

[コンクリートに関する豆知識]

2022年3月



コンクリートに関する豆知識

皆さんの最も身近に存在するわが国のコンクリート構造物は、本格的な社会資本ストックが始まった第二次世界大戦後の60年間で、約100億 m^3 に達していると推定され、最大の社会資本ストックとなった。コンクリート構造物への建設資本投資の流れは、これまでの新設中心の視点から維持補修に移りつつある。また、別な流れとして、新設構造物の劣化を抑制する予防保全の考え方も徐々に浸透し、表面処理材によるコンクリートの劣化防止または抑制技術の共通指針として、平成17年4月に土木学会より発行されたコンクリートライブラリー119「表面保護工法 設計施工指針(案)」に総合的な方向性が示された。その後、平成24年7月には同学会より同指針(案)において表面含浸工法のうちけい酸塩系表面含浸工法を対象として、コンクリートライブラリー137「けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針(案)」が発行され、技術指針および試験方法が示された。CS-21は、表面保護工法指針(案)ではけい酸ナトリウム系表面含浸材に、けい酸塩系表面含浸工法指針(案)では反応型けい酸塩系表面含浸工材にそれぞれ分類されるコンクリート改質剤で、様々なコンクリート構造物の広範な問題に対応できる優れた性質を有している。この章では皆さんに今後CS-21の活用場を拡げていただくために、コンクリートの必要な基礎知識をまとめてみた。

【コンクリートの歴史と未来】

1) コンクリートとセメント	2
2) 鉄筋コンクリートと生コン	2
3) コンクリートの未来	2

【コンクリートの基礎知識】

1) 水和反応	3
2) コンクリートの配合	5
3) セメントおよび混和剤	6
4) 初期欠陥の発生原因	8
5) ひび割れの発生原因	9
6) コンクリートの劣化と水の関係	14

【コンクリートの要求性能】

1) 力学的特性	15
2) 水密性	15
3) 耐久性	16
4) 施工性	17
5) 経済性	17

【コンクリートの歴史と未来】

1) コンクリートとセメント

コンクリートはセメント、水、骨材(砂利、砂など)を主な材料として、これに施工条件、使用条件に対応するための各種混和材料を使用して製造されている。また、コンクリートは圧縮には強いが引っ張りに弱く約1/10程度である。このため、一般にコンクリートは、引っ張りに強い鉄筋や鉄骨の鋼材と組み合わせた構造物として用いられている。土木構造物では、コンクリートダム・堰堤、重力タイプの擁壁、トンネルの覆工コンクリートのようは無筋コンクリートがあるが、建築構造物では鉄骨・鉄筋コンクリートがほとんどである。

コンクリートは、セメントと水が反応し他の材料と一体になったものである。セメントの歴史は古く約5000年前の古代エジプトのピラミッド建設にまでさかのぼることが出来る。焼き石こうの粉と砂、水をあわせたモルタルを石材の目地として用いていた。その後消石灰の利用が長く続き、1800年代には現在に近い製造方法の高品質セメント(ポルトランドセメント)が発明され普及するようになった。わが国では、1860年頃(江戸末期)に輸入されるようになりコンクリート工事が始まった。1875(明治8)年には東京に日本初のセメント工場を建設し、セメント製造を開始した。

2) 鉄筋コンクリートと生コン

高品質のセメントの普及によりコンクリート構造の研究が進み、やがて鉄筋コンクリート構造物を生み出すこととなる。鉄筋コンクリートは、1867年にフランスの植木職人モニエ(Joseph Monier)が、鉄網を芯としたセメントモルタルで植木鉢を作り特許を取得したのが始まりとされている。その後、水槽、床版、橋梁等に発展させていった。

世界のコンクリートの大量生産を支えたのは、生コンプラントの出現である。1903年にドイツで最初の生コンプラントが建設されたが維持できず、1913年のアメリカでのプラント建設から本格的な生コン時代に入っていった。その後トラックミキサーの発明により、全米に普及していった。わが国では、1949(昭和24)年に東京に最初のプラントが建設され、1950年代に全国へ急速に普及し、その後の経済発展を支えることになった。

併せて、施工条件により選定可能な各種セメント、異形棒鋼、鉄骨の開発と普及が設計・施工の技術開発に大きく貢献し、現在に至っている。

3) コンクリートの未来

近年の社会ニーズの高度化と多様化に伴い、コンクリート構造物に対し、これまで以上に高品質や高機能が要求されている。さらに、建築物の構造計算書偽装問題に対する社会の目は厳しく、皆さんが良いコンクリートとはどのようなものか、また、良いコンクリートを生み出す条件は何かを理解していただく必要がある。地下・地上空間の高度利用および効率的な社会資本整備のために、高強度、高耐久性、施工性、経済性の追求は永遠のテーマであるが、中でも、高強度コンクリートによる高層建築物への社会的ニーズはますます大きくなると予想され、国土交通省の総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」では、 $120\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の超高強度コンクリートや $1200\text{N}/\text{mm}^2$ 程度までの超高強度鉄筋などの材料開発、 $80\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の超高強度コンクリートや $600\text{N}/\text{mm}^2$ 程度までの超高強度鉄筋を用いた超高層鉄筋コンクリート建築物の実用化に向け、研究・開発を推進している。

コンクリートの未来展望はこのような新技術の開発と、前述の既設構造物の維持補修および既存技術への新技術の付加(表面保護工法等)が考えられるが、CS-21は、コンクリートの躯体防水や構造物の長寿命化など、幅広い発展の可能性も秘めている。

【コンクリートの基礎知識】

1) 水和反応

モルタル、コンクリートは、どうして固まるか？と聞くと、セメントが入っているから。

では、セメントはどうして固まるか？と聞くと、水と混ぜるから。

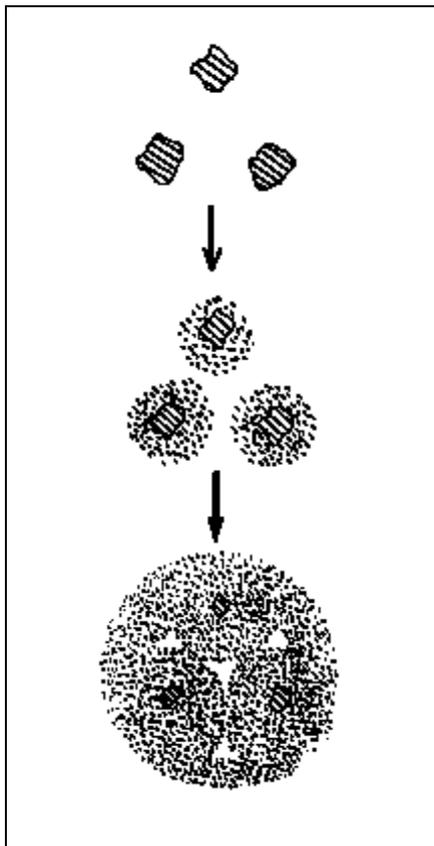
それでは、セメントは水と混ぜるとどうして固まるか？と聞くと、???

