



コンクリート工学

岩波光保 伊藤 始 皆川 浩 佐川孝広 著

理工図書

コンクリート工学

岩波光保 伊藤 始 皆川 浩 佐川孝広 著

コンクリート工学

岩波光保 伊藤 始 皆川 浩 佐川孝広 著

コンクリート工学

はじめに

コンクリート工学を学ぶ理由は何であろうか。

わが国では高度経済成長期以降、大量のインフラが整備されてきたことで、安全で安心な暮らし、豊かで便利な暮らし、活力ある社会が実現されている。このインフラの多くはコンクリート構造物で構成されていることから、コンクリートなくしては現在の生活はあり得ないものとなっている。諸外国でも事情は同様である。

しかし、我々はコンクリートのことをきちんと理解しているであろうか。空気のように、「あって当たり前のもの」になってはいないだろうか。我々の生活を基盤から支えているコンクリートを適切に使いこなすには、正確な知識を身に付け、正しく理解することが重要である。土木技術者を志す諸君であれば、なおさらである。

コンクリート工学は、主に物理学と化学の基礎理論をベースとして、有史以来の先達の経験と知見を集約し体系化した学問であり、総合工学、経験工学の色彩が強い。したがって、初学者にとっては、ややとっつきにくい内容が多いことは否定できない。例えば、重要な考え方や数値が、過去の知見に基づいて設定されていたり、他の規準類からの引用であったりする。また、理論や言葉で説明しにくい性質も多く、実際の製造・施工の場面では暗黙知による部分がいまだに残されているのも事実である。コンクリート工学特有の専門用語も多い。そのため、教科書を一読するだけでは理解しにくい点が多々あり、結果的にコンクリート工学は、いわゆる「暗記科目」になっているのではないかと著者らは考えた。

そこで、本書の編集にあたっては、コンクリート工学が「暗記科目」ではなく、総合工学であることを常に意識し、本書を通読するだけで全体像が見渡せるように配慮した。また、実務での活用に重きを置いた記載内容としていることも本書の特徴である。執筆にあたって特に心がけたのは、目に見えない現象でも記載内容を読めばそのメカニズムを理解できるようにすること、各章を独立させず記載内容の連係を意識すること、他の規準類を読まなくても概要を把握できるように、そのエッセンスを本書に取り込むこと、などである。

また、記載内容に関心を持ってもらうことを目的として「コラム」を随所に設けたり、ひと通り学習した後でさらに詳しい内容を知りたいと考えた人のために「発展

的内容」を取り入れたりすることで、読者の多様なニーズに応えられるようにした。

本書でコンクリート工学を学んだ諸君が、その知識を駆使して建設の現場で活躍することを切に望んでやまない。

2021 年 7 月

著者記す

本書で用いる略称

日本産業規格	JIS
土木学会 コンクリート標準示方書	示方書
日本建築学会 建築工事標準仕様書・同解説 (鉄筋コンクリート工事)	JASS

目 次

第 1 章 建設材料としてのコンクリート／1

- 1.1 建設材料概論／2
- 1.2 コンクリートの概要と歴史／4
- 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／10
- 1.4 コンクリートの用途／12

第 2 章 構成材料／17

- 2.1 使用材料の構成／18
- 2.2 セメント／19
 - 2.2.1 概要／19
 - 2.2.2 セメントの種類／20
 - 2.2.3 セメントの原料と製造／23
 - 2.2.4 化学成分と化合物／26
 - 2.2.5 物理・化学的性質と試験／30
 - 2.2.6 水和反応と硬化体の性質／32
 - 2.2.7 セメントの環境性能／36
- 2.3 混和材／38
 - 2.3.1 概要／38
 - 2.3.2 フライアッシュ／39
 - 2.3.3 高炉スラグ微粉末／41
 - 2.3.4 膨張材／43
 - 2.3.5 シリカフューム／44
 - 2.3.6 石灰石微粉末／46
- 2.4 化学混和剤／46
 - 2.4.1 概要／46
 - 2.4.2 フレッシュ性状を制御するための化学混和剤／47
 - 2.4.3 硬化を制御するための化学混和剤／50

- 2.4.4 硬化後の性質を制御するための化学混和剤／51
- 2.5 骨材／52**
 - 2.5.1 概要／52
 - 2.5.2 骨材の種類／53
 - 2.5.3 骨材の品質と試験／54
 - 2.5.4 有害骨材／64
 - 2.5.5 特殊骨材／64
- 2.6 水／67**
 - 2.6.1 概要／67
 - 2.6.2 上水道水および上水道水以外の水の品質／67
 - 2.6.3 回収水／68
- 2.7 鋼材／69**
 - 2.7.1 概要／69
 - 2.7.2 鉄筋／70
 - 2.7.3 PC 鋼材／72
- 2.8 補強用繊維／73**
 - 2.8.1 概要／73
 - 2.8.2 短繊維／74
 - 2.8.3 連続繊維補強材／76

第3章 フレッシュコンクリートの性質／79

- 3.1 概説／80**
- 3.2 ワーカビリティとレオロジー的性質／82**
 - 3.2.1 ワーカビリティと適切な充填性の考え方／82
 - 3.2.2 フレッシュコンクリートのレオロジー的性質／83
 - 3.2.3 コンシステンシー／85
- 3.3 材料分離とブリーディング／86**
 - 3.3.1 材料分離とは／86
 - 3.3.2 粗骨材とモルタルの分離／87
 - 3.3.3 水の分離／88
- 3.4 コンクリート中の気泡の種類／90**
 - 3.4.1 エントレインドエア／90

- 3.4.2 エントラップトエア／91
- 3.5 フレッシュコンクリートの性質の評価方法／91
 - 3.5.1 スランプ試験／91
 - 3.5.2 空気量試験／98
 - 3.5.3 高流動コンクリートのスランプフロー試験および各種試験／99
- 3.6 フレッシュコンクリートの性質に影響を及ぼす要因／102
 - 3.6.1 概要／102
 - 3.6.2 単位水量・化学混和剤・空気量／103
 - 3.6.3 セメント・混和材／106
 - 3.6.4 骨材／107
 - 3.6.5 製造・施工／111

第4章 硬化コンクリートの性質／115

- 4.1 硬化コンクリートの構造／116
- 4.2 圧縮力が作用したときの破壊と圧縮強度／119
 - 4.2.1 圧縮強度とは／119
 - 4.2.2 応力－ひずみ曲線と破壊／121
 - 4.2.3 圧縮強度に影響を与える要因／126
 - 4.2.4 設計、製造、品質管理における圧縮強度の扱い／133
- 4.3 圧縮力が作用したときの変形挙動／135
 - 4.3.1 弾性係数（ヤング係数）／136
 - 4.3.2 動弾性係数／140
 - 4.3.3 ポアソン比／140
 - 4.3.4 クリープ／141
- 4.4 引張力または曲げが作用したときの破壊と強度／147
 - 4.4.1 引張強度／147
 - 4.4.2 曲げ強度／149
- 4.5 その他の強度（せん断・付着・支圧・疲労）／153
 - 4.5.1 せん断強度／153
 - 4.5.2 付着強度／155
 - 4.5.3 支圧強度／158
 - 4.5.4 疲労強度／159

4.6 体積変化とひび割れ／161

4.6.1 乾燥収縮／162

4.6.2 自己収縮／164

4.6.3 温度変化／166

4.6.4 ひび割れ／166

4.7 水密性／174

4.7.1 水密性とは／174

4.7.2 水密性に影響を与える要因／176

第5章 硬化コンクリートの性能の経時変化に対する抵抗性／181

5.1 概説／182

5.2 コンクリート中の鋼材腐食／184

5.2.1 鋼材腐食による劣化の進展／184

5.2.2 鋼材の腐食の基本メカニズム／186

5.2.3 塩害／189

5.2.4 中性化／192

5.2.5 対策／195

5.3 凍害／196

5.3.1 劣化性状／196

5.3.2 凍害の発生メカニズム／198

5.3.3 対策／200

5.4 セメント水和物の化学的变化に伴う劣化／201

5.4.1 劣化性状／201

5.4.2 劣化メカニズム／201

5.4.3 下水道施設における硫酸劣化とコンクリートの劣化の進行／205

5.4.4 対策／206

5.5 アルカリシリカ反応／207

5.5.1 劣化性状／207

5.5.2 劣化メカニズムと発生条件／209

5.5.3 対策／211

5.6 熱の作用による劣化／213

5.6.1 熱の作用による性能の変化／213

- 5.6.2 性能変化のメカニズム／214
- 5.7 電流の影響／216
- 5.8 エフロレッセンス／217
- 5.9 疲労／218
 - 5.9.1 材料の疲労強度／218
 - 5.9.2 道路橋床版の疲労／219
- 5.10 摩耗・すり減り／220
 - 5.10.1 滑り・転がり・衝突による摩耗／220
 - 5.10.2 キャビテーションによる摩耗／220
 - 5.10.3 対策／220

第6章 コンクリートの配合設計／225

- 6.1 概説／226
- 6.2 配合設計にかかわる基礎事項／230
 - 6.2.1 適切な配合／230
 - 6.2.2 施工性・ワーカビリティーの選定／231
 - 6.2.3 空気量の選定／233
 - 6.2.4 水セメント比の選定／233
 - 6.2.5 単位水量の選定／236
 - 6.2.6 細骨材率の選定／237
- 6.3 配合設計の手順／240
 - 6.3.1 概要／240
 - 6.3.2 設計条件の選定／240
 - 6.3.3 材料試験の実施／243
 - 6.3.4 細骨材率と単位水量の選定／244
 - 6.3.5 配合計算の実行／248
 - 6.3.6 試験練りの実施／256
 - 6.3.7 現場配合／260
 - 6.3.8 表計算ソフトを使った配合計算／260

第7章 コンクリートの製造と施工／265

7.1 概説／266

7.2 コンクリートの製造／269

7.2.1 概要／269

7.2.2 材料の貯蔵・計量／275

7.2.3 練混ぜ／278

7.2.4 運搬（場外運搬）／281

7.2.5 検査／283

7.2.6 レディームイクストコンクリート／289

7.3 コンクリートの施工／291

7.3.1 概要／291

7.3.2 型枠・鉄筋の組立／295

7.3.3 打込みの準備／299

7.3.4 運搬（現場内運搬）／300

7.3.5 打込み／306

7.3.6 締固め／309

7.3.7 表面仕上げ／311

7.3.8 養生／312

7.3.9 打継ぎ／315

7.4 寒中コンクリート、暑中コンクリート／318

7.4.1 寒中コンクリート／318

7.4.2 暑中コンクリート／319

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。

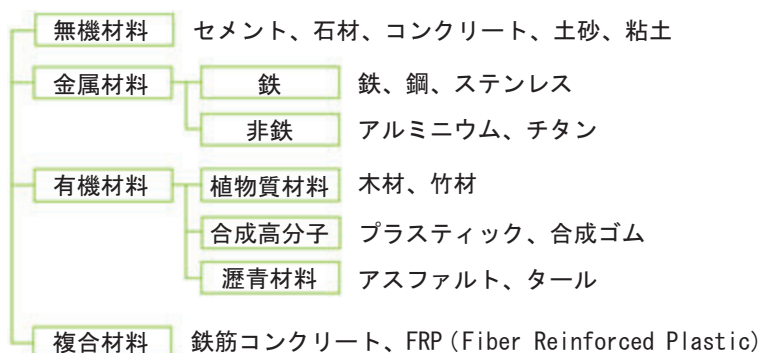


図-1.1.2 代表的な建設材料

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

に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ネ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、2018年度には8548万 m^3 で、東京ドーム約70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、2015年度には5500万トンであるが、世界の生産量は82億トンにも及ぶ。

(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、2020年度には東京地区で、15000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5 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）。

