

PCの新しい材料

入門講座

No.1

最近のコンクリート材料の発展

講師：松岡 康訓*

1. はじめに

コンクリートの歴史を考えると、いつも思い出すのはイタリアや南フランスなどの地中海に面した国々に今も存在している多くの歴史的建造物です。過日、ヨーロッパの古代コンクリートを調査した際、有名なローマのパンテオンを視察する機会を得ましたが、軽量コンクリートで造られている大ドームを支えるのに必要な強度をコンピュータ

で計算した結果、約20N/mm²の圧縮強度が必要であるとの解説を今でも鮮烈に記憶しています。ローマ時代に造られた軽量コンクリートが2000年の時を経て今もお20N/mm²以上の強度を有しているのです。古代の人々のもの造りのレベルの高いことに感動するとともに、歴史から学ぶべきことが多いことを痛感した次第です。

さて、鉄筋コンクリートがフランス人モニュエによって発明されて約130年が経過しましたが、AE剤の発明に始まる

表-1 コンクリート材料の歴史年表

| 年代 | 混和剤 | 混和材またはその他の材料 |
|-------------|--|--|
| 1824 | | ポルトランドセメントの発明 |
| 1867 | | 1862 高炉セメントドイツで発明 鉄筋コンクリートの発明 |
| | | 1910 わが国で高炉セメント製造 |
| 1930 ~40 | 米国でAE剤、減水剤実用化 | 1940 米国でフライアッシュをダムに大量使用 |
| 1948 | AE剤米国より導入 | |
| 1950 | 減水剤米国より導入 | 1950 わが国でフライアッシュの研究活発化 |
| 1953 | AEコンクリートがレディーミクストコンクリート工場より出荷 リグニン系減水剤国産化 JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」制定 | ~60 須田貝ダムで本格使用 |
| 1960 | メラミン系高性能減水剤ドイツで開発 | 1958 JIS A 6201「フライアッシュ」制定 |
| 1963 | わが国でナフタレン系高性能減水剤開発 | 1960 JIS R 5213「フライアッシュセメント」制定 |
| | | 1963 米国で鋼繊維の特許公開 |
| | | 1966 わが国で膨張材開発 |
| 1971 | ドイツで流動化コンクリート使用 | 1970 北欧でシリカフェュームの研究始まる |
| 1974 | ドイツで流動化コンクリートの指針作成 | 年代 鋼繊維・耐アルカリガラス繊維実用化 |
| 1975 | わが国で建築工事に流動化コンクリートを使用 | 炭素繊維の研究開始 |
| 1980 年代 | 高性能AE減水剤市販 | 1980 炭素繊維実用化 |
| 1981 | 水中不分離性混和剤ドイツから導入 収縮低減剤開発 | 年代 LNG地下タンク混合セメントによる低発熱化 明石海峡大橋建設用超低発熱セメント開発 |
| 1982 | JIS A 6204「コンクリート用化学混和剤」制定 | 高ビーライト系セメントの研究始まる JIS A 6202「コンクリート用膨張材」制定 |
| | | 1983 産業副産物のコンクリートへの利用に関する国際会議 →わが国でシリカフェュームの研究始まる |
| 1989 | 高流動コンクリート用増粘剤開発 | 1987 わが国でアラミド繊維の生産開始 |
| 1995 | 高性能AE減水剤 JIS A 6204に規定 | 1995 JIS A 6206「コンクリート用高炉スラグ微粉末」制定 |
| | | 1997 低熱ポルトランドセメント JIS R 5210に規定 |

* Yasunori MATSUOKA：大成建設(株) 技術研究所 土木研究部長

近代コンクリートの幕開けは半世紀前に遡ります。水、セメント、骨材中心のコンクリート材料分野では、この50年の間に多くの画期的な新材料・新技術が多様な要求に応じて次々と開発され、建設技術の高度化・機械化と相まって、かつては夢であったような建造物の構築を実現してきました。その夢の実現にコンクリート工学の果たしてきた役割が大きいことは言うまでもありません。中でも新材料はコンクリートの品質や性能の向上に貢献してきただけでなく、それが契機となり多くの新技術を開発する牽引役を果たしてきました。

本稿では、高強度コンクリートや高流動コンクリートなどの最近のコンクリート材料の新しい発見に焦点を絞り、それらが使われるコンクリートの新技術を具体例として、それらの材料の役割を中心に解説したいと思います。

