

第1章

建設材料としての コンクリート

- 1.1 建設材料概論
- 1.2 コンクリートの概要と歴史
- 1.3 鉄筋コンクリートおよびプレストレスト
コンクリート
- 1.4 コンクリートの用途

1.1 建設材料概論

学習のポイント

- 材料の特性には、物理的特性、化学的特性、機械的特性などがある。
- 材料の分類には、金属材料、無機材料、有機材料などがある。
- 建設材料に求められる特性として、大量に使用できること、比較的成本が安いこと、耐久性に優れること、取扱いが容易で安全であることなどがあげられる。

(1) 材料とは

身の周りにある自然物以外のものはすべて、いろいろな材料からできている。自然物に対しては材料とはいわない。例えば、「牛乳の材料は、たんぱく質、脂肪、水などである」とはいわず、この場合、構成成分などという。すなわち、人間が何らかの目的で何かを作り出そうとするときに必要なものが「材料」である。作り出そうとする目的物によって、材料の種類とその組み合わせ、そして、それぞれの分量を決める必要がある。また、これらの条件が同じであっても、混ぜる順序などの作り方が変われば、まったく違ったものが出来上がることは想像に難くない。子供の頃に公園の砂場で作った泥団子を想像すればよい。

(2) 材料の特性

目的物の機能や性能は、材料の特性に大きく依存する。したがって、よりよい目的物を作り出そうと思えば、材料の特性についてよく知らなければならない。これが材料学を学ぶ理由である。材料の特性には、次のようなものがある。

❖ 物理的特性

❖ 化学的特性

❖ 機械的特性

物理的特性には、その材料の密度、融点・沸点、色、熱的性質、電気的性質、磁氣的性質などがあり、化学的特性には、他の物質に対する安定性・反応性などがある。機械的特性は、その材料が力を受けたときの強度や変形状、破壊性状に代表される。これらの特性は、ある指標や試験によって客観的に定められるものであるが、人間の主観が入ることでさらに別の特性をもたせることもできる。例えば、美観、加工性、経済性などである。

(3) 材料の分類

一般的な身の回りの材料は、大きく次の3つに分けることができる。

(a) 金属材料

良好な導電性、光反射性を有し、低温でも塑性加工性があるが、多くの場合、化学的にそれほど安定ではない。

(b) 無機材料（セラミックス）

導電性が低く、しばしば透明体であり、塑性加工性はない。化学的に安定で、高温で溶解する。

(c) 有機材料（プラスチック）

導電性がさらに低く、低温では脆性であるが、高温では塑性加工性があり、室温大気中では、化学的に安定である。密度が小さく、かなり低い温度で溶解または分解する。

他にも、これらの3つにあてはまらず、それぞれの中間的な特性を示す材料がある。例えば、金属材料と無機材料の中間的な特性を有するものとして半導体があり、無機材料と有機材料の中間的な特性を有するものとしてシリコンがある。

実際には、これらの材料が単独で使用されて目的物が作られることはまれで、これらの材料を適切に組み合わせて複合材料として使用されることが一般的である。

(4) 建設材料

目的物を工業的に製造しようとする場合には、必要とする目的物の機能や性能に応じて、使用する材料の物理的特性、化学的特性、機械的特性を定める必要がある。このとき、目的物の製造量や価格に応じて、材料の取扱いや加工に対する容易性、入手や調達の容易性、経済性についてもあわせて考慮する必要がある。

建設分野で使用される材料（建設材料）について考えてみる。建設材料とは、道路、鉄道、港湾、空港などのインフラ（[図-1.1.1](#)）を構成する構造物、例えば、橋

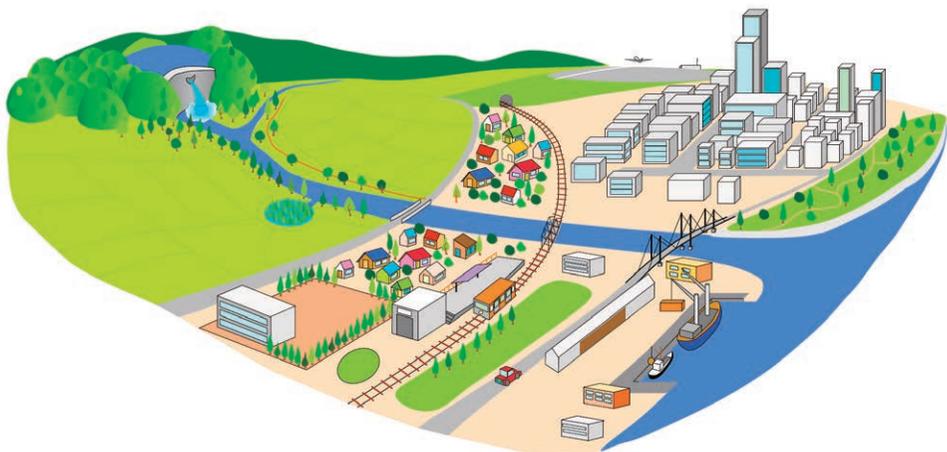


図-1.1.1 我々の暮らしを支えるインフラ

梁、トンネル、岸壁、舗装などを建設するために使用される材料のことである。構造物の特徴としては、他の工業製品と比較して、寸法が大きいこと、長期間にわたり使用され続けること、風雨に曝されること、一品ごとに建設されること、などがあげられる。したがって、建設材料に求められる特性は、次のことになる。

- ❖ 大量に使用できること
- ❖ 比較的成本が安いこと
- ❖ 耐久性に優れること
- ❖ 取扱いが容易で安全であること

これらの条件をおおむね満たす材料には、金属材料として、鉄鋼、アルミニウムなど、無機材料として、セメント、石材、土砂、粘土などがある。実際には、これらを単独で使用して構造物を建設するのではなく、これらの材料を組み合わせ、コンクリートや鉄筋コンクリートなどの複合材料として使用することが一般的である。また、上記の条件をすべて満たさないが、特定の用途に使用される材料もある。例えば、ゴムやエポキシ樹脂などの有機材料は、比較的高価で、取扱いも必ずしも容易ではないが、他の材料では発揮できない特徴的な特性（大変形性や接着性など）を有しているため、ピンポイントで使用されることが多い。このように、まさしく適材適所で使用する材料を選択して、必要な機能や性能を有する構造物を妥当な期間とコストで、安全に建設することが重要である。一般的な建設材料の例を **図-1.1.2** に示す。

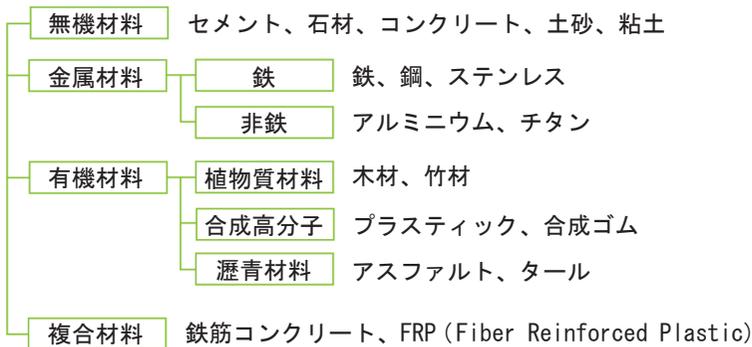


図-1.1.2 代表的な建設材料

1.2 コンクリートの概要と歴史

学習のポイント

- コンクリートは、セメントペーストで骨材を固めたものである。
- コンクリートは、太古の昔から人々の知恵で利用されてきた材料である。

(1) コンクリートの語源と定義

コンクリートの語源は、ラテン語の「concretus」である。「con」は、「共に」という意味の前置詞で、「cretus」は、「成長する」という意味の動詞「crescere」の過去分詞であり、共に成長したもの、いろいろなものがくっつきあって固まったものをさしている。したがって、コンクリートとは、広義には、固形物を結合材で固めた、あるいは、包んだものをいう。本書で取り扱うコンクリートは、砂や砂利などの骨材（固形物）を、セメントと水を混ぜたセメントペースト（糊、結合材）で固めたものである。結合材にセメントを用いていることから、セメント・コンクリートということもある。これに対し、道路の舗装でしばしば用いられるアスファルトは、アスファルト合材で骨材を固めているため、正確には、アスファルト・コンクリートとよぶこともある。

狭義のコンクリートであるセメント・コンクリートの主な構成材料は、水、セメント、砂に代表される細骨材、砂利に代表される粗骨材であり、必要に応じて混和材料も用いられる。また、コンクリートから粗骨材を取り除いたものをモルタルとよび、さらに細骨材も取り除いたものをセメントペーストとよぶ。用途に応じて、モルタルやセメントペーストがコンクリートの代わりに用いられることがある。これらの詳細については、第2章で述べることとする。

