

刊行のことば

本書は建築構造力学を初めて学ぼうとする人を対象に書かれた入門書です。新たに未知の分野の勉強をはじめようとする場合、だれしも多少なりとも期待と不安を持つものです。新たな学問との出会いの場を作り、その分野に興味を持ってもらうことを使命とする入門書は、初学者が持つ不安を和らげ、期待に応えるものでなければならないことは、言うまでもないことです。それと同時に求められるのは、「むずかしいことをやさしく、やさしいことをふかく、ふかいことをおもしろく」という井上ひさしが座右の銘としていた言葉です。「やさしく、ふかく、おもしろく」の要件は、入門書だけに限ったことではありませんが、建築構造力学が初学者にとって難解で苦手であることを考えると、「やさしく」は最も重点が置かれなければならない要件です。

本書を通読して思うのは、本書がこの点に意を注いで書かれていることです。解説には図を多用し、それらの図にさまざまな工夫を凝らすなど、重要なことを初学者にわかりやすくそして面白く伝える、という精神が貫かれているように感じられます。所々には、ふふーと思わず口元が緩むようなイラストが登場し、これが建築構造力学という少々堅苦しい学問に一服の清涼剤の役割を果たしています。

建築構造力学が難しく苦手であるという不評を多くの人に持たれてしまうのは、数式が登場し公式や無味乾燥な数字が多いということによるのでしょうか。このような不評の原因を取り除く学習上のコツはどのようなもののでしょうか。じつは、魔法の杖のような特別な策は残念ながら見当たりません。それでも、重要で鍵となることはいくつかあって、初学者には以下の3点を心掛けることをお勧めしたい。

- (1) 活字を目で追う勉強ではなく、手を動かすこと。
- (2) 一項目一項目ごとの理解を確実にすること。
- (3) できるだけ多くの問題を解くこと。

特に第1の項目が重要であって、つねに本書とノートを脇に置き、自らの手で図を描きながら、ときには計算をしながら一步一步着実に進めることです。これは旧来からの方法ですが、電子化が進んだ今日であっても、この地道な方法に勝る術はなさそうです。

建築構造力学を勉強する目的は、公式や数式、あるいはさまざまある計算方法を覚えることではありません。目標は力のバランスという抽象的ではあるが、力に対する感覚を養うことであって、建物を安全に造る上で必要となる基礎を身につけることです。建物に要求される要件は、古くローマ時代から「強・用・美」と言われています。「強」とは建物の強さと耐久性、「用」は建物の機能性、「美」は美しさのことです。建物を安全なものに作り上げるという「強」の使命を確かなものにし、その基礎となる勉強が建築構造力学の役割です。本書を通して、建築構造力学の面白さと、奥深さと、大切さを認識してもらうことができれば本書の目的は達せられることでしょう。

2015年1月

井口道雄

まえがき

建築を学ぶ学生の中には、構造力学に苦手意識を持つひとが少なくありません。さらに、現在の建物の構造計算は大規模なマトリックス計算法で行われ、データを入力すればあとはコンピュータが構造計算までやってくれる時代であります。このような状況で、少しくラシカルな構造力学の理論を学んでも、どの程度役に立つのかが見えない部分も多いかもしれません。筆者も恥ずかしながら構造力学を教える立場になる前は、そのような考え方を持っていました。しかしながら、構造力学の講義を準備するうちに、これが現在のコンピュータ計算を理解する上で欠かせないものであり、力の流れ方や材の変形を理解する上で大変重要であることを、改めて認識することになりました。

構造力学を習得するには、手を動かして自分で計算してみるのが一番と考えます。経験や直感も重要な部分ではありますが、いきなりそのような能力を磨くことは難しいでしょう。四則演算を満足に習っていない状態で、高度な数学の問題を理解することは難しいのと同じです。中学、高校では、数学や物理の授業でたくさんの計算を経験したと思います。そのような基礎学力はあるのですから、それを使わない手はありません。構造力学では比較的難しいと思われる問題が中学校の受験問題で出るくらいですので、構造力学の理論自体はそれほど難しいわけではないと思います。

