

第1章 総論

本書は大学課程の専門授業に適した、講義用テキストとしてまとめている。実務における設計や施工計画業務で参考になるように、専門用語の解説や設計式の説明を行っている。また、鋼製の橋梁を中心に解説するが、建築鉄骨、鉄塔、水門、および水圧鉄管などの**鋼構造物**（Steel Structures）でもある程度対応できるように用語の解説を行っている。本章では、鋼構造の歴史、鋼構造の種類、鋼構造の特徴、および本書の構成について説明している。

1.1 鋼構造物の歴史

1.1.1 鉄の構造的使用の始まり

鉄が構造用材料として使用されるようになったのは、ここ 250 年余のことである。その中で鋼構造物の出現は、18 世紀の後半になってからである。鉄そのものは、今から 3000 年前にアジアで鉄器として使い始めたことが記録されている。

本格的な製鉄技術は、主として英国において石炭製鉄と精錬、圧延工程への蒸気機関の導入により発展した。18 世紀前半までの鉄の使用は、鉄道レール、蒸気エンジンのタンク、クランクシャフトなどの機械部品などに限られていた。

構造物への鉄の適用は、製鉄技術の発展を背景として、1779 年に英国中西部のアイアンブリッジの建設によって始まった^{1),2)}（図 1.1 参照）。この世界初の鉄橋は支間長 100 ft のアーチ構造で、炭素が多く含まれた**鑄鉄**（Cast Iron）を 300 トン使用した。これ以後、18 世紀末までに、欧州諸国でも鉄橋の建設が行われた³⁾。



図 1.1 アイアンブリッジ（1779 年，英国）

1.1.2 鑄鉄から錬鉄へ

1830 年のマンチェスター・リバプール鉄道の完成以後、鉄道建設は英国および、その他の欧州諸国で急速に進み、橋梁などに鉄を使用した構造物の需要をもたらした。鉄道建設の本格化したがつて、大量の鉄橋が架設されるが、型に流し込んだだけの鑄鉄の構造材料としての問題は、1847 年に英国北西部で発生した、テイ川の**鉄道橋**（Railway Bridge）の落橋事故で顕在化した⁴⁾。

列車の通過中に、鑄鉄部材の**ぜい性破壊**（Brittle Fracture）によって落橋が起こり、死者 5 名を出

す惨事となった。この事故をきっかけに、1849年に鉄道橋主要部材における鑄鉄の使用は禁止され、炭素量が小さく純鉄に近い**錬鉄** (Wrought Iron) が一般的に使用されるようになった。

錬鉄箱桁として有名なのが、1849年に開通した**図 1.2**に示すコンウェイ鉄道橋がある。この錬鉄製の箱形管状橋はスティーブソンにより設計された歴史遺産であり、鉄板をリベット接合して集成した**薄肉補剛構造** (Thin-walled Stiffening Structure) としては最も初期のものである。このような構造が成立した背景には、鉄材の加工技術と機械、設備の進歩がある。

最後期の錬鉄構造物の1つとして、パリのエッフェル塔がある (**図 1.3** 参照)。この塔は、ギュスタヴ・エッフェル (Gustave Eiffel 1832-1923) の会社によって1884年に設計されて1889年に完成した。材料には錬鉄が採用された。1886年に完成した自由の女神像も、やはりエッフェル社によって設計された錬鉄構造である。

1.1.3 わが国への鉄構造の導入

製鉄技術の発展に伴って、19世紀前半に欧米諸国で着実に実績を積んだ鉄材の構造物への適用技術は、この世紀の半ば頃から鉄道建設を通じて、アジア、中東などの非欧米諸国へ伝播が始まった。

1850年代に、伊豆韮山および、薩摩、佐賀、長州、水戸の各藩では、反射炉の建設が行われた。1856年に長崎では、オランダの指導によって**造船所** (Shipyard) が建設された。1864年には、横須賀にフランスの指導によって造船所が建設され、明治になって完成した。当時の先進技術である鉄船の建造技術は、鋼構造物建造につながった。

橋梁は明治年間を通じて、欧米から輸入されて架設されたものが多数を占めたが、1880年頃より国内で設計、製作する動きも出てきた。1878年には、支間長15.8mのボーストリングトラス形式の**弾正橋**が、工部省赤羽製作所で製作されて架設された。現在、旧弾正橋は移設され、八幡橋 (人道橋) として供用されている (**図 1.4** 参照)。この後、国産化は次第に進み、鉄道橋では、1910



図 1.2 コンウェイ鉄道橋 (1849年, 英国)



図 1.3 エッフェル塔 (1889年, フランス)



図 1.4 八幡橋 (旧弾正橋 1878年)

年頃をもって輸入橋に終止符が打たれた⁵⁾。鉄骨建築（Steel Building）構造では、鉄道寮新橋工場の建屋は、鑄鉄、錬鉄の柱（Colum）、梁（Beam）を用いた最も初期の鉄骨構造であった。1890年以降になって、次々と建設されたレンガ造の官庁の建築物では、防火床構造やピン接合のトラス構造の屋根に鉄が使用された。海軍省庁舎（1894年）、司法省（1895年）、日本銀行本店（1896年）、東京商工会議所（1899年）などがこれらの例である。

1.1.4 鋼の出現

(1) 製鋼法の発明

1830年代に入ると製鉄技術では、冷風の代わりに熱風を高炉に吹き込む方法が英国で開発され、19世紀の中頃には一般化した。これによって、高炉（Blast Furnace）の効率が上がり、規模が拡大して製鉄技術が著しく向上した。表 1.1 に鑄鉄、錬鉄、鋼（Steel）の炭素量と強度の関係を示す³⁾。鋼は炭素（Carbon）量を鑄鉄よりも少なく、錬鉄よりも多くなるようにして、圧縮強度（Compressive Strength）および引張強度（Tensile Strength）をともに高めたものであり、構造物に最も適している。

溶鉄中の炭素は、吹き込まれた空気により酸化除去され、鉄は炭素量を減少させて鋼へとその性質を変えることができるようになった。この転炉法の発明によって、一般に軟鋼（Mild Steel）と呼ばれる鋼の生産は、在来の錬鉄の生産に比べて格段に効率が上がり、大量生産されるようになった（図 1.5 参照）。

鋼が錬鉄の生産量を超えたのは、ほぼ1880年代半ばで、その後19世紀末の約10数年間には、鉄鋼生産の首位の座は、欧州からアメリカに移った。

(2) 初期の鋼構造物

製鉄産業の急速な発展を遂げつつあったアメリカでは、構造材料としての鋼の使用は早かった。

1883年に完成したニューヨークの吊橋（Suspension Bridge）であるブルックリン橋に、14700トンの鋼が使用されており、この中には、亜鉛めっき（Zinc Plating）被覆の鋼ワイヤロープ（Wire Rope）が含まれる（図 1.6 参照）。

表 1.1 鑄鉄、錬鉄、鋼の炭素量と強度³⁾

項目	炭素含有量 [%]	圧縮強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]
鑄鉄	2.5-4.5	400-1000	100-150
錬鉄	0.02-0.05	250-400	250-400
鋼	0.05-1.2	350-700	350-700

鑄鉄の材料を銑鉄と呼ぶ。錬鉄は工業用純鉄である

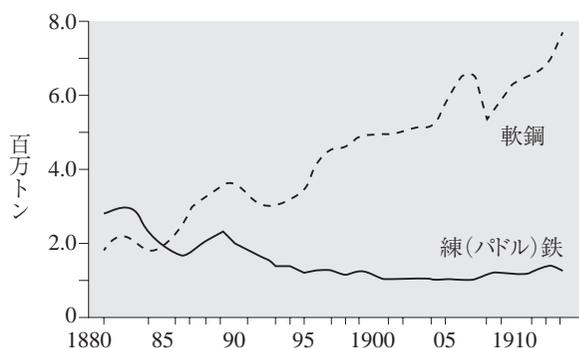


図 1.5 錬鉄と鋼の生産量 (英国) ³⁾

一方、1890年に完成した英国のフォース鉄道橋は、橋脚から両側に張出した、**カンチレバートラス橋**（Cantilever Truss Bridge）で、鋼重51000トンの本格的な鋼構造物を代表するものである⁴⁾（**図1.7**参照）。

わが国では、1888～1889年に完成した東海道線の天竜川、大井川、富士川橋梁が、鋼と錬鉄混用の構造物で、部材を三角形に組み合わせた200ftの**トラス構造**（Truss Structure）である。

表1.2に錬鉄から鋼への過渡期の構造物について年表で示す。1890年以降は鋼構造物が主流になっていることがわかる¹⁾。



図1.6 ブルックリン橋（1883年，アメリカ）



図1.7 フォース鉄道橋（1890年，英国）

表1.2 錬鉄から鋼への過渡期の構造物および鋼材¹⁾

名称 (国)	1865	1870	1880	1890	1900	1910
旧テイ橋 (英)			----- '78 錬鉄 [1879年落橋]			
自由の女神像 (仏)			----- '86 錬鉄			
エッフェル塔 (仏)			----- '89 錬鉄			
イーズ橋 (米)			----- '74 鋼・錬鉄 [橋梁への鋼の最初の適用]			
天竜川橋梁他 (日)			----- '89 錬鉄・鋼 [日本初の鋼橋]			
ブルックリン吊橋 (米)			----- '83 鋼 [14700トン，本格的鋼橋]			
ホームインシュアテンスビル (米)			----- '85 鋼 [ロールI形鋼使用]			
新テイ橋 (英)			----- '88 鋼 [26000トン]			
フォース橋 (英)			----- '90 鋼 [51000トン本格的鋼橋]			
秀英社工場 (日)			鋼 (仏材) ----- '94 [日本初の鋼建築]			

注1) ----- 線は建設時期を示す

1.1.5 鋼構造物の発展

(1) わが国の鉄鋼技術のあゆみ^{5),6)}

わが国の製鉄産業は、1901年の八幡製鉄所（Steel Works）の創業とともに開始された。10年後の1911年には生産35万トン体制となった。この頃より八幡製鉄所は造船の他鉄道、建築、橋梁などへ鋼材の供給を順次進めていった。