2. コンクリートの新技術に見る材料の発展

材料としてのコンクリートに要求される主要な性能は、強度、流動性(=施工性)、耐久性の三大要求性能だと言えます。コンクリートに関する技術開発の歴史は、これらの三大要求性能の高度化への挑戦の歴史と言うこともできます。つまり、高性能化への実現を目的としてコンクリート材料は発展を遂げてきたもので、いまだその過程にあると

言えます。

コンクリートの構成材料は、水、セメント、骨材、混和剤および混和材の5種類です。このうちコンクリートの高性能化と切り離すことができない材料は、セメント、混和剤および混和材の3つです。中でも、ここ30年のセメントと混和剤の発展が顕著であり、多くの新材料が出現し、コンクリートの新技術開発に大いに貢献してきました。まさにコンクリートのハイテク化がこれらの新材料の研究開発によって達成されてきたのです。表-1は、これらの材料の発明、研究、実用化の歴史年表です。

コンクリートに要求される3つの性能とコンクリート材料の役割を整理して図-1に示しました。このうちの高耐久化については、ひび割れの抑制、塩害やアルカリ骨材反応の抑制、単位水量の低減や空気の連行など、コンクリートの耐久性向上に有効な材料を例示しました。ここでは、3つの高性能化に共通する最近話題の実用化されている材料を取り上げることとします。

2.1 セメント

成熟域にあったセメント素材の分野でも、ここ数十年LNG地下タンクや本州四国連絡橋等に代表される大型建造物の施工に必要な低発熱セメントの研究開発が活発に行われてきました。その手法は、初期においては高炉セメント

