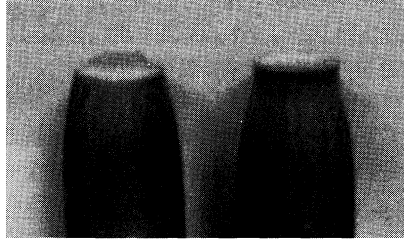


第2章 コンクリートと鉄筋の性質



コンクリートの圧縮破壊(左), 鉄筋の引張破壊(右)

キーワード 普通コンクリート 軽量コンクリート 高強度コンクリート 応力-ひずみ曲線 ヤング係数(比) ポアソン比 せん断弾性係数 設計基準強度 破壊曲面 クリープ 乾燥収縮 付着機構 付着強度 割り裂き破壊 付着応力-すべり曲線 降伏点 ひずみ硬化 許容応力度 材料強度

2.1 コンクリートの性質

2.1.1 コンクリートの種類

JASS 5 では、コンクリートの種類を表 2.1 に示すように使用骨材によって普通コンクリート、軽量コンクリート 1 種および 2 種に分類している。普通コンクリート (N) とは、絶乾密度 (絶対乾燥状態の見かけ密度) が 2.5 g/cm^3 以上の粗骨材を単体あるいは混合して用いたコンクリートの総称である。また、軽量コンクリート (L) とは、絶乾密度が 2.0 g/cm^3 未満の人工軽量粗骨材を用いたコンクリートで、軽量コンクリート 1 種は細骨材に普通骨材を用い、軽量コンクリート 2 種は細骨材の一部または全部に人工軽量細骨材を用いたコンクリートである。

その他のコンクリートとしては、高強度コンクリート (設計基準強度 $F_c = 36 \text{ N/mm}^2$ 超)、28 日間平均気温が 4°C 以下のときに適用する寒中コンクリート、同じく 25°C 以上のときに適用する暑中コンクリート、施工現場で打設直前に流動化剤を添加して流動性を増大させた流動化コンクリート、コンクリート製造時に高性能 AE 減水剤を添

表 2.1 コンクリートの種類 (JASS 5)

コンクリートの種類	使用骨材		設計基準強度 [N/mm ²]	単位体積質量 [t/m ³]
	粗骨材	細骨材		
普通コンクリート	砂利, 砕石, 高炉スラグ砕石, 再生骨材	砂, 砕砂, 再生細骨材, 各種スラグ細骨材	18, 21, 24 27, 30, 33 36	2.2~2.4
軽量コンクリート	1種	人工軽量粗骨材	同上	1.7~2.1
	2種	人工軽量粗骨材	人工軽量細骨材 またはこれに砂, 砕砂, 再生細骨材, 各種スラグ骨材を 加えたもの	18, 21, 24, 27 1.4~1.7

加して流動性を著しく高めた高流動コンクリートなどがある。

2.1.2 コンクリートの応力-ひずみ曲線

(1) 一般的性質

コンクリートの応力 (σ)-ひずみ (ϵ) 曲線の形状は, 図 2.1 に示すように, 最大荷重点に至るまでの応力上昇域と, それ以降の応力下降域とに分けられる。応力上昇域では, 最大荷重点のおよそ 1/3 点の応力段階で粗骨材とモルタル間にボンドクラックが入り, それ以後徐々にモルタルクラックが発生・進展し, 最大荷重よりもやや小さい荷重付近でクラックがコンクリート中を貫通するようになる。最大荷重点でのひずみは, およそ $1.5 \sim 2.5 \times 10^{-3}$ (0.15~0.25%) 程度である。

コンクリートの σ - ϵ 曲線の形状は, コンクリートの品種・品質, 載荷速度, 供試体の形状・寸法などによって異なる。例えば, 図 2.2 は, コンクリートの強度レベルによる σ - ϵ 曲線の変化状況を示したものである。図にみられるように, 圧縮強度が大きいコンクリートほど, 曲線の立ち上がり勾配および圧縮強度時のひずみは大きくなり, 応力下降域の下り勾配も大きくなって急激に破壊するようになる。応力下降域の

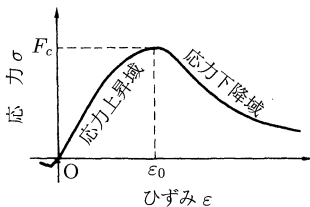


図 2.1 コンクリートの一般的な σ - ϵ 曲線

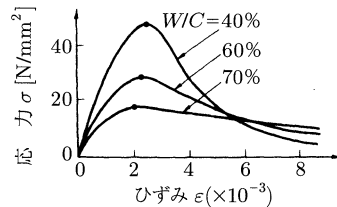


図 2.2 σ - ϵ 曲線の形状に及ぼす圧縮強度の影響

$\sigma-\epsilon$ 曲線は、ひずみが約 5×10^{-3} を超えるような高ひずみ領域では、コンクリートの品質にかかわらず、ほぼ類似の形状を示す。

(2) 応力-ひずみ曲線の表示式

RC 部材の耐力を計算する場合には、 $\sigma-\epsilon$ 曲線の数式表示が必要になる。実用表示法としては図 2.3 に示すような直線表示、折線表示、曲線表示などの方法があり、目的に応じて適宜使い分けている。実用的にはなるべく簡明な表示法がよく、直線表示は主として部材の弾性解析の際に用いられ、折線表示は部材の終局耐力の解析を含む弾塑性解析などに用いられている。

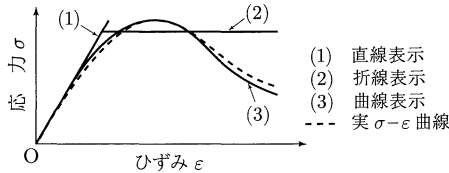


図 2.3 $\sigma-\epsilon$ 曲線の近似法

(3) 弾性諸定数

(a) ヤング係数 応力とひずみの比をヤング係数、または弾性係数という。ヤング係数は、本来 $\sigma-\epsilon$ 曲線が線形関係を示す範囲の応力とひずみの比をいうため、 $\sigma-\epsilon$ 曲線の直線部分にのみあてはまる用語である。しかし、コンクリートの $\sigma-\epsilon$ 曲線は荷重初期の段階から非線形となるため、コンクリートのヤング係数は一義的には定義できない。このため、図 2.4 に示すようにいくつかの定義がある。すなわち、 $\sigma-\epsilon$ 曲線の原点における接線勾配を初期ヤング係数 (E_i) といい、 $\sigma-\epsilon$ 曲線上の任意点と原点を結ぶ直線の勾配をセカントモデュラス (割線ヤング係数) という。 E_c は曲線上の応力点をどこに選ぶかによって異なるが、通常、構造設計用のヤング係数として用いられており、一般には圧縮強度の $1/3 \sim 1/4$ の応力点を選んでいる。

