

複合材料としてのコンクリートの特性 (内的複合)

日本セメント(株)研究所 正会員 山 崎 寛 司

1. 話題提供の主旨

構造材料としてのコンクリートは、他の材料にみられないすぐれた特性をもっているため、きわめて広い範囲に利用されているが、科学技術の進歩と利用面の拡大とによって、さらに在来みられなかった高度の性能が要望され、強度その他の力学的特性の大巾な改善向上はもちろん、耐久性、耐食性、耐熱性、等の向上や軽量化などが切実な要求として提起されている。

このような高度の要求を充足させ、それぞれの利用目的に適合させる方法を見出すためには、主として経験の累積により組み立てられた在来のコンクリート工学の域を脱し、コンクリートの組織構造を基礎的に解明し、組織構造とコンクリートの挙動との関係を明らかにしたうえで、その基礎に立脚してコンクリートの性能の改善を進める必要があると考えられる。

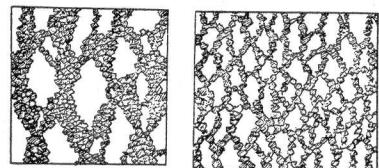
コンクリートは巨視的にみれば骨格素材である骨材を結合素材であるセメントペーストで結合した複合材料とみることができる。別の見方をすれば、 cm オーダーの粗骨材粒子から $\text{\AA}$ オーダーのセメント水和物粒子まで含む各種寸法の粒子の集合体であり、その間に水および空気が介在し、各粒子も水も詳細にみればそれぞれの特性が化学的、物理的に著しく相異なるものによって構成されている。

したがって、コンクリートの性状を基礎的に理解するには、これを構成している構成成分のそれぞれの性状を解明するとともに、成分相互の複合機構を明らかにして、総合的にコンクリートの特性を明らかにする必要がある。しかし、現在までのところでは、セメントペーストにおける微細構造とその化学的・物理的性質との関係がやや詳細に解明されつつある段階で、結合素材であるペーストの分野でもまだ解明すべき多くの問題が残されているほか、各構成成分の複合機構や複合材料としてのコンクリートの特性や挙動に関する研究などは、ほとんどその緒についたばかりと考えられる。そのために高分子の利用など他の材料との高度の複合を考える場合に、いつまでも経験を主体とする思考錯誤的研究が進められているようにも考えられる。コンクリート工学の進歩とコンクリートの利用面の拡大のためには、材料としてのコンクリートの基礎的な面の研究が是非必要であると考えられる。

以下、主としてコンクリート構成成分のうち、セメントペーストに関する知識の一端を述べて、今後の複合材料としてのコンクリートの研究の必要性を指摘してみたい。

2. セメントペーストの構成成分

- a) 水および水和物 ポルトランドセメントの水和は、ほぼ図-2のように説明されている。練り混ぜた直後のセメントペーストは、薄い水和物の被膜に覆われたクリンカ粒子が相互に接合して図-1のように羽毛状構造をなしている。水和は、クリンカの成分により solid state reaction と through solution reaction とが併



(a)練り混ぜ不十分な場合 (b)よく練り混ぜられた場合

図-1 ペースト中の粒子のプロキュレーションの状態

行して進行するが、クリンカ成分の主体をなすけい酸石灰の水和は前者であるとみられ、水和物の多くはセメント粒子周辺に漸次析出する。羽毛状構造の間隙にあるかなり大きな水隙には、through solution reaction によってできた水酸化カルシウムや、エトリンガイトの結晶が析出するが、完全に水和物で埋められずに毛細管として残るものがかなり

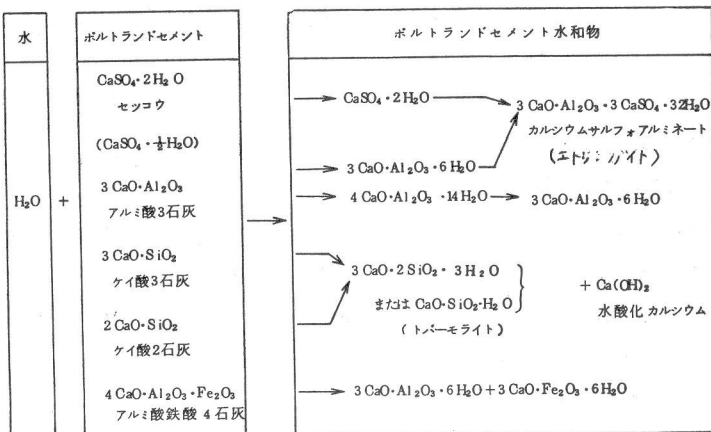


図-2 ポルトランドセメントの水和の説明図

ある。ある材令におけるセメントペーストの内部構造を、T. C. Powers は図-3のように示している。

図-3において、Cは毛細管間隙を示し、C以外の部分は、未水和のセメントおよびセメント水和物から成っている。

水和物は、 10μ 以下程度の水酸化カルシウムの板状結晶、エトリンガイトの針状結晶から、 $100 \sim 1000\text{\AA}$ 程度のきわめて微細なトパーモライトを主体とする粒子(ゲル)から成る。ゲル部分の構成は、その成分により箔状、葉巻状、板状、針状など、多様の化学的特性と形状をもつ微細粒子の集合である。

b) ゲル水 セメント水和物は、このようにきわめて多様な形状および寸法をもつ微細粒子の集合体であるが、微細であるためにきわめて大きな表面積をもち、そのオーダーは $2 \sim 3 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{g}$ におよぶ。