民間においても製鉄所設立の動きが出てきた。住友鑄鋼所、日本製鋼所、川崎造船所、神戸製鋼所および日本鋼管が鋼材の生産を開始し、ほぼこの頃をもって今日の製鉄産業の基礎が確立された。

わが国の鉄鋼生産は、戦前では1940年をピークに下降に転じ、第二次世界大戦でほぼ壊滅的な打撃を受けたが、戦後まもなく復興を遂げ、1955年頃には、粗鋼生産が1000万トンに達した。

構造用鋼材では、関東大震災復興事業として建設された永代橋（図 1.8）や清洲橋（図 1.9）などの道路橋に、50 キロ（ 500 N/mm^2 ）級鋼の高張力鋼（High Tensile Steel）が使用された⁷⁾。加工・組立てにおいては、リベット（Rivet）と呼ばれる、^{びょう}鉋が用いられていたが、その後鋼材を溶融して接合する溶接（Welding）工法が1950年代半ば頃より一般化した。また、溶接性を考慮した溶接構造用圧延鋼材（Rolled Steel）SM41は、1952年にJIS化された。その後、1959年には高張力鋼SM50が、1966年には、SM50Y、SM53、SM58がJIS化された。

1974年には、70、80キロ鋼の高張力鋼を大量に使用した、図 1.10 に示す港大橋が建設された⁸⁾。本州四国連絡橋公団では1978年に高張力鋼の本格的な使用を前提として基準が制定された。

一方、鉄鋼材料とともに、塗料（Paint）も機械、船舶、機関車などの製品と並んで、鋼構造物の発展のために不可欠の材料であった。塗料は、1877年以前まで国内で生産ができず、全面的に欧米からの輸入に頼っていた。わが国で塗料の工業生産が開始されたのは1881年からである。

1920年代に合成樹脂塗料（Synthetic Resin Paint）が開発されると、国内でもフェノール樹脂塗料（Phenolic Resin Paint）、フタル酸樹脂塗料（Phthalate Resin Paint）の生産が行われ、塗装方法もエア式スプレーガン（Air Spray Gun）が国産されて施工された。1950年代から、ブラスト処理（Blasting Process）が一般化し、合成樹脂系塗料の開発が進んで、1960年代から重防食塗装（Heavy Corrosion Protection Coating）系が海上橋を中心に実用化された。

(2) 鋼橋の発展

20世紀の橋梁技術は、長大化と多様化の時代となる。長大化を可能とした要因の1つは、ケーブル



図 1.8 永代橋（1925年）



図 1.9 清洲橋（1928年）



図 1.10 港大橋（1974年）

ルを用いた**吊形式構造**（Cable Supported Structure）による長支間化が挙げられる。吊橋は19世紀末に架設されたブルックリン橋の建設以降発展を続け、鋼材の高強度化、建設機械の高性能化、設計技術の高度化などによって規模の拡大を図り、**図 1.11** に示すゴールデン・ゲート橋などの長大橋時代が到来した。

また、タコマ・ナロウズ吊橋の落橋をきっかけとした**耐風安定性技術**（Wind Resistant and Stable Technology）の発展により、1966年に支間長988mの**流線型箱桁**（Streamlined Box Girder）断面のセバーン吊橋が英国で完成し、また、1981年に支間長1410mのハンバー吊橋が完成している（**図 1.12**）。

わが国の本格的な吊橋は1962年に完成した支間長367mの若戸大橋（北九州）から始まった。その後、関門橋が1973年に完成して支間長は712mと倍増した。1988年に完成した南備讃瀬戸大橋の支間長は1100mである。**図 1.13** に示す支間長1991mの明石海峡大橋は1998年に完成しており、世界最長支間長を誇っていたが、2022年にトルコで支間長2023mの1915チャナッカレ橋が完成しており、現在最長支間長である。

戦後になって、高張力鋼の採用と**鋼床版**（Orthotropic Steel Deck）と箱桁が組み合わされることによって、支間長を延ばすとともに複雑な道路線形にも対応できるようになった。わが国では、鋼床版桁は1960年の城ヶ島大橋の完成以来、数多く建設されてきた。**格子桁**（Grillage Girder）や**合成桁**



図 1.11 ゴールデン・ゲート橋（1937年）



図 1.12 ハンバー吊橋（1981年）



図 1.13 明石海峡大橋（1998年）



図 1.14 多々羅大橋（1998年）

(Composite Girder) も一般的な構造として建設された。

アーチ橋 (Arch Bridge) では、**腹材 (Web Member)** にケーブルを用いた**ニールセンローゼ橋 (Nielsen Rose Bridge)** も、1960年代後半から建設されるようになった形式であり、構造の多様化の傾向を構成している。

斜張橋 (Cable-stayed Bridge) は西ドイツや東欧で20世紀中頃以降に建設され始めた。デュセルドルフのライン川には、1957年に支間長260mのテオドル・ホイス橋が架けられ、以後数多くの斜張橋が建設された。わが国では、1966年に建設された摩耶大橋が、本格的な斜張橋であった。最近の支間長増加はめざましく、上海の楊浦大橋 (602m)、鶴見つばさ橋 (510m)、フランスのノルマンディー橋 (856m) などが完成しており、本州四国連絡橋の多々羅大橋 (890m) が1998年に完成し、建設当時世界最長支間の斜張橋となっている (図 1.14)。2012年にロシアで支間長1104mのルースキー島連絡橋が完成し、現在最長支間長の斜張橋である。

1.2 鋼構造の種類

1.2.1 建築鉄骨

近年、図 1.15 に示すような、ドバイのブルジュハリファ (高さ800m) や上海センタービル (高さ632m) など、超高層ビルが建設されている。**ビル鉄骨 (Building Steel Frame)** は基本的に柱とはりから構成される**立体ラーメン構造 (Rigid-frame Structure)** であるが、超高層になるとトラス構造を併用するケースが多い。橋梁構造物は薄肉構造であるが、建築鉄骨は厚板が用いられている。また、一般的な建築鉄骨では軟鋼が用いられるが、超高層ビルでは高張力鋼が用いられる。

わが国は地震が多く**耐震設計 (Seismic Design)** 基準の厳しさもあり、鉄骨建築では2023年に完成した麻布台ヒルズ森 JP タワー (330m) が最も高く、次に2014年に完成したあべのハルカス (300m) などがある。



(a) ブルジュハリファ

(b) 上海センタービル

図 1.15 世界の超高層ビル

1.2.2 水圧鉄管

図 1.16 に示すような**水力発電 (Hydroelectric Power)** に用いられる**水圧鉄管 (Penstock)** では、一般に50～60キロ鋼が用いられるが、大容量で高落差の水圧鉄管では80キロ鋼が使用されている。

水圧鉄管においては、その規模を示す指標として設計水頭 H と鉄管内径 D の積、 $H \times D$ (m^2) を用いる。1970年代以降急激に規模が大型化し、 $4500 m^2$ のものがある。高張力鋼を用いることで鋼重軽減が可能であり、工場、架設現場での運搬に重要な材料となる。製造技術上、 $100 mm$ を超えるような板厚の鋼管を製作することは可能であるが、コストその他を考えれば軽量化を検討する必要がある。



図 1.16 水圧鉄管

1.2.3 水門

図 1.17 に示す水門 (Hydraulic Gate) は、河川または水路を横断して設けられる流水制御施設であり、堤防の機能を有するものである。門扉が堤防天端まで達し堤防を分断して設けられる水門は、河川の水位が高くなると閉じて水の進入を防ぐ目的で設けられる。河川を横断して門扉がある構造物には、水門と可動堰 (Movable Weir) がある。このうち、洪水時または高潮時に、ゲートを全閉することによって堤防の代わりとなるものが水門であり、ゲートを全閉せず流下させるものは堰と呼んでいる。



図 1.17 水門

また、ゲートには大別して、上下開閉式、回転ヒンジ式、その他の3種類があるが、図 1.17 のゲートは上下開閉式のホイール形式の「ローラーゲート」である。鋼製の扉体を垂直に上下させて開閉する。一方、図 1.18 は河川の河口付近の設けられる堰である。



図 1.18 河口堰

このように水門や堰に使用する鋼材は大半が軟鋼であり、高張力鋼の優位性があまり発揮できないことによる。河口堰には耐海水性鋼板も使用されている。

1.2.4 貯蔵タンク

(1) 球形ガスホルダー

図 1.19 に示すような高圧力の球形ガスホルダー (Gas Holder) には、高張力鋼が多用されている。100 キロ鋼も 1964 年にメタノールガス用球形ホルダーに用いられたのが、最初の事例といわれている。



図 1.19 球形ガスホルダー

(2) 石油タンク

わが国の石油タンク (Oil Tank) では、25000 m³ (直径 40 m) 程度までは軟鋼，それ以上では高張力鋼 (60 キロ鋼) が使われるのが多い。日本では高張力鋼を用いた大型タンクが多くなっている。

図 1.20 に示すような石油タンクなどでは、小型のものを除きタンク本体と基礎をアンカーで結合するという事はしないのが普通である。そのため、地震時に側板と底板隅角部近傍が浮き上がり、過大な応力が作用して、この部分が座屈や破断につながるようなことがある⁹⁾。



図 1.20 石油タンク

(3) LNG タンク

LNG は -162℃ で貯蔵される液化天然ガス (Liquefied Natural Gas) であり、直接内液を保持する内槽には、低温じん性に優れた 9%Ni 鋼 (SL9N590) が用いられる。これは、引張強さとしては 690 N/mm²，降伏点 (0.2% 耐力) として 590 N/mm² 以上が要求される高張力鋼である。



図 1.21 LNG タンク

LNG タンクには、地上式と地下式があり、地上式には内槽と外槽からなる二重殻タンクが通常使われる (図 1.21 参照)。内槽に保持された極低温液体が流出して、鋼製外槽や PC 外壁に直接衝撃的に接触しないようにするために、内槽のき裂伝播停止性能が重視される。本材料の特徴の 1 つは、継手は異材溶接継手となって、引張強度や耐力が低下することである。このような異材継手強度、鋼板・形鋼の大型化などが設計、施工上の課題とさ

れている。

近年、**液化水素** (Liquefied Hydrogen) 貯蔵タンクが開発されている。液化水素は -253°C の超極低温であり、液化設備や貯蔵設備など、さらなる課題が解決されてきている。