(2) コンクリートの歴史

太古の昔から人類は、ある特殊な土を水と混ぜると固まることを知っていた。読者の中には、子供の頃、砂遊びをしていたときに、ある特別な土を使うと「かちんかちん」の泥団子が出来上がることを経験的に知っていた人がいるであろう。これがコンクリートの始まりといえよう。歴史上で、コンクリートの使用が確認されている最も古いものは、紀元前7000年頃のイスラエルの遺跡で発見された石灰石を用いて固められた住居である。紀元前2600年頃には、エジプトのピラミッドの建設において、焼石こうと砂を固めたモルタルが使用されている。紀元後になると、ローマ帝国において多数の構造物がコンクリートで造られ、現存しているものが多くある。これをローマコンクリートとよぶこともある。

その後、18世紀にイギリスで産業革命が起こると、世界は工業化の道をたどることになった。その結果、構造物の大型化と高強度化に伴って構成材料としてのコンクリートにはそれまで以上に高い品質と大量生産性が求められることとなった。これを実現するため、1824年に、イギリスのAspdinがポルトランドセメントを発明し、これにより現在のセメントに近い、品質の高いセメントが工業的に生産できるようになった。この後、世界中にコンクリートが広まり、現在ではインフラの大部

分を構成する重要な建設材料としての地位を確立している。

わが国では、当初セメントは輸入に依存していたが、明治維新以降の富国強兵と殖産振興のため、その需要が大きく高まったことから、1875年に官営のセメント工場が東京の深川につくられた（写真-1.2.1）。また、1901年には、官営の製鉄所が北九州の八幡につくられ、鉄鋼の生産も始まった。そして、1903年には、わが国で最初の鉄筋コンクリート橋が琵琶湖疎水に架けられ（写真-1.2.2）、同じ頃、北海道の小樽港ではコンクリート製の防波堤も建設された（写真-1.2.3）。なお、わが国に



写真-1.2.1 わが国最初のセメント工場

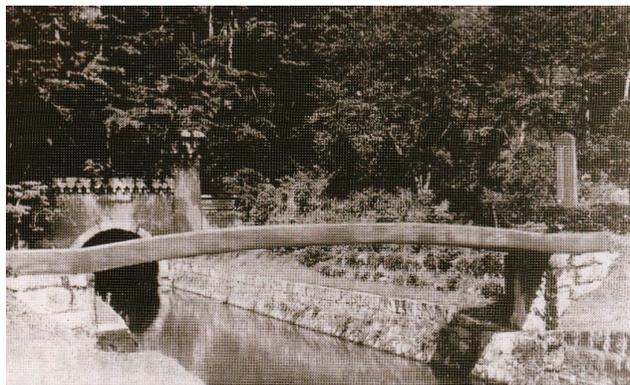


写真-1.2.2 琵琶湖疎水に架かるわが国最初の鉄筋コンクリート橋

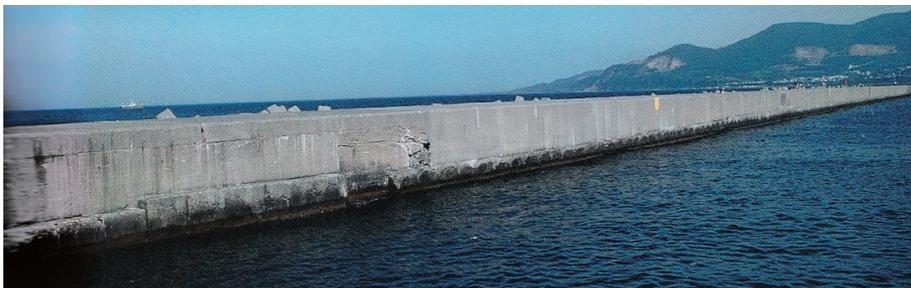


写真-1.2.3 小樽港北防波堤

おける最初のプレストレストコンクリート橋は、1952年に石川県七尾市で架設された長生橋である（写真-1.2.4）。

その後、現代に至るまで、コンクリートは重要な建設材料として膨大な数のインフラの建設に使用され、市民の安全で安心な生活を守り、経済活動の基盤を支え続けている。



写真-1.2.4 移設して保存されている長生橋

(3) コンクリートの特徴

読者は、コンクリートに対してどのようなイメージをもっているであろうか。「固い、重厚、頑丈」といった比較的ポジティブなイメージをもつ人もいれば、「汚い、悪い」といったどちらかというとなガティブなイメージをもっている人もいるかもしれない。ぜひとも、この科目の学修を通じて、社会のインフラの大部分を構成するコンクリートに対する正しい知識を身に付けて欲しい。

では、なぜコンクリートはここまで使われるのか。これは、1.1で述べた建設材料に求められる特性をすべて満足するからである。

(a) 大量に使用できること

コンクリートの構成材料はいずれも自然由来のものが多く、わが国の場合、そのほとんどを自給できている。セメントの製造に必要なエネルギーこそ輸入しているものの、原材料はほぼ国産である。わが国の工業製品のなかで、ここまで自給率が高いものも珍しい。コンクリートの大部分を占める骨材は、現地のものを使うことができ、地産地消を実現できる点は地域の産業育成の観点から重要である。いわゆる生コンクリートとよばれるレディーミクストコンクリートの出荷量は、2023年度には7018万 m^3 で、東京ドーム約57杯分（1杯分は約124万 m^3 ）にもなる。過去最高の出荷量を記録した1990年度は、19800万 m^3 であった。このように毎年膨大な量のコンクリートが製造され、利用されている。ここまで大量に使用できる材料は現時点では、コンクリート以外には考えられない。

ちなみに、わが国のセメントの生産量は、2021年度には5011万トンであるが、世界の生産量は44億トンにも及ぶ。

(b) 比較的成本が安いこと

レディーミクストコンクリートの価格（運搬費込み）は、2023年度には東京地区で、19000円/ m^3 程度である。コンクリートの密度を2300 kg/m^3 と仮定すると、この

価格は1 kg当たり約8円である。他の工業製品と比べると安価であることが分かる。ここまで安価でなければ、大量に使用することができない。また、レディーミクストコンクリートの価格は、地域によって差があること、社会情勢などで変動することも特徴のひとつである。

(c) 耐久性に優れること

元来、コンクリートは高耐久な材料である。わが国の高度経済成長期の一時期に、必ずしも品質管理や施工管理が十分でないコンクリートが用いられたことがあったため、早期劣化の問題が引き起こされた。しかし、適切な材料を用いて、品質管理と施工管理を確実に行えば、一般的な環境条件下では、少なくとも100年間は著しい劣化をすることなく使い続けることができる。先にあげたように、100年以上前に建設された鉄筋コンクリート製の橋梁や防波堤が今でも現役で使われていることから、コンクリートの耐久性の高さは証明できる。また、鋼材と比較して、耐火性に優れる点も建設材料として有利な点である。

(d) 取扱いが容易で安全であること

第7章で述べるように、コンクリートの製造と施工を確実にを行うためには、一定の知識と経験が必要であるものの、特別に高度な技術や技能を必要とすることはない。また、コンクリートを練り混ぜて、まだ固まらない状態で運搬して、型枠に詰めれば、どのような形にも成形することができる。このような造形性の高さもコンクリートのメリットのひとつである。コンクリートの製造は、場所や時間の制約を受けない。セメントなどの構成材料を工場から運搬すれば、山奥でも離島でもどこでも製造することができる。

また、コンクリートを製造する際には、有毒ガスが発生したり、著しく高温になったりすることはなく、特別な対策を講じることなく作業を行える点も建設材料として広く用いられる理由のひとつである。

(e) その他の特徴

他にも、他分野の産業廃棄物・副産物を受け入れて、コンクリートの構成材料の一部として用いたり、セメントの製造に用いたりすることで、その有効利用を図っている。このように、コンクリート分野における産業廃棄物の有効利用は、わが国の静脈産業の根幹を支えることで、持続可能な社会の実現に大きく貢献している(2.2.7参照)。また、コンクリートは鉄筋などの鋼材と一体化して用いることが多いが、鋼材との相性がよいことも、コンクリートが建設材料として優れている点のひとつである。これについては、1.3で詳述する。

(4) デメリットとなる特徴

コンクリートがまだ固まらない状態で現場に運搬されて使用されることは、逆にデメリットにもなる特徴である。すなわち、コンクリートに関する十分な知識がないままに取り扱えば、本来期待していた品質を得られないばかりか、不具合を引き起こすこともある。自由度があることはメリットにもなるし、デメリットにもなり得ることに十分に注意しなければいけない。だからこそ、土木技術者としてコンクリートに関する正しい知識を身に付けることは重要である。他にもコンクリートのデメリットとなる特徴としては次のことがあげられる。