本書は以下を心掛けて作成しました。

- ① わかりやすい図を多用し、構造力学に苦手意識を持った初学者にもやさしい構成とする。
- ② 豊富な例題を通じ、理論が完全に理解できていなくても計算だけでもできるようにする。
- ③ 1冊の本で、静定構造物、不静定構造物までの範囲を網羅する。
- ④ 一級建築士対策にも適した構成とする。
- ⑤ 大地震時の建物の揺れを考える上で重要となる振動学への道筋もつける。

本書は全11章から構成されています。前半の「1章 力と釣合い」、「2章 荷重と反力、応力」では、構造力学に必要な基礎的な事項を学びます。「3章 トラスの応力」、「4章 梁の応力」、「5章 ラーメンの応力」では、力の釣合いだけで解くことができる静定構造物を取り扱います。後半では材の変形をイメージし、「6章 断面性能」「7章 材の応力度」、「8章 材の変形・たわみ」を学びます。これらは不静定構造物の解法に必要となります。「9章 不静定梁の応力」と「10章 不静定ラーメンの応力と変形」では、建築構造では現実的な問題となる不静定構造物の解法を修得します。最後の「11章 構造力学から振動学へ」では、構造力学と振動学がどのように結びつくかを紹介し、建物の地震応答で必要となる振動学の基礎を学びます。

構造力学は前の内容を今回に、今回の内容をつぎに利用する積重ねの上に成り立っています。章が進むにつれ、内容も少しずつ難しくなっていくので、わからなくなったら、あきらめてその時点まで戻って理解してください。

本書では、まずは皆さんが構造力学の計算ができるように構成しています。少し難しい基礎理論もありますが、豊富な図、例題によって、丁寧なわかりやすい説明を心がけました。各章の初めと終わりに、会話形式でポイントをまとめています。共著の肥田剛典さんにキャラクターを含むイラストを描いていただき、少しでも堅苦しいイメージを脱するように心がけました。わかりやすさを優先したために、厳密さに欠けるところもありますが、まずは例題、演習問題を通じいろいろな問題を解いて慣れてください。計算ができるようになると、力の流れ方がわかった気になるのではないかと思います。

2011年東日本大震災の発生により、日本が地震大国であることを改めて認識したかと思えます。建築構造は大地震に対し如何に耐えるかが重要となり、地盤や建物の揺れの話は大変重要となります。しかしながら、いままでのテキストでは、構造力学が振動学にどのように繋がるかを記述しているものは少なかったように思います。本書では地震時の建物の揺れに関わる振動の話も最後に少しだけ入れてあります。建物の振動についても関心を持っていただき、建物の耐震性向上のため、以降に発生が予想される大地震に対して私たちがなにをできるかを考えるきっかけとなれれば願います。筆者の浅学非才のため、内容の不備、誤りもあるかと思われませんが、ご指摘いただければ幸いです。

最後に、東京理科大学永野研究室の学生の皆さんには、原稿をチェックしていただきました。コロナ社の諸氏には、出版に際し大変ご尽力いただきました。ここに記して御礼申し上げます。

2015年1月

永野正行

目 次

1章 力と釣合い	1
1.1 力とモーメント	2
1.2 力の分解と合成	9
1.3 力の釣合い	17
2章 荷重と反力, 応力	22
2.1 荷重の種類	23
2.2 構造の種類	24
2.3 支点の反力	25
2.4 部材の応力	28
3章 トラスの応力	33
3.1 トラスの特徴と種類	34
3.2 応力算定の基本	35
3.3 節点法による静定トラスの応力	36
3.4 力の釣合いからわかる部材の軸力	40
3.5 切断法による静定トラスの応力	42
3.6 各種静定トラスの応力	45
4章 梁の応力	47
4.1 梁の応力算定の基本	48
4.2 梁の応力算定のコツ	51
4.3 梁の応力分布と応力図	56
4.4 種々の荷重と梁の応力分布	60
4.5 応力と荷重間の関係	67
5章 ラーメンの応力	71
5.1 ラーメンの応力算定	72
5.2 ラーメンの応力算定のコツ	74
5.3 片持ちラーメンの応力	76
5.4 斜材のあるラーメンの応力	77
5.5 ラーメンの応力分布と応力図	80
5.6 3ヒンジラーメン	87
5.7 各種静定構造物の応力	90