1.2.5 その他の構造物

上記以外の鋼構造物としては、**電波塔** (Radio Towers)、**送電鉄塔** (Power Transmission Towers)、**煙突** (Chimney)、**鉄塔支持型煙突** (Tower-supported Chimney) などが挙げられる。図 1.22 に示す東京スカイツリーは 634 m の電波塔であり、全ての鋼管部材を溶接接合している。

港湾構造物 (Port Structure) は、防波堤など外郭施設、岸壁などの係留施設、水底トンネルなどの臨港交通施設など多岐にわたる。また、石油や LNG 掘削用ジャケット (Drilling Jackets)、海上大型橋梁の鋼殻ケーソン (Steel Shell Caisson)、**海底沈埋トンネル** (Submarine Immersed Tunnel) などが挙げられる。

近年、地球温暖化防止、 CO_2 削減などが提言され、クリーンなエネルギーが求められる時代になってきている。そのため、図 1.23 に示すような風力発電設備や、太陽光発電設備の建設が目立ってきている。風力発電用の風車は支柱やナセルが鋼構造であり、ブレードは**繊維強化樹脂** (Fiber Reinforced Polymer : FRP) で製作されることが多い。特に大型になると、**ガラス繊維** (Glass Fiber) だけではなく**炭素繊維強化樹脂** (Carbon Fiber Reinforced Polymer : CFRP) を組み合わせて製作されている。近年は、環境、エネルギー関連設備開発が活発になってきており、鋼材、ステンレスのみならず、アルミニウム合金、マグネシウム合金、および FRP など種々の材料を用いた構造物の研究開発が行われている。



図 1.22 東京スカイツリー



図 1.23 風力発電設備

1.3 鋼構造の特徴

1.3.1 構造物の要求性能

構造物の建設に要求される基本性能は、力学的に安全性が確保されること、大量かつ容易に入手可能な材料から構成されること、製作や架設などの施工が容易であること、および長期にわたって品質が安定していることなどである。特に超高層ビルや長大橋などの大規模構造物では、**自重** (Dead Load) が支配的となり耐震性や耐風安定性が求められる。また、建設費用や維持管理費用を含めたライフサイクルコスト (Life Cycle Costs : LCC) を低減させることが求められる。基本設計における構造物の形式決定においては、これらの要求性能を満足させることが重要となる。

1.3.2 構造材料の種類と特徴

構造物に用いられる材料は、**土** (Soil)、**木** (Timber)、**石** (Stone)、**コンクリート** (Concrete)、**鋼** (Steel) などがある。鋼は**アルミニウム** (Aluminum)、**マグネシウム** (Magnesium)、**チタン** (Titanium) などの**金属材料** (Metal Materials) の一種である。近年ではガラス繊維や炭素繊維などを樹脂で積層して一体化させた FRP が、構造物に適用されるようになってきている。その他、建築構造物では強化ガラスが用いられるようになっており、公共構造物の付属物などにおいては、**プラスチック** (Plastic) の一種である**ポリカーボネート** (Polycarbonate) や**ポリプロピレン** (Polypropylene) などが適用されている。これらの材料の比重や強度を表 1.3 に比較する。

表 1.3 各種材料の比重と強度

材料		比重	強度 [N/mm ²]	弾性係数 [N/mm ²]
金属	鋼	7.9	400~800	2.0×10 ⁵
	アルミニウム合金	2.7	170~570	7.0×10 ⁴
	マグネシウム合金	1.8	270~300	4.5×10 ⁴
	チタン合金	4.5	300~450	1.1×10 ⁵
無機	コンクリート	2.3	20~80	3.0~4.0×10 ⁴
	強化ガラス	2.5	50~150	6.5×10 ⁴
	ガラス繊維強化樹脂	2.0	150~550	1.0~3.0×10 ⁴
	炭素繊維強化樹脂	1.7	500~2000	1.2~5.0×10 ⁵
有機	木材	0.4~1.2	16~65	0.6~1.1×10 ⁴
	ポリカーボネート	1.2	130~140	2.0~3.0×10 ⁴
	ポリプロピレン	0.9	30~40	2.2~3.0×10 ³

注1) 記載の数値は材料の種類や配合状況によって異なる

注2) コンクリート強度は圧縮を受ける場合を示している

1.3.3 鋼構造の長所と短所

鋼材を用いた構造物の長所は以下の通りである。

- (1) 自重が支配的となる長大構造物や高層建築物等では、軽量で高強度であるため有利となる
- (2) 耐震性が要求される構造物や軟弱地盤上の構造物では、軽量で高強度であるため有利となる
- (3) 鋼は伸びに富んだ材料であり、破断するまでの変形性能が高く、エネルギー吸収性能がよい
- (4) 板部材が座屈や変形が生じて、荷重の再配分などにより構造物全体の崩壊が免れることが多い
- (5) 品質が安定しており、均質である
- (6) 板厚、強度、耐候性など、構造に応じた材料の選択が可能である
- (7) 切断、孔あけ、曲げ加工が可能であり、種々の形状の構造物が設計可能である
- (8) 現場での接合が容易であり、急速施工が可能である
- (9) 部分的な補修、補強が容易である
- (10) 解体が容易で、材料のリサイクル性が高い

一方、鋼材を用いた構造物の短所は以下の通りである。

- (1) 圧縮を受けると座屈変形が生じやすい
- (2) 軽量化、長大化、高層化に伴って変形が大きくなりやすく、振動や騒音が生じる場合がある
- (3) 腐食劣化が生じやすく、屋外での使用では塗装などの防食対策が必要となる。そのため、維持管理費用が大きくなる
- (4) 材料費や製作費が高価であり、初期の建設費用がコンクリート構造物より高くなることが多い
- (5) 約 600℃で軟化するため、住宅などの建築では耐火被膜などの対策が必要である

1.4 本書の構成

第1章では、鋼構造の歴史、鋼構造の種類、鋼構造の特徴を述べているが、最後に本書の構成について説明する。鋼とコンクリートは建設構造物にとって最も一般的な材料であり、それぞれの特長を生かした建設構造物を設計、施工することが求められる。そのため、表 1.4 に示すような内容で本書を構成して、鋼構造の基礎から、設計や施工の実務に役立つような情報まで網羅的に詳述している。

表 1.4 本書の構成

章	タイトル	内容
第1章	総論	鋼構造の歴史, 鋼構造の種類, 鋼構造の特徴, 本書の構成
第2章	鋼材	鋼材の製造と加工, 鋼材の力学特性, 鋼材の種類と規格, 合金鋼, 非鉄金属材料
第3章	構造設計	作用, 設計・照査の法, 鋼橋の構造形式, 橋梁の構成
第4章	引張部材	引張力に対する照査, ケーブルの種類と設置法
第5章	圧縮部材	圧縮部材の座屈による事故, 柱の座屈, 無補剛板の座屈, 補剛板の座屈, 全体座屈と局部座屈の連成, 圧縮部材の設計
第6章	曲げ部材	曲げ耐力, せん断耐力, 曲げ部材の設計, たわみ, 振動
第7章	部材の接合	接合の概要, 溶接接合, 高力ボルト接合, その他の接合, 部材の連結
第8章	鋼桁構造	床版および床組, プレートガーダー橋, 箱桁橋, 連続桁橋, ゲルバー橋, 斜橋, 曲線橋, 少数主桁橋
第9章	合成・複合構造	複合構造, 合成桁橋, 合成床版, 合成柱, 混合構造
第10章	トラス, アーチ, ラーメン構造	トラス構造, アーチ構造, ラーメン構造
第11章	吊形式構造	吊形式構造の構造特性と解析法, 吊橋, 斜張橋, その他の吊形式構造
第12章	製作, 架設	工場製作, 現場架設, 製作, 架設における技術動向
第13章	維持管理	鋼構造物の損傷と維持管理, 防錆・防食, 腐食に対する補修・補強, 疲労に対する補修・補強, その他の損傷に対する対策

[章末問題]

問題 1.1

わが国で製作され、架設された橋梁で最も古いとされている八幡橋（旧弾正橋 1878 年）の特徴を調べて記載しなさい。

問題 1.2

鑄鉄、鍛鉄、鋼の炭素量と強度の違いを説明しなさい。

問題 1.3

鋼材の特徴について、誤っているものはどれか。また、その理由を述べなさい。

- (1) 鋼は伸びに富んだ材料であり、破断するまでの変形性能が高く、エネルギー吸収性能がよい
- (2) 板部材に座屈変形が生じた場合は、一気に崩壊に至るケースがほとんどであり、注意を要する
- (3) 軽量化、長大化、高層化に伴って変形が大きくなりやすく、振動や騒音が生じる場合がある
- (4) 材料費や製作費が高価であり、初期の建設費用がコンクリート構造物より高くなることが多い
- (5) 約 600℃ で軟化するため、住宅などの建築では耐火被膜などの対策が必要である

[参考文献]

- 1) 日本鋼構造協会編著：鋼構造技術総覧 [土木編]，技法堂出版，1998。

- 2) 大田孝二, 深沢誠: 橋と鋼, 建設図書, 2000.
- 3) 鋼材倶楽部市場開発部: **Steel Construction: Introduction to Design**, - 鑄鉄から錬鉄を経て鋼に至る鋼構造発展の歴史 -, CD-R, 2001.3
- 4) 五十畑弘: 19世紀橋梁界とテイ, フォース鉄道橋, 橋梁, Vol23, No.5-7, 1987.
- 5) 日本橋梁建設協会: 日本の橋 (改訂版), 朝倉書店, 1994.
- 6) 成瀬輝男編: 鉄の橋百選, 東京堂出版, 1994.
- 7) 坂井藤一: 土木鋼構造物における高張力鋼の利用, 日本鉄鋼協会講演文集, 材料とプロセス, Vol.6, No.2, 1993.
- 8) 笹戸松二, 松本忠夫, 河井章好: 港大橋の建設, 土木学会誌, Vol.59, No.7, 1974.
- 9) 坂井藤一: 液体貯槽の耐震設計研究に関する現状と課題, 土木学会論文集, No.362/I-4, 1985.