❖引張力に弱い。 ❖硬化までの日数がかかる。 ❖施工時にひび割れが生じやすい。

しかし、これらについては、構造設計や使用材料の選定で配慮したり、製造・施工方法を工夫したりして、完成後のコンクリート構造物に不具合が発生しないようにできる。これらの詳細については、本書でも後述している。

(5) コンクリートに求められる性能

コンクリートには、[図-1.2.1](#)のように構造物の各種条件から定まる所要のフレッシュ特性、硬化特性および性能の経時変化に対する抵抗性が求められる。施工時のフレッシュ特性のみに配慮してコンクリートの特性を決めると、硬化後のコンクリートの強度や耐久性が低下してしまうことがある。コンクリートに求められる様々な特性をバランスよく満たすようなコンクリートを製造することが重要である。そのために使用する材料やその混合割合を適切に定めることが必要になるが、これを配合設計とよぶ（第6章参照）。

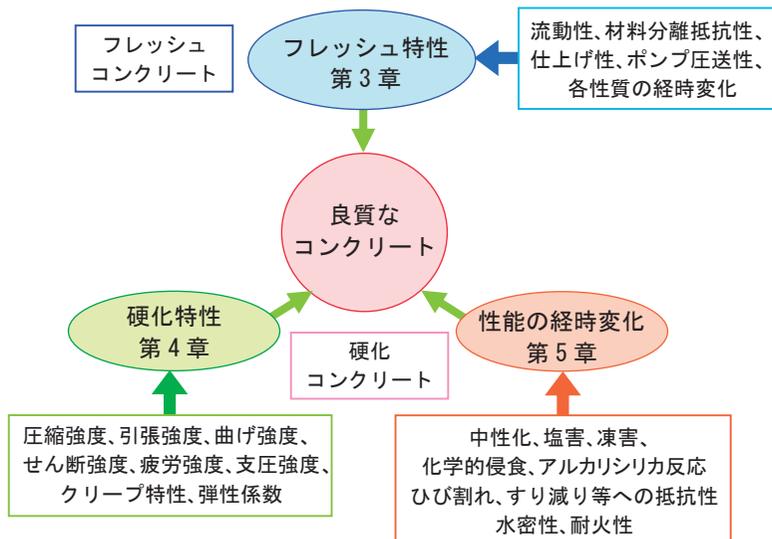


図-1.2.1 良質なコンクリートを製造する基本

1.3 鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリート

学習のポイント

- 鉄筋コンクリートは、コンクリートと鉄筋の互いの長所を生かし、短所を補い合うことができる合理的な複合材料である。
- プレストレストコンクリートは、ひび割れの発生を防止あるいは制限した構造である。

インフラを構成する構造部材にコンクリートを用いる場合、鉄筋などの鋼材と複合して用いることが一般的である。重力式のダムや消波ブロックなどでは、コンクリート単体として設計することがあるが、梁、柱、壁、スラブなどの構造部材として用いる場合には、コンクリートの内部に鋼材を配置して、鉄筋コンクリートまたはプレストレストコンクリートとして設計する。

(1) 鉄筋コンクリート

コンクリートと鉄筋を併用することで合理的な複合材料となる理由は次のとおりである。

(a) コンクリートは圧縮力に強く、鉄筋は引張力に強い

曲げを受ける構造部材では、断面内に圧縮と引張が発生する（図-1.3.1）。コンクリートは圧縮に対しては比較的強いが、引張に対しては弱い。したがって、コンクリートに引張が作用すると容易にひび割れが発生してしまう。そこで、このひび割れの発生を防止あるいは抑制するために、引張に強い鉄筋が配置される。しかし、鉄筋は線状の材料であるため、圧縮が作用すると容易に座屈が生じてしまう。そこで、鉄筋をコンクリート内部に埋め込むことで座屈を防止する。

このように、圧縮に強く引張に弱いコンクリートと引張に強く圧縮に弱い鉄筋を組み合わせることで、互いの長所を生かし、短所を補い合うことができる合理的な構造形式が成立する。

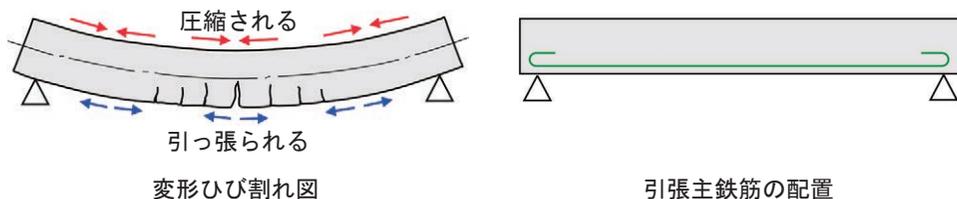


図-1.3.1 鉄筋コンクリートの原理

(b) コンクリートと鉄筋の温度に対する熱膨張係数がほぼ等しい

コンクリートが自然環境下に曝されると、周囲の環境（気温や日照など）の変化に応じてコンクリートの温度が変化する。わが国でも、真夏と真冬の外気温の差が30℃以上の箇所が多くある。もし、コンクリートと鉄筋の熱膨張係数が大きく異なっていたとすると、外力が作用していない状況でも、温度変化によって、コンクリートと鉄筋にひずみの差が生じて、両者が一体として挙動しなくなる。一般的なコンクリートの熱膨張係数は $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、鉄筋の熱膨張係数は $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であり、一般的な環境下であれば、温度変化によるひずみの差は数十 $\mu\text{m}/\text{m}$ にすぎず、実用上は無視できる。

(c) コンクリート中に埋め込まれている鉄筋は腐食しにくい

鉄筋は、大気中に放置しておく、さびてしまう。海岸に近い場所であれば、なおさらである。鉄筋の材料である鉄鋼は、鉄鉱石を還元して製造されるものであり、放置すれば酸化が進み、酸化鉄、いわゆるさびとなる。鉄筋がさびてしまえば、有効な鉄筋の断面が減少することとなり、構造物の安全性が脅かされることになる。詳しくは、5.2で述べる。

鉄筋がさびてしまっは建設材料としては不適である。しかし、コンクリートに埋め込んで使用することでさびの発生を防止できる。これは、2.2.6で詳述するが、セメントの水和によって水酸化カルシウムが生成するため、コンクリートはpHが12~13の強いアルカリ性を呈する。このような強いアルカリ環境中に鉄筋が存在する場合、鋼材表面に緻密な酸化層（不動態皮膜）が形成され、腐食が進行しなくなる。鉄筋がコンクリート中に配置された鉄筋コンクリートは、鉄筋のさびが進行しない耐久性に優れる構造形式といえる。

(d) コンクリートと鉄筋の付着強度を大きくできる

コンクリートと鉄筋が外力に対して有効に機能するためには、両者が一体として挙動する必要がある。そのために、一般に使用される鉄筋には、表面に凹凸をつけることで、両者の付着強度を大きくしている。表面の凹凸がなければ、両者の付着は粘着と摩擦によるものしか期待できないが、凹凸の存在により機械的な噛み合わせも期待できる。このように、鉄筋の製造時に表面加工を施しやすいことも、コンクリートとの相性をよくしている要因のひとつである。詳しくは、2.7.2および4.5.2で述べる。

(e) 火事に強い

火事が起きたとき、安全に避難できて、人々の生命と財産を守るためには、構造物や建造物に耐火性が求められる。コンクリートの中に鉄筋を埋め込むことで、耐

火性や高温履歴に対する抵抗性を上げることができる。詳しくは、5.6で述べる。

(2) プレストレストコンクリート

プレストレストコンクリート（PC）では、鉄筋の代わりにPC鋼材が用いられ、あらかじめPC鋼材に大きな引張力を与えてそれを定着することで、コンクリートに圧縮力を与えている（図-1.3.2）。これにより、PC部材に曲げが作用したとしても、断面内に引張が作用しにくくなり、結果的にひび割れの発生を防止あるいは制限することができる。

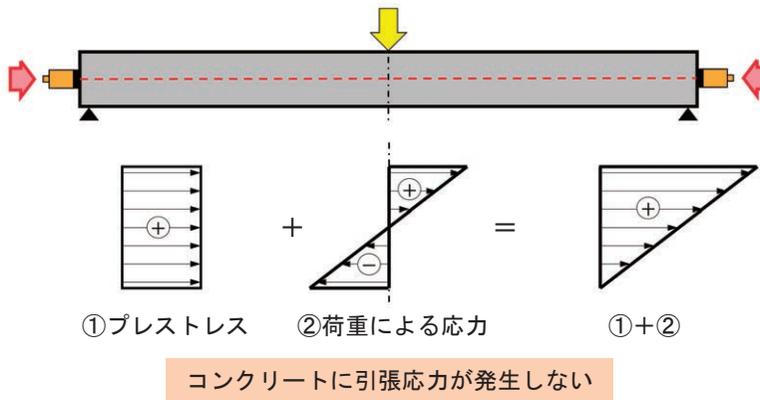


図-1.3.2 プレストレストコンクリートの原理

1.4 コンクリートの用途

学習のポイント

- コンクリートを製造方法で分類すると、レディーミクストコンクリート、現場練りコンクリート、工場製品用コンクリートとなる。
- 現場の多様なニーズに応えるために、種々の特性を変化させたコンクリートが開発されている。