コンクリートのヤング係数 (E_c) は、図 2.5 のようにコンクリートの圧縮強度 (F_c) および気乾単位体積重量 (γ) が大きいほど大きくなる。RC 規準では、実験結果に基づく次式を用いている。

$$E_c = 3.35 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{24}\right)^2 \times \left(\frac{F_c}{60}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{2.1}$$

ここに、 E_c : コンクリートのヤング係数 [N/mm²]

γ : コンクリートの気乾単位容積重量 [kN/m³]

F_c : コンクリートの圧縮強度 [N/mm²]

k_1, k_2 (図 2.5 中) : それぞれ、粗骨材および混和材種類による係数

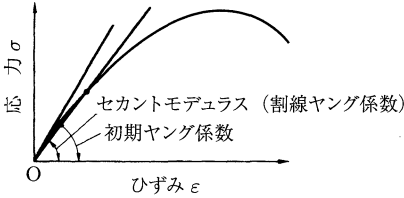


図 2.4 弾性係数の定め方

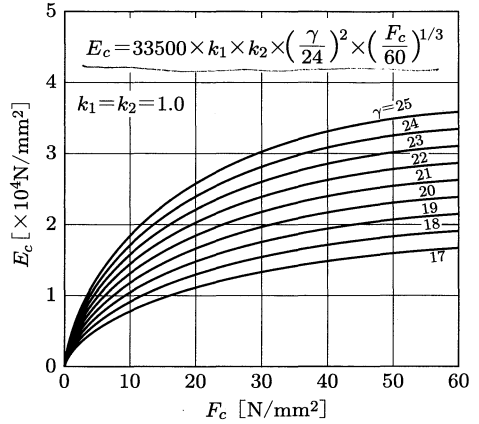


図 2.5 コンクリートのヤング係数と圧縮強度の関係 (RC 規準)

(b) **ポアソン比** コンクリートの軸方向ひずみ (ε_l) を、軸と直角方向の横ひずみ (ε_t) で割った値をポアソン数 (m)、その逆数をポアソン比 (ν) という。

$$m = 1/\nu = \varepsilon_t/\varepsilon_l \tag{2.2}$$

コンクリートのポアソン比は、荷重応力レベルやコンクリートの品質によっても異なり、普通コンクリートでは 0.18~0.20、軽量コンクリートでは 0.20~0.22、高強度コンクリートでは 0.20~0.23 である。ただし、RC 規準ではコンクリートの種類にかかわらず、 $m = 5$ ($\nu = 0.2$) を採用している。

(c) **せん断弾性係数** コンクリートのせん断弾性係数 (G) は、弾性材料の場合に成立する次式で求めることができる。

$$G = \frac{m \cdot E_c}{2(1+m)} = \frac{E_c}{2(1+\nu)} \tag{2.3}$$

ここで、 $\nu = 0.2$ とすると、せん断弾性係数は、 $G = 0.42E_c$ となる。

2.1.3 コンクリートの強度

(1) 圧縮強度

コンクリートの強度には、圧縮強度、引張強度、曲げ強度、せん断強度、付着強度などがあるが、コンクリート強度といえば、一般に圧縮強度のことを意味する。これは圧縮強度が他の強度と比較して著しく大きく、RC 構造の設計でも圧縮力を主として利用するからである。コンクリートの圧縮強度は材料の品質、調合、施工方法、養生方法、材齢、試験方法などの要因によって大きく異なる。

(2) 引張強度

コンクリートの引張強度 (F_t) は、圧縮強度の 1/10 程度で極めて小さい。また、引張強度は圧縮強度と同様に、水セメント比で支配され、使用材料の性質や試験方法などによってもかなり異なる。一般に、コンクリートの引張強度は、圧縮強度用試験体を横にして断面の直角方向に加圧する割り裂き試験方法により、次式で求める。

$$F_t = \frac{2P}{\pi \cdot d \cdot l} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (2.4)$$

ここに、 P : 割り裂き荷重 [N], d : 試験体の直径 [mm]
 l : 試験体の長さ [mm]

(3) 曲げ強度

コンクリートの曲げ強度 (F_b) は、部材の曲げひび割れ荷重の算定に必要である。長方形断面を持つコンクリートの曲げ強度は、次式で求められる。

$$F_b = \frac{M}{Z} = M \frac{6}{b \cdot D^2} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (2.5)$$

ここに、 Z : 断面係数, M : 最大曲げモーメント [N・mm], b : 断面の幅 [mm]
 D : 断面の高さ [mm]

コンクリートの曲げ強度は、原理的に引張強度と同じであると考えられるが、実際には引張強度のおよそ 1.5 倍である。これは曲げ試験において、断面内に応力勾配が生じるためである。

(4) セン断強度

コンクリートの直接せん断強度は、圧縮強度のおよそ 1/5 である。しかし、図 2.6 に示すように曲げモーメントとせん断力を受ける部材に生じるせん断ひび割れは、斜め引張応力によるため (5.2 節参照)、実質的なせん断強度は引張強度と同程度とみなすのが妥当である。

