

## Chapter 2 鋼材の性質

この章には、鋼材の基本的力学特性について解説する。

### 2.1 鋼の種類

鉄は比重<sup>1</sup>7.87 である。ようするに、鉄の密度は  $7.87 \times 10^3 \text{kg/m}^3$  であり、コンクリート ( $2.3 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ) と木材 (杉:  $0.38 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 、檜:  $0.41 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ) の密度よりだいぶ高くなっている。

鉄あるいは鉄鋼という材料は、鉄の原子に炭素、ケイ素、リン、硫黄などの非金属元素、あるいはマンガン、ニッケル、クロムなどの添加金属元素を少量含んでいる。これらの元素の含有量は鉄鋼の正式にいろいろな影響を及ぼすが、中でも最も大きな影響を与えるのが炭素である。炭素の含有量によって、鉄は表 2.1 のように分類されている。

表 2.1 鉄の炭素含有量による分類

名称	炭素含有量 (%)
鉄 (Iron)	0~0.08
鋼 (Steel)	0.008~2.0
鋳鉄 (Cast Iron)	2.0~6.67

純鉄は降伏強さ  $100 \text{N/mm}^2$  程度、引張強さ  $250 \text{N/mm}^2$  程度で強度は大きくないが、延性に富んでいる。鉄に炭素が固溶すると、固くて脆い金属間化合物  $\text{FeC}$  を作る。鉄の強度を制御するには、炭素の含有量を調節するのが最も容易である。鋼は純鉄の延性と鋳鉄の強度をバランスよく持ち合わせた優れた材料であり、構造用材料として多く使用されている。炭素の含有量によって、鋼はさらに表 2.1 のように分類される。

表 2.2 鉄の炭素含有量による分類

名称	炭素含有量 (%)	用途
極軟鋼	0.08~0.12	薄鋼板やブリキ亜鉛鉄板など
軟鋼 (Mild Steel)	0.12~0.30	建築、造船、橋梁、ボイラーなど
硬鋼	0.30~0.50	車両、歯車、ばねなど
最硬鋼	0.50~0.90	レール、ワイヤロープなど車両、歯車、ばねなど

炭素鋼に特殊の合金元素を添加すると、硬さや強さを増やしたり、耐食性や耐熱性を増やすことができる。たとえば、以下のような鋼材が開発されている。

- 高張力鋼: 降伏強さ  $300 \text{N/mm}^2$  以上、引張強さ  $500 \text{N/mm}^2$  以上の強度を持つ鋼材。

<sup>1</sup> 同じ体積の水との重さの比

- 耐候性鋼：表面に酸化被膜ができて錆の進行を遅らせる鋼材。
- 低降伏点鋼：低い応力状態で塑性化し、振動のエネルギーを吸収する制振構造に用いられる。

## 2.2 鋼材の力学的特性

### 2.2.1 応力-ひずみ関係

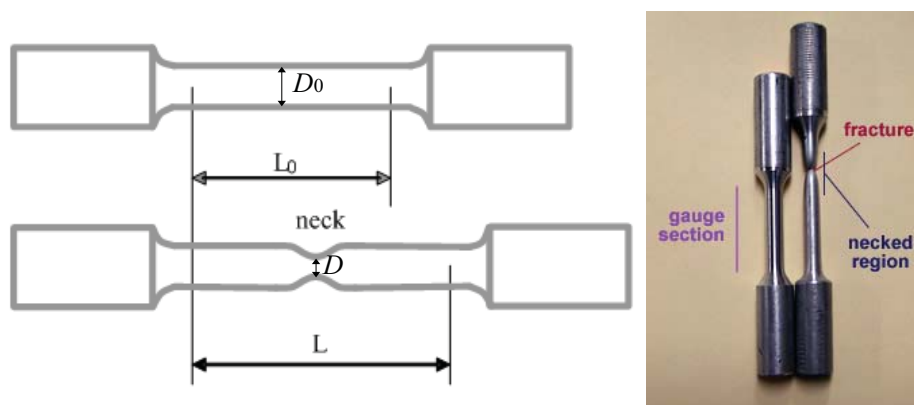


図 2.1 鋼材の引張試験片 (Taken from <http://www.substech.com/>)

