

すぐに役立つ

# 構造力学

羽切道雄・前林和彦 著

Michio Hakiri / Kazuhiko Maebayashi

Structural Mechanics



彰国社

---

## はじめに

建築や土木の技術者にとって、構造力学や応用力学は必須の学問です。

とはいえ、高校や大学で構造力学や応用力学を学んでいるにもかかわらず、習得したこれらの知識を実際の設計でどのように活用するのかをよく知らない人が多いのが実情です。これには教える側にも責任があると思いますし、また教わる側ももう少し興味を持って、実際の設計ではどのように活用するのだろうかという思いを持つことが必要だと思います。

構造力学や応用力学は、自然現象や身近にある構造物と関連付けて説明することによって、学ぶ方の理解を深めることができます。

「力」や「応力」は目で見ることができないので、構造力学や応用力学がわからなかったり、面白くない方が多いようです。

私は「力や応力は目で見ることができない」が「変形は目で見ることができる」と説明しています。片持ばりや単純ばりの変形を見るには、アクリル製の“物差し”があれば可能です。受験対策の講師をしているときでも、現場での打合せのときでも、相手を説得するのに物差しは大変便利な道具です。

私は建築構造設計の実務経験を通して、理論式や実験式、公式との関係等を若い技術者たちに伝えてきました。本書は私の今までの全ての経験を生かして、簡潔でわかりやすい構造力学と応用力学書としてまとめたものです。難しい理論は避けて、実際の設計ですぐに役立つように最も基本的でかつ具体的な例題を取り上げました。そして、例題を解くに当たってはややくどいほど丁寧に記述しました。

目で見えた形状や変形図、応力図は文字だけの勉強よりも記憶に残るので、例題中の図を多くしています。

---

本書は主に次の方のお役に立つようまとめています。

1. 今までの参考書では構造力学や応用力学があまりよくわからず悩んでいた学生や技術者。
2. 構造力学を独学で学びたい方。
3. 木造建築士、二級建築士、一級建築士を目指す方。
4. 二級建築施工管理技士、一級建築施工管理技士を目指す方。
5. 二級土木施工管理技士、一級土木施工管理技士を目指す方。
6. 構造設計実務に携わっている建築および土木の技術者。

本書をまとめるに当たっては、約40年間にわたって使用した沢山の構造力学や応用力学の専門書を参考にしました。構造力学や応用力学の基本は昔とほとんど変わっていません。特筆すべき変化は、重力単位がSI単位に変わったことです。本書ではSI単位表示を基本としました。

今日ではコンピュータの性能が良くなったことと解析ソフトが安く入手できるようになったことから、コンピュータがなくては何もできないような錯覚に陥りつつあります。若い技術者の中には全ての構造設計をコンピュータがしてくれると勘違いしている方がいます。構造力学や応用力学の基本を正しく学んで正しく理解していないと、構造計画にも支障をきたします。現在の構造設計基準（規準も含む）では、コンピュータを使用して解析することが前提条件として式が作られています。コンピュータは大変便利なものですから、大いに活用すべきです。

これから構造設計や管理の業務でコンピュータを使用する方は、入力するデータの意味を理解することが一番大切です。そして、解析結果を正しく評価することが求められています。そのためにも本書で構造力学と応用力学の基本と設計のセンスを身に付けていただければ幸甚です。

2012年8月

羽切道雄

はじめに ————— 3

## 第1章 自然現象にみる力学 …………… 9

1. 地球 ————— 10
2. 重力 ————— 13
3. 気象現象 ————— 15
4. 地震 ————— 17
5. 大自然の木から学ぶ ————— 19
6. 水と土 ————— 22
7. コンクリート ————— 24
8. 鉄・鋼 ————— 26

## 第2章 構造力学を学ぶ前に知っておきたいこと ……… 29

1. 構造力学の必要性 ————— 30
2. 力の単位 ————— 31
3. 変形と応力 ————— 33
4. 部材の壊れ方 ————— 34
5. 支点 ————— 36
6. 節点 ————— 38
7. 荷重と外力 ————— 39
8. ラーメン構造 ————— 42
9. トラス構造 ————— 43
10. 材料の強度と性質 ————— 46