6章 断面性能	95
6.1 図心と断面一次モーメント	96
6.2 断面二次モーメント	101
6.3 断面係数	107
6.4 断面極二次モーメント	108
7章 材の応力度	111
7.1 応力度とは	112
7.2 梁の曲げ応力度	113
7.3 軸力と曲げによる柱の応力度	116
7.4 セン断応力度	121
7.5 材の強度と許容応力度	126
8章 材の変形・たわみ	130
8.1 応力度とひずみ度, 変形	131
8.2 梁のたわみ	137
8.3 モールの定理を用いた梁のたわみ	147
8.4 柱の座屈	151
9章 不静定梁の応力	158
9.1 構造物の分類と静定, 不静定	159
9.2 たわみ角法の基本式	163
9.3 不静定梁の応力計算	172
10章 不静定ラーメンの応力と変形	179
10.1 節点移動のないラーメンの応力	180
10.2 固定モーメント法	185
10.3 節点移動のあるラーメン	193
10.4 水平荷重を受ける門形ラーメンの層剛性と層間変位	203
11章 構造力学から振動学へ	209
11.1 静的問題から動的問題へ	210
11.2 建物の運動方程式	214
11.3 建物の地震応答	218
参考文献	225
演習問題の解答	226
記号一覧	251
索引	254

1 章

力と釣合い



コージ

さあ、これから構造力学の勉強を始めよう。

よろしくお願いします！

構造力学をしっかりと理解するためには、まずは力と抵抗について知っておくことが重要だよ。例えば、図 1.1 に示すように定規の片側を手で握って反対側の先端を引っ張ると、握った手で抜けないようにしっかりと押さえるよね。つぎに、定規の先端で直交方向に力を入れると、定規は回転しようとするけど、手のひら全体を使って何とか押さえるようにするよね。



りっちゃん

確かにそうですね！ でも、これと建物と
なにか関係があるんですか!?

じつは、建物全体や柱、^{はり}梁などの部材でもまったく同じことが起きているんだよ。建物に力が働くと、建物が移動ないようにそれを支える力が働くことになるんだ。最初は力と力の釣合いや、力のモーメントに関する基礎を学んでいこう。

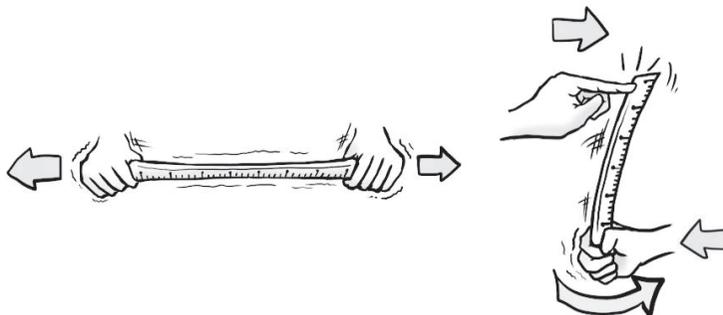


図 1.1 定規にかけた力とそれを支える力

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

1.1 力とモーメント

1.1.1 力とモーメントとは

力を表現するときには、**図 1.2** に示すように大きさ・方向・作用点が必要となる。これを**力の3要素**と呼ぶ。大きさの単位は、N（ニュートン）やkN（キロ・ニュートン）である。単位は大変重要なので、必ず正しく表現してほしい。力の記号は、 F や P で表現する。

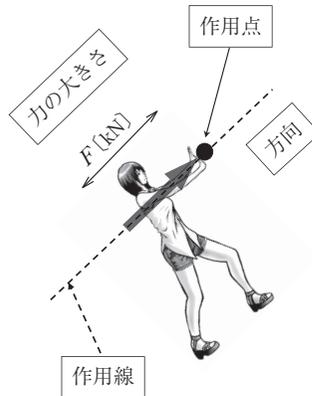


図 1.2 力の3要素

力のモーメント（以降は、単に**モーメント**という。）は、**図 1.3** に示すように物体に回転を生じさせる力である。先ほどの力に**アーム長**（もしくは**モーメントアーム**、腕の長さ）を掛けて表現する。アーム長は適当に取るのではなく、注目する点から力の作用線に垂線を下ろしたときの長さを