鋼材の力学的特性を調べるには、引張試験が簡便であるため、一般的に行われている。断面積  $A_0$ 、評点距離  $L_0$ 、直径  $D_0$  の試験片を万能試験機に挟み、引張荷重  $P$  を加えると、断面積  $A$ 、評点距離  $L$ 、直径  $D$  に変化したとする。このとき、荷重と評点間の伸びにより、応力  $\sigma$  (Stress) とひずみ  $\varepsilon$  (Strain) はそれぞれ

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{P}{A} \\ \varepsilon &= \frac{L - L_0}{L_0}\end{aligned}\quad (2.1)$$

で定義される。

軟鋼の引張試験片を伸びさせると、(公称) 応力とひずみの関係は図 2.2 に示すように得られる。また、試験片が破断までのプロセスは以下の通りとなる。

- 応力  $\sigma$  (またはひずみ  $\varepsilon$ ) が小さいとき、 $\sigma$  と  $\varepsilon$  は完全な直線関係を保つ。荷重をゼロに戻すと、試験片も元の状態に戻り、残留変形 (ひずみ) が生じない。この状態は弾性といい、この状態が保たれる範囲は弾性範囲という。
- ある弾性限界を超えると、荷重がゼロにしても、試験片の変形がある程度戻るが、残留変形 (ひずみ) が生じ、元の状態に戻れない。この弾性限界は、降伏強度  $\sigma_y$  (降伏強さ, Yielding Strength) といい、弾性範囲を超えたものは、塑性範囲という。また、軟鋼の場合に、降伏した後試験片が伸び続けるが、荷重がほぼ変わらない段階がある。これは、降伏棚という。
- さらに伸び続けさせると、試験片が均一に変形しなくなり、局部的にくびれ (Necking) が生じ、荷重が下がって破断する。この途中で達した最大の応力  $\sigma_u$  は、引張強度 (引張強さ, Ultimate Strength) という。

<sup>2</sup> ここで定義されているのは公称応力とひずみである。真応力は  $\sigma^* = \frac{P}{A}$ 、真ひずみは  $\varepsilon^* = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right)$  である。

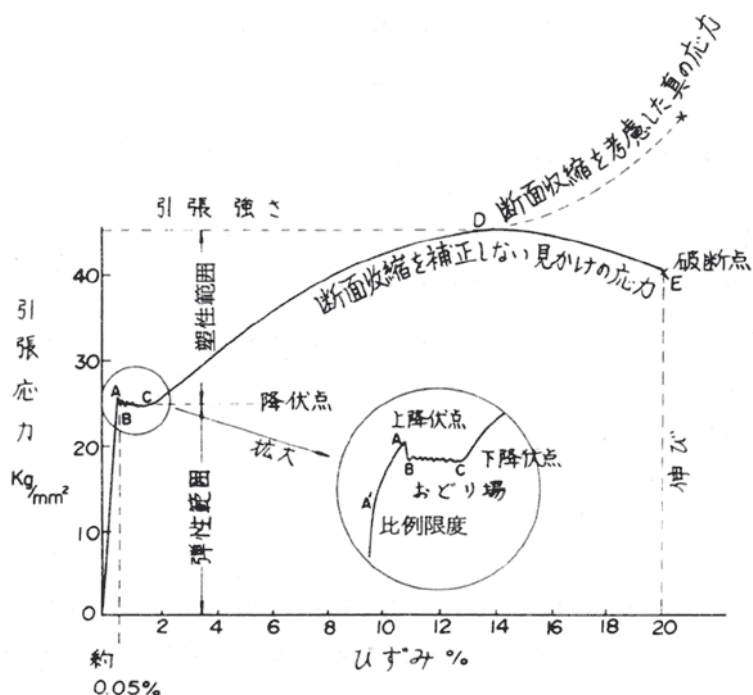


図 2.2 軟鋼の応力-ひずみ関係 (Taken from)