第 <b>3</b> 章 構造力学の基礎・力の性質	61	第 <b>5</b> 章 断面の性質	171
1. 力の三要素	62	1. 断面の性質	172
2. 力のつり合い	64	2. 断面一次モーメント	173
3. 力の合成	65	3. 断面の図心	174
4. 力の分解	69	4. 断面二次モーメント	178
5. モーメント	70	5. 断面係数	181
6. 偶力	71	6. 断面二次半径	182
7. 作用と反作用	72	7. 応力と応力度	184
8. 応力の図示法	73	8. 断面性能公式表の活用法	186
9. 静定構造物	76	9. 部材の座屈	191
10. 不静定構造物	77		
第 <b>4</b> 章 やさしい実践構造力学	79	第 <b>6</b> 章 断面の設計	197
1. 片持ばり	80	1. 断面の図心・断面二次モーメントの計算	198
2. 単純ばり	94	2. 断面係数の計算	205
3. はね出しばり	107	3. 断面二次半径の計算	209
4. トラス	115	4. 曲げを受ける木材の設計	213
5. 静定ラーメン	133	5. 圧縮力を受ける木材の設計	214
6. 単純ばりラーメン	140	6. 圧縮力を受ける鉄骨材の設計	218
7. 3ヒンジラーメン	145		
8. 不静定構造物	153	付録 構造設計に用いる参考資料	223
9. はりのたわみ	164	参考文献	231
		索引	232
		著者紹介	234

# 1. 地球

地震は地球の中で起こる自然現象の1つですから、地震について知るためには地球に関する知識を豊富にすることが必要です。構造物の設計では外力として地震力と風圧力が重要な要因となります。さらに構造物に使用する材料は自然界から得られる物質を加工したものです。

この章では自然現象と材料について簡単に整理しました。

## 1 地球の年齢

最新の太陽系形成論によると、地球が誕生したのは今から約46億年前だといわれています。約50年ほど前から岩石の年齢が正確に計れるようになりました。それは岩石の中に含まれている放射性元素の自然崩壊現象がわかってきたからです。それまでは地球の年齢はせいぜい数億年であると推定されていたのです。

## 2 地球の内部

現代の地球物理学者によって正しいとされている地球内部の構造を地球全体のイメージとしてとらえておきましょう。

一般に地球は卵（タマゴ）のような構造にとえられて説明されます。

図1は地球を模式的に示した断面図です。

地球の外側から地殻（プレート）、マントル、外核、内核という部分から成り立っていて、これらはタマゴにおける殻、白身、黄身の部分に相当します。地殻およびマントルは固体で核は液体ですが、核の真ん中の部分の内核は多分固体であるといわれています。

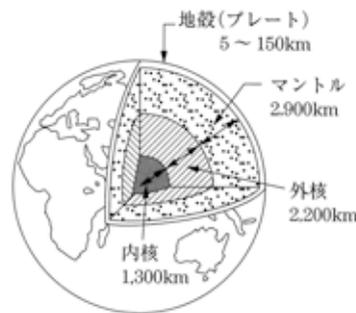


図1 — 地球の断面図

## 3 プレート・テクトニクス

地球の表面を覆っているのはプレートです。このプレートの厚さは薄いところで約5 km、厚いところでは約150 kmあるといわれています。地球とタマゴの違いは、このプレートがタマゴの殻のように1枚のものではなく、複数のプレートに分かれているということです。大きなプレートは7つあり、その他にも小さいプレートがいくつもあるそうです。

海洋底拡大説や大陸移動説を基にして次のような学説が発表されました。

「地球の表面が複数枚のプレートに分かれていて、これらがお互いにゆっくり移動して衝突したり離れたりする」

「プレートは海嶺<sup>かいれい</sup>で生まれて、海底を長い間にわたって少しずつ移動して海溝<sup>かいこう</sup>から地球の内部へ潜り込んでいく」

そして1980年代半ばに「プレート・テクトニクス (plate tectonics)」(プレートは板または剛盤を意味し、テクトニクスは構造地質学を意味する) という呼び名とともに日本にも定着しました (図2)。

このプレート・テクトニクス論によって、1915年にドイツのウエゲナー (Alfred Lothar Wegener) 氏の大陸移動説や山脈の形成、地盤の隆起や沈降、火山活動や地震の原因などが総合的に説明できるようになったのです。