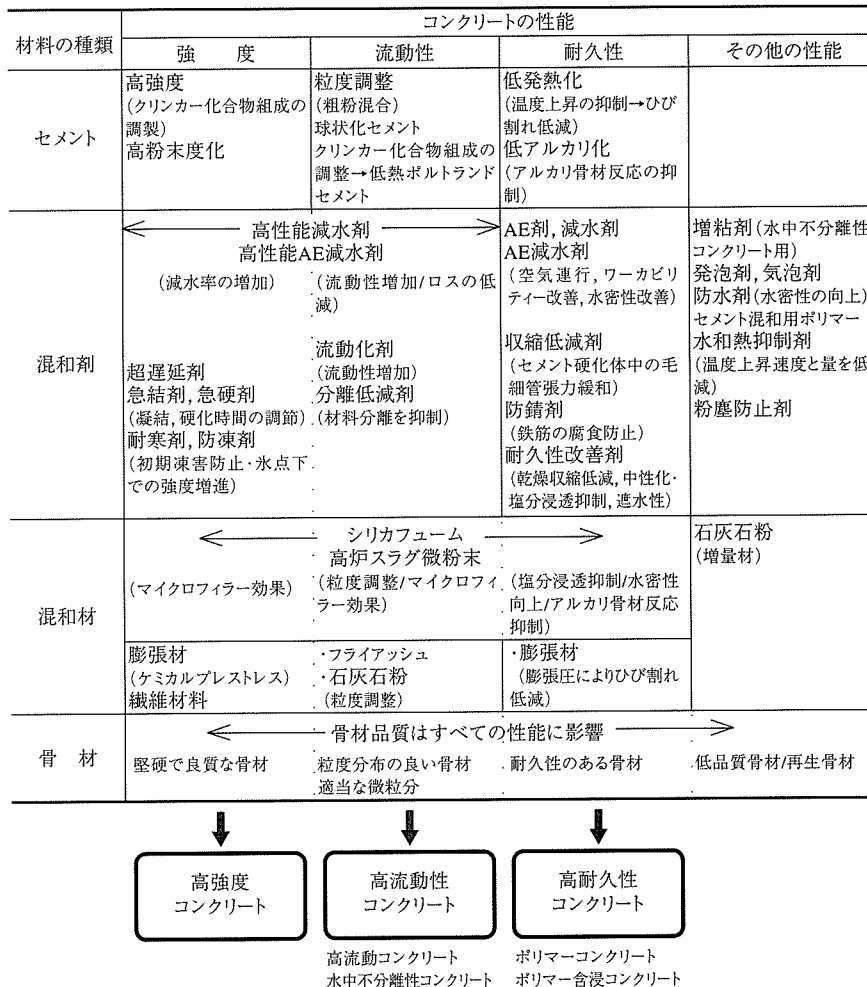


図-1 コンクリートの三大要求性能とコンクリート材料の役割

中の高炉スラグ微粉末の混入量を規定の範囲内で大きくすることでした。たとえば、マスコン型高炉セメントがそれです。引き続き行われたのが、これにフライアッシュを混合して三成分系とすることでした。もちろんこれらの基準セメントは普通ポルトランドセメントでした。その後、明石海峡大橋の工事において、さらに低発熱のマスコンクリート仕様¹⁾が提案され、ポルトランドセメント成分の下限値を15%とした各種の高炉スラグ微粉末高添加の二成分系混合セメントや三成分系混合セメントがセメント各社で開発されました。これらのセメントでは、基準セメントとして中庸熱ポルトランドセメントやさらに水和熱の低い低熱ポルトランドセメントも開発され利用されました。また、ブリーディングや凝結に関する問題を解決するために、高炉スラグ微粉末の高微粉末化や石灰石微粉末の利用も進みました。これらの技術が、後の高強度コンクリートや高流動コンクリートの技術開発に有効に適用されていきました。

ポルトランドセメントには、普通、早強、超早強、中庸熱、低熱、および耐硫酸塩ポルトランドセメントの6種類が規格化されており、エーライト ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)、ビーライト ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)、アルミネート相 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) などのクリンカー化合物の組成を変えることによって、それぞれ特徴のあるセメントが製造されています。このうち、低発熱でかつ高強度あるいは高流動用として最近注目を浴びてきたのが、1997年にJIS化された低熱ポルトランドセメントです。このセメントは、JIS化される前は高ビーライトセメントと言われていたもので、ビーライトの割合を中庸熱ポルトランドセメントよりもさらに大きくしたセメントで、高性能AE減水剤との併用により30%程度以下の低水セメント比(または低水結合材比、低水粉体比)の領域で優れた特性を発揮します。たとえば、

- ① 少ない高性能AE減水剤の使用量で大きな流動性が得られる。
- ② 粘性も小さくなるために製造、運搬、打込みの作業性・施工性が良い。
- ③ 温度上昇が小さい。
- ④ 長期強度の増進が大きい。

などです²⁾。図-2は、高性能AE減水剤の使用量と流動性の関係の一例³⁾ですが、アルミネート相の少ない耐硫酸塩セメントとアルミネート相・エーライトが少なくビーライトの多い(56%)低熱セメントの流動性が良いことが分かります。

そのほかには、セメントの粒度分布の調整も低水セメント比の高強度コンクリートや高流動コンクリートには有効です。表-2は、基準セメント：粗粉セメント(平均粒子径数十 μm)：石灰石微粉末(比表面積1万 cm^2/g 以上)=7：2：1として、それぞれ可能な限り水粉体比を小さくしたコンクリートの強度試験結果です⁴⁾。図-3に模式的に示すように、セメントよりも細かい粒子と粗い粒子の両方を添加することにより結合材の粒度分布を最密充填に近づけることができ、それによって低水粉体比と高強度を達成しているのです。もちろん、粒度調整は、流動性の向上と粘性の

低下にも有効です。

フライアッシュ混入低熱ポルトランドセメント、フライアッシュセメントB種に粗粉を添加したもの、および三成分系混合セメントの3種類のセメントを使用した設計基準強度60N/mm²のコンクリートの断熱温度上昇の測定結果を図-4に示します。流動性や充填性を考慮して配合を決定しているため配合条件は同一ではありませんが、従来の二成分系および三成分系の混合セメントに比べてフライアッシュを9%置換した低熱ポルトランドセメントの温度上昇および発

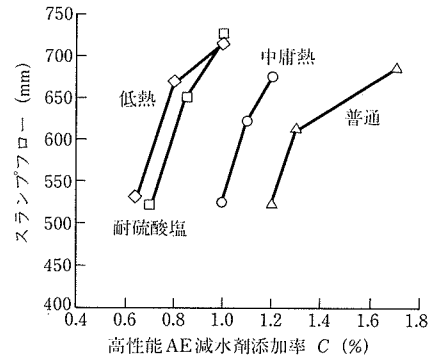


図-2 各種ポルトランドセメントのスランプフローと高性能AE減水剤量との関係

・単位セメント量:570kg/m³
 ・水セメント比 :30%
 ・高性能AE減水剤:ポリカルボン酸塩系

表-2 各種粒度調整セメントを使用したコンクリートの圧縮強度

| セメントの種別 | 水粉体比 W/P (%) | 圧縮強度 (kgf/cm ²) | | |
|---------|--------------|-----------------------------|-------|-------|
| | | 7日 | 28日 | 91日 |
| 普通 | 19.0 | 867 | 1 055 | 1 296 |
| 早強 | 20.0 | 907 | 1 064 | 1 261 |
| 中庸熱 | 18.0 | 874 | 1 120 | 1 333 |
| 低熱 | 20.0 | 714 | 1 087 | 1 361 |
| 高炉B種 | 17.0 | 960 | 1 141 | 1 280 |

