

進化するコンクリート

Concrete Innovation

米澤 敏男*1

梗概

コンクリートは、この20年位の間には20N/mm²程度の設計基準強度の時代から150N/mm²の超高強度・超高性能コンクリートが実用化される時代へと進化し技術革新が大きく進んだ。この間、当社技術研究所の材料部門では高強度化の他に環境、生産性および高品質という四つの技術分野を基軸に据えた研究開発を進め、業界と学会の先陣を駆け抜けてきた。当社におけるこれら四つの技術分野におけるコンクリートの研究開発を振り返り進化するコンクリートの全体像を紹介する。

キーワード：超高強度コンクリート、緑化コンクリート、高品質再生骨材、超高耐久性コンクリート、高流動コンクリート、低収縮コンクリート

Summary

Innovation of concrete technology has developed substantially during the couple of decades; concrete strength, for example, has increased up to 150N/mm² from 20Nmm². Takenaka R&D Institute has, as a front runner, kept research and development activities in the four major fields of high strength, environment, productivity and high-quality. In this paper outline of the research and development activities in the four fields are briefly introduced.

Keywords: super high-strength concrete, green concrete, high quality recycled aggregate, super durable concrete, high flow concrete, low drying shrinkage concrete

1 はじめに

コンクリートは建築物や土木構造物といった社会資本の構造体を形成する基幹材料である。水との反応（水和反応）によって硬化するセメントをバインダーとして砂利や砂を固めたシンプルな複合材料である。ローテクの代表のようなイメージがあるが、社会資本として空間を創出するのみならず、資源、廃棄物、エネルギー・CO₂等の面で社会に対して大きな影響を有している。例えば、コンクリートに使用される骨材は、我が国全体のマテリアルフローの約40%、解体コンクリートの量は全産業廃棄物の10%弱、セメントの製造によって排出されるCO₂は1トン当たり750kg（エネルギー=300kg、原料=450kg）であり、我が国全体のCO₂排出量の約4%に相当する。コンクリートの使われ方やコンクリート技術が社会に対して大きな影響を有する所以である。

Fig.1は、建築物に使用されるコンクリートの設計基準強度の最大値の経年変化を示したものである。20世紀の最後の10年と21世紀に入った10年弱、合計約20年程度の間には飛躍的に強度が高くなっていることがわかる。40N/mm²程度の高強度コンクリートから始まり、100~200N/mm²の超高強度コンクリートに至ったコンクリートの技術革新に支えられた超高層集合住宅の普及によるものであるのは言うまでもない。100年スケールで見れば、最近約20年というごく短期間の中にコンクリートの技術革命と呼んでもよい急速な進歩があったのである。この間、コンクリートは強度を高めたのみならず、環境問題、品質問題や少子高齢化等、大きく動いた社会変化に対応して技術革新を行い進化を続けてきた。

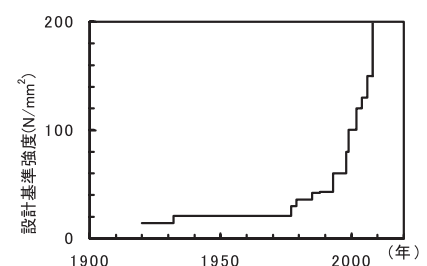


Fig.1 コンクリートの設計基準強度の変遷（1970年代までは基準ベース、それ以降は実績ベース）
Transition of specified design strength of concrete

*1 技術研究所 リサーチフェロー

すなわち、当社技術研究所の材料部門では高強度化の他に環境、生産性および高品質という四つの技術分野を基軸に据えた研究開発を進めてきたのである。

筆者は、このコンクリートの技術革新の時代を当社のコンクリート技術者集団のリーダーとして業界と学会の先陣を駆け抜けてきた。当社における上記の四つの技術分野の研究開発を振り返って進化するコンクリートの全体像を紹介し、これからのコンクリート技術のあるべき方向を考える資料としたい。

2 高強度から超高強度・超高性能へ

2.1 超高層集合住宅の進展とコンクリートの高強度化

1980年代半ばから集合住宅の超高層化が始まった。Fig.2は全国における超高層集合住宅の建設棟数の推移を示す。2000年前後から急速に増大しており超高層集合住宅が進展・普及したことがわかる。超高層集合住宅がランドマークであった時代から、それらが林立しスカイラインを形成する時代となったのである。Fig.3は建物階数とコンクリートの設計基準強度の関係を示す。幅の広い関係ではあるが高層化が進む程強度の高いコンクリートが必要なことがわかる。