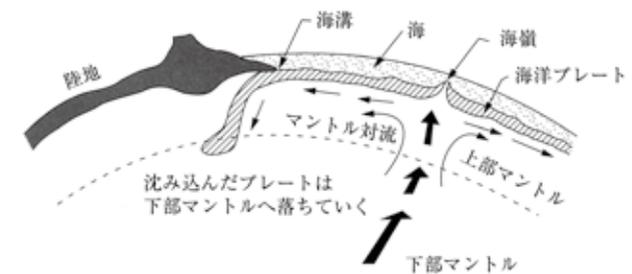


図2 — プレート・テクトニクス

## 4. 部材の壊れ方

建築構造物の部材の壊れ方にはいろいろあります。皆さんも地震で被害にあった建物の写真などを見たことがあると思います。

実験室で部材実験をする場合には、破壊の目的に合った壊し方ができます。こうした実験によって、その部材の耐力を知ることができます。

しかしながら、実際の構造物では実験のように単純な壊れ方はしません。

地震によって破壊された部材の壊れ方を分析すると、次のように分類できます。

- ① 圧縮破壊    ② 引張破壊    ③ 曲げ破壊    ④ せん断破壊
- ⑤ ねじり破壊    ⑥ 座屈破壊    ⑦ <sup>かた</sup>割裂破壊