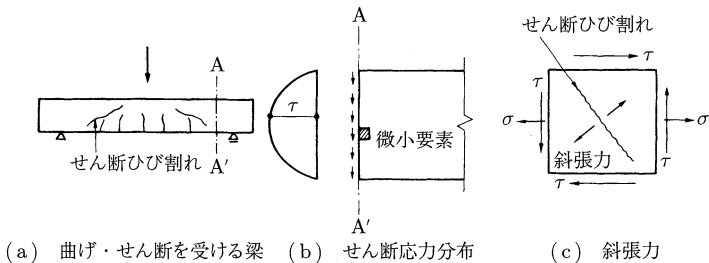


図 2.6 セン断応力と斜張力

2.1.4 複合応力下の力学性質

RC 部材が 1 軸応力状態にあることは少なく、実際には 2 軸あるいは 3 軸の複合応力下にある。図 2.6 のように、1 点集中荷重を受ける単純梁でも、曲げによる垂直応力とせん断応力を受けている。このような応力状態をモールの応力円を用いて表示したものが図 2.7(a) である。部材の作用応力が次第に大きくなり、ある限度に達するとコンクリートは破壊する。この限界を破壊条件といい、図中の直線で表されているモール・クーロンの式もその一つである。

3 軸応力状態の破壊条件を幾何学表示すると、鋼のような延性材料では、主応力 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ を中心軸とする円筒形となり、コンクリートのような脆性材料では図 2.7(b) のように丸みをおびた三角錐形になる。いま、この三角錐形を $\sigma_1 - \sigma_3$ 面で平面表示すると図 2.7(c) のようになり、コンクリート断面の 2 次元解析では、このような破壊曲線がよく利用される。RC 部材が帯筋やあばら筋などの横方向鉄筋で拘束された場合のように、複合応力下にあるコンクリートの変形性質は、単軸応力下のコンクリートのそれと大きく異なる。図 2.8 は、横方向鉄筋で拘束されたコンクリート (コンファインドコンクリート) の $\sigma - \epsilon$ 曲線を模式的に示したもので

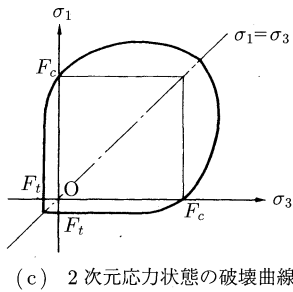
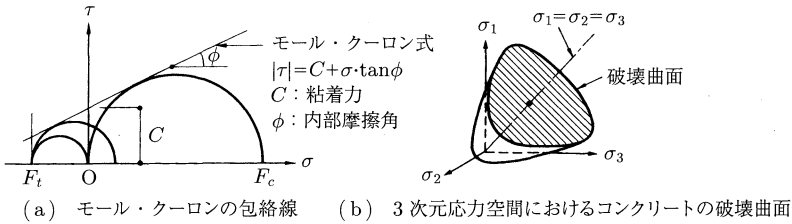


図 2.7 コンクリートの破壊条件の表示例

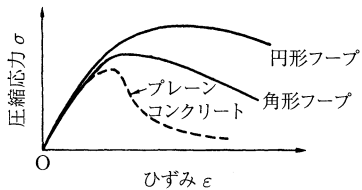


図 2.8 コンファインドコンクリートの $\sigma - \epsilon$ 曲線

ある。一般に、RC 部材の強度と靱性は、角形フープで拘束された部材より円形（スパイラル）フープで拘束された部材の方が大きく、同一部材では横補強筋で拘束されたコア部分の占める割合が大きいほど向上する。

2.1.5 その他の性質

(1) クリープ

コンクリートが持続荷重を受けると、時間とともにひずみが増大する。この現象をクリープといい、時間とともに進行するひずみをクリープひずみという。図 2.9 のように持続荷重が加わると、その直後に瞬間弾性ひずみ (ε_e) が生じ、その後クリープひずみ (ε_c) が生じる。クリープひずみは載荷直後に急増し、次第に一定値（終局クリープひずみ）に収束する。弾性ひずみ (ε_e) に対する終局クリープひずみ ($\varepsilon_{c\infty}$) の比をクリープ係数 (Φ_t) という。この係数は、一般に 2~4 程度であり、特にプレストレストコンクリート構造の解析の際に用いられる。

$$\Phi_t = \frac{\varepsilon_{c\infty}}{\varepsilon_e} \quad (2.6)$$

また、鉄筋コンクリートの構造計算に用いられる「コンクリートに対する鉄筋のヤング係数比 n 」（第 3 章）には、このようなコンクリートのクリープの効果が考慮されている。すなわち、RC 規準では、材料そのもののヤング係数の比より若干大きめの値を用いることとしている。

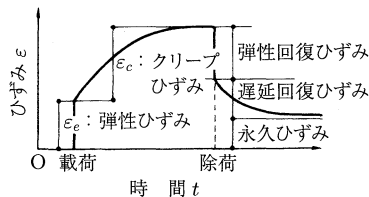


図 2.9 クリープひずみの定義

▶ 持続荷重がある限度より大きくなると、図 2.10 のようにクリープひずみの増加率は時間とともに増大し、クリープ破壊を生じる。クリープ破壊を起こさない限界をクリープ限度といい、コンクリートでは静的圧縮強度の 70~90% 程度である。載荷応力が圧縮強度の 1/3 程度よりも小さい範囲では、終局クリープひずみと載荷応力との比がほぼ一定になり、その比例定数は圧縮の場合も引張の場合も等しいことが認められている。これをデービス・グランビル (Davis-Glanville) の法則という。一方、図 2.11 のように時間 t_1 で載荷した場合のクリープの進行は、時間 t_0 で載荷した場合の t_1 以後の進行速度に等しい。この法則をホイットニー (Whitney) の法則という。これら二つの法則によれば、コンクリートのクリープひずみは持続荷重が小さいほど、載荷時期が遅いほど小さくなる。

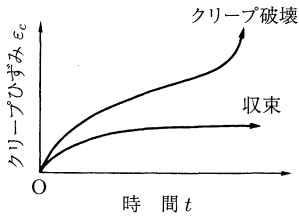


図 2.10 クリープひずみ-時間曲線

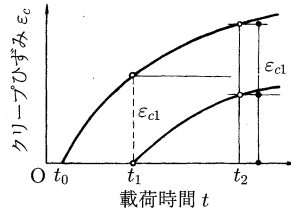


図 2.11 ホイットニーの法則

(2) 乾燥収縮

コンクリートの乾燥収縮は、セメントペースト中の水分の逸散によるもので、乾燥収縮に影響する要因としては、単位水量、単位セメント量、空気量、養生方法、部材寸法、セメントや骨材の品質などが挙げられる。この中で単位水量および骨材の品質が最も重要な要因である。コンクリートの乾燥収縮ひずみの大きさは、通常 $5 \sim 8 \times 10^{-4}$ 程度である。

