

第 1 章

コンクリート構造と設計法の概説

1.1 鉄筋コンクリートの特徴

鉄筋コンクリート構造およびプレストレストコンクリート構造は、コンクリートにそれぞれ補強材および初期応力を施すことにより成り立つ複合構造である。すなわち、コンクリートの内部に鉄筋を配置し補強されたコンクリートを鉄筋コンクリート、PC 鋼材を用いてあらかじめ圧縮応力を導入したコンクリートをプレストレストコンクリートと呼び、この2つの形式を鉄筋コンクリートと総称して本書で取り扱う。さらに、図-1.1には、第1章から第9章の全体の流れの中でどの部分を学習しているかについて容易に理解できるように、フローを示す。

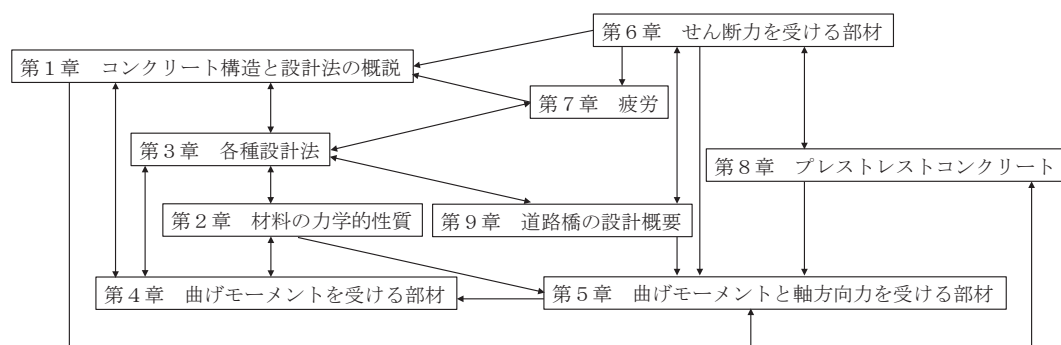


図-1.1 全体の流れ

1.1.1 コンクリートの成立

コンクリートは、セメントと水を混合したセメントペーストを接着剤とし、これに砂（細骨材）を混ぜることでモルタル、さらに、このモルタルに砂利（粗骨材）などの岩石片を加え混合・結合させたものを総称し、建設材料として最も広範囲に使われている複合材料である。かつては、混凝土（こんくりーと）と漢字で記されていたことから、固まるのは乾くのではなく、水とセメントの化学反応（水和反応）による結合であることが理解できる。通常、このコンクリートの流動性、空気量、固まる（硬化する）までの時間を調整するだけでなく、強度、ワーカビリティおよび耐久性などの品質を改善する目的で、混和材料（使用量により混和剤または混和材）が混入される。

コンクリートは建設材料として強固なイメージがあるが、例えば、地震のような大きな外力が作用した場合、図-1.2に示すように、圧縮力に対しては強いが、曲げと引張りに対しては弱いといった固有の性質を有している。そのため、コンクリートには写真-1.1に示すようなひび割れと欠けやすいといった弱点がある。その原因には、強固で変形しづらいという性質が影響している。さらに、ひび割れは外力だけでなく、コンクリート中の水分が減少することと写真-1.2

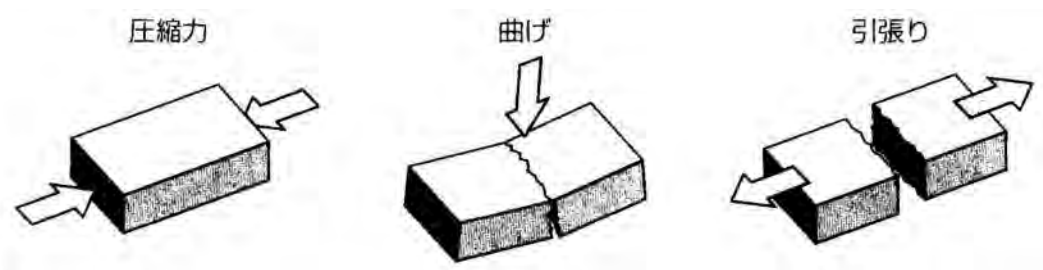


図-1.2 コンクリート固有の性質¹⁾



写真-1.1 RC 橋（地崎道路株式会社提供）



写真-1.2 PC 橋（ショーボンド建設株式会社補修工学研究所提供）

に示すようなコンクリート自体の劣化によっても生じる。前者として、コンクリート中の水分が外部に逸散されることで生じる**乾燥収縮**と、セメントの水和反応によりコンクリート中の水分が消費されることで生じる**自己収縮**がある。後者は、コンクリート自体の組織が緩み強度低下を生じる劣化ひび割れで、アルカリシリカ反応、凍害、疲労によるひび割れがある。

現在、確認されている最も古いコンクリートは、約9000年前のものでイスラエルの南ガレリア地方のイフタフ遺跡で発見され、大型居住跡の床として使われていた²⁾。その後、古代エジプトから18世紀にかけて火山灰と石灰を混ぜて作ったポゾランセメントを用いて、土木構造物と建築物が造られた。特に、2000年前の古代ローマ帝国ではローマン・コンクリートが使用され、現代のコンクリートより耐久性が高い無筋コンクリート（コンクリートだけで外力に対して抵抗する）で水道橋、トンネルはもとより、今なお構造が維持できている遺跡などが造られた。現代のコンクリートは、1824年にイギリス人のアスペディン（Aspdin）が発明したポルトランドセメントが広まったもので、ローマン・コンクリートとは異なる。ローマン・コンクリートの詳細な製造法はローマ帝国滅亡とともに失われたが、それらを起源とするジオポリマーコンクリート³⁾に関する研究が現在も行われている。また、建設分野のCO₂排出量の削減を目指した環境配慮型コンクリート、または低炭素型コンクリート、そして完全リサイクル可能なカーボンニュートラルコンクリート⁴⁾など、サステナブルな取組みが進められている。さらに、常識を覆す新たなコンクリートとしてコンクリート自体がひび割れを感知し、内部に組み込まれた修復機構によって、自らが修復する自己治癒コンクリート⁵⁾の開発が行われている。

1.1.2 鉄筋コンクリートの成立ち

鉄筋コンクリートは、鉄筋とコンクリートという非常に異なる力学的性質を持つ2種類の材料から構成され、引張力に弱いというコンクリートの短所を鉄筋で補強することで成り立つ複合材料である。表-1.1は鉄筋とコンクリートの機械的（力学的）性質⁶⁾、図-1.3は応力－ひずみ曲線を示したものであり、次のような力学的・材料的特徴を持っている。

- ①圧縮強度について、鉄筋はコンクリートの10～20倍程度である
- ②引張強度について、鉄筋はコンクリートの100～200倍程度である
- ③鉄筋は圧縮強度と引張強度がほぼ等しいのに対し、コンクリートの引張強度は圧縮強度の1/10程度となり、コンクリートが引張に対して弱いことがわかる
- ④ヤング係数（図-1.3の弾性範囲OA）について、鉄筋はコンクリートの10倍程度である
- ⑤破壊時のひずみについて、鉄筋はコンクリートに比べて極めて大きい

表-1.1 鉄筋とコンクリートの機械的（力学的）性質⁶⁾

	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ひずみ能力 (10 ⁻⁶)
コンクリート	20～100	1～3	15～50	3000～10000 (圧縮)
				200～500 (引張)
鉄筋	500～1000	500～1000	190～210	100000～300000

コンクリート：強度的方向性あり（圧縮＞引張）

鉄筋：座屈しない場合は、強度的方向性なし（圧縮＝引張）

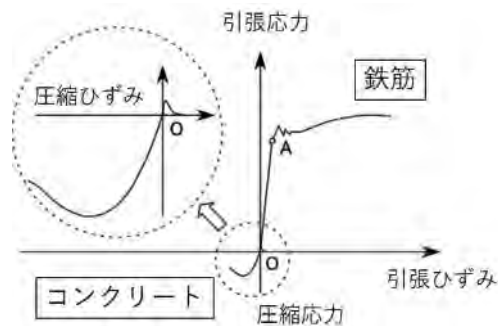


図-1.3 鉄筋とコンクリートの応力－ひずみ曲線

このような特徴から、コンクリートの中に鉄筋を配置し、引張力を負担させるのが、鉄筋コンクリートの基本的な考え方である。さらに、鉄筋コンクリートが長年にわたり構造部材として適用されてきたのは、次のような理由による⁷⁾。