第2章 鋼材

鋼材は、強度が強いこと、加工しやすいこと、大量生産が容易で、安価であることから、その目的、用途に応じて、多種多様な材料が開発され、様々な工業製品、構造物に適用されている。この章では、鋼構造物に用いられる鋼材の性質とその設計に必要な力学的な特徴について学ぶ。また、維持管理においては、構造物の耐久性が求められ、鋼材よりも耐腐食性能に優れる、ステンレス鋼、アルミニウム合金、チタンなどの非鉄金属材料も適用されつつある。それらの基本的な性質についても紹介する。

2.1 鋼材の製造と加工

鉄は、天然にある鉄鉱石（ Fe_2O_3 など）から取り出されてつくられる。図 2.1 に、原料となる鉄鉱石から様々な鉄鋼製品がえられる流れの一例を示す。溶鉱炉（Smelting Furnace、高炉とも呼ばれる）では、鉄鉱石を、コークスを燃焼して発生する一酸化炭素（CO）により脱酸（還元）することで銑鉄（Pig Iron、4～5%の炭素を含み、硬くてもろい鉄）がえられる。高炉の底にたまった銑鉄は、取り出され、転炉（Converter）に運ばれる。転炉では、銑鉄に必要な合金元素や非金属物質が添加され、あるいは残留元素の量が制御され、様々な熱処理が行われることで鋼（Steel）がえられる。特に、高温の銑鉄に酸素を加え、炭素（C）を燃焼させることで、炭素量を適度に下げる制御は、鋼としての強度（Strength）、延性（Ductility）の性質を特徴づける重要な処理である。

製鋼炉には、鉄鉱石を原料として製鉄を行う転炉の他、平炉、電気炉の3種類がある。電気炉は鉄スクラップ（廃材）から鋼を製造するだけでなく、特殊鋼、合金鋼の製造にも用いられる。

製鋼炉で精錬された溶鋼は、インゴットケース（鋳型）に入れられ鋼塊にされる。インゴットケースで造塊された鋼は、分塊圧延機でスラブ（Slab）、ブルーム（Bloom）、ビレット（Billet）と呼ばれる鋼片に分塊され

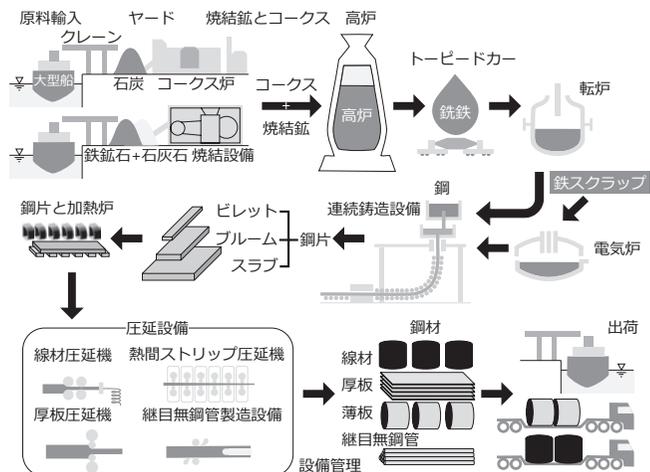


図 2.1 鉄鉱石から各種材料の鉄鋼製品ができるまで

る。それら名称は鋼片の形状と大きさで分類され、主にスラブから鋼板を、ビレットから棒鋼、線材を圧延機により**圧延** (Rolling) する。圧延によっても鋼材の性質は変化する。また、圧延には、高温で行う**熱間圧延** (Hot Rolling) と、常温に近い温度で行う**冷間圧延** (Cold Rolling) がある。熱間圧延では大きな加工ができ、経済的で、市場に出る圧延鋼材の多くは熱間圧延鋼材である。

連続鋳造法とは、インゴットケースで造塊せず、溶鋼から直接スラブ、ブルーム、ビレットなどの半製品をつくる方法である。わが国では通常の構造用鋼のほとんどがこの連続鋳造法により加工されている。

圧延された鋼板は必要に応じて**焼入れ** (Quenching)、**焼き戻し** (Tempering)、**焼きならし** (Normalizing) などの熱処理、**時効** (Aging) 処理が施される。鋼材の機械的性質は化学成分、熱処理、圧延などの履歴などにより決定される。表 2.1 に、鋼材の加工時の主な熱処理の方法と性質を示す。

図 2.2 に、主要 5 カ国および世界の粗鋼の生産高を示す。粗鋼とは、製鋼工程で生産される基本的な鉄鋼製品で、圧延等の加工前の段階の鋼材を指し、鉄鋼の生産量の指標などに用いられる。2000 年以降、中国の生産高が飛躍的に増加し、2023 年時点で、全世界の約半分の粗鋼の生産高を占めている。わが国は、2023 年時点で、中国、インドに次いで世界第 3 位の粗鋼の生産高 (8700 万トン) である。

2.2 鋼材の力学特性

2.2.1 鋼材の破壊

一般に、室温で鋼材の引張試験を行うと大きな伸びが生じて破断する。このような破壊を**延性破壊** (Ductile Fracture) という。同じ鋼材でも、例えば、低温下で引張試験を行うと、伸

表 2.1 鋼材の加工時の熱処理等の方法と性質¹⁾

焼入れ (Quenching)	鋼のオーステナイト相 (高温相) となる温度に加熱後、急冷する操作。急冷により内部の結晶構造がマルテンサイト相 (低温相) に変化し、硬度が上がる。焼入れ後は、硬度が上がる反面、もろくなる性質もある
焼き戻し (Tempering)	焼入れにより、硬くて脆くなった鋼を再加熱して、適度な温度で一定時間保持することで、硬度を下げて、じん性を向上させる操作。この処理で、焼入れ後のもろさを軽減し、所定の機械的性質に調整することができる
焼きならし (Normalizing)	焼入れ温度よりも低い温度で加熱し、空冷する操作。その目的は、加工前の影響を除去し、内部の結晶構造を微細化して、機械的性質を改善することにある
時効 (Aging)	急冷、冷間加工などの後、時間の経過に伴い、鋼の性質 (例えば硬さなど) が変化する現象。時効硬化を目的とした操作の意味で用いられることもある。焼入れ時効、ひずみ時効などがある

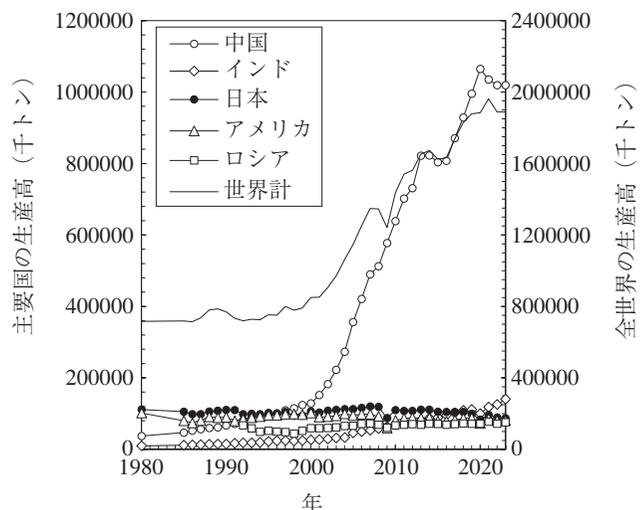


図 2.2 主要 5 カ国および世界の粗鋼の生産高²⁾

びは小さく、瞬時的に破壊する。このような破壊を**ぜい性破壊** (Brittle Fracture) という。また、それらの破壊が生じる荷重よりも小さい荷重が繰返し作用すると鋼材に**き裂** (Crack) が発生する。荷重がさらに繰返えされることでき裂が進展し、最終的に延性破壊またはぜい性破壊を生じることがある。これを**疲労破壊** (Fatigue Fracture) という。ここでは、鋼材の力学特性として、延性、じん性 (ぜい性)、疲労強度、**遅れ破壊** (Delayed Fracture) について学ぶ。なお、鋼材の疲労は、接合方法と関連性が高いため、第7章で詳しく取り扱う。

2.2.2 鋼材の延性と応力-ひずみ関係

(1) 鋼材の引張試験による力学特性

鋼材の延性の力学特性を調べるため、細長い鋼板や鋼棒の試験片を用いた引張試験が行われ、鋼材の**応力** (Stress) と**ひずみ** (Strain) の関係、降伏点、引張強度、伸び、絞り、ポアソン比などを得る。日本産業規格 (JIS) により、試験片の種類、形状 (JIS Z 2201 金属材料引張試験片) と試験方法 (JIS Z 2241 金属材料引張試験方法) が定められ、それにしたがって行われる。

図 2.3 に、鋼材の応力-ひずみ関係の模式図を示す。応力 σ_n とひずみ ε_n は、式 (2.1)、式 (2.2) で計算され、それぞれ**公称応力** (Nominal Stress)、**公称ひずみ** (Nominal Strain, 工学ひずみ) と呼ばれる。

$$\sigma_n = \frac{P}{A_0} \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_n = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.2)$$

ここで、 P は引張荷重、 A_0 は試験前の断面積、 l_0 は試験前の標点間距離 (試験片の2つの基準点間の距離)、 l は試験中の標点間距離、 Δl は試験による伸びである。

図 2.3 (b) より、応力を徐々に増加させると、応力とひずみは比例関係の挙動を示す。この関係を式 (2.3) に示す。

$$\sigma_n = E\varepsilon_n \quad (2.3)$$

ここで、比例定数 E を**弾性係数** (Elastic Modulus) または**ヤング率** (Young's Modulus) と呼ぶ。弾性

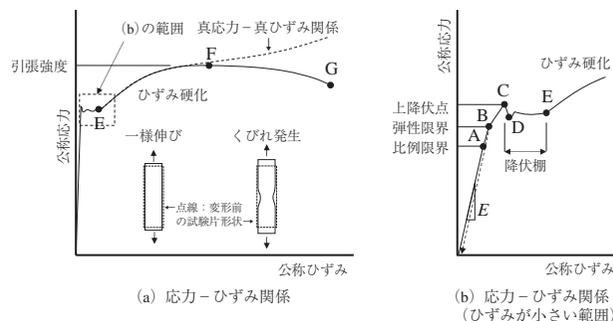


図 2.3 応力-ひずみ関係

係数 E は鋼の種類，引張強度によらず $E=2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 程度で，ほぼ一定であり，設計計算においてもこの値が一般に用いられる．式 (2.3) の関係は**フックの法則** (Hooke's Law) と呼ばれる．