(1) コンクリートの分類

コンクリートは、その製造方法に着目すると、レディーミクストコンクリート、現場練りコンクリート、工場製品（二次製品）用コンクリートの3つに分類できる。現在、わが国で使用されるコンクリートの多くは、レディーミクストコンクリート（いわゆる、生コンクリート）である。

ダム、山岳トンネル、海洋構造物などの特殊な大型の工事では、現場に専用のコンクリート製造設備を設置して、現場練りでコンクリートを製造する。これは、大

量のコンクリートを使用するために専用の設備を設けた方がコストを抑えられること、現場が市中の生コンクリート工場から離れていて運搬できないことなどによる。

ポール（電柱）、側溝、マンホールなどもコンクリートで造られているが、これらは「工場製品」であり、工場内で製造されたコンクリートを使って、打込みから養生までの作業がすべて工場内で行われ、最終的にコンクリート製品として出荷されている。二次製品とよばれることもある。最近では、現場での作業の省力化などを目的として、土木分野でもプレキャスト工法が導入される事例が増えてきているが、このときに使われるプレキャスト部材も工場製品であることが多い。プレキャスト工法は、コンクリート製品工場や専用ヤードで製造されたプレキャスト部材を現場で接合して、構造体を構築していく工法であり、現場作業の省力化だけでなく、品質向上、工期短縮、作業の安全性向上といったメリットもある。

これらの3種類のコンクリートの国内での製造比率は、おおよそ、レディーミックスコンクリート、現場練りコンクリート、工場製品用コンクリートで、7:1.5:1.5である。コンクリートの製造については、7.2で詳述する。

(2) 現場のニーズの多様化とそれに答えるコンクリート

コンクリートは、構成材料の種類やその混合割合を変化させたり、製造方法を工夫することで、強度、密度、流動性などの特性を大きく変化させることが可能である。この点も、コンクリートが建設材料として重宝される理由のひとつである。

例えば、圧縮強度でいえば、一般的なコンクリートの場合、土木分野では20~60 N/mm²、建築分野では20~80 N/mm²であるが、最近では、100 N/mm²を上回る高強度コンクリートが広く使われるようになっただけでなく、世界最高強度364 N/mm²のセメント硬化体も開発されている。また、一般的なコンクリートの密度は、2300~2400 kg/m³であるが、密度が1000 kg/m³を下回る水に浮くような軽量コンクリートから、密度が3000 kg/m³を上回る重量コンクリートまで、幅広いレンジの密度を有する種々のコンクリートが実用化されている。

強度や密度以外にも、現場の多様なニーズに応えるために、次のような特性を有するコンクリートが開発され、コンクリートの高性能化や多機能化が進んでいる。

(a) フレッシュ時の軟らかさによる分類

□高流動コンクリート（3.5.3参照）

流動性を高めたコンクリートであり、締固め作業を行うことなく、型枠などの隅々まで充填できる自己充填性を有する。

□締固めを必要とする高流動コンクリート

流動性を高めたコンクリートであり、充填がしやすく、打込み間隔の拡大や締固

め時間の短縮により施工の効率を高めることができる。高流動コンクリートに比べて、粘性が低いため製造および圧送がしやすく、材料コストが低い特徴がある。

□流動化コンクリート

□硬練りコンクリート

土木分野では、スランプが5 cm未満のコンクリートをさし、ダム堤体や舗装に用いられる。

□超硬練りコンクリート

(b) 施工や供用環境による分類

□暑中コンクリート (7.4.2 参照)

施工現場の日平均気温が25℃を超えることが想定されるとき、コンクリートのスランプ低下やコールドジョイント発生などを防止するために用いられる。

□寒中コンクリート (7.4.1 参照)

施工現場の日平均気温が4℃以下になると予想されるとき、コンクリートを初期凍結させないことなどを目的に用いられる。

□水中不分離性コンクリート (水中コンクリート) (2.4.3 参照)

水中での材料分離抵抗性を高めたコンクリートであり、水質を汚濁することなく、水中で施工できる。

□水密コンクリート

(c) 施工方法による分類

□吹付けコンクリート

圧縮空気によって打込み箇所に吹き付けて施工するコンクリートであり、用途としては、トンネル覆工、法面保護、断面修復などがある。

□プレキャストコンクリート

コンクリート製品を工場で製造して、建設現場に据え付けるコンクリートであり、U形側溝、道路縁石、農業用水路、電柱、水道管、橋梁の桁、ボックスカルバートなどがこれにあたる。工場製造のため品質が安定しており、新材料やリサイクル材料を導入しやすい特徴がある。加えて、現場作業を軽減できるため工期短縮や省力化に寄与できる。

□レディーミクストコンクリート (7.2.6 参照)

□プレパックドコンクリート

型枠または施工箇所に特定の粒度をもつ粗骨材をあらかじめ詰めておき、その隙間にモルタルを注入して製造するコンクリートである。

(d) 部材の大きさによる分類

□マスコンクリート (4.6.4(3) 参照)

(e) 特殊な材料の混入による分類

□繊維補強コンクリート (2.8.2 参照)

長さが数 cm 以下の短い繊維をコンクリート中に均一に分散させたコンクリートであり、ひび割れ抵抗性、じん性、耐衝撃性を改善することができる。

□膨張コンクリート (2.3.4 参照)

膨張材の使用により硬化後に体積膨張を起こす能力を付与したコンクリートであり、収縮によるひび割れを軽減できる。

□軽量骨材コンクリート (2.5.5(1) 参照)

構造物の自重を低減するために用いられるコンクリートであり、骨材の全部または一部に人工軽量骨材や天然軽量骨材が使用される。

□再生骨材コンクリート (2.5.5(3) 参照)

コンクリート構造物の解体時に生じるコンクリート塊から取り出した再生骨材を骨材として再利用したコンクリートである。

□エコセメントを用いたコンクリート (2.2.2(3) 参照)

都市ごみや下水汚泥の焼却灰を原料としたエコセメントを用いたコンクリートである。

第2章

構成材料

- 2.1 使用材料の構成
- 2.2 セメント
- 2.3 混和材
- 2.4 化学混和剤
- 2.5 骨材
- 2.6 水
- 2.7 鋼材
- 2.8 補強用繊維

2.1 使用材料の構成

学習のポイント

- コンクリートは、水、セメント、細骨材、粗骨材、混和材料により構成される複合材料である。
- 骨材がコンクリート中の体積の約7割を占める。

コンクリートは、水、セメント、細骨材、粗骨材の4種類の材料で構成され、必要な特性に応じて混和材料が加わり、これらを混ぜ合わせて作られる。図-2.1.1のように構成材料の組み合わせによって呼び名があり、セメントと水のみを使用したものを「セメントペースト」、セメント、水、細骨材を使用したものを「モルタル」とよぶ。混ぜ合わせた後は、図-2.1.2のように粗骨材の隙間を細骨材が埋めて、粗骨材と細骨材の隙間をセメントペーストが埋めることでコンクリートとなる。

セメントは、コンクリートを構成する基本材料であり、水との化学反応（水和反応）により骨材同士をつなぐ「糊」の役割を果たす。水は、セメントと化学反応するとともに、フレッシュコンクリートに流動性を付与する。細骨材および粗骨材は、



図-2.1.1 材料の構成と呼び方

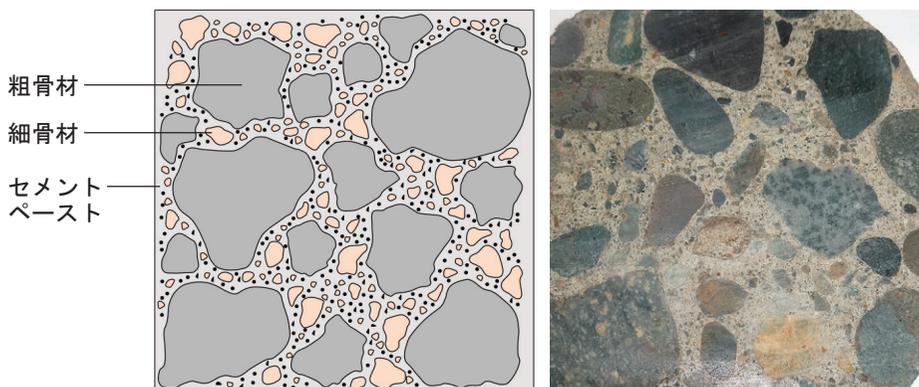


図-2.1.2 コンクリートの構成

コンクリート中の体積の約7割を占め、化学的に安定で不活性である。混和材料は、セメント、水、骨材以外の材料を指し、コンクリートに特別な性質を与えるために、打込みを行う前までに必要に応じて加える材料である。使用量によって「混和材」と「化学混和剤」に分類され、混和材は、添加量が多くコンクリートの配合計算で体積に算入する材料であり、化学混和剤は薬剤のように少量添加で使用され、コンクリートの体積として考慮しない材料である。