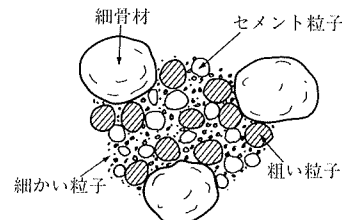


図-3 微粒子のモルタル中での分散状況(最密充填の模式図)

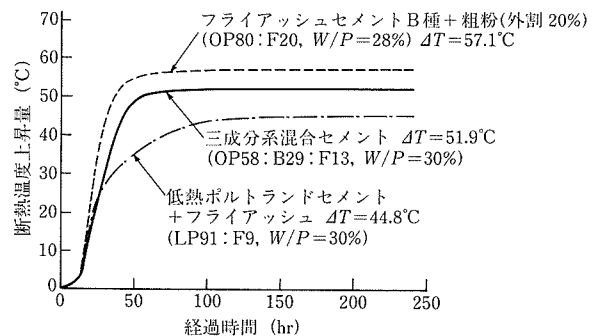


図-4 高強度コンクリートの断熱温度上昇

熱速度が小さいことが分かります。

2.2 混和剤/高性能AE減水剤

AE剤、減水剤がわが国に導入されて約50年が経過していますが、これらの混和剤はコンクリートのワーカビリティの改善、耐凍害性の改善、単位水量や単位セメント量の低減などを目的としてほとんどすべてのコンクリートに使用されています。

高性能減水剤は、通常のAE剤や減水剤よりも高い減水性能を有し、空気連行性や凝結遅延作用がほとんどないため高添加により水セメント比を極めて小さくすることができます。これらの特性によって高強度コンクリートが容易に製造できるようになりました。しかしながら、高性能減水剤による低水セメント比の基本的な問題は、フレッシュコンクリートの粘性の増加とスランプの保持時間が短くなることです。とくに粘性の過度の増大は、コンクリートの製造やトラックミキサーによる運搬、コンクリートポンプやトレミーなどによる打込みを困難にします。そのため、PC部材やコンクリートセグメントなどの工場製品の製造に主に使用されてきました。また、工事現場では遅延剤やスランプロス低減型の流動化剤を併用することで対処してきましたが、必ずしも満足のいくものではありませんでした。それを解決したのが高性能AE減水剤なのです。

高性能AE減水剤は、AE剤、減水剤、高性能減水剤、流動化剤に引き続き1980年代後半に市販されるようになり、1995年にJIS A 6204「コンクリート用化学混和剤」に規格化された混和剤です。この混和剤開発の経緯は、流動化コンクリートの普及に伴い発生してきた、トラックミキサーの現場での高速回転時の騒音や排ガス公害、品質責任等の諸問題の解決と、建築学会JASS 5の改訂において、コンクリートの耐久性向上の観点からコンクリートの単位水量の上限が185kg/m³に規制されたことへの対応です。つまり、生コン工場での流動化コンクリート製造の要望や、細骨材の品質が悪くなってきたためにAE減水剤では185kg/m³の単位水量規制を満足できない地域が出てきたためです。

高性能AE減水剤は、「空気連行性能をもち、AE減水剤よりも高い減水性能および良好なスランプ保持性能をもつ混和剤」と定義されているように、高性能減水剤と同等の高い減水性を有し、かつ高性能減水剤に欠けていた優れたスランプ保持性能を有しています。そのため、一般コンクリートの単位水量低減対策から、高性能・高品質を要求される高強度コンクリートや高流動コンクリートまで広範囲に使用されています。とくに高強度コンクリートや高流動コンクリートの生コン工場での製造・運搬・現場での打込みを容易にしている点は、コンクリートの高性能化にとってなくてはならない材料として一層の発展が期待されています。図-5は、AE減水剤と高性能AE減水剤の使用量と減水率の関係ならびに各種混和剤を用いたコンクリートのスランプの経時変化を比較した概念図です⁵⁾。

高性能AE減水剤は減水成分から、ナフタレン系、メラミン系、ポリカルボン酸系、アミノスルホン酸系の4種に分類され、さらにスランプ保持機能により細分化されています。高性能AE減水剤の減水性能は、AE減水剤や高性能減水