弾性範囲における応力・ひずみ関係の勾配は、弾性係数  $E$  (ヤング係数、Young's modulus) と呼ぶ。鋼材の場合、どの鋼種でもほぼ  $E = 2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$  である。

試験片の横方向のひずみ  $\varepsilon_c$

$$\varepsilon_c = \frac{D - D_0}{D_0} \quad (2.2)$$

として定義し、横方向ひずみ  $\varepsilon_c$  と荷重方向ひずみ  $\varepsilon$  の比  $\nu$  はポアソン比 (Poisson's Ratio) と呼び、弾性範囲内の鋼材のポアソン比は 0.3 前後である。

$$\nu = -\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon} = 0.3 \quad (2.3)$$

また、せん断弾性係数 (Shear Modulus, または Modulus of Rigidity) は  $G$  で表し、弾性係数とポアソン比との間には、以下の関係を持つ。

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = 7.8 \times 10^4 \text{ N/mm}^2 \quad (2.4)$$

降伏比：

降伏強度  $\sigma_y$  と引張強度  $\sigma_u$  の比を降伏比  $Y$  と呼ぶ。

$$Y = \frac{\sigma_y}{\sigma_u} \quad (2.5)$$

降伏比は、鋼材が降伏してから破断するまでの強度の余力を示す数値である。また、降伏比は建物が降伏してから最大耐力に達するまでの塑性変形能力を決めるパラメーターでもあり、建物の構造上の粘り強さを確保するという点で耐震設計上重要な指標である。

高張力鋼は降伏強度を上げる目的で作られたものである。しかし、降伏強度の上昇する一方、引張強度は上昇していない。したがって、降伏強度が大きい鋼材ほど、その降伏比  $Y$  が 1.0 に近づく傾向を示す。

## 2.2.2 鋼材の靱性と破断

鋼材の破断には二つのパターンがある。

鋼材破断のパターン：

- **延性破断**：塑性変形で大きなせん断すべりが生じると欠陥も生じる。欠陥の連結により、鉄が破断する。鉄の破断面は結晶のすべり面にそって生じるせん断型破面となる。
- **脆性破断**：温度が低くなると鋼材の延性が減少し、ガラスのように脆い破壊が生じる。この破断面は結晶の特定の面にそって生じる劈開（へきかい）型破面となる。鋼材の中では脆性破壊の進展が秒速数 km に及ぶので、大変危険な破壊である。

建物の設計においては、できるだけ脆性破壊を避けたい。鉄骨の部材または接合部には応力集中部分があり、外力をうけて変形が進んだ場合に、これが脆性破壊を起こす起点となるかどうかは、鋼材の靱性 (Toughness) があるかどうかによるといわれている。鋼材の靱性を工学的に簡便な方法で調べるのはシャルピー衝撃試験がある。

## 2.2.3 建設材料の力学特性比較

材 料	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	ヤング係数 ×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup>	密 度 ×10 <sup>-5</sup> N/mm <sup>3</sup>	比強度 ×10 <sup>5</sup> mm	比剛度 ×10 <sup>6</sup> mm	破壊ひずみ %
鋼	400~570	205	7.85	50~70	26	20%程度以上
コンクリート	15~27	18~24	2.3	6~12	8~10	0.5%程度
木	50~100	5~10	0.3~0.7	100~250	10~25	1%程度
ガ ラ ス	30~90	70~80	2.4~2.6	12~35	28~30	0.05%程度

(注) コンクリートは圧縮性能, 他は引張性能

図 2.3 各材料の力学特性 (Taken from)