さらに応力を増加させ，点 A に達すると，応力とひずみの比例関係が成立しなくなる．この点 A の応力を**比例限界** (Proportionality Limit) と呼ぶ．また，点 B から荷重を下げる (除荷する) と，破線の矢印のような挙動を示し，ひずみがゼロに戻らなくなる．この点 B の応力を**弾性限界** (Elastic Limit) と呼ぶ．

さらに応力を増加させると，応力は点 C の上限に達した後，急に下がり，点 D のように下限を示す挙動となる．この近傍では，応力はほぼ一定のまま，ひずみのみが増加する挙動となる．この一連の現象を**降伏** (Yielding) といい，点 C を**上降伏点**，点 D を**下降伏点** と呼ぶ．単に**降伏点** (Yield Point: YP) というときは上降伏点を指す．また，降伏点に相当する応力を**降伏応力** (Yielding Stress) あるいは**降伏強度** (Yielding Strength) と呼び，設計計算では重要な値となる．

また，降伏前の状態を**弾性** (Elastic)，降伏後の状態を**塑性** (Plastic) と呼ぶ．降伏点を過ぎ，応力はほぼ一定のままひずみのみが増加する領域を**降伏棚** (Yield Plateau) または**おどり場** と呼ぶ．

さらにひずみが増加し，点 E を過ぎると再び応力が増加しはじめる．この現象を**ひずみ硬化** (Strain Hardening) と呼ぶ．応力は，ひずみ硬化により非線形的に増加し，やがて点 F (最大応力) に達する．この点 F の公称応力を**引張強度** (引張強さ，Tensile Strength, Ultimate Strength: TS) といい，最大荷重 P_{\max} を試験前の断面積 A_0 で除して計算される．試験片は，最大応力あたりまでは，全体的に一樣に伸びる．最大応力を過ぎて応力が下がりはじめと，試験片の平行部の一箇所が細くなり，その箇所の伸びだけが進行する．これを**くびれ** (Necking) と呼ぶ．さらにくびれが進行すると点 G (破断点) で破断する．点 G の公称応力を**破断強さ** σ_b と呼び，破断時の荷重 P_b を試験前の断面積 A_0 で除して計算される．また，破断時のひずみを**伸び** (Elongation) と呼び，試験後に，破断した試験片を突き合せ，試験後の標点間距離 l_b を計測して，式 (2.2) で計算される．この時の伸びは，除荷により弾性ひずみがなくなるため，計測される破断時のひずみに比べてわずかに小さい．

試験片は，引張応力が作用する軸方向には伸び，それと直交する 2 つの方向には縮む性質がある．前者のひずみを縦ひずみ，後者のひずみを横ひずみと呼び，それらは引張試験で直交する 2 軸のひずみゲージを用いて容易に計測できる．縦ひずみ (ε_y) に対する横ひずみ ($\varepsilon_x, \varepsilon_z$) の比に負の符号を付けた次式

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \quad (2.4)$$

で求められる値を**ポアソン比** (Poisson's Ratio) と呼ぶ．一般に，鋼材のポアソン比は，弾性域で約 0.3，塑性域で約 0.5 の値である．

引張強度の大きい鋼材などでは，**図 2.4** に示すように，明確な降伏点を示さず，応力-ひずみ関係が徐々に比例関係からずれて非線形な挙動を示す．この場合，降伏点に相当する点として，0.2% に相当するひずみ (点 H) から初期の弾性係数で直線的に伸ばし，非線形挙動を示す応力-ひずみの関

係と交差した点Iで評価される。点Iの公称応力を**0.2% 耐力** (0.2% Proof Stress) と呼ぶ。また、後述するステンレス鋼材も明確な降伏点を示さない合金鋼である。建築構造物用ステンレス鋼材では、0.2% 耐力ではなく、0.1% 耐力を設計基準強度としている。

図 2.5 に、種々の鋼材の応力-ひずみ関係を示す。弾性域での弾性係数は、鋼材の引張強度に関係なく、同じであることがわかる。SM570 材では、明確な降伏点がないため、降伏点は0.2% 耐力を用いて評価される。引張強度の小さいSM400 材では、伸びは30% に達することから、鋼材には、伸びが大きい特性（延性）があるが、引張強度の大きい鋼材（例えばSM570 材）ほど、伸びは小さくなる。また、引張強度の小さい鋼材では、降伏後、ひずみ硬化による応力の増加が大きく、引張強度と降伏応力の比（これを**降伏比** (Yield Ratio: YR) と呼ぶ) が大きい。

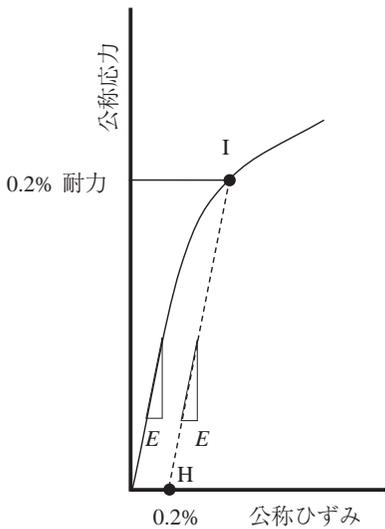


図 2.4 高強度鋼などの応力-ひずみ関係

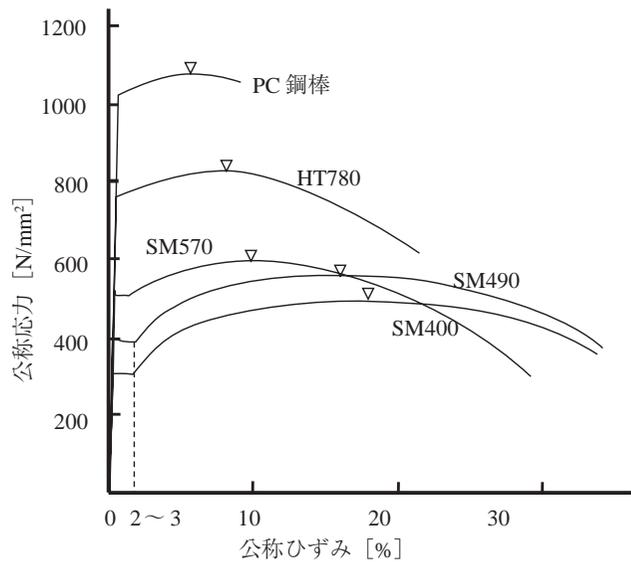


図 2.5 種々の鋼材の応力-ひずみ関係

(2) 圧縮時の力学特性と弾塑性の繰返し挙動

圧縮力を受ける鋼材の応力-ひずみ関係を実験により求めるのは一般に難しい。これは、鋼材が圧縮力を受けると、弾性領域において第5章で述べるような座屈が生じ、適切な応力-ひずみ関係を得ることができないためである。また、試験片を座屈が生じない短柱としても降伏点に達すると見かけ上、弾性係数が極めて小さくなり、不安定となるためである。そこで、圧縮側の応力-ひずみ関係は、図 2.6 に示すように、引張側を逆にした値が用いられる。

鋼材に繰返し荷重が作用する場合、荷重が弾性範囲内、つまり作用応力が比例限界（一般には、降伏点を限界として評価される）を超えなければ、荷重をゼロに戻すと、ひずみもゼロに戻る。さらに、降伏点を超える荷重を作用させた後、除荷した場合には、図 2.6 に示した履歴となる。例えば、点Aで除荷し、作用応力をゼロとすると、応力とひずみは直線的に減少して点Bに至る。点Bに残

鋼材は、引張応力の増加とともに軸方向に伸び、その直角方向に縮む（これを**ポアソン効果**と呼ぶことがある）ことから断面積が減少する。その断面積 A はポアソン比 ν を用いて、式 (2.5) で表される。



図 2.7 鋼材の引張試験の再現解析の一例

$$A = A_0(1 + \varepsilon_y)(1 + \varepsilon_z) = A_0(1 - \nu\varepsilon_x)^2 \quad (2.5)$$

真応力 σ_t は、引張荷重 P を式 (2.5) によるその時点の断面積 A で除すことで計算でき、式 (2.6) のように定義する。

$$\sigma_t = \frac{P}{A} \quad (2.6)$$

真ひずみ ε_t もその時点での長さ l を基準に定義すると、増分ひずみ $d\varepsilon_t$ は増分長さ dl を用いて式 (2.7) と定義される。

$$d\varepsilon_t = \frac{dl}{l} \quad (2.7)$$

初期長さを l_0 、その時点での長さ l までの真ひずみは、式 (2.7) を積分することで求められ、式 (2.8) が導出される。

$$\varepsilon_t = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (2.8)$$

ここに、 \ln は自然対数である。真ひずみは式 (2.8) より**対数ひずみ** (Logarithmic Strain) と呼ばれることもある。式 (2.8) を、 $l = l_0 + \Delta l$ の関係を用いて変形すると式 (2.9) が得られる。

$$\varepsilon_t = \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = \ln \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0} \right) = \ln(1 + \varepsilon_n) \quad (2.9)$$

したがって、真ひずみは、公称ひずみを式 (2.9) により変換して求めることができる。真応力は式 (2.6) に式 (2.5) を代入して求める。

公称ひずみは試験前の長さ l_0 を基準としたひずみ、真ひずみはその時点での長さ l を基準としたひずみであり、ひずみの定義が異なることに注意が必要である。

図 2.3 (a) に、真応力-真ひずみの関係を破線で併記している。真応力、真ひずみは、くびれが生じる断面で評価される。ひずみが小さい領域では、真応力-真ひずみ関係と公称応力-公称ひずみ関係とはほぼ同じであるが、ひずみが大きくなると、破線で示したように両者の差異は次第に大きくなる。くびれが生じると、真応力は、ポアソン効果によって小さくなる断面積 A を用いて計算されるため、増加する。一方、公称応力は、荷重前の断面積 A_0 を用いて計算されるため、荷重の低下とともに減少する。

鋼材の材料破壊を評価する場合、弾性から塑性に移行する**降伏条件** (Yield Condition) が用いられる。例えば、単純な引張問題では、降伏条件は降伏応力 σ_y である。実際の鋼構造物は、一般に、