剤などの他の混和剤と同様、次のように説明されています⁶⁾。

- ① セメント粒子表面に吸着して拡散電気二重層を形成し、その静電的反発力による効果
 - ② この静電的反発力に加えて主鎖あるいは側鎖による立体反発力(立体障害作用)の2つの効果
 - ③ 水分子との高い親和性による浸透湿潤作用の効果
- ポリカルボン酸系やアミノスルホン酸系の高性能AE減水剤は②の効果であり、①の効果のナフタレン系やメラミン系の高性能AE減水剤に比べて少量の使用量で同等の減水効果が得られます。

スランプ保持性能に優れた高性能AE減水剤ですが、セメントや細骨材の種類と品質および温度などによってスランプ保持性能やブリーディング特性が異なってきます。そのため、事前にこれらの影響を試験によって確認しておき、最適な高性能AE減水剤の種類と使用量あるいは高性能AE減水剤中に添加しているスランプ保持成分の量などを適切に選定することが重要になります。図-6は高強度・高流動コンクリートにおいて、高性能AE減水剤中のスランプ保持成

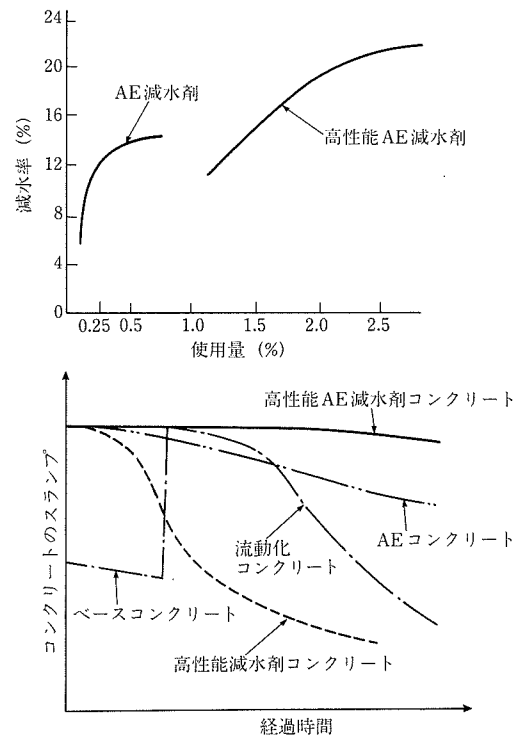


図-5 AE減水剤、高性能減水剤と高性能AE減水剤の違い

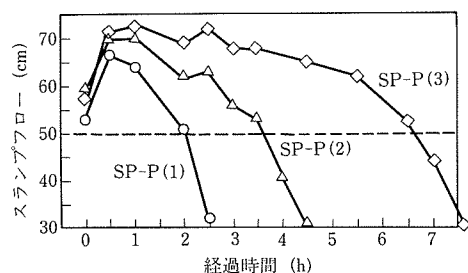


図-6 高性能AE減水剤中の架橋ポリマー量を変化させた場合のスランプフローの経時変化
 $W/C=36.9\%$, $C=420$, 三成分系セメント
 架橋ポリマー量: $SP-P(1) < SP-P(2) < SP-P(3)$

分(架橋ポリマー)の量を増すことによってスランプフローの保持時間を6時間程度まで延長した例です⁷⁾。

高性能AE減水剤を使用したコンクリートの圧縮強度は、その種類によって異なりますので、単位セメント量を有効に低減するためにはこれを適切に選定することも重要です。

2.3 フライアッシュ/シリカフェーム

わが国でフライアッシュの研究が始まって約50年が経過しましたが、良質のフライアッシュはコンクリートのワーカビリティの改善、水密性の改善、温度上昇の低減、単位水量や単位セメント量の低減などの効果があるため、ダムコンクリートをはじめとして多くのマスコンクリートに使用されてきました。最近では、火力発電所の排出ガス規制や海外炭の使用などによりフライアッシュの性質がかなり変化してきているようですが、低発熱セメントや高流動コンクリートなどの新しい用途も増えてきており、品質管理面での対応が重要になってきています。

シリカフェームは、シリコンやフェロシリコンなどのけい素合金を電気炉で製造する際に発生する排出ガス中のダストを回収した超微粉末です。主成分は非晶質のSiO₂で、その含有量が高いものほど反応性は高いと言われています。フライアッシュとの品質およびコンクリートの性能改善効果を比較して表-3に示します。

