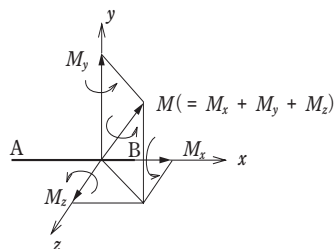


図 5.1 部材 AB に作用する外力モーメント M とその成分

このプレビューでは表示されないページがあります。

6. 棒の座屈^{4,5,33)}

棒が長軸方向の圧縮荷重をうけるとき、棒は柱(column)とよばれる。柱は圧縮荷重によって縮むだけでなく、しばしば横方向に大きなたわみを生ずることがある。この現象を柱の座屈(buckling)という。トラスをはじめすべての構造物では、座屈が起きないようにしなければならない。前章まででは、座屈について触れなかったため、この章では、座屈の弾性論的な解析法と解釈について簡単に述べる。

6.1 一端固定・他端自由の棒

(1) 中心荷重のばあい

図 6.1(a)のように、断面が一樣な棒の下端を固定端、上端を自由端として、棒の図心軸に圧縮荷重(中心荷重) P を加える。このとき、棒は僅かに側方にたわんで安定し、たわみの大きさは自由端で δ であったとする。

いま、棒が下端から距離 x の断面で受ける曲げモーメントを M とすれば、

$$M = -P(\delta - y) \quad (6.1)$$

であるが、曲げモーメントとたわみ曲線との関係式から、棒のたわみ y に関して次の微分方程式がえられる。

$$EI_z \frac{d^2 y}{dx^2} = -M = P(\delta - y)$$

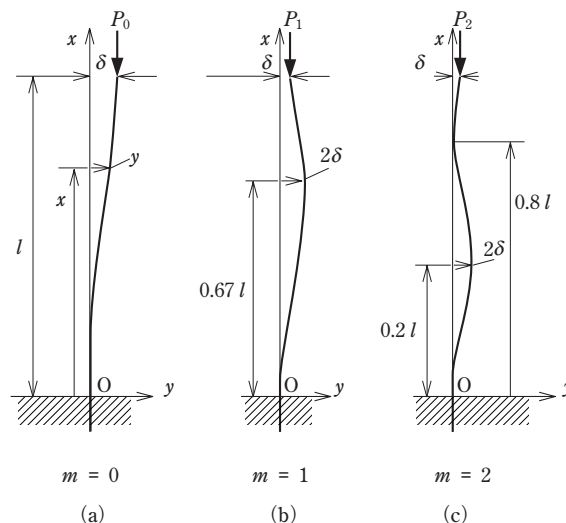


図 6.1 上端自由・下端固定の棒の座屈モード

このプレビューでは表示されないページがあります。

7. 半剛節平面骨組の非線形構造解析

これまで扱ってきた構造解析の範囲では、座屈のばあいを除き、力と変形の関係は、いつでも比例関係にあるとしてきた。この直線関係はしばしば線形(linear)と呼ばれるが、力と変形が大きくなると、直線関係は徐々に成立しなくなる。このばあいの関係を非線形(nonlinear)という。

非線形の要因は、ふつう材料非線形性(material nonlinearity)と、幾何学的非線形性(geometrical nonlinearity)に大別される⁹⁾。材料非線形性は材料自身が示すもので、その力学的挙動が線形領域と非線形領域とからなるばあいである。これに対して、幾何学的非線形性は、小変形では無視されていた幾何学的な条件変化、例えば節点位置の変化に伴うつり合い条件の変化などが要因となって生ずる。本章では、材料非線形性に起因する骨組の非線形構造解析の一手法について述べる。そのばあい、非線形領域は多くの小領域に細分され、かつ各小領域内ではこれまでの線形解析の手法が適用できている。また、材料の非線形性は骨組接合部の非線形な挙動に由来するものとしている。なお、この章に続く8,9章では、同じ非線形の問題を弾塑性構造解析の観点から取り上げる。

