

第7回 鉄 筋

講師：濱田 秀則*

1. はじめに 1, 2, 3, 4, 5)

鉄筋を製造する大元の材料となる鉄は、原子番号 26 番、元素記号「Fe」、遷移金属に分類され、原子量 55.845、融点 1538℃、沸点 2861℃、比重 7.87 です。鉄は、地球上でもっとも多量に存在する元素の一つであり、地球の核のほとんどは溶けた鉄からなると考えられています。鉄は恒星の核融合によって最後にできあがる元素であることから、宇宙全体でも 9 番目に多い元素とされています。人類が初めて製鉄を行ったのは、今から 4000 年ほど前のヒッタイト帝国人（現トルコ）であったと考えられています。現在、鉄は世界の金属生産量の 95% を占めていますが、このように鉄が大量に使用される理由として、強度が高く加工しやすいこと、原料の鉄鉱石の量が豊富で価格が安いことなどがあげられます。

地球上において、鉄のほとんどは赤鉄鉱（ Fe_2O_3 ）と磁鉄鉱（ Fe_3O_4 ）という鉄石として存在し、これらの鉄石から不純物を取り除いて鉄が得られます。そのほかの鉄石として、褐鉄鉱（ $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ）や砂鉄などもありますが、少量です。鉄にはおよそ 2% 以上の炭素を含む鉄鉄（鑄鉄などに用いられる）や、炭素を約 0.02～2% の範囲まで除去した鋼などの種類があります。また、鉄は人体における必須元素でもあり、血液中のヘモグロビンに含まれていることはよく知られているところです。

わが国における鉄鋼の製造は、大きく分けて高炉と電炉により行われており、その比率はおよそ 7 対 3 となっています。鉄鉱石から鉄鋼を製造する場合は高炉が必要であり、その製造プロセスは、製鉄工程、製鋼工程、圧延工程からなります。一方、電炉を用いる場合は、鉄スクラップを主原料としており、本講座で説明する鉄筋はその大部分が電炉を用いて製造されています。電炉メーカーはほぼ全国各地に存在しており、使用済の鉄の再利用を効率的に行っているといえます。

2. RC および PC 部材用の鉄筋について 6, 7, 8)

コンクリートは圧縮強度に比べて引張強度が極端に小さいため、構造部材には引張補強のための鉄筋が必要です。鉄筋をコンクリートの補強材として用いることができる背

景には、熱膨張係数が鋼とコンクリートではほぼ等しいために温度変化による内部応力の発生がきわめて小さいこと、また、コンクリート内部がアルカリ性の細孔溶液に満たされていることから、鉄筋表面に不動態被膜が形成され鉄筋が安定した状態に保たれること、などがあります。

鋼（炭素量 0.2% 程度）の常温における物理的性質としては、密度が 7860 kg/m^3 、熱膨張係数が $12.2 \times 10^{-6} (\text{K}^{-1})$ 、比熱が $0.47 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 、熱伝導率が $51.9 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、弾性係数が 200 kN/mm^2 です。図 - 1 に鉄筋の引張応力-ひずみ曲線を示します。弾性限界の降伏点近傍での挙動が、コンクリートには見られない鋼材独自の挙動を示します。

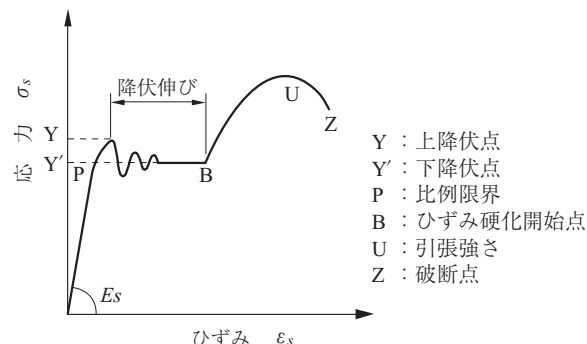


図 - 1 鉄筋の引張応力-ひずみ曲線

余談ではありますが、筆者は大学 2 年生を対象とした土木材料学の講義において、学生たちに以下のように説明して、鼓舞？しています。『応力-ひずみ曲線は、材料の力学的性質のなかでもっとも基本的かつ重要な性質であり、どのようにその材料を用いても、この曲線からはずれた挙動をすることはない。したがって、各材料の応力-ひずみ曲線から材料の力学的性質を把握し、異なる材料を合成して用いた場合に、その合成部材が全体としてどのような力学的挙動を示すのか、正確に理解できる技術者になってもらいたい……』自分自身を省みずにこのような講義をしています。この言葉を聞いたときの学生の目が少し輝くようにも感じるので、毎年続けています。