表-3 フライアッシュとシリカフェームの品質比較

| 項目 | フライアッシュ (JIS A 6201) | シリカフェーム (JSCE-D106-1995) |
|-------------------------|--|--|
| 材料起源 | 石炭火力発電所の微粉炭燃焼ボイラーの燃焼ガスから採取された石灰 | シリコンやフェロシリコンなどのけい素合金を電気炉で製造する際の排ガス中のダストを回収したもの |
| 平均粒径(μm) | 10~20 | 0.1程度 |
| 比表面積(m ² /g) | 3 000~4 000 | 20万程度 |
| 品質規格 | 二酸化けい素の規定値(%) | 45以上 |
| | 密度(g/cm ³) | 1.95 |
| | 活性指数(%) 材齢28日 | 80以上 |
| コンクリートの品質改善効果 | <ul style="list-style-type: none"> 流動性の向上 温度上昇の低減 長期強度の増進 耐久性の向上 (アルカリ骨材反応の抑制) | <ul style="list-style-type: none"> 高強度化 (ボゾラン反応+マイクロファイラー効果) 耐久性の向上 (アルカリ骨材反応の抑制, 塩化物イオンの浸透抑制, 硫酸塩に対する抵抗性大) 高流動化 (高性能AE減水剤との併用により, 塑性粘度の増大, 降伏値の低減) |

わが国でシリカフェームに関する研究が始まったのは1983年にカナダで開催された「産業副産物のコンクリートへの利用に関する国際会議」で公表されたシリカフェームの性能に注目してからですので、歴史的には約15年になります。シリカフェームは電気炉で製造されるため、電力が安く豊富に供給できる北欧、アメリカ、カナダ等で生産されており、わが国ではほとんど生産されていません。したがって、大量に使用する場合には輸入に頼らざるを得ないためコスト的には高価となります。そのため、現在では水結合材比が25%程度以下の場所打ちの高強度コンクリートに、高性能(AE)減水剤と併用することで強度の増進、流動

性の向上、製造・施工性の改善などを目的に使用されています。これらの性能改善効果は、図-7に示すシリカフェームのマイクロファイラー効果によるものと説明されています⁸⁾。図-8は、シリカフェーム混入コンクリートの圧縮強度試験結果の一例ですが、高性能AE減水剤との併用により水結合材比を25%以下とすることができ、100N/mm²を越す強度が得られています⁹⁾。図-9は、設計基準強度60~80N/mm²の高強度コンクリートのポンプ圧送実験の結果¹⁰⁾ですが、シリカフェーム混入コンクリートのポンプ圧送性が極めて良いことがわかります。

2.4 高炉スラグ微粉末

高炉スラグ微粉末は、製鉄所の高炉で鉄鉄をつくる際に

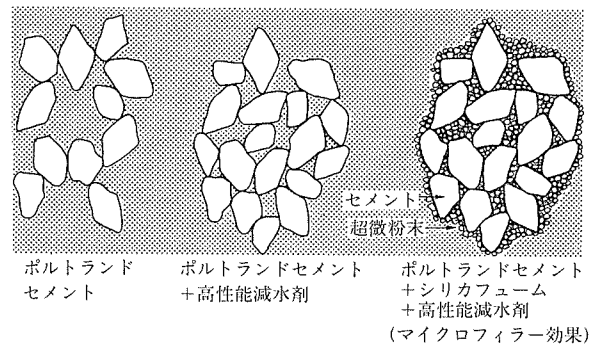


図-7 まだ固まらないコンクリート中のペースト構造

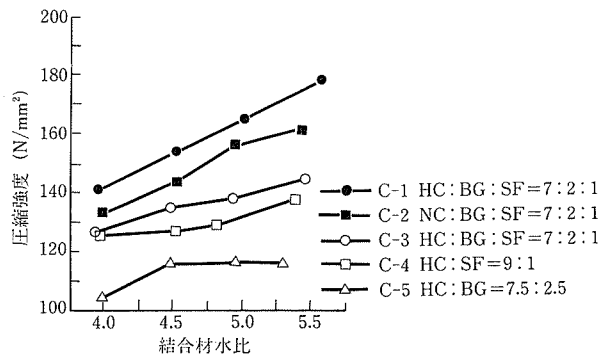


図-8 結合材水比と圧縮強度(材齢91日, 標準養生)
(HC早強ボルト, NC:普通ボルト, BG:スラグ石膏系結合材, SF:シリカフェーム)

結合材(水結合材比 30%)

| HF | 低熱ポルトランドセメント(100) |
|------|---------------------------------------|
| UL+F | 低熱ポルトランドセメント(90), フライアッシュ(10) |
| TC | 普通ボルト(70), スラグ石膏系混和材(20), シリカフェーム(10) |