このように膨大な比表面積をもつゲルは、表面力によって、その表面に水分子を強く吸着し、吸着された水分子は自由に流動する水とは全く別の、ほとんど固

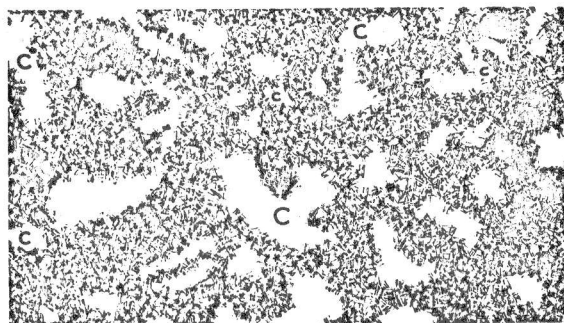


図-3 硬化したセメントペーストの構造モデル (T. C. Powers) (Cは毛細管水隙)

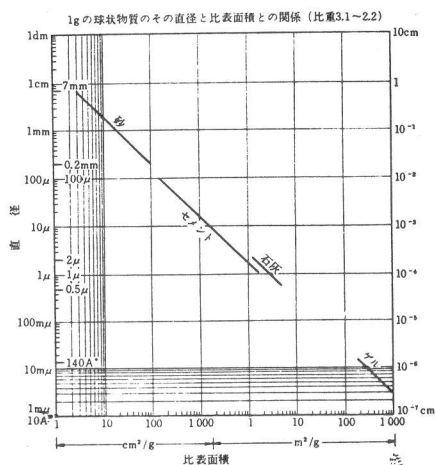


図-4 モルタル成分の粒子径と比表面積との関係

体に近い性状を示す。このような水はゲル水と呼ばれる。セメント水和物の硬化は、結晶またはゲル粒子相互の化学的結合、粒子相互のからみ合いなどによる機械的結合も大きな寄与をしているのであるが、現在のところ、硬化力の主体はゲル水の吸着およびゲル水相互の結合によるものと考えられている。

c) 自由水（毛細管水） ゲル水以外で硬化ペースト内部の毛細管を埋め、内部において比較的自由に流動する水が自由水である。自由水は水酸化カルシウムおよびアルカリ等が溶出して飽和状態となっており、その pH は 14 に近い。内部を自由に流動するから外力にたいしてはほとんど抵抗を示さないが、乾燥過程において毛細管張力を管壁におよぼし、乾燥収縮の生ずる原因をつくると考えられている。また、凍結融解作用にたいしては、毛細管水が非常に大きな関係をもっている。

d) ポアー ゲル水および自由水によって満たされている硬化ペースト内部のポアの寸法分布が硬化ペーストの性状ときわめて密接な関係をもつことが指摘され、水銀圧入、窒素吸着、水蒸気吸着、シクロヘキサン吸着、などによる測定方法の進歩と相まって、活潑な研究が展開されている。

乾燥収縮、クリープ、その他の力学的性状とポアとの関係も逐次明らかにされるものと考えられる。

水銀圧入方法によるポアの寸法分布試験の一例は図-5 のようである。

e) 空気ほうねりまぜのさいにペースト部分に導入されるエントレインドエアまたはエントラップトエアは、ペーストのコンシステンシーや硬化後の耐久性にきわめて密接な関係をもっている。空気泡の大きさは毛細管より上のオーダーで、(5 ~ 500 μ 程度)、その寸法分布はペースト性状と密接な関係をもつ。また、外力によるペーストの変形や破壊を取扱う上で、気ほう周辺の応力集中は、問題としてとりあげられ、研究が始められている。

f) 材令および外的条件によるペーストの内部変化 以上述べた構成成分は、セメントペーストの水セメント比および材令によって変化する。その状態を Rüsch は図-6 のような形で示している。

また、セメントペーストは、空气中に放置されると炭酸ガスと接触して炭酸化し、水酸化カルシウムが炭酸カルシウムに変化するばかりでなく、他の水和物も化学変化をおこすことが明らか

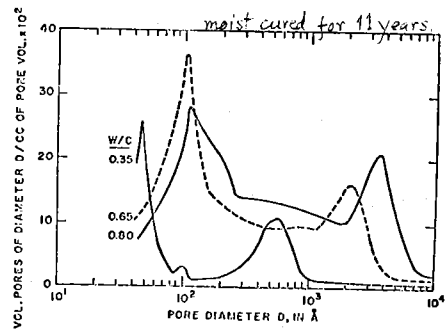


図-5 水銀圧入ポロシメータによるセメントペースト内部のポアの寸法分布試験の例 (Verbeck)