1980年代半ばに超高層集合住宅の建設が始まった頃、コンクリートの設計基準強度は42~48N/mm²、階数は20~30階であった。この頃の集合住宅の一例をPhoto 1に示す。現在、コンクリートの強度は150N/mm²の超高強度に、階数は59階に達している。この事例をPhoto 2に示す。さらに200N/mm²の超高強度コンクリートの大臣認定の取得も終えており、すでに実施工が行われている。

2.2 高強度コンクリートの時代

1980年代の半ば、普通コンクリートの設計基準強度は18~21N/mm²であった。それに対して超高層集合住宅に使用された42~48N/mm²のコンクリートを高強度コンクリートと呼んだ。Fig.4はコンクリートの圧縮強度・流動性と水セメント比（水結合材比）の関係を概念的に示したものである。強度を高くするために水セメント比を小さくすると流動性が低下して施工が困難となるのである。そのため高強度コンクリートでは、当時、化学混和剤メーカーで開発されつつあった高性能AE減水剤を使って流動性を確保した。この薬剤は、セメント粒子の表面に吸着してセメント粒子の凝集塊を分散する界面活性剤である。今から見れば、初歩的な技術であり、きわめて施工しづらい粘性の高いコンクリートであった。そのため、現場からは不評であった。この時代の技術は利用可能なメーカーの技術を流用しただけであり、コンクリートのあるべき性能を明確にし、それを実現する研究開発を行うという視点が弱かったと考えられる。この時代の研究開発として、先進性を評価できるものが一つあった。Photo 3に示すL型フロー試験器¹⁾である。従来から、普通コンクリートの流動性はスランプで測定されてきた。と

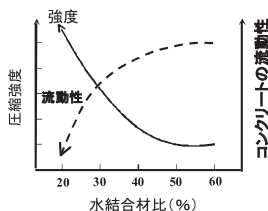


Fig.4 コンクリートの圧縮強度・流動性と水セメント比の関係（概念図）
Relation between concrete strength・fluidity and water to cement ratio



Photo 3 L型フロー試験器
L-shape flow meter

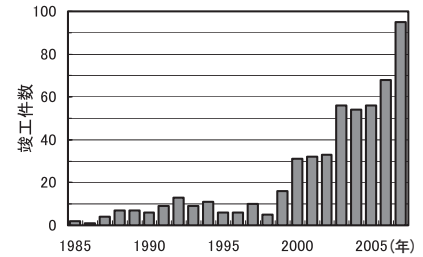


Fig.2 超高層集合住宅の建設棟数の推移（不動産経済研究所）
Transition of the number of high-rise RC buildings

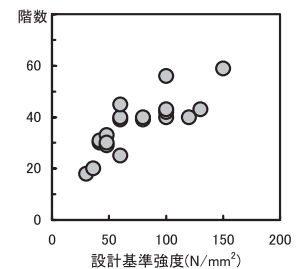


Fig.3 建物階数とコンクリートの設計基準強度の関係（当社実績）
Relation between number of floors and concrete strength



Photo 1 セーラ小松川10号棟
($F_c = 48\text{N/mm}^2$, 33F)
An example of high-rise RC buildings in 1980s



Photo 2 パークシティ武蔵小杉
($F_c = 150\text{N/mm}^2$, 59F)
An example of present high-rise RC buildings

ころが、高強度コンクリートではスランプは同じでも粘性が大きく相違した。スランプ値は流体のレオロジーで言う降伏値を測定している。粘性を測定するには流動速度を測定する必要がある。L型フロー試験器はそれを実現したのである。この技術は、その後の当社の高強度・超高強度コンクリートの流動性評価の基準となった。