7.1 材料の非線形挙動

(1) 材料の荷重—変形曲線

材料の荷重—変形曲線(load-deformation curve)は、材料の種類や環境条件などによって多種多様であるが、それらに応じて曲線の表示式も、直線式、放物線式、指数関数式、高次多項式など、多くのものがある。一方、構造物における部材と部材の接合部は、それ自身複雑な構造をもち、そのような構造をもたない通常の材料とは明らかに異なる。したがって、部材接合部の描く荷重—変形曲線はおのずと材料のものと相違するが、それにも拘わらず、それらは多種多様な材料の曲線のいずれかのタイプと類似することが多い。

例えば、在来工法における木造軸組の接合部は、部材相互の緊結度に広い幅があり、堅いものから緩いものまで変化にとむ。したがって、そのような接合部の荷重—変形曲線の性状を一つにまとめることは困難といわねばならないが、ここでは簡単に、曲線は概して初期直線部が少なく、全体として緩やかな曲線を描くものと仮定する。

図7.1は木造軸組のT字型仕口接合部の荷重(モーメント)—変形(回転角)曲線を模式的に描いたものである。この曲線は全体として上に凸であるが、初期部分は十分直線で近似することができる。初期直線部をすぎると、曲線は荷重の増加とともにそのこう配を次第に減少し、反対に変位は急速に増大し、ついには曲線のこう配は零となり、荷重は最大値に達する。初期直線部を離れてから、最大荷重点に至るまでの曲線部分を通常、降伏部という。このばあい、初期直線部と降伏部との境界点を降伏点(yield point)というが、降伏点は、図のように、必ずしも明瞭でないことが多い。降伏部よりあとの部分は、ゆるやかに下降し、破壊または終端に至る。

一般に荷重—変形曲線は上例のように幾つかの異なる部分からなり、それらの部分では、それぞれ

このプレビューでは表示されないページがあります。

8. 平面ラーメンの完全弾塑性構造解析

前章では、構造物の力学的挙動が線形挙動に近い非線形挙動であることを前提に解析を行ったが、構造物が大きな変形を起こし、ついには破壊に至るようなばあいには、この非線形的前提は成立しなくなる。そこで、これに代わるものとして、構造物の変形挙動を2分し、負荷開始から降伏点までの弾性挙動と降伏点以後の塑性挙動とからなる、比較的単純な挙動を考えることができる。このような挙動を弾塑性挙動(elastoplastic behavior)といい、その解析を一般に弾塑性解析(elastoplastic analysis)という。ここでは、前章に続くものとして、骨組がその接合部で弾塑性の挙動を示すばあいの構造解析を取り扱うことにする。

8.1 完全弾塑性の材料と骨組¹⁴⁾

(1) 完全弾塑性材料の応力-ひずみ曲線

図 8.1 にみられるような応力-ひずみ曲線(stress-strain curve)を描く材料を完全弾塑性材料(elastic-perfectly plastic material)という。このとき、曲線は立ち上がり部の直線部分 OA とそれに続く水平な直線部分 AB とからなる。直線部分 OA, AB はそれぞれ材料の弾性域(elastic region)、塑性域(plastic region)を表し、両域の境となる点 A を前同様、降伏点、その点の応力 σ_y を降伏応力(yield stress)という。図から明らかなように、塑性部分 AB では、応力はもはや増加せず一定で、ひずみのみが増加する。材料のこの状態を塑性状態、このとき生じている流動を塑性流れ(plastic flow)あるいは塑性流動という。

(2) 完全弾塑性骨組の荷重-変形曲線と崩壊

いま、接合部を含めて骨組がすべて完全弾塑性材料からなるものとして、この骨組を完全弾塑性骨組(elastoplastic frame)と呼ぶことにする。この骨組に外力(荷重)が作用するときの変形挙動を考える