- ①コンクリート中の鉄筋は腐食しにくい

コンクリート中のセメントペーストはアルカリ性（pH：12～13）なので、セメントペーストに保護されている鉄筋には酸化などの腐食が生じない。

- ②コンクリートと鉄筋との間で付着が確保できる

異形鉄筋の使用が前提の場合、鉄筋とコンクリートの付着強度は十分に大きく、ひび割れが生じてでも鉄筋がコンクリートの受け持つ応力を負担する。

- ③コンクリートと鉄筋の熱膨張係数がほぼ等しい

第1章 コンクリート構造と設計法の概説

鉄筋とコンクリートの熱膨張係数は、それぞれ約 $10\sim 12\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と約 $7\sim 13\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であり、ともに $10\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度ではほぼ等しいので、温度変化が生じても両者の間にずれと応力は、ほとんど生じない。

以上のような点を前提に成り立っている鉄筋コンクリートは、優れた合理的な構造材料であるが、他の構造材料と比較して欠点もある。その長所・短所は、次の通りである⁸⁾。

[長所]

- ・耐久性、耐火性、耐候性に優れており、維持管理がしやすい
- ・種々な形状・寸法の構造物を容易に一体としてつくることのできるため、継手が少なく、耐震性を確保しやすい
- ・材料の入手および運搬が容易であり、他の構造物に比べて経済的である
- ・構造物としての機能上、振動・騒音が少ない

[短所]

- ・鋼構造と比較して断面が大きくなるので、例えばスパン（支間）の大きな構造物および軟弱地盤上の構造物には不利である
- ・コンクリートの引張強度が低く、さらに乾燥によっても収縮することから、ひび割れが生じやすく、衝撃を受けると局所的に破損しやすい
- ・構造物に欠陥が生じた場合、修理または取壊しが困難である
- ・人的要因によって施工が粗雑になりやすい

すなわち、鉄筋コンクリート構造物を長期にわたり使用するには、良質の鉄筋とコンクリートを用いて入念な設計と施工、品質管理、維持管理を行っていくことが大切である。

鉄筋コンクリートは、1855年の第1回パリ万国博覧会へ2人のフランス人が出品したことで広く社会に認知された。1人目はランボー（Lambot）でボートを、2人目はコワネー（Coigne）で建物をそれぞれ展示した⁹⁾。写真-1.3にボートの製品と世界初の住宅をそれぞれ示す。コワネーは1861年に出版した書物で、「コンクリートと鉄棒の付着が十分確保されることによって、コンクリートが圧縮力に抵抗し、鉄筋が引張力に抵抗すること」を明らかにした。その後、アメリカ人の弁護士ハイアット（Hyatt）が鉄筋を引張側に配置することを明らかにし、1878年に鉄筋コンクリート構造の特許を取得している。



写真-1.3 ランボーのボートおよびコワネーの住宅^{10,11)}

日本では、広井勇が1903年に工学会誌で『鉄筋混凝土橋梁』を発表し、欧米諸国における鉄筋コンクリートを紹介し、新材料の有用性を指摘している。同年、田邊朔郎は琵琶湖疎水日ノ岡に、写真-1.4のメラン式アーチ橋を架設した¹²⁾。また、1906年には、わが国で最初の書籍となる『鐵



(a) 琵琶湖疎水日ノ岡第11号橋



(b) 架設当時

写真-1.4 メラン式アーチ橋^{13,14)}

筋コンクリート』が、田邊朔朗と井上秀二によって出版されている。そして、1931年に土木学会から鉄筋コンクリート標準示方書（現在のコンクリート標準示方書で、以下、土木学会示方書という）が初めて制定され、1964年に建設省（現 国土交通省）から現在の道路橋示方書の基になっている鉄筋コンクリート道路橋示方書が制定されている¹⁵⁾。その過程で木橋に代わって鉄筋コンクリート橋が中心的存在となった。

1.2 各種設計法

構造物に変位および応力が生じる原因となるものを**荷重**と呼び、常に作用するものを主荷重、常に作用しないものを従荷重という。主荷重には構造物自身の自重（死荷重）、群衆および自動車等の荷重（活荷重）、衝撃、プレストレス力、コンクリートの乾燥収縮およびクリープの影響、土圧および水圧等があり、従荷重には地震、風および温度変化の影響等がある。このような荷重または影響を**作用**と呼ぶ。ここでは、作用と荷重の違いと鉄筋コンクリート構造物の構造設計法の概念について述べる。

1.2.1 作用

荷重とは、構造力学の集中荷重、分布荷重、モーメント荷重等の力学計算の中で用いられる力（大きさ、方向、作用点）をモデル化したものである。それに対し、作用とは必ずしも力に限定したものではなく、もっと幅広い概念を持っている。すなわち、構造物または部材に応力および変形の増減、材料特性に経時変化をもたらす全ての働きで、持続性、変動の程度、発生頻度によって、一般に永続作用、変動作用、偶発作用の3つに分類される。

- ①永続作用とは、持続的に生じる作用であり、死荷重、土圧、プレストレス力、コンクリートの収縮およびクリープ等の影響がある
- ②変動作用とは、連続あるいは頻繁に生じ、その平均値と比較して変動が無視できない作用であり、活荷重、風荷重、雪荷重および温度変化等の影響がある
- ③偶発作用とは、設計耐用期間中に生じる頻度が極めて小さいが、生じると影響が非常に大きい作用であり、地震、津波、火災、強風および衝突荷重等の影響がある

さらに、作用はISO等の国際標準だけでなく、JIS¹⁶⁾にも反映されており、国土交通省が定め

る示方書の共通原則である土木・建築にかかる設計の基本¹⁷⁾ および土木学会の性能設計の標準である土木構造物共通示方書¹⁸⁾ にも作用の概念が取り入れられている¹⁹⁾。ここでは、永続作用の死荷重と変動作用の活荷重について述べる。

(1) 死荷重

死荷重とは主げた自体の重量であり、固定荷重とも呼ばれる。設計にあたっては、死荷重を表-1.2に定められている代表的な材料の単位重量から仮定して求め、設計完了後にあらためて寸法と単位重量から求める。

(2) 活荷重

活荷重とは主げたに作用する自動車荷重、群衆荷重であり、移動荷重とも呼ばれる。自動車荷重は、大型自動車の交通状況に応じて、A活荷重とB活荷重に区分されている。主げたの設計では、表-1.3の荷重を図-1.4に示すように、L荷重として車道部分に作用する2種類の等分布荷重 p_1 および p_2 を作用させる。このうち、等分布荷重 p_1 は、1橋につき1組のみ作用させる²⁰⁾。そして、等分布荷重 p_1 および p_2 は、着目する点または部材に最も不利な応力が生じるように、橋の幅員5.5mまでは等分布荷重 p_1 および p_2 を主載荷荷重、また残りの部分にはおのおのの1/2の従載荷荷重を載荷する。

表-1.2 代表的な材料の単位重量

材 料	鋼 材	鉄筋コンクリート	アスファルト
単位重量 (kN/m ³)	77	24.5	22.5

表-1.3 L荷重の強度

荷重	主載荷荷重（幅員5.5m）						従載荷荷重
	等分布荷重 p_1			等分布荷重 p_2			
	載荷長 D (m)	荷重（kN/m ² ）		荷重（kN/m ² ）			
		曲げモーメントを 算出する場合	せん断力を 算出する場合	L ≤80	80<L ≤130	130<L	
A 活荷重	6	10	12	3.5	4.3-0.01L	3.0	主載荷荷重 の50%
B 活荷重	10						

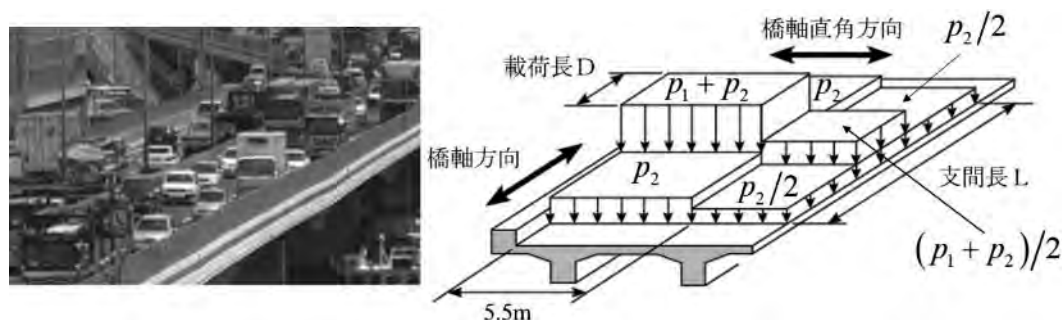


図-1.4 実際の活荷重とL荷重²¹⁾

1.2.2 構造設計法の概念

設計法については、許容応力度設計法、終局強度設計法、限界状態設計法および性能照査設計法の4種類がある。図-1.5に仕様規定型の許容応力度設計法から性能照査・性能規定型の性能照査型設計法への設計法の変遷と特徴を示す。なお、図中の○△は、それぞれ長所と短所を示す²²⁾。