2.3 超高強度コンクリートの扉を開く

1989年、品川プリンスホテル新館（Photo 4）の鋼管コンクリートに設計基準強度 $F_c=60\text{N/mm}^2$ の高強度コンクリートを圧入施工したいというリクエストがプロジェクトサイドから届いた。 $F_c=60\text{N/mm}^2$ という当時としては前例のない高強度コンクリートを締め固めすることなく、21階まで一挙に圧入施工（圧力をかけて底部からコンクリートを注入する工法）したいというのである。「可能か」という問いに一呼吸置いて「可能です」と答えた。当時の高性能AE減水剤（セメント分散剤）だけでは無理だと判断し、シリカフュームを使う技術を作るしかないことと決意した。シリカフュームは、ガラス質 SiO_2 を主成分とする直径50～300ナノメートル（セメントの100分の1、タバコの煙の粒子くらいの大きさ）の球形の超微粒子である（Photo 5）。ノルウェーで研究の始まったこの材料について国内でも研究され始めていた。当時、シリカフュームによってコンクリートの強度と耐久性は向上するが、流動性は低下すると考えられていた。しかし、当社では、ある種のシリカフュームが高強度コンクリートの塑性粘度を大きく低下させるとの知見を先のL型フロー試験器により把握していた。このデータがあったので「可能です」と答えることが出来たのである。しかし、基礎研究レベルの技術を短期間で実用化レベルにする必要があった。2週間の間に20便の航空機を乗り継いだノルウェーと米国のシリカフューム生産工場の調査をはじめ、①シリカフュームの品質管理技術、②シリカフュームコンクリートの製造技術、および③シリカフュームを使用したコンクリートに関するデンシット社の特許に関する研究開発を実施し、 $F_c=60\text{N/mm}^2$ の高強度コンクリートの21階までの圧入施工を1991年に実現した²⁾。

シリカフュームの品質管理技術の研究開発では、超音波を負荷した時の分散性の良好なシリカフューム程、コンクリートの流動性を向上させる作用が強いことを見出し、超音波によるシリカフュームの品質管理技術を実現した。

シリカフュームコンクリートの製造においては、この粉末の超微粒子という特性から生コンクリートプラントでのハンドリングが困難であり、シリカフュームを貯蔵、搬送、計量できる新しいプラント技術を実現することが必要であった。そのため、横置きサイロに貯蔵して強制的に排出する機能を持ち、空気とともにシリカフュームを搬送して計量する専用のプラント²⁾を開発した（三菱マテリアル㈱と共同、Photo 6）。

デンシット社の特許とは、セメント粒子の間隙にシリカフュームが凝集することなく均一に分散した粒子構造の特許である（Fig.5）。概念の特許であり証明のない特許であった。そのため、レーザー回折式粒度分布測定装置を導入し、シリカフュームの粒子構造の研究を行った。当社の結論はFig.6に示す粒子構造、すなわち、セメント粒子の周囲にシリカフュームがコーティング状に凝集した粒子構造³⁾である。この研究の成果によりデンシット社のライセンスを購入することなく新たなシリカフュームコンクリートの特許権⁴⁾を取得した。

品川プリンスホテル新館の $F_c=60\text{N/mm}^2$ の高強度コンクリートの圧縮強度の管理試験結果の一例をFig.7²⁾に示すが、所要の強度を満足するコンクリートを安定して施工することができた。これらの一連の研究開発に対して1993年に日



Photo 4 品川プリンスホテル新館
($F_c=60\text{N/mm}^2$, 39F, CFT構造)
Shinagawa Prince Hotel

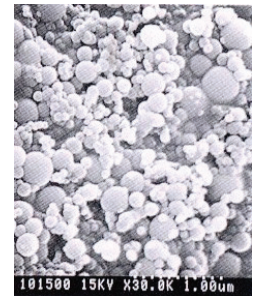


Photo 5 シリカフューム（走査電子顕微鏡写真）
Silica fume (SEM micro-graph)



Photo 6 生コンクリート用シリカフュームプラント
Silica fume plant for ready mixed concrete

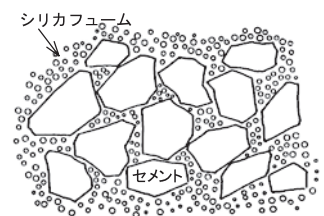


Fig.5 セメント・シリカフュームの粒子構造（デンシット社）
Particle distribution of cement and silica fume (Densit model)

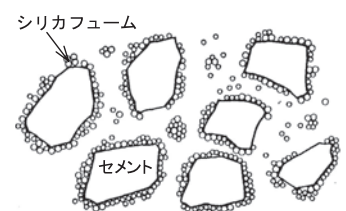


Fig.6 セメント・シリカフュームの粒子構造（当社）
Particle distribution of cement and silica fume (Takenake model)

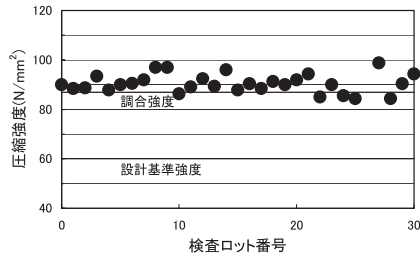


Fig. 7 Fc = 60N/mm²高強度コンクリートの管理試験結果
Quality control results of a Fc = 60N/mm² high-strength concrete