さて、コンクリート標準示方書^{9, 10)}では、RC 部材および PC 部材の補強材として使用できる鉄筋について、以下のように記述されています。

* Hidenori HAMADA：九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 教授

- 鉄筋は、JIS G 3112 および JSCE-E 121 に適合することを標準とする。
- JIS G 3112 に適合しない鉄筋を用いる場合には、試験を行い、所要の性能を満足することを確認するとともに、その使用方法を定めなければならない。

すなわち、鉄筋は JIS G 3112 に準拠することがほぼ原則になっており、その種類は、丸鋼として、SR235、SR295 の 2 種類、異形棒鋼として、SD295A、SD295B、SD345、SD390、SD490 の 5 種類の合計 7 種類です。これらの鉄筋の化学成分は表 - 1、機械的性質は表 - 2 のように示され

ています。また異形棒鋼の寸法、単位質量および節の許容限度は表 - 3 のように示されています。

表 - 1 鉄筋の化学成分

単位 %

種類の記号	C	Si	Mn	P	S	C + $\frac{Mn}{6}$
SR235	—	—	—	0.050 以下	0.050 以下	—
SR295	—	—	—	0.050 以下	0.050 以下	—
SD295A	—	—	—	0.050 以下	0.050 以下	—
SD295B	0.27 以下	0.55 以下	1.50 以下	0.040 以下	0.040 以下	—
SD345	0.27 以下	0.55 以下	1.60 以下	0.040 以下	0.040 以下	0.50 以下
SD390	0.29 以下	0.55 以下	1.80 以下	0.040 以下	0.040 以下	0.55 以下
SD490	0.32 以下	0.55 以下	1.80 以下	0.040 以下	0.040 以下	0.60 以下

注^{a)} 必要に応じて、この表以外の合金元素を添加してもよい。

表 - 2 鉄筋の機械的性質

種類の 記号	降伏点または耐力 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	引張試験片	伸び ^{a)} %	曲 げ 性	
					曲げ角度	内 側 半 径
SR235	235 以上	380～520	2 号	20 以上	180°	公称直径の 1.5 倍
			14A 号	22 以上		
SR295	295 以上	440～600	2 号	18 以上	180°	径 16 mm 以下 公称直径の 1.5 倍
			14A 号	19 以上		径 16 mm 超え 公称直径の 2 倍
SD295A	295 以上	440～600	2 号に準じるもの	16 以上	180°	呼び名 D16 以下 公称直径の 1.5 倍
			14A 号に準じるもの	17 以上		呼び名 D16 超え 公称直径の 2 倍
SD295B	295～390	440 以上	2 号に準じるもの	16 以上	180°	呼び名 D16 以下 公称直径の 1.5 倍
			14A 号に準じるもの	17 以上		呼び名 D16 超え 公称直径の 2 倍
SD345	345～440	490 以上	2 号に準じるもの	18 以上	180°	呼び名 D16 以下 公称直径の 1.5 倍
			14A 号に準じるもの	19 以上		呼び名 D16 超え 公称直径の 2 倍
						呼び名 D41 以下 公称直径の 2 倍
						呼び名 D51 公称直径の 2.5 倍
SD390	390～510	560 以上	2 号に準じるもの	16 以上	180°	公称直径の 2.5 倍
			14A 号に準じるもの	17 以上		
SD490	490～625	620 以上	2 号に準じるもの	12 以上	90°	呼び名 D25 以下 公称直径の 2.5 倍
			14A 号に準じるもの	13 以上		呼び名 D25 超え 公称直径の 3 倍

注記 1 N/mm² = 1 MPa

注^{a)} 異形棒鋼で、寸法が呼び名 D32 を超えるものについては、呼び名 3 を増すごとにこの表の伸びの値からそれぞれ 2 を減じる。ただし、減じる限度は 4 とする。

