

# 委員会報告 高強度・高靱性コンクリート利用研究委員会報告

菅野 俊介\*1・野口 貴文\*2・木村 秀樹\*3

**要旨:** 高強度に加えて高耐久, 自己充填, 高靱性などの高機能を付加した高性能コンクリートが用いられるようになってきた。本稿は, 高性能コンクリート技術の現状と課題を明らかにし, 今後の発展・普及を図るために必要な資料を整備することを目的とする本委員会の調査研究の結果を, 自己充填コンクリート, 高耐久コンクリートおよび繊維補強・高靱性コンクリートの観点から紹介する。

**キーワード:** 高性能コンクリート, 高靱性, 自己充填性, 繊維補強, 建築構造物, 土木構造物

## 1. はじめに

近年, 高強度コンクリートに高耐久性, 自己充填性, 高靱性などの高機能を付加した高性能コンクリートが用いられるようになってきた。本委員会ではこの状況に鑑みて, 高性能コンクリートの技術の現状と課題を明らかにし, 今後の発展・普及を図るために必要な資料を整備することを目的とする調査研究を進めてきた。

本稿では自己充填コンクリート, 高耐久コンクリートおよび繊維補強・高靱性コンクリートの観点から活動成果を紹介する。なお, 本年10月に東京で開催される「第8回高強度・高性能コンクリート利用国際シンポジウム」に本活動成果を報告する予定である。

## 2. 高性能コンクリート用材料の技術の現状

### 2.1 高性能コンクリート用セメント

高性能コンクリートは水粉体比が小さく, 流動性の確保が施工性・耐久性の観点から重要となる。優れた流動性を確保するためには,  $C_3A$  量の少ないセメントを使用することが最も重要となる。次に, 硫酸アルカリ量の低減やセッコウの半水化率の制御などが重要となる。高性能コンクリート用セメントとしては, 流動性に加えて, さらに低発熱性が要求される場合も多くあり,  $C_3A$  量や  $C_3S$  量の少ない低発熱ポルトランドセメントや中庸熱セメントが利用される。また, これらは,  $C_3S$  量が少ないため自己収縮が小さくなるという利点もある。100MPaを超えるような高強度コンクリート用セメントとしては, 低熱ポルトランドセメントを基本としてシリカフェームを混和したシリカフェームセメントと, 普通ポルトランドセメントを基本として高炉スラグ微粉末, 無水セッコウおよびシリカフェームを混合したセメントが利用されている。

流動性の観点からは,  $C_3A$  量の少ないセメントが有用であるが,  $C_3A$  量の少ないセメントは, 現在セメント産

業に期待されている「持続可能な社会を形成させるために役に立つ」ということとは矛盾する。セメント産業では, 既に多くの廃棄物や副産物を受け入れ, 2010年に目標としたセメント1t当り400kgを2004年度に既に達成している。今後もより多くの廃棄物の利用が期待されているが, セメント生産量の大幅な増加は期待できない。廃棄物は, 図1に示すように, 普通ポルトランドセメントの化学組成と比較して,  $Al_2O_3$  成分が多いため, セメント製造時における廃棄物利用量をさらに増加させると, セメント中の  $C_3A$  量は増加することとなる。

以上のように, 今後の汎用的なセメントは,  $C_3A$  含有量が多くなる可能性が高いが, 優れた流動性を確保できるセメントとは要求が矛盾していることを理解する必要があり, 社会全体としての議論が必要である。

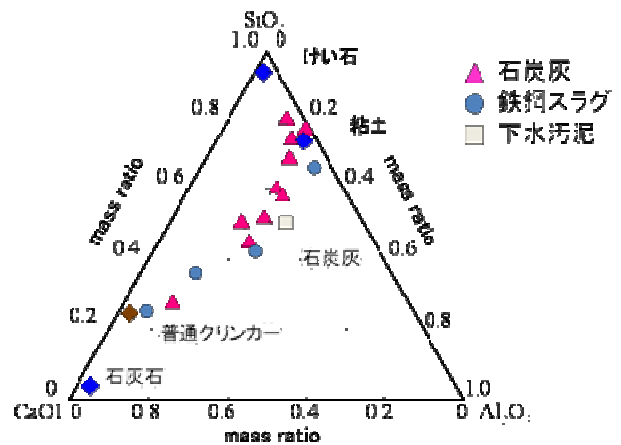


図1 廃棄物の化学組成

### 2.2 高性能コンクリート用混和材

フライアッシュは, アルミノシリケートガラスのポズラン反応により組織を緻密化し, 屈曲度の大きな空隙構造を形成するとともに, 低置換率でもアルカリ骨材反応抑制効果がある。フライアッシュのポズラン反応は, 材

\*1 広島大学 名誉教授 工博 (正会員)