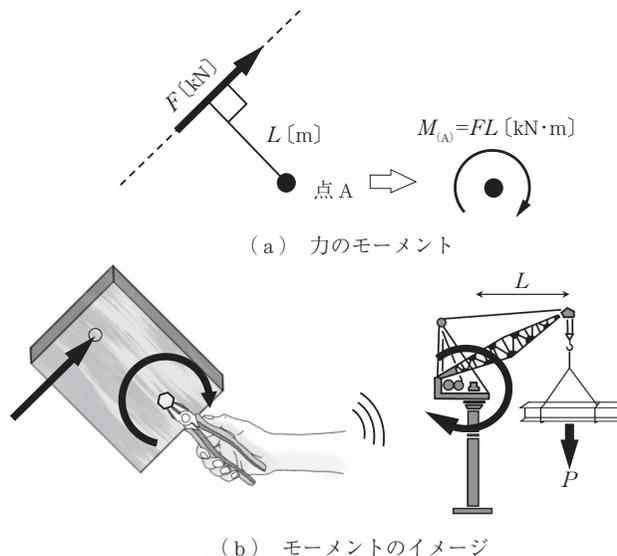


図 1.3 力のモーメント

とる。図 1.4 に示すように、力の作用点が違ってても、アーム長が同じであればモーメントは同じである。単位は、 $\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $\text{N}\cdot\text{mm}$ のように力に長さを掛けたものになる。後で、「曲げモーメント」というものが出てくるが、親戚みたいなもので同じ単位となる。モーメントの記号は M で表現する。点 A 周りのモーメントは $M_{(A)}$ と表記する。しばらくは、 kN と m を使って、力とモーメントを表現する。

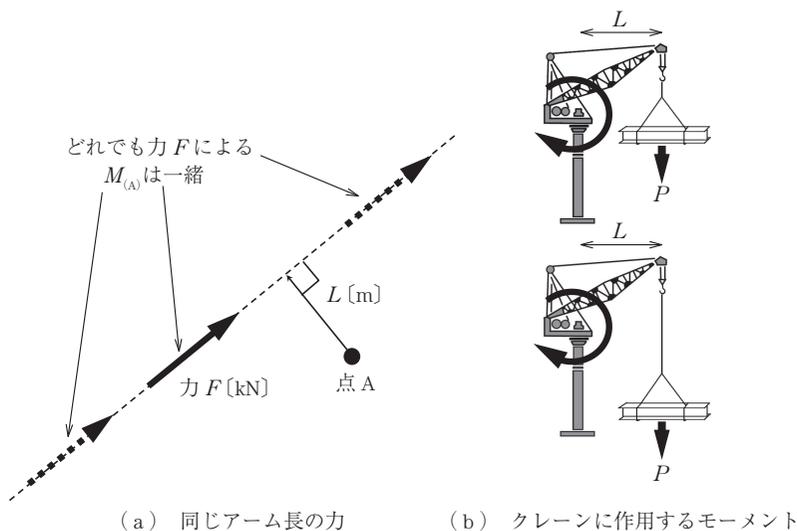


図 1.4 力とモーメントとアーム長

1.1.2 本書での方向, 正負の定義

本書では、表 1.1 にあるように、力やモーメントを図で描くときは原則、正となる方向で描く。

表 1.1 本書での力とモーメントの表記ルール

図：方向, 大きさ (数値) を記入			
<p>4 kN</p>	<p>6 kN</p>	<p>9 kN·m</p>	<p>5 kN·m</p>
数式：正負で方向を表現			
$F_x = 4 \text{ kN}$	$F_x = -6 \text{ kN}$	$M_{(A)} = 9 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$M_{(A)} = -5 \text{ kN}\cdot\text{m}$

4 1. 力 と 釣 合 い

これらを式で表現する場合には、図 1.5 に示すように紙面上で右側と上側を力の正方向、時計回りをモーメントの正方向と定義した座標系で、正負を考慮して表現する。正負も重要なので、慣れるまでは必ず正しく表現すること。

力とモーメントの正方向の定義

【力】 x は右方向, y は上方向

【モーメント】 時計回り

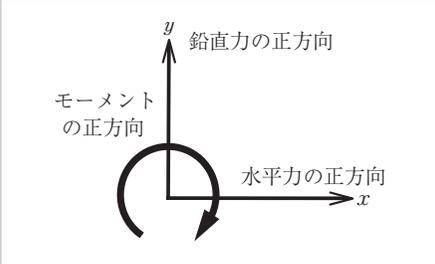


図 1.5 本書での力とモーメントの正方向



ポイント

例題 1.1

図 1.6 (a), (b) に示す力の大きさ F , アーム長 L , 点 A に作用するモーメント $M_{(A)}$ を式と図で示しなさい。マス目一つにつき長さは 1 m, 力は 1 kN とする。