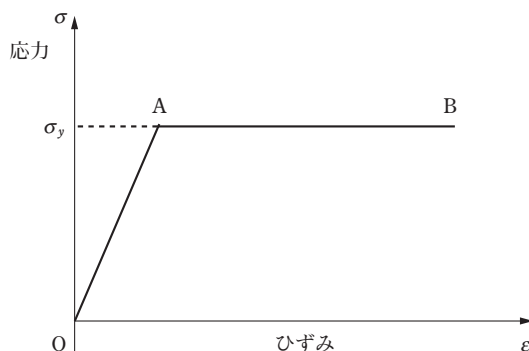


図 8.1 完全弾塑性材料の応力-ひずみ曲線

このプレビューでは表示されないページがあります。

9. 半剛節平面骨組の弾塑性構造解析

前章では、剛節骨組の節点が順次塑性化して、遂には崩壊に至る過程を扱ったが、この章では、剛節の代わりに半剛節が塑性化をおこして、遂に骨組が崩壊するばあいを扱う。このばあいの解析を前章と区別して、半剛節骨組の弾塑性構造解析と呼ぶことにする。

9.1 部材の塑性化と骨組崩壊の前提

半剛節の節点は、塑性化しなくても力を受ければ変形する。剛節は塑性化しなければ変形することはない。このように、節点が半剛節と剛節では、力学的挙動の上で大きな差異がある。しかし、塑性化した後の半剛節の挙動は、前章で述べた塑性ヒンジと同様であろう。ここでは、このような前提の下に、半剛節骨組の弾塑性構造解析を行う。その際、部材の塑性化は、簡単のため、曲げモーメントのみによって引き起こされ、また塑性ヒンジは材端(節点)に生ずるものとする。したがって、荷重は節点のみに作用し、中間荷重は存在しないものとする。これらの仮定は、前章と同様である。

9.2 塑性ヒンジと部材のタイプ

部材(節点)の塑性化が曲げモーメント M のみによって引き起こされるとすれば、そのときの曲げモーメント M は、前出のように次のとおりである。

$$M = M_p = fM_y \quad (9.1)$$

(M_p : 全塑性モーメント、 M_y : 降伏モーメント、 f : 形状係数)

部材が塑性化して塑性ヒンジを生ずれば、部材の力学的挙動は変化し、それに伴い剛性マトリックス K も変化する。この変化は塑性ヒンジの有無、位置、および部材塑性化の条件によって異なる。そこで、これらのことを次に検討する。

(1) 部材のタイプ

ここでも、部材のタイプを塑性ヒンジの有無とその位置によって、次の4タイプに分ける。

タイプ0(●—●)：両端が半剛節(二重丸)	}	(H)
タイプ1(○—●)：左端が塑性ヒンジ(白丸)		
タイプ2(●—○)：右端が塑性ヒンジ		
タイプ3(○—○)：両端が塑性ヒンジ		

このタイプ分けは前章と同じであるが、半剛節の記号として、新たに二重白丸●を用いている。また、ここでの白丸○は、半剛節から移行した塑性ヒンジを表す。

このプレビューでは表示されないページがあります。

このプレビューでは表示されないページがあります。

索 引

INDEX (A~Z)

- angle of torsion 126
angle of torsion per unit length 127
anisotropic body 128
area moment method 76
assessment of coe. of joint stiffness 109
augmented matrix 32
axial force 21
axial force diagram, AFD 92
axonometric projection 157
- backward substitution (reduction) 33
beam 15
bending moment 67
bending moment diagram, BMD 67
bending of a bar 67
bending stress 68
Bernoulli-Euler's assumption 68
bifurcation load 193
bifurcation mode 193
bifurcation point 193
boot 37
boundary condition 31
buckling 191
buckling (column) curve 200
buckling load 193
buckling stress (strength) 194
- cantilever 107
centroid 69
Cholesky method 241, 243
chord angle 150
coefficient of fixity, flexity coefficient 199
coefficient of joint stiffness 109
cofactor 305
collapse 232
collapse load 232
collapse mechanism 232
collapse mechanism diagram, CMD 244, 282
column 191
column (buckling) curve 200
CommandButton 94
common region 40
compatibility condition 28
compression side 68
conjugate shearing stress 14
coordinate transformation 23
couple 14
Cramer's formula (rule) 32, 305
curvature 72
- declaration 39, 213
deflection 71
deflection curve 71
deformation 11
diagonal element 241
diagonal matrix 109
dimetric projection 157
direction cosine 26
displacement 22
displacement vector 23
Double 40
- eccentric load 194
effective slenderness ratio 199
elastic-perfectly plastic material 231
elastic region 231
elastoplastic behavior 231
elastoplastic frame 231
elastoplastic (elastic-plastic) analysis 231
End 42
end forces, member end force 27
end moment 77
equilibrium equations 106
equilibrium matrix 106
equilibrium method 194
Excel 37
Excel VBA 37
execution 40
extension 156
external force 12