\*2 東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 准教授 工博 (正会員)

\*3 (株) 竹中工務店 技術研究所 建設技術研究部 工博 (正会員)

齢7日程度まではほとんど生じないため、置換率に応じた水和熱抑制効果が顕著に現れる。

このように、フライアッシュは低発熱性や自己収縮低減性の観点から有用であるが、未燃焼カーボン混入量や形態も含めた、流動性に及ぼす品質の変動の影響が大きい点に注意する必要がある。

高炉スラグ微粉末の主成分は  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  ガラスであり、潜在水硬性を有するため、組織を緻密にし、塩化物イオンなどの物質移動を抑制する。また、塩化物イオンや六価クロムなど微量成分の固定に貢献し、アルカリ骨材反応抑制効果、耐塩害性、耐硫酸塩抵抗性などを示す。しかし、高炉スラグ微粉末の反応は、粉末度、塩基度、セッコウの種類・添加量などの影響を受けるため、粉末度などの調整を適正に行わないと、水和熱や自己収縮の影響によりひび割れ抵抗性に劣る結果を招くことなどが指摘されている。

膨張材は、初期にコンクリートを膨張させる性質を有しており、収縮補償用コンクリートやケミカルプレスト用コンクリートに利用されている。膨張材の水和生成物は、微細な空隙が多く含み、水和収縮することなく膨張が生じるため、拘束条件下では硬化体中の大きな空隙を減少させ緻密化させる。

シリカフェームは、ポゾラン反応と充填効果により、コンクリートの高強度化や高耐久化に利用される。超微粒子であるため、高性能 AE 減水剤を併用する 경우가多く、低水粉体比でのポンプ圧送性などの向上に寄与する。しかし、低水粉体比でシリカフェームを混和したコンクリートは、自己収縮やプラスチック収縮などが大きいことに注意が必要である。

石灰石微粉末は、他の無機質混和材に比べて粒子形状が良好であるため、同一の流動性を得るための高性能 AE 減水剤の添加量を減少させることができる。また、アルミネート相と反応してモノカーボネートなどを生成するが、長期強度発現性などには寄与しないため、不活性の無機粉体として材料分離抵抗性やワーカビリティ改善を目的として高流動コンクリートや高品質吹き付けコンクリートなどに実用されている。

### 2.3 高性能コンクリート用化学混和剤

図2に高性能 AE 減水剤の主成分別の製品数の推移を示す。高性能 AE 減水剤が使用され始めた1990年頃ではナフタレン系が最も多く全体の半数以上を占めていたが、1995年頃からポリカルボン酸系がナフタレン系に代わって最も多くなり、2006年では85%以上を占めるようになった。製品数に関しては、1998年の62品目を最高に減少傾向にあり、ポリカルボン酸系に高性能 AE 減水剤全体が集約されている傾向がうかがえる。ポリカルボン

酸系が主流になった要因としては、高い分散性を有していること以外に、凝結遅延・粘性増大などの悪影響を生じさせにくい点が挙げられるが、他の分散剤成分に比へ分子設計が容易に出来るため、減水性やスランプ保持性の向上や新機能の付与など、新機能・高機能分散剤の開発が可能である点も、大きな要因の一つと考えられる。最近、超高強度コンクリートの問題点の一つである自己収縮の低減用に収縮低減効果を付与した高性能 AE 減水剤も開発されている。

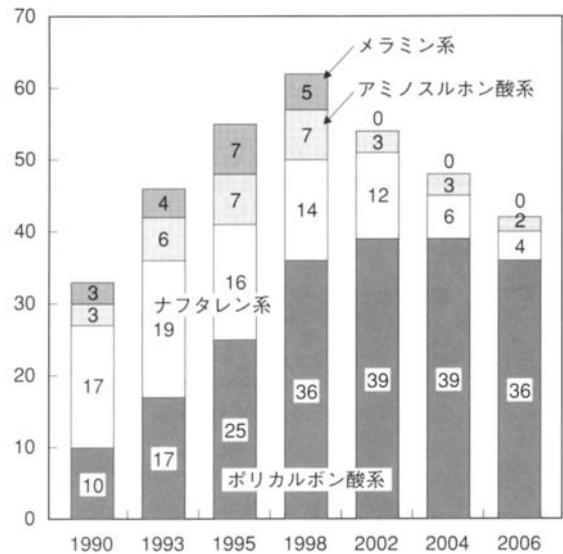


図2 高性能 AE 減水剤の製品数の推移

大部分の収縮低減剤は、低級アルコールアルキレングリコールエーテルに分類されるものであり、乾燥収縮のメカニズムの一つとして提唱されている毛細管張力機構に基づき、硬化体中の間隙水の表面張力を低減することにより、乾燥収縮を低減している。