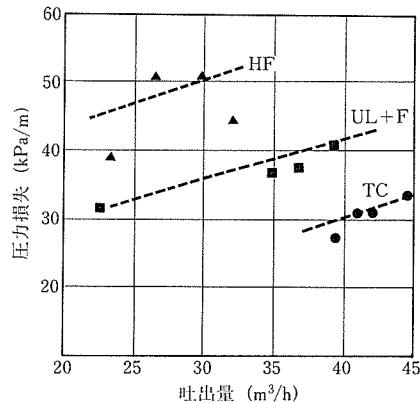


図-9 高所圧送時の吐出量と配管圧力損失の関係

副生する高炉スラグを水で急冷し微粉砕したもので、アルカリ性の雰囲気下でポルトランドセメントと同様の凝結、硬化の反応を示す(これを潜在水硬性という)ことが古くから知られており、各国で高炉セメントの原料や混和材料として130年以上も使用されてきました。主成分は、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO で、塩基度($\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$)が高いほど潜在水硬性は大きく、粉末度が大きいほど反応性は高いと言われています。JIS A 6206「コンクリート用高炉スラグ微粉末」では、塩基度は1.6以上と規定しています。また、粉末度は比表面積の大きさにより4000、6000、8000の3種類に分類しています。

高炉スラグ微粉末のコンクリートの性能改善効果は、ワーカビリティの向上、温度上昇の低減、耐久性の向上(化学抵抗性、耐海水性、耐塩分浸透性、アルカリ骨材反応の抑制)などです。マスコンクリートの温度ひび割れ抑制や耐久性の向上には高炉セメントとして多くの実績があります。中でも高炉スラグ微粉末の混合量を高炉セメントC種の上限の70%を超える75%~85%まで上げた二成分系の低熱セメントリやフライアッシュと併用した三成分系の低熱セメントの温度上昇や温度ひび割れ抑制効果は優れています。最近では、粉末度が $5000\text{cm}^2/\text{g}$ 以上の高炉スラグ微粉末が高性能(AE)減水剤との併用により、水結合材比が30%程度以下の高強度コンクリートや高流動コンクリートに強度の増進、流動性の向上、製造・施工性の改善を目的として用いられるようになってきています¹¹⁾。図-10は、8000スラグを用いた高炉スラグ微粉末混入コンクリートの圧縮強度試験結果¹²⁾の一例ですが、高性能AE減水剤との併用により60~80N/mm²を越す強度が得られています。

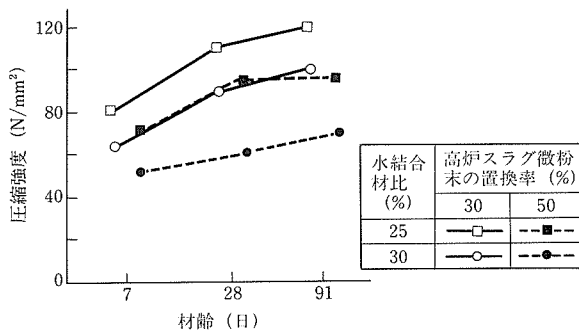


図-10 高炉スラグ微粉末(8000)混入コンクリートの強度発現性

2.5 その他の材料

コンクリートの高性能化のための材料としては、増粘剤(分離低減剤ともいう)、収縮低減剤、膨張材、繊維材料などもあります。

増粘剤は、1980年代初めにドイツから水中不分離性コンクリート用のセルローズ系水溶性高分子がわが国に導入されて以来、関西空港や明石海峡大橋などの大型プロジェクトへの利用を目指して精力的に研究開発が行われ、1991年に土木学会標準「コンクリート用水中不分離性混和剤品質規格(案)」が作成されました。その後、わが国で自己充填型の高流動コンクリートが提案され¹³⁾、従来からのセルローズ系水溶性高分子とは機能の異なる新しいタイプの分離低

減剤が開発されました。これは、一般にバイオポリマーと言われており、フレッシュコンクリートの分離抵抗性を増すとともに品質変動も抑制する効果をもっています¹⁴⁾。

コンクリートの乾燥収縮を抑制するためには、

- ① 単位水量の低減
- ② コンクリート中の水の物理的性質を変える混和剤(収縮低減剤)の使用
- ③ コンクリートを膨張させることによって収縮を補償する混和材(膨張材)の使用