ここでは、土木学会示方書において、構造物の限界状態に基づいた性能照査型設計法が採用されており、許容応力度設計法の適用も認めた上で限界状態設計法の適用を基本とした経緯から、許容応力度設計法と限界状態設計法を取り扱う。

(1) 許容応力度設計法

許容応力度設計法は、種々の視点から欠点が指摘されてきた設計法であるが、従来から多くの構造物で使われてきた。設計荷重によって生じる部材断面の応力度が弾性、すなわち材料の応力－ひずみ関係にフックの法則が成り立つという仮定に基づいている。基本的な手順は、図-1.6^{23,24)}のように与えられた設計荷重 F_k に対して、部材の断面力（曲げモーメント、せん断力、軸方向力） S が求まり、各材料（コンクリートおよび鉄筋）に生じる応力度 σ （図-1.7の圧縮側（上縁）のコンクリートの応力度 σ'_c （記号の'は圧縮側を意味する）、引張側（下縁）の鉄筋の応力度 σ_s およびせん断応力度 τ が生じ、詳細については、第4章を参照されたい）が得られる。一方、これとは別に使用される材料と同じ品質のものの材料試験からコンクリートの圧縮強度、鉄筋の降伏強度が得られ、これを材料強度（設計基準強度） f_k とし、コンクリートの設計基準強度および鋼材の降伏点に対し十分な安全性を見込んだ安全率 γ で除することで、許容応力度 σ_a が得られる。そして、各材料の応力度 σ が許容応力度以下となるように繰り返して、断面寸法等を求める方法である。

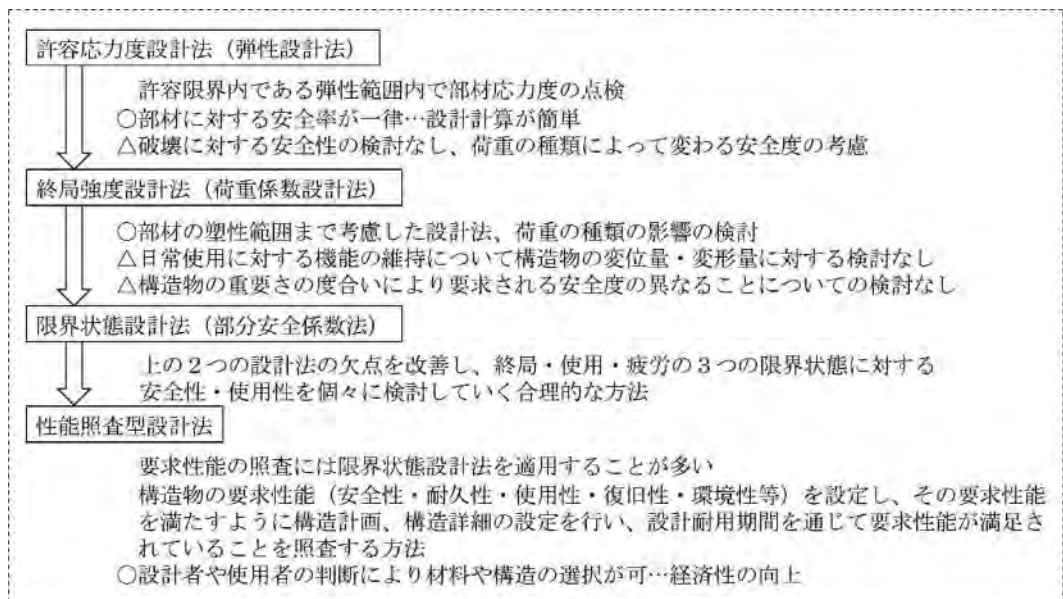


図-1.5 設計法の変遷と特徴²²⁾

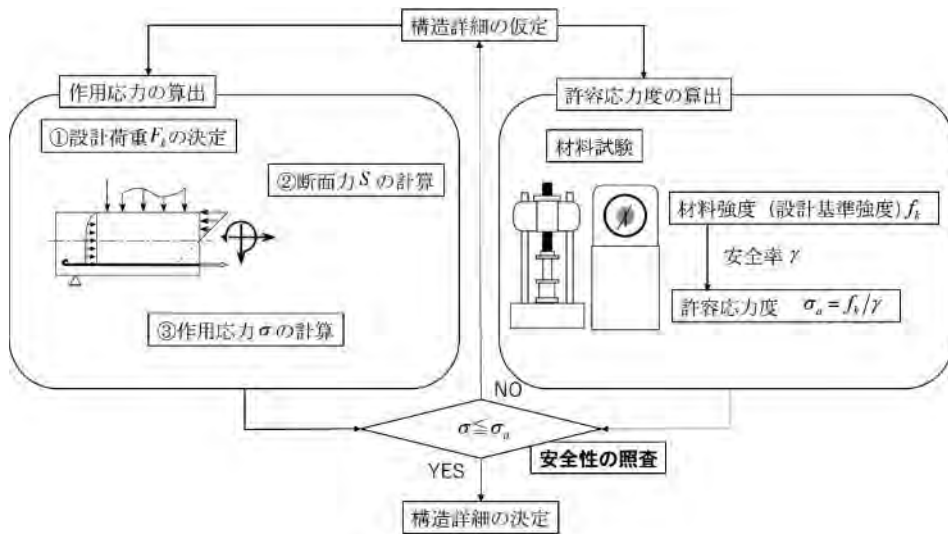


図-1.6 許容応力度設計法における設計手順^{23,24)}

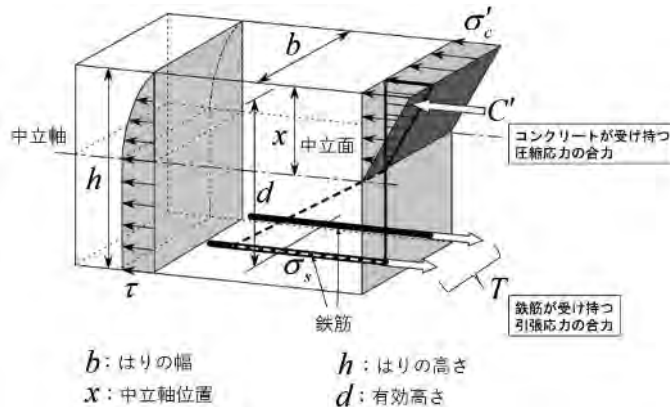


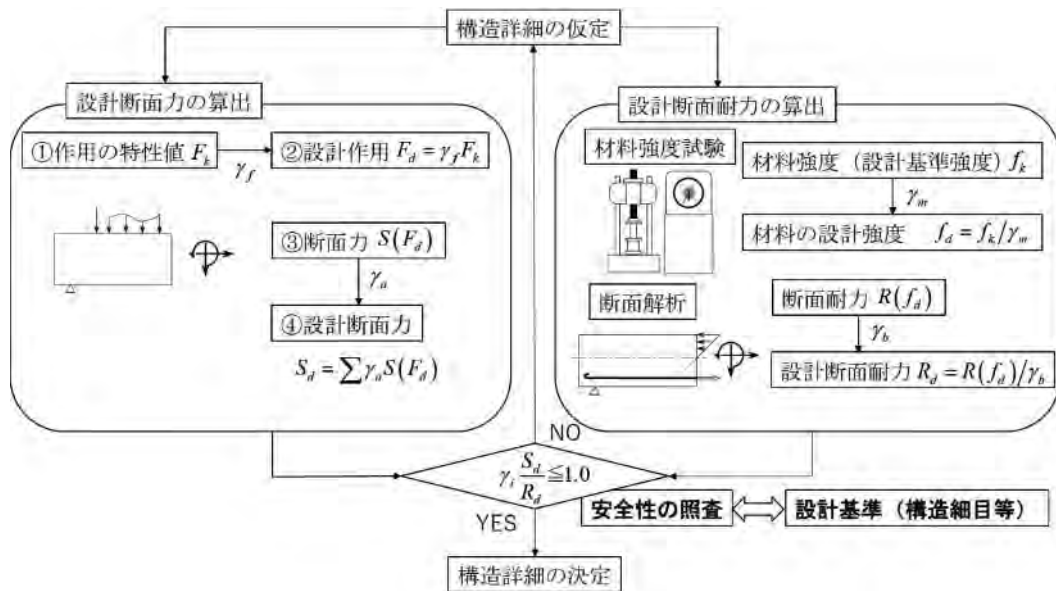
図-1.7 鉄筋コンクリートに生じる応力

(2) 限界状態設計法

構造物に作用する荷重の増加に伴い、弾性的であった挙動が塑性的となり、ついには破壊する。その過程は、ひび割れの発生・進展、たわみの増加、鉄筋の降伏、断面破壊等の際だった変化を示す特別な状態²¹⁾を示し、これらの特定の状態を**限界状態**と呼ぶ。この状態を設計の拠り所としている設計法が、限界状態設計法である。