破壊状態のイメージを図2～6に示すので参考にしてください。

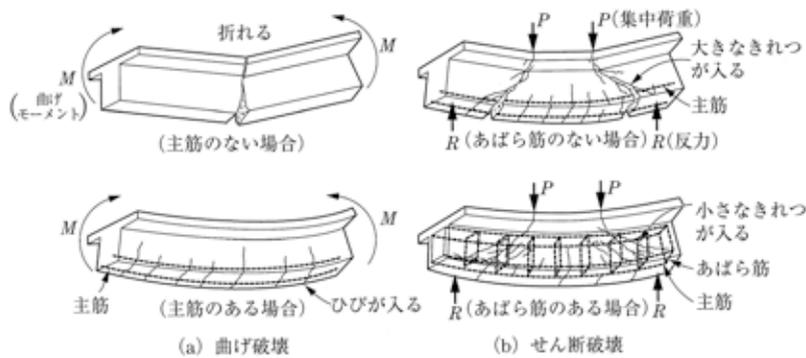


図2 — はり部材の破壊状態

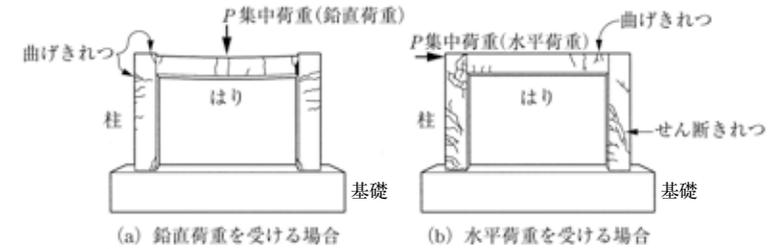


図3 — 門型ラーメンのひび割れ

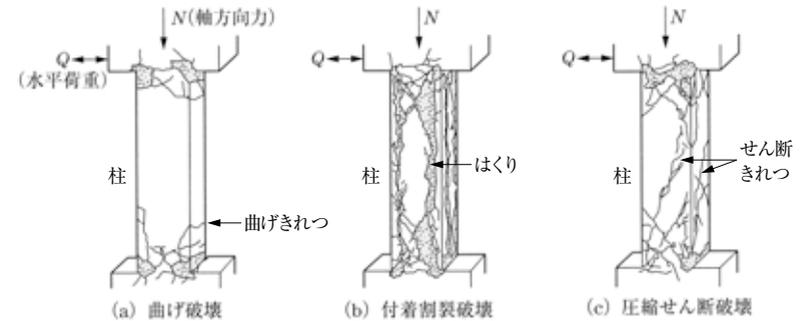


図4 — 柱部材の破壊状態

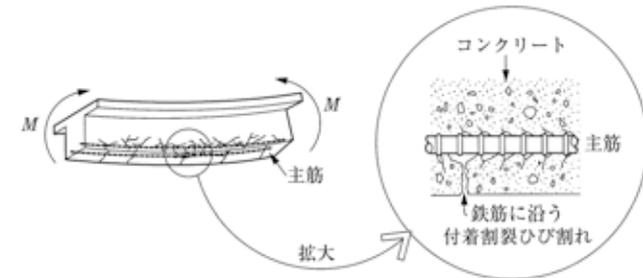


図5 — 付着割裂ひび割れ

# 1. 力の三要素

物体に作用した力は次の3つの要素によって表します。

- ① 力の大きさ
- ② 力の方向
- ③ 力の作用点

これらを力の三要素といいます。図1を参照してください。合力や反力を求める場合には、力の三要素を考慮する必要があります。

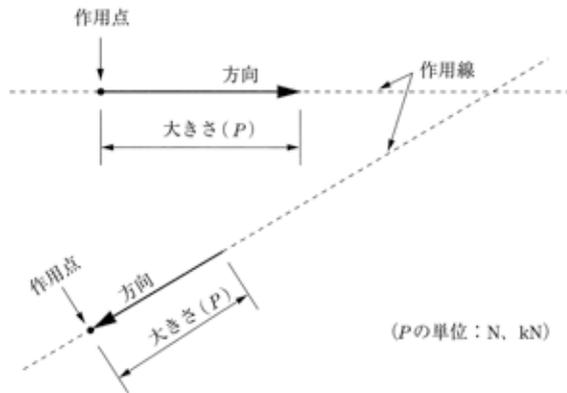


図1 — 力の表し方

## 力の三要素の具体的な例

- ① ボールを投げるときに、軽く投げると力を入れて投げるのでは、ボールの運動の様子が異なります(図2)。

→ 力の大きさ

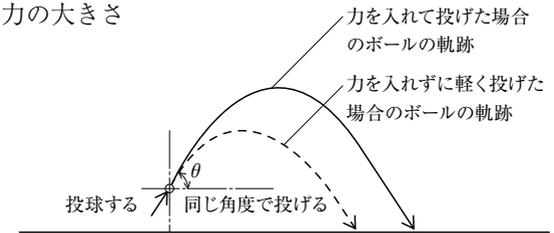


図2 — 力の大きさ

- ② 「押してダメなら引いてみな」といわれるように、同じ大きさの力を加えても、押すのと引くのでは運動の様子が異なります(図3)。

⇒ 力の方向

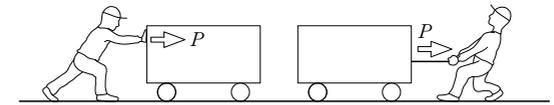


図3 — 力の方向

- ③ 子供が乗っている三輪車を後ろから押すときに、同じ大きさの力で押しても、三輪車の下のほうを押すのと、子供の背中を押すのでは運動の様子が異なります(図4)。

- 力の作用点

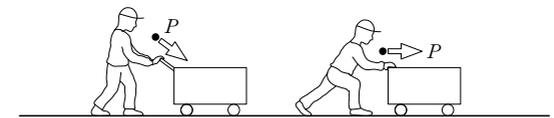


図4 — 力の作用点

このように身近な例を思い出して、力の理解を深めましょう。

# 1. 片持ばり

## ① 片持ばりの例

片持ばりとは、一端が固定され他端が自由なはりをいいます。英語ではcantilever（キャンチレバー）です。私たちの身近にある例としては、次の図1に示すような木造家屋の庇や鉄筋コンクリート構造物の壁面から突き出たバルコニーや階段などがあります。

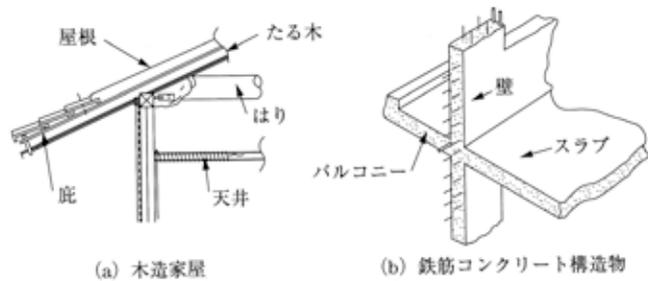


図1 — 片持ばりの例

片持ばりの変形図や応力図は複雑な構造物の変形や応力を理解するうえで最も基本となるものですから、変形図や応力図が示す意味を理解することが大切です。

この節では、片持ばりの曲げモーメントとせん断力を求めて、変形を考えながら曲げモーメント図（M図）とせん断力図（Q図）を描くことが主な学習になります。曲げモーメント図とせん断力図は、はりやスラブの断面算定をするときの応力を示す重要な図です。ここではややくどいほど丁寧に解説しますので、基本的なことをしっかりと身に付けましょう。

解説に当たって、読者の皆さんが構造物のイメージを持つことができるように簡単な図を挿入しました。全ての例題に挿入してはませんが、例題を解いているときにそれが実際の構造物の設計においてどのような所に使用できるのかを考えることが大切です。実際の構造物の設計に使用する

イメージがつかめるようになると、構造力学や応用力学を学ぶのが楽しくなってくると思います。

## ② せん断力および曲げモーメントの符号の約束

せん断力図および曲げモーメント図に対する、せん断力および曲げモーメントの正負の符号は次の通りとします。

図2に示すように、はりの任意断面 $n-n$ で切断したとき、その断面に生じたせん断力 $Q$ がその作用している部分を時計回りの方向に回転させるように作用しているとき、この1対のせん断力 $Q$ を正（+）とします。