本コンクリート工学協会賞を受賞した。

この頃、同時に60N/mm²を超え100N/mm²を可能にする研究を行っていた。セメントとシリカフェームを高度に分散し、60N/mm²のコンクリートの水結合材比=28%に対して、水結合材比=20%で現場打設できるコンクリートを実現しようとしていた。100N/mm²のコンクリートを何に使うんだとの声もあった。100N/mm²の時代が後に来ることになるが、当時は私の勘と言うか読みであったと思う。セメント分散剤の分子設計法という技術をいち早く導入していた竹本油脂(株)と共同で、Fig.8に構造を示すアクリル酸ベースのポリカルボン酸系超高性能減水剤 (SSP-104) の開発に成功した。

この技術を使って水結合材比20%、Fc = 100N/mm²のコンクリート⁵⁾を技術研究所の連絡橋 (1993年竣工, Photo 7) で施工した。画期的なコンクリートであったと思う。この研究開発に対してプレストレストコンクリート技術協会賞を受賞している。こうして超高強度コンクリートの扉が開かれたのである。

他社が100N/mm²の超高強度コンクリートを実用化するのには1990年代後半であるが、その時、他社の発表に対して「当社は超高強度コンクリートで遅れを取っていないか」と社内でも誤解されたほどである。5年は進んでいたと思う。

2.4 超高性能コンクリートへの展開

シリカフェームプラントによってシリカフェームコンクリートの製造を可能にしたが、シリカフェームはセメントとプレミックスの方が合理的である。そのため、三菱マテリアル(株)と共同でシリカフェームをプレミックスしたシリカフェームセメント (Photo 8) を研究開発した。ところが、コンクリートが超高強度になると火災時に爆裂を起こし、Fc = 80N/mm²程度以上では柱を載荷加熱した時に3時間の耐火性能を確保するのが難しくなることが明らかとなってきた。すなわち、超高強度であるだけでは十分ではなく、耐火性の確保が必要となったのである。そのために、ポリプロピレン繊維を混入し、水蒸気圧の緩和によって爆裂を抑制する技術⁶⁾ (AFR : Advanced Fire

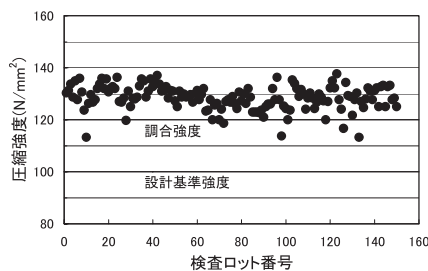


Fig. 9 Fc = 100N/mm²の超高性能 (APC) コンクリートの管理試験結果
Quality control results of a Fc = 100N/mm² Advanced Performance Composite (APC) concrete

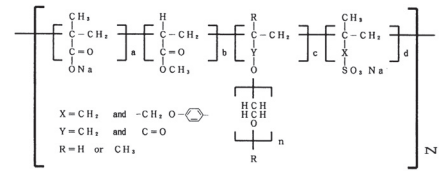


Fig. 8 超高性能減水剤 (SSP-104) の化学構造
Chemical structure of the super-plasticizer (SSP-104)



Photo 7 技術研究所の連絡橋 (1993年竣工)
(Fc = 100N/mm², スパン = 40m, 桁高 = 1m)
Pedestrian bridge in the research institute
(Fc = 100N/mm², span = 40m, depth = 1m)

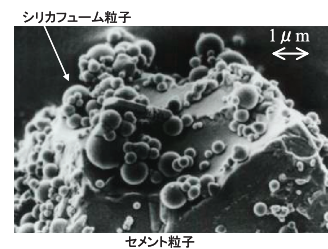


Photo 8 シリカフェームセメント
Silica fume cement (SEM micro-graph)

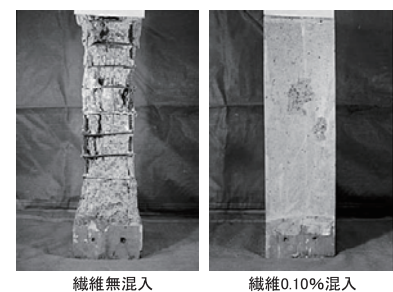


Photo 9 AFRコンクリートの耐火性 (3時間載荷加熱後)
Fire resistance of AFR (Advanced Fire Resistant) concrete