表 - 3 異形棒鋼の寸法・単位質量および節の許容限度

呼び名	公称直径 (<i>d</i>) mm	公称周長 ^{a)} (<i>l</i>) cm	公称断面積 ^{a)} (<i>S</i>) cm ²	単位質量 ^{a)} kg/m	節の平均間隔 の最大値 ^{b)} mm	節の高さ ^{c)}		節のすき間の 合計の最大値 ^{d)} mm	節と軸線と の角度
						最小値 mm	最大値 mm		
D4	4.23	1.3	0.140 5	0.110	3.0	0.2	0.4	3.3	45° 以上
D5	5.29	1.7	0.219 8	0.173	3.7	0.2	0.4	4.3	
D6	6.35	2.0	0.316 7	0.249	4.4	0.3	0.6	5.0	
D8	7.94	2.5	0.495 1	0.389	5.6	0.3	0.6	6.3	
D10	9.53	3.0	0.713 3	0.560	6.7	0.4	0.8	7.5	
D13	12.7	4.0	1.267	0.995	8.9	0.5	1.0	10.0	
D16	15.9	5.0	1.986	1.56	11.1	0.7	1.4	12.5	
D19	19.1	6.0	2.865	2.25	13.4	1.0	2.0	15.0	
D22	22.2	7.0	3.871	3.04	15.5	1.1	2.2	17.5	
D25	25.4	8.0	5.067	3.98	17.8	1.3	2.6	20.0	
D29	28.6	9.0	6.424	5.04	20.0	1.4	2.8	22.5	
D32	31.8	10.0	7.942	6.23	22.3	1.6	3.2	25.0	
D35	34.9	11.0	9.566	7.51	24.4	1.7	3.4	27.5	
D38	38.1	12.0	11.40	8.95	26.7	1.9	3.8	30.0	
D41	41.3	13.0	13.40	10.5	28.9	2.1	4.2	32.5	
D51	50.8	16.0	20.27	15.9	35.6	2.5	5.0	40.0	

注^{a)}～注^{d)}における数値の丸め方は、JIS Z 8401 の規則 A による。

注^{a)} 公称断面積、公称周長、および単位質量の算出方法は、次による。

なお、公称断面積 (*S*) は有効数字 4 けたに丸め、公称周長 (*l*) は小数点以下 1 けたに丸め、単位質量は有効数字 3 けたに丸める。

$$\text{公称断面積 } (S) = \frac{0.7854 \times d^2}{100}$$

$$\text{公称周長 } (l) = 0.3142 \times d$$

$$\text{単位質量} = 0.785 \times S$$

^{b)} 節の平均間隔の最大値は、その公称直径 (*d*) の 70% とし、算出した値を小数点以下 1 けたに丸める。

^{c)} 節の高さは、表 5 によるものとし、算出値を小数点以下 1 けたに丸める。

^{d)} 節のすき間の合計の最大値は、ミリメートルで表した公称周長 (*l*) の 25% とし、算出した値を小数点以下 1 けたに丸める。ここでリブと節とが離れている場合、およびリブがない場合には節の欠損部の幅を、また、節とリブとが接続している場合にはリブの幅を、それぞれ節のすき間とする。

3. 太径の鉄筋について

近年の構造物の大型化に伴って、需要が増加しつつある径の大きな鉄筋については、JIS G 3112 には規定がないことから、土木学会規準 JSCE-E 121 として、D57 および D64 に対して規格が制定されています。表 - 4 は種類および記号、表 - 5 は化学成分、表 - 6 は機械的性質、表 - 7 は寸法、質量および節の許容限度です。