これとは逆に、図3に示すような、反時計回りに回転させるように作用する1対のせん断力 $Q$ を負（-）とします。



図2 — はりの任意断面のせん断力（正）

図3 — はりの任意断面のせん断力（負）

次に、集中荷重を受ける片持ばりの場合を具体的に説明します。荷重状況は次の図4(a)に示す通りとします。

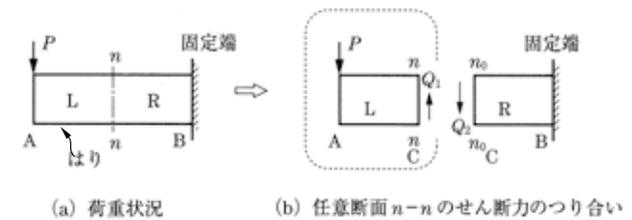


図4 — 片持ばりの力のつり合い

図4(a)荷重状況において、集中荷重 $P$ を受ける片持ばり $AB$ の任意断面 $n-n$ で切断して、片持ばり $AB$ を左側 $L$ と右側 $R$ の2つに分けます。

次に、図(b)に示すはりの $L$ 側のみの点線の枠の中で、力のつり合いを考えます。外力は荷重 $P$ 以外に作用していないので、切断図 $n-n$ の位置

# 1. 断面の図心・断面二次モーメントの計算

5章までに学んだ内容を実際の設計でどのように利用するか、例題を挙げてわかりやすく解説します。いろいろな断面の部材の曲げ応力度や圧縮応力度の算定方法を理解しましょう。

## ■ 例題-1 I形断面の図心と断面二次モーメント

次の図1に示すI形断面の図心を求め、さらに図心Gを通る横軸 ( $x-x$ ) に関する断面二次モーメントを求めよ。

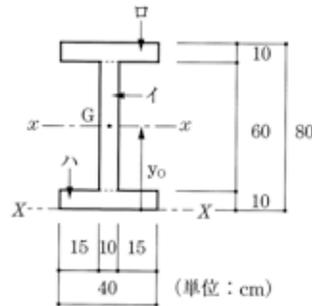


図1 — I形断面

**【解】**

**【ケース1】**

まず、I形断面をイ、ロ、ハの3つに分割して計算します。

断面積の計算  $A_i = 10 \times 60 = 600$

$A_{ロ} = 40 \times 10 = 400$

$A_{ハ} = 40 \times 10 = 400$

$\Sigma A = 600 + 400 + 400 = 1,400 \text{ cm}^2$

I形断面の下端を  $X-X$  軸として、この  $X-X$  軸に関しての断面一次

モーメントを求めます。

$$S_x = 600 \times \left(10 + \frac{60}{2}\right) + 400 \times \left(70 + \frac{10}{2}\right) + 400 \times \frac{10}{2}$$

$$= 24,000 + 30,000 + 2,000 = 56,000 \text{ cm}^3$$

$X-X$  軸から図心までの距離を  $y_0$  とすると、

$$y_0 = \frac{56,000}{1,400} = 40 \text{ cm}$$

となります。

この断面は左右対称ですから、図心は  $X-X$  軸から上に40cmの位置で、左右の中心にあります。図心を通る  $x-x$  軸に関する断面二次モーメント  $I_x$  は次のように求められます。

$$I_x = \Sigma (I_0 + A \times y^2)$$

断面イの図心の位置からI形断面の図心Gまでの距離  $y_{0i}$  は次のようになります。

$$y_{0i} = 40 - 40 = 0 \text{ cm}$$

断面ロの図心の位置からI形断面の図心Gまでの距離  $y_{0ロ}$  は次のようになります。

$$y_{0ロ} = 75 - 40 = 35 \text{ cm}$$

断面ハの図心の位置からI形断面の図心Gまでの距離  $y_{0ハ}$  は次のようになります。

$$y_{0ハ} = 40 - 5 = 35 \text{ cm}$$

$$\therefore I_x = \frac{10 \times 60^3}{12} + \left( \frac{40 \times 10^3}{12} + 400 \times 35^2 \right) \times 2 = 180,000 + 986,667$$

$$= 1,166,667 \text{ cm}^4$$

**【ケース2】**

次の図2のように、I形断面に斜線部を加えた矩形断面（充実断面）の断面二次モーメントを求め、この断面二次モーメントからI形断面以外の部分の断面二次モーメントを差し引く方法で計算します。