(a) $F=4$ [kN], $L=2$ [m], $M_{(A)} = -4 \times 2 = -8$ [kN·m]

(b) 直角三角形の 3 : 4 : 5 の辺長比を利用すると

$F=5$ [kN], $L=4$ [m], $M_{(A)} = 5 \times 4 = 20$ [kN·m]

モーメントの方向は図 (c), (d) に示すとおりである。

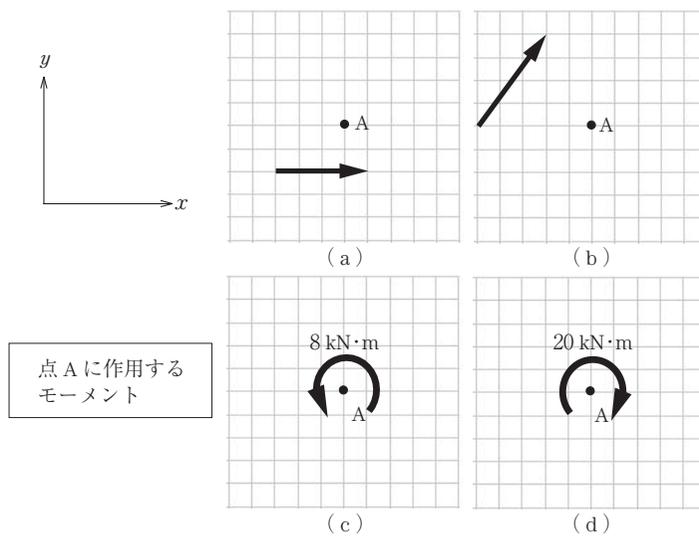


図 1.6 力のモーメントの例題

例題 1.2

図 1.7 (a) に示す点 A に作用するモーメント $M_{(A)}$ を式と図で示しなさい。マス目一つにつき長さは 1 m, 力は 1 kN とする。

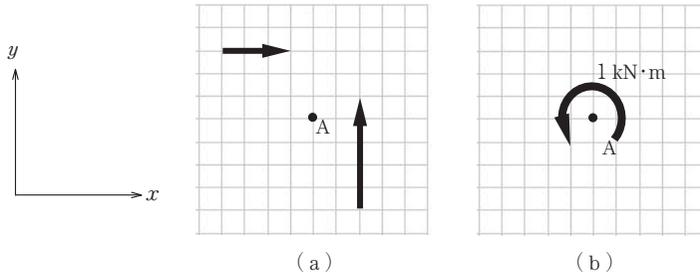


図 1.7 二つの力のモーメントの例題

$$M_{(A)} = 3 \times 3 - 5 \times 2 = -1 \text{ [kN}\cdot\text{m]}$$

モーメントの方向は図 (b) に示すとおりである。

演習問題 1.1

図 1.8 に示す矢印で示したそれぞれの力の大きさ F と、アーム長 L , 点 A に作用するモーメント $M_{(A)}$ を式で示しなさい。マス目一つにつき長さは 1 m, 力は 1 kN とする。