(3) 熱に対する性質

コンクリートの熱膨張係数は、常温付近で約 $1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ であり、鉄筋のそれとほぼ等しい。普通コンクリートでは、受熱温度が約 250°C 以上になると強度が次第に低下し、 500°C ぐらいになると常温時強度の $50 \sim 65\%$ 程度になり、 800°C 以上になると急激に低下する。また、ヤング係数の低下は強度よりも顕著で、 500°C では、常温の値の $10 \sim 20\%$ になる。高強度コンクリートなどのように組織が緻密なコンクリートでは、含水率が高いと、急激な加熱によって表層部から爆裂現象を起こすことがある。

2.2 鉄筋の性質

2.2.1 鉄筋の種類と形状

RC 構造物に使用する鉄筋の種類は、表 2.2 に示すように、熱間圧延棒鋼 (SR: 普通丸鋼) と熱間圧延異形棒鋼 (SD: 異形鉄筋) および一度使用した鋼材を再圧延した再生棒鋼 (SRR または SDR) に分けられる。SR は加熱炉で加熱した鋼塊をロールの間を通して圧延したものであり、SD は凹凸模様のある孔型ロール間を圧延して図 2.12 に示すように表面に凹凸をつけたものである。表面の凹凸のうち、軸方向の突起をリブ、その他をふしと呼んでいる。JIS 規格ではふし間隔、形状、寸法に関する規定がある。異形鉄筋の直径や断面積は、一般にその異形鉄筋と同単位質量の丸鋼の直径や断面積で表し、公称直径、公称断面積と呼んでいる。鉄筋の直径・断面積・質量の一覧を付録 4 に示す。

表 2.2 丸鋼および異形鉄筋

種類	記号	(降伏点または 0.2%耐力 [N/mm ² (kgf/mm ²)])	引張強さ [N/mm ² (kgf/mm ²)]
丸鋼	SR 235(SR 24)	235(24) 以上	380~520(39~53)
	SR 295(SR 30)	295(30) 以上	440~600(45~61)
異形鉄筋	SD 295 A(SD 30A)	295(30) 以上	440~600(45~61)
	SD 295 B(SD 30B)	295~390(30~40)	440(45) 以上
	SD 345(SD 35)	345~445(35~45)	490(50) 以上
	SD 390(SD 40)	390~510(40~52)	560(57) 以上

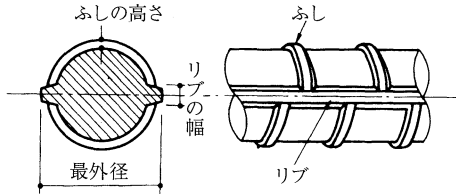


図 2.12 異形鉄筋の一例

溶接金網については、引張強度が 490 N/mm² (50 kgf/mm²) 以上と規定されている。鉄線の直径は 4 mm 以上のものを使うことになっているが、主筋方向は 6 mm 以上が望ましい。主筋にはほとんど異形鉄筋を使用するが、溶接金網はスラブや壁あるいは柱、梁のせん断補強筋として使われており、次第にその利用範囲が広がっている。

表 2.2 中の記号および単位は、1991 年に SI 単位系に改正されたため、従来の単位 [kgf/mm²] による表示を () 内に示し、SI 系の単位 [N/mm²] による表示に改めてある。両者の関係の一例を示すと次のようになる。

$$35 \text{ [kgf/mm}^2\text{]} = (35 \times 9.8 = 343) \approx 345 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

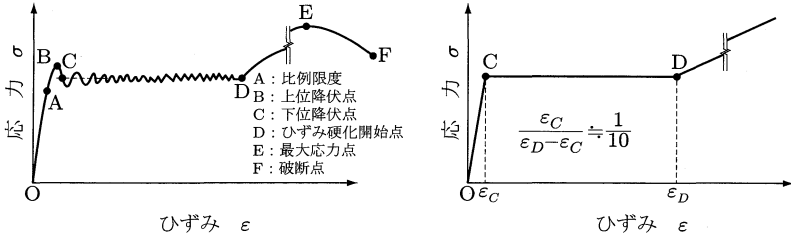
したがって、SD 35 (降伏点 : 35 kgf/mm²) は SD 345 (降伏点 : 345 N/mm²) となる。

2.2.2 鉄筋の応力-ひずみ曲線

鉄筋の σ - ϵ 曲線を図 2.13(a) に示す。O より A までは応力とひずみが正比例する直線であり、その勾配を E_s とすると

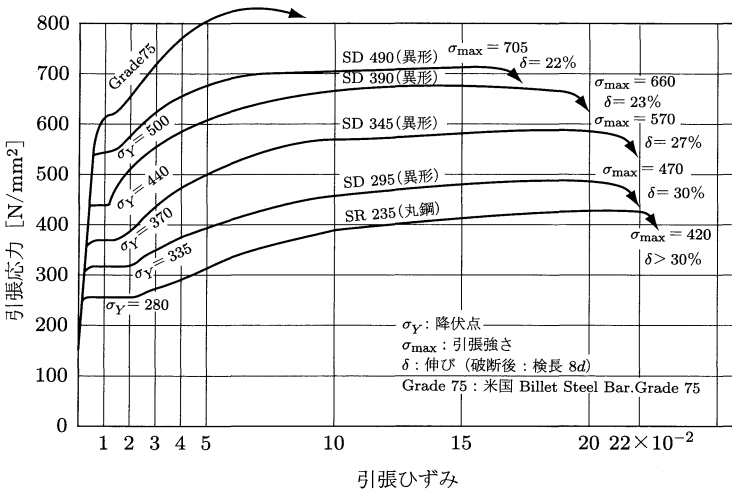
$$\sigma = E_s \cdot \epsilon \tag{2.7}$$