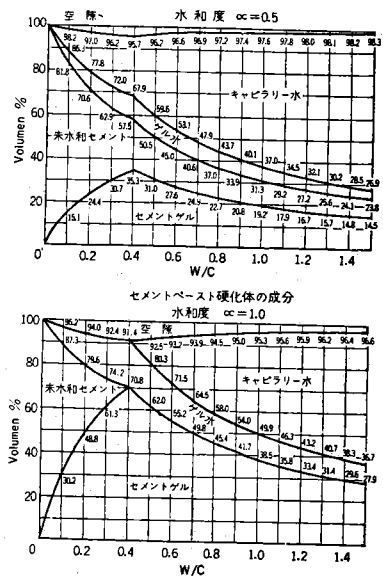


図-6 種々の W/C によるセメント硬化体中の個々の成分の容積% (Rüsch)

にされ、したがって、力学的性状のみでなく、乾燥収縮、体積変化、耐久性、などの面でも炭酸塩のままと異なった状況を示すことが認められている。そのほか、乾湿による挙動、外力により生ずる内部微細ひびわれ、微細ひびわれの自癒、など、経過条件による内部構造変化とそれが各種性状に及ぼす影響については、多くの研究があるが、さらに研究を進める必要のある問題が多い。

3 混和材料とその作用

コンクリートには、A E 剤、減水剤、促進剤、遅延剤、など多くの種類の混和剤および、ボゾランなどの混和剤が使用される。これらの作用および効果については、それぞれの分野で多くの研究がなされ多くの問題点が解明されつつある。しかし、例えば A E 剤においては、気ほうの寸法分布と耐久性との関係はかなりの程度明らかにされたが、気ほうがペーストと骨材との付着に及ぼす影響とか、外力を受けた場合の気ほう周辺の応力集中、などは今後の研究にまたねばならないと考えられる。また、フライアッシュを中心として、鉱物質微粉末を用いた場合について、筆者は微粉末作用とボゾラン作用とを区分し、ボゾラン反応によるボゾランとセメント水和物との複合作用につき推論を提出したが、高炉スラグその他の鉱物質粉末利用の面でも、さらに研究が重ねられる必要があると考えられる。

高分子材料をコンクリートと複合させる研究は最近のものではないが、今日迄多くの研究がありながら十分な実用化に至らなかったのは、それらの研究の多くが try and error の繰返しで、複合材料として各素材の基礎的理解が十分でなかったことによるものと考えられる。これら各種混和材料の有効利用および新しい混和素材の開発のためにも、各素材の基礎性質の研究と、それら相互の複合作用の研究が是非必要となると考えられる。

4 骨材および骨材とペーストとの接合

骨材を構成する母岩の基礎性状は、在来鉱物学、岩石学、などの分野で取扱われてきた。骨材を構成する母岩の性状は、その内部構造、力学的性質、熱的性質、などが非常に広範囲にわたり、特定の物理化学的性状をもつもの以外には、その基礎性状をコンクリートの性状と関連して論じたものは比較的少ない。大部分の骨材に関する研究は、その粒度、形状、表面状態、などとコンクリートの配合や強度との関係、骨材に含まれる不純物の影響、耐火性、などの面から、実用的な実験の積み重ねとしてなされてきたように考えられる。しかし、骨材の力学特性はじめその基本性状は、コンクリートの載荷時の変形、応力集中、微細ひびわれの発達、破壊現象、などと密接な関係をもつもので、コンクリートにおけるペーストとの複合特性を解明する上で、さらに検討を要する多くの問題がある。

骨材とセメントペーストとの付着の機構には、化学結合、分子間引力による結合、機械的結合、などが考えられるが、スラグや石灰石などの特定の骨材以外は、表面が粗であるほど付着が良いことから、主体は機械的結合であると考えられている。微小硬度計、表面粗度計、顕微鏡、などを利用した付着の研究も散見されるが、骨材とペーストとの接合の機構は今後の研究にまっところが多いと考えられる。

5 複合材料としてのコンクリートの性状

以上述べたように、コンクリート内部の構成分は、その形状寸法はもちろん、物理的・化学的特性

の著しく異なる物質より成っていて、個々の性状についてある程度明らかにされつつある面も多いが、それらを総合した複合の機構や複合体としての性状については、まだ明らかにされていない点が多い。

内部構造にしても、以上述べたほかに、ブリージングによってできる水道、骨材下面の水隙、分離によっておこる各部性状の差異、なども力学的挙動や熱的挙動、耐久性や経時変化と関連して重要な問題であろう。

複合材料として各種構成成分をスプリングやダッシュポットなどの力学的構造模型におきかえて取扱った多くの研究があるが、これらも構成成分の基礎性状とその複合機構が明らかにになればさらに進むことが考えられる。

載荷時の内部応力集中による載荷初期からの微細ひびわれの発生、微細ひびわれと変形および破壊の機構などの研究も進められつつある。この方面からの研究の進展も期待される。

高分子材料はじめ他材料との複合によるコンクリートの性状改善が最近の話題となっており、このような各種材料との複合において、コンクリートの一段の進歩が期待されるものと考えられ、そのためにも微視的構造の研究をはじめとする各方面の研究を総合した基礎研究の推進が望まれる。