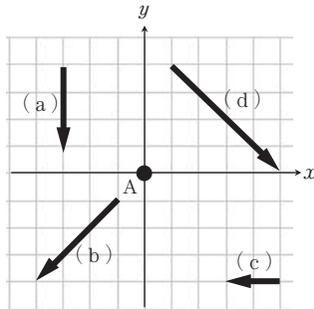


図 1.8 点 A に作用するモーメント

演習問題 1.2

図 1.9 に示す壁に固定された部材に作用する力により点 A に作用するモーメントを示しなさい。外力を受けた部材は壁に力を伝えるものとする。

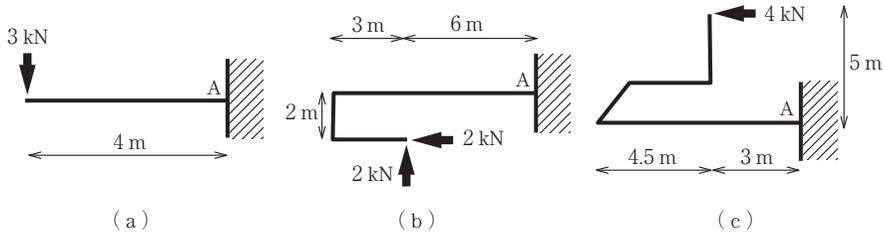


図 1.9 部材を通じ点 A に作用するモーメント

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

1.1.3 質量と力

質量と力の関係を整理する。図 1.10 (a) に示すように体重計に乗って 50 kg と表示されれば、それは体の質量が 50 kg ということである。50 kg の人間が地面に対して作用する荷重は、質量に重力加速度 $g=9.80665 \text{ m/s}^2$ を掛けたもの、すなわち $50 \times 9.80665 \div 490 \text{ N} = 0.490 \text{ kN}$ となる。図 (b) の天秤^{びん}を利用すれば月のように重力加速度が変化するところでも、正確な質量を知ることができる。

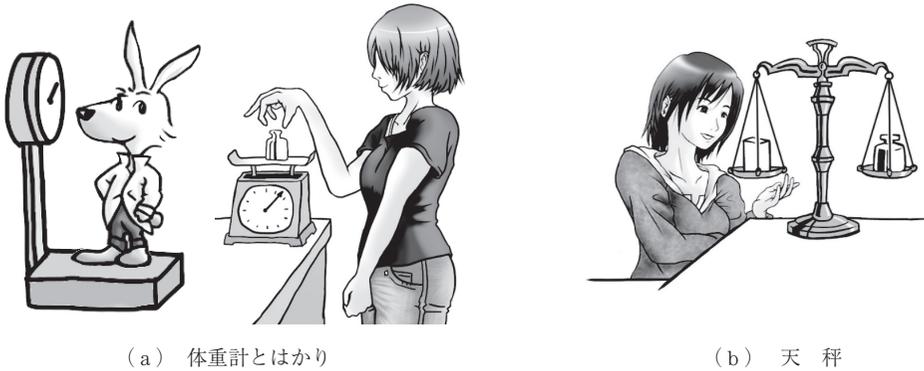


図 1.10 質量と力の関係

例題 1.3

図 1.11 に示すように、質量 3t の鉄骨がクレーンタワーに作用するモーメントを求めなさい。

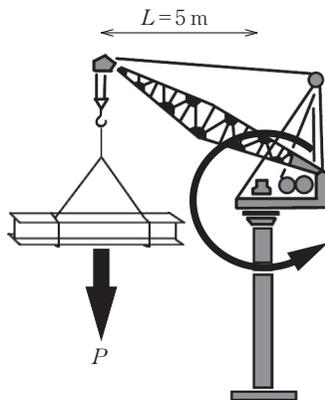


図 1.11 クレーンタワーに作用するモーメント

$$M_{(A)} = -3 \times 9.80665 \times 5 \div -147.1 \text{ [kN} \cdot \text{m]}$$

モーメントの正負に注意すること。

1.1.4 等価な力とモーメント

ある点からアーム長分だけ離れて力が作用する場合、モーメントが作用することは述べたが、同時に力も作用している点を忘れてはいけない。「等価な力とモーメントはなにか」を問われたときは、**図 1.12** のように力 P も必ず加える必要がある。