Resistant Concrete) を清水建設と共同開発⁷⁾した。この繊維の効果(Photo 9)に示す。この技術はドイツBAGRAT社で始められた技術を発展させたものである。この技術を使って $F_c = 100\text{N/mm}^2$ の超高強度コンクリートを56階建ての超高層集合住宅に適用した。この時の圧縮強度の管理試験データをFig.9⁸⁾に示す。

つぎに、圧縮強度が $F_c = 150\text{N/mm}^2$ 程度となると鉄筋によるせん断補強の限界に近付いてくことや地震時にかぶりコンクリートがはく落すること等が課題となってきた。鉄筋以外の方法でせん断耐力や変形性能を上げることやかぶりコンクリートのはく落を防止することが必要となった。すなわち、広い意味でコンクリートに韌性を付与することが必要となった。Fig.10に示すように

超高強度・高耐火・高韌性の三つの性能を保有する超高性能コンクリートが必要となったのである。耐火性でも、 150N/mm^2 の超高強度コンクリートになるとポリプロピレン繊維による水蒸気圧の緩和のみでは不十分なことがわかってきた。ところが、これに鋼繊維をミックスすると爆裂が防止できた⁹⁾。さらに鋼繊維の量や形状、強度を制御して、地震時のかぶりコンクリートのはく落防止やせん断耐力・変形能力を向上できることもわかってきた。このような超高強度・高耐火・高韌性を有する超高性能コンクリートをAPC (Advanced Performance Composite) コンクリートと呼び、Photo 2に示すパークシティ武蔵小杉等のプロジェクトに適用している。

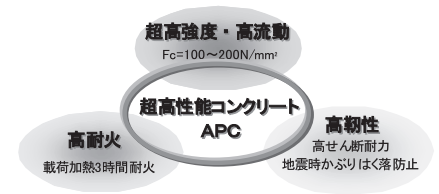


Fig.10 超高性能コンクリート (APC) の概念
Concept of APC (Advanced Performance Composite) concrete

3 環境貢献にむけて

3.1 コンクリートの環境負荷

環境という面ではコンクリートは昔からあまり評判が良くない。かつてはコンクリートジャングルと言われた。無機質で温もりがない、人に優しくないといったイメージであろうか。一方で、原料として高炉スラグやフライアッシュといった産業副産物を受け入れたり、一般廃棄物の焼却灰を利用したり、あるいは燃料として廃タイヤを受け入れたりと貢献も行っている。しかし、先に述べたように、コンクリート用材料は、わが国の全マテリアルフローの約40%を占め、解体コンクリートは全産業廃棄物の10%弱を占める。さらに、セメント製造時のCO₂の排出量は、我が国全体のCO₂排出量の約4%を占める。このように、資源、廃棄物とエネルギー・CO₂という環境の核心に関わる問題でコンクリートは負荷の大きい材料と言わざるを得ないのであり、これらの負荷を削減する技術が必要とされている。

3.2 コンクリートで植物を育てる (緑化コンクリート)

1989年、竹中工務店の創立90周年を記念して技術アイデアコンペが実施された。土の基盤に芝を植栽したパリ・ベルシー体育館の傾斜外壁にヒントを得て、植栽できるコンクリートが出来れば建築の外壁や屋上、外構等で緑の環境を飛躍的に拡大できるに違いないと考え、「緑化コンクリート」という名前前で植栽できるコンクリートの提案を行い入選した。緑化コンクリートの開発はここから始まった。

高いpH (細孔溶液のpH=13以上)、根張り空間のない緻密な組織、肥料成分を含まない化学組成等、コンクリートは植栽には全く適していない材料であった。農学・造園緑化の専門家は、pH=9を上回るアルカリ環境では植物は生育しないと断言し、開発の可能性を否定した。このような環境からスタートし、3年間の試行錯誤の末、辿り着いた構造がFig.11に示す緑化コンクリート^{10), 11)}である。粗骨材をセメントペーストで固めた「おこし」状のポーラスコンクリートにより、空隙率20~30%の連続した根張り空間を創出した。この空間に微粉碎して大きさ

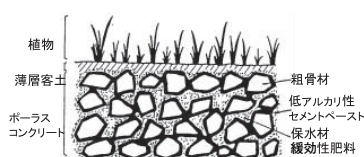


Fig.11 緑化コンクリートの構造
Structure of the Green Concrete



Photo 10 初めて植栽に成功した緑化コンクリート試験体
An Green Concrete specimen succeeded growing grass for the first time