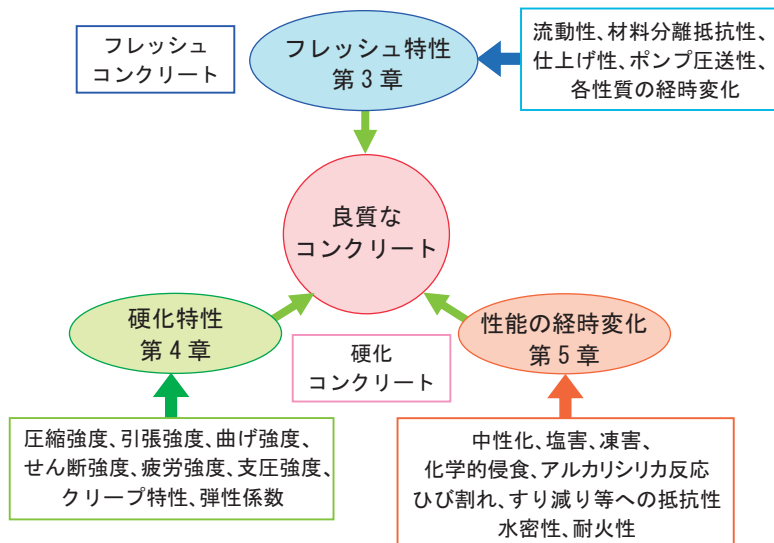


図-1.2.1 良質なコンクリートを製造する基本

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。

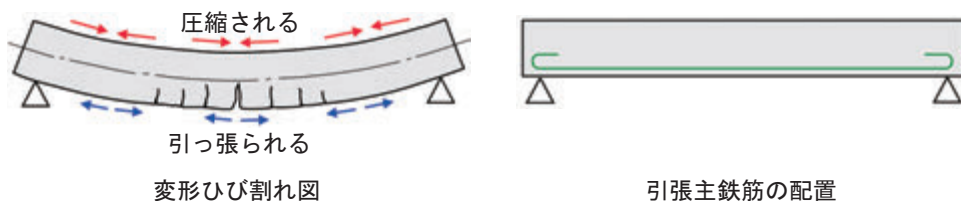


図-1.3.1 鉄筋コンクリートの原理

(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と、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て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。

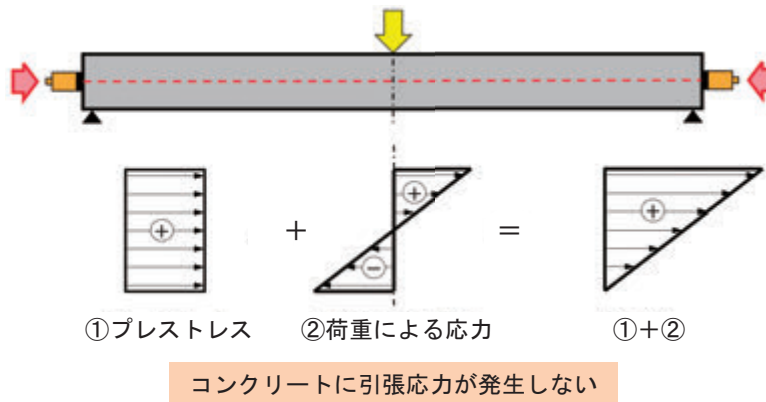


図-1.3.2 プレストレストコンクリートの原理

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、およそ、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応えるコンクリート

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

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。

□流動化コンクリート

□硬練りコンクリート

土木分野では、スランブが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ブ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、耐衝撃性など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、

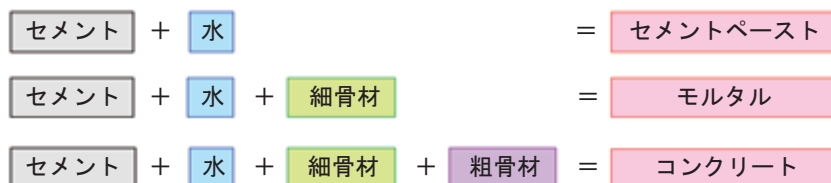


図-2.1.1 材料の構成と呼び方

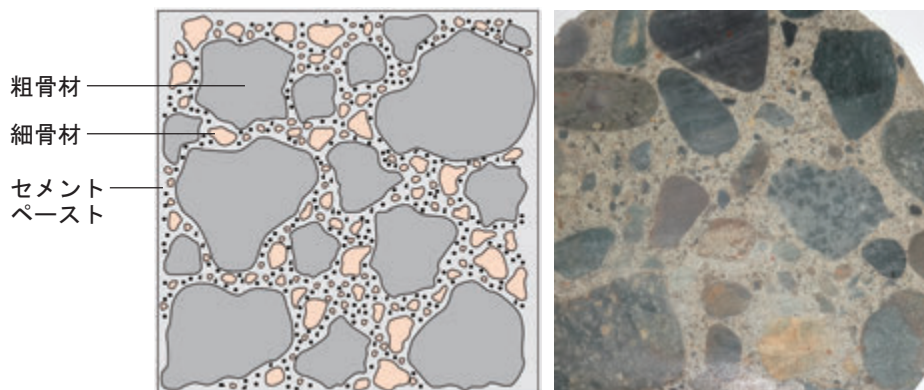


図-2.1.2 コンクリートの構成

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、

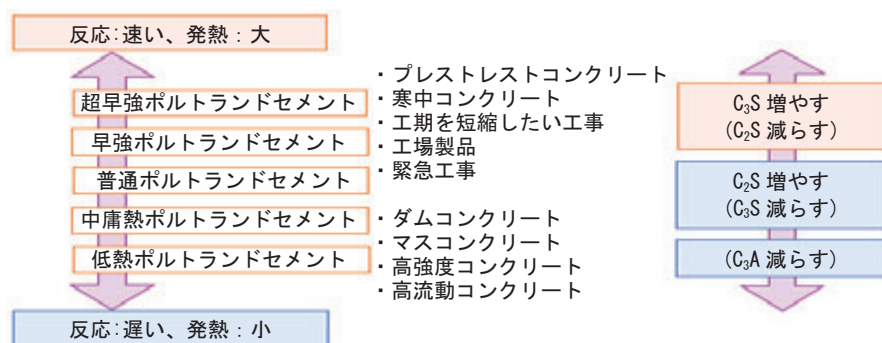


図-2.2.1 各種ポルトランドセメントの特性と用途

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 (%)				植物組成 (%)			水和熱(J/g)		比表面積 (cm ² /g)	凝結		安定性	圧縮強さ(N/mm ²)					
						強熱減量	三酸化硫黄	酸化カルシウム ⁽¹⁾	全アルカリ ⁽¹⁾	塩化物イオン	C ₂ S	C ₃ S	C ₄ A	7日		28日	始発 (min)		終結 (h)	ハット 法	ランヤ テリエ法 (mm)	1日	3日	7日
ポルトランドセメント (JIS R 5210)	普通	—	5以下	5.0以下	3.5以下	5.0以下	0.75以下 ⁽²⁾	0.05以下	—	—	—	—	— ⁽³⁾	—	250以上	80以上	10以下	良	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⁾	0.10以下	—	—	—	—	—	—	300以上	80以上	10以下	良	10以下	10.0以上	20.0以上	30.5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⁾	0.20以下	—	—	—	—	—	—	400以上	80以上	10以下	良	10以下	20.0以上	30.0以上	40.0以上	56.0以上	—
	中熱	—	3.0以下	3.0以下	5.0以下	0.75以下 ⁽²⁾	0.07以下	5.0以下	—	8.0以下	230以下	—	250以上	80以上	10以下	良	10以下	—	7.5以上	15.0以上	20.5以上	—	—	
	低熱	—	3.0以下	3.5以下	5.0以下	0.75以下 ⁽²⁾	0.10以下	—	4.0以上	4.0以下	230以下	—	250以上	80以上	10以下	良	10以下	—	—	7.5以上	22.5以上	42.5以上	—	
高炉セメント (JIS R 5211)	新設設	—	—	3.0以下	3.0以下	5.0以下	0.75以下 ⁽²⁾	0.20以下	—	—	4.0以下	—	—	—	250以上	80以上	10以下	良	10以下	—	10.0以上	20.0以上	40.0以上	—
	A 種	5を超え30以下	5.0以下	3.5以下	5.0以下	—	—	—	—	—	—	—	—	300以上	80以上	10以下	良	10以下	—	12.5以上	22.5以上	42.5以上	—	
	B 種	30を超え60以下	5.0以下	4.0以下	5.0以下	—	—	—	—	—	—	—	—	300以上	80以上	10以下	良	10以下	—	10.0以上	17.5以上	47.5以上	—	
シリカセメント (JIS R 5212)	C 種	60を超え70以下	5.0以下	4.5以下	5.0以下	—	—	—	—	—	—	—	—	330以上	80以上	10以下	良	10以下	—	7.5以上	15.0以上	40.0以上	—	
	A 種	5を超え10以下	5.0以下	3.0以下	5.0以下	—	—	—	—	—	—	—	—	300以上	80以上	10以下	良	10以下	—	12.5以上	22.5以上	42.5以上	—	
	B 種	10を超え20以下	—	3.0以下	5.0以下	—	—	—	—	—	—	—	—	300以上	80以上	10以下	良	10以下	—	10.0以上	17.5以上	37.5以上	—	
フライアッシュセメント (JIS R 5213)	C 種	20を超え30以下	—	3.0以下	5.0以下	—	—	—	—	—	—	—	—	300以上	80以上	10以下	良	10以下	—	7.5以上	15.0以上	30.5以上	—	
	A 種	5を超え10以下	5.0以下	3.0以下	5.0以下	—	—	—	—	—	—	—	—	250以上	80以上	10以下	良	10以下	—	12.5以上	22.5以上	42.5以上	—	
	B 種	10を超え20以下	—	3.0以下	5.0以下	—	—	—	—	—	—	—	—	250以上	80以上	10以下	良	10以下	—	10.0以上	17.5以上	37.5以上	—	
エコセメント (JIS R 5214)	C 種	20を超え30以下	—	3.0以下	5.0以下	—	—	—	—	—	—	—	—	250以上	80以上	10以下	良	10以下	—	7.5以上	15.0以上	30.5以上	—	
	普通	—	5.0以下	4.5以下	5.0以下	0.75以下 ⁽²⁾	0.20以下	—	—	—	—	—	—	250以上	80以上	10以下	良	10以下	—	12.5以上	22.5以上	42.5以上	—	
速硬	—	—	3.0以下	10.0以下	5.0以下	0.75以下 ⁽²⁾	0.15以下	—	—	—	—	—	—	300以上	—	1以下	良	10以下	15.0以上	22.5以上	25.0以上	30.5以上	—	

注: (1) 全アルカリ(%)=Na₂O(%) + 0.65K₂O(%) (2) 塩アルカリ形の配合は0.60以下 (3) ここに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

第3章

フレッシュ コンクリートの性質

- 3.1 概説
- 3.2 ワーカビリティとレオロジー的性質
- 3.3 材料分離とブリーディング
- 3.4 コンクリート中の気泡の種類
- 3.5 フレッシュコンクリートの性質の評価方法
- 3.6 フレッシュコンクリートの性質に影響を及ぼす要因

3.1 概説

学習のポイント

- 材料を混ぜ合わせてもまだ固まらないコンクリートをフレッシュコンクリートとよぶ。
- フレッシュコンクリートの性質を表す用語には、ワーカビリティやコンシステンシーなどがある。

(1) フレッシュコンクリートとは

コンクリートは、硬化し始めるまでの1～2時間に流動させることができ、さまざまな形状の型枠に詰めることができる。このような水、セメント、細骨材、粗骨材を混ぜ合わせてもまだ固まらず、流動可能な時期や状態のコンクリートをフレッシュコンクリートとよぶ。コンクリートは主に生コンクリート工場で練り混ぜられ、建設現場に運搬されて型枠内に打ち込まれるため、フレッシュコンクリートには適切な作業性（後述するワーカビリティ）が求められる。適切な作業性とは、型枠の隅々までコンクリートが行きわたる性質（後述するコンシステンシー）をもつこと、コンクリート中の粗骨材や水などの材料が分離しない性質（後述する材料分離抵抗性）をもつこと、それらの性質を所要の時間にわたり保つことなどを意味している。