- externally stable 18
- extreme fiber stress 70
- fixed beam 78
- fixed end 17
- flexibility 21
- flexibility matrix 108
- flexibility method 21
- flexural rigidity 70
- force 11
- forward substitution (elimination) 33
- frame 17
- frame structure 16
- fully plastic moment 233
- Gauss elimination 32
- Gauss-Jordan method 33
- Gauss-Seidel method 35, 36
- geometrical moment of area 69
- geometrical moment of inertia 70
- geometrical nonlinearity 201
- global coordinate system 21
- global variables 43, 86
- hinged joint, pin, hinge, pin support 17
- hollow circular shaft 127
- Hooke's law 11
- imperfection method 194
- increment 203
- increment analysis 203
- inflection point 91
- inner force 12
- InputDialog 175
- internally stable 18
- inverse matrix 24
- isometric projection 157
- isotropic body 128
- iteration (iterative method) 35, 36
- Jacobi method 36
- joint translation angle, slope angle 75
- joint, connection 16
- lateral strain 14
- linear 201
- load 15, 21
- load-deformation curve 201
- load-displacement curve 123
- load vector 22
- local (member) coordinate system 22
- local variables 43, 86
- longitudinal strain 14
- lower triangular matrix 242
- LU**-factorization (decomposition) 241
- main program 40
- material nonlinearity 201
- matrix 18
- matrix method 18
- member 16
- member (local) coordinates 22
- modulus of elasticity 11
- modulus of rigidity, shear modulus 15
- Mohr's circle for inertia 149
- moment 14
- moment of area 69, 76
- movable support, roller end 17
- neutral axis 68
- Newton-Raphson method 204
- nodal displacement 23
- nodal load 23
- node 16
- nominal stress 12
- nonlinear 201
- normal force, vertical force 13
- normal stress 13
- Option Explicit 39, 214
- orthotropic body 128
- overall coordinate system 21
- overall (total) stiffness equation 28
- overall (total) stiffness matrix 28
- pin joint 16
- pivot 33
- plane frame (rahmen) 65
- plane truss 21
- plastic flow 231
- plastic hinge 233
- plastic region 231
- plastic section modulus 233
- point of inflection 91
- Poisson's ratio 14
- polar moment of inertia of area 127
- principal axis 148
- principal axis of inertia 148
- principal moment of inertia of area 148

product of inertia of area	147	stress strain curve	231
program	37	structure, construction	16
reaction	15	structural analysis	18
radius of curvature	69	structural analysis of elastoplastic frames	233
radius of gyration of area	194	structural design	18
rahmen	17	structural mechanics	16
reduced length, effective length	199	subprogram	40
regular	29	subroutine	40
right projection	125, 154	successive approximation	211
rigid joint	16	successive correction	211
rigidity	21	support	17
section	12	sweep-out method	33
section force	12	symmetric matrix	26
section modulus	70	tension side	68
semi-rigid joint	105	torque	14
semi-rigid jointed frame	105	torsion, twist	125
shape factor	233	torsional constant	129
shear	13	torsional moment, torque	125
shearing force	13	torsional moment diagram, TMD	174
shearing force diagram, SFD	67	torsional rigidity	128
shearing strain	15	torsional section modulus	128
shearing stress	13	transformation matrix	23
sign conventions	77, 131	transposed matrix	24
simple beam	67	triangular matrix	241
Single	40	trimetric projection	157
singular	29	truss	17
slenderness ratio	194	unit matrix	24
slope	74	unstable	18
slope, deflection angle	71	upper triangular matrix	242
slope-deflection method	78	variable	43
solid circular shaft	125	Variant	40
space frame, solid rahmen	125	virtual load	76
space semi-rigid jointed frame	125	warping	128
span	65	yield moment	233
specific angle of torsion	127	yield point	201, 231
stable	17	yield stress	231
statically determinate	18	Young's modulus	11
statically determinate structure	18		
statically indeterminate	18		
statically indeterminate structure	18		
stiffness equation	22		
stiffness factor	78		
stiffness matrix	23		
stiffness method, displacement method	29		
Stop	42		
stress	11		
stress diagram	65		