コンクリートとは骨材である砂・砂利を接着剤であるセメントペースト（セメント+水）で固めたセメントコンクリートが一般的であるが、アスファルトで固めた物をアスファルトコンクリート、樹脂で固めた物を樹脂コンクリートと言う。

コンクリートの強度、耐久性は、接着剤であるセメントペーストに大きく影響される。セメントは、石灰石と粘土を1400～1500℃の高温で焼成させ、それに石膏を加え、微粉碎して作られたもので、混合する材料の種類と比率によって性質の異なる製品となる。セメントに水を加えて練ると化学変化を起し、次第に組織を硬くして緻密化する。この反応を水和反応と言う。

セメントの水和反応とは、どのような反応か調べてみると学説が複数あるが、簡単に説明すると下記のように要約される。

（これは、セメントの主成分であるC3S、C2Sの反応）



セメント粒子からカルシウム等が溶け出し、水がアルカリ性の水溶液になる。

続いてシリカが溶け出し、濃度が高くなるとCSH系（カルシウムとシリカと水）の結晶となる。

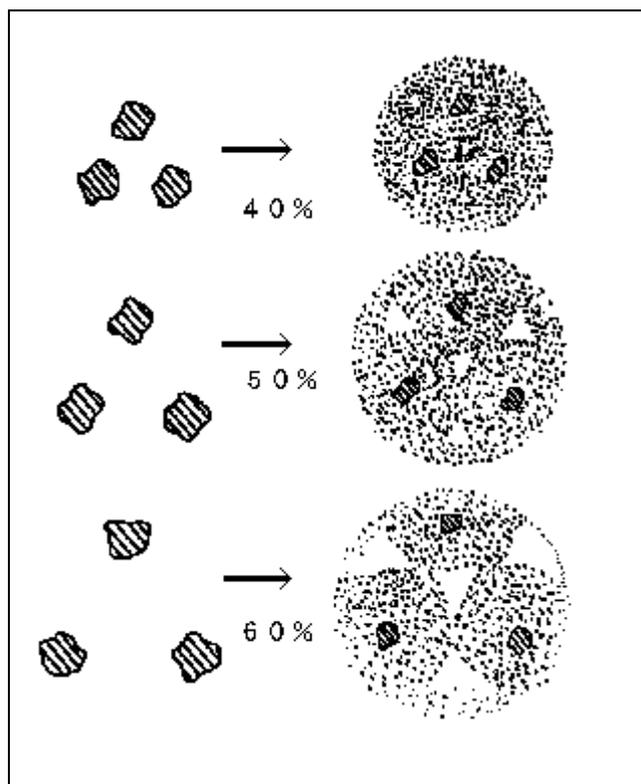
初めは不安定な結晶であるが、時間の経過と共に安定した3C.2S.2.5Hの結晶となる。

反応初期はカルシウムやシリカが良く溶け出し、水和反応も盛んであるが、セメント粒子の廻りに結晶が多くできると解け出し難くなり、4週間で反応はほぼ完了する。

その後も、湿潤養生を行えば、内部に未水和のセメント粒子（40～60%）が残っているので、水和反応は継続する。

※ 反応初期段階で乾燥させてしまうと、水和反応はその時点で停止してしまう。

次に水セメント比とコンクリートの強度について説明する。



左の図は、水セメント比40%、50%、60%の状態をイメージしたものである。

水が多くなるとセメント粒子間の間隔が広がり、水和反応がほぼ完了した時点の空隙が大きくなる。

この空隙がコンクリートの強度低下だけにとどまらず、劣化原因の要因となる。

水セメント比が小さいセメントペーストほど緻密で強度も高くなる。

これだけを見ると、水セメント比が小さいほど緻密なコンクリートとなるが、作業性が悪い場合、大きな空隙ができてしまい水セメント比の小さい材料を選定した意味がなくなる。コンクリートの配合を選定する場合には構造物の形状に合わせた流動性も重要である。

●関連知識

コンクリートの漏水箇所を観察すると、一般的に鍾乳石のような白い溶出物が目につく。これは、コンクリート内部の未水和のセメントやカルシウムが水に溶け出し、コンクリート内部の空隙やひびわれを通りコンクリートの表面まで運ばれ、空気中の炭酸ガスと反応して炭酸カルシウムになったものである。

コンクリートは、水中で初期養生すれば水和反応が進むことにより、水密性が増し強度も増加し、微細なひび割れも埋まっていく性質を持っている。しかし現実の構造物は、ひび割れがほとんど埋まってくれない。これは、コンクリートが空気と触れて炭酸カルシウムができることにより、水分が供給されても水和反応がおきにくい状態になるからである。

このことは悪いことばかりではなく、擁壁の表面など雨が直接当たるコンクリートでは、炭酸カルシウムの層ができることにより、雨に溶け出しにくくなる良い面もある。

中性化は、コンクリートにとって悪の代名詞のように言われているが、水酸化カルシウムが炭酸カルシウムに変ることは、少し体積も大きくなり、より安定した結晶が形成され、耐久性が向上する側面も有している。

鉄筋の周りまで中性化すると、アルカリ性が失われることにより、鉄筋を錆から守っている不動態被膜が破壊され、鉄筋が錆びやすくなる事が悪く言われている原因である。

2) コンクリートの配合

ここでは、現場で一般的に使用するコンクリートおよびモルタルの性質を考え、現場で使用している配合を考えてみる。

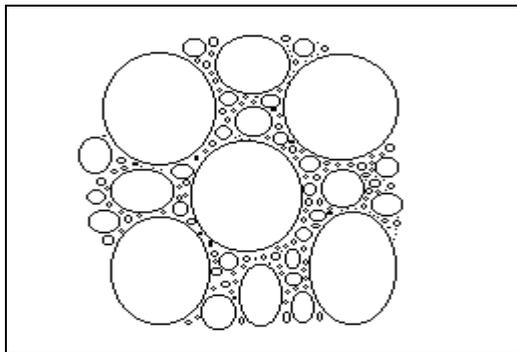
コンクリートの主材料である砂利、砂、セメント、水の関係はどのような配合になっているのか？
セメントコンクリートとは骨材である砂利、砂を、接着剤であるセメントペーストで固めたものである。

骨材はコンクリートの容積の65%～80%を占め、コンクリートの品質に大きな影響を及ぼす。

良い骨材とは

1. 固く強いもの (圧縮強度 80N～120N程度)
 2. ゴミ、泥、有機物を含まないもの
 3. 気象作用による影響を受けないもの
 4. 比重の大きいもの (比重 2.6程度)
 5. すりへらないもの
 6. 吸水量の少ないもの (吸水率が多いと凍害などの影響を受ける)
 7. 粒形がよいもの (なるべく球形のものがよい)
 8. 粒径分布がよいもの
- 5mmより大きいものを粗骨材 (5mmのふるいに85%以上留まるもの) 砂利
5mmより小さいものを細骨材 (5mmのふるいを85%以上通るもの) 砂

骨材の粒径分布がコンクリートの性質を構成する重要な要素である。



大きい骨材から小さい骨材までの配合バランスが大事である。(空隙が小さい、ワーカビリティが良い)

粒径分布が良好で空隙率の小さい骨材の配合は、接着剤であるセメントペーストが少なくて経済的で強固なコンクリートとなる。

コンクリートに使用する粗骨材、細骨材には粒径分布が重要である。

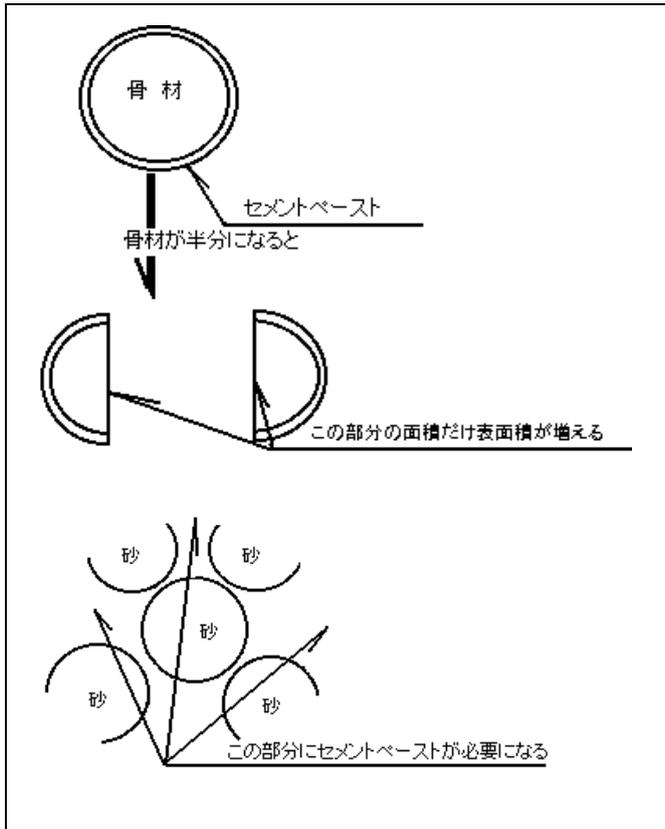
モルタルに珪砂を使用する場合も、粒径分布を考慮することが重要である。

次に接着剤のセメントペースト (セメント+水) に関しては、セメントペーストの強度は水の量に反比例し、セメント水比に正比例する。

略式の強度計算式は

$$\text{材令28日の圧縮強度 } \sigma_{28} = -239 + 259 \times C/W$$

強固なコンクリート、モルタルを作るためには、良質の骨材を使用することが重要なのは当然であるが、さらに前のページに記載したように、粒径分布が良好で空隙率の小さい骨材の配合が重要である。それは、次の理由による。



セメントペーストは、骨材に比べると強度や化学抵抗性が劣るため、最小限（骨材の表面を覆う必要量）に押さえることが大事である。

砂の径が小さくなると、セメントペーストは多く必要となる。これは砂の表面積が増えるからである。

粒径分布が悪い骨材の配合の場合は、空隙率が大きくなり、空隙を埋めるためのセメントペーストも多く必要になる。

骨材の大きさを半分にした場合表面積が増加してセメントペーストの量が増加する。

よいコンクリートを造るためには、最大骨材(砂利)をできるだけ大きく(部材断面および鉄筋の配筋状況を考慮した上で)し、粒径分布が良好で空隙率の小さい骨材(砂利+砂)を使用して、水セメント比の小さいコンクリートモルタルを使用することが望ましい。

3) セメントおよび混和剤

一般的に使用するセメントは、普通ポルトランドセメントである。

ポルトランドセメント (J I S R 5 2 1 0) の種類

1. 普通ポルトランドセメント
2. 早強ポルトランドセメント
3. 超早強ポルトランドセメント
4. 中庸熱ポルトランドセメント
5. 耐硫酸ポルトランドセメント
6. 普通ポルトランドセメント (低アルカリ形)
7. 早強ポルトランドセメント (低アルカリ形)
8. 超早強ポルトランドセメント (低アルカリ形)
9. 中庸熱ポルトランドセメント (低アルカリ形)
10. 耐硫酸塩ポルトランドセメント (低アルカリ形)

もっとも一般的なセメント
 硬化が早い (28日強度→7日で発生する)
 硬化が早い (7日強度→1日で発生する)
 発熱量が少ない 強度の増進が遅い
 硫酸塩に対する抵抗性 大

セメント中のアルカリを0.6%以下におさえ、アルカリ骨材反応を抑制する

混合セメントの種類

- | | | |
|----------------------------|----------------------|--------|
| 1. 高炉セメント(JIS R 5211) | ポルトランドセメント+高炉スラグ | 水密性が高い |
| 2. シリカセメント(JIS R 5212) | ポルトランドセメント+ケイ酸質(シリカ) | 水密性が高い |
| 3. フライアッシュセメント(JIS R 5213) | ポルトランドセメント+フライアッシュ | 水密性が高い |

特殊セメントの種類

- | | | |
|----------------|------------------------|-------------|
| 1. アルミナセメント | ボーキサイト+石灰石 | 早期強度の増加が激しい |
| 2. 超速硬セメント | 粉末度を小さくし反応を早くさせる | 早期強度の増加が激しい |
| 3. 超微粉末注入用セメント | 注入用に高炉スラグとセメントを微粉碎したもの | |

これ以外に、混和剤を加えることによりセメントペーストに特徴をもたせたものがある。

混和剤の種類

- | | |
|----------|---------------------------------------|
| 1. ポゾラン | ポゾラン反応により水密性が向上する |
| 2. AE剤 | 微細な空気の泡を導入する(凍結融解に効果有り、ワーカビリティの改善) |
| 3. 減水剤 | 位水量を減少させる 流動化剤としても使用する |
| 4. 促進剤 | 硬化を促進させるもの(塩化カルシウム) |
| 5. 遅延剤 | 硬化を遅らせるもの(リグニルスルホン酸系、オキシカルボン酸系、けい沸化物) |
| 6. 防水剤 | 防水性をもたせるもの(金属石けん、脂肪酸石灰、けい酸ソーダ) |
| 7. 分離抵抗剤 | 分離抵抗性をもたせるもの(合成樹脂) |

混合セメントを配合した構造物にCS-21を使用する場合、高炉スラグ等の混合量によって効果の発現に差が出ることがある。例えば自閉作用の反応速度が極端に遅い場合があるため注意しなければならない。

理想的な材料を追求してきたが、よいコンクリート構造物を造るために大事なことは、施工性と仕上がり性で、施工性や仕上がり性の悪い材料を使用し、施工上の欠陥部を作ってはならない。

収縮ひび割れやブリーディング水による影響は、コンクリートの単位水量(コンクリート1m³当たりの水の量)が大きくなることが問題であり、ジャンカやコールドジョイントは、コンクリートの流動性と締め固めに問題がある。

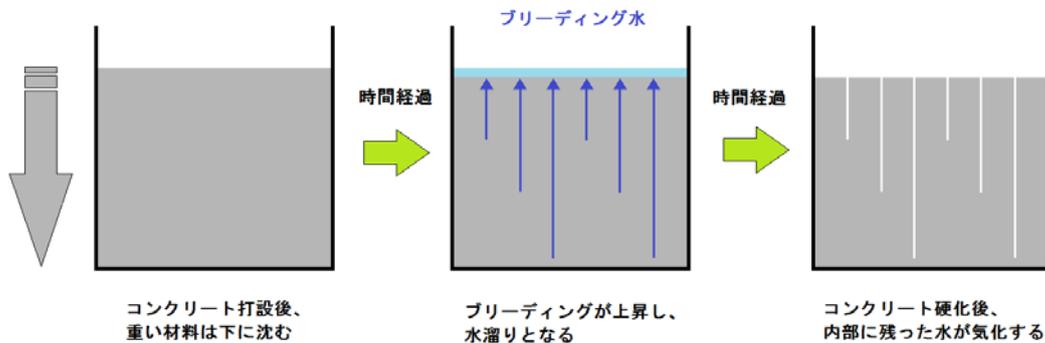
現在では、施工上の問題を軽減するための流動化剤、高性能減水剤、AE剤、硬化促進剤、硬化遅延剤、水中分離抵抗剤、無収縮剤等があり、目的に合わせて活用されている。

4) 初期欠陥の発生原因

初期欠陥は施工に配慮することで防ぐことのできるが、発生させるとコンクリートの耐久性が低下する。初期欠陥の原因にはブリーディング、型枠のはらみ、支保工の沈下、打重ねの不適（コールドジョイント）、打継ぎの不備、締固め不足、締固め過多による材料分離、不適當な打設順序、打設時の振動（ポンプ車の振動）等がある。

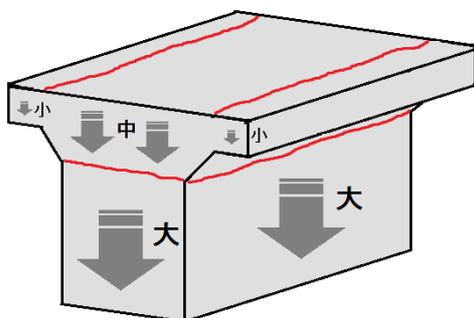
ここでは、ブリーディングに伴い発生する初期欠陥について述べる。

ブリーディングとは、コンクリート打設後に重い材料（石や砂やセメント）は下に沈み、軽い材料である水が表面に上がって来る現象のことである。上がってきた水は、コンクリート表面に水溜りとなる。コンクリートを練り混ぜる際、水を多く使うと多くの水が上がることになる。全ての水が表面まで上がりきれば問題とはならないが、コンクリート内部の石（骨材）などで上昇を止められてしまう水も多くあり、そのような水は、コンクリートが硬化した後に乾燥するに従って気化し、コンクリート外部に放出される。その水が溜まっていた箇所は空洞になり、結果コンクリートの強度を低下させることになる。



コンクリートは打設直後からブリーディングが上昇し、それに伴いコンクリートは沈降する。この時、鉄筋や型枠形状等により沈降が拘束されると、沈降ひび割れが発生する。

沈降ひび割れは、一般にブリーディング量が多くなる冬期施工に多く見られる初期損傷のひとつである。このひび割れの特徴として、ひび割れ幅が大きくなるとひび割れ面はささくれた状況になることがある。通常、コンクリートを打ち込んでから硬化するまでに発生する。



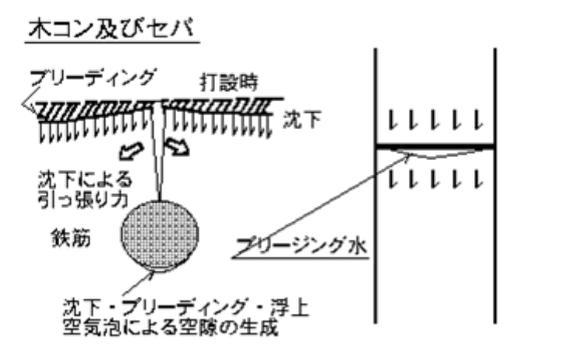
相対沈降差によるひび割れ



Pコン下に発生したひび割れ

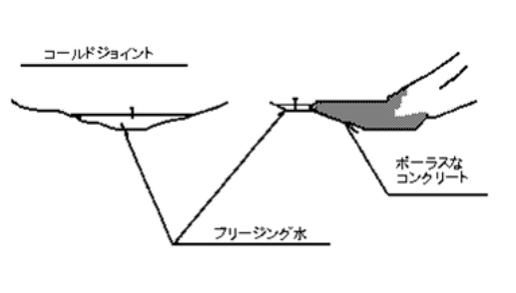
上部コンクリートを打ち込む前に、コールドジョイントが発生しない範囲で一旦打込みを停止し、下部コンクリートの落ち着きを待って打ち込むのがよい。

●漏水などが発生しやすい初期欠陥



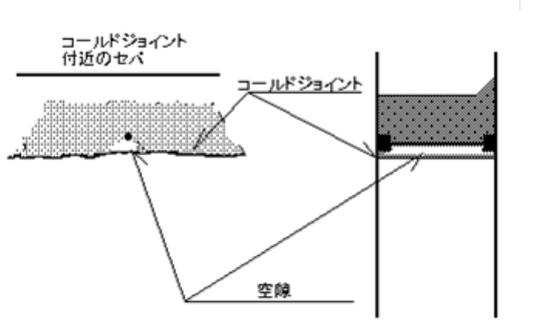
コンクリートの沈下をセパレータや水平貫通部材が阻害し、下にブリーディング水がたまり、やがて空隙となる。上には沈下ひび割れが発生する。

仕上げ前の再振動は、このような現象を防止する手段として有効である。また、沈下ひび割れが発生した時点で、タンピングにより修復することが可能。



ブリーディング水が溜った箇所にコンクリートを打設すると、コールドジョイント部が水セメント比の大きいポーラスなコンクリートとなる。

ブリーディング水を撤去し打設することで防止できる。



打ち重ね位置とセパレータあるいは鉄筋などの間隔が狭い場合、そのセパレータの下にコンクリートが廻り切らず空隙ができる。

打ち重ね位置を考慮してコンクリートを打設する必要がある。

型枠の補水性が良くなり、ポンプ打設により打設速度が速くなったため 最近このような原因による欠陥が多く発生している。

5) ひび割れの発生原因

コンクリート構造物の劣化要因にはさまざまなものがあるが、中でもひび割れは大きな要因のひとつで、コンクリートは、必ずひび割れが発生する材料だといえる。

ここでは、ひび割れの発生原因について考えてみる。

1. 乾燥収縮

コンクリートは、空气中で乾燥すると収縮する。これを乾燥収縮といい、配合や湿度、温度等の環境条件によって異なるが、コンクリートの収縮率は0.04～0.07%、モルタルではその約3倍、セメントペーストではさらにその約3倍である。

コンクリートが乾燥すると、乾燥の程度によって自由な収縮を生じようとする。しかし、コンクリートは引張強度（圧縮強度の約1/10）や伸び能力が小さいため、その自由な収縮を周りのコンクリートや内部にある鉄筋に拘束されることによってひび割れ（乾燥収縮ひび割れ）が発生する。

2. 自己収縮

セメントは、完全水結合材比（セメント 1 g と完全に水和発熱反応を生じる水の量：約 0.25 g）の水のみと反応を起こし、その他の水は C S H ゲルに吸着した水やコンクリート中を自由に動き回る水（自由水）として存在し、徐々に蒸発する。この際、コンクリート中に水で満たされていたり、満たされていなかったりする空隙（孔）が形成されるが、これは水和により形成される空隙である。セメントと水との水和反応は、このような水和による空隙の形成の他に収縮（縮む）を生じる。この収縮が自己収縮であり、先の水和により形成される空隙と自己収縮を合わせたものが水和収縮と呼ばれる。

自己収縮とは、外部から水分の供給や外部への水分の逸散が無い状態（乾燥などを受けない状態）、外部から力が作用しない状態、水和発熱反応による温度変形が無い状態（温度が一定の状態）におけるセメントペーストのマクロな収縮である。簡単に言えば、セメントと水が水和発熱反応を生じると、発熱が発生しなくともセメント水和物（C S H ゲル）は収縮する。

自己収縮はセメントの種類によって異なるが、セメントペーストでは

- ① 早強セメントを使用した場合：材齢 7 日で約 0.2%
- ② 普通セメントを使用した場合：材齢 7 日で約 0.1%
- ③ 低発熱セメントを使用した場合：材齢 7 日で約 0.05%

であり、材齢とともに徐々に大きくなる。

コンクリートではセメントペーストの約 1/2 程度である。しかしながら、コンクリートは引張強度（圧縮強度の約 1/10）あるいは伸び能力（0.01~0.015%）が小さいため、自己収縮が何らかの要因（例えば、鉄筋・鉄骨や既設コンクリート）により拘束されると、ひび割れが発生しやすくなる。

自己収縮は、次のようなコンクリートでは非常に大きくなる。

- ① 水結合材比（水セメント比）が小さい
- ② 単位結合材量（単位セメント量）が多い

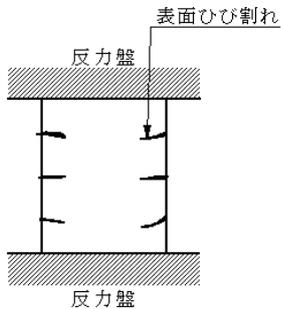
このようなコンクリートは、高強度コンクリートや高流動化コンクリートに多い。

3. 水和発熱によるコンクリートの温度応力

セメントと水とが水和反応することによって発熱を生じる。したがって、型枠に打設されたコンクリートの温度は、この発熱反応によって徐々に温度が上昇する。この温度上昇はセメントの種類、単位セメント量（C）、水セメント比（W/C）や外気温度によって異なるが、高いもので 60℃ 以上にもなる。その後、外気温度に徐々に近づくように降下する。一般に物質は線膨張係数という固有の性質を有している。この線膨張係数とは、物質の温度が 1℃ 上昇あるいは降下したときの変形量で、コンクリートの場合には、温度上昇時には約 0.002%/℃、温度降下時には約 0.001%/℃ である。したがって、線膨張係数と温度上昇量あるいは温度降下量によって、物質は膨張（温度上昇時）したり収縮（温度降下時）したりという体積変化を生じることになり、この体積変化（自由な変形）が何らかによって拘束された場合、コンクリート内部に温度応力が発生する。

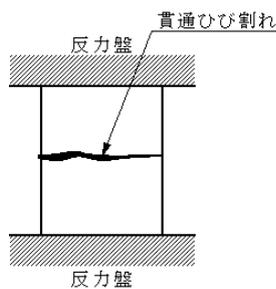
なお、鉄筋の線膨張係数は、コンクリートとほぼ同じ 0.001%/℃ で、温度変化による鉄筋の変形はコンクリートとほぼ同じである。したがって、鉄筋とコンクリートの温度による変形はほぼ同じである。この特徴は、鉄筋コンクリートの利点である。

コンクリートは断面内で不均一な温度変形状を示し、また既設コンクリートや岩盤などにより、温度変形が拘束された変形状を示す。このような変形状によりコンクリート部材内部で温度応力が発生するが、前者の変形状によるものは内部拘束型、後者によるものは外部拘束型と呼ばれている。コンクリート構造物は通常このような変形状が複雑に絡み合っているため、発生する温度応力も部材レベルで異なった傾向を示すことが一般的である。



内部拘束型応力が卓越する構造物としては、コンクリートスラブが代表的である。内部拘束型の応力によるひび割れは、下図に示すような表面ひび割れであり、ひび割れの発生時期はコンクリート打設後比較的短期間で発生する。

外部拘束温度応力が卓越する構造物としては、既設コンクリート上に打設された部材厚の比較的小さい壁構造物や柱に支持された梁構造物がある。これらの構造物では、部材断面内の温度勾配は殆どないものと考えられる。したがって、このようなコンクリートに発生する温度応力は、既設コンクリートによる外部拘束が支配的である。

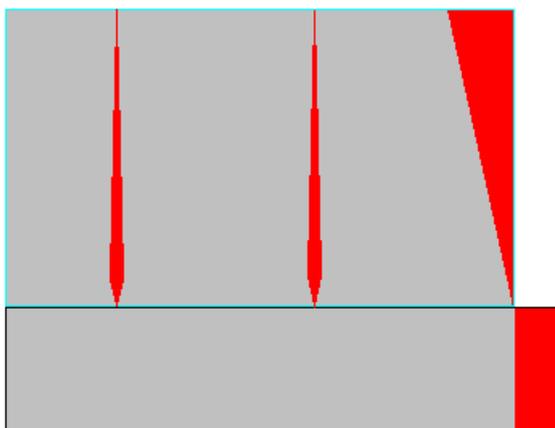


外部拘束型の応力によるひび割れは、図に示すような断面を貫通するひび割れであり、ひび割れの発生時期はコンクリート打設後比較的長期間で発生する。

4. 水和熱により発生するひび割れの例

L型擁壁、水槽、ボックスカルバート、砂防ダム等、一体化させて打ち継ぐ構造物には貫通ひび割れが発生しやすい。これは打ち継ぐコンクリートの硬化時の温度と、自然状態で安定した温度差による収縮を、既に打設し硬化したコンクリートに束縛されることにより発生する。

そのとき、脱型時の乾燥収縮あるいはコンクリートの内部と外部の温度差により発生する微細なひび割れ箇所が誘発目地的な働きをして、そのひび割れが徐々に広がり貫通ひび割れとなる。



コンクリートの熱膨張係数は、通常の温度範囲で $7 \sim 13 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 程度である。

暑中コンクリートで硬化時の温度 50°C 、現在の温度 10°C 、構造物の長さが 30m と仮定すると

$$10 \times 0.000001 \times (50^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) \times 30\text{m} = 0.012\text{m}$$

12mm 収縮していることになる。

ベースコンクリートは、砕石の上などで束縛が少ないため端部が収縮する。
 そのため、ベースコンクリートには、比較的貫通ひび割れは発生しにくい状況にある。
 壁面のコンクリートは、すでに収縮した既設ベースコンクリートに束縛されるため、硬化時との温度差が大きくなるほどひび割れの総幅(ひび割れ幅の合計)が大きくなる。
 上部は、束縛の影響が小さくなるため、端部が収縮する。
 下部の接着面付近は、温度がベースコンクリートに逃げるため、束縛が大きいにもかかわらずひび割れの総幅が小さい傾向にある。

5. 日射と環境温度の変化によるコンクリートの温度応力

ここでは、コンクリートが硬化した後に、日射あるいは環境温度の変化によるコンクリートの体積変化による温度応力に関して説明する。

日射あるいは環境温度は、屋上部と基礎部および壁の屋外と屋内に温度差を生じるため、その温度差による変形が拘束されることによって温度応力が発生し、ひび割れを生じることが多い。そこで『屋上部と基礎部との温度差による温度応力』および『壁の屋外と屋内の温度差による温度応力』について説明する。

● 屋上部と基礎部との温度差による温度応力

日射あるいは環境温度によって、屋上部と基礎部とで温度差が発生する場合、

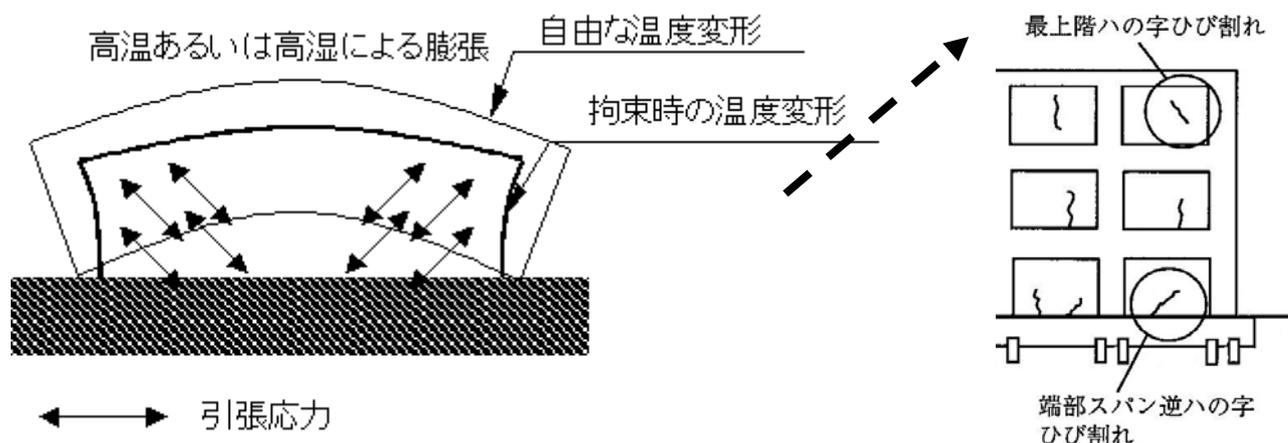
- ① 屋上部分が高温となり膨張する場合（夏場に多い）
- ② 屋上部分が低温となり収縮する場合（冬場に多い）

に大別することができる。

※これらは『水和発熱によるコンクリートの温度応力』とは異なり、セメントの種類や水セメント比などには無関係であり、どのようなセメントの種類あるいは水セメント比においても共通で、外気の温度や日射の程度に依存する。

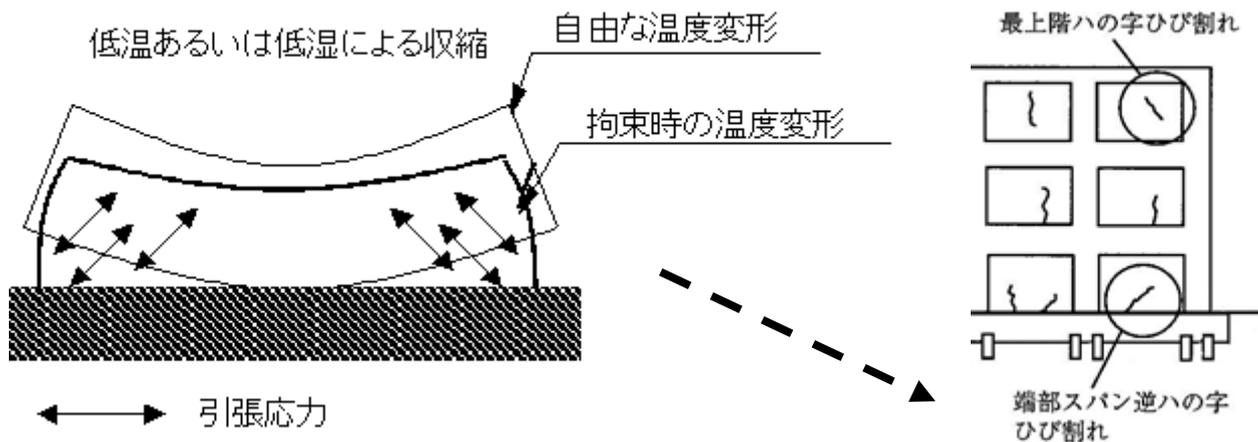
① 屋上部が高温となり膨張する場合（夏場）

夏場には、屋上部が高温あるいは高湿度となり膨張を生じる。この場合には、屋上部の膨張を下部のコンクリートが拘束することによって、上端部にハの字型のひび割れが発生する。



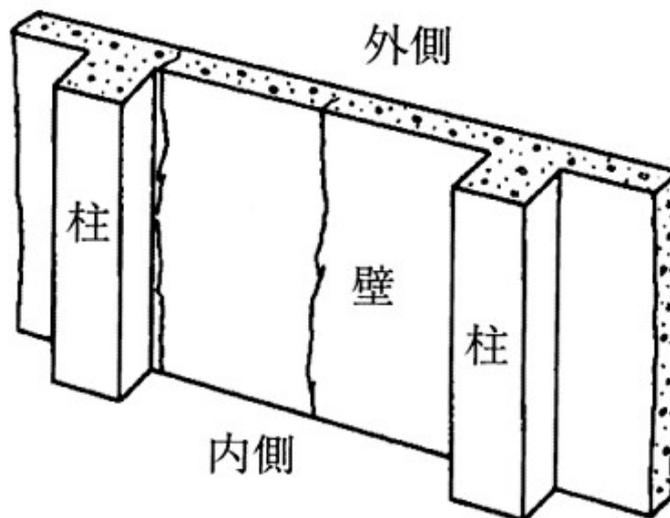
②屋上部が低温となり収縮する場合（冬場）

冬場には、屋上部が低温あるいは低湿度となり収縮を生じる。この場合には、屋上部の収縮を下部のコンクリートが拘束することによって、下端部に逆ハの字型のひび割れが発生する。



● 壁の屋外と屋内の温度差による温度応力

日射あるいは環境温度によって、夏場には建物壁の屋外では高温となり、逆に屋内では低温（クーラー等）となる。この場合、壁が屋外に反る変形を生じ、それを柱等が拘束することによって、屋内では引張応力、屋外では圧縮応力が発生し、屋内に発生した引張応力が引張強度を超えると、次の図のようなひび割れが発生する。



ひび割れは、拘束部材間のほぼ中央、及び拘束部材隣接部の低温または乾燥側に発生する。このような反りが繰り返すことにより、ひび割れが大きく深くなり、貫通することもあります。

6. コンクリートの遷移帯

コンクリートは、数 n m から数 c m までの極めて広範囲な粒子の集合によって形成され、粗骨材とセメントペーストとの間には、材料的に不連続な（空隙径が非常に大きい）領域が存在する。この領域は遷移帯と呼ばれており、他のセメントペースト部分と比較して空隙部分が非常に多く、空隙径も非常に大きい（多孔質）、コンクリート中に存在する欠陥（弱点）部分である。また、鉄筋コンクリート構造物では鉄筋周りにも遷移帯の形成が確認されており、これは、悪く言えばコンクリート中にひび割れがたくさんあることと同じである。遷移帯では、イオンや気体の拡散係数が非常に大きくなるため、中性化や鉄筋の腐食が進み、また、強度の低下も生じる。

遷移帯が狭い領域で単独に存在する場合は、構造物全体に大きな影響はないが、遷移帯同士が重なったり、または連続し、遷移帯領域が大幅に拡大された場合には、コンクリート組織の連続性が失われるため、問題となる可能性が高い。

6) コンクリートの劣化と水の関係

コンクリートは、初期に水中養生すれば半永久的に緻密で強固なものとなり、耐久性は100年以上と言われてきた。しかし至る所で劣化に起因する問題から支障をきたしている。

劣化箇所を数多く見ていくと、いろいろな要因と条件が組合わされているが、構造的要因を除外すると、水がほとんどの劣化の主要因として関わっている。

水がコンクリートに染み込む、または通過することにより、化学的変化の引き金となり劣化が始まっている。建築と土木の構造物を比較すると、明らかに建築構造物のコンクリートの方がセメント量も多く単位水量の多いコンクリートを打設している。単位水量が多いため、建築構造物の方がひび割れは多く発生し、中性化の進行速度もかなり早く、鉄筋のかぶり厚さも少ないことから、劣化の進行が早い環境にあるものが多く見受けられるのが現状である。

しかし、雨水のかからない室内の壁や柱には、ひび割れ以外の変状はほとんど無く、外部や屋上の壁やスラブも、塗膜や防水層が切れるまで変状は発生しない。当然、防水層が一度切れると急速に漏水や剥離現象が発生している。アルカリ骨材反応の多い地域で、同時期に打設したと思われる建築物も、同じ骨材を使用しているにもかかわらず、水と触れない構造物では変状は発生していない。土木構造物でも水が当たる箇所、水と触れる箇所と水の全く当たらない箇所では、劣化状態には雲泥の差が発生している。

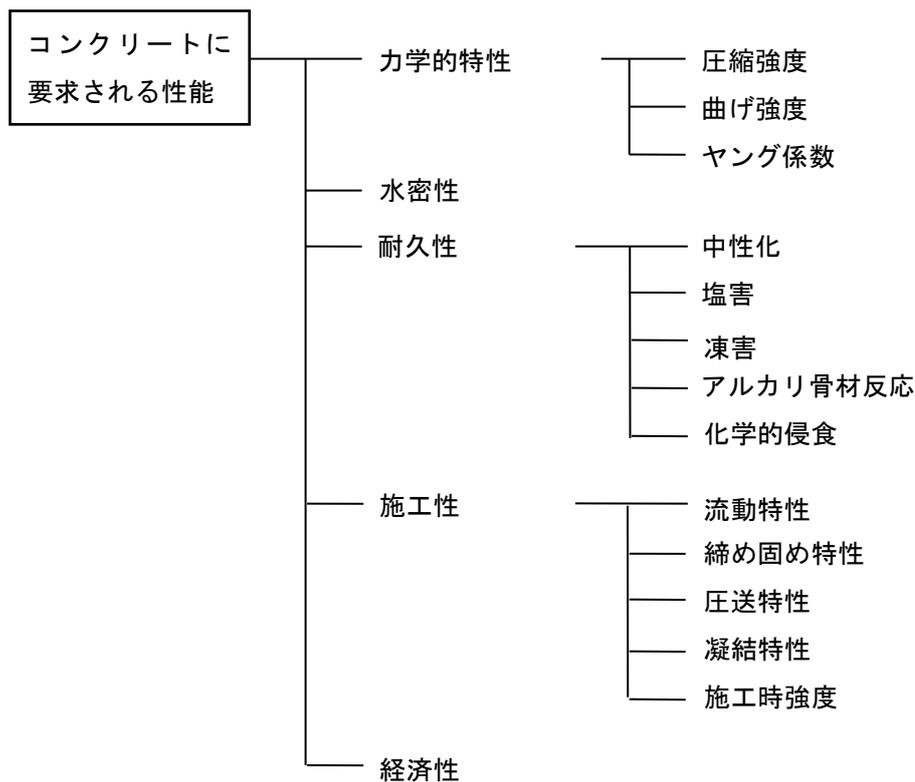
コンクリートの劣化原因は、塩害、中性化、アルカリ骨材反応、凍結・融解、疲労、化学的侵食等の要因が輻輳していることが多いと言われるが、化学的侵食を除き、多かれ少なかれ水が関わりを持っていることは確実と考えられている。

このことから、鋼構造物に防錆塗装が必要なように、コンクリートの延命、耐久性の保持には防水や表面保護工が必要と考えられる。

【コンクリートの要求性能】

コンクリートに求められる性能には、「構造物に要求される強度、耐久性などの力学的および耐久性能、さらに施工性などの品質を有し、かつ品質のばらつきが小さく、適正なコスト」がある。とくに、最近では高強度コンクリート、高流動コンクリート、高靱性コンクリートなどの高品質、高機能なものが要求されるようになってきている。

また、良質天然骨材の枯渇に伴い外国産海砂、砕砂、再生骨材などの利用を余儀なくされており、品質面で、特に強度、耐久性に大きな影響を及ぼす可能性がある。従って「所要の品質を有するコンクリートを得る」には、設計・材料・製造・施工・維持管理プロセスの全ての面から考える必要がある。



1) 力学的特性

コンクリートの代表的な力学的特性には、強度とヤング係数があり、強度には圧縮強度、引張強度、曲げ強度、せん断強度、支圧強度、付着強度などがある。中でも圧縮強度は全ての強度と密接に関連し、設計上重要な指標である。また、支保工、型枠の取り外しに必要な強度指標であり、施工面からも重要なもので、設計上の強度を満足するとともに、ばらつきの小さいことも必要である。

ヤング係数は、コンクリートの変形特性を表す指標で設計上重要な特性であるが、施工面からは支保工取り外し後の変形、供用時の荷重による変形を左右するため、上げ越等の面でコンクリート打設計画時の配慮が必要である。

2) 水密性

水を通しにくい性質、すなわち透水性の小さいことを高水密性と言うが、ここでは透気性すなわち気体（特に炭酸ガスと酸素）を通しにくい性質およびイオンの移動（特に塩化物イオン）も併せて示す。

コンクリートは、セメントの水和に必要な水量以上の水を用いて造るため、内部に毛細管空隙（水隙）

を持っており、水圧が加えられる（建築物では雨水）と透水する。同じく、気体に関しても、毛細管空隙内を浮遊してコンクリート内部に浸入するが、気体の場合は、毛細管空隙内の相対湿度によって透気性が大きく異なる。このような透水性あるいは透気性は、コンクリートの組織が緻密であればあるほど、透水係数あるいは透気係数の値としては小さく（水を通しにくい、気体を通しにくい）、逆に組織が多孔質であれば大きくなる。ここで言う「組織の緻密さ」とは、コンクリート内部に存在する空隙径が小さく、それぞれの空隙が連続していないことを示している。一般に、このような「組織の緻密さ」は「水セメント比」、「骨材の最大寸法」、「材齢」が大きく影響するが、打設時の締め固めの程度によっても大きな差が出ることを認識しておかなければならない。

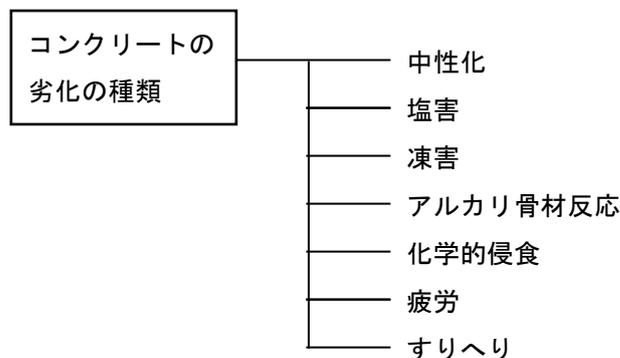
以上の説明は、あくまでも「ひび割れていないコンクリート」に対するものである。ひび割れたコンクリートの透水性及び透気性は、ひび割れていない健全なコンクリートに比べて遥かに大きくなる。したがって、ひび割れが存在するコンクリートの劣化（中性化、鉄筋の腐食、コンクリートの侵食）は急速に進展する。現在の構造物の透水性及び透気性は、ひび割れていない健全なコンクリートに対して主に研究が実施されている。しかし、構造物の水密性の低下による劣化現象（中性化、鉄筋の腐食等）を耐久性確保と長寿命化という観点から考えると、劣化が最も激しくなるコンクリートは必ずひび割れが発生する材料であるということを念頭においた対策、すなわち、ひび割れが存在する状態におけるコンクリートの水密性に重点をおく必要がある。

維持補修を行う際、構造物の劣化診断の一項目に「中性化深さ」試験があるが、ほとんどの劣化診断ではこの「中性化深さ」を健全なコンクリート部に対して行っており、多くは診断結果としてOKという判定をしている。このような診断は全く意味をなさない。何故ならば、健全な部分のコンクリートは、中性化が生じて100年程度の耐久性が設計で配慮されているからである。構造物の耐久性確保と長寿命化の観点から言えば、ひび割れた部分のコンクリートの中性化が非常に重要なわけで（設計段階では、コンクリートのひび割れまで予測不可能）、ひび割れを有するコンクリートの透水性及び透気性は、健全なコンクリート部分に比べて遥かに大きく、それが故に中性化も遥かに進んでいる。このような最悪の状態に対しての診断を実施しないと、構造物の耐久性向上などは望めない。

各種の劣化現象には、①炭酸化によるコンクリートの中性化（コンクリートが強アルカリ性から中性に近づく）と②それによる鉄筋の腐食、③塩化物イオンによる鉄筋の腐食などが挙げられる。また、①ではコンクリートが単に酸性となることを示したが、それ以外に中性化はコンクリート組織自体の劣化をも誘発する場合があるため、診断時は留意しなければならない。

3) 耐久性

コンクリートは、建設事業の材料では土、石材、木材と同様に長期間にわたり要求性能の維持が求められ、所定の強度のみを満足しても十分とは言えず、耐久性の観点から別の配慮が必要である。例えば近年問題となった劣化によるコンクリートの剥落に対して、繊維補強コンクリートなどが用いられ、補修、保護が行われている。コンクリートそのものが、図に示す劣化要因に対する抵抗性を有するとともに、繊維補強コンクリートなどの他の保護工法と組み合わせることで、厳しい環境条件に対応した耐久性を保持できるケースが多くなっている。



4) 施工性

施工性の面から良いコンクリートとは、「計画された施工方法で運搬、打ち込み・締め固めが容易で、分離が少なく、所要の強度、耐久性等の品質を有する構造物が経済的に得られるコンクリート」のことであり、しかし、構造物の種別によりコンクリートの要求品質が異なるように、運搬、打ち込み・締め固めの施工も異なる。とくに近年では作業者の高齢化、省力化に加え構造物の高品質・高機能化のニーズに対応するために、新しい混和材料や機械が開発され、コンクリートの性能とともに施工方法も変化してきている。

● 流動特性、締め固め特性（ワーカビリティー）

打設時のコンクリートの扱いやすさ、仕事のしやすさである。一般的には粗骨材の最大寸法とスランブから判断できる。一方、高密度配筋などで締め固め不可能または十分できない場合は、上記の自己充填性を有する高流動コンクリートの使用が推奨されている。

● 圧送特性（ポンパビリティー）

コンクリートポンプによる打設場所までの圧送のしやすさで、吐出圧力と圧送管内の圧力損失から設定され、細骨材率が大きく、モルタル量の多いコンクリートでは、圧力損失が小さく圧送特性は向上する。高所、長距離圧送等の特殊な条件下では、慎重な検討が必要になる。

● 凝結特性

凝結特性は、コンクリートが固まり始める時間の性質で、締め固め、打ち重ね時間、側圧などに関連するが、外部環境の温度、湿度、型枠の仕様に左右される。コールドジョイントやジャンカの発生、型枠の変形などに注意が必要である。

● 施工時強度

コンクリート構造物が完成するまでの安全性を保証し、完成後の性能を保証するためには、その時々々の条件に応じた適切な強度が必要である。例として、型枠および支保工の取り外し時の強度、PC鋼材緊張時の強度などがあり、土木学会のコンクリート標準示方書等に必要な圧縮強度を示している。

5) 経済性

コンクリートの経済性には、材料、製造・管理、運搬のコストと打ち込み・養生などの施工に関係するコストが含まれるが、我々は構造物の重要性の判断に基づき、生コンとしての材料と施工のやりやすさのバランスを考えなければならない。

構造物完成後も合理的な維持管理が必要であり、維持管理の基準、維持管理の費用（LCC：ライフサイクルコスト）、環境への影響（LCA：ライフサイクルアセスメント）を総合的に検討するLCD（ライフサイクルデザイン）が必要と考えられるが、施工段階での品質確保が経済性の根幹となることを認識しておかなければならない。