種々の応力が生じた状態，いわゆる多軸応力状態であるため評価が難しい．そこで，それを一軸応力状態と等価に評価できるようにしたミーゼスの降伏条件（Mises Yield Criterion）が適用され，式(2.10)で与えられる．

$$\begin{aligned}\sigma_{eq} &= \sqrt{\frac{1}{2}\{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\}} \\ &= \sqrt{\frac{1}{2}\{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)\}}\end{aligned}\quad (2.10)$$

ここで， $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ は主応力， $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ は，着目する鋼部材の微小立方体の各方向に作用する応力成分である．この σ_{eq} は，多軸応力状態にある応力から計算される単軸応力に相当する量という意味で，**相当応力**（Equivalent Stress）とも呼ばれる． σ_{eq} が降伏応力 σ_Y に達しているかどうかで，降伏条件が評価される．

一般に，構造解析に用いる応力－ひずみ関係は，より簡便にモデル化したものが適用される．**図 2.8**に，応力－ひずみ関係の代表的なモデルを示す．降伏点までは応力とひずみは直線関係が仮定される．(a)は，降伏後のひずみ硬化を無視するものであり，**弾完全塑性モデル**または**完全弾塑性モデル**（Perfect Elasto-plastic Model）と呼ばれる．

(b)は，ひずみ硬化を直線で近似するものであり，**バイリニア型モデル**と呼ばれる．(c)は，ひずみ硬化部分を指数関数で近似する例である．この他に，多数の折れ線で近似するマルチリニア型などもある．**表 2.2**

に，繰返し塑性履歴を考慮した，発展的な材料モデルを示す．これらのモデルを利用できる汎用有限要素解析プログラムもあるが，別途，多くの材料パラメータの設定が必要な場合がある．

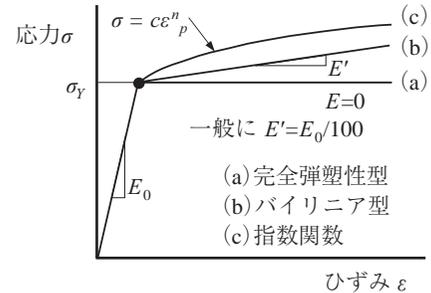


図 2.8 応力－ひずみ関係の代表的なモデル

表 2.2 繰返し塑性履歴を考慮した材料モデルの例

1 降伏曲面の移動範囲を表す境界曲面を用いたモデル	1) 二曲面モデルをベースにしたモデル	・修正二曲面モデル ³⁾ ・三曲面モデル ⁴⁾
	2) 単調載荷曲線をベースにしたモデル	・BMCモデル ⁵⁾ ・多軸マルチリニアモデル ⁶⁾
2 非線形移動硬化則モデル（背応力の非線形性を考慮）	・Armstrong-Frederick (A-F)モデル ⁷⁾ ・Chaboche-Rousselier (C-R)モデル ⁷⁾	—

2.2.3 じん性（衝撃強さ）

切欠きがある鋼材が低温で衝撃的な荷重を受けると，延性破壊とは異なり，塑性変形をほとんど伴わずに瞬時に破壊することがある．この破壊が生じるときの応力は，引張強度よりかなり小さい．この破壊形式を，冒頭で述べたように，**ぜい性破壊**（Brittle Fracture）と呼び，ぜい性破壊に耐えるねばり強さの性質を**じん性**（Fracture Toughness）と呼ぶ．じん性は，V字形切欠きのある試験片に衝撃

的な外力を加えるシャルピー衝撃試験（Charpy Impact Test, JIS Z 2242 金属材料のシャルピー衝撃試験方法）によって評価される。図 2.9 に、シャルピー衝撃試験方法を、図 2.10 にその結果の一例を示す。ぜい性破面率とは、試験片の破断面全体に占めるぜい性破面（ざらざらした面）の面積比である。図 2.10 より、破壊するのに要する吸収エネルギーとぜい性破面率は高い相関を示すことがわかる。

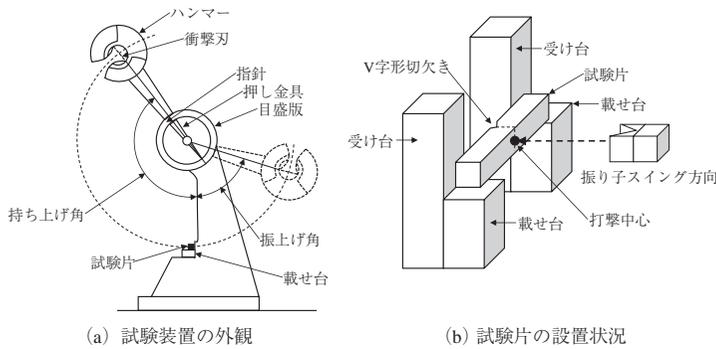


図 2.9 シャルピー衝撃試験方法

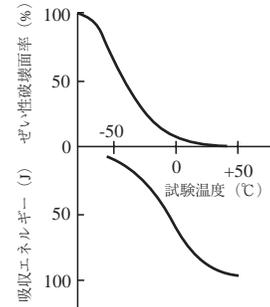


図 2.10 シャルピー衝撃試験結果の一例

鋼材のじん性は、後述する表 2.11 に示すように、所定の温度で、要求される吸収エネルギーを確保するように JIS で規定されている。例えば、寒冷地において、あるいは高張力鋼を溶接してつくられる鋼構造において、この規定はより厳しくなる。ぜい性破壊は、鋼構造物では、予期しない事故につながる危険な破壊様式の 1 つで、避けなければならない破壊形式である。図 2.11 に、橋梁のぜい性破壊の事例を示す。アメリカ・ウィスコンシン州のミルウォーキー川に架かるホーン橋では、2000 年 12 月 13 日に、鋼桁にき裂が発見され、破壊に近い状況であった。これは、鋼桁下フランジの接合部からき裂が発生し、短時間で腹板を貫通した破壊であった。原因は、溶接接合部が集中することで高い拘束力を受けたことによるものと分析されている。



(a) き裂発生箇所の外観

(b) ぜい性破壊した鋼桁の状況

図 2.11 橋梁のぜい性破壊の事例⁸⁾

2.2.4 疲労強度

(1) 疲労の分類と作用の特徴

繰返し応力を受ける鋼材は、2.2.1 で述べたように、静的な作用で破壊する引張強さより小さい応

力でも破壊する場合がある。これを**疲労破壊** (Fatigue Fracture) と呼ぶ。表 2.3 に、低サイクル疲労と高サイクル疲労の特徴を示す。繰返し数が 10 万回以下で生じる疲労破壊を低サイクル疲労、10 万回以上で生じる疲労破壊を高サイクル疲労と分類される。低サイクル疲労は、降伏応力以上で、少ない繰返し数で、き裂進展が速いことから、地震荷重、衝突荷重などの偶発的な作用に起因するものである。特に、10 回程度以下のひずみの繰返しにより破壊する場合を極低サイクル疲労と呼ぶ。一方、高サイクル疲労は、降伏応力以下で、多くの繰返し数で、き裂進展が遅いことから、活荷重や風荷重などのしばしば生じる変動作用に起因するものである。破壊性状は、巨視的には、き裂として、表面であれば外観からの目視等で、内部であれば非破壊検査等で観察される。微視的には、1 回の繰返しごとに、破壊の縞模様がその進行方向と直角方向に形成される。この縞模様は**ストライエーション** (Striation) と呼ばれ、破面を数百倍～数万倍に拡大することで観察される。一方、繰返し応力の大きさが変わると、き裂進展速度が変わり、ストライエーションに濃淡ができる。これが**ビーチマーク** (Beach Mark) として、高サイクル疲労におけるき裂進展を表す指標として、目視で観察される。ここでは、供用中に課題となる高サイクル疲労の基本事項について示す。

表 2.3 低サイクル疲労と高サイクル疲労の特徴

	低サイクル疲労	高サイクル疲労
作用応力	降伏応力以上	降伏応力以下
部材の変形	塑性変形を伴う	弾性変形が支配的
破壊面の状態	粗い	平坦
き裂進展速度	相対的に速い	相対的に遅い
破壊の繰返し数	10 万回以下	10 万回以上

高サイクル疲労による破壊は、鋼材に極めて小さいき裂の発生により生じる。その点は、高い応力集中を受けるため、そこが起点となってき裂が進展、伝播して、ぜい性破壊や断面減少に伴った延性破壊へとつながる。疲労破壊に耐える性質を**疲労強度**または**疲労強さ** (Fatigue Strength) と呼び、後述する**応力範囲** (Stress Range) で評価される。疲労強度は、多くの要因が関係するが、主要因を次に述べる。

(2) 作用応力の影響

繰返し作用する応力振幅が高いほど、疲労破壊に要する繰返し数は小さくなり、結果として疲労強度は小さくなる。図 2.12 に、繰返し応力の概念図を示す。最大応力 σ_{max} と最小応力 σ_{min} の差を応力範囲 $\Delta\sigma$ と呼び、この応力範囲が大きいほど、疲労強度は低下する。また、平均応力が高い場合、つまり引張応力下では、疲労に対して厳しい条件になる。一方、圧縮応力下では、き裂の進展は遅く、耐荷力への影響は小さい。

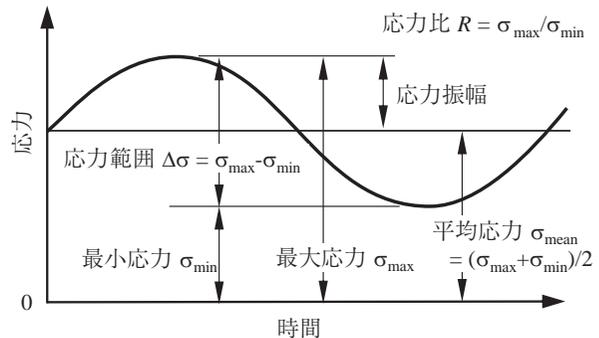


図 2.12 繰返し応力の概念図

図 2.13 に、応力範囲と繰返し数の関係を示す。この図は、一定の応力範囲で、応力範囲をパラ

メータとした疲労試験により得られる。応力範囲と疲労破壊時の繰返し数の関係を両対数目盛で表したもので、ばらつきはあるものの、両者はほぼ直線関係にある。この図を **S-N 関係** (線図, 曲線), S-N Curve と呼ぶ。いくら繰返しても疲労破壊しないときの応力範囲の最大値を **疲労限 (度)**