2.2 セメント

学習のポイント

- セメントは、原料を焼成して製造するポルトランドセメントと、ポルトランドセメントに各種の混合材を混入した混合セメントに大別される。
- セメントは水和反応によって凝結・硬化し、セメントの物理・化学的性質や水和反応がコンクリートの硬化特性に大きな影響を及ぼす。
- セメントの製造は、CO₂の排出や産業廃棄物・副産物の活用など、環境問題に大きく関わっている。

2.2.1 概要

セメントは、ポルトランドセメント、混合セメント、特殊セメントに分類される。ポルトランドセメントの「ポルトランド」とは、硬化した後の色や硬さが、イギリスのポルトランド岬で採取される石材に似ているところから名付けられたといわれている。Joseph Aspdin というイギリス人が、1824年にポルトランドセメント製造に関する特許を取得している。

ポルトランドセメントの成分は、主にカルシウム (Ca)、ケイ素 (Si)、アルミニウム (Al)、鉄 (Fe) であり、その成分比はカルシウムを除けば、地殻の構成比率にほぼ等しい。つまり、セメントは地球上に広く分布する元素から構成されており、石油やレアメタル、レアアースなどの資源とは異なり、地域的な偏りが少なく、どこでも大量に製造でき、地球上のあらゆる文明生活を支えるインフラを建設する材料として使用できる。

混合セメントは、ポルトランドセメントに各種の混合材を混入したセメントであり、日本では高炉セメント、フライアッシュセメント、シリカセメントの3種類がJISに規定されている。

2.2.2 セメントの種類

(1) ポルトランドセメント

ポルトランドセメントは、国内の全セメント生産量の75%程度を占め、次に示す6種類のポルトランドセメントと、それぞれの低アルカリ形の計12種類がJISに規定されている。低アルカリ形セメントは、セメント中の全アルカリ量を0.60%以下に保証したものであるが、現在は通常のポルトランドセメントがこの規定値をほぼ満たすため、「低アルカリ形セメント」としての製造はほとんど行われていない。また、超早強ポルトランドセメントや耐硫酸塩ポルトランドセメントについても、JIS規格はあるものの、国内ではほとんど生産されていない。

各ポルトランドセメントは、用途に応じて各種のコンクリートに使用される。各ポルトランドセメントの違いは、**図-2.2.1**のように主に反応の速さと反応に伴う発熱である。この反応には2.2.4で述べる化合物の混合割合が関係する。

- ① 普通 : 一般コンクリート工事に最も多く使用されている。
- ② 早強 : 化合物 C_3S の含有量を多くし、粉末度を高めて初期強度を大きくしたものであり、PC部材や冬期工事に用いられる。
- ③ 超早強 : 「早強」よりさらに初期強度を大きくしたものであり、緊急工事や寒中工事に用いられる。
- ④ 中庸熱 : 化合物 C_3S 、 C_3A の含有量を少なくし、水和時の発熱量を小さくしたものであり、寸法の大きいマスコンクリートに用いられる。
- ⑤ 低熱 : 「中庸熱」よりさらに化合物 C_2S の含有量を多くし、水和時の発熱量を小さくしたものである。1997年にJIS規格に追加された。
- ⑥ 耐硫酸塩 : 化合物 C_3A の含有量を少なくし、耐硫酸塩に対する抵抗性を高めたものである。

表-2.2.1には、各種セメントのJIS規格値を示す。比表面積や圧縮強さなどの物理的性質の限界値と化学成分の割合などが規定されている。表中の構成に示すように、

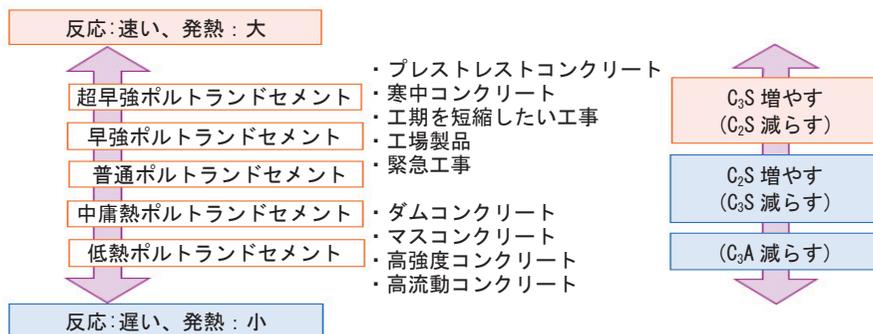


図-2.2.1 各種ポルトランドセメントの特性と用途

表-2.2.1 各種セメントの JIS 規格値¹⁾

セメントの種類	構成		品質																		
	混合材 (質量%)	少量混合 成分 (質量%)	化学成分 (%)				鉱物組成 (%)			水和熱(J/g)		比表面 積 (cm ² /g)	凝結		安定性 ハンヤ 法	圧縮強さ(N/mm ²)					
			強熱 減量	三酸化 硫黄	酸化 マグネシウム	全アル カリ ¹⁾	塩化物 イオン	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ F		7日	28日		密度 ⁴⁾ (g/cm ³)	始発 (min)	終結 (h)	1日	3日	7日
普通	-	5以下	5.0以下	3.5以下	5.0以下	0.75以下 ²⁾	0.035以下	-	-	-	-	-	2,500以上	60以下	10以下	-	12.5以上	22.5以上	42.5以上	-	
早強	-		5.0以下	3.5以下	5.0以下	0.75以下 ²⁾	0.02以下	-	-	-	-	-	3,300以上	60以上	10以下	-	10.0以上	20.0以上	32.5以上	47.5以上	-
超早強	-		5.0以下	4.5以下	5.0以下	0.75以下 ²⁾	0.02以下	-	-	-	-	-	4,000以上	60以上	10以下	-	20.0以上	30.0以上	40.0以上	50.0以上	-
ポルトランド セメント (JIS R 5210)	-	-	3.0以下	3.0以下	5.0以下	0.75以下 ²⁾	0.02以下	50以下	-	8以下	290以下	340以下	2,500以上	60以上	10以下	-	7.5以上	15.0以上	32.5以上	-	
中庸熱	-	-	3.0以下	3.5以下	5.0以下	0.75以下 ²⁾	0.02以下	-	40以上	6以下	250以下	290以下	2,500以上	60以上	10以下	-	7.5以上	15.0以上	32.5以上	-	
低熱	-	-	3.0以下	3.0以下	5.0以下	0.75以下 ²⁾	0.02以下	-	4以下	-	-	2,500以上	60以上	10以下	-	10.0以上	20.0以上	40.0以上	-		
耐硫酸塩	-	-	3.0以下	3.0以下	5.0以下	0.75以下 ²⁾	0.02以下	-	-	-	-	3,000以上	60以上	10以下	-	12.5以上	22.5以上	42.5以上	-		
A種	5を超え30以下	クリンカー、 石膏および 少量混合成分 の 含量に対し、 質量で5以下	5.0以下	3.5以下	5.0以下	-	-	-	-	-	-	-	3,000以上	60以上	10以下	-	12.5以上	22.5以上	42.5以上	-	
高炉 セメント (JIS R 5211)	30を超え60以下		5.0以下	4.0以下	6.0以下	-	-	-	-	-	-	-	3,000以上	60以上	10以下	-	10.0以上	17.5以上	42.5以上	-	
B種	60を超え70以下		5.0以下	4.5以下	6.0以下	-	-	-	-	-	-	-	3,300以上	60以上	10以下	-	7.5以上	15.0以上	40.0以上	-	
A種	5を超え10以下	クリンカー、 石膏および 少量混合成分 の 含量に対し、 質量で5以下	5.0以下	3.0以下	5.0以下	-	-	-	-	-	-	-	3,000以上	60以上	10以下	-	12.5以上	22.5以上	42.5以上	-	
シリカ セメント (JIS R 5212)	10を超え20以下		5.0以下	3.0以下	5.0以下	-	-	-	-	-	-	-	3,000以上	60以上	10以下	-	10.0以上	17.5以上	37.5以上	-	
B種	20を超え30以下		5.0以下	3.0以下	5.0以下	-	-	-	-	-	-	-	3,000以上	60以上	10以下	-	7.5以上	15.0以上	32.5以上	-	
A種	5を超え10以下	クリンカー、 石膏および 少量混合成分 の 含量に対し、 質量で5以下	5.0以下	3.0以下	5.0以下	-	-	-	-	-	-	-	2,500以上	60以上	10以下	-	12.5以上	22.5以上	42.5以上	-	
フライ アッシュ セメント (JIS R 5213)	10を超え20以下		5.0以下	3.0以下	5.0以下	-	-	-	-	-	-	-	2,500以上	60以上	10以下	-	10.0以上	17.5以上	37.5以上	-	
B種	20を超え30以下		5.0以下	3.0以下	5.0以下	-	-	-	-	-	-	-	2,500以上	60以上	10以下	-	7.5以上	15.0以上	32.5以上	-	
A種	5を超え10以下	5以下 ³⁾	5.0以下	4.5以下	5.0以下	0.75以下	0.02以下	-	-	-	-	-	2,500以上	60以上	10以下	-	12.5以上	22.5以上	42.5以上	-	
エコセメント (JIS R 5214)	10を超え20以下		5.0以下	3.0以下	5.0以下	0.75以下	0.5以上 1.5以下	-	-	-	-	-	2,500以上	60以上	10以下	-	12.5以上	22.5以上	42.5以上	-	
C種	20を超え30以下		3.0以下	3.0以下	5.0以下	0.75以下	1.5以下	-	-	-	-	-	3,300以上	-	1以下	-	15.0以上	22.5以上	25.0以上	32.5以上	-