表 - 4 太径鉄筋の種類および記号¹⁰⁾

区 分	種類の記号
太径ねじ節鉄筋	SD 295-N
	SD 345-N
	SD 390-N
	SD 490-N

表 - 5 太径鉄筋の化学成分¹⁰⁾

種類の記号	化 学 成 分 %									
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Sn	Cr	N (ppm)	C+1.6Mn
SD 295-N	0.25 以下	0.50 以下	1.60 以下	0.030 以下	0.030 以下	0.05 以下	0.010 以下	0.07 以下	70 以下	0.48 以下
SD 345-N	0.25 以下	0.50 以下	1.55 以下	0.030 以下	0.030 以下	0.05 以下	0.010 以下	0.07 以下	70 以下	0.48 以下
SD 390-N	0.28 以下	0.55 以下	1.60 以下	0.030 以下	0.030 以下	0.05 以下	0.010 以下	0.07 以下	70 以下	0.52 以下
SD 490-N	0.30 以下	0.55 以下	1.60 以下	0.030 以下	0.030 以下	0.05 以下	0.010 以下	0.07 以下	70 以下	0.57 以下

表 - 6 太径鉄筋の機械的性質¹⁰⁾

種類の記号	引 張 試 験			曲 げ 性	
	降伏点または 0.2% 耐力 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	伸 び %	曲げ角度	内 側 半 径
SD 295-N	295~375	440 以上	18 以上	180°	公称直径の 2 倍
SD 345-N	345~425	490 以上	20 以上	180°	公称直径の 2.5 倍
SD 390-N	390~470	560 以上	18 以上	180°	公称直径の 2.5 倍
SD 490-N	490~570	620 以上	14 以上	90°	公称直径の 3 倍

表 - 7 太径鉄筋の寸法・質量および節の許容限度¹⁰⁾

項 目		呼 び 名		
		D57	D64	
公 称 直 径 (<i>d</i>)	mm	57.2	63.5	
公 称 周 長 (<i>l</i>)	cm	18.0	20.0	
公 称 断 面 積 (<i>S</i>)	cm ²	25.70	31.67	
単 位 質 量	kg/m	20.2	24.9	
節の平均間隔の最大値		40.0	44.4	
節 の 高 さ	最小値	mm	2.9	3.2
	最大値	mm	5.8	6.4
節のすき間の和の最大		45.0	50.0	
節と軸線との角度		45° 以上	45° 以上	

注記 公称断面積、公称周長、単位質量、節の間隔、節のすき間、節の高さの算出方法は、JIS G 3112 の 5. (形状・寸法、質量および許容差) による。

4. 鉄筋の高強度化について^{11), 12)}

通常の異形棒鋼の 2 倍以上の強度を持つ USD685 あるいは USD985 といった高強度鉄筋も開発され実用化に至っています。関連指針として「高強度鉄筋 PPC 構造設計施工指針¹²⁾」が 2003 年にプレストレストコンクリート技術協会から出されています。これまでは主に RC の高橋脚に適用実績があり、東海北陸自動車道の鷺見橋、宮崎県の上岩戸大橋、新名神高速道路の近江大鳥橋、首都圏中央連絡自動車道の裏高尾橋などにおいて適用されています。

5. 防食性の高い鉄筋について^{13), 14), 15), 16)}

厳しい環境下における RC 構造物あるいは PC 構造物の鉄筋腐食を抑制し、構造物の長期耐久性を確保する観点から防食性の高い鉄筋を採用する事例も増えつつあります。なかでも、エポキシ樹脂塗装鉄筋は使用事例が大幅に増えつつあります。エポキシ樹脂塗装鉄筋については、土木学会規準 JSCE-E 102 が定められており、このなかで、外観、ピンホール、塗膜厚、耐衝撃性、曲げ加工性、付着強度、耐食性、塗膜硬化性が品質管理項目としてあげられています。過去、品質のよくない樹脂塗装鉄筋も存在したことから、必ずしもエポキシ樹脂塗装鉄筋に対する信頼性が高かったとはいいがたいですが、土木学会で設計施工指針¹³⁾ が改訂されたことや、近年において塗装鉄筋自体の品質の向上が進んだことなどから、現在では防食鉄筋の代表的存在として使用実績が伸びつつあります。エポキシ樹脂塗装鉄筋を使用する際には、若干の付着強度の低下や施工時に発生しやすい塗膜のきず、擦れなどに注意する必要があります。