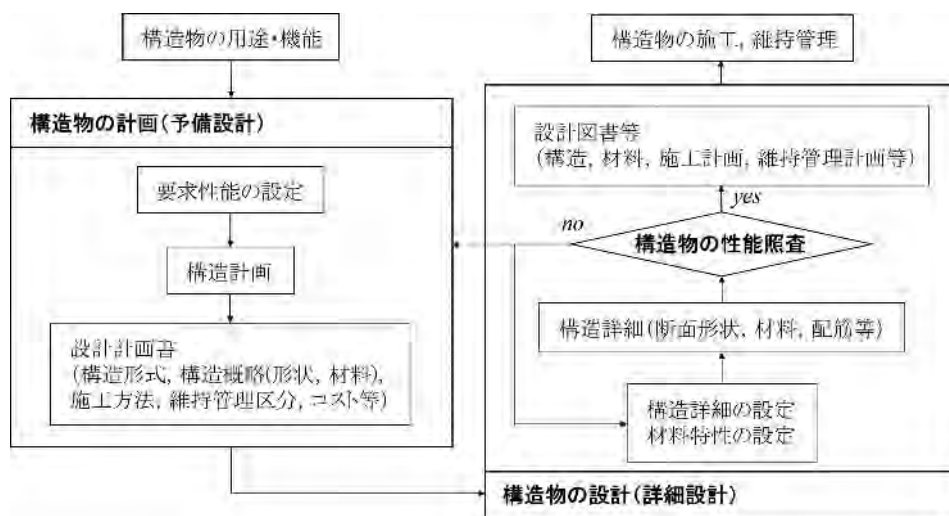
限界状態設計法では、一般に要求性能（安全性、耐久性、使用性、復旧性および環境性等）を明確に定め、それぞれに応じて限界状態を与える。そして、**設計耐用期間**を通じて構造物が限界状態に至らないことを照査し、要求性能を満足するかどうかを確認する。

図1-8^{20,21)}に従って説明すると、まず荷重の特性値 F_k を組み合わせて、荷重に対する荷重係数 γ_f を考慮し設計荷重 F_d を設定する。この荷重が作用した時の断面力 $S (F_d)$ を構造解析によって算出し、さらに安全側に構造解析係数 γ_a で割り増したものが設計断面力 S_d となる。一方、耐荷力としては、材料強度 f_k から材料係数 γ_m を用いてばらつきを考慮して若干割り引いた値が材料の設計強度 f_d であり、これを用いて計算された断面耐力を部材係数 γ_b で除したものが設計断

図-1.8 限界状態設計法における設計手順（終局状態の場合）^{23,24)}

面耐力 R_d となる。そして、設計断面力 S_d に対する設計断面耐力 R_d の比をとり、 $\gamma_i (S_d / R_d) \leq 1.0$ を満足すればよい。ここで、 γ_i は**構造物係数**と呼ばれ、構造物の重要度・社会的影響度を考慮して設定される。

構造物の設計の流れを図-1.9²²⁾に示す。設計では、まず自然条件、社会条件、施工性、経済性、環境適合性等の構造物の要件を考慮した個別の目的に応じて、**要求性能**を設定する。そして、その要求性能を満たすように構造物の構造計画、構造詳細の設定を行い、設計耐用期間を通じて要求性能が満足されていることを照査することになる。

図-1.9 構造物の設計の流れ²⁵⁾

さらに、サステナブル社会に求められる要求性能は、新規建設投資の時代から維持管理の時代に移行しつつあることから、長寿命化だけでなく十分な**環境性能**を持つことが重要となる。環境性能においても、構造物は設計、施工、供用、維持管理、解体・廃棄、再生利用のライフサイクルにわたって環境負荷が生じるため、一定の水準を設けて抑制することが必要である。

図-1.10²⁶⁾は、サステナブル社会に求められる要求性能を時系列変化で表したものである。わが国は地震国であることから、構造物の安全性が特に重要であるので、ここでは安全性能として**耐震性能**を示している。耐震性能は当初は変化しないが、地震被害の経験により見直される耐震基準とともに変化する要求性能を満足させるためには、耐震補強により性能を引き上げる必要がある。これに対して、耐久性能は経年劣化により時間とともに低下し、やがて当初の要求性能を満たさなくなる。環境性能は、耐震性能および耐久性能と異なり、一般に環境負荷の低減性能なので、ライフサイクルにわたって何らかの環境負荷を与える。各種設計法の詳細については、第3章を参照されたい。

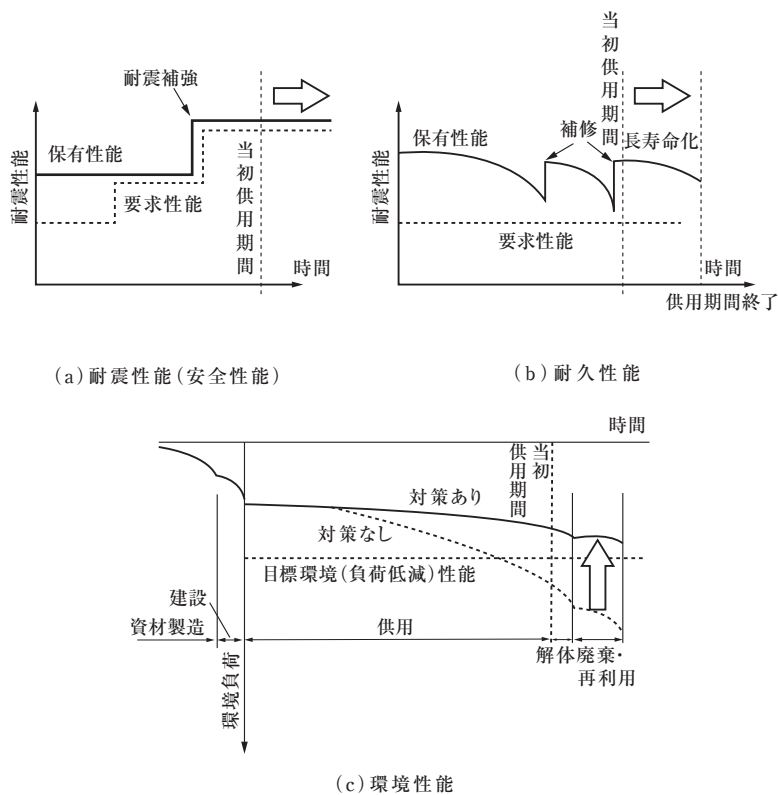


図-1.10 耐震・耐久・環境性能の時系列変化²⁶⁾

1.3 コンクリート構造の種類と特徴

鉄筋コンクリート構造、プレストレストコンクリート構造に対し、無筋コンクリート構造は鉄筋による補強がなく、コンクリートだけで荷重に抵抗する構造である。

ここでは、構造力学で学ぶ内容を用いて無筋コンクリートのはりについて簡単な計算例を示す。

まず、図-1.11(a)に示すはりのスパン（支間長）を $L=10\text{m}$ 、はりの断面を $b=40\text{cm}$ 、 $h=80\text{cm}$ とした場合、はりの自重（等分布荷重） w は、コンクリートの単位体積重量を 23kN/m^3 とすると、 $w=23 \times 0.4 \times 0.8=7.36\text{kN/m}$ となる。次に、はりの断面 2 次モーメント I は $I=bh^3/12=0.017\text{m}^4$ 、はりの中央に発生する曲げモーメントは $M=w \times L^2/8=92\text{kN} \cdot \text{m}$ となることから、はりの下端（引張側）の引張応力度は、中立軸からの距離 y を 0.4m とし、 $\sigma=M/I \times y=2,165\text{kN/m}^2$ となる。最後に無筋コンクリートの許容引張応力度 σ_{ta} をコンクリートの設計基準強度 f'_{ck} （ここでは、 24N/mm^2 ）の $1/80$ とすると、 $\sigma_{ta}=300\text{kN/m}^2$ であることから、コンクリートの安全率（ $3 \sim 4$ ）を考慮しても、はりの自重だけで破断する。このような場合、はりの高さを高くすることも考えられるが、自重以外に様々な荷重がはりに作用するので、非常に不経済なはりの断面となる。以上の理由から、無筋コンクリートは断面が大きくなっても問題のないダムおよびトンネル等の土木構造物で利用されている。