となる。 E_s を弾性係数あるいはヤング係数という。鋼のヤング係数は強度にかかわらずほぼ一定で、 $E_s = 2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ である。A 点を比例限度といい、この点よりさらに応力が高くなると、 σ - ϵ 曲線はわずかに曲がる。B 点を過ぎると応力は減



(a) σ - ϵ 曲線

(b) 理想化 σ - ϵ 曲線



(c) 各種強度レベルの σ - ϵ 曲線

図 2.13 鉄筋の σ - ϵ 曲線

少して C 点に達する。B 点を上位降伏点，C 点を下位降伏点という。試験測定が容易であることから，通常に用いる降伏点は上位降伏点をさす。C 点より D 点までは一定の応力を保ったままひずみだけが増え続ける。D 点を過ぎると応力が再び増加し始める。これは鉄筋がひずみ硬化するためで，D 点をひずみ硬化開始点といい，この点のひずみは C 点の降伏ひずみの約 10 倍前後の値となる。最大応力の E 点に達したあと，F 点で破断する。E 点を引張強度といい，F 点を破断強度という。図 2.13(b) は，同図 (a) の σ - ϵ 曲線を理想化して示したものである。許容応力度設計法では，OC の直線部分を用いるが，構造物の終局耐力を計算するような場合には，OCD のように仮定した σ - ϵ 曲線を使う。各種強度の鉄筋の σ - ϵ 曲線の実測例を同図 (c) に示した。

2.3 鉄筋とコンクリートの付着

2.3.1 付着のしくみ

(1) 付着の意義

RC構造は、鉄筋とコンクリートが一体となり相互に力を伝達し合いながら外力に抵抗する複合構造である。したがって、その複合作用が健全であるためには、鉄筋とコンクリートの界面における付着力が大きく、力の伝達が十分に行われることが要求される。例えば、単純梁が中央集中荷重を受けた場合、付着が健全であれば図2.14(a)に示すように最大曲げモーメント断面を中心にひび割れが分散し、部材の破壊は徐々に進行する。これに対し、付着のない梁(同図(b))では、引張破壊が最大曲げモーメント断面に集中し、無筋の梁とほぼ同様な破壊性状を示し、鉄筋コンクリートとしての複合効果が得られない。

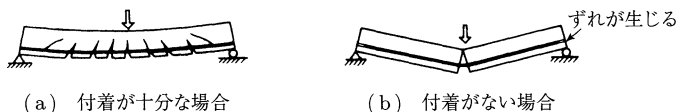


図 2.14 RC梁の破壊性状に及ぼす付着の効果

(2) 付着機構の分類

付着機構としては、一般に次の三つの作用が挙げられる。

- 1) 鉄筋とコンクリート界面の接着作用
- 2) 鉄筋とコンクリート界面の摩擦作用
- 3) 異形鉄筋表面のふしとコンクリートの機械的かみ合い作用

丸鋼の付着は接着作用と摩擦作用とからなり、鉄筋とコンクリート界面の相対ずれが生じると付着抵抗は消失し、摩擦抵抗だけが残る。

一方、異形鉄筋ではこれらの作用に加えて、図2.15に示すような鉄筋のふしとコンクリートのかみ合いによる機械的な抵抗が生じる。RC部材の主筋には異形鉄筋が使用されるので、3)の付着機構が最も重要である。

(3) 異形鉄筋の付着機構

異形鉄筋の付着の破壊機構は次の三つに大別される。

- 1) ふしの支圧面積が過小な場合のふし間のコンクリートの局部圧縮破壊(図2.16(a))
- 2) ふしの支圧面積が十分な場合の鉄筋周囲のコンクリートの割り裂き破壊(図2.17)

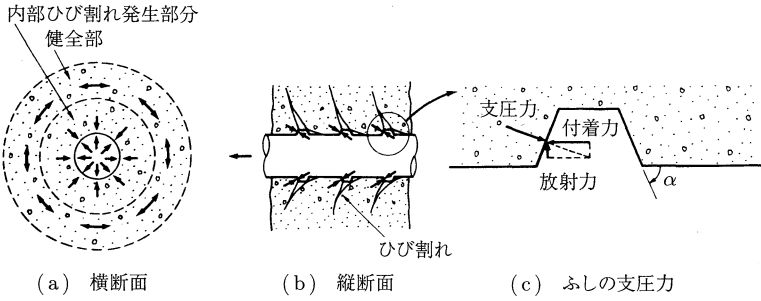


図 2.15 引抜き試験体の内部ひび割れ発生後の状態 (後藤)

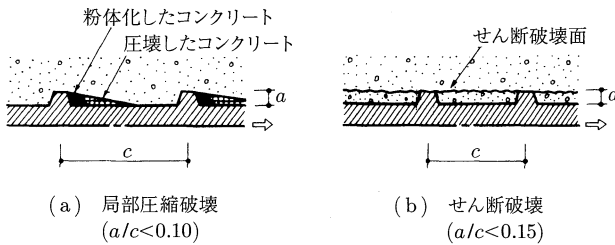


図 2.16 異形鉄筋のふし間の破壊メカニズム (R. Park and T. Paulay)

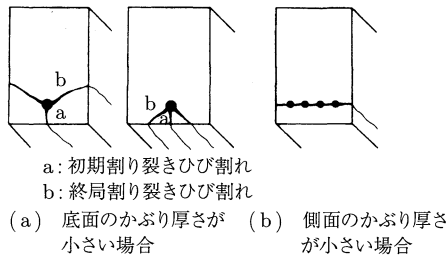


図 2.17 割り裂き破壊の基本形態

3) 鉄筋周囲のコンクリートの横拘束が十分な場合のふし間のコンクリートのせん断破壊 (図 2.16(b))

図 2.16 に示すように、異形鉄筋周囲のコンクリートには、ふしの高さ a に比べてふしの間隔 c が大きい場合に局部圧縮破壊が、逆の場合に周囲のコンクリートの割り裂き破壊またはふしの頂部を連ねる面でせん断破壊が生じる。このせん断破壊が生じるようになるふしの形状 (a/c がおよそ $0.15 \sim 0.2$) が異形鉄筋の形状を決める際の一つの目安となる。