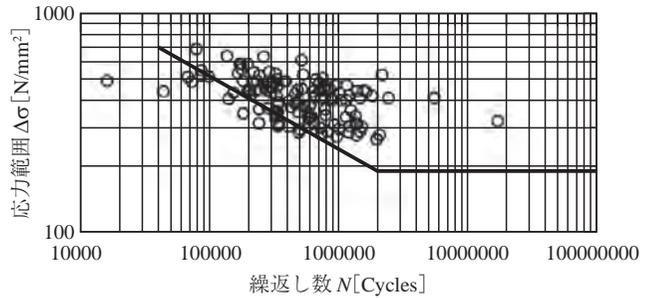


図 2.13 応力範囲と繰返し数の関係の一例⁹⁾

(Fatigue Limit) と呼び、その目安として 1000 万回とすることがある。また、疲労設計では、200 万回の繰返し数における応力範囲を、その鋼材の疲労強度として用いられる。

(3) 形状の影響

応力集中を強く受ける部位ほど、疲労強度は小さくなる。き裂の先端 (Crack Tip) では、**線形破壊力学** (Linear Fracture Mechanics) において応力が無限大となり、疲労の影響を最も強く受ける。また、**切欠き** (Notch)、部材同士の接合部、隅角部などでは、高い応力集中を受けるため、疲労設計では留意が必要である。また、外形だけではなく、鋼材の内部や表面の形状 (溶接接合部の内部欠陥、止端形状) の影響も強く受け、形状の変化が大きいほど、疲労強度は小さくなる。これらについては **第 7 章** で学ぶ。

(4) 材料特性の影響

鋼材は、後述するように、用途に応じた様々な鋼種があり、降伏応力、引張強度が異なる。一般に、平滑材 (熱の影響や表面・内部にきずがない鋼材) では、降伏応力が高い鋼材ほど、疲労強度は高くなる。

また、溶接接合では、部分的に溶融する温度まで上昇した後、常温まで下がることで、鋼材に内部応力が発生することがある。これを **残留応力** (Residual Stress) と呼ぶ。残留応力は、内部の自己つり合い力であるが、残留応力が大きい場合、溶接後に残留ひずみや残留変形が生じることもある。残留応力は、鋼材の降伏応力に匹敵する応力に達する場合があります。応力範囲や平均応力が小さくても、疲労強度の低下の要因になる。溶接による残留応力の影響は、高強度の鋼材ほど大きいため、溶接継手の疲労強度は、一般に、鋼材の強度に依存しない。溶接継手の具体的な疲労強度は **第 7 章** で取り扱う。

2.2.5 遅れ破壊

遅れ破壊 (Delayed Fracture) は、鋼材に応力が持続して作用しているとき、作用応力が引張強さより小さい場合でも、ある時間が経過した後、突然、ぜい性的に破壊する現象である。全ての鋼材で生

じる現象ではなく、条件がそろったときに生じる。鋼材の引張強さが 1000 N/mm^2 以上で、何らかの要因で鋼材の内部に水素が存在し、そのぜい化による割れが主な要因とされる。わが国では、高強度の鋼材として、遅れ破壊が生じやすい材質であった F11T の高力ボルトや、防錆対策が不十分な状態で PC 鋼棒が使われた時期があり、それらの鋼部材に遅れ破壊が発生して問題になっている。また、水素ぜい化は、環境にも左右され、腐食生成物が生じやすい、水中や海岸工業地域などではこの傾向が強いとされる。その後の設計・施工への対応として、道路橋示方書・同解説¹⁰⁾には、素材、ねじ形状が見直された超高力ボルト S14T が追加された。また、PC 鋼棒を含む PC 鋼材は、予め工場での鋼材に後硬化型の樹脂が塗布され、シーラに包まれた状態（プレグラウト）としているため、現場でのグラウト作業が不要となっている。

2.3 鋼材の種類と規格

2.3.1 鉄鋼材料の分類

鋼構造物には、鋼板、鋼管、形鋼、ワイヤケーブルなどの様々な鋼材が用いられる。それらの形状、力学特性、化学成分などは JIS で規定される。JIS に規定される鉄鋼材料は、表 2.4 のように分類され、鋼と鉄に大別される。以下では、鋼構造物で多用される普通鋼、特殊鋼について述べる。

普通鋼は、**炭素鋼**（Carbon Steel）とも呼ばれ、鉄に炭素（C）、ケイ素（Si）、マンガン（Mn）、リン（P）、硫黄（S）の 5 元素を含むものを指す。炭素鋼には、後述する一般構造用圧延鋼材

（SS）、溶接構造用圧延鋼材（SM）などがある。表 2.5 に、炭素鋼製品の形状、用途による分類を示す。

特殊鋼は、炭素鋼に、種々の合金元素を添加することで、特殊な性質を有するようになったもの指す。特殊鋼のうち、調質（焼入れ、焼戻し）をして使うものを構造用合金鋼鋼材という。さらに、工具、特殊な用途に使うものをそれぞれ、工具鋼鋼材、特殊用途鋼鋼材という。構造用合金鋼鋼材には、機械構造用炭素鋼鋼材（S-C 材）、ステンレス鋼鋼材（SUS）などがある。

表 2.4 JIS に規定される鉄鋼材料の分類¹⁾

大別	中別	小別
鋼	普通鋼（炭素鋼）	圧延鋼材
		構造用合金鋼鋼材
	特殊鋼	工具鋼鋼材
		特殊用途鋼鋼材
		炭素鋼鋳鋼品
	鋳鋼	構造用合金鋼鋳鋼品
		特殊用途鋼鋳鋼品
		炭素鋼鍛鋼品
	鍛鋼	構造用合金鋼鍛鋼品
		ねずみ鋳鉄品
鉄	鋳鉄	球状黒鉛鋳鉄品
		可鍛鋳鉄品

表 2.5 炭素鋼製品の形状、用途による分類¹⁾

形状による分類	用途別の分類
棒鋼、形鋼、鋼板、鋼帯	構造用、一般加工用、圧力容器用、土木・建築用、鉄道用
鋼管	配管用鋼管、熱伝達用鋼管、構造用鋼管、特殊用途鋼管、合金管
線材	線材二次製品

炭素鋼は、炭素含有量に応じて低炭素鋼 ($C < 0.3\%$)、中炭素鋼 ($0.3 < C < 0.5\%$)、高炭素鋼 ($0.5\% < C$) に分類される。炭素含有量が多いほど、固くて強くなるが、伸びは小さくなる。低炭素鋼は、主に棒鋼、形鋼、鋼板、鋼帯として一般構造用圧延鋼材 (SS)、溶接構造用圧延鋼材 (SM) に用いられる。中・高炭素鋼は、主に機械構造用炭素鋼鋼材 (S-C 材) として用いられる。

表 2.6 に、鋼材に対する合金元素の特徴を示す。各合金元素の組合せの影響で性質が変わるため、役割は単純ではないが、各合金元素の鋼材に対する影響の理解の参考とされたい。

2.3.2 構造用鋼

表 2.7 に、構造用鋼の JIS による分類と記号を示す。冒頭で述べたように、構造用鋼だけでも多くの種類がある。ここでは、鋼構造物に主に適用される、一般構造用圧延鋼材 (SS)、溶接構造用圧延

表 2.6 鋼材に対する合金元素の特徴^{1),11)}

元素	特徴
C	鋼の基本合金元素。C 量の増加とともに引張強さを増す。また Cr, Mo, V, Fe と炭化物を作り強度を増す。しかし、C 量の増加は溶接性を損ねる。鋳鉄では融点を下げる重要元素
Si	鋼の脱酸剤として有力であり、またフェライト相 (911℃ 以下の温度領域にある鉄の組織) を強くする。Si は鋼塊の偏析と熱間加工材の方向性を増す。Si < 0.1% の溶鋼を真空炭素脱酸すると、鋼のじん性と等方性が著しく改善される
Mn	鋼の脱酸剤として有力で、焼入れ性を増す。それにより強度、じん性が向上する。廉価であるので有用な元素
P, S	じん性を害し、また偏析を起こしやすい。有害な不純物。しかし、精錬法の進歩 (炉内での 2 回スラグ法、炉外でのとりべ精錬法) により、これらを 0.01% 以下にすることは容易である
Ni	焼入れ性を増し、低温じん性を向上させる
Cr	焼入れ性、焼き戻し抵抗性を大きくし、耐食性を増す。しかし Ni-Cr 鋼は焼き戻しによるぜい化が著しい
Mo	焼入れ性を増し、また Cr と安定な複炭化物を作って焼き戻し抵抗性を増大する。Ni-Cr 鋼の焼き戻し脆化を防ぐ。構造用鋼にとって必須の元素であるが、高価である
V	0.3% までの添加では焼入れ性と焼戻し抵抗性を増し、結晶粒を微細にする。V は溶接性を損ねる
Cu	強度を増すが、熱間加工性、溶接性を損ねるので、構造用鋼では積極的に添加しない
Al, Ti	強力な脱酸剤で、結晶粒を微細にすることにより衝撃遷移温度 ^{注1)} を低下させる
Ca	強力な脱酸剤で、また酸化物系金属介在物の形態と分布に影響することによって、異方性の軽減とじん性の改善に寄与する。Ca は被削性を向上させる
As, Sn, Sb	微量でもじん性を著しく害し、また精錬によって除去しにくいいため、高級鋼では、原材料を精選して、これらの元素量を最小にする
Nb	結晶粒を微細化する
Te, Se, Pb	鋼の被削性を増す (< 0.05% の S も同様)
O	鋼中の欠陥の原因となり、じん性を害する。最近は精錬法 (真空処理を含む) の進歩により、O は 50ppm 以下にできるのでその影響は著しく減少した
N	Al, V, Ti, Nb などと結合して、結晶粒を微細にする
H	いわゆる水素割れ (Hydrogen Cracking, 往時の白点を含む) ^{注2)} を起こす。真空処理の発達により 1ppm 以下に減ったが、鋼種によっては、なお水素割れ発生の危険がある