ア 行

圧縮側 compression side	68
安定な stable	17
外的— externally stable	18
内的— internally stable	18

一時停止 Stop	42
移動支点 movable support, roller end	17
異方性体 anisotropic body	128
引張側 tension side	68
インプットボックス InputBox(関数)	175
エクセル Excel	37
エクセルの起動(立ち上げ) boot	37
Excel VBA	37
LU -分解 LU -factorization (decomposition)	241
縁応力 extreme fiber stress	70
Option Explicit	39, 214
応力 stress	11
応力図(断面力図) stress diagram	65
応力ひずみ曲線 stress-strain curve	231
カ 行	
外力 external force	12
ガウスの消去法 Gauss elimination	32
—ザイデル法 Gauss-Seidel method	35, 36
—ジョルダン法 Gauss-Jordan method	33
拡大マトリックス(拡大行列) augmented matrix ...	32
角棒のねじり torsion of a rectangular bar	128
架構 frame	16
仮想荷重 virtual load	76
荷重 load	15, 21
—ベクトル load vector	22
—変位曲線 load-displacement curve	123
—変形曲線 load-deformation curve	201
片持ちはり cantilever	107
滑節 pin joint	16
慣性主軸 principal axis of inertia	148
完全弾塑性骨組 elastoplastic frame	231
幾何学的非線形 geometrical nonlinearity	201
規約(正負の) sign conventions	79, 131
境界条件 boundary condition	31
局所座標系 local (member) coordinate system	22
曲率 curvature	72
—半径 radius of curvature	69
共役せん断応力 conjugate shearing stress	14
逆マトリックス inverse matrix	24
逆マトリックス法	34
クラメールの公式 Cramer's formula(rule)	32, 305
グローバル変数 global variables	43, 86
偶力(トルク) couple (torque)	14
計算の効率化	235

計算終了 End	42
形状係数 shape factor	233
構造 structure, construction	16
—解析 structural analysis	18
—設計 structural design	18
—力学 structural mechanics	16
公称応力 nominal stress	13
後進法(後退代入) backward substitution (reduction)	33
コードアングル chord angle	150
剛性 rigidity	21
—法 stiffness method (変位法 displacement method)	29
—方程式 stiffness equation	22
—マトリックス stiffness matrix	23
剛節 rigid joint	16
剛度 stiffness factor	78
固定支点 fixed end	17
固定はり fixed beam	78
降伏応力 yield stress	231
—点 yield point	201, 231
—モーメント yield moment	233
コマンドボタン CommandButton	94
コレスキー法 Cholesky method	241, 243

サ 行

サブプログラム subprogram	40
サブルーチン subroutine	40
材端モーメント end moment	77
材端力 end forces	27
材料非線形 material nonlinearity	201
座屈 buckling	191
—応力(強さ) buckling stress (strength)	194
—荷重 buckling load	193
—曲線 buckling (column) curve	200
座標変換 coordinate transformation	23
—マトリックス transformation matrix	23
三角マトリックス triangular matrix	241
上— upper triangular matrix	242
下— lower triangular matrix	242
3軸測投影 trimetric projection	157
軸方向力(軸力) axial force	21
支点 support	17
主断面二次モーメント principal moment of inertia of area	148
主軸 principal axis	148
—角 chord angle	150