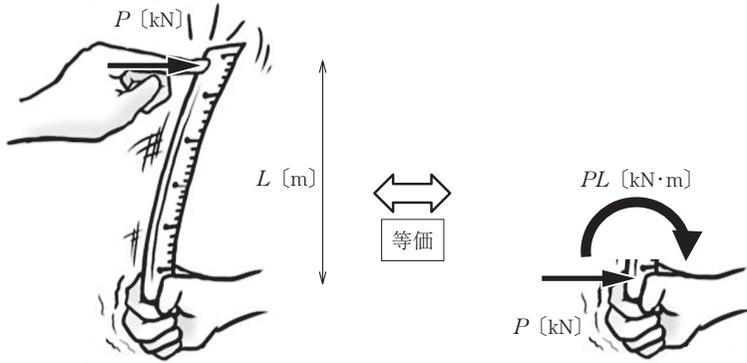


図 1.12 等価な力とモーメント

例題 1.4

図 1.13 (a) に示す状態で、点 A に作用する等価な力とモーメントを求めなさい。

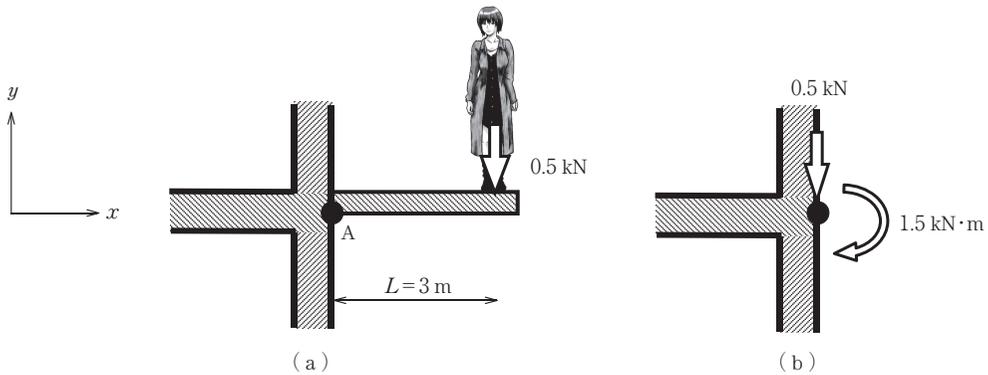


図 1.13 壁に作用する等価な力とモーメント

等価な力は下向きが負となるので、 $F_y = -0.5 \text{ kN}$ 、 $M_{(A)} = 0.5 \times 3 = 1.5 \text{ kN}\cdot\text{m}$ となる。図 (b) にこれらの力を図示する。

1.1.5 偶力と偶力モーメント

たがいに平行で、かつ同じ大きさで、逆方向を向いている力の組みを**偶力**と呼ぶ。この偶力が作用した場合にどのように等価な力とモーメントが働いているか見てみる。

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

索 引

【あ】	アーチ 45 圧縮 30 アーム長 2 安定 159	【こ】	減衰係数 214 減衰振動 215 減衰定数 218 減衰力 213, 215	【せ】	垂直ひずみ度 131 水平剛性 204 数式解法 36 図式解法 36 図心 96 図心軸 102 スパン 93 スラスト 93
【い】	異形ラーメン 77 移動端 24	【さ】	剛接合 24 剛節接合材数 161 剛度 169 剛比 170 合力 10 固定端 24 固定端モーメント 166 固定モーメント法 189 固有円振動数 218 固有周期 218 固有振動数 218	【そ】	静定構造物 24, 160 静定トラス 36 静定ラーメン 72 静的問題 209 積載荷重 23 設計基準強度 127 絶対加速度 216 切断法 42 節点 24 節点移動 ーのあるラーメン 180 ーのないラーメン 180 ーを考慮したたわみ角法の 基本式 194 節点角 164 節点法 36 節点方程式 172, 181 せん断応力度 112, 121 せん断弾性係数 136 せん断ひずみ度 135 せん断力 28 せん断力図 57, 81 せん力方程式 196
【う、え】	運動方程式 216 円振動数 212	【し】	材軸 137 材質 132 最大加速度応答 222 最大せん断応力度 121 最大変位応答 222 最大曲げ応力度 114 材端モーメント 164 座屈 151 座屈応力度 155 座屈荷重 153	【た】	ダッシュポット 215 建物応答 210 建物の地震応答 210 たわみ 137 たわみ角 137 たわみ角法 158, 164 たわみ角法の基本式 165 単位体積重量 12
【お】	オイラーの座屈荷重 153 応力 28 応力図 56 応力度 112	【す】	軸力 28 軸力図 81 時刻歴波形 210 自重 23 地震荷重 23 地震計 210 地震動 210 地震力 23 質量 6, 23, 214 支点 24 弱軸 153 斜材 77 周期 212 自由振動 218 自由端 24 集中荷重 12, 23 重力加速度 215 振動学 209 振動数 212		
【か】	回転角 137 回転端 24 回転半径 156 解放モーメント 189 カイン 211 重ね合わせの原理 65, 165 荷重項 166 風荷重 23 加速度 211, 213 加速度応答 222 片持ち梁 53 ガル 211 慣性力 23, 213, 216				
【き】	基準強度 126 強度 126 共役性 124 共役梁 148 曲率 140 曲率半径 139 許容応力度 127 許容応力度設計 127				
【く】	偶力 7 偶力モーメント 8				
【け】	ゲルバー梁 92 限界細長比 156				