注 1) シャルピー衝撃試験で、破壊形式がぜい性と延性に遷移するときの指標となる温度

注 2) 鋼材が水素を吸収することで脆くなり、割れが生じる現象。13.1.1 (5) 参照

鋼材 (SM), 溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材 (SMA), 建築構造用圧延鋼材 (SN) の特徴を説明する。また, 薄板, 形鋼について述べる。さらに, 最近, JIS に規定された橋梁用高降伏点鋼板 (SBHS) については, 高性能鋼として紹介する。

表 2.7 主な構造用鋼の種類と記号¹⁾

JIS No. (制定年)	種別	記号
G 3101 (1952)	一般構造用圧延鋼材	SS
G 3104 (1953)	リベット用丸鋼 (廃止規格)	SV
G 3105 (1953)	チェーン用丸鋼	SBC
G 3106 (1952)	溶接構造用圧延鋼材	SM
G 3108 (1972)	みがき棒鋼用一般鋼材	SGD
G 3109 (1971)	PC 鋼棒	SBPR
G 3111 (1956)	再生鋼材	SRB
G 3112 (1964)	鉄筋コンクリート用棒鋼	SR, SD
G 3114 (1968)	溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材	SMA
G 3117 (1969)	鉄筋コンクリート用再生棒鋼	SRR, SDR
G 3123 (1955)	みがき棒鋼	SGD
G 3125 (1971)	高耐候性圧延鋼材	SPA-H, SPA-C
G 3128 (1983)	溶接構造用高降伏点鋼板	SHY
G 3129 (1988)	鉄塔用高張力鋼鋼材	SH
G 3136 (1994)	建築構造用圧延鋼材	SN
G 3137 (1994)	細径異形 PC 鋼棒	SBPDN, SBPDL
G 3138 (1996)	建築構造用圧延棒鋼	SNR
G 3140 (2008)	橋梁用高降伏点鋼板	SBHS
G 3192 (1954)	熱間圧延形鋼の形状, 寸法, 質量及びその許容差	-
G 3350 (1987)	一般構造用軽量形鋼	SSC
G 3353 (1990)	一般構造用溶接軽量 H 形鋼	SWH

(1) 一般構造用圧延鋼材 (JIS G 3101 : 1952, SS 材)

一般構造用圧延鋼材は, 構造用鋼の中で最も大量生産され, 土木, 建築, 橋, 船舶, 車両, その他の構造部材などに, 多く用いられる鋼材である。一般に, SS 材と呼ばれ, JIS 記号では, SS の後に引張強度の最小規格値が示される。例えば, SS400 は, 引張強度として最低 400 N/mm^2 を保証する鋼材である。

表 2.8 に, 一般構造用圧延鋼材の種類の記事および化学成分を示す。JIS では, SS330, SS400, SS490, SS540 の 4 種類が規定されるが, 一般に市場で入手可能な鋼種は SS400 であり, 単に SS 材という場合, SS400 を指す。化学成分は, SS540 では C, Mn が規定され, SS330, SS400, SS490 では P, S のみが規定される。したがって, SS 材は, 降伏点, 引張強度のみが保証される鋼種であり, 溶接性 (溶接に対する適性) は考慮されない。

表 2.8 一般構造用圧延鋼材の種類の記事および化学成分 [wt.%] ¹⁾

種類の記事	C	Mn	P	S
SS 330	-	-	0.050 以下	0.050 以下
SS 400				
SS 490				
SS 540	0.30 以下	1.60 以下	0.040 以下	0.040 以下

wt. % : 質量パーセント濃度, 質量に対する含有率 (%) を指す. 以下同様

表 2.9 に, 一般構造用圧延鋼材の機械的性質を示す. 例えば, SS400 の機械的性質は, 板厚 16 mm 以下の場合, 降伏点 245 N/mm^2 以上, 引張強さ $400 \sim 510 \text{ N/mm}^2$ である.

表 2.9 一般構造用圧延鋼材の機械的性質 ²⁾

種類の記事	降伏点または耐力 [N/mm^2]			引張強さ [N/mm^2]	伸び ^{注1)} [%]	曲げ性 ^{注2)} 曲げ角度 の鋼板
	鋼材の厚さ [mm]					
	16 以下	16 を超え 40 以下	40 を超え るもの	16 ~ 50 mm の鋼板	曲げ角度	
SS 330	205 以上	195 以上	175 以上	330 ~ 430	26 以上	180 [°]
SS 400	245 以上	235 以上	215 以上	400 ~ 510	21 以上	180 [°]
SS 490	285 以上	275 以上	255 以上	490 ~ 610	19 以上	180 [°]
SS 540	400 以上	390 以上	-	540 以上	17 以上	180 [°]

注1) 伸びは形状・寸法により異なるため, 詳細は JIS G 3101 を参照のこと

注2) 曲げ性は, 曲げ試験 (JIS Z 2248) で, 曲げ加工により割れやひびが生じないことを確認するもので, その角度までの性能が要求される (180° は折り曲げた状態)

(2) 溶接構造用圧延鋼材 (JIS G 3106 : 1952, SM 材)

溶接構造用圧延鋼材は, 一般構造用圧延鋼材より, 溶接性を確保するために C 量に上限を設けて規格化された鋼材であり, SM 材と呼ばれる. SM 材は, SS 材に次いで多く使用される鋼種で, 多くの分野で多用されている. 表 2.10 に, 溶接構造用圧延鋼材の種類の記事および化学成分を示す. SM400A から SM570 まで 11 種類あり, 化学成分は, C, Si, Mn, P, S の上限値が規定される. SM400A を除き, C は 0.2% 以下である. 表 2.11 に, 降伏点, 引張強さ, 伸び, シャルピー吸収エネルギーを示す. 例えば, SM490A の場合 (板厚 16 ~ 40 mm), 降伏点 315 N/mm^2 以上, 引張強さ $490 \sim 610 \text{ N/mm}^2$ である.

鋼材の溶接性では, 低温割れ感受性が重要となる. 鋼材の溶接金属近傍には溶接熱影響部 (Head Affected Zone: HAZ) (7.2.3 (3) 参照) が生じる. HAZ は, 高温へ急熱後, 急冷されることで生成され, 硬くてもろい性質がある. さらに, 溶接後の冷却時に生じる引張側の残留応力のため, ぜい性破壊が生じやすく, その硬化性が大きい場合 (硬いほど), 溶接割れが生じやすい. HAZ の最高硬さは化学成分に依存するため, 最高硬さの上限を制限し, ぜい性破壊を防ぐために, 炭素当量 (Carbon Equivalent: C_{eq}), 溶接割れ感受性指数 (Weld Cracking Parameter : P_{cm} , P_c) が式 (2.11) ~ 式 (2.14) のように規定される.

$$C_{eq} (\%) = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14 \quad (2.11)$$

$$C_{eq} (\%) = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/5 \quad (2.12)$$

$$P_c (\%) = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B + t/600 + H/60 \quad (2.13)$$

$$P_{cm} (\%) = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B \quad (2.14)$$

C_{eq} を求める式には JIS, WES (日本溶接協会規格) 方式の式 (2.11) と IIW (国際溶接学会) 方式の式 (2.12) がある. 式中の元素記号はその元素の質量 [%], t は板厚 [mm], H は 100 g の溶接金属中に含まれる拡散性水素 (溶接金属の部分の結晶格子内を自由に移動できる原子状の水素で, 水素ぜい化の要因となる) の量 [mL] である¹⁾.

表 2.12 に, 溶接構造用圧延鋼材の炭素当量と溶接割れ感受性指数を示す. 例えば, SM490A (板厚 50 mm 以下) の場合, $C_{eq} \leq 0.38$, $P_{cm} \leq 0.24$ である. 表 2.10 で, C を 0.2% 以下とする必要があるのは, C_{eq} を抑える必要があるためである. Mn は 1.6% 以下であり, 他の化学成分と比べて許容限度が高い. これは, C 量を抑えた分, 強度上昇に Mn を利用したことによる. なお, SM 材では, JIS には C, Si, Mn, P, S のみが規定されているが, 備考として必要に応じてこれら以外の合金元素を追加できるとされている.

SM 材では, シャルピー吸収エネルギーが規定され, 衝撃試験を行って一定以上の低温じん性のあることが保証されている. A 種は規定なし, B 種は試験温度 0°C で 27J 以上, C 種は試験温度 0°C で 47J 以上が要求される. これを区別するために, 記号の最後にシャルピー吸収エネルギーによる区分をつけ, 例えば SM400A などと称する. なお, SM570 では, A, B, C の区別がなく, 一律に試験温度 -5°C で 47J 以上が要求される.

表 2.10 溶接構造用圧延鋼材の種類の記号および化学成分 [wt.%]¹⁾

種類の記号	C	Si	Mn	P	S	
SM 400 A	厚さ 50 mm 以下	0.23 以下	—	2.5×C 以上	0.035 以下	0.035 以下
	厚さ 50 mm を超え 200 mm 以下	0.25 以下				
SM 400 B	厚さ 50 mm 以下	0.20 以下	0.35 以下	0.60~1.40	0.035 以下	0.035 以下
	厚さ 50 mm を超え 200 mm 以下	0.22 以下				
SM 400 C	100 mm 以下	0.18 以下	0.35 以下	1.40 以下	0.035 以下	0.035 以下
SM 490 A	厚さ 50 mm 以下	0.20 以下	0.55 以下	1.60 以下	0.035 以下	0.035 以下
	厚さ 50 mm を超え 200 mm 以下	0.22 以下				
SM 490 B	厚さ 50 mm 以下	0.18 以下	0.55 以下	1.60 以下	0.035 以下	0.035 以下
	厚さ 50 mm を超え 200 mm 以下	0.20 以下				
SM 490 C	100 mm 以下	0.18 以下	0.55 以下	1.60 以下	0.035 以下	0.035 以下
SM 490 YA	100 mm 以下	0.20 以下	0.55 以下	1.60 以下	0.035 以下	0.035 以下
SM 490 YB						
SM 520 B	100 mm 以下	0.20 以下	0.55 以下	1.60 以下	0.035 以下	0.035 以下
SM 520 C						
SM 570	100 mm 以下	0.18 以下	0.55 以下	1.60 以下	0.035 以下	0.035 以下