図 2.17 は割り裂き破壊の基本的な形態を示したものである。異形鉄筋周囲のコンクリートのかぶり厚さが十分でない場合には、鉄筋の半径方向のひび割れが部材の表面に達して鉄筋に沿う縦ひび割れを誘発する。この縦ひび割れを伴う破壊は極めて脆性的であるが、RC 部材の付着破壊は多くの場合この形態をとる。そのため、部材の靱性確保の観点からも、十分なかぶり厚さの確保や横補強筋による拘束などの配慮が重要である。ただし、横拘束筋の量を極度に増やしても、ふし間のせん断破壊を防止するには至らない。

2.3.2 付着応力と付着強度

(1) 付着応力

■▶ コンクリート中の鉄筋に軸応力の変化 $\Delta_s\sigma$ があれば、図 2.18 に示すように、その場所には付着応力 τ_a が発生している。付着応力は鉄筋表面の単位面積当たりに生じる平均応力で表し、鉄筋の微小長さ Δx における力の釣合いから次式のように求められる。

$$\tau_a = \frac{A_s \cdot \Delta_s \sigma}{\pi \cdot D \cdot \Delta x} = \frac{D}{4} \cdot \frac{\Delta_s \sigma}{\Delta x} \tag{2.8}$$

ここに、 A_s : 鉄筋断面積、 D : 鉄筋径

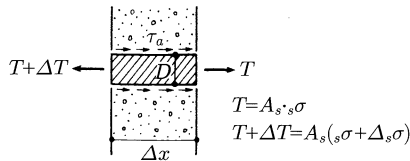


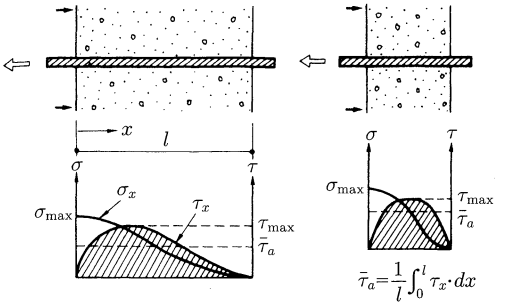
図 2.18 付着応力の定義

(2) 付着強度

■▶ 付着強度は、一般に破壊時の付着応力の大きさとして表される。ただし、異形鉄筋の付着強度は、多くの場合かぶりコンクリートの割り裂き面積と引張強度にかかわる量であり、(1)で定義した鉄筋表面の付着応力として取り扱うことは必ずしも合理的ではない。このように、異形鉄筋の付着強度とは便宜上の値であり、その大きさはコンクリートのかぶり厚さや鉄筋径などに影響されることになる。

(3) 付着応力分布と平均付着強度

■▶ (1)では、ある微小部分における付着応力を定義した。しかし、実際の付着作用は鉄筋のある長さに渡って生じる。図 2.19 は鉄筋がコンクリートから引き抜かれる際に生じる付着応力 (τ_x) および鉄筋の軸方向応力 (σ_x) の分布を示したものである。図から明らかなように、局所的な付着応力の最大値 (τ_{max}) は付着長さにかかわらずほぼ等しいが、全付着域における平均付着強度 ($\bar{\tau}_a$) は付着長さによって相違する。すなわち図 2.20 に示すように、付着長さが増加しても引抜き力はそれほど増加せず、結局、平均付着強度は付着長さの増加に伴って減少する。



(a) 付着域が長い場合 (b) 付着域が短い場合

図 2.19 付着応力分布および鉄筋の軸方向応力分布

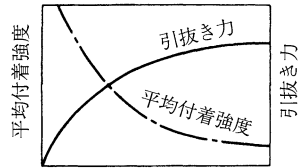


図 2.20 付着長さおよび平均付着強度との関係

この傾向は引き抜ける異形鉄筋周囲のコンクリートが割れ裂き破壊する場合や丸鋼が引き抜ける場合に顕著である。

2.3.3 付着に影響を及ぼす要因

(1) 鉄筋の表面状態

丸鋼のように付着が主に摩擦作用に依存する場合には、鉄筋表面の平滑度の影響が大きい。例えば、鉄筋表面に生じた適度の錆は、付着の向上に貢献する。異形鉄筋の付着は、主にふしによる機械的かみ合い作用によってもたらされるため、その付着強度はふしの形状とピッチに依存し、丸鋼の付着強度の2~3倍程度である。

(2) コンクリートの強度

付着強度はコンクリートの圧縮強度の平方根または引張強度にほぼ比例して増大する。特に異形鉄筋では、周囲のコンクリートに半径方向のひび割れを生じること、かぶり厚さが小さい場合は異形鉄筋周囲のコンクリートに縦ひび割れが進展することによって終局付着破壊に至ること、などからも付着強度は引張強度と密接な関係があることがわかる。

(3) 鉄筋の位置および方向

図 2.21 は、鉄筋の位置および方向と付着強度(ここでは、引抜き試験において自由端のすべり量が 0.1 mm のときの平均付着応力)との関係を示したものである。図によれば、上端筋の付着強度は下端筋の付着強度のおよそ 1/2 である。これは、上端筋はコンクリートの沈下やブリーディングによる弱化層の影響を、下端筋は圧密の影響を受けやすい位置にあるためである。また、水平鉄筋の付着強度は垂直鉄筋の付着強度よりかなり小さい。これは、水平鉄筋の下側にはコンクリートの沈下やブリーディングに起因する空隙が生じやすいためである。

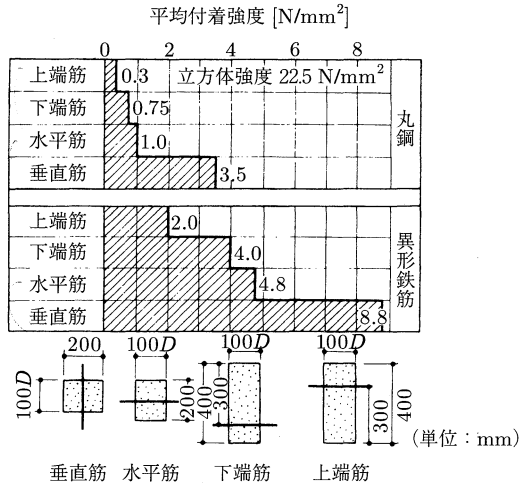


図 2.21 付着強度に及ぼす鉄筋位置の影響 (Isteg-Stahl 社)