次に、図-1.11(a)に示すはりに荷重および反力の外力が作用し、断面力のせん断力と曲げモーメントが生じる場合を考える。図(b)から(d)は左側が荷重を下向きに作用させた場合、右側が荷重を上向きに作用させた場合である。図(c)のはりの軸に対して直角にはりをハサミで切断するような作用をせん断力 V といい、その断面から左（または右）にある全ての外力の断面に平行な外力の合力として求められる。右下がりにずらそうとするせん断力を正のせん断力、その反対が負のせん断力である。次に、図(d)のはりを凹凸状に反らせる作用を曲げモーメント M といい、その断面から左（または右）にある全ての外力の、その断面の図心についてのモーメントの和として求められる²⁷⁾。曲げモーメントははりを曲げようとする力であることから、はりの下側に引張、はりの上側に圧縮が生じるような向きに作用するものを正の曲げモーメント、その反対が負の曲げモーメントである。

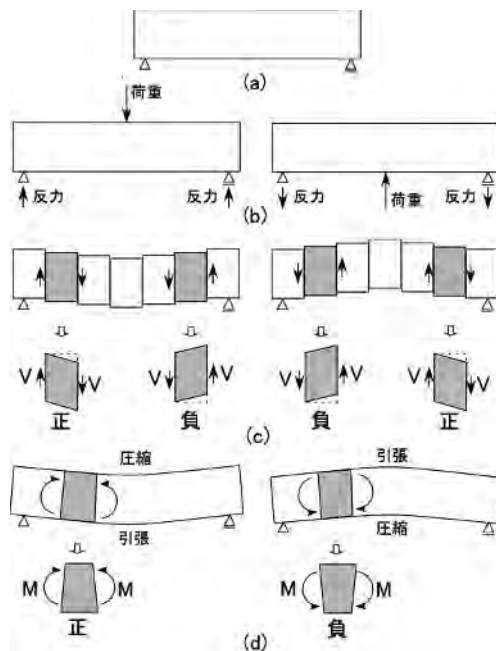


図-1.11 断面力の正負

さらに、許容応力度設計法では、弾性理論によって生じる応力をもとに設計しており、**平面保持の仮定**が設計計算上の仮定の1つである。平面保持の仮定とは、部材の変形前に平面だった断面は変形後も平面であることを仮定している。しかしながら、せん断スパン比（スパンの1/2とよりの有効高さ d の比）が小さいディープビームではこの仮定が成り立たないことに注意が必要である²⁸⁾。

1.3.1 鉄筋コンクリート構造

(1) 曲げモーメントとせん断力が作用するとき

鉄筋コンクリート構造は、1.1.2で述べたように、複合材料である。荷重作用に対して鉄筋コンクリート構造が抵抗するには、圧縮力を負担するコンクリートと引張力を負担する単鉄筋が境界面での付着（くっつく程度）により力の伝達を行う必要がある。図-12(b)に示すように曲げによって引張応力度が生じ、コンクリートにひび割れが生じた後、引張側に軸方向鉄筋（主筋）を配置しているが界面に付着がないため鉄筋がコンクリート中を滑り引張力を負担できない。そして、ひび割れが進展しはりが破断する。図(c)は付着があるので、ひび割れが生じても鉄筋が引張力を分担するため、ひび割れは上端（圧縮側）まで進展することがなく、かなり大きい荷重作用が生じない限りはりは破壊しない。ただし、鉄筋のみではひび割れの発生に対するひび割れ発生強度を高めることがほとんどできない²⁹⁾。すなわち、断面寸法およびコンクリートの品質が同じ場合、図(a)の無筋コンクリートも鉄筋コンクリートもほぼ同じ荷重作用でひび割れが発生する。従って、一般に鉄筋が有効なのはひび割れが発生した後であり、通常の力学的計算および設計はひび割れ発生後の状態を基準（全ての引張応力度は鉄筋が負担する）としてなされている。

ここでは、外力が作用した場合にコンクリートのはりに発生するひび割れに着目する。このひび割れは、上述した断面力である曲げモーメントとせん断力に関連づけて整理されている。

図-1.13には、はりに発生する3種類のひび割れの状況を示す。曲げモーメントが作用すると、軸に対し直角方向に入る曲げひび割れと斜め方向に入る曲げせん断ひび割れが生じる。曲げひび割れは、せん断応力度がほとんど生じない位置で生じるひび割れで、下端から上端に伸びる特徴がある。曲げせん断ひび割れは、せん断応力度より曲げ応力度が大きい位置で生じるひび割れで、下端から上端および荷重作用点に向かって伸びる特徴がある。せん断ひび割れは、せん断応力度が大きい位置で生じるひび割れで、中立軸から荷重作用点に45°前後の方向へ向かって伸びる特徴がある。斜め方向に入る斜めひび割れは、破壊の進行が急激で変形性能が乏しくせん断破壊の原因となることから注意が必要である。

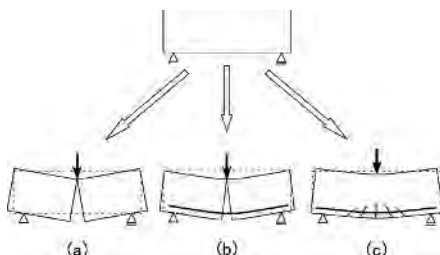


図-1.12 コンクリートと鉄筋の付着

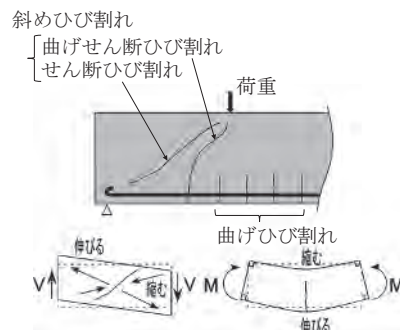


図-1.13 3種類のひび割れ

はりのせん断破壊を防止するには、引張側の鉄筋のみでは対応できない。その理由は、はりに地震荷重が作用すると図-1.11(d)に示す正負の曲げモーメントが作用し、圧縮側にも鉄筋を配置する必要があるからである。このような鉄筋の配置を単鉄筋に対し複鉄筋という。さらに、複鉄筋は有効高さが制限されている場合だけでなく、コンクリートのクリープおよび収縮に対しても有効に作用する。

さらに、軸方向の引張側と圧縮側の鉄筋だけでは斜め方向にコンクリートが引っ張られ、斜めひび割れが生じ、せん断破壊を起こす可能性がある。そこで、曲げモーメントを受ける場合と同様に、せん断力によって引っ張られるコンクリートを鉄筋で補強する必要があるので、図-1.14に示すせん断補強鉄筋を必ず入れ、圧縮側の鉄筋に定着させる。せん断補強鉄筋としては、図-1.15に示すスターラップ（あばら筋ともいう）と折曲げ鉄筋がある。スターラップは軸方向鉄筋と直角方向に配置され、折曲げ鉄筋は軸方向鉄筋を途中から折り曲げて斜め方向に配置し、1本の鉄筋で軸方向鉄筋だけでなく、せん断補強鉄筋としての役割を持っている。

はりのまとめとして、図-1.16に鉄筋の有無によるひび割れの影響を曲げモーメントとせん断力が作用した場合について示す。図-1.13に示すように曲げモーメントが作用した場合に曲げひび割れ、せん断力が作用した場合のせん断ひび割れが生じ、軸方向鉄筋が曲げひび割れ、せん断補強鉄筋がせん断ひび割れを抑制することがわかる。