などがあります。収縮低減剤は、わが国において1980年代初頭に開発されており、主成分として低級アルコールアルキレンオキシド付加物やポリエーテルなどがあります。この混和により、セメント硬化体中の毛細管水の表面張力を低下することによってコンクリートの乾燥収縮を低減すると説明されています¹⁵⁾。膨張材は、1960年代にわが国で開発・実用化され約30年の研究・使用実績があり、1980年にはJIS A 6202「コンクリート用膨張材」が制定されています。膨張力は結晶性の膨張性水和物の生成によってもたらされ、その種類によりエトリンサイト系と酸化カルシウム系の2つに分類されます。近年、セメントの水和熱を抑制するとともに温度低下時においても膨張が持続する、水和熱抑制型膨張材がマスコンクリートの温度ひび割れ低減を目的に使用されています。

セメントコンクリートへの繊維材料による補強の研究は、1960年代にガラス繊維や鋼繊維について始まり1970年代に実用化されました。引き続き、炭素繊維、アラミド繊維、ビニロン繊維などによる補強の研究が行われ、種々の繊維補強コンクリートが開発されています¹⁶⁾。繊維の利用方法としては、

- ① 繊維を数mmから数十mmの長さに切断して短繊維とし、コンクリート中に分散させて用いる方法
- ② 鉄筋やPC鋼材と同様にコンクリートを補強する連続繊維補強材として用いる場合

があります。連続繊維補強材の製造には、結合材としてエポキシ樹脂やビニルエステル樹脂などの熱硬化性樹脂が多く用いられています。炭素繊維やアラミド繊維などの新素材繊維は、① 腐食しない、② 軽量である、③ 非磁性である、などの共通の特長を有しているため、これらを生かした利用方法が検討されています。

3. おわりに

コンクリートの先端技術である高強度コンクリートや高流動コンクリートを視野において、コンクリート材料の発展の歴史とその役割について概観してきました。コンクリート材料は成熟の域に達しつつも、他方では現場サイドからの多様なニーズに応じてさらに高度化あるいは新材料の開発が今後も進められていくものと考えます。本講座が、コンクリートの設計施工の第一線で活躍されている読者の皆様にとって実務の一助となれば幸いです。

本稿では多くの文献、資料を参考にさせていただきました。誌面を借りて深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 山田勝彦：超低発熱-海中コンクリート・気中コンクリート，第249回コンクリート講演会，セメント協会，pp.23～34，1990
- 2) 名和豊春：高ビークライト系セメントの現状，コンクリート工学，Vol.34，No12，pp.16～25，1996
- 3) 松永 篤ほか：ポルトランドセメント-石灰石粉系高流動コンクリートの性質，第48回セメント技術大会講演集，pp.218～223，土木学会編：コンクリートライブラリー第74号 高性能AE減水剤を用いたコンクリートの施工指針(案)，1994.3
- 4) 南條毅一ほか：2.2高強度化のための材料-結合材-，コンクリート工学，Vol.32，No 7，pp.18～22，1994
- 5) 日本建築学会編：高性能AE減水剤コンクリートの調合・製造および施工指針(案)・同解説
- 6) 土木学会編：コンクリートライブラリー第74号 高性能AE減水剤を用いたコンクリートの施工指針(案)，1994.3
- 7) 大友 健ほか：低発熱高流動地下連続壁コンクリートの特性に関する研究，大成建設技術研究所，No.26，pp.107～122，1993
- 8) H.H.Bache：Densified Cement/Ultra-Fine Particle Based Materials，presented at the Second International Conference on Superplasticizers in Concrete，Ottawa，Canada，June 1981
- 9) 陣内 浩ほか：超高強度コンクリートによる柱構造体の強度発現性状の検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No1，pp.255～260，1994
- 10) 早川光敬ほか：超高強度コンクリートのポンプ圧送実験(その2 結果および考察)，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)，pp.193～194，1996
- 11) 土木学会編：コンクリートライブラリー第86号 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，1996.6
- 12) 国土開発技術研究センター：建設省総合開発プロジェクト「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」平成4年度 高強度コンクリート分科会報告書，1993.3
- 13) 小沢一雅ほか：ハイパフォーマンスコンクリートの開発，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.11，No.1，1989
- 14) 奈良 潔ほか：コンクリート用分離低減剤 β -1，3グルカン(カードラン)の性質，コンクリート工学論文集，Vol.5，No.1，pp.23～28，1994(Issue9)
- 15) 富田六郎ほか：収縮低減剤を用いたコンクリートの乾燥収縮性状，セメント技術年報，Vol.37，pp.386～389，1983
- 16) 秋濱繁幸：繊維補強コンクリート-新素材繊維を中心に-，鹿島出版会，1992

【1998年8月26日受付】