フレッシュコンクリートは、練り混ぜてから2時間程度を過ぎると流動できなくなり、所定の材齢を経過したときに硬化体（構造体）としての機能を発揮する。このようにセメントが十分に水和し、形状が固定された時期や状態のコンクリートを硬化コンクリートとよぶ（第4章 参照）。

(2) フレッシュコンクリートの各種性質

フレッシュコンクリートの性質は、ワーカビリティ、コンシステンシー、プラスチックティ（形状保持性）、フィニッシュビリティ（仕上げ性）、ポンパビリティ（ポンプ圧送性）などの用語で表される。材料分離抵抗性や空気量もフレッシュコンクリートの重要な性質である。

(a) ワーカビリティ

ワーカビリティは、作業性を包括的に表す性質であり、コンクリートが材料の分離を生じることなく、運搬・打込み・締固め・仕上げなどの作業が容易にできる程度を示す性質である。3.2 で詳述する。

(b) コンシステンシー

コンシステンシーは、ワーカビリティを判断する重要な性質であり、フレッシュコンクリートの変形や流動に対する抵抗性の程度を表し、硬さ軟らかさに関係する性質である。3.2 で詳述する。

(c) プラスティシティー

プラスティシティーは、フレッシュコンクリートの粘性に関係して、型を取り去ったときのコンクリートの形状保持性を表す。ゆっくり変形して崩壊や材料分離を生じないコンクリートがプラスティシティーのよいコンクリートと判定され、施工の際の型枠への詰めやすさや材料分離のしにくさを表す。粘性と変形に関しては3.2 で詳述する。

(d) フィニッシュアビリティ

フィニッシュアビリティは、フレッシュコンクリートの流動性と粘性に依存する表面仕上げのしやすさに関する性質（仕上げ性）である。コンクリートの流動性が高く、粘性が低いとコテによる表面の仕上げがしやすくなる。粘性と変形に関しては3.2 で詳述する。また、ブリーディングによるコンクリート表面の水にも影響を受ける（3.3.3(1) 参照）。

(e) ポンプアビリティ

ポンプアビリティは、圧力が作用したときのフレッシュコンクリートの流動性、変形性、材料分離抵抗性に依存するポンプで圧送するときの容易さに関する性質（ポンプ圧送性）である。ポンプ圧送における配管閉塞などのトラブルを回避するための重要な性質である。ポンプ圧送に関しては、7.3.4 で詳述する。

(f) 材料分離抵抗性

材料分離は、コンクリートを構成する材料の密度と粒径が多岐にわたることに起因し、コンクリート内の材料分布が練上がり直後の均質な状態から施工を通して不均質な状態に変化する現象である。標準的なコンクリートでは、打込み中の粗骨材とモルタルの分離、打込み後の水の分離・上昇（ブリーディング）が主な材料分離である。3.3 で詳述する。

(g) 空気量

コンクリート中には、流動性と耐凍害性の改善を目的に、練混ぜ時に AE 剤などの空気連行作用がある化学混和剤を用いることで、全体積の 3～6 % の気泡を含ませるように配合を決める。3.4 で詳述する。

3.2 ワーカビリティとレオロジー的性質

学習のポイント

- ワーカビリティを良好にするためには、所定の時間にわたり施工に必要な流動性をもち、かつ分離しない性質をもつ配合を設計することが大切である。
- フレッシュコンクリートは、流動と粘性に関連したレオロジー的性質を有し、軟練りコンクリートはビンガム流体として扱われる。
- コンシステンシーとは、流動や変形に対する抵抗性の程度である。

3.2.1 ワーカビリティと適切な充填性の考え方

ワーカビリティとは、フレッシュコンクリートの重要な性質のひとつであり、作業性を包括的に表す用語で、一般に数値化できない定性的な性質である。ワーカビリティは、打込み作業のみの容易さを表す性質ではなく、コンクリートが材料分離を生じることなく、運搬・打込み・締固め・仕上げなどの作業が容易にできる程度を表す性質である。言い換えると、欠陥のない構造物をつくるために必要なさまざまな性質の良し悪しを、総合的かつ相対的に表す性質である。また、ワーカビリティは配筋や使用機械などの施工条件に応じて変わる性質であることに対して、例えば、コンシステンシーはコンクリート自体の固有の指標である。

ワーカビリティを良好にするためには、所定の時間にわたり施工に必要な流動性（適切なコンシステンシー、3.2.3 参照）をもち、かつ分離しない性質（材料分離抵抗性、3.3 参照）をもつ配合を設計することが大切である。図-3.2.1 左にコンクリートを適切に充填するための流動性と材料分離抵抗性の考え方を示す。流動性はスランプの増加に対して高くなり、材料分離抵抗性はスランプの増加に対して低くなる（3.5.1 参照）。下限のスランプを下回る範囲では、コンクリートの流動性が不足し、充填不良が生じる可能性が高まる。一方、上限のスランプを超える範囲では、材料分離抵抗性が不足し、粗骨材の密集や過剰なブリーディングが生じる可能性が高まる。このような施工時の不具合を防止するためには、下限のスランプから上限のスランプまでの範囲において、構造物条件にあわせたスランプを選定する必要がある。特に、配筋状態が高密度であるときには、図-3.2.1 右のように高い流動性と材料分離抵抗性が求められ、狭くなった範囲から適切なスランプを選定する必要がある。

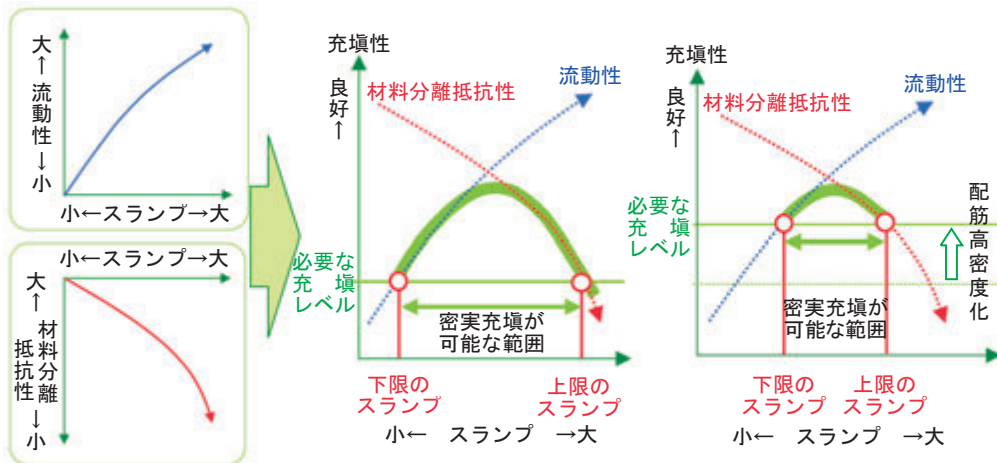


図-3.2.1 適切な充填性の考え方（配筋条件による要求レベルの変化）¹⁾

3.2.2 フレッシュコンクリートのレオロジー的性質

(1) レオロジーとビンガム流体

標準的なコンクリートを型枠に密実に充填するために、一般に振動機を用いてフレッシュコンクリートを締め固める。振動機でフレッシュコンクリートに継続的に振動を与えると、フレッシュコンクリートは変形し、流動を開始する。流動は急激に進まず、緩やかに進む。このように流動の速度を一様にしようとするせん断応力が生じる性質を粘性とよぶ。フレッシュコンクリートは、流動と粘性に関連したレオロジー的性質を有している。ここでレオロジーとは物質の変形と流動の科学と定義され、流動学などとよばれる。

粘性を有する流体は粘性流体とよばれる。水も粘性流体である。粘性流体のうち図-3.2.2 左の流体Aのようにせん断応力とひずみ速度（流動速度）が比例する流体、すなわちニュートンの粘性法則に従うものをニュートン流体とよぶ。さらに粘性流体には、流体Bのようなせん断応力の増加に伴いひずみ速度の増加量が大きくなる擬塑性流体と、流体Cのようなせん断応力の増加に伴いひずみ速度の増加量が小さくなるダイラタント流体がある。

一方、小さな外力に対しては流動しないが、所定以上の外力を加えると流動し始める流体がある。このような流体は塑性流体とよばれる。塑性流体は、図中の流体D、E、Fのように原点を通らず降伏値 τ_y をもつように挙動する。塑性流体のうち流体Dは、研究者の名からビンガム流体とよばれ、ひとたび所定のせん断応力を超えるとひずみ速度がせん断応力と直線関係を保って流動する。直線関係でない流体E、Fは、非ビンガムの塑性流体などとよばれる。

第4章

硬化コンクリートの 性質

- 4.1 硬化コンクリートの構造
- 4.2 圧縮力が作用したときの破壊と圧縮強度
- 4.3 圧縮力が作用したときの変形挙動
- 4.4 引張力または曲げが作用したときの破壊と強度
- 4.5 その他の強度（せん断・付着・支圧・疲労）
- 4.6 体積変化とひび割れ
- 4.7 水密性

4.1 硬化コンクリートの構造

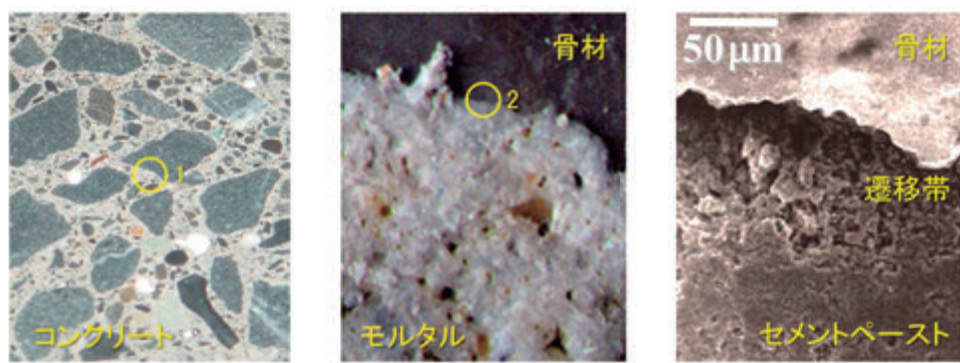
学習のポイント

- コンクリートを構成する材料の体積のおおよその比率は、骨材（芯材）70 %、セメントペースト（糊）25 %、気泡（空隙）5 %である。
- コンクリートは、気体や液体が出入りできる多孔質な材料である。

(1) 概説

固まったコンクリート（硬化コンクリート）は、まだ固まらないコンクリート（フレッシュコンクリート）と同様に、セメントペースト、細骨材、粗骨材、連行された気泡で構成されている。それらの体積比は、芯材である骨材が約 70 %、糊であるセメントペーストが約 25 %、気泡が約 5 %である（写真-4.1.1(a)）。骨材とセメントペーストが固く結びつくことで、コンクリートは構造物に要求される強度や各種作用に対する抵抗性（耐久性）を発揮することができる。

まだ固まらないコンクリートからコンクリートが硬化する過程で、骨材の状態はほとんど変化しない。それに対して、セメントペーストの状態は大きく変化する。このセメントペーストの硬化状態がコンクリートの性能を左右するため、その理解が大切である。硬化コンクリートで着目する主要な性能は、力学的性能（4.2、4.4、4.5 参照）、変形性能（4.3 参照）、体積変化（4.6 参照）、水密性（4.7 参照）、耐久性（第5章 参照）である。これらの性能に対しては、セメントペースト自体およびセメントペーストと骨材の境界面の影響が大きい。このセメントペーストと骨材の境界面は遷移帯とよばれている（写真-4.1.1(c)）。