増粘剤には、メチルセルロース系の他に、 $\beta$ -1,3 グルカン、ウェランガムなどのバイオポリマー系、グリコール系、ポリアクリルアミド系、ポリグルタミン酸系などがあり、それぞれ増粘に対する特性は異なるが、いずれもコンクリートに材料分離低減性を付与する。

### 3. 自己充填コンクリートの技術の現状

1988年に日本で開発された自己充填コンクリートは、当時は特殊なコンクリートとして扱われていたが、様々な技術開発がなされた結果、最近是一般コンクリートとして利用されるようになってきている。

自己充填コンクリートの配(調)合設計手法として、図3に示すようなスランプフロー試験と漏斗流下試験に基づき水粉体比と高性能 AE 減水剤添加量を決定する方法が提案された。また、自己充填コンクリートの自己充填性を建設現場において全量検査可能な方法が開発され、

実用に供された。この方法は、図4に示すように、建設現場でコンクリートの荷下ろし時に、運搬車とポンプ車との間に設置した間隙通過試験装置を通過させることによってコンクリートの自己充填性を検査しようとするものである。

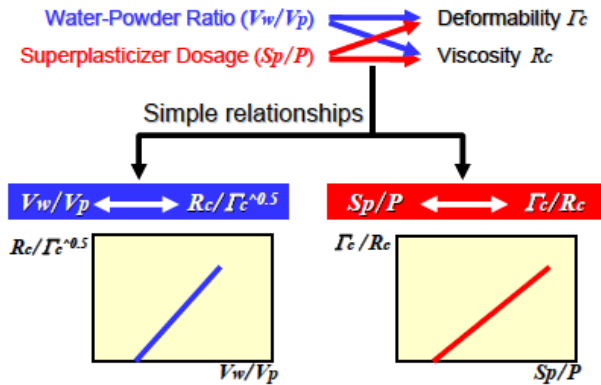


図3 水粉体比・高性能 AE 減水剤量の合理的決定方法



図4 自己充填性の全量試験装置

自己充填コンクリートを利用することのインセンティブは、(1) 大規模構造物の工期短縮、(2) 振動機を挿入できない過密配筋部分（図5）へのコンクリートの充填性確保、(3) コンクリート製品製造における振動騒音の低減、(4) 施工欠陥の抑制による高耐久化であり、様々なコンクリート構造物に自己充填コンクリートは適用されてきている。

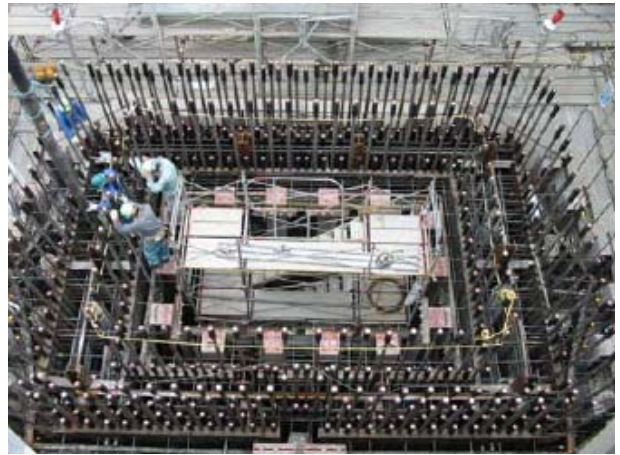


図5 橋脚の過密配筋部分

#### 4. 高耐久コンクリートの技術の現状

コンクリート構造物の劣化は、中性化・塩化物イオンの浸透による鉄筋の腐食、酸・硫酸塩によるコンクリートの浸食、凍結融解作用によるコンクリートの脆弱化などによって生じ、コンクリートを取り巻く自然環境には多岐に渡る劣化作用が存在する。紙面の都合上、中性化、塩害、凍結融解作用などに対して高い抵抗性を有するコンクリートについては、割愛させていただき、ここでは、コンクリートに耐酸性を付与する技術（図6）について紹介する。

##### ①抗菌コンクリート

コンクリートに抗菌剤（ニッケル、銅等の金属）を混練し、硫酸を生成する元となる細菌を生息させない方法である。

##### ②ポゾラン系耐酸セメント

ポゾラン反応を利用して、硫酸侵食を促進させる二水石膏生成のもととなる水酸化カルシウムの生成を少なくして、耐酸性を高める方法である。

##### ③石灰石微粉末添加型耐酸コンクリート

硫酸と反応する石灰石微粉末を添加するとともに、ナフタリン系の化学混和剤を添加することで、硫酸に接するコンクリートの表面に緻密な石こう層を形成させ、硫酸イオンの浸入を抑制する方法である。



図6 普通コンクリート(左)と耐酸性コンクリート(右)