(4) かぶり厚さ

鉄筋周囲のコンクリートのかぶり厚さの増大は、付着に対して極めて有効である。既に図 2.17 に示したように、異形鉄筋の場合には、かぶり厚さが十分に確保されていないと割り裂き作用によって部材の側面または鉄筋に沿う縦ひび割れを生じて付着が劣化する。この傾向は鉄筋径が大きいほど著しく、一般に付着強度はかぶり厚さ a と鉄筋径 D の比 a/D に比例する。

(5) 鉄筋周囲の横補強筋

異形鉄筋が引き抜ける際には、鉄筋と直角方向にコンクリートを押し広げようとする放射状の力が生じる。この際、かぶりコンクリート中にコンクリートの膨張を拘束する補強筋が配置されていれば、図 2.22 に示すように、割り裂きひび割れの発生による付着応力の低下が大幅に改善される。

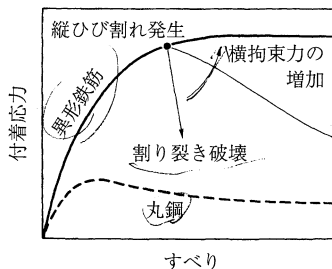


図 2.22 付着応力-すべり曲線に及ぼす横拘束の影響

(6) 締固め

コンクリートの締固めが不十分な場合には付着強度が低下する。この原因による付着強度の低下は、適切な再振動締固めを行うことによって防止できる。

2.3.4 付着応力-すべり曲線

▶▶ 付着応力の発生と同時に鉄筋コンクリート間には相対変位、すなわちすべりが生じる。たとえ付着強度が同じであっても、そのときのすべり量が大きいとコンクリートにひび割れが生じやすくなる。そのため、部材の力学挙動を解析するためには、付着強度のみならず、付着応力-すべり関係を把握しておくことが重要である。

図 2.23 は、コンクリート中に埋め込まれた鉄筋のある位置 x の微小長さにおける付着状態を示したものである。微小長さ dx のコンクリートが力を受けて変形後 dx' となり、鉄筋とコンクリート間に相対変位 dS_x が生じたとすると、変形の適合条件および力の釣り合い条件から次式が得られる。

$$\frac{d^2 S_x}{dx^2} = \frac{(1+n \cdot p)}{E_s \cdot A_s} \cdot \psi \cdot \tau_x \tag{2.9}$$

ここに、 n : ヤング係数比 ($= E_s/E_c$)

p : 鉄筋比 ($= A_s/A_c$)

ψ : 鉄筋の周長

式 (2.9) は付着の基本式と呼ばれ、付着応力 τ_x はすべり S_x の関数として与えられる。この関係を明らかにしておくことが RC 部材内部の応力状態や変形性状を解析する際に極めて重要となる。

図 2.24 は、引抜き試験によって求められた付着応力 (τ)-すべり (S) 曲線の例である。ここで付着応力の最大値はすべりがおよそ 0.2 mm のとき生じているが、この場合のすべりとは鉄

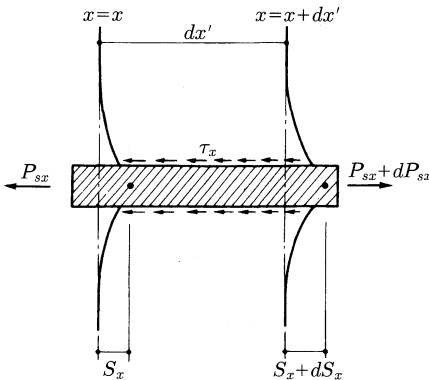


図 2.23 微小長さの付着応力状態

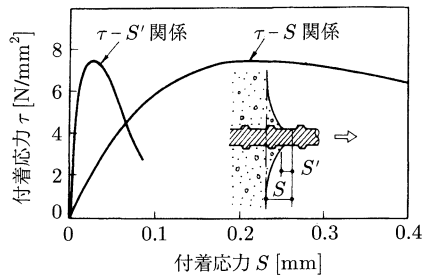


図 2.24 引抜き試験より得られる付着応力-すべり曲線

筋の引抜きの影響を受けないコンクリート端面からの鉄筋の相対すべり量 (S) であり、鉄筋とコンクリート界面における相対すべり量 (S') は上記の値よりオーダーが一つ低い。有限要素解析などにはこの界面の付着応力-すべり関係が用いられる。

図 2.25 は正負の繰返しすべりを与えた場合の付着応力とすべりの関係を定性的に示したものである。異形鉄筋の場合でも先に経験した最大のすべり以内の範囲では、摩擦的な機構しか働かず付着応力は激減する。しかし再度最大すべりに近づくと機械的抵抗が回復し、付着抵抗が急激に増加する。それに対して、丸鋼はすべりの大きさにかかわらず一定の付着応力を示す。

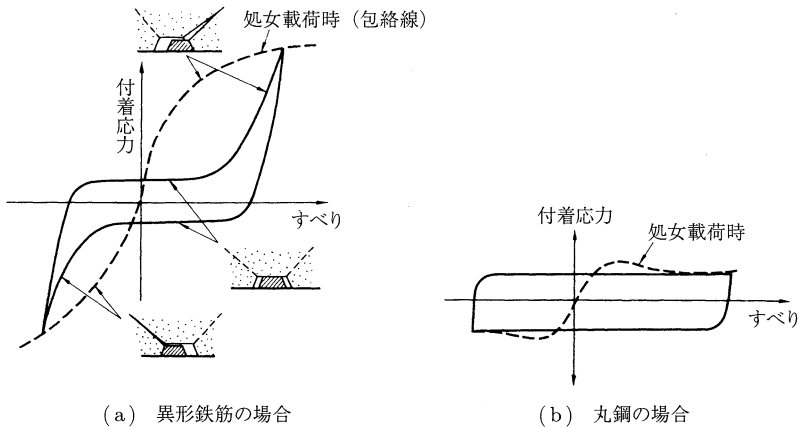


図 2.25 正負繰返し荷重下の付着応力-すべり曲線と付着機構 (森田)