(a) コンクリートの切断面

(b) 〇1 部分の拡大写真

(c) 〇2 部分の拡大写真

写真-4.1.1 硬化コンクリートの切断面

(2) セメントペーストの構造（発展的内容）

セメントペースト内では、硬化する過程においてセメントと水が減少し、水和生成物が増加する。セメントの反応率によるセメントペースト内の構成比の変化を図-4.1.1に示す。ここでは、マクロな体積変化および水の出入りは考慮しないこととする。セメントと水が練り混ぜられた直後のセメントの反応率は0%であり、未水和セメントと毛細管水の2相が存在する状態である。水和反応の進行によるセメントの反応率の増加に伴い、未水和セメントと毛細管水が減少し、水和生成物が増加する。そして、セメントの水和が完了して反応率が100%になると、硬化したセメントペーストは、ゲル本体、ゲル水、毛細管水（キャピラリー水）、自己乾燥による空隙で構成されるようになる。図-4.1.1(a)の水セメント比50%では、ゲル本体が約60%、ゲル水が約20%、毛細管水が約10%強存在し、残りが自己乾燥による空隙である。

ゲル本体とは、水和したセメントと結合水で構成される部分である。結合水は水和生成物として化学的に結合した水（液体ではない水）で、一般的な供用環境の温度では脱水しないものである。ゲル水は水和生成物の一部とみなされ、硬化後にゲル本体の空隙（ゲル空隙）に存在する水である。ゲル空隙は、ナノメートル（ 10^{-9} m）オーダーの微細な空隙である。毛細管水は、硬化したセメントペーストの空隙（毛細管空隙）に存在する水である。毛細管空隙は、コンクリート表面までの距離や外部環境により蒸発と吸水を生じる。毛細管空隙の大きさは、マイクロメートル（ 10^{-6} m）オーダーで、ゲル空隙と比較すると粗大な空隙である。コンクリートが乾燥を受けなければ、毛細管空隙は水で満たされており、未水和セメントが残存するうちは

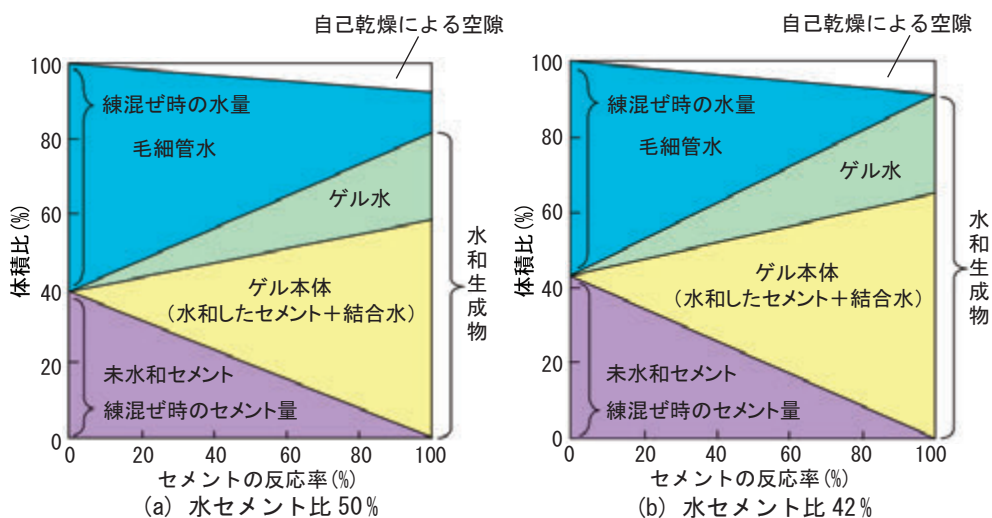


図-4.1.1 セメントペースト内の構成比とセメントの反応率の関係

セメントの水和反応は進行し、毛細管空隙に水和生成物が析出する。一方で、コンクリートが乾燥を受けると毛細管空隙は空の状態となる場合もあり、その場合は未水和セメントが残存していても水和反応は進行しない。自己乾燥による空隙は、セメント自体の化学変化による体積減少で生じる（2.2.6(3) 参照）。この空隙は、水中養生などで水が侵入する場合には、水で満たされるため、毛細管水の体積と区別ができなくなる。

セメントがすべて反応するのに必要な水量は、水セメント比で表すと42%（結合水23%＋ゲル水19%）であり、これを下回るとセメントが100%反応する以前に毛細管水がゼロとなり、それ以上セメントが水和反応することができなくなる。図-4.1.1(b)は、セメントが100%反応したときに毛細管水がゼロになった状態を表している。したがって、これより水セメント比が小さければ、図-4.1.2に示すように硬化したセメントペースト内に未水和状態のセメント（未水和セメント）が存在することになる。一方、これより水セメント比が大きければ、セメントがすべて反応しても毛細管水が残存していくことが理解できる。

(3) コンクリート内部の空隙

硬化したセメントペースト自体のもつ空隙には、(2)で述べたようにゲル空隙と毛細管空隙、自己乾燥による空隙とがある。骨材とセメントペーストとの境界面には、遷移帯とよばれる疎な組織からなる層（写真-4.1.1）、ブリーディング水による骨材下面の空隙（写真-4.1.2）、セメントペーストの自己収縮や乾燥収縮によりセメントペーストと骨材とが肌離れして生じた空隙などが存在する。これらの空隙が存在す

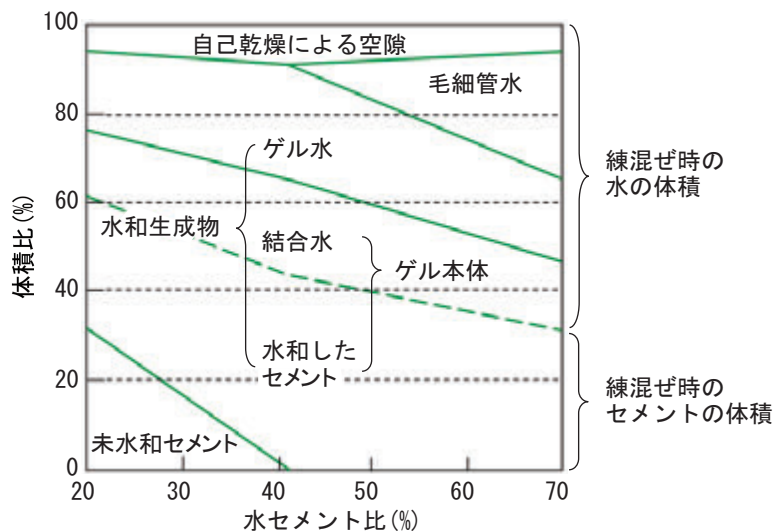


図-4.1.2 硬化したセメントペースト内の構成（セメントの完全水和時）¹⁾

ることから、コンクリートは気体や液体が出入りできる多孔質な複合材料であることが分かる。そして、これらの空隙が塩化物イオンや二酸化炭素などの劣化要因となる物質の移動経路になるため、配合設計や製造・施工において空隙発生の抑制に留意することが大切である。

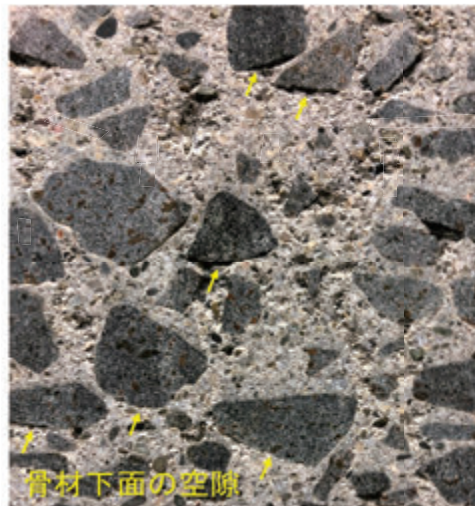


写真-4.1.2 骨材下面の空隙（実験的にブリーディング水を多くした場合）

4.2 圧縮力が作用したときの破壊と圧縮強度

学習のポイント

- コンクリート強度とは、一般的に材齢 28 日を基準とした圧縮強度である。
- コンクリートは低い応力では弾性体として挙動するが、応力やひずみが大きくなると内部に微細ひび割れが生じて弾塑性体として挙動する。
- 圧縮強度は、配合、材料、製造・運搬、供試体の形状寸法、試験材齢などに影響を受ける。
- 圧縮強度は、設計や製造の場面ごとに扱い方や呼び方が使い分けられる。

4.2.1 圧縮強度とは

コンクリートが圧縮力で破壊するまでの作用応力の最大値を圧縮強度とよぶ。コンクリートは圧縮力に対する抵抗を期待された材料であり、圧縮強度は構造物を設計する際に重要な材料物性である。圧縮強度や圧縮破壊に至るまでの応力とひずみの関係は、鉄筋コンクリート部材の変形挙動に影響を与える。はりや柱などの曲げ

第5章

硬化コンクリートの性能の 経時変化に対する抵抗性

- 5.1 概説
- 5.2 コンクリート中の鋼材腐食
- 5.3 凍害
- 5.4 セメント水和物の化学的変化に伴う劣化
- 5.5 アルカリシリカ反応
- 5.6 熱の作用による劣化
- 5.7 電流の影響
- 5.8 エフロレッセンス
- 5.9 疲労
- 5.10 摩耗・すり減り

5.1 概説

学習のポイント

- コンクリート構造物を長持ちさせるためには、性能の経時変化に対する抵抗性をコンクリートに付与するとともに適切な維持管理を実施する必要がある。
- 適切な維持管理のためには、性能の経時変化に及ぼす要因あるいは作用、および劣化機構を適切に把握することが肝要である。

(1) 性能低下の要因

適切な計画、設計、製造、施工によって建造されたコンクリート構造物は高い耐久性を有している。ここで、耐久性とは、各種の要求性能があらかじめ定められた期間にわたり確保され続けることである。コンクリート構造物は長期にわたって各種の作用に曝され続ける。そのため、硬化したコンクリートに性能の経時変化に対する抵抗性を付与し、コンクリート構造物の経年的な健全度の低下を抑制しなければならない。

ここで、性能の経時変化に対する抵抗性を決める主たる要因または作用、およびその結果として生じる劣化現象は、次のように大別できる。

<要因または作用>

- ① 計画・設計 ② 使用材料・配合 ③ 製造・施工
- ④ 環境作用 ⑤ 外力作用

<劣化現象>

- ① 鋼材腐食による劣化 ② コンクリートの劣化

なお、環境作用と外力作用は作用の発生頻度によって、永続作用、変動作用、偶発作用にさらに分類できる。

性能の経時変化に対する抵抗性をコンクリートに適切に付与するためには、構造物の供用環境や施工条件などを調査して、これらの要因または作用、および劣化現象を適切に想定しておくことが肝要である。なお、上記の要因または作用は、単独あるいは複合して影響を及ぼす。また、劣化現象も単独あるいは複数の現象が同時にまたは異なる速度で進行する。複合する場合は、単独の場合よりも劣化の進行速度が速くなることがあるので注意が必要である。

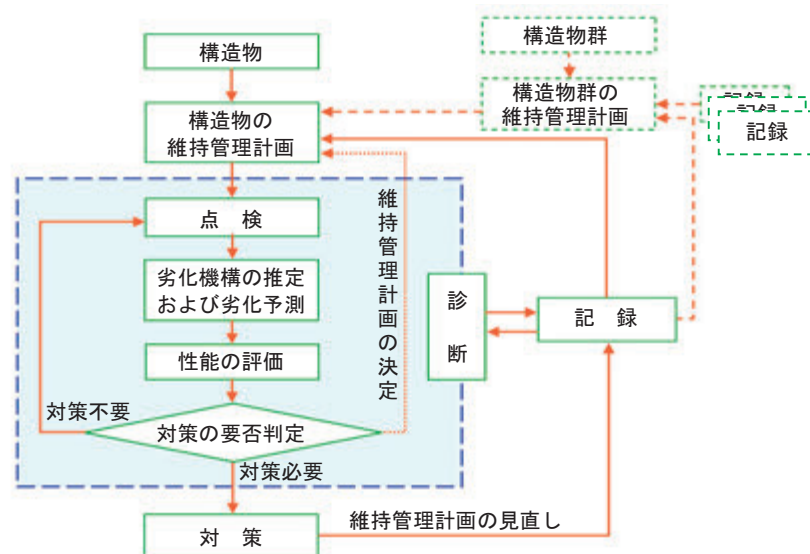
(2) コンクリート構造物の維持管理

コンクリート構造物は適切に計画・設計・製造・施工がなされていれば、基本的に高い耐久性を有することになる。しかし、供用環境が想定以上に過酷であった場合や、当初予定していた品質を構造物に付与できなかった場合、供用期間が長期化して性能低下が顕著になってきた場合には、コンクリート構造物の性能が許容される水準よりも下回ってしまうことがある。このような事態を避けるために、適切な維持管理計画を策定し、それを実行する必要がある。