図 2.3 に示すように、ほかの建設材料と比べて、鋼構造は以下の長所がある。

- **強度が高い**  
同じ応力に対して、必要な断面積 (材料) が小さい (少ない)。引張強度は、コンクリートの 20 倍、木材の 4 倍以上である。
- **剛性が高い**  
鋼材の剛性は、コンクリートの 10 倍、木材の 20 倍である。同じ断面力および変形制限のもとでは、必要な断面積 (材料) が小さい (少ない)。
- **品質が保証される**  
鋼材は工場で作成し、現場で組立てるのに対し、コンクリートは現場で打ち、養生しないとできない。また、木材は成長環境によってその品質が影響されやすい。
- **材質が均一**  
鋼材の主な成分は鉄原子であり、各方向にも同じぐらいの力学特性を持つ。コンクリートに

は、セメントと水が化学反応により生成された成分、小骨材、粗骨材などが含まれている。各方向の力学特性が異なり、圧縮強度も引張強度の 10 倍となる。木材も繊維方向とそれと直交する方向の力学特性が異なる。

- 工期が短い  
コンクリートのように現場で一カ月ぐらいの養生期間が不要である。
- 変形能力・耐震能力が高い  
降伏後、破断までに大きな変形能力を有し、降伏後エネルギー吸収能力が高まるため、地震に対しては有利である。
- リサイクルしやすい  
原材料として再び鋼材への生産が可能である。

鋼構造の強度・剛性が高いことによって、スパン（柱と柱の距離）が長く取れる。したがって、事務所など柱が邪魔なときは、適用される。大きなスパンを飛ばせる空間構造<sup>3</sup>においてもほとんどが鋼材を使用している理由もここにある。

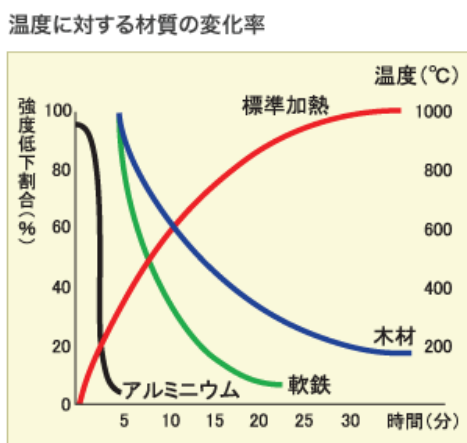


図 2.4 温度に対する軟鋼の強度低下率 (Taken from <http://2x4shikoku.com/2x4/fire-retardant.html>)

しかし、世の中で完璧な材料は存在しない。鋼構造は、以下のような短所がある。

- 耐火能力が低い  
例えば、図 2.4 に示すような加熱曲線に対する各材料の強度低下率の図によると、鉄は 550°C を超えると、その強度が 50% ダウンとなっていることが分かる。したがって、規定時間内<sup>4</sup>、一定の温度 (350°C) を超えないように耐火被覆 (ひふく) を実施する。
- 局所座屈が起りやすい  
剛性・強度が高いより、少ない材料 (薄い鋼板) で済むが、鋼板が座屈しやすくなる。したがって、応力が集中するところに、補強材 (スチフナ, Stiffener) が必要となる。
- 錆びやすい  
空気に暴露すると、さびやすいため、防錆処理が必要である。

## 2.3 建築構造用鋼材（SN 材）

建築物の主要構造部に使用する材料は、大臣が定める指定建築材料でなければならない。また、鉄骨に用いる構造用鋼材は日本工業規格に適合した工業製品としてその性能が安定的に供給さ

<sup>3</sup> 空間構造とは、大きな柱のない空間を持つ建築構造物である。主に、体育館や空港など大規模な公共建築に使われる。

<sup>4</sup> 避難などに要する時間である。

れるものでなければならない（建築基準法第 37 条）。建築鉄骨の構造用として定められた鋼材は、SN 材（JIS G 3136 建築構造用圧延鋼材）である。

### 2.3.1 SN 材の強度レベル

引張強度の強度レベルによる種別は、建築分野においては引張強度 400N/mm<sup>2</sup> 級（SN400 材）と 490N/mm<sup>2</sup> 級（SN490 材）の二種類としている。