2.4 許容応力度と材料強度

2.4.1 許容応力度

許容応力度とは、構造部材に生じている応力が材料強度に対して一定の応力以下になるように割り引いた材料の応力限度のことをいう。この割り引き率を材料安全率といい、鉄筋とコンクリートでは、この安全率が異なる。

許容応力度には、長期許容応力度と短期許容応力度がある。長期許容応力度は、クリープによって過大な変形が生じたり、常時に有害なひび割れが入ることを防ぐために材料強度をかなり割り引いた値にしてある。短期許容応力度は、鉄筋では基本的には降伏点強度をとり、コンクリートではばらつきを考慮して材料強度を低減した値としている (図 2.26 参照)。

RC 規準では、それぞれ次のように許容応力度を定めている。

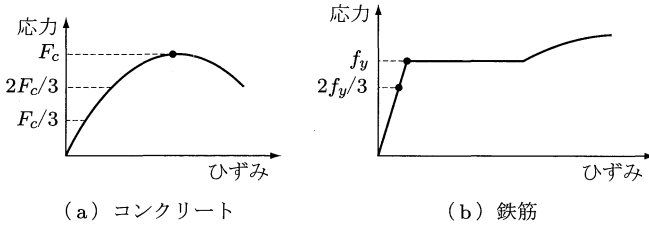


図 2.26 許容応力度の概要

(1) コンクリートの許容応力度

コンクリートの許容圧縮応力度は、表 2.3 に示すように、長期で安全率を 3 とし、短期で安全率を 1.5 として定めている。許容せん断応力度は、長期では部材にせん断ひび割れが発生しないことを前提として、短期ではひび割れの発生は許容するが、破壊しないことを条件にして定めている。

表 2.3 コンクリートの許容応力度 [N/mm²]

種別	長期		短期	
	圧縮	せん断	圧縮	せん断
普通コンクリート	$\frac{1}{3}F_c$	$\frac{1}{3}F_c$ かつ $(0.5 + \frac{1}{100}F_c)$ 以下	長期の値 の 2 倍	長期の値 1.5 倍
軽量コンクリート		普通コンクリートの 0.9 倍		

(2) 鉄筋の許容応力度

鉄筋の長期許容応力度は、コンクリートの最大ひび割れ幅がおよそ 0.3 mm 以下になるとともに、鉄筋の降伏点強度に対する安全率が一定になるように定められている。短期許容応力度は、鉄筋の JIS 最小降伏点強度としている。それぞれの許容応力度を表 2.4 に示す。

表 2.4 鉄筋の許容応力度 [N/mm²]

鉄筋の種類		JIS 規格 降伏点	長期		短期	
			引張・圧縮	せん断補強	引張・圧縮	せん断補強
丸鋼	SR 235	235	160	160	235	235
	SR 295	295	160	200	295	295
異形	SD 295 A,B	295	200	200	295	295
	SD 345	345	220(200)	200	345	345
	SD 390	390	220(200)	200	390	390
溶接金網		295	200	200	...	295

注) () 内の数値は、D 29 以上の太さの鉄筋に適用する。

(3) 許容付着応力度

RC 規準による異形鉄筋とコンクリート間の許容付着応力度を表 2.5 に示す。水平上端筋は、コンクリートの沈下やブリーディングなどにより下端筋や縦筋に比べて付着強度が低下する。

表 2.5 異形鉄筋のコンクリートに対する許容付着応力度 [N/mm²]

普通コンクリート	長期		短期
	上端筋	その他の鉄筋	
	$0.8 \times \left(\frac{F_c}{60} + 0.6 \right)$	$\frac{F_c}{60} + 0.6$	長期に対する 1.5 倍

- 注) 1. 上端筋とは曲げ材にあってその鉄筋の下に 300 mm 以上のコンクリートが打ち込まれる場合の水平鉄筋をいう。
 2. F_c はコンクリートの設計基準強度 [N/mm²] を表す。
 3. 本表の許容付着応力度は、第 9 章の配筋による修正係数とあわせて使用される値である。
 4. 軽量コンクリートでは本表の値に 0.8 を乗じる。

2.4.2 設計用諸定数

RC 規準では、断面設計を行う際に使用するヤング係数、ポアソン比および熱膨張係数の値を表 2.6 のように定めている。なお、コンクリートに対する鉄筋のヤング係数比 n は、曲げ部材の断面算定時に必要となるが、コンクリートの設計基準強度に応じて $n = 9 \sim 15$ の値が与えられている (第 3 章参照)。

表 2.6 RC 構造設計用の材料定数 (RC 規準)

材料	ヤング係数 [N/mm ²]	ポアソン比	線膨張係数 [1/°C]
鉄筋	2.05×10^5	—	1×10^{-5}
コンクリート	$3.35 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{24} \right)^2 \times \left(\frac{F_c}{60} \right)^{\frac{1}{3}}$	0.2	1×10^{-5}

- 注) γ : コンクリートの気乾単位容積重量 [kN/m³]
 F_c : コンクリートの設計基準強度 [N/mm²]

演習問題 2

1. コンクリートの種類を列挙し、それぞれの特徴について説明せよ。
2. SD 345 の鉄筋の一般性質について述べよ。
3. 気乾重量 36.1 N の普通コンクリート供試体 ($\phi 100 \times 200$ mm) の圧縮試験を行った結果、最大荷重が 164.9 kN で、応力が最大荷重の 1/3 のときの縦ひずみが 333×10^{-6} 、

横ひずみが 55.5×10^{-6} であった。このコンクリートの単位容積重量，圧縮強度，ヤング係数，ポアソン比，およびせん断弾性係数を求めよ。また，引張強度はどの程度になるか予測せよ。

4. 断面積が $1 \times 10^4 \text{ mm}^2$ のコンクリート柱に 50 kN の荷重を連続載荷したとき，クリープ変形を考慮した最終ひずみを求めよ。ただし，コンクリートのヤング係数は $2.5 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ，最終クリープ係数は 4 とする。
5. コンクリートと鉄筋の付着に影響を及ぼす要因を挙げ，それぞれのメカニズムを説明せよ。