また、ステンレス鉄筋も土木学会で設計施工指針¹⁶⁾ が発刊され、ステンレス鉄筋自体の規格として、JIS G 4322 が制定されています。ステンレスとは何か、定義に従えば、鉄を主成分 (50% 以上) とし、クロムを 10.5% 以上含む鋼にくい合金がステンレスとなります。ステンレスは大別して、クロム系ステンレスとクロム・ニッケル系ステンレスに大別されます。クロム系ステンレスはさらに、金属組織の違いにより、マルテンサイト系とフェライト系に大別されます。また、クロム・ニッケル系は金属組織がオーステナイト組織を示すことからオーステナイト系とも呼ばれています。鉄筋としてのステンレスの使用は、価格の問題もありまだまだ少ないのが実態ではありますが、これまでに、沖縄県の古宇利大橋や伊良部大橋のプレキャストセグメントの地覆用埋込み鉄筋としてステンレス鉄筋を採用した事例があります。古宇利大橋は国内橋梁でステンレス鉄筋を本格採用 (使用量約 30 t) した初めての施工例です。

紫外線の影響を受ける環境においてエポキシ樹脂塗装鉄筋に不安がある場合、または、超長期の耐久性が求められる場合には、ステンレス鉄筋が有利となる場合もあると思われますが、いずれにしてもライフサイクルコスト算定に基づいたライフサイクルマネジメントが確立されることが、ステンレス鉄筋が主鉄筋として広く用いられていくためには必要であると思われます。また、ステンレス鉄筋特有の現象、たとえば溶接部の耐食性の低下、継手部におけるすき間腐食、異種金属接触腐食などにはとくに注意をする必要があるといえます。

6. 鉄筋工に関する新しい話題について^{17), 18)}

鉄筋工に関する新しい話題として、生産性向上のための技術を紹介します。現在、国土交通省が旗振り役となっている「i-Construction」の一環として、「現場打ちコンクリート構造物に適用する機械式鉄筋継手工法ガイドライン¹⁷⁾」および「機械式鉄筋定着工法の配筋設計ガイドライン¹⁸⁾」が策定されました。「現場打ちコンクリート構造物に適用

する機械式鉄筋継手工法ガイドライン」は、従来の重ね継手の代替となる機械式継手について、また「機械式鉄筋定着工法の配筋設計ガイドライン」は、従来の円形フックや曲げフックの代わりに定着体による鉄筋の定着工法について、それぞれ標準的な使用方法と設計施工上の留意点をまとめたものです。さらに、鉄筋のプレファブ化も進められています。鉄筋のプレファブ化は、とくにプレキャストセグメント工法やプレキャスト PC 床版のように同一形状のコンクリート構造物の製作において有利となる技術であり、これまでもさまざまな現場で用いられており（写真 - 1）、今後のさらなる活用が期待されている工法です。



写真 - 1 鉄筋のプレファブ化の例（伊良部大橋のプレキャストセグメント製作）

7. 鉄筋工に関する温故知新 19, 20, 21, 22)

本稿を依頼されたことから、古い基準・規準や古い技術書も確認しました。このなかに、以下のような記述を見つけたので、本稿の最後に温故知新として紹介します。

- 1) 鉄筋を長く大気にさらしておくときには、水セメント重量比 30 % 位のセメント・ペーストをよくかき回しながら、はけで鉄筋の表面にうすく塗りつけるのがよい。
- 2) セメント・ペーストの塗布は、鉄筋に浮き錆のできるのを防ぐのに有効であるばかりでなく、比較的貧配合のコンクリート中で鉄筋の防錆を確実にする目的に対しても、有効である。
- 3) うすく塗ったセメント・ペーストは、コンクリートを打つ前にこれを剥ぎ取るに及ばない。

以上は、コンクリートハンドブック（吉田徳次郎著）¹⁹⁾の記述ですが、他の文献^{20, 21, 22)}にもほぼ同義の記述がなされています。このなかで、鉄筋コンクリート設計法（吉田徳次郎著）²¹⁾コンクリート及鉄筋コンクリート施工法（吉田徳次郎著）²²⁾は土木学会の電子アーカイブに収められており、学会のホームページからダウンロードすることができます。現在でも、RC 部材および PC 部材の鋼材腐食は、塩害、中性化に関連した技術的課題としてコンクリート技術者、コンクリート研究者を悩ませていることを考えると、吉田徳次郎先生の先見性、慧眼には驚くほかありません。実際の鉄筋腐食の状況を観察してみると、大半が水平鉄筋の下面において激しく発錆しており、ブリーディングにより発生した水平鉄筋下面のわずかな空隙がのちの鉄筋腐食