### 2.3.2 鋼材の特性区分

建物での鋼材の使用部位を考慮し、SN400 材では A, B, C 種に、SN490 では B, C 種に区分している。

- A 種は、小梁、トラスまたは二次部材のように弾性範囲で設計され、原則として主要な溶接を施（ほどこ）さない部材を主用途とする。
- B 種は、塑性変形能力と溶接性を確保する鋼材で、耐震上主要な構造部材を主用途とする。
- C 種は、B 種の性能に加えて、板厚方向の特性が向上したもので、貫通ダイアフラムや溶接組立箱形断面柱のスキンプレートなどの板厚方向に応力が作用する構造部材を主用途とする。

### 2.3.3 基準強度 $F$ と引張強度 $F_u$

建築基準法における許容応力度設計においては、一次設計で損傷限界に対して許容応力度設計を行い、二次設計で安全限界に対して保有耐力の計算を行って構造安全性を確認することとなっている。

#### 一次設計（許容応力度設計）の基本式

一次設計の許容応力度設計では、弾性解析によって得られた部材断面力を公称応力度  $\sigma_i$  ( $i$  は、引張、圧縮、曲げ、せん断などの応力度の種類) に換算し、この応力度の種類に対応した許容応力度  $f_i$  以下であることを確認する。すなわち、

$$\sigma_i \leq f_i \implies \text{OK} \quad (2.6)$$

許容応力度  $f_i$  は、応力度の種類  $i$  によって部材等が損傷限界となる応力度  $\sigma_{cr,i}$  に対して、安全率  $c_i$  を考慮したものである。

$$f_i = \frac{\sigma_{cr,i}}{c_i} \quad (2.7)$$

ここで、損傷限界に対する  $\sigma_{cr,i}$  および  $c_i$  は、弾性範囲だけでなく、非弾性挙動も考慮して決められている。

そこで、材料の基準強度  $F$  の値は降伏強度  $\sigma_y$  だけでなく、引張強度  $\sigma_u$  も考慮する必要がある。具体的には、JIS 規格で規定された降伏強度  $\sigma_y$  の下限値と引張強度の下限値の 70% のうちの小さい値を  $F$  として採用している。

また、二次設計における保有耐力の計算では部材の全塑性モーメントの計算が必要になり、これに対する材料の基準強度も同じ値が用いられる。

接合部の終局耐力を計算するときに必要な材料の終局強度  $F_u$  は、材料規格における引張強度  $\sigma_u$  の下限値を用いるのが一般的である。

上記の基準強度  $F$  と終局強度  $F_u$  は、表 2.3 に挙げられる。

表 2.3 建築構造用鋼材の  $F$  および  $F_u$  値 (N/mm<sup>2</sup>)

鋼材の種類		SN400	SN490
$F$	厚さ 40mm 以下	235	325
	厚さ 40 をこえ 100mm 以下	215	295
$F_u$		400	490

### 2.3.4 許容応力度

建築基準法施行令 90 条に定められている鋼材の許容応力度を、表 2.4 に示す。短期応力に対する許容応力度は長期応力の 1.5 倍であり、せん断の許容応力度は圧縮、引張、曲げの  $1/\sqrt{3}$  である。鋼種ごとの  $F$  値は、表 2.3 の値を用いる。

表 2.4 鋼材の短期・長期許容応力度の関係

長期荷重に対する許容応力度		短期荷重に対する許容応力度	
圧縮	引張 曲げ	せん断	せん断
$\frac{F}{1.5}$	$\frac{F}{1.5\sqrt{3}}$	$F$	$\frac{F}{\sqrt{3}}$

このほか、支圧、圧縮材の座屈、曲げ材の横座屈に対する許容応力度として、許容支圧応力度、許容圧縮応力度、許容曲げ応力度が鋼材の基準強度  $F$  値に基づき定められている。これらは該当の章に挙げる。