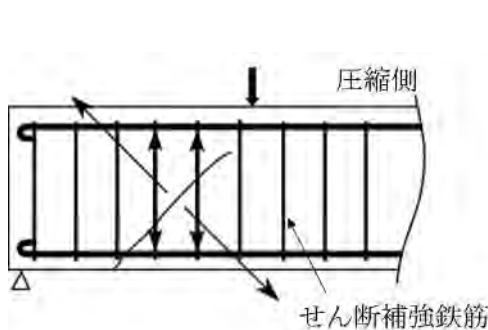
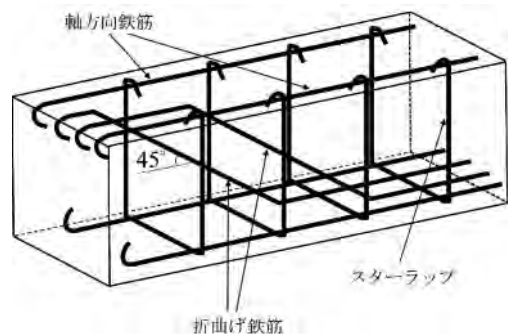
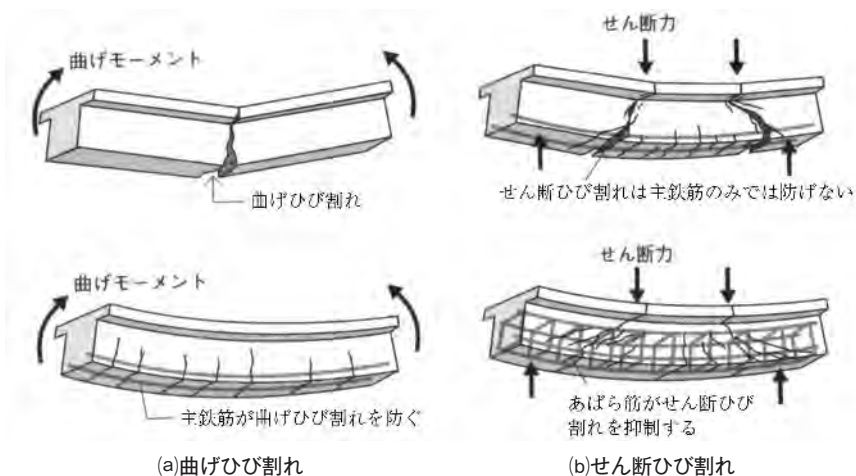
図-1.14 せん断補強鉄筋による補強³⁰⁾

図-1.15 スターラップと折曲げ鉄筋

図-1.16 鉄筋の有無による断面力とひび割れの影響³¹⁾

(2) 圧縮力が作用するとき

ここまでは、はりに曲げモーメントとせん断力が作用するときについて述べた。ここからは、**図-1.17**に示すように柱に断面力の軸方向力が生じる場合を考える^{32,33)}。柱の軸方向には軸方向鉄筋が柱の周辺に近い位置に配置され、**帯鉄筋**が軸方向鉄筋を囲むように高さ方向に一定間隔で配置されている。

まず、この柱から帯鉄筋を除き、上から外力（圧縮力）が軸方向に作用し縮む場合を考える。コンクリートと鉄筋のヤング係数は異なるので、同じ大きさの外力が別々に作用した場合は、ヤング係数の小さいコンクリートの圧縮変形が鉄筋と比べ10倍程度大きくなる。しかし、鉄筋コンクリートは付着により一体となって外力に抵抗するので、**図-1.18**に示すように、同じ圧縮変形となり鉄筋にコンクリートの10倍程度の圧縮応力度が生じる。

次に、柱に外力（引張力）が軸方向に作用し伸びる場合を考える。引張力が小さい領域では、**図-1.19(a)**に示すように鉄筋とコンクリートの引張変形は同じとなり、鉄筋にコンクリートの10倍程度の引張応力度が生じる。引張力が大きくなってくると、**図(b)**に示すようにコンクリートの応力度が引張強度に達し、柱の水平方向にひび割れが生じる。ひび割れが生じると、コンクリー

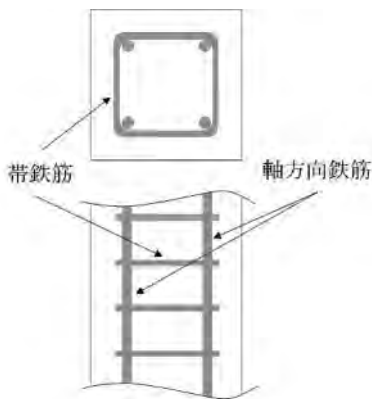


図-1.17 軸方向力を受ける柱の鉄筋³²⁾

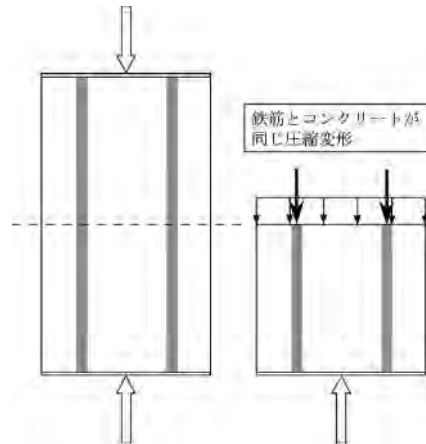
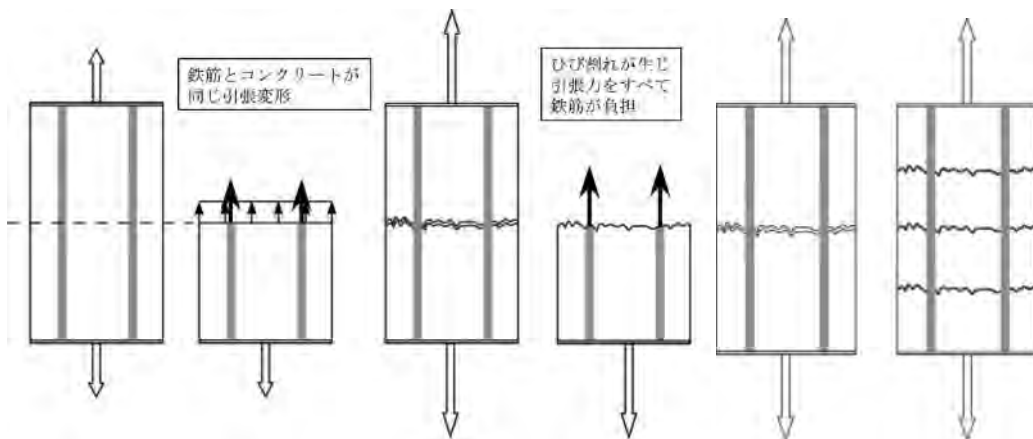


図-1.18 圧縮力を受ける柱³²⁾



(a) 小さい引張力 (b) 大きい引張力

図-1.19 引張力を受ける柱³²⁾

図-1.20 付着によるひび割れ³²⁾

トは力を伝達できなくなり、引張力を全て鉄筋が負担することになる。さらに引張力が大きくなると、ひび割れが生じて付着がない箇所では引張力は鉄筋が負担し、コンクリートのひび割れ幅が大きくなる。付着がある別な箇所では、同じ現象が生じて新たなひび割れが生じることになる。このためひび割れが多く発生すると、図-1.20に示すように、1本当たりのひび割れ幅は小さく抑制される。すなわち、この1本当たりのひび割れ幅が許容ひび割れ幅以下であれば、外部からの塩化物イオン等の浸透は小さくなると考えられる。

さらに、柱でははりのスターラップと同じくせん断力に抵抗するために、図-1.17に示す帯鉄筋が軸方向鉄筋を拘束している。その理由は、柱ははりと違い軸方向の伸び縮みに抵抗するだけでなく、図-1.21に示すように、地震時には上部構造の荷重を支えながら横方向の変形にも抵抗する必要があるからである。柱が大きな交番荷重を受けて左右に変形することで、曲げひび割れが柱の断面を切るように発生し、せん断ひび割れはX形のひび割れとなる³⁴⁾ (写真-1.5)。

以上から、鉄筋コンクリート構造では、鉄筋とコンクリートの付着性能を高めることが重要である。普通丸鋼 (JIS 記号 SR) より異形鉄筋 (JIS 記号 SD (写真-1.6)) がコンクリートとの付着強度が大きく、同じ異形鉄筋でも鉄筋の表面積が大きいほうが付着は大きくなる。従って、道路橋では1970年以降は異形鉄筋が用いられるのが通常であるし、太い鉄筋を使うより細い鉄筋を使って同じ断面積となるようにすることにより、適切に配筋を行う必要がある。鉄筋コンクリート構造の詳細については、第4章から第6章を参照されたい。