軸測投影 axonometric projection	157
軸(方向)力図 axial force diagram, AFD	92
軸要素(ピボット) pivot	33
柔性 flexibility	21
柔性(たわみ性)法 flexibility method	21
柔性(たわみ性)マトリックス flexibility matrix	108
垂直力 normal force, vertical force	13
垂直応力 normal stress	13
図心 centroid	69
スパン span	65
正則 regular	29
静定 statically determinate	18
— 構造物 statically determinate structure	18
接合部 joint, connection	16
接合剛性係数 coefficient of joint stiffness	109
— の推算(評価)	289
節点 node	16
— 角 slope	74
— 荷重 nodal load	23
— 変位 nodal displacement	23
絶対座標系 global coordinate system	21
線形 linear	201
せん断 shear	13
— 応力 shearing stress	13
— 弾性係数(率) modulus of rigidity, shear modulus	15
— ひずみ shearing strain	15
— 力 shearing force	13
— 力図 shearing force diagram, SFD	67
前進法(前進消去) forward substitution (elimination)	33
全塑性モーメント fully plastic moment	233
全体剛性マトリックス overall(total) stiffness matrix	28
全体剛性方程式 overall(total) stiffness equation	28
全体座標系 overall coordinate system	21
塑性域 plastic region	231
— 流れ(流動) plastic flow	231
— 断面係数 plastic section modulus	233
— ヒンジ plastic hinge	233
反り(ゆがみ) warping	128
増分 increment	203
増分解析 increment analysis	203
— 弾性域 elastic region における —	237
— 塑性域 plastic region における —	238

タ 行

対角要素(対角成分) diagonal element	241
— マトリックス diagonal matrix	109
対称マトリックス symmetric matrix	26
縦ひずみ longitudinal strain	14
たわみ deflection	71
— 角 slope, deflection angle	71
— 角法 slope-deflection method	78
— 曲線 deflection curve	71
たわみ性マトリックス flexibility matrix	108
単位マトリックス unit matrix	24
単精度(浮動小数点型) Single	40
単純はり simple beam	67
端末条件係数 coefficient of fixity, flexity coefficient	199
弾性域 elastic region	231
弾性係数(率) modulus of elasticity	11
弾塑性挙動 elastoplastic behavior	231
— 解析 elastoplastic (elastic-plastic) analysis	231
— 骨組構造解析 structural analysis of elastoplastic frames	233
断面 section	12
— 一次モーメント geometrical moment of area ..	69
— 係数 section modulus	70
— 相乗モーメント product of inertia of area	147
— 二次極モーメント polar moment of inertia of area	127
— 二次半径 radius of gyration of area	194
— 二次モーメント geometrical moment of inertia	70
— 力 section force	12
力 force	11
逐次補正 successive correction	211
— 近似 successive approximation	211
縮み率 extension	156
中空丸棒 hollow circular shaft	127
中立軸 neutral axis	68
中実丸棒 solid circular shaft	125
直交異方性体 orthotropic body	128
直投影(図) right projection	125, 154
適合条件 compatibility condition	28
転置マトリックス transposed matrix	24
等測投影 isometric projection	157
等方性体 isotropic body	128
特異 singular	29

トラス truss	17
ナ 行	
内力 inner force	12
2 軸測投影 dimetric projection	157
ニュートン-ラプソン法 Newton-Raphson method	204
ねじり torsion, twist	125
—角 angle of torsion	126
—剛性 torsional rigidity	128
—定数 torsional constant	129
—断面係数 torsional section modulus	128
—モーメント torsional moment, torque	125
—モーメント図 torsional moment diagram, TMD	174
—率 angle of torsion per unit length	127
ハ 行	
倍精度(浮動小数点型) Double	40
掃き出し法 sweep-out method	33
柱 column	191
はり(梁) beam	15
バリエーション型 Variant	40
反曲点 inflection point	91
半剛節 semi-rigid joint	105
—平面骨組(ラーメン) semi-rigid jointed frame	105
—立体骨組 space semi-rigid jointed frame	125
反復法 iteration (iterative method)	35, 36
反力 reaction	15
非線形 nonlinear	201
比ねじり角 specific angle of torsion	127
ヒンジ支点 hinged joint, pin, hinge, pin support	17
フックの法則 Hooke's law	11
部材 member	16
—角 joint translation angle, slope angle	77
—の分割数 number of dividing	94
—座標系 member (local) coordinates system	21
不安定な unstable	18
不静定な statically indeterminate	18
—構造物 statically indeterminate structure	18
プログラム program	37
—の実行 execution	40
分岐点 bifurcation point	193
分岐荷重 bifurcation load	193