短期荷重 127
 単純支持梁 47
 単純支持ラーメン 72
 単純梁 47
 弾性曲線式 141
 弾性座屈荷重 153
 断面一次モーメント 96
 断面極二次モーメント 108
 断面係数 107, 114
 断面二次半径 156
 断面二次モーメント 101

【ち】

力
 —の3要素 2
 —のモーメント 2
 地動 210
 地動入力時の運動方程式 217
 中間荷重 164
 中立軸 114
 長期荷重 127
 調和波 212

【つ, て】

釣合い条件式 18
 適合条件 164

【と】

土圧 23
 到達モーメント 186
 到達率 186
 動的問題 209
 等分布荷重 12, 23
 等変分布荷重 14, 23
 トラス 18, 34

【に, の】

入力地震動 210
 伸び 131

【は】

ばね定数 133, 204, 214
 バリニオンの定理 11
 反曲点 200
 反曲点高比 201
 反曲点高さ 201
 判別式 160
 反力 25

【ひ】

ひずみ度 131
 左側の部分構造 43, 49, 72
 引張 30
 ピン 24
 ピン接合 24

【ふ】

不安定 159
 復元力 216
 部材角 194
 不静定構造物 24, 160
 不静定次数 160
 不静定ラーメン 72
 縁応力度 114
 フックの法則 132
 不釣合いモーメント 189
 部分構造 43
 分配率 186
 分布荷重 12

【へ】

平均せん断応力度 121
 平行弦トラス 34
 平行軸の定理 103
 平面保持 114
 ベースシア係数 223
 変位 137, 211
 変位応答 222
 変形 131, 137
 変形角 137
 偏心荷重 118

偏心距離 118

【ほ】

ポアソン比 136
 細長比 156

【ま】

曲げ応力度 113
 曲げ剛性 137
 曲げモーメント 28
 曲げモーメント図 57, 81
 マトリックス構造計算 158

【み, む】

右側の部分構造 50, 72
 武藤のD値法 202

【も】

モーメント 2
 モーメントアーム 2
 モーメント荷重 58
 モールの定理 147
 門形ラーメン 72

【や, ゆ】

ヤング係数 132
 有効剛比 187
 有効座屈長さ 154
 有効細長比 156

【ら】

ラーメン 24
 ライズ 93

【り】

リッター法 42
 両端固定梁 163

【れ, ろ】

連続梁 175
 ローラー 24

【G】

gal 211

【K】

kine 211

【M】

M図 57, 81

【N】

N図 81

【Q】

Q図 57, 81

1 質点系モデル 215
 3 ヒンジラーメン 87

—— 著者・監修者略歴 ——

永野 正行 (ながの まさゆき)
1988年 早稲田大学大学院修士課程修了
1988年 鹿島建設株式会社
1998年 博士(工学)(早稲田大学)
2008年 東京理科大学理工学部教授
現在に至る
共著に『建築振動を学ぶ—地震から免震、制震まで—』、『入門・建物と地盤との動的相互作用』、『建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計』ほか

肥田 剛典 (ひだ たけのり)
2005年 千葉大学大学院修士課程修了
2005年 国土交通省関東地方整備局
2010年 京都大学大学院博士課程修了
博士(工学)
2011年 東京理科大学助教
2014年 東京大学助教
現在に至る

井口 道雄 (いぐち みちお)
1966年 早稲田大学大学院修士課程修了
1974年 工学博士(早稲田大学)
1978年 Univ. of Calif. San Diego 客員研究員
1985年 東京理科大学理工学部教授
2009年 東京理科大学名誉教授
現在に至る
共著に『入門・建物と地盤との動的相互作用』、『建築構造力学の最近の発展』、『建築構造力学演習/教科書』ほか

学びやすい建築構造力学

—— 力の釣合いから振動まで ——

Fundamentals of Structural Mechanics—From equilibrium of force to vibration—

© Nagano, Hida, Iguchi 2015

2015年3月25日 初版第1刷発行



検印省略

編著者 永野正行
著者 肥田剛典
監修者 井口道雄
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 萩原印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-05242-8

(中原) (製本:愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします