

演習問題解答例

□2 章

1. 原子間ポテンシャルを平衡距離 r_0 のまわりで 2 次までテーラー展開すれば、 $U_0 + dU = U(r_0 + dr) = U_0 + \frac{\partial U}{\partial r} dr + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} dr^2$ となる。いま、平衡距離 r_0 において $\frac{dU}{dr} = 0$ であるため、この式は $dU = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} dr^2$ となる。一方、 $dU = F \cdot dr$ の関係より、 $F = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} dr$ であり、この式の両辺を r_0^2 で割ると、 $\frac{F}{r_0^2} = \frac{1}{2r_0} \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \frac{dr}{r_0}$ が得られる。さらに、応力は $\sigma = \frac{F}{r_0^2}$ 、ひずみは $\varepsilon = \frac{dr}{r_0}$ で表されることに注意すれば、この式は $\sigma = \frac{1}{2r_0} \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \varepsilon$ となる。これより、弾性係数 $E = \frac{1}{2r_0} \frac{\partial^2 U}{\partial r^2}$ が得られる。
2. 一般に、分子間には分子量に応じたファン・デル・ワールス力が作用するが、水分子には分子の極性による水素結合が生じている。水素結合はファン・デル・ワールス結合よりも強い。そのため水分子においては、分子量が小さくても、液体から気体への転移に比較的大きな熱エネルギーが必要となる。

□3 章

1. 本文 3.2.1 項参照。
2. 金属の変形は弾性変形と塑性変形に分けられる。弾性変形の範囲内であれば、外力を取り除くともとの形に戻り、ひずみは残らない。さらに荷重を加えていくと塑性変形が生じ、除荷しても永久ひずみ（塑性ひずみ）が残る。これを応力-ひずみ曲線で表すと図 1 のようになる。

金属の塑性変形は主として原子のすべり

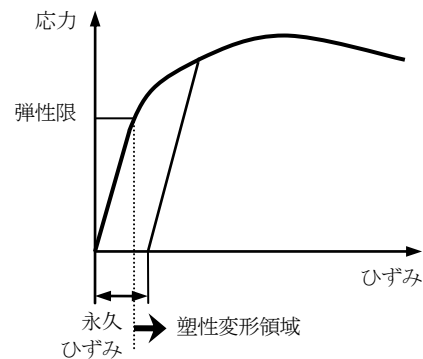


図1 応力-ひずみ曲線

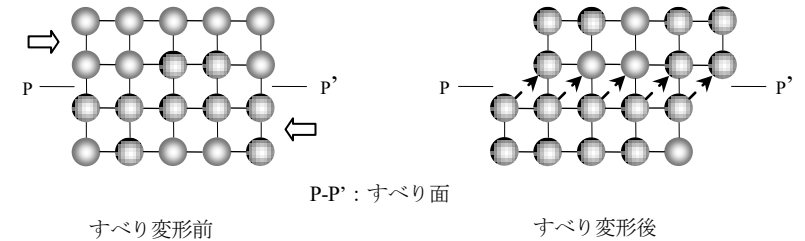


図2 金属結晶のすべり変形

によって生じる。図2は、せん断力を与えたときの塑性変形の様子を示している。変形前には結晶面PP'で向かい合って結合していた原子が、矢印のようにせん断力を受けて原子間の結合が切れ、1原子間距離だけ移動して隣の原子と結合したことを示す。金属結晶では、原子の結合が切れても結合の役目を果たしている電子雲の拡がりが大きいため、隣の原子と再び引力を及ぼし合い、容易に結合することができる。

すべり面上で結晶の全断面を同時にすべらせるのに要するせん断応力は、理論的に $G/2\pi$ （ここに G ：剛性率）で与えられる。ところが、金属のすべり変形に要するせん断応力を実験で測定すると、理論的に求められる値（ $G/2\pi$ ）よりもはるかに小さなせん断応力ですべり変形が生じる。これは、すべり面上で原子が一気にすべるのではなく、原子が順々にすべることによって変形していくからである。

すべり変形の起点となるのが、転位とよばれる線欠陥である。金属結晶の中にはもともと多数の転位が存在しており、凝固時に結晶方位の異なった結晶が成長して接触する際や、原子空孔が直線状に集まって生成される。また、転位は外力を受けて増殖する。そして、応力が弾性限を超えると転位の移動と増殖が始まり、原子が順々にすべることによって塑性変形するのである。

3. 本文 3.6 節参照。

□4 章

1. 鋼も鉄の一種とし、区別されない場合があるが、狭義では、合金中の炭素量によって区別される。炭素含有量が 0.02% 以下を鉄、それ以上で 2.0% までを鋼という。ただし実際に使用されている構造用鋼材の炭素含有量はほとんどの場合 1.0% 以下である。

2. 本文 40～41 ページ参照.
3. 疲労強度に影響を与える要因については 45 ページを参照のこと. 疲労強度を向上させる対策として, 応力範囲の低減はもちろん有効である. 平滑材では, より表面平滑度を上げる, 端部表面の凹凸を低減させる等の方法がある. 溶接継手では, 余盛削除, 止端のグラインダー仕上げ等の応力集中を低減させる方法があり, また, 最近ではピーニング, 局部加熱, 特殊溶剤の適用などで残留応力を低減させる方法が開発されている.
4. 鋼材の種類とその特性に合わせた溶接方法の選定等が重要である. 特に注意すべきは溶接熱影響による硬度を一定レベルに抑え, 割れが発生しないようにすることである. そのためには, 鋼材成分から硬さを予測し, 予熱, 後熱の必要性を検討する, あるいは実際に溶接施工試験で性能を確認することが行われる.

□5 章

1. 本文 5.2 節参照.
2. 本文 5.5 節参照.
3. 本文 5.7 節参照.
4. 本文 5.8 節参照.

□6 章

1. 【解答例】 弾性率を決める相互作用は, 金属材料については共有結合 (ばね定数 $k = 15 \sim 75$ N/m, 弾性率 60～300 GPa) であり, 高分子材料についてはファン・デル・ワールス相互作用 (ばね定数 $k = 0.5 \sim 1$ N/m, 弾性率は 2～4 GPa) であるため.

【解説】 系内部の原子間に働く相互作用をもとに弾性率を考察すると, $E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{k}{r_0}$ (6.2) 式

と表され, 弾性率は系内部のばね定数に依存する. 金属材料の場合, 原子間に働く相互作用は金属結合 (ばね定数 $k = 15 \sim 75$ N/m) が主となるため, 金属結合に相当する弾性率 (60～300 GPa) が発現する. 一方, 高分子材料の場合, 基本構造は共有結合であるが, 一般的な高分子の共有結合は配向していないため, 変形を加えたときに高分子の主鎖のまわりの回転が生じ, 非結合原子間のファン・デル・ワールス相互作用が弾性率を決めることになる. ファン・デル・ワールス相互作用のばね定数は $k = 0.5 \sim 1$ N/m と小さく, したがって弾性率は 2～4 GPa と金属材料よりも小さくなる. ただし, 繊維の場合には分子が一方向に配向して

おり, 共有結合 (ばね定数 $k = 50 \sim 180$ N/m) が弾性率を決めることになるため, 配向の度合によっては金属材料並みまたは金属材料以上の弾性率を示す場合がある.

2. 【解答例】 エポキシ樹脂 (熱硬化性樹脂) の場合, ファン・デル・ワールス相互作用が大きいために弾性率はファン・デル・ワールス相互作用 (エネルギー弾性) によって決まるのに対して, ゴムの場合はファン・デル・ワールス相互作用が小さいため弾性率はゴム弾性 (エントロピー弾性) によって決まるため.

【解説】 熱硬化性樹脂は, (1) 極性基をもつ (ファン・デル・ワールス相互作用が大きい), あるいは (2) 芳香環を有する (変形時のエントロピー変化が小さい) ため, 弾性率を決めるのはエネルギー弾性となる. 一方, ゴムの場合は, 部分鎖 (絡み合い点間の部分鎖または架橋点間の部分鎖) 間のファン・デル・ワールス相互作用が小さく (極性が小さい), 部分鎖の変形が容易である (変形時のエントロピー変化が大きい) ために, 弾性率を決めるのはエントロピー弾性となる.

□7 章

1. 【機能】 次の 3 つの機能が求められる. ① 骨材を移動させる媒体 (フレッシュコンクリート中のペースト), ② 骨材を繋ぎとめる結合材, ③ 鋼材の防食.

これらの機能が, セメント (硬化体) が置かれる種々の環境において, 求められる期間にわたり保持されることが必要である. ここで考えるべき環境とは, 温度 (火災も含む), 湿度 (乾湿などの変化を含む), 湿潤条件 (セメント水和物は, 溶解度は小さいとしてもわずかず水に溶解する. 接する溶液の移動も重要), 接する環境のイオン条件 (pH, 各種イオン濃度), およびこれらの複合である. さらに工業製品としてみた場合, これらの機能が再現性をもって発現することが重要である.

【発現機構】

〔①骨材を移動させる媒体〕 コンクリートはセメントペーストと骨材からなるのであるから, 骨材の粒度分布と形状も重要であるが, まずは骨材の移動媒体としてのセメントペーストを考える必要がある. 骨材を分離させず, かつ潤滑に移動せしめることができるセメントペーストのレオロジー挙動 (変形速度と応答応力で表現されるフローカーブなど) が重要となるが, レオロジーパラメータと工学的指標であるスランプやフローとの関連はおおよそ定式化されているものの, 厳密な関係は明らかにされていない.

セメントペーストは, 骨材を材料分離させることなく担持し, しかも型枠に適切に充填で

きる変形性能を有する必要がある。この際、振動の影響も考慮する必要がある。

このためには、第一に、水と練り混ぜ後の水和したセメント粒子の粒径（比表面積）と粒度分布が重要である。ここでは詳細は述べないが、これらに影響するセメントのキャラクター、粉末度、粒度分布、形状（スラグは角張っており、フライアッシュは丸い）、水和反応性（ C_3A が多いセメントは一般には水和後の比表面積が大きくなる）が考察のポイントである。比表面積が大きくなると粘度が高まる。説明の範囲を超えるが、上記の因子が、ダイラタンシー、チクソトロピーなどといった特徴的レオロジー挙動に関係する。

第二に、水セメント比と減水剤の作用を考える必要がある。水セメント比を下げると粘度が上がるが、減水剤によりセメント粒子を分散させることにより粘度を下げるができる。この際、セメントと減水剤の相互作用には相性があり、同じ JIS 規格のセメントであっても、製造工場や製造条件の微妙な違いにより、レオロジー挙動は異なってくる場合がある。

基本的作用機構に立ち戻って考えるならば、セメント水和物粒子間の相互作用力（時間依存性を含めて凝縮なのか分散なのか、そこに及ぼす減水剤の影響）、セメント粒子間の平均水膜厚さ、セメント粒子の形状と粒度分布、セメントの水和による水の消費が、セメントペーストの流動性を支配する本質的因子であり、これらを解析することがフレッシュコンクリートのワーカビリティ制御には必須となる。

〔②骨材を繋ぎとめる結合材〕 強度は、もとは水であったところを主には $C-S-H$ で充填することで発現する。 $C-S-H$ は、空隙を充てんするのみで、空隙を押し広げてまで生成することはない。コンクリートの構成材料と強度の違いをおおまかに考えると、骨材と未水和セメント粒子が最も高強度で、次いでセメント水和物（ $C-S-H$ が最も多い）、最も低いものが空隙である。 $C-S-H$ も空隙を有しているが、 $C-S-H$ は生成する際に空隙を必ず副成するので、 $C-S-H$ 中の空隙を除去することはできず、 $C-S-H$ は空隙込の物質と考える。

当然、ある体積の物質中で、強度が高いものが多いほうが全体として高強度と考えられる。ということは、強度発現は、コンクリート中の $C-S-H$ の生成量を評価すればよいことになる。 $C-S-H$ を減らすもっとも簡単な方法は水を減らすことである。水セメント比を下ればよい。

この原理から考えると、コンクリートの単位水量を一定にして水セメント比を下げていくと、なぜ強度が高くなるか疑問に思わないだろうか？ また、セメントペーストに骨材を徐々にたくさん多く入れていくと強度が高まるのだろうか？ 普通は、コンクリートの圧縮強度は水セメント比により決まり、単位水量には依存しないはずなので、上記の説明は間違ってい

るのか？ 読者が自分で調べて勉強されることに期待する。

強度発現性が $C-S-H$ の生成量に依存するのであるから、 $C-S-H$ を早く生成する場合に強度発現が高くなる。つまり、 C_3S がより多く、評価する材齢までに反応する最大粒度以下の粒子の割合が多い場合に高強度となる。温度依存性については、初期では高強度となるが、長期では強度の伸びが小さくなる。この現象は、 $C-S-H$ の生成量と直接的に関連しているが、 $C-S-H$ の継時的生成量が温度により変化する原因を考えるには、より詳細な水和組織の理解が必要となる。

〔③鋼材の防食〕 鋼材の防食が、セメント硬化体が生み出す高アルカリ性の雰囲気により達成される。キーとなるのは OH^- 濃度である。鉄は高 OH^- 濃度では、不動態とよばれる安定酸化皮膜を形成し、この皮膜を通した酸素の移動が阻害され、発錆から守られる。しかし、この酸化皮膜は水酸化物イオンと亜硝酸イオンによってのみ形成されるという特性をもち、他の陰イオン濃度が高まるとこの酸化被膜が溶解し、鉄は錆び始める。もちろん、酸の影響（二酸化炭素も炭酸イオンとして作用）で OH^- 濃度が低下すれば同じことが起きる。

典型的な陰イオンは塩化物イオンである。両者のモル濃度比 $[Cl^-]/[OH^-]$ が発錆条件として用いられる場合も多い。コンクリートの発錆限界 Cl^- 濃度が 1.2 kg/m^3 と表記されるのは、工学的簡便さのためであり、水溶液を用いた発錆実験を行えば、 $[Cl^-]/[OH^-]$ が支配要因となる結果が得られる。

$[Cl^-]/[OH^-]$ をセメントの観点から考えると重要なポイントが一つある。それは、セメントペースト空隙水中の pH である。セメントの水和は水酸化カルシウムの生成を伴い、空隙水はその飽和濃度と平衡にあると考えられ、水酸化カルシウムの純水への溶解度から求められる 12.6 がその pH とされる場合もある。実際、コンクリートを粉砕し、多量の水に分散して pH を測定すると 12.6 程度の値が得られ、この結果をもって空隙水の pH を 12.6 と推定するわけである。しかし、これは間違いである。コンクリートの空隙水を圧搾抽出などで絞り出せば、pH は 13.5 前後の値になる。これは、アルカリ共存下の水酸化カルシウムの溶解平衡を考える必要があるためで、高アルカリ濃度環境では水酸化カルシウムの溶解度は格段に下がる。実際に、空隙水の pH はアルカリ量でほぼ決まるのであり、水酸化カルシウムは直接的には関与しない。ただし、外来の炭酸イオンとの相互作用では重要となる。一定量のアルカリを含む水酸化カルシウムを多量の水に入れると、アルカリは希釈され水酸化カルシウムの溶解への影響は無視できるようになり、溶液の pH は水酸化カルシウムの溶解度で決定される。

pH の違いはわずか 1.0 程度でも、 $[\text{OH}^-]$ は 10 倍異なる。つまり、錆び始める $[\text{Cl}^-]$ も 10 倍になるのである。Cl⁻による鋼材発錆を考えるには、このようなコンクリートの空隙水の化学の理解が根本となる。

この項の最後に申し添えるならば、コンクリートの流動性、強度、耐久性の研究を行う場合、再現性を担保するには、相当なる注意をもってセメントを分析しなければならない。JIS 製品であるからといって、研究目的によってはまったく再現性がない結果となっているかもしれない。

2. コンクリートの乾燥収縮は、C-S-H により引き起こされる。セメントペーストの乾燥収縮は 2000~4000 μ のオーダーであるが、コンクリートの乾燥収縮は 500~1000 μ のオーダーである。つまり、コンクリートの乾燥収縮の根本的原因はセメントペーストである。セメントペーストが収縮する機構は、C-S-H は nm オーダーの微細空隙構造を含み、この構造に含まれる水が乾燥により減少し、毛細管張力が発生することに帰結できると考える研究者が多い。そして、生成する C-S-H の構造が材齢やセメント組成の異存性がないとすると（より高精度には明らかにある）、コンクリート中の C-S-H 量が重要な因子となる。

コンクリート中の C-S-H 量は何によって決まるかを考えると、単位水量、水セメント比、水和度（温度と材齢と湿潤条件などに依存）である。一般に単位水量を減らし、水セメント比を減ざるとコンクリートの乾燥収縮は低減するが、これは C-S-H を少なくするということである。乾燥収縮が長期的に大きくなっていくが、C-S-H が乾燥期間中にも増加する場合と一定である場合とでは状況が異なるともいえる。こう考えると、乾燥開始材齢の影響、乾燥開始時の湿潤状況、低水セメント比での水和水の欠乏の影響（つまり自己収縮）など、C-S-H 量の観点から考えると整理できる。

このような理解ができると、さらに C-S-H の組成が異なる場合、すなわちボゾランが入り、Ca/Si 比が低下する場合の効果を明確に意識して分離し、議論ができるようになる。セメント硬化体の断面の反射電子顕微鏡写真を掲載したが、水和初期にできる C-S-H とより長期でできる C-S-H では、明るさが異なる。C-S-H の化学組成が一定であるとする、空隙の量が異なることになる。乾燥収縮に影響するのは、空隙の量そのものではなく、ある湿度条件で空になる特定の径を有する空隙の量である。ゆえに、コンクリートの空隙径分布を測定することは、コンクリートの乾燥収縮挙動の基礎解析に重要となる。

まとめると、C-S-H の量、C-S-H の C/S 比、およびセメントペーストの空隙径分布を考えると乾燥収縮の理解の基本となる。

3. セメントの化学組成は、カルシウム、シリカ、アルミナ、鉄、そして主に石膏として存在する硫黄からなる。まずは、クリンカもしくはセメントに混合するのか、クリンカ製造用原料として用いるのか、熱処理の有無を考える必要がある。

混合材料として代表的なものは石膏であり、火力発電所などで排煙脱硫のために石灰を投入することで副産し、これらが主な供給源となる。天然に産する無水石膏も石膏源となる。石膏は他のリン酸やフッ酸の製造工程からも副成する。この場合、Ca と結合していないリン酸やフッ酸が残留しているとセメントが水と接した直後に空隙水中の Ca イオンと結合し、空隙水の化学組成が通常と異なり、セメントの水和反応が極度に遅延することになる。

石膏を除く他の主要 4 元素は多くの廃棄物・副産物と共通のものである。この主要元素の組成を制御すれば原料の種類には関係なくセメントは製造可能である。ここで注意すべきなのは、クリンカ鉱物に取り込まれる状況が元素ごとに異なることである。ある種の元素は水和反応を極度に遅延させ、また別の元素は環境に悪影響を及ぼす。高炉スラグやフライアッシュなど使用実績が多く、品質が安定しているものは安心して使えるが、汚染土壌や工場からのある種の廃棄物によっては量が少なく化学組成が安定しないものもある。特に Cr や Pb などの有害物質は、原料における濃度管理が重要である。

下水道汚泥は、季節変動はあるものの発生源が不確定な多くの廃棄物に比べれば組成は比較的安定している。ただしリンを多く含むため、リンのセメントへの影響を考慮する必要がある。リンは C_2S のシリカを置換し固溶するため、見かけ上、シリカが増加したのと同じ効果をもつ。同じ強度発現パターンを維持するには、原料中の Ca 濃度を高める必要がある。

4. 海外、特に今後のセメント需要が伸びると考えられる発展途上国では、セメントは 28 日強さクラスのみが指定されることが多い。しかも、過半数は 42.5 クラスと称される、28 日圧縮強さが 42.5~62.5 MPa のセメントである。日本の普通ポルトランドセメントは 52.5 MPa 以上の 52.5 クラスである。42.5 クラスのセメントは、多くの場合、52.5 クラスのセメントに何らかの混合材を添加することで製造される。この混合材を評価することがセメントの詳細性能の理解には重要である。

セメントの代表的分析方法は、粉末度、粒度分布、密度、化学組成、相組成について行われ、それぞれが相互に関連をもつ。注意したいのは、いきなり X 線回折/リートベルト法などの機器分析により構成相の種類と量の評価を行うのではなく、総合的に行うことが重要であるということである。

たとえば、粉末度が高いのに 28 日強さが低いとすれば、クリンカ以外に強度発現に寄与

しない混合材が相当量併用されている可能性が考えられる。密度を調べ、3.15を有意に下回る値であれば、クリンカ以外の成分の量が多いことがわかる。高炉セメントであることがわかっていれば、密度のみからでもおよそ高炉スラグ混合割合が推定可能である。

蛍光 X 線による化学組成分析は、設備があり測定条件設定が整っている場合には比較的手軽に短時間に行える。装置はあっても検量線がなければ十分な精度の測定はできない点には注意が必要である。さらに解釈にあたっては、セメント組成以外に、各種の混合材の化学組成情報が必要である。日本の高炉セメントであれば、高炉スラグ中にはポルトランドセメントよりも Mg に富むので、その差を利用して組成推定もできる。しかし、未知試料に関しては、全体の化学組成だけから判断することはなかなか難しい。

より詳細に調べるには、X 線回折/リートベルト法が適している。この方法を用いれば、混合セメントのベースとなっているポルトランドセメントの鉱物組成もわかる。混合材の基本鉱物組成も推定できるので、混合材の種類の推定もできる。高炉スラグとフライアッシュの判別と定量はどちらもガラス相を含むので容易ではないが、標準物質を入れることで非晶質量が定量できる方法が提案されている。高炉スラグとフライアッシュの判別をもし XRD で行うならば、高炉スラグはガラスのハローしか生じないが、フライアッシュであれば特徴的なムライトのピークが検出される可能性がある。フライアッシュも Ca リッチになるとムライトが生成しなくなるので注意が必要である。

より直接的に調べるのであれば、偏光顕微鏡を用い、セメント粒子を浸液に浸して観察するとよい。形状から高炉スラグ微粒子やフライアッシュ粒子は容易に判別できる。

さらに詳細に調べるのであれば、セメントをエポキシなどに練り込み、粒子断面を SEM により分析するとよい。SEM が有する種々の機能と分析者の技能に応じてできる範囲は異なるが、時間と手間をかければどのような混合材であってもすべてを明らかにできる可能性がある。たとえば、シリカフェュームが混入されていたとすると、SEM 以外ではその存在を確認するのは容易ではないであろう。

□8 章

1. ナフタレンスルホン酸のホルマリン縮合物は、セメント粒子表面に吸着し表面電位（ゼータ電位）を増加させ、その静電反発力によりセメント粒子を分散させる。ポリカルボン酸エーテルは、セメント粒子表面に吸着して分子内にもつグラフト鎖を溶液中に伸ばし、立体障害効果によりセメント粒子を分散させる。

2. 高炉スラグ微粉末は潜在水硬性を有しており、アルカリなどの刺激剤となる物質が少量存在すると難溶性の水和物に変化する。このため、高炉スラグ微粉末を使用することにより、硬化後のコンクリートの組織が緻密になり、化学抵抗性の向上、水密性の向上などの効果が期待できる。また、セメントの一部を高炉スラグ微粉末で置換することにより、単位セメント量を低減し、アルカリを刺激剤として消費することから、水和熱の抑制、アルカリ骨材反応の抑制も期待できる。

なお、これらの性質は高炉スラグ微粉末の粉末度に依存しており、フレッシュコンクリートにおいては、スラグ置換率が大きいほど、粉末度が高いほど、流動性が增大する傾向がある。特に、コンクリート硬化時の養生が十分になされないと、高炉スラグ微粉末の効果が期待できないことがある。

3. フライアッシュの成分はシリカ質およびアルミナ質に富み、ポゾラン反応性を示す。不溶性のポゾラン反応生成物により、硬化後の組織が緻密になり、圧縮強度や耐久性などのコンクリートの品質を向上させることができるが、ポゾラン反応の進行を促すためには、十分な湿潤養生が必要である。また、フライアッシュは、JIS に品質の規定が設けられているが、原料炭の品質、焼成条件および捕集方法などによって変動するため、産地やロットの変更時には注意が必要である。

なお、同 JIS には強熱減量の上限值が設けられているが、この値は未燃焼炭素量の目安となり、未燃焼炭素量が多いと、同一空気量を得るための AE 剤の使用量が增大する傾向がある。

□9 章

1. 表面水率 (%) = $\frac{W - W_s}{W_1 - W} \times 100$, $W_s = \frac{W_1}{D_s}$

W_1 : 試料の質量, W : 試料で置換された水の質量, D_s : 表乾密度

図 9.1 の表面水の定義は、 $H(\%) = \frac{w_s}{W_s} \times 100$ である。つまり、骨材に付着している表面水

w_s を表乾状態の骨材の質量 W_s で除した数値の百分率を意味する。したがって、問題の式の分子と分母の意味について、定義の意味から考える。骨材試料に付着する表面水 w_s は、非常に微量量なので、この表面水を直接測定することは困難である。そこで、表面水を含む試料を水に完全に浸すことによって、表乾状態の試料と表面水の容積（水の質量）と表面水

が付着した試料の質量の差が表面水のみに依存すると考える．すなわち， W ：試料で置換された水の質量とは，表面水を含む表乾状態の試料と同体積の水量の質量を意味し，

$$W = \frac{W_s}{D_s} + w_s \text{ となる． よって， 分子の } (W - W_s) \text{ は， } W - W_s = \frac{W_s}{D_s} + w_s - \frac{W_1}{D_s} = \frac{W_s}{D_s} + w_s - \frac{W_s + w_s}{D_s} = w_s \left(\frac{D_s - 1}{D_s} \right) \text{ となる． 一方， 分母 } (W_1 - W) \text{ は， } W_1 - W = W_s + w_s - \left(\frac{W_s}{D_s} + w_s \right) = W_s - \frac{W_s}{D_s} = W_s \left(\frac{D_s - 1}{D_s} \right) \text{ となる． つまり， 表面水を含む試料の質量から試料で置換された水の質量を引くと， 表面水の影響がなくなり， 表乾状態の骨材の質量 } W_s \text{ でまとめることができる． よって， 問題の式の分子と分母には， } \left(\frac{D_s - 1}{D_s} \right) \text{ の項があり， これは消去できる．}$$

これによって，分子は表面水 w_s となり，分母は表乾状態の試料の質量 W_s となり，これは図 9.1 の表面水率の定義の式と一致する．

2. 下記に示すコンクリートの配合を設定する．

配合表						
空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)			
			水	セメント	細骨材	粗骨材
5	50	45	175	350	807	986
セメントの密度: 3.15g/cm ³ , 細骨材と粗骨材の表乾密度: 2.70g/cm ³						

スラッジ固形分率 1% の回収水を練混ぜ水に用いた場合の配合修正を考える．スラッジ固形分率とは，122 ページの「9.3 水」より，単位セメント量に対するスラッジ固形分の質量を意味する．いま，スラッジ固形分の質量を S_l とすると， $S_l = 0.01 \times 350 \text{ kg/m}^3 = 3.5 \text{ kg/m}^3$ となる．スラッジ固形分は回収水に含まれるので，スラッジ濃度を α とすると， $\alpha \times 175 \text{ kg/m}^3 = 3.5 \text{ kg/m}^3$ より， $\alpha = \frac{3.5 \text{ kg/m}^3}{175 \text{ kg/m}^3} = 0.02 = 2\%$ となり，1000ℓ の回収水に 20g のスラッジ固形分があることを意味する．

単位水量の補正としては， $175 + 3.5 = 178.5 \text{ kg/m}^3$ の水量が必要になる．同一水セメント比にするためには，単位セメント量は， $\frac{178.5 \text{ kg/m}^3}{0.5} = 357 \text{ kg/m}^3$ となる．これより，単位水量

W は， $\frac{178.5}{175} = 1.02$ となり，2% の増加になる．また，単位セメント量 C は， $\frac{357}{350} = 1.02$ と

なり，2% の増加になる．

この単位水量と単位セメント量の増加は，スラッジ固形分のため，細骨材の一部となる．これより，みかけの細骨材率を一定にするためには，細骨材量を ΔS 減じる必要がある．単位水量と単位セメント量が増加したために，必要な骨材容積 V_a は， $V_a =$

$$1000 - \left(50 + 175.5 + \frac{357}{3.15} \right) = 658 \ell \text{ になる． したがって， 以下の方程式が成り立つ．}$$

$$\frac{S - \Delta S}{2.7} + \frac{G}{2.7} = 658 . \quad \text{この式に } S = 807, G = 986 \text{ を代入すると， } \Delta S = 16 \text{ kg となり，}$$

$$s/a = \frac{807 - 16}{2.7 \times 658} = 0.445 = 44.5\% . \quad \text{したがって， 修正前の細骨材率を } 0.5\% \text{ 減ずることになる．}$$

3. 図 3 に示す細管内のビンガム流体の流動を考える．

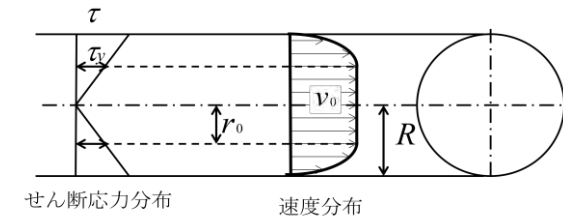


図 3 細管中のビンガム流れの速度分布

ビンガム流体が半径 R ，長さ l の細管内を圧力差 Δp で流れる場合の流出速度は，次式で表現できる． $2\pi r l \tau = \pi r^2 \Delta p$ ．この式より， $\tau = \frac{\Delta p r}{2l}$ が導かれる．これを塑性方程式に代入することにより， $\dot{\gamma} = -\frac{dv}{dr} = \frac{1}{\eta_{pl}} \left(\frac{\Delta p}{2l} - \tau_y \right)$ ．半径 r で積分すると， $v = -\frac{1}{\eta_{pl}} \left(\frac{\Delta p}{4l} r^2 - \tau_y r \right) + C$ が得られる．

$$r = R \text{ のとき } v = 0 \text{ より， } C = \frac{1}{\eta_{pl}} \left(\frac{\Delta p}{4l} R^2 - \tau_y R \right) \text{ となり， } v = \frac{1}{\eta_{pl}} \left\{ \frac{\Delta p}{4l} (R^2 - r^2) - \tau_y (R - r) \right\} .$$

$\tau = \tau_y$ の位置の半径を r_0 とすると， $r_0 = \frac{2l}{\Delta p} \tau_y$ ，半径 r_0 の部分は層流的流れを起こさず，

一定速度で流れる．この部分を栓流（plug flow）と称す．流出量 Q は，以下の積分を実行することによって得られる．図 3 参照．

$$Q = \int_{r_0}^R 2\pi r v dr + \pi r^2 v_0, \quad \text{ただし, } v_0 = \frac{1}{\eta_{pl}} \left\{ \frac{\Delta p}{4l} (R^2 - r_0^2) - \tau_y (R - r_0) \right\}.$$

これより，Buckingham-Reiner の式

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 \eta_{pl}} \left\{ 1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l}{R \Delta p} \tau_y \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l}{R \Delta p} \tau_y \right)^4 \right\}$$

が導かれる．

□10 章

1. 本文 10.3.2 項 (1)～(3) 参照．高強度化の主な方策としては，① 高強度の材料（セメント，骨材，混和材）の選択，② 配合（特に水セメント比の低減），③ 空気（空隙）の低減（配合，締固め方法），④ 適切な養生方法（温度，湿度，時間）の選択，が考えられ，コンクリート内部の組織をいかに緻密にするかがポイントである．なお，セメント硬化体の高強度化については 7.3.3 項を参照のこと．

2. 材料，配合が異なれば強度発現の性状が異なることはいうまでもない．特に骨材とともに混入する可能性のある有機不純物（たとえば，フミン酸やタンニン酸など）はコンクリートの強度発現を阻害する．また糖類も強度発現を遅らせることがある．

一方，材料，配合が同一であっても以下のように養生条件が強度発現を阻害することがある（10.3.2 項 (3) 参照）．

- ① 湿度： 打込み後，特に早期に乾燥させると強度が発現しなくなる（図 10.6 参照）．
- ② 温度： 一般的に養生温度が低いほど強度発現が遅れる（図 10.7 参照）．ただし，養生温度と強度は必ずしも比例関係にあるわけではなく，セメントの種類や配合によっても異なる．また，一般的に長期材齢における強度の増進は，養生温度が低い方が大きくなる．なお，材齢初期に凍結させると強度が永久に発現しなくなることがある．
- ③ 振動： 打設後，加振によって流動性が回復する範囲であれば，再振動によって強度が増加する．しかし，凝結が進み，加振しても流動性が回復しない時期以降に振動を加えると水和反応によって形成された組織が破壊されることになり，強度が発現しなくなる．

3. 本文 10.3.2 項 (4) 参照．主要要因は以下のとおりである： ① 供試体の形状と寸法，② 端

面の平滑度，③ 載荷速度，その他，10.3.2 項 (3) に示されているとおり，試験時の供試体の乾湿も影響する．

□11 章

1. ASR およびこれによる有害なひび割れ発生の抑制には，ASR 発生の 3 条件に対する対抗策を講ずることが基本となる．すなわち，① JIS に規定される化学法（JIS A 1145）やモルタルバー法（JIS A 1146）などの「骨材のアルカリシリカ反応性試験」を実施し，これによって「無害」と判定された骨材を使用して，コンクリート内部の反応性シリカの量を低減する，② 全アルカリ量が明らかなポルトランドセメントを使用し，コンクリート中のアルカリ総量が 3.0 kg/m^3 以下になるようにする．また，高炉セメント B 種，C 種，もしくはフライアッシュセメント B 種，C 種を使用する．このとき，高炉セメント B 種においては高炉スラグ質量割合が 40% 以上，フライアッシュセメント B 種においてもフライアッシュ質量割合が 15% 以上の，それら混和材の混合割合の大きいものを使用する．また，高炉スラグ微粉末やフライアッシュを，普通ポルトランドセメントの一部と置換し混和材として使用する場合には，ペシマム量に留意し，アルカリシリカ反応抑制効果が事前に確認された置換率にて用いる．これらにより，コンクリート中の細孔溶液の pH の上昇を抑制する，③ コンクリート内部への水分浸透を防止するために，コンクリート表面に防水性仕上げや遮水処置を施し，ASR ゲルへの水分供給を断つことによって吸水膨張を抑制する．
2. 骨材の安定性試験（JIS A 1122）結果や過去の使用実績などから，耐凍害性が大きいと判断される骨材を使用する．また，AE 剤，AE 減水剤もしくは高性能 AE 減水剤を適量使用して，最大骨材寸法に応じて 3～6% 程度のエントレインドエアを導入する．さらに，水セメント比をできる限り低減して密な組織を形成させ，毛細管空隙の連続性を断つことも凍害に対して有効である．
3. 生活排水が分解されて生成する気体である硫化水素は，毒性が極めて強く，鉄や銅などの金属に対して腐食性をもつ．また，硫化水素は，硫黄酸化細菌の働きにより硫酸に変化し，コンクリートのかぶりを浸食する．設計において，コンクリートの腐食対策方法および腐食予防方法を検討するためには，硫化水素（硫酸）による腐食機構が次の 4 段階からなることを理解しておかなければならない．

[1] 下水中の硫酸イオンが硫酸塩還元細菌の働きにより硫化水素を生成する．

[2] pH が 7 前後の下水において気体化しやすい硫化水素が気相中へ放散する．

[3] コンクリート表面の結露水や飛沫した下水に再溶解した硫化水素が、硫黄酸化細菌によって酸化され、硫酸が生成する。

[4] コンクリートの表面に生成された硫酸によって、コンクリートが化学反応を起こし、かぶりが減少する。

このような硫酸劣化の対策を行うためには、

[1] 発生源対策として、下水の性状を改善し、硫化水素の発生を抑制できる管路施設の構造改善を行う。

[2] 下水の流れが乱れにくい構造へと改善し、下水中の硫化水素が気相中へ放散する量を低減する。

[3] 気相中へ放散した硫化水素を取り除く方法や施設を検討する。

[4] 鉄筋を硫化水素による腐食から守ることのできる有効なかぶり厚が、設計耐用期間を通して確保される対策を講じる。

等を考慮する必要がある。

4. 【有利にはたらく例】一定持続応力下において変形が大きくなるクリープ現象と、一定の大きさのひずみ下において応力の大きさが減少する現象は、力学的には区別されることのない同様な現象である。したがって、コンクリートに発生するクリープは、不静定構造物において一定の変位が生じることで発生する不静定力等を緩和する方向に働く。【不利にはたらく例】鉄筋の配筋されたプレストレストコンクリートを想定する。鉄筋が完全な弾性体であるとすれば、コンクリートにクリープが生じれば、鉄筋には同等の大きさの弾性ひずみが生じる。コンクリートのクリープによって、鉄筋の受けもつ荷重は大きくなる。プレストレストコンクリートに外力として作用するプレストレスト力の大きさが一定であるとすれば、コンクリートの負担する荷重は小さくなり、結果としてコンクリートに作用する応力は小さくなる。コンクリートに引張応力を作用させないためにあらかじめ圧縮応力を与える目的で導入されたプレストレスト力は、コンクリートのクリープによって、本来の効果が小さくなる。
5. 【例 1：鉄筋コンクリートの乾燥収縮ひび割れ】コンクリートが乾燥によって収縮することを、コンクリート内部に配筋された鉄筋が拘束することによって、コンクリートには引張応力が発生する。乾燥収縮ひずみが大きく、コンクリートの引張強度を上回る引張応力が発生したときに、コンクリート表面にはひび割れが発生する。このひび割れから二酸化炭素や水分が供給されることで、鉄筋に腐食が生じる。【例 2：プレストレスト力の減少】プレストレストコンクリートは、PC 鋼材を用いて、荷重が載荷される前にコンクリート部材に圧縮力

が作用した状態（プレストレス）とし、荷重が載荷されたときにコンクリートに引張応力が発生しないようにする構造部材である。プレストレストコンクリート部材において、PC 鋼材を緊張することによって導入されるプレストレスト力が一定に保たれるためには、PC 鋼材の変形が一定に保たなければならない。しかし、コンクリートの乾燥収縮ひずみによってコンクリート部材も収縮すれば、PC 鋼材の緊張力がそれにともない減少し、コンクリートに作用する圧縮応力も小さくなる。

□12 章

1. コンクリート表面からの塩化物イオンの浸透は、(12.2) 式で表される拡散現象と見なすことができる。この場合のコンクリート中における塩化物イオン濃度は (12.3) 式で予測することができることから、本問の条件として、与えられた D_{ap} 、 x （かぶり 7cm）、 C_0 を代入し、計算値 $C(x,t)$ が 1.2 kg/m^3 になるときの t を求めることになる。誤差関数も含めて Excel 等の表計算ソフトで容易に計算することができ、 t としては 23.7 年となる。すなわち、塩化物イオンの浸透開始後約 24 年で鉄筋腐食が開始するものと予想できる。
2. 図 12.7 に示されるように、中性化速度に影響を及ぼす要因は多岐にわたるが、そのなかでも二酸化炭素侵入速度に大きな影響を与える要因として、二酸化炭素濃度と湿度が挙げられる。二酸化炭素濃度に関しては、その値が高いほど中性化速度は大きくなる。また、湿度に関しては、図 12.6 に示されるように、高湿度や低湿度で中性化速度が抑制される。建築構造物の場合、室外より居住空間である室内の方が二酸化炭素濃度が高くなり、雨掛かりのある室外より比較的乾燥しやすい室内の方が中程度の湿度を保持する傾向があることから、一般に、室外より室内の方が中性化の進行が速くなる。
3. 塩害と中性化が複合したコンクリート構造物では、図 12.5 に示されるように、コンクリート中の中性化部分でフリーデル氏塩が分解され、解離した塩化物イオンが未中性化部分に濃縮する現象が発生する。この場合にまず注意すべきこととしては、塩害あるいは中性化の単独劣化の場合よりも、早期に鉄筋腐食が発生しやすいことと、濃縮された塩化物イオンにより腐食速度も大きくなる傾向が強いことである。これより、対策を講じる際には、劣化が深刻化する前により根本的な補修を施す必要がある。有効な対策としては電気化学的防食工法が挙げられる。鉄筋の腐食反応停止を目的とした電気防食工法が効果的だが、対策後の維持管理を効率化する観点からは、脱塩工法を適用することで塩化物イオンの除去とかぶり部分の pH 回復の同時達成を狙う考え方もできる。

□13 章

1. コンクリート中に連行されたエントレインドエアにより、コンクリート中のセメントペースト量が見かけ上大きくなる。このエントレインドエアが大きくなることにより、コンクリートがプラスチックに（粘りが大きく）なる。したがって、空気量が大きくなっても同一のスランプを保持するためには、細骨材率を小さくする必要がある。
2. コンクリートの配合強度が設計基準強度を下回る確率を 5% 以下とすることから、 $k=1.645$ とした (13.4) 式を用い、変動係数 V を 10% として代入すると、割増し係数 α は 1.2 と計算される。設計基準強度 f'_{ck} が 24 N/mm² であることから、配合強度 f'_{cr} は 28.8 N/mm² になる。水セメント比と圧縮強度の関係から、求める水セメント比 W/C は約 53% となる。
3. 細骨材の表面水率を小さく計算していることから、実際に練り上がったコンクリート中の単位水量は配合設計したものよりも大きくなってしまっている。すなわち、一定量のセメントに対して、単位水量が大きくなっていることから、水セメント比が配合設計よりも大きくなっており、コンクリート強度は目標とした強度よりも小さくなる可能性がある。
4. 細骨材率を大きくすると、コンクリート中の骨材の細かい粒子の割合が大きくなる。コンクリート中に小さい固体粒子の割合が増えると、粒子の表面積が大きくなり、粒子全体の接触抵抗が大きくなるため、コンクリートの粘り、すなわちプラスティシティが大きくなる。

□14 章

1. 【セメント】水和熱を抑える目的などから、低熱または中庸熱ポルトランドセメントが用いられる。【混和材】ポゾラン反応による緻密化、高強度化を目的に、シリカフューム、高炉スラグ微粉末、フライアッシュなどが用いられる。【骨材】高強度で安定的な骨材が用いられる。単位セメント量が多く、ASR に対して注意が必要である。【高性能 AE 減水剤】ポリカルボン酸系などが主流であり、高流動を得るために不可欠である。
2. ひび割れ発生後の靱性向上（はく落防止）、高強度コンクリートの爆裂防止、収縮ひび割れ低減（分散）。
3. 略。
4. 基本的にこれらの補強材は、コンクリートの補強に通常用いられる鉄筋や PC 鋼材が腐食することに対して考案された、高い耐久性が期待される材料である。逆に、その高い耐久性を考慮した長期の計画が必要となる。その際、経済性の観点も重要である。鋼材とは異なる材

料特性については本文や参考文献を参照されたいが、補強材という観点から主に取りざたされる引張特性だけでなく、鋼材なら基本的に有している諸特性（たとえば線膨張係数や導電性など）の面も含め、把握しておく必要がある。

5. 鋼材のような等方性材料のほうが、一般的には取り扱いやすい。施工段階から供用段階に至るなかで、作用する応力の方向が 3 次元的に不用意に変化しうるからである。一方向あるいは異方性材料では、抵抗方向以外の方向の応力に対する挙動を明らかにしておく必要がある。その用途としては、抵抗方向以外の方向の応力に「抵抗しなくてよい」場合と「抵抗しないほうがよい」場合がある。連続繊維棒材をコンクリートの引張補強材として用いるのは「抵抗しなくてよい」面が強いためである。一方、連続繊維シートの接着により、部材の破壊形式の制御のため曲げ耐力とせん断耐力のうち後者のみを向上させたい場合は「抵抗しないほうがよい」面が強い。またシールドの発進立坑土留め壁への使用では、シールド機のカッタービットでの切削が容易となり、「抵抗しない」ことを積極的に活用している。

□15 章

1. 湿潤状態であるので、(15.1) 式における補正值 ΔR を +5 とし、 $R_0=R+\Delta R=25+5=30$ となる。これより (15.2) 式から、 $F_c=-18.0+1.27R_0=-18.0+1.27\times 30=20.1$ (N/mm²)。
2.
$$E = \frac{V_p^2 \rho (1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} = \frac{(2Lf)^2 \rho (1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} = \frac{4L^2 f^2 \rho (1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu}$$
3. コンクリートの比誘電率は 4~12 程度の値であり、コンクリート中に鉄筋がある場合、鉄筋の比誘電率が ∞ であることから、コンクリートと鉄筋の境界面で電磁波の強い反射が生じるため。
4. コンクリート中に空隙などの欠陥が存在する部分は、健全部と比べて熱伝導率等を含めた熱的な性質が異なることから、日射などにより表面から熱が与えられると内部の温度勾配に違いが生じ、結果的に表面温度に差が生じるため、表面温度分布から欠陥検出が可能となる。
5. 腐食が進行中の鉄筋においてアノード部は負に帯電するため、自然電位が負の方向に向かう点に着目することによって、電位の大きさの分布状況から鉄筋の腐食の可能性を把握することができる。