—モード bifurcation mode	193
平衡法 equilibrium method	194
—条件式 equilibrium equations	106
—マトリックス equilibrium matrix	106
平面	
—骨組 plane frame	65
—トラス plane truss	21
—ラーメン plane rahmen	65
ベルヌーイ-オイラーの仮定 Bernoulli-Euler's assumption	68
変位 displacement	22
変位ベクトル displacement vector	23
変曲点(反曲点) point of inflection	91
変形 deformation	11
変数 variable	43
—の型宣言 declaration	39, 213
—の共通領域	40
—の宣言を強制する	213
偏心法 imperfection method	194
—荷重 eccentric load	194
棒の曲げ bending of a bar	67
崩壊 collapse	232
—荷重 collapse load	232
—機構(崩壊メカニズム) collapse mechanism	232
—機構図 collapse mechanism diagram, CMD	244, 282
—の判定	239
骨組 frame	16
—構造 frame structure	16
ポアソン比 Poisson's ratio	14
方向余弦 direction cosine	26, 149
細長比 slenderness ratio	194
マ 行	
曲げ応力 bending stress	68
マトリックス(行列) matrix	18
—法 matrix method	18, 29
曲げ剛性 flexural rigidity	70
曲げモーメント bending moment	67
曲げモーメント図 bending moment diagram, BMD	67
メインプログラム main program	40
面積モーメント moment of area	69, 76
—法 area moment method	76

モーメント moment	14
モールの慣性円 Mohr's circle for inertia	149

ヤ 行

ヤコービ法 Jacobi method	36
ヤング率(係数) Young's modulus	11

有効細長比 effective slenderness ratio	199
有効長さ reduced length, effective length	199

余因数 cofactor	305
横ひずみ lateral strain	14

ラ 行

ラーメン rahmen, frame	17
--------------------------	----

立体骨組(ラーメン) space frame, solid rahmen ..	121
---	-----

ローカル変数 local variables	43, 86
------------------------------	--------

著者紹介：

Takemura Tomio
竹村 富男

《略 歴》

1930年 兵庫県生まれ
1953年 鳥取大学農学部林学科卒業
1957年 京都大学大学院農学研究科修士課程修了、農学博士
(京都大学、1966)
1957年 鳥根農科大学農学部助手就任、その後同大学・京都
大学講師
東京農工大学・名古屋大学助教授
1976年 名古屋大学教授、同退職(1944)
1994年 名古屋大学名誉教授、現在に至る。その間2年間、
福井工業大学教授(客員)
専攻 生物材料工学(主として木材物理、木質構造分野)

《著 書》

分担執筆	『木材の事典』	朝倉書店	1982年
共 著	『木材の物理』	文永堂	1985年
分担執筆	『新編 木材工学』	養賢堂	1985年
分担執筆	『木質環境の科学』	海青社	1987年
分担執筆	『木材居住環境ハンドブック』	朝倉書店	1995年

英文タイトル

Structural Mechanics for Biophysics and Architecture
Structural Analysis and Programming in Excel

せいぶつけいのための こうぞうりきがく

生物系のための 構造力学
構造解析とExcelプログラミング

発行日 ————— 2009年3月15日 初版第1刷
定 価 ————— カバーに表示してあります
著 者 ————— 竹村 富男 ©
発行者 ————— 宮内 久



海青社
Kaiseisha Press

〒520-0112 大津市日吉台2丁目16-4
Tel. (077) 577-2677 Fax. (077) 577-2688
<http://www.kaiseisha-press.ne.jp>
郵便振替 01090-1-17991

● Copyright © 2009 T. Takemura ● ISBN978-4-86099-243-9 C3052
● 乱丁落丁はお取り替えます ● Printed in JAPAN

*本書の中では「Microsoft® Excel」のことをExcelまたはエクセルと表記しています。
Windows 98, Windows XP は米国 Microsoft Corporation の登録商標です。