維持管理の基本的なフローを図-5.1.1に示す。維持管理は「構造物の維持管理計画」に基づいて点検を実施し、その結果に基づいて構造物の性能を評価し、対策の可否を判定する。これらの一連の行為は「診断」とよばれる。対策が必要と判定された場合は、更新、補修・補強、供用制限などの対策を実施する。診断および対策の結果は適切に記録として残し、その後の維持管理に役立てる。

図-5.1.2に示すように、診断には実施時期や頻度に応じて、初期、定期および臨時の各診断がある。また、初期の診断においては初期点検、定期の診断においては日常点検と定期点検、臨時の診断には緊急点検と臨時点検が実施される。各点検は調査を実施することで行われ、調査には標準調査と、標準調査によって必要と判断された場合に追加で実施される詳細調査がある。

調査の方法には、目視による外観観察、テストハンマーによってコンクリート表面を叩いて変状の有無を確認する打音調査といった比較的簡易に実施できる方法か



実線矢印：対象とする構造物の維持管理において必ず実施するフロー
破線矢印：必要に応じて実施するフロー

図-5.1.1 維持管理の基本フロー¹⁾

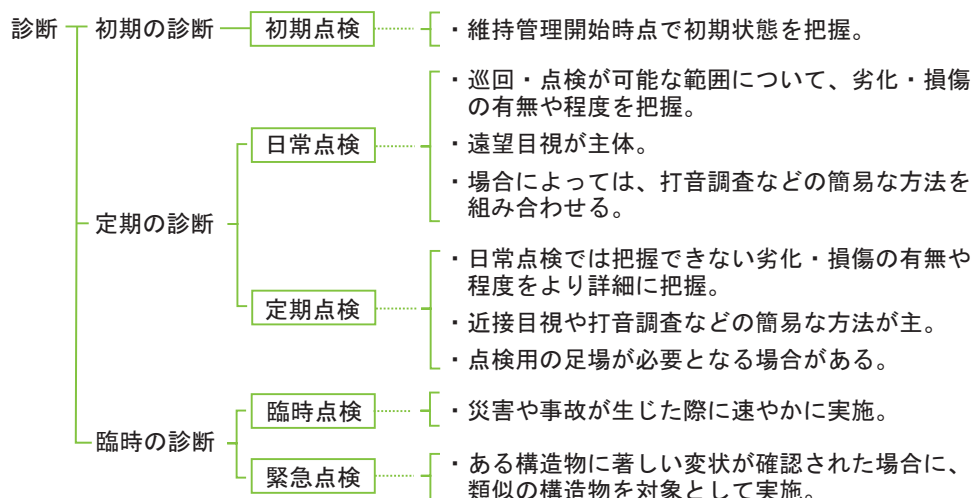


図-5.1.2 診断と点検の種類

ら、各種の非破壊試験や採取したコア試料を用いた分析試験、ダンプトラックによる載荷試験といった難易度は高いものの、性能を詳細かつ定量的に把握できる方法まで多種多様である。点検は、診断の種類、想定される劣化機構、経済性などを考慮して、これらの方法を適切に選定することや組み合わせることで実施される。

5.2 コンクリート中の鋼材腐食

学習のポイント

- コンクリート内部が高アルカリ性雰囲気であるため、コンクリート中の鋼材の表面には不動態皮膜が形成され、腐食から保護される。
- コンクリート内部に塩化物イオンが侵入して不動態皮膜が破壊されたり、中性化が進行してコンクリート内部の pH が低下したりすると、鋼材腐食が発生する。
- 鋼材腐食によって生成される腐食生成物（さび）は、鋼材中の Fe よりも体積が大きいので、コンクリート内部に膨張圧を発生させ、コンクリートにひび割れを発生させる。

5.2.1 鋼材腐食による劣化の進展

健全なコンクリートの内部には CH（セメント水和物の水酸化カルシウム、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）やアルカリ金属イオンが多量に存在するため、コンクリートの空隙水の pH はおおそ 12～13 程度に高く保たれる。つまり、健全なコンクリート内部の鋼材の周囲は、

高アルカリ性雰囲気となる。このような環境であると、鋼材（鉄筋やPC鋼材）の表面には不動態皮膜（数 nm の厚さの酸化物の層）が形成され、鋼材は腐食から保護される。しかし、周辺の環境に存在する CO_2 （二酸化炭素）が作用してコンクリートのアルカリ度が低下したり、塩化物イオンが不動態皮膜に作用したりすると、この不動態皮膜は消失したり破壊されたりする。すると、図-5.2.1 に示すようなアノード反応とカソード反応からなる腐食電池が形成され、腐食生成物（さび）が生じる。

腐食生成物は、図-5.2.1 に示すように、まず $\text{Fe}(\text{OH})_2$ （水酸化鉄(II)）が生成され、その後、 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ は空隙水の pH、塩化物イオン濃度、溶存酸素量などの要因によってさまざまな腐食生成物に変化する。主要な腐食生成物は FeOOH （オキシ水酸化鉄）や Fe_3O_4 （四酸化三鉄）などであり、それらの体積は鋼材中の Fe よりも大きいため、コンクリート内部には膨張圧が発生する。この膨張圧によりコンクリートにひび割れが生じると、このひび割れを通じてより多くの水や酸素が鋼材表面に供給されるようになり、鋼材の腐食が加速される。さらに腐食が進むと、鋼材の断面が欠損するため、部材の耐力が低下する。また、ひび割れの進展に伴い複数のひび割れが連結すると、かぶりの浮きや剥離・剥落が生じる。

鉄筋コンクリートの部材断面を表した図-5.2.2 から分かるように、鋼材腐食によるひび割れの発生パターンは、かぶり、鋼材の径、鋼材のあきに依存して、それらの相対的な関係によって変化する。例えば、かぶりが大きい場合でも、鋼材の径が大きくなれば、図-5.2.2 の左図のように剥離を生じるひび割れパターンになり得る。

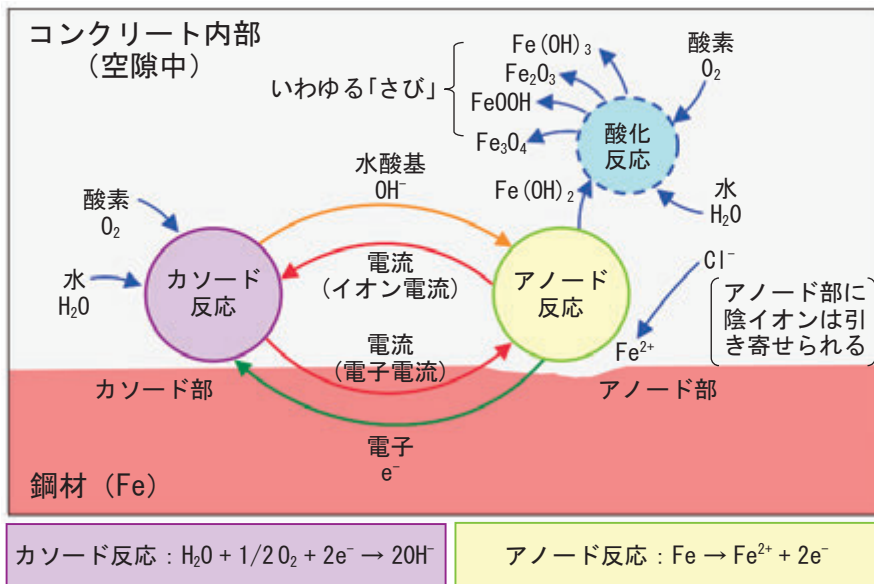


図-5.2.1 コンクリート内部の鋼材の腐食進行のメカニズム

第6章

コンクリートの 配合設計

- 6.1 概説
- 6.2 配合設計にかかわる基礎事項
- 6.3 配合設計の手順

6.1 概説

学習のポイント

- 配合には、単位体積 1m^3 当たりの質量割合である計画配合と、体積や骨材の含水状態などを補正した質量割合である現場配合がある。
- 配合設計では、必要な性質や性能のコンクリートとなるように構成材料の体積割合を決定する。

(1) コンクリートの配合設計で大切なこと

コンクリートの「配合」とは、コンクリートをつくる各材料の割合のことである。配合は一般に単位体積当たりの質量 (kg/m^3) で表され、その質量は「単位量」とよばれる。配合には「計画配合」と「現場配合」があり、「計画配合」とは単位体積を 1m^3 (1000 リットル) としたときの材料の質量割合である。計画配合において、骨材は表面乾燥飽水状態を想定する。ちなみに、実用で「 m^3 」は「立米 (りゅうべい)」と称される。また、土木分野では「配合」、建築分野では「調合」とよばれる。

計画配合に対して、「現場配合」とは1回の練混ぜ (1 バッチ) の体積に必要な各材料の質量割合を示したものである。例えば、コンクリート工場では1 バッチを 2m^3 程度で練り混ぜることができるが、実験室では1 バッチを 50 リットル (0.05m^3) 程度で練り混ぜるため、それぞれに必要な材料の質量が異なる。また、現場配合は骨材の含水状態や骨材の粒度などを補正して算定される。

図-6.1.1 はコンクリートを構成する材料の体積割合の概念図である。数値は標準的なコンクリートの例である。セメントペースト部分は空気、水、セメントで構成され、フレッシュ時に流動性を持ち、硬化時や硬化後に収縮や透水が生じる。骨材部分は細骨材と粗骨材で構成され、セメントペースト部分に比べて硬く、収縮や透水はほぼ生じない。ダムコンクリート (RCD : Roller Compacted Dam Concrete) の体積割合は、 $air = 1\%$ 、 $w = 10\%$ 、 $c = 4\%$ 、 $s = 30\%$ 、 $g = 55\%$ 程度であり、セメントペースト量が少ない特徴がある。高強度コンクリートの体積割合は、 $air = 2\%$ 、 $w = 15\%$ 、 $c = 23\%$ 、 $s = 25\%$ 、 $g = 35\%$ 程度であり、セメント量が多く、水セメント比が小さい特徴がある。

この体積割合を決定することを「配合設計」とよぶ。体積割合を変化させることでコンクリートの性質や性能が変化するため、配合設計において必要な性質や性能となるように構成材料の割合を決定することが大切である。

(2) 配合計画書

標準的なレディーミクストコンクリートの配合計画書を表-6.1.1に示す。配合計画書には、配合の設計条件、使用材料、配合表が記載される。配合の設計条件には呼び方と指定事項が記載される。呼び方は注文者からの指定に従い、コンクリートの種類、呼び強度、スランプ、粗骨材の最大寸法、セメントの種類の順番に記載する。例えば、[普通 24-8-25N]のように指定される。その他に指定するものがある場合には指定事項の欄に特記する。

使用材料の欄には、セメントの生産者・密度など、細骨材の種類・産地・粗粒率・密度など、粗骨材の種類・産地・実積率・密度など、化学混和剤の製品名・種類など、水の区分などが記載される。配合表には各材料の単位量、配合計算条件である水セメント比または水結合材比と細骨材率が記載される。