#### ④アルカリスラグ固化体

下水汚泥溶融スラグ微粉末とアルカリ珪酸塩を基調とする結合材に、施工性の改善を目的としてペントナイトや、吸水性ポリマーを添加したアルカリスラグ固化体である。

#### ⑤硫黄固化体

硫黄、鉄鋼スラグ、石灰などを構成材料としたコンクリート状の建設材料で、熱を加えると溶融し冷却すると固化する。

### 5. 高靱性セメント複合材料(ECC)の技術の現状

ECC は引張応力下でひずみ硬化を示すという、従来のセメントコンクリートには見られない大変ユニークな性能を持っている。この性能によって、ひび割れ幅が微細に抑えられ、大きな引張変形とじん性を示すようになる。これまでの常識を覆すこのセメント系複合材料については土木学会から 2007 年 3 月に「複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案)」が出版されている。

#### 5.1 土木分野における ECC の適用例

土木構造物における ECC の適用例としては、①橋梁の道路鋼床版の上面に ECC を打設することによって、鋼床版の剛性を向上させ、疲労耐久性を確保している例、②重力式コンクリートダムの上流側の嵩上げリニューアル工事における吹き付け ECC の適用例、③アルカリ骨材反応によるひび割れが生じた重力式コンクリート擁壁に対する ECC 吹き付けによる表面補修例、④鉄道高架橋の曲げひび割れ部中性化抑止対策工への吹き付け ECC 工法の適用例、および⑤変状トンネルの補強対策として鋼材と吹き付け施工型の ECC を用いた内巻補強工法の例などがある。

#### 5.2 建築分野における ECC の適用例

建築構造物への適用例としては、立体耐震壁(コア壁)を用いた高層集合住宅において、コア壁間の連結梁にエネルギー吸収性能に秀でた ECC を使用し、地震のエネルギーを吸収させる架構とした例がある。この例では構造部材としての ECC 梁の各種構造性能を確認するために実験を行っている。建築分野における適用例は土木分野に比べると多くはないが、適用に向けた研究は多く、ECC を用いた柱、梁、耐震壁、制震構造に関する研究、SRC 構造で鉄筋を省略したコンクリート-鋼合成構造(CES 構造)に ECC を用いる研究などがある。

### 6. 超高強度繊維補強コンクリート(UFC)の技術の現状

UFC は  $150\text{N/mm}^2$  を超える圧縮強度と共に  $10\text{N/mm}^2$  を超える高い引張強度を有する高靱性、高耐久の画期的なコンクリートである。このため、UFC を構造物に適用すると断面を飛躍的に縮小でき、構造物の軽量化や高耐久化を容易に達成することができる。UFC については土木学会から 2004 年 9 月に「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」が出版されている。

#### 6.1 土木分野における UFC の適用例

$150\text{N/mm}^2$  を超える圧縮強度と高耐久性という優れた性能を有する UFC の適用により、①薄い部材厚、②軽量化、③低い桁高、④鉄筋を一切使用しないプレストレス構造等の特徴を有する部材が可能となるため、40~70m スパンの橋梁やスパン 20m 以上の梁部材への適用が可能であり、鋼構造領域への PC 構造物の適用拡大が期待される。カナダや韓国で歩道橋に用いられているほかに、耐久性の点からフランスの原子力発電設備の梁に、また形状の自由性によりパリ市内のモニュメントなどに用いられている。

わが国における適用例として UFC を用いた歩道橋や道路橋の主桁等がある。UFC 適用のメリットとして①架設桁数の減少、②クレーンの小型化、③ライフサイクルコストの低減、④下部工規模の縮小、⑤基礎工事費の低減、などが挙げられる。また、高い耐塩害性が要求される沿岸部において構造物の耐久性向上のために土木用埋設型枠に用いた例もある。

#### 6.2 建築分野における UFC の適用例

建築構造物における適用例としては、UFC で作成したブロックの組積を行い、これを既存躯体と一体化して耐震壁として用いている例がある。また、構造部材としてではなく、ウッドデッキと同一形状の UFC 製デッキ、板の薄さを生かした庇、ルーバーなどへの適用も行なわれている。また、土木学会の超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)に対応する UFC ではなく、粗骨材を有する  $150\text{N/mm}^2$  クラスのコンクリートに鋼繊維を混入し、超高層 RC 集合住宅の柱に使用した例もある。この例では、地震時におけるかぶりコンクリートの早期剥落の防止、ひび割れ分散による損傷の低減、耐火性能の向上、構造性能の向上等がメリットとしてあげられている。

UFC を用いた柱、梁、壁、制震デバイスの実験的研究が行なわれているが、建物の柱、はり、壁等の主構造に UFC を用いた実施例はまだ報告されていない。