の主要因となり、部材ひいては構造物の耐久性の低下をもたらしています。水平鉄筋下面の空隙を除去することができれば、鉄筋腐食の問題は大きく解決に近づくことを考えると、吉田徳次郎先生が残された記述はいまなおわれわれの先導となっているのです。

8. おわりに

筆者が調べ得る範囲で、鉄筋についてまとめました。まだまだ落としている最新情報もあるかと思いますがご容赦願います。本稿が少しでも貴重な時間を割いて読んでいただいた読者の皆様の参考になれば幸いです。なお、本稿の 5. および 6. に関して、河村直彦氏（株式会社ピーエス三菱技術本部技術部）および西垣義彦氏（公益社団法人プレストレストコンクリート工学会）より貴重な情報を提供していただきました。ここに記して謝意を表する次第です。

参考文献

- 1) 美しい元素, Gakken, 2013 年 10 月発行
- 2) 日々に出会う化学のことば, 加藤俊二・竹村富久男著, 化学同人, 1991 年 4 月発行
- 3) 例えば, 土木材料学, 町田篤彦編, オーム社, 平成 23 年 8 月
- 4) 例えば, 最新土木材料, 第 3 版, 西村昭ほか著, 森北出版株式会社, 2014 年 3 月
- 5) 例えば, 土木材料学, 宮川豊章・六郷恵哲編, 朝倉書店, 2012 年 3 月
- 6) コンクリート技術の要点 '16, 公益社団法人日本コンクリート工学会, 2016 年 9 月発行
- 7) プレストレストコンクリート技術, 公益社団法人プレストレストコンクリート工学会, 2017 年 7 月発行
- 8) コンクリート構造学 第 5 版, 小林和夫著, 森北出版, 2017 年 8 月発行
- 9) 2012 年制定コンクリート標準示方書, 施工編, 土木学会, 2013 年 3 月発行
- 10) 2013 年制定コンクリート標準示方書, 規準編, 土木学会, 2013 年 11 月発行
- 11) PC 橋梁の新たな挑戦, 辻幸和・二羽淳一郎著, 技報堂出版, 2011 年 2 月発行
- 12) 高強度鉄筋 PPC 構造設計施工指針, プレストレストコンクリート技術協会, 2003 年 11 月
- 13) コンクリートライブラリー第 112 号 エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリート構造物の設計施工指針 [改訂版], 土木学会, 平成 15 年 11 月発行
- 14) ステンレスの初歩 2007, ステンレス協会, 平成 19 年 (2007 年) 5 月発行
- 15) ステンレスのおはなし, 大山正・森田茂・吉武進也著, 日本規格協会, 2001 年 2 月発行
- 16) コンクリートライブラリー第 130 号 ステンレス鉄筋を用いるコンクリート構造物の設計施工指針 (案), 土木学会, 2008 年 9 月発行
- 17) 現場打ちコンクリート構造物に適用する機械式継手工法ガイドライン, 機械式継手工法技術検討委員会, 平成 29 年 3 月
<http://www.mlit.go.jp/common/001186458.pdf>
- 18) 機械式鉄筋定着工法の配筋設計ガイドライン, 機械式鉄筋定着工法技術検討委員会, 平成 28 年 7 月
<http://www.mlit.go.jp/common/001184141.pdf>
- 19) コンクリートハンドブック, 吉田徳次郎著, 養賢堂版, 昭和 24 年 (1949 年) 5 月発行
- 20) 鉄筋混凝土施工法, 吉田徳次郎著, 丸善, 昭和 4 年 2 月発行
- 21) 鉄筋コンクリート設計法, 吉田徳次郎著, 養賢堂, 昭和 7 年 (1932 年) 2 月発行
- 22) コンクリート及鉄筋コンクリート施工法, 吉田徳次郎著, 丸善, 昭和 17 年発行
http://library.jsce.or.jp/Image_DB/s_book/jsce100/htm/068.htm

【2017 年 7 月 31 日受付】