(3) 配合計算書

配合計画書には、表-6.1.2に示すような配合計算書が添付される。配合計算書は、設計条件から配合表までの計算過程を示すものである。計算過程は6.3で記述する。

配合計算書や配合表に使用される記号として、単位水量を W (Water)、単位セメント量を C (Cement)、単位細骨材量を S (Sand)、単位粗骨材量を G (Gravel) と表す。骨材全体を A (Aggregate)、単位化学混和剤量を Ad (Admixture)、空気量を Air と表す場合がある。

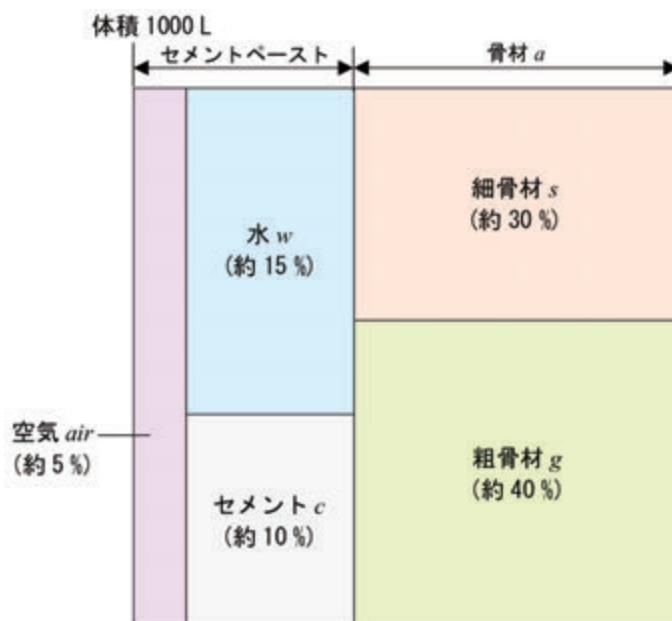


図-6.1.1 コンクリート材料の体積割合の概念図

表-6.1.1 配合計画書の例

レディーミクストコンクリート配合計画書										No. _____	
_____ 殿										_____ 年 _____ 月 _____ 日	
株式会社 ○△コンクリート工業											
配合計画者名											
工 事 名 称											
所 在 地											
納 入 予 定 時 期											
本 配 合 の 適 用 期 間											
コンクリートの打込み箇所											
配 合 の 設 計 条 件											
呼び方	コンクリートの種類による記号		呼び強度		スランブ又はスランブフロー (cm)		粗骨材の最大寸法 mm		セメントの種類による記号		
	普 通		24		8		25		N		
指 定 事 項	セメントの種類		呼び方欄に記載		空 気 量		—		%		
	骨材の種類		使用材料欄に記載		軽量コンクリートの単位容積質量		—		kg/m ³		
	粗骨材の最大寸法		呼び方欄に記載		コンクリートの温度		—		℃		
	アルカリシリカ反応抑制対策の方法		AL (1.8kg/m ³)		水セメント比の目標値の上限		—		%		
	骨材のアルカリシリカ反応性による区分		使用材料欄に記載		単位水量の目標値の上限		—		kg/m ³		
	水の区分		使用材料欄に記載		単位セメント量の目標値の下限又は上限		—		kg/m ³		
	混和材料の種類及び使用量		使用材料及び配合表欄に記載		流動化後のスランブ増大量		—		cc		
塩化物含有量		0.30kg/m ³ 以下									
呼び強度を保証する材齢		— 日									
使 用 材 料											
セメント	生産者名					密度 g/cm ³	3.16	Na ₂ Oeq %	0.62		
混和材	製品名	— 種類				密度 g/cm ³	—	Na ₂ Oeq %	—		
骨材	No.	種 類	産地又は地名	アルカリシリカ反応性による区分		粒の大きさの範囲	粗粒率又は実積率	密度 g/cm ³		微粒分量の範囲%	
				区分	試験方法			絶対	表乾		
細骨材	①	砂	川水系	A	化学法	5	2.75	—	2.60		
	②	砂	川水系	A	化学法	5	2.75	—	2.63		
	③										
粗骨材	①	砂利	○△川水系	A	化学法	25～5	62.0	—	2.65		
	②	砂利	川水系	A	化学法	25～5		—	2.65		
	③										
混和材①	製品名	○△		種類	AE 減水剤標準形 I 種			Na ₂ Oeq %	1.1		
混和材②		—			—			%	—		
細骨材の塩化物量		① 0.000 %	② 0.000 %	水の区分	上澄水			目標スランブ固形分率		— %	
回収骨材の使用状況		細骨材	粗骨材								
配 合 表 kg/m ³											
セメント	混和材	水	細骨材①	細骨材②	細骨材③	粗骨材①	粗骨材②	粗骨材③	混和剤①	混和剤②	
284	—	156	347	520	—	601	401	—	2.84	—	
水セメント比		55.0 %		水結合材比		— %		細骨材率		46.7 %	
備考 標準配合						細骨材混合率 【①：②＝40：60】					
						粗骨材混合率 【①：②＝60：40】					
骨材の質量配合割合、混和剤の使用量については、断りなしに変更する場合があります。											

記号のうち大文字は質量 (kg)、小文字は体積 (L または m^3) を表す。例えば、水セメント比 W/C は質量比であり、細骨材率 s/a は体積比である。なお、表-6.1.2 中では、骨材の体積 s 、 g を S_v 、 G_v で表している。

表-6.1.2 配合計算書の例

配 合 計 画 書										No. _____	
配 合 の 設 計 条 件											
呼び名	コンクリートの種類による記号	呼び強度	スランプ又はスランプフロー cm			粗骨材の最大寸法 mm		セメントの種類による記号			
	普 通	24	8			25		N			
標準偏差	σ	当工場の実績値により							2.7 N/mm ²		
配合強度	m	$m1 = 0.9 \times S_L + 3.0 \times \sigma = 29.7$ $m2 = S_L + 2.0 \times \sigma = 29.4$ より、配合強度は							$m1 = 29.7$ $m2 = 29.4$ 29.7 N/mm ²		
水セメント比	W/C	$m = a + b \times C/W = -23.500 + 29.500 \times C/W$ $W/C = \frac{b}{m-a} = \frac{29.500}{29.7 + 23.500} \times 100 = 55.0$							55.0 %		
単位水量	W	当工場の実績値により							156 kg/m ³		
単位セメント量	C	$C = \frac{W}{W/C} \times 100 = \frac{156}{55.0} \times 100 = 284$							284 kg/m ³		
	C_v	$C_v = C \div \text{密度} = 284 \div 3.16 = 90$							90 L/m ³		
空気量	A	$A = \text{設計容積} \times \text{空気量}(\%) = 1000 \times 4.5(\%) = 45$							45 L/m ³		
粗骨材かさ容量	G_v	当工場の実績値により (実積率 = 62.0 %)							0.610 m ³ /m ³		
単位粗骨材量	G_v	$G_v = \text{かさ容積} \times \text{実積率}(\%) = 610 \times 62.0(\%) = 378$							378 L/m ³		
	G	$G = G_v \times \text{密度}(2.65) = 1002$							1002 kg/m ³		
	$G1$	① $G1 = G \times 60(\%) = 601$							601 kg/m ³		
	$G2$	① $G2 = G \times 40(\%) = 401$							401 kg/m ³		
単位細骨材量	S_v	$S_v = \text{設計容積} - (W + C_v + G_v + A)$ $= 1000 - (156 + 90 + 378 + 45) = 331$							331 L/m ³		
	S	$S = S_v \times \text{密度}(2.62) = 867$							867 kg/m ³		
	$S1$	① $S1 = S \times 40(\%) = 347$							347 kg/m ³		
	$S2$	① $S2 = S \times 60(\%) = 520$							520 kg/m ³		
細骨材率	S_v/a	$S_v/a = \frac{S_v}{S_v + G_v} \times 100 = \frac{331}{331 + 378} \times 100 = 46.7$							46.7 %		
単位混和剤量	AD	$AD = C \times \text{添加率}(\%) = 284 \times 1(\%) = 2.84$							2.84 kg/m ³		
単位容積質量	W_t	$W_t = C + W + S + G = 284 + 156 + 867 + 1002 = 2309$							2309 kg/m ³		
配合表 kg/m ³											
セメント	混和材	水	細骨材①	細骨材②	細骨材③	粗骨材①	粗骨材②	粗骨材③	混和剤①	混和剤②	
284	—	156	347	520	—	601	401	—	2.84	—	
水セメント比			55.0 %		水結合材比			— %		細骨材率	46.7 %

第7章

コンクリートの 製造と施工

- 7.1 概説
- 7.2 コンクリートの製造
- 7.3 コンクリートの施工
- 7.4 寒中コンクリート、暑中コンクリート

7.1 概説

学習のポイント

- コンクリートの製造と施工では、コンクリートの均質性と密実性を確保することが重要である。
- 製造では、不具合を防止するために運搬条件や施工条件に適した配合を選定するとともに、適切な製造管理で品質を安定させることが重要である。
- 施工では、不具合を防止するために打込みや締固めの際に材料分離を生じさせないことが重要である。

(1) コンクリートの製造と施工で大切なこと

コンクリートの製造と施工においては、コンクリートの均質性と密実性が確保されることが大切である。製造における均質性の確保は、製造上のばらつきを安定させるように管理することで、季節や時間にかかわらず同じ品質のコンクリートが練り上がり、運搬され、打込み場所に提供されることが必要である。

施工における均質性の確保は、型枠のどの場所に着目しても、コンクリートの品質が同様であることが大切である。また、密実性の確保では、コンクリートのどの部分にも、ひび割れや豆板、コールドジョイントなどの強度、水密性、物質移動に対する抵抗性などに影響を与える不具合を生じさせないことが必要である。

加えて、コンクリートのフレッシュ性状は季節や昼夜の変化などによる温度の影響を受けやすく、低温や高温の場合でも均質性と密実性を確保することが求められる。そのために、冬期または夏期に製造・施工されるコンクリートを寒中コンクリートまたは暑中コンクリートとよび、製造と施工に特別な配慮を施すことが行われている。

(2) 製造と施工の手順

コンクリートの製造と施工は、[図-7.1.1](#)のような手順で行われる。製造は材料の貯蔵から運搬（場外運搬）、検査までをさし、主にコンクリート製造会社により実施される。なお、検査には、製造者によるコンクリートの製造時と荷卸し時の品質検査と施工者による荷卸し時の受入れ検査があり、検査は製造から施工への受渡しのポイントである。

コンクリートは、製造場所によりレディーミクストコンクリートと現場練りコンクリート、工場製品用コンクリートに分けられる（1.4 参照）。レディーミクストコンクリートとは、施工者の注文に応じて、生コンクリート工場で作られるコンクリ

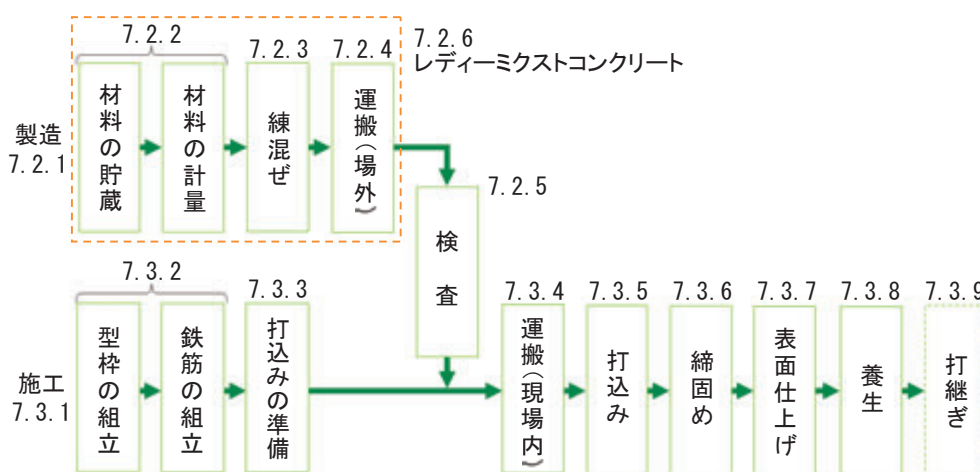


図-7.1.1 コンクリートの製造と施工の手順

ートである。現場練りコンクリートは、コンクリートを大量に使用するダムなどの工事現場に、その工事専用の貯蔵ビンやミキサを設置する製造方法である。工場製品用コンクリートは、その工場内の専用プラントや養生設備などで製造され、養生後に建設現場に運搬されて施工されるコンクリートである。