注: (1) 全アルカリ(%)=Na₂O(%) + 0.658K₂O(%) (2) 低アルカリ形の場合は0.60以下 (3) ここでいう少量混合成分は石灰石のみを指す (4) 測定値を報告する

ポルトランドセメントのうち普通、早強、および超早強には、セメントに対して質量で5%まで少量混合成分を混合することが認められている。少量混合成分とは、高炉スラグ、石灰石、シリカ質混合材、フライアッシュの混合材であり、これらの少量混合成分は混合セメントへの混合も認められている。ポルトランドセメントにおける少量混合成分量の上限值は各国で異なり、日本や欧州は5%であるが、韓国では10%、米国ではクリンカー粉砕時の添加剤を含めて10%程度である。近年、日本においてポルトランドセメントの少量混合成分量を10%程度に引き上げる検討が進められている。

(2) 混合セメント

混合セメントは、各種の混合材をポルトランドセメントに混入したセメントであり、JISには高炉セメント、シリカセメント、フライアッシュセメントの3種類が規定されており、それぞれ混合材の分量によってA、B、C種の3種類が規定されている。混合材の品質や特徴については、2.3で詳述する。

(a) 高炉セメント

製鉄所の溶鉱炉（高炉）から副生する高炉スラグを水で急冷した水砕スラグを微粉砕した高炉スラグ微粉末と、ポルトランドセメントを混合して製造される。現在使用されている高炉セメントは、ほとんどが高炉セメントB種である。そのスラグ分量は、一般工事向けに販売されているもので40～45%程度である。高炉スラグは潜在水硬性を有し、ポルトランドセメントの水和反応により生成した水酸化カルシウムのアルカリ刺激によって徐々に硬化する（2.3.3参照）。高炉セメントを用いたコンクリートの特性は、混合する高炉スラグ微粉末の分量により異なるが、高炉セメントB種を使用した場合は、初期強度は小さいが、長期強度は大きくなる。耐海水性や化学抵抗性、水密性、アルカリシリカ反応抑制効果などに優れる。高炉スラグ微粉末の分量を多くすると水和熱を小さくすることができるが、一般的な高炉セメントB種を用いた場合は、水和熱の抑制効果は小さい。これらの特性のうち主に耐久性の観点から、高炉セメントは、河川工事や港湾工事をはじめ、一般のコンクリート工事にも広く使用される。

(b) シリカセメント

純度の高い珪石（けいせき）などの粉末を混合したもので、オートクレーブ養生を行うコンクリート製品に使用される。

シリカセメントについては、近年、ほとんど生産されていない。

(c) フライアッシュセメント

石炭火力発電所などから副生するフライアッシュを混合したセメントである。フライアッシュは微粉炭を燃焼した際に生じ、ポゾラン反応性を有する人工ポゾランの一種である (p. 45 のコラム参照)。ポゾラン反応は長期にわたって継続するため、フライアッシュを用いたコンクリートは長期強度の発現性に優れる。良質なフライアッシュは球形を有し、ボールベアリング効果 (2.4.2 参照) によりフレッシュコンクリートの流動性が向上することでコンクリートの単位水量を減じることができる。また、コンクリートの乾燥収縮は小さく、水和熱も小さくなる。フライアッシュセメントは、ダムなどのマスコンクリートに使用される (4.6.4(3) 参照)。

(3) その他のセメント

都市ごみ焼却灰等の廃棄物を主原料とした資源リサイクル型のセメントの一種として、JIS R 5214 エコセメントが 2002 年に制定された。JIS 規格に規定されていない混合セメントとして、中庸熟ポルトランドセメントにフライアッシュを 30% 置換した混合セメントが、ダム用セメントとして一般に使用されている。

その他、白色ポルトランドセメント、アルミナセメント、超速硬セメント、セメント系固化材などが製造されている。

2.2.3 セメントの原料と製造

(1) 概要

セメントの製造では、まず原料である石灰石、珪石、鉄原料、粘土などを粉砕して 1450℃ 程度の高温の回転窯 (ロータリーキルン) に投入し焼成することで、クリンカーとよばれる焼成物が得られる。このクリンカーを冷却装置で急冷し、石こうと混ぜて粉砕したものがセメントである。なお、石炭火力発電所から排出される「石炭灰」や鉄鋼製品を製造するときに副生する「高炉スラグ」といった副産物もセメントの原料として使用されており、産業廃棄物や副産物の有効活用に貢献している。

日本には、全国各地に純度の高い良質な石灰石を産出する鉱山が点在しており、セメント製造の観点からは、世界的にみても資源に恵まれた地域である。そのため、セメントの原料は 100% 自給自足されている状況である。

(2) 原料

ポルトランドセメントを製造する際の原料は、[図-2.2.2](#) のように大きく石灰石、珪石、鉄原料、粘土の 4 種類で、そのうちの 3/4 程度が石灰石である。

ポルトランドセメントの化学成分は、酸化物表記で酸化カルシウム (CaO)、二酸化けい素 (SiO₂)、酸化アルミニウム (Al₂O₃)、酸化第二鉄 (Fe₂O₃) が主で、この 4

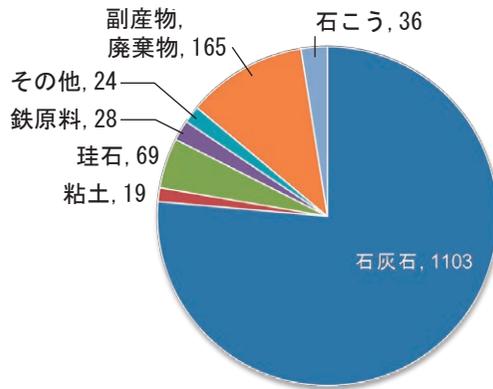


図-2.2.2 普通ポルトランドセメント 1 トン製造当たりの原料組成 (kg)

成分で質量の 95%程度を占め、地球上に存在する“ありふれた”元素でできていることが分かる。セメントを製造する主要原料は、これらの化学成分を最も効率よく取り込めるという観点で選定されており、石灰石は CaO 、珪石は SiO_2 、鉄原料は Fe_2O_3 、粘土は Al_2O_3 のソース（源）となっている。少し見方を変えると、重金属などの管理の問題を除けば、これらの元素が含まれていれば、どのようなものもセメント原料になり得るといえる。実際に国内のセメント工場では、珪石の代替として建設発生土が利用され、粘土の代替として石炭灰（フライアッシュ）や高炉スラグなどの産業廃棄物や副産物が多量に利用されている。

(3) 製造

セメントの製造は、図-2.2.3 のように石灰石や珪石などの天然の岩石から、水と化学反応する化合物（セメント鉱物）をつくる工程といえ、原料工程、焼成工程、および仕上げ工程からなる。

- ① 原料工程 : 原料を乾燥、粉砕し、所定の化学成分となるように各原料を均一に調合・混合する。
- ② 焼成工程 : 調合した原料を 1450℃ 程度の高温で焼成し、急冷してクリンカーとする。
- ③ 仕上げ工程 : クリンカーに所定量の石こう、規定量以下の少量混合成分および粉砕助剤を添加して微粉砕し、ポルトランドセメントとする。

セメントの焼成工程において、燃料は主に微粉炭を使用するが、廃タイヤや廃油、廃プラスチック、木くず、再生油などが代替燃料として利用されている。現在では、原料代替と燃料代替をあわせるとセメント 1 トン製造当たり 450 kg 程度の産業廃棄物や副産物が利用されている。