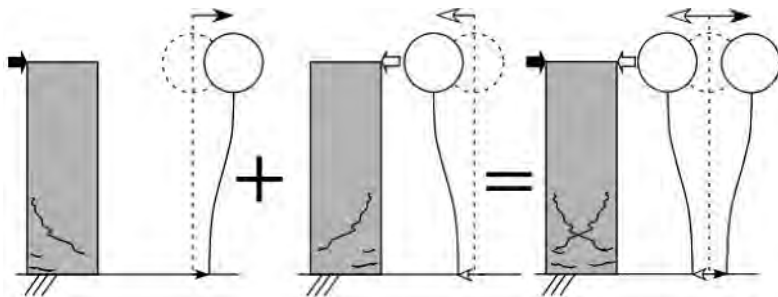


図-1.21 地震時に柱に生じるひび割れ



写真-1.5 道路橋の地震被害

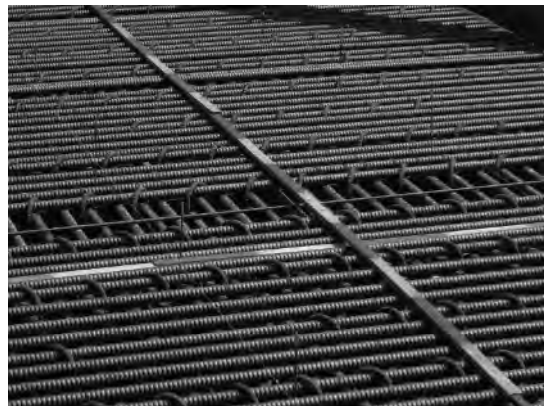


写真-1.6 異形鉄筋

1.3.2 プレストレストコンクリート構造

プレストレストコンクリート構造（PC 構造）は、橋の構造として多用されているにもかかわらず、鉄筋コンクリート構造とは異なるものと考えられているようである³⁵⁾。あらかじめはりの軸方向に圧縮応力を与えている点では異なるが、本質は鉄筋コンクリート構造と変わらず適用範囲を拡大したものである。図-1.22に示すように圧縮力によりはり断面には圧縮応力が作用した状態に外力を作用させると引張応力が生じるが、この圧縮応力が打ち消すように働く。圧縮応力のほうが引張応力より大きければ、はり断面の応力は圧縮のみとなるので、ひび割れは生じない。このようにあらかじめ与えておく圧縮応力を、プレストレスという。

プレストレスを与えるためには、高強度の鋼材（PC 鋼材）を用いて緊張させる。PC 鋼材は降伏点強度が鉄筋の3～4倍の $800\sim 1550\text{N/mm}^2$ のものが使用され、コンクリートも比較的高品質な圧縮強度が 50N/mm^2 程度のものが使用されている。プレストレスを与える方法としては、様々なものがあるが、通常はPC 鋼材をジャッキで緊張する方法が用いられ、写真-1.7に示すようにプレテンション方式とポストテンション方式の2つがある。さらに、与えるプレストレスの大きさによって様々な性能の構造物をつくることができる。例えば、道路橋は通常の使用状態において引張応力は生じるが、ひび割れは発生させない構造であるが。タンクおよび原子炉用容器等では水密性と気密性が要求されるので、使用状態でひび割れを発生させないことが特に重要となるので、引張応力が生じない構造となる。

以上のような点を前提に成り立っているプレストレストコンクリートの長所・短所は次の通りである³⁶⁾。

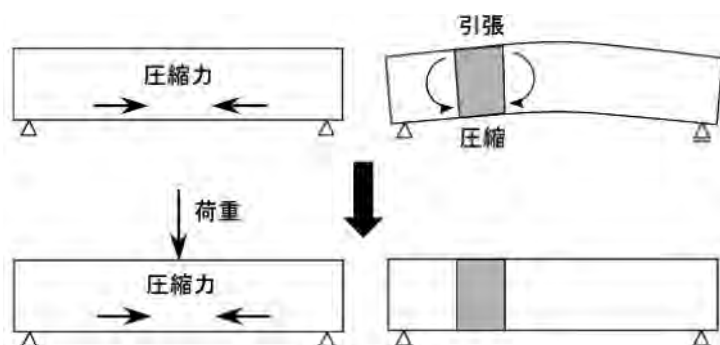


図-1.22 プレストレストコンクリート構造の原理



(a)プレテンション方式



(b)ポストテンション方式

写真-1.7 プレストレストを与える方法（株式会社日本ビーエス提供）

[長所]

- ・ ひび割れを生じないようにすることが可能なので、耐久性と水密性が優れている
- ・ ひび割れを生じないので全断面を有効に利用でき、スレンダーな構造が可能である。さらに、プレストレスによって部材と部材を接合できる
- ・ 高強度の PC 鋼材と高品質なコンクリートを用いているので、高応力レベルで有効に活用できる

[短所]

- ・ 鉄筋コンクリートと比べて剛性が小さいので、変形、振動しやすい
- ・ PC 鋼材は鉄筋に比べて耐熱性が多少劣るため、耐火性に注意が必要である

すなわち、プレストレストコンクリートは、様々な構造に利用されており、今後もますます発展すると考えられている。

プレストレストコンクリートは、1886年にアメリカ人のジャクソン（Jackson）、1888年にドイツ人のデーリング（Doehring）によって相次いで発案されたのが始まりである。その後、紆余曲折を経て1930～1940年にフレシネー（Freyssinet）はポストテンション工法におけるくさび形定着具と PC 鋼線を束ねたケーブルを開発し、プレストレストコンクリートの実用化に著しい貢献をした。これは日本においても1932年に補強コンクリート製品の製造法の特許として登録された。

日本では、戦後本格的に研究が開始され、1949年頃から PC まくら木が実用化、写真-1.8に示す日本初の PC 橋としてプレテンション方式の長生橋（1951年）、ポストテンション方式の十郷橋（1953年）が建設された。写真-1.9には1958年に技術導入され多数の実績がある張出し架設工法の施工例（ブロックサイクル施工）を示す。張出し架設工法とは、橋脚から左右にバランスをとりながら移動作業車を用いて順次張出していく技術的方法である。プレストレストコンクリート構造の詳細については、第8章を参照されたい。



(a) 長生橋（石川県七尾市）



(b) 十郷橋（福井県坂井市）

写真-1.8 日本初の PC 橋^{37,38)}

1.4 構造細目

構造細目は、性能照査（性能照査型設計法）において照査方法の前提条件等として重要な事項である。通常の場合、配筋詳細および部材形状等の妥当性は、性能照査においては検討断面のその一部を照査しているに過ぎず、これ以外については構造細目でその妥当性を検討する。



写真-1.9 張出し架設工法の施工例（株式会社日本ピーエス提供）

2022年制定土木学会示方書〔設計編〕は、2017年制定版の制定方針を受け継ぎ、〔本編〕、〔標準〕および〔付属資料〕で構成されている。図-1.23に〔標準〕7編の構造細目に関する目次を示すが、下線部が改訂された箇所である。この構造細目は、構造物の設計において計算に考慮できない問題について、実験、経験等に基づいて定めたものである。従って、計算とともに極めて重要な意味を持つので、設計においては土木学会示方書の構造細目を熟読し、規定を守らなければならない³⁹⁾。

さらに、〔標準〕5編の耐震設計および耐震性に関する照査が、偶発作用に対する計画、設計および照査に改訂され、レベル2地震動に加え、津波、洪水および衝突を偶発作用と定義し、それらに対する性能照査を可能にする体系となった。ここでは、鉄筋に関する構造細目のうち、鉄

7 編 鉄筋コンクリートの前提および構造細目		
1 章 総 則	3 章 部材の構造細目	4 章 その他の構造細目
2 章 鉄筋コンクリートの前提	3.1 はりの構造細目	4.1 面 取 り
2.1 かぶり	3.1.1 一 般	4.2 露出面の用心鉄筋
2.2 鉄筋のあぎ	3.1.2 独立したはり	4.3 集中反力を受ける部分の補強
2.3 鉄筋の配置	3.1.3 ディープビーム	4.4 開口部周辺の補強
2.3.1 軸方向鉄筋の配置	3.1.4 コーベル	4.5 打 継 目
2.3.2 横方向鉄筋の配置	3.2 柱の構造細目	4.5.1 一 般
2.3.3 ねじり補強鉄筋の配置	3.2.1 帯鉄筋柱	4.5.2 床組みおよびこれと一体になった柱または壁の打継目
2.3.4 ひび割れ制御のための鉄筋の配置	3.2.2 らせん鉄筋柱	4.5.3 アーチの打継目
2.4 鉄筋の曲げ形状	3.2.3 柱の鉄筋の継手	4.6 目 地
2.5 鉄筋の定着	3.3 スラブの構造細目	4.6.1 一 般
2.5.1 一 般	3.3.1 一 般	4.6.2 伸縮目地
2.5.2 標準フック	3.3.2 一方向スラブ	4.6.3 ひび割れ誘発目地
2.5.3 機械式定着	3.3.3 二方向スラブ	4.7 水密構造
2.5.4 鉄筋の定着長	3.3.4 片持ちスラブ	4.8 排水工および防水工
2.5.5 軸方向鉄筋の定着	3.3.5 斜めスラブ	4.9 コンクリート表面の保護
2.5.6 横方向鉄筋の定着	3.3.6 円形スラブ	4.10 ハ ン 丁
2.5.7 定着破壊に対する照査	3.3.7 フラットスラブ	
2.6 鉄筋の継手	3.4 シェルおよび壁の構造細目	
2.6.1 一 般	3.5 フーチングの構造細目	
2.6.2 軸方向鉄筋の継手	3.6 ラーメンの構造細目	
2.6.3 横方向鉄筋の継手	3.6.1 一 般	
	3.6.2 部材接合部	
	3.7 アーチの構造細目	