施工は型枠と鉄筋の組立、検査、運搬（現場内運搬）から打込み、締固め、表面仕上げ、養生、打継ぎまでをさし、主に建設会社（施工者）により実施される。

(3) 製造・施工で生じる不具合

コンクリートの製造と施工のすべての工程に、さまざまな不具合を発生させる要因がある（写真-7.1.1）。主な不具合とその不具合が起こりやすい工程を表-7.1.1にあげる。製造では、運搬条件や施工条件に適した配合を選定するとともに、適切な製造管理で品質を安定させることが重要である。配合選定においては時間経過によるフレッシュ状態の変化も考慮しておく必要がある。

施工では、打込みと締固めの際に、材料分離を生じさせないことが最も重要である。適切な打込みのために、コンクリートの自由落下高さや1層の打上がり高さの標準が定められている。また、適切な締固めのために、振動機の操作方法に留意点がある。

表面仕上げや養生を適切に行うことが各種ひび割れの抑制や表面品質の向上につながる。さらに鉄筋やスパーサーを移動させないように施工することが鉄筋を保護するかぶりの確保につながる。



(a) 豆板



(b) コールドジョイント

写真-7.1.1 不具合の事例

表-7.1.1 製造・施工で生じる主な不具合

工 程	留意項目	豆 (充填不良) 板	コールドジョイント (一体性不良)	初期ひび割れ	沈下ひび割れ	プラスチック 収縮ひび割れ	表面気泡	鉄筋などの移動・ (かぶり不足) 破損	型枠の破損
運搬(場外)	配合選定、運搬時間(スランプ低下)	●	●						
運 搬 (ポンプ)	配合選定(スランプ低下)	●	●						
	配合選定(ポンプ閉塞)		●						
打込み	自由落下高さ(材料分離、鉄筋衝突)	●						●	●
	1層の高さ(締固め不足)	●							
	打重ね時間		●						
	打込み順序(沈降量の相違)				●				
	打込み速さ(型枠の側圧)								●
	充填性の確認	●							
	表面気泡の除去						●		
締固め	コンクリートの横移動(材料分離)	●							
	振動機の操作(1箇所への長時間の振動による材料分離)					●	●		
	振動機の操作(鉄筋などへの接触)							●	●
	振動機の操作(下層への挿入不足)			●					
表 面 仕上げ	仕上げ方法(過度の仕上げ)					●			
	仕上げのタイミング				●				
養 生	湿潤養生期間、型枠脱型強度			●		●			
	加熱養生(寒中)			●					
	水分蒸発防止(暑中)			●		●			

7.2 コンクリートの製造

学習のポイント

- 練混ぜでは、コンクリートが均質な状態となるように、ミキサの性能、材料の投入順序、練混ぜ時間を適切に決める。
- 運搬では、運搬中のスランプ低下による施工不良を防ぐために、運搬時間を管理するとともに、目標スランプを適切に決める。
- 検査では、スランプと空気量、強度などを測定し、検査項目ごとに許容値を満たすことを確認する。
- レディーミクストコンクリートの注文では、種類、強度、スランプ、必要量、荷卸し時間などを指定する。

7.2.1 概要

(1) 製造で重要なこと

コンクリートの製造においては、その品質にある一定のばらつきを生じる。品質の主要な指標である圧縮強度のばらつきは正規分布に従い、その変動係数（標準偏差/平均値）は10%程度である。製造上のばらつきの要因は、主に①材料の計量誤差、②材料の品質変動、③試験誤差である。製造の各工程で、それらの誤差や変動を小さくするために、製造に関わる基準類を守ること、製造現場において工夫することが大切である。製造では、各工程を経て最終的なコンクリートの均質性を確保することが重要である。

(2) 実験室とコンクリート工場の対比

コンクリートの製造に関する実験室とコンクリート工場の対比を図-7.2.1に示す。工場での製造の手順や方法は、基本的に実験室と同様であるものの、工場では大量製造のために合理化された設備が使われていて、コンピュータ制御で自動化されていることが分かる。

材料の貯蔵について、実験室では必要量の細骨材と粗骨材を表乾状態に近い状態に調整し、大きめのバケツに入れて蓋を閉めておく。セメントはセメント袋に入ったものを準備する。水は水道水を使用し、化学混和剤を準備する。コンクリート工場では骨材をストックヤードに粒径や産地ごとに保管する。材料は練混ぜ量に応じて、スイッチを押すことでベルトコンベアで貯蔵ビンに移動する。

材料の計量について、実験室では材料を小さめのバケツに入れて、はかりを用い

て手動で計量する。コンクリート工場ではそれぞれの材料を動荷重計で短時間かつ同時に計量し、操作室で計量値を確認する。

練混ぜについて、実験室では50リットル程度の試験用ミキサを用いて練り混ぜる。

	実験室	コンクリート工場
材料の貯蔵		
材料の計量		
練 混 ぜ		
運 搬		
検 査		

図-7.2.1 コンクリートの製造に関する実験室とコンクリート工場の対比

引用・参考文献

引用文献

- 1) 全国生コンクリート工業組合，全国生コンクリート協同組合：生コン工場のしくみ，ナマコンパーク，http://www.zennama.or.jp/park/kojo/k1_shikumi.html，2021（閲覧）。
- 2) 日本規格協会：レディーミクストコンクリート，JIS A 5308，pp. 2-3，pp. 5-6，pp. 9-10，2019。
- 3) 建設材料研究会：生コン工場の設備と管理，技術書院，pp. 53-54，p. 56，1983。
- 4) 加賀秀治：ミキサの練りまぜ性能試験，コンクリート技術基礎教室，コンクリートの試験方法，第5回，コンクリートジャーナル，Vol. 11，No. 3，pp. 42-50，1973。
- 5) 伊藤始，岩波光保，横田弘：短繊維補強コンクリートの施工性に関する検討，港湾空港技術研究所資料，No. 1087，pp. 1-19，2004。
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書【施工編】，p. 112，p. 125，pp. 149-151，p. 157，p. 165，2017。
- 7) 日本コンクリート工学会：打込み・締固めの要領，コンクリート基本技術調査委員会 打込み・締固めWG 報告書，p. 23，p. 26，2015。
- 8) 日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧[第2版]，技報堂出版，p. 375，1996。
- 9) 戸祭邦之：コンクリートの実像，理工図書，p. 241，1999。
- 10) 足立一郎，小林一輔：ショットブラストを利用した新旧コンクリートの打継ぎ工法に関する研究，土木学会論文集，No. 373/VI-5，pp. 64-73，1986。

参考文献

7章

- 日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点，pp. 132-138，pp. 163-185，pp. 192-200，pp. 372-377，2019。
- 土木学会：コンクリート標準示方書【施工編】，pp. 110-128，pp. 145-174，pp. 203-206，2017。
- 伊藤始，岩波光保，横田弘：短繊維補強コンクリートの施工性に関する検討，港湾空港技術研究所資料，No. 1087，pp. 1-19，2004。

7.2

全国生コンクリート工業組合, 全国生コンクリート協同組合 : 生コン工場のしくみ, ナマコンパーク, http://www.zennama.or.jp/park/kojo/k1_shikumi.html, 2021 (閲覧).

日本規格協会 : レディーミクストコンクリート, JIS A 5308, pp. 1-20, 2019.

建設材料研究会 : 生コン工場の設備と管理, 技術書院, pp. 45-57, 1983.

日本規格協会 : コンクリートミキサー第2部 : 練混ぜ性能試験方法, JIS A 8603-2, pp. 1-13, 2010.

加賀秀治 : ミキサの練り混ぜ性能試験, コンクリート技術基礎教室, コンクリートの試験方法, 第5回, コンクリートジャーナル, Vol. 11, No. 3, pp. 42-50, 1973.

伊藤始, 栗山浩, 窪田一沙, 泉谷智之, 中畔大夢 : フライアッシュを添加した高強度コンクリートのフレッシュ性状と初期強度に関する検討, 土木学会第71回年次学術講演会講演概要集, V-137, pp. 273-274, 2016.

日本規格協会 : 適合性評価—日本産業規格への適合性の認証—分野別認証指針 (レディーミクストコンクリート), JIS Q 1011, pp. 1-6, 2019.

7.3

日本コンクリート工学会 : 打込み・締固めの要領, コンクリート基本技術調査委員会 打込み・締固めWG 報告書, pp. 22-28, 2015.

日本コンクリート工学協会 : コンクリート便覧[第2版], pp. 374-375, 1996.

戸祭邦之 : コンクリートの実像, 理工図書, pp. 238-242, 1999.

青柳征夫 : セン断伝達機構とその設計上の取扱い, コンクリート工学, Vol. 20, No. 12, pp. 4-10, 1982.

岡田武二 : コンクリート接合面のせん断伝達に関する研究, 土木学会論文集, No. 502/V-25, pp. 73-82, 1994.

足立一郎, 小林一輔 : ショットブラストを利用した新旧コンクリートの打継ぎ工法に関する研究, 土木学会論文集, No. 373/VI-5, pp. 64-73, 1986.

索引

和文

あ

圧縮強度
……………119, 126, 133, 234, 284, 285
圧縮強度の規格値……………134
圧縮強さ……………31
圧縮破壊……………119, 125
圧縮破壊エネルギー……………120
アノード反応……………186, 187, 188
アルカリシリカ反応41, 43, 54, 207
アルカリ総量規制……………211
アルカリの作用による劣化……………203
アルミネート相……………27, 32
安定性……………30

い

異形棒鋼……………70
維持管理……………182
異種金属接触腐食……………188
1層の高さ……………307

う

打重ね時間……………307, 320
打込み……………306
打込み順序……………307
打込み速さ……………307
打継ぎ……………315
海砂……………53
運搬……………281, 300
運搬時間……………281

え

AE 減水剤……………48
AE 剤……………47, 90
ASR……………208
ASR ゲル……………207, 209, 210
L 形フロー試験……………100
S-N 線図……………218
エアメータ……………98
エーライト……………27
エコセメント……………15
エトリンナイト……………32, 43
エフロレッセンス……………217, 218, 219
塩害……………189, 234
塩化物イオンの固定化……………190

塩化物イオンの侵入……………190
塩化物イオン量……………285, 286
塩基度……………42
円柱供試体……………120
エントラップトエア
……………47, 90, 91, 196, 198, 200
塩類の作用による劣化……………203

お

応力振幅……………218
応力ひずみ関係……………70
応力ひずみ曲線……………121, 124
押抜きせん断破壊……………219
温度……………285, 286
温度ひび割れ……………170
温度変化……………166

か

回収水……………67, 68, 271
外部拘束型の温度ひび割れ……………171
外力作用……………182
化学混和剤……………19, 46, 103, 243
化学混和剤量……………249
化学収縮……………36
化学的侵食……………234
化学的特性……………2
化合物……………27
加振スランプフロー試験……………102
カソード反応……………186, 187, 188
カソード防食……………216
硬練りコンクリート……………85
型枠……………295
型枠振動機……………309
型枠脱型強度……………312
かぶり……………231
川砂利……………109, 128
環境作用……………182
乾湿状態……………133
含水率……………58
乾燥収縮……………36, 43, 44, 46, 51, 54, 162
寒中コンクリート……………14, 48, 318
管内圧力損失……………302