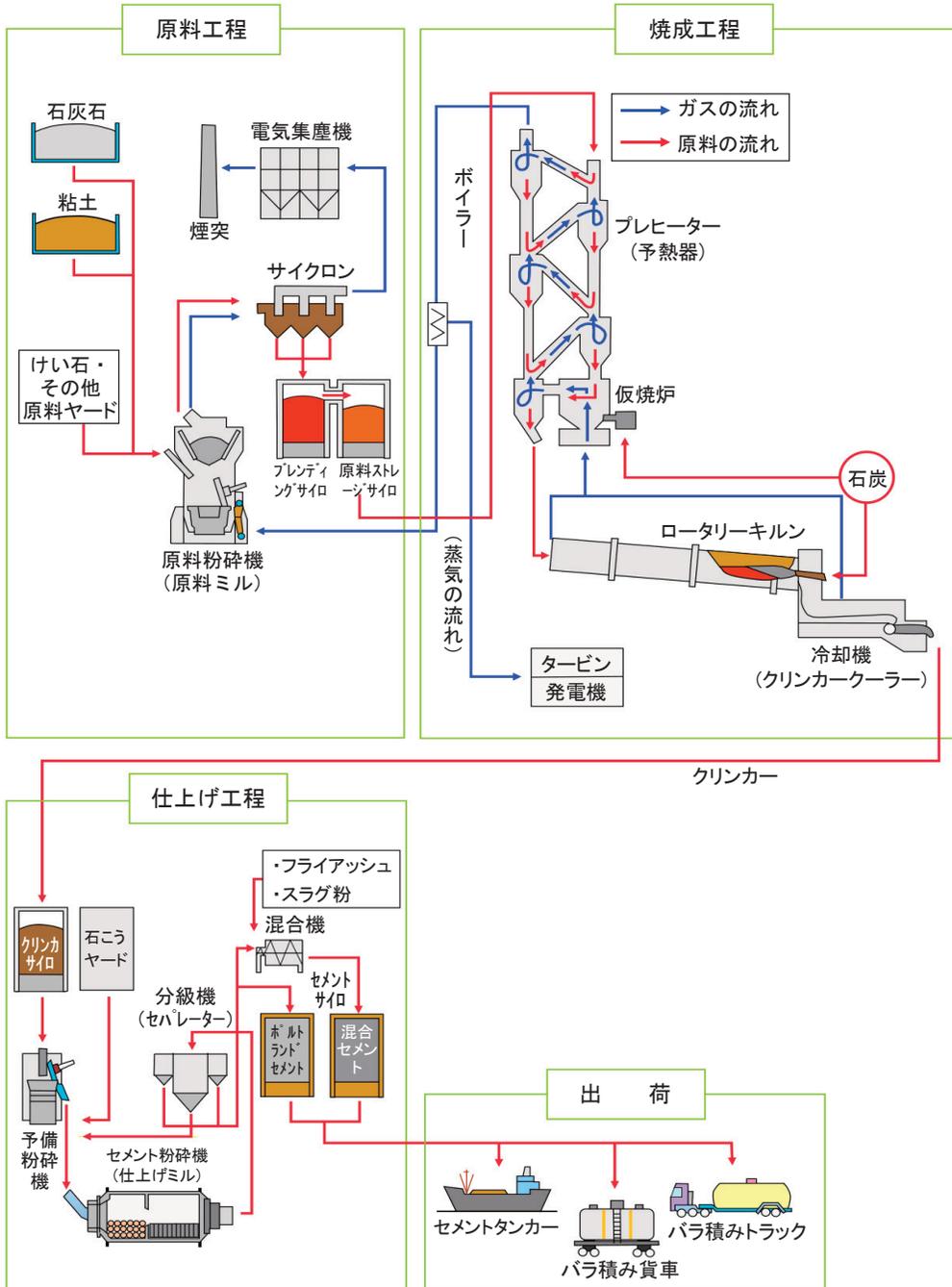


図-2.2.3 セメントの製造工程の例¹⁾

コラム セメント製造の歴史

日本で初めてセメントの製造が開始されたのは1875（明治8）年で、東京府下深川清住町（現在の東京都江東区清澄）に官営のセメント工場が設立された。明治初期の輸入セメントは大変高価で、セメントの価格は1トン50～60円程度とされている。現在の貨幣価値への換算として、当時の1円を2万円と仮定すると、セメント1トンが100～120万円に相当する。セメントは、国家の建造物を造るための重要な建設資材であり、国産化が必要であった。

官営のセメント工場の設立後、1881（明治14）年に山口県小野田（現在の山口県山陽小野田市）に社名をセメント製造会社と称する民営会社が設立された。当時のクリンカー焼成用の堅窯は現存しており、堅窯自体は国重要文化財に、堅窯周辺は県指定文化財にそれぞれ指定されている（写真）。

写真の堅窯は、その形状から徳利窯とよばれ、バッチ式の焼成窯である。クリンカーの製造は、徳利窯の中に原料と石炭を交互に充填し、1週間程度かけて焼成したとされている。一度の焼成で製造されるクリンカー量は10トン程度であった。この徳利窯は、操業当時は最大で12基あったとされている。

現在のセメントの製造では、クリンカーはロータリーキルンとよばれる回転窯で連続的に焼成され（[図-2.2.3](#)）、1日当たり数千トンの生産が可能である。



写真 クリンカー焼成用の堅窯（徳利窯）

2.2.4 化学成分と化合物

ポルトランドセメントの主要化学成分は、 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 であり、[表-2.2.2](#)のように含有量は普通ポルトランドセメントの場合でそれぞれ65%、20%、5%、3%程度である。

表-2.2.2 各種セメントの化学分析結果の例¹⁾

セメントの種類		化学成分 (%)															
		ig.loss	insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	SrO	S	Cl
ポルトランドセメント	普通	2.10	0.13	20.42	5.33	2.96	64.29	1.32	2.07	0.27	0.39	0.29	0.22	0.06	0.06	—	0.017
	早強	1.15	0.09	20.20	5.06	2.69	65.32	1.23	2.87	0.24	0.37	0.29	0.22	0.06	0.05	—	0.009
	中庸熱	0.63	0.08	23.71	3.60	3.79	63.88	0.91	2.12	0.23	0.35	0.21	0.23	0.10	0.03	—	0.007
	低熱	0.64	0.09	26.11	2.87	3.15	62.99	0.72	2.44	0.19	0.33	0.16	0.15	0.11	0.03	—	0.003
高炉セメント	B種	1.68	0.15	25.65	8.82	1.98	55.02	3.30	2.02	0.26	0.35	0.42	0.14	0.13	0.06	0.38	0.012
フライアッシュセメント	B種	1.19	13.32	19.05	4.73	2.82	54.67	0.99	1.88	0.29	0.42	0.23	0.18	0.08	—	—	0.015
エコセメント	普通	2.32	0.08	17.55	6.51	3.79	62.08	1.60	3.24	0.60	0.02	0.85	1.18	—	—	—	0.041

表-2.2.3 セメント鉱物とその特性²⁾

名称	分子式	略記号	特性				
			水和反応速度	強度	水和熱	収縮	化学抵抗性
けい酸三カルシウム (エーライト)	3CaO·SiO ₂	C ₃ S	比較的速い	28日以内の早期	中	中	中
けい酸二カルシウム (ビーライト)	2CaO·SiO ₂	C ₂ S	遅い	28日以後の長期	小	小	大
アルミン酸三カルシウム (アルミネート相)	3CaO·Al ₂ O ₃	C ₃ A	非常に速い	1日以内の早期	大	大	小
鉄アルミン酸四カルシウム (フェライト相)	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	かなり速い	強度にほとんど寄与しない	小	小	中

実際のセメント中では、これらの化学成分がそのままの状態では存在するのではなく、結晶質で各種の化合物（セメント鉱物）を形成している。主要な化合物は、表-2.2.3に示す4種類である。実用上、これらはカッコ内のエーライトやビーライトなどの呼称、C₃SやC₂Sなどの略記号で表す。この略記号において、CはCaO、SはSiO₂、AはAl₂O₃、FはFe₂O₃を意味する。

これらセメント鉱物は、すべてCaOを含むことが共通で、SiO₂を含むC₃SとC₂Sをあわせてカルシウムシリケート相、Al₂O₃を含むC₃AとC₄AFをあわせてカルシウムアルミネート相と称することもある。それぞれの化合物は、表-2.2.3のように水和反応速度や水和時の発熱量などで異なる特性を有する。なお、C₃S、C₂S、C₃A、C₄AFのいずれも、クリンカー中ではこのような純粋な組成式では存在せず、アルカリ等の微量成分を固溶している。そのため、C₃S、C₂Sは、クリンカー中の状態をエーライト、ビーライトと呼称し、同様にC₃A、C₄AFは、クリンカー中の状態をアルミネート相、フェライト相と呼称する。