図-1.23 〔標準〕7編の構造細目に関する目次

筋コンクリートの前提および構造細目（かぶり、鉄筋のあき、鉄筋の配置および鉄筋の定着）および地震動を受けるコンクリート構造物の構造細目（かぶり、帯鉄筋の配置、鉄筋の定着、鉄筋の継手、実験に基づく構造細目の設定）について一部を紹介する。

1.4.1 鉄筋コンクリートの前提および構造細目

(1) かぶり

かぶりとは、図-1.24の最外縁に配置された鉄筋の表面とコンクリートの表面との最短距離を測ったコンクリートの厚さで、付着強度を大きくしたり、鉄筋をセメントペーストで保護するために必要である。図-1.25に示すように、耐火性を要求しない場合についてその一部を紹介する。

①鉄筋の直径または耐久性を満足するかぶりのいずれか大きい値 c_d に施工誤差 Δc_e を考慮した値を最小値とする

②鉄筋の継手部に帯鉄筋またはスターラップがある場合には、帯鉄筋とスターラップのかぶりが①の規定を満足する必要がある

③異形鉄筋を束ねて配置する場合は、図-1.26に示すように束ねた鉄筋をその断面積の和に等しい断面積の1本の鉄筋と考えて、鉄筋直径 ϕ' を求めてよい

(2) 鉄筋のあき

鉄筋のあきとは、図-1.24と図-1.26に示すように配置された鉄筋の互いの表面の水平・鉛直方向の間隔で、コンクリート打ち込み時の施工のし易さや、締固めが行われた上で鉄筋との付着

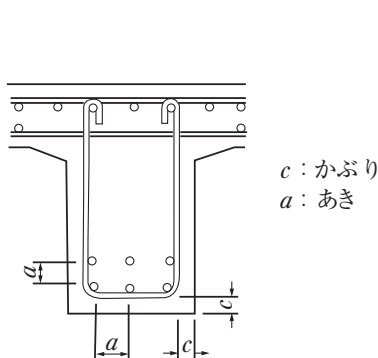
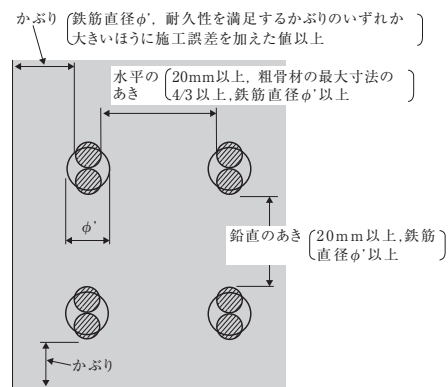


図-1.24 鉄筋のかぶりおよびあき⁴⁰⁾



ϕ' : 束ねた鉄筋の断面積の和に等しい断面積をもつ1本の鉄筋の直径

図-1.26 束ねた鉄筋のかぶりおよびあき⁴²⁾

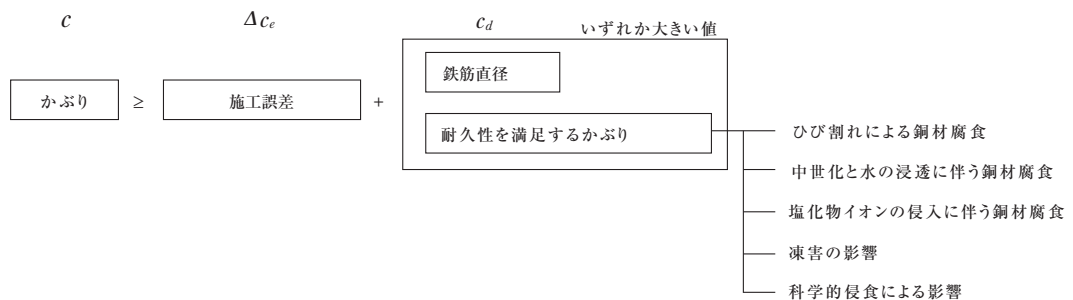


図-1.25 かぶりの算定（耐火性を要求しない場合）⁴¹⁾

力が十分に得られる必要がある。はり、柱および異形鉄筋を束ねる場合についてその一部を紹介する。

- ①はりにおける軸方向鉄筋の水平のあきは、20 mm 以上、粗骨材の最大寸法の4/3倍以上、鉄筋の直径以上としなければならない。2段以上に軸方向鉄筋を配置する場合には、一般にその鉛直方向のあきは20 mm 以上、鉄筋の直径以上とする
- ②柱における軸方向鉄筋のあきは、40 mm 以上、粗骨材の最大寸法の4/3倍以上、鉄筋直径の1.5倍以上としなければならない
- ③直径32 mm 以下の異形鉄筋を用いる場合で、複雑な鉄筋の配置により、十分な締固めが行えない場合は、図 -1.27に示すようにはりの水平の軸方向鉄筋は2本ずつを上下に束ね、柱の鉛直軸方向鉄筋は、2本または3本ずつを束ねて、これを配置してもよい

(3) 鉄筋の配置

鉄筋の配置には、軸方向鉄筋の配置と横方向鉄筋の配置がある。前者には最小鉄筋量、最大鉄筋量、後者にはスターラップの配置と帯鉄筋の配置があり、その一部を紹介する。

- ①最小鉄筋量として、軸方向力の影響が支配的な鉄筋コンクリート部材には、軸方向力のみを支えるのに必要な最小限のコンクリート断面積の0.8%以上の軸方向鉄筋を配置しなければならない。さらに、曲げモーメントの影響が支配的な部材の場合、曲げひび割れ発生と同時に部材が脆性的に破壊することを防止するために十分な量の引張鉄筋を配置することを原則とする
- ②最大鉄筋量として、軸方向力の影響が支配的な鉄筋コンクリート部材の軸方向鉄筋量は、コンクリート断面積の6%以下を原則とする。さらに、曲げモーメントの影響が支配的な棒部材の軸方向引張鉄筋量は、釣合鉄筋比の75%以下とすることを原則とする
- ③スターラップの配置として、棒部材には0.15%以上のスターラップを部材全長にわたって配置する。また、その間隔は、部材の有効高さの3/4倍以下、かつ400 mm 以下を原則とする
- ④帯鉄筋の配置として、帯鉄筋の部材軸方向の間隔は、一般に、軸方向鉄筋の直径の12倍以下で、かつ部材断面の最小寸法以下とする。塑性ヒンジとなる領域は、軸方向鉄筋の直径の12倍以下で、かつ部材断面の最小寸法の1/2以下とする。帯鉄筋は、斜めひび割れの進展を抑止してせん断耐力を向上させるので、せん断補強あるいは所要のじん性の確保という観点から、[設計編：標準] 5編における照査を満足する鉄筋量が配置されるとともに、図 -1.28に示すように、部材軸方向の間隔も所定の値以下とする必要がある

(4) 鉄筋の定着

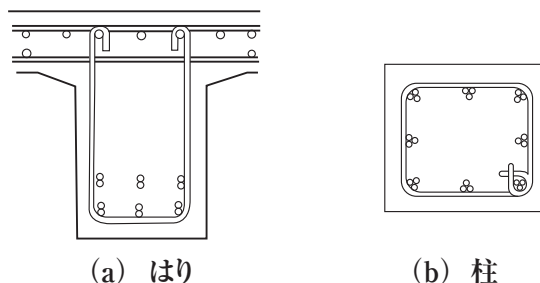


図 -1.27 束ねて配置する鉄筋⁴³⁾