き

機械的特性……………2
気乾状態……………57

気泡……………198
キャピテーション……………220
急結剤……………50
吸水率……………58
給熱養生……………319
凝結……………30
強制練りミキサ……………278
強熱減量……………31, 107
局部腐食（マクロセル腐食）
……………187, 188

く

空気量
……………54, 81, 102, 127, 200, 233, 286
空気量試験……………98
クリープ……………141
クリープ係数……………144
クリープ限度……………141
クリープ破壊……………141, 219
クリープひずみ……………141, 144
クリンカー……………23, 24, 29
黒皮……………187

け

計画配合……………226
けい酸カルシウム水和物
……………32, 40, 42, 45
軽量骨材……………64
軽量骨材コンクリート……………15
ケミカルプレストレス……………43
ゲル空隙……………117
ゲル水……………117
ゲル本体……………117
検査……………283
検査の許容値……………285
減水剤……………48
建設材料……………2
現場内運搬……………300
現場練りコンクリート……………12, 267
現場配合……………226, 260

こ

硬化コンクリート……………116
高強度コンクリート……………13, 128, 226
鋼材腐食……………184, 234
工場製品用コンクリート……………12, 267

孔食	188
高性能 AE 減水剤	48
高性能減水剤	48
構造的ひび割れ	168
降伏点	70
鉱物組成	28, 29
高流動コンクリート	13, 84, 99
高炉スラグ細骨材	276
高炉スラグ微粉末	22, 41
高炉セメント	19, 22
コルゲートサイロ	275
コンクリート	4, 18
コンクリート技士	289
コンクリート工場	271, 289
コンクリートバケット	300
混合セメント	22, 19, 38
コンシステンシー	81, 85, 91, 102
コンシステンシー曲線	84
混和材	19, 38, 211

さ

載荷速度	133
細骨材	52
細骨材率	86, 110, 237, 244, 251
砕砂	54
再生骨材	66
再生骨材コンクリート	15
碎石	54, 109, 128
最大圧送負荷	304
最適細骨材率	237
材料	2
材料の計量	276
材料の貯蔵	275
材料分離	86
材料分離抵抗性	81, 82, 102
材齢	131
産業廃棄物	8, 24, 36
残コン	271
三酸化硫黄	31
酸の作用による劣化	201
サンプリング	129

し

JIS 認定品	290
J リングフロー試験	100
支圧強度	158
試験練り	245, 256
自己乾燥	36, 117, 164
自己収縮	43, 46, 51, 54, 164
湿潤状態	57
湿潤養生期間	312

実積率	62, 108
締固め	309
砂利	53
収縮低減剤	51
収縮ひび割れ	170
充填性	82
自由落下高さ	306
重量骨材	64
重力式ミキサ	278
樹脂塗装鋼材	197
場外運搬	281
上澄水	67, 68
少量混合成分	22, 33
初期ひび割れ	170
暑中コンクリート	14, 48, 319
シリカセメント	19, 22
シリカフェーム	44
人工軽量骨材	128
診断	183
浸透圧説	196, 198

す

水圧説	196, 198
水酸化カルシウム	32, 43
水素脆化	216
水中不分離性コンクリート	14
水中不分離性混和剤	50
水平換算距離	303
水密性	174, 234
水和生成物	117
水和熱	31
水和反応	32, 34
水和物	34
水和物の分解	201
すきま腐食	188
スケーリング	196, 197
ストックヤード	275
砂	88
砂すじ	53
スパーサ	231
スラグ骨材	64
スラッジ水	67, 68
スランプ	82, 232, 242, 285
スランプコーン	91
スランプ試験	91
スランプフロー	285
スランプフロー試験	99
スランプロス	281, 319
すり減り	220
すり減り抵抗性	63

せ

静弾性係数	136
積算温度	130
石灰石骨材	54
石灰石微粉末	46
絶乾状態	57
設計圧縮強度	134
設計基準強度	134, 234
セパレータ	231
セメントの粉末度	107
セメントペースト	5, 18, 116
セメント水比	127, 234
遷移帯	116
繊維補強コンクリート	14
全国生コンクリート品質管理監査 会議	291
潜在水硬性	22, 42, 45
せん断強度	153
全面腐食 (マイクロセル腐食)	187

そ

側圧	296
粗骨材	52
粗骨材かさ容積	251
粗骨材の最大寸法	107, 231, 242
塑性粘度	84
粗粒率	56, 109, 243

た

耐火性	75, 63
体積変化	161, 167
耐凍害性	47, 91
タッピング	94, 97
ダムコンクリート	226
単位クリープ	141
単位結合材量	236
単位細骨材量	248, 249
単位水量	103, 236, 244, 251, 285, 286
単位セメント量	106, 236, 248, 251
単位容積質量	62
短繊維	74
弾塑性体	121
タンピング	90

ち

中性化	192, 234
中性化速度	193
中性化速度係数	195
中性化残り	194
中性化深さ	194

調査……………183
沈下ひび割れ……………88, 312

つ

通気差腐食……………188

て

鉄筋……………70, 295
鉄筋コンクリート……………10
鉄筋のあき……………231
電気化学的防食工法……………195
電気防食……………197, 216
点検……………183
電食……………216

と

凍害……………196, 198, 200, 234
凍結防止剤……………200
凍結融解……………196, 197
凍結融解抵抗性……………63
透水係数……………175
透水量……………174
動弾性係数……………140

な

内部拘束型の温度ひび割れ……………170

に

二酸化炭素の侵入……………193
ニュートン流体……………83

ね

熱の作用による劣化……………213
熱膨張係数……………54, 166
練上がり温度……………320
練混ぜ……………278
練混ぜ時間……………280
粘性……………83, 97
粘性係数……………84

は

配合……………226
配合強度……………135, 234
配合計画書……………227
配合計算……………248
配合計算書……………227
配合修正……………256
配合設計……………226, 230, 240
破壊エネルギー……………148
白華……………217
反応性骨材……………207, 211

反応リム……………207, 208

ひ

PC 鋼材……………72, 73
ビーライト……………27
引張強度……………147
引張軟化曲線……………148
ひび割れ……………166
ひび割れ間隔……………169
ひび割れ指数の限界値……………171
ひび割れ幅……………169
ひび割れ幅の許容値……………168
表乾状態……………57, 260
表乾密度……………243
氷晶生成圧説……………196, 198
表面気泡……………308
表面仕上げ……………311
表面水率……………58, 260
疲労……………218, 219
疲労強度……………159, 218, 219
疲労限度……………218, 219
疲労破壊……………159
ビンガム流体……………83
品質……………291
品質検査……………283

ふ

Fick の法則……………192
フィニッシュビリティ……………81, 85
風化……………30
フェライト相……………27, 33
吹付けコンクリート……………14
複合材料……………4
副産物……………24, 36, 37
腐食……………185, 186, 188
腐食生成物……………185, 186
腐食電池……………186, 187
付着強度……………11, 155
物質移動抵抗性……………90
物理的特性……………2
不動態皮膜……………11, 51, 184, 185, 189, 192, 193
フライアッシュ……………23, 39, 107, 212
フライアッシュセメント……………19, 23
プラスティシティー……………81, 84
プラスティック収縮ひび割れ……………312, 320
ブリーディング……………54, 88, 187, 311, 315
ブリーディング水……………88
ふるい分け試験……………243

プレキャストコンクリート……………14
プレキャスト製品……………150
プレストレストコンクリート……………10, 143
フレッシュコンクリート……………80
ブレパックドコンクリート……………14
粉末度……………30

へ

変形挙動……………135
変動係数……………235

ほ

ポアソン比……………140
棒状振動機……………309
防食……………195, 197
防せい剤……………51
膨張コンクリート……………15
膨張材……………43
膨張性化合物……………201
ボグ (Bogue) の式……………28
ボールペアリング……………47
ボールペアリング効果……………23, 41, 91, 107
保温養生……………319
ボゾラン反応……………23, 40, 45
ボゾラン反応性……………44
ポップアウト……………196
ポルトランドセメント……………5, 19, 20
ボンパビリティ……………81
ポンプ圧送……………300

ま

マクロセル腐食……………187, 188
曲げ強度……………149
曲げひび割れ強度……………150
マスコンクリート……………14, 170
摩耗……………220
㊦マーク……………291

み

見かけの拡散係数……………192
ミキサ……………278
ミクロセル腐食……………187
未水和セメント……………117
水セメント比……………107, 126, 233, 242, 251
密度……………30
密度試験……………243
未燃炭素……………107

め

めっき鋼材……………197

も

毛細管空隙……………34, 117
毛細管水……………117
毛細管張力……………36
目標スランプ……………232
モノサルフェート……………33
モルタル……………5, 18

や

ヤング係数……………123, 136

ゆ

U形充填試験……………100
有害骨材……………64
有効材齢……………129
誘発目地……………315

よ

養生……………129, 312
溶脱……………201, 204
呼び強度……………135, 235, 290

り

硫酸塩劣化……………206
硫酸劣化……………205
粒度……………54, 107, 260
流動性……………82, 102
リラクセーション……………73

れ

レイタンス……………88, 315
レオロジー……………83
レオロジー的性質…82, 83, 84, 95
レディーミクストコンクリート
……………12, 14, 227, 235, 266, 283, 289
連続繊維補強材……………76

ろ

漏斗試験……………100
ロータリーキルン……………23

わ

ワーカビリティ…47, 54, 80, 81
割増し係数……………135, 235

執筆者略歴

岩波光保（いわなみみつやす）

1972 年 東京都に生まれる
1999 年 東京工業大学大学院 理工学研究科 博士後期課程 修了
1999 年 運輸省 入省
2001 年 独立行政法人港湾空港技術研究所
2013 年 東京工業大学 教授 現在に至る

伊藤 始（いとうはじめ）

1971 年 愛知県に生まれる
1997 年 名古屋大学大学院 工学研究科 博士前期課程 修了
1997 年 前田建設工業株式会社 入社
独立行政法人港湾空港技術研究所 出向（2002 年～2005 年）
2009 年 富山県立大学 准教授
2016 年 同 教授 現在に至る

皆川 浩（みながわひろし）

1976 年 福島県に生まれる
2003 年 東京工業大学大学院 理工学研究科 博士後期課程 修了
2003 年 住友大阪セメント株式会社 入社
2006 年 東北大学 助手
2007 年 同 助教
2010 年 同 准教授 現在に至る

佐川孝広（さがわたかひろ）

1970 年 北海道に生まれる
1995 年 北海道大学 工学部 卒業
1995 年 日鉄セメント株式会社 入社
北海道大学大学院 工学研究科 博士後期課程（2005 年～2008 年）
2015 年 前橋工科大学 准教授 現在に至る

コンクリート工学

2021年9月10日 初版第1刷発行



編著者 岩 波 光 保
伊 藤 始
皆 川 浩
佐 川 孝 広

発行者 柴 山 斐 呂 子

発行所 理工図書株式会社

〒102-0082 東京都千代田区一番町 27-2
電話 03 (3230) 0221 (代表)
FAX 03 (3262) 8247
振替口座 00180-3-36087 番
<http://www.rikohtosho.co.jp>

© 岩波 光保 2021 Printed in Japan ISBN978-4-8446-0909-4

印刷・製本 丸井工文社

〈日本複製権センター委託出版物〉

＊本書を無断で複写複製（コピー）することは、著作権法上の例外を除き、禁じられています。本書をコピーされる場合は、事前に日本複製権センター（電話：03-3401-2382）の許諾を受けてください。

＊本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製は著作権法上の例外を除き禁じられています。本書を代行業者等の第三者に依頼してスキャンやデジタル化することは、たとえ個人や家庭内の利用でも著作権法違反です。

★自然科学書協会会員★工学書協会会員★土木・建築書協会会員



9784844609094



1923051036004

ISBN978-4-8446-0909-4

C3051 ¥3600E

定価（本体 3600 円＋税）

土木

土木工学 / コンクリート工学