また、**図-2.2.1**に示したように、これらの化合物の含有量を変えることでセメントの特性を変化させ、各種のポルトランドセメントが製造される。化合物の質量割合（鉱物組成）は、セメントの化学分析の結果を用いて、次のボーグ（Bogue）の式で算出される。この式は、1929年に R. H. Bogue に

表-2.2.4 各種ポルトランドセメントの鉱物組成の一例

	Bogue 式による鉱物組成 (%)			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
普通	57	18	9	9
早強	65	10	9	8
中庸熱	42	35	4	12
低熱	27	53	3	10

より提唱された計算式で、セメントの主要な4つの化学成分 CaO、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ が4つのセメント鉱物である C₃S、C₂S、C₃A、C₄AF になるとの前提でクリンカーの焼成状態を仮定し、4つの主要成分以外の微量成分の影響を考慮せずに、簡便にポルトランドセメントの鉱物組成が求められる。鉱物組成の一例を**表-2.2.4**に示す。

$$C_3S = (4.07 \times CaO) - (7.60 \times SiO_2) - (6.72 \times Al_2O_3) - (1.43 \times Fe_2O_3) - (2.85 \times SO_3) \quad (2.1)$$

$$C_2S = (2.87 \times SiO_2) - (0.754 \times C_3S) \quad (2.2)$$

$$C_3A = (2.65 \times Al_2O_3) - (1.69 \times Fe_2O_3) \quad (2.3)$$

$$C_4AF = (3.04 \times Fe_2O_3) \quad (2.4)$$

中庸熱ポルトランドセメントおよび低熱ポルトランドセメントでは、水和熱が高くならないように、**表-2.2.1**の JIS 規格で化合物量の上限値または下限値が次のように規定されている。

中庸熱ポルトランドセメント： C₃S ≤ 50 % C₃A ≤ 8 %

低熱ポルトランドセメント： C₂S ≥ 40 % C₃A ≤ 6 %

図-2.2.4には、普通ポルトランドセメント中の各化合物の反応率を示す。**表-2.2.3**にも示したように、各化合物のうち、C₃S と C₃A の水和反応速度は速く、C₂S は遅いことから、これらの含有率を変化させることで、各種のポルトランドセメントを使用したモルタルは、**図-2.2.5**に示すように異なった圧縮強度の発現性を示す。

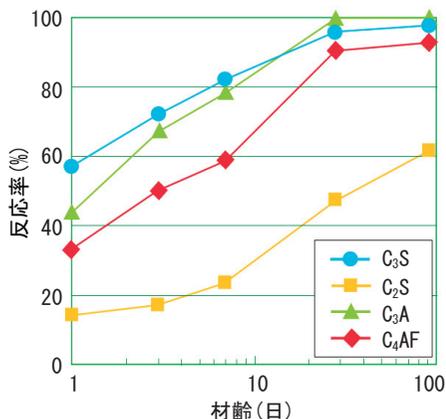


図-2.2.4 普通ポルトランドセメント中の各化合物反応率の一例

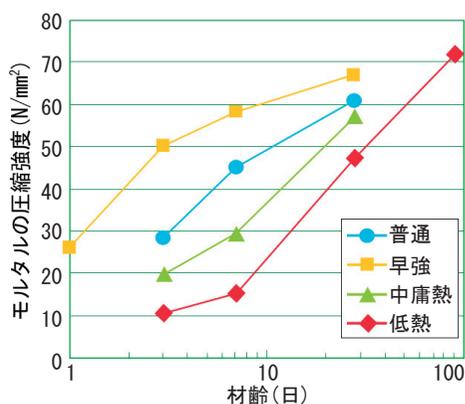


図-2.2.5 各種のポルトランドセメントで作製したモルタルの圧縮強度の経時変化の一例

コラム セメントの化合物の割合（鉱物組成）

ポルトランドセメント中の化合物（セメント鉱物）である C_3S 、 C_2S 、 C_3A 、 C_4AF は、構成する原子が規則的に三次元に配列している「結晶」であるため、クリンカーを顕微鏡で観察するとその形状を確認することができる。写真¹はクリンカーを切断し鏡面研磨して顕微鏡で観察したものである。セメントは、これを微粉砕して製造するため、各セメント鉱物の形状を確認することは難しくなる。写真中の六角板状に見える結晶が C_3S で、丸くて筋状の葉脈（ラメラ）が観察できるものが C_2S の結晶である。 C_3S と C_2S の結晶の間を埋めるものが、間隙相といわれる C_3A 相および C_4AF 相であり、これらはクリンカー焼成時の $1450\text{ }^\circ\text{C}$ では液相として存在し、冷却時に結晶化する。

これらセメント鉱物の含有比（鉱物組成）は、ポルトランドセメントの性質を左右する重要な指標である。本文でも述べた通り、一般にはセメントの鉱物組成は、ボーグの式を用いて算定される。この方法は、セメントの化学成分から鉱物組成を推定するひとつの方法で、セメント中の微量化学成分の影響やクリンカーの焼成状態の差異などは考慮されていない。そのため、ボーグの式により求めたセメント鉱物組成と実際の値は異なる場合もあることが指摘されてきた。これまでは、セメント中の実際の鉱物組成を求めることは難しく、クリンカー試料を顕微鏡で観察し、顕微鏡視野内の格子点 5000 点程度を確認する方法（ポイントカウント法）で鉱物組成を求めてきた。セメント鉱物は結晶性化合物であることから、粉末 X 線回折（XRD）で固有の回折線が確認できる。近年では、これを定量分析に応用した XRD/リートベルト法が普及しつつあり、セメント工場でのクリンカー焼成時の品質管理に適用されている。

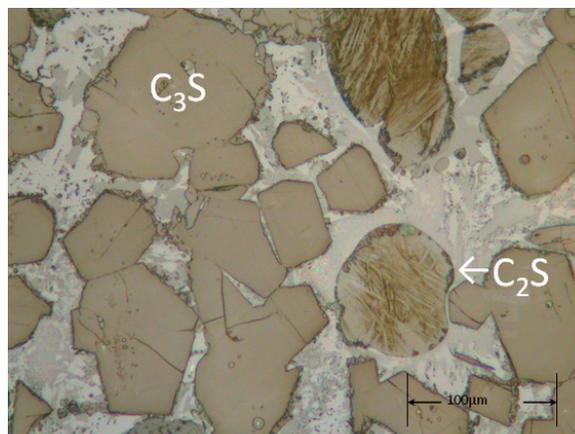


写真 クリンカーの顕微鏡観察例

2.2.5 物理・化学的性質と試験

セメントの品質は、一般に密度、粉末度、安定性、圧縮強さなどの物理的性質と化学分析結果により評価できる。各種セメントの JIS 規格を表-2.2.1 に、各種セメントの物理試験結果および水和熱試験結果の例を表-2.2.5 に示す。

(1) 密度

ポルトランドセメントの密度は、一般に SiO_2 と Fe_2O_3 が多いものほど大きくなる。混合セメントでは、混合材の分量が多くなるほど密度は小さくなる。また、セメントは貯蔵中に空気に触れると空気中の水分とわずかに水和反応し、同時に炭酸化も進行することで強熱減量（(7) 参照）が大きくなり、密度は小さくなる。さらに水和反応が進むと凝結が遅くなり、強度発現性も徐々に低下する。この現象をセメントの「風化」とよぶ。

セメントの密度は、コンクリートの配合計算の際に絶対容積の算定に必要である。密度はルシャテリエフラスコと鉱油を用い、一定質量の試料を入れ試料の体積を測定して求める。

(2) 粉末度

セメントの粉末度は、コンクリートの強度、乾燥収縮、耐久性などに影響を与える。粉末度は、一般にブレン空気透過装置を用いて測定した比表面積で表す。比表面積は、セメント 1g 当たりの全表面積を cm^2/g の単位で表す。比表面積が大きいほどセメント粒子は細かいことを示す。

一般的には、比表面積が大きいほど強度の発現が早く、水和熱が大きく、乾燥収縮が大きくなる。

(3) 凝結

セメントは、注水直後から水和反応を開始し、徐々に流動性を失い固化する。この現象を「凝結」という。適切な作業時間を確保するために凝結速度のコントロールが必要であり、凝結の始まりと終わりを示す指標として、始発および終結が定められている。始発はコンクリートの施工可能な限界の時間の目安を与えるもので、早強ポルトランドセメントと超早強ポルトランドセメントで 45 分以上、その他のセメントで 60 分以上と規定されている。

セメントによっては、練混ぜ直後に急にこわばって一時的に凝結したような状態になる現象を示すことがある。これを偽凝結という。通常は、再び練り混ぜることによってこわばりは解消する。

(4) 安定性

セメントに未反応の石灰 (CaO) や酸化マグネシウム (MgO) が過剰に含まれると