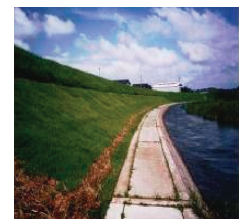


Photo 11 緑化コンクリートを施工した河川護岸
An river bank covered with the Green Concrete

を制御したピートモスや緩効性肥料をアクリル系増粘剤で粘性を付与したスラリーとして充填し、保水性と肥料成分を確保した。表層の薄層客土で発芽空間を確保し水の蒸発も抑制した。高炉スラグセメントC種の使用（後にB種でも実現可能なことが判明）とピートモスの中和作用によりpHを10程度に抑制した。超高強度コンクリートの技術を転用することで20~30%もの空隙を形成しつつ圧縮強度10~20N/mm²を実現した。ケンタッキーブルーグラスの植栽に初めて成功した試験体をPhoto 10に示す。

緑化コンクリートによって建物の外壁を緑化するという当初の夢はまだまだ実現していないが、建物の外構や河川護岸（Photo 11）に適用され、10年以上の実績がある。最近では、市内電車の軌道敷へも適用された。緑化コンクリートは緑の空間を造る新しい技術として環境に貢献するコンクリートへの道を開いた。

3.3 コンクリートをリサイクルする（高品質再生骨材サイクライト）

溶鉱炉で製造された鉄は使用された後、屑鉄として回収され電炉鋼として再利用される。鉄もコンクリートと同様、社会資本の基幹材料であり、エネルギー・資源多消費材料であるが、リサイクルという点では鉄の方が進んでいる。解体コンクリート塊は破碎処理した後、道路の路盤材料としてリユースするしかなかった。道路の建設が縮小すれば、ただちにリユースも困難となり一挙に最終処分場への負荷を増大させる可能性があった。構造体コンクリートを構造体コンクリートにリサイクルできる技術を開発する必要があると考え、高品質再生骨材サイクライトの研究開発に着手した。1990年代半ば頃のことである。骨材とセメント硬化体・モルタルを精度良く分離する技術の開発が必要であった。Fig.12

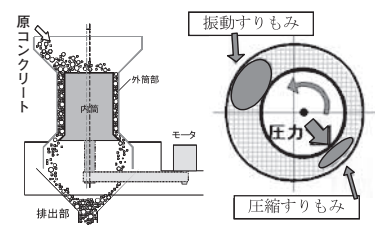


Fig.12 偏心ロータ式高品質再生骨材製造装置の原理
Principle of the eccentric roter type machine for the high quality recycled aggregate

に原理を示す偏心ロータ式高品質再生骨材製造装置の研究を進め実用化¹²⁾した（大阪市立大学、栗本鐵工(株)と共同）。偏心回転する内筒と外筒との間で解体コンクリート塊に強いすりもみ作用を及ぼし、骨材に付着するモルタルを除去することができる。その結果、構造体コンクリートに再利用できる高品質再生骨材を製造できるようになった。この装置（Photo 12）で製造した骨材の品質をFig.13に、コンクリートの品質をFig.14に示す。普通骨材の品質規格を満足しており、コンクリートの性能も普通骨材を用いたものと同様である。プロジェクトへの適用を進め（Photo 13）、施工上、品質上の問題のないことも確認できた。



Photo 12 偏心ロータ式高品質再生骨材製造装置（実用機、処理能力=20t/h）
Eccentric roter type machine for concrete recycle (Commercial machine, production capacity = 20t/h)

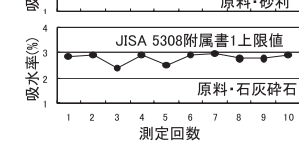


Fig.13 高品質再生骨材の品質¹²⁾
Quality of the high quality recycled aggregate

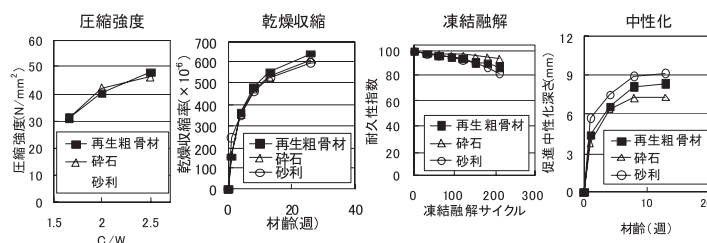


Fig.14 高品質再生骨材を使用したコンクリートの品質¹²⁾
Quality of the concrete using the high quality recycled aggregate



Photo 13 新丸の内ビル（コンクリート約10,000tをリサイクルし、1F、B1Fの一部に適用）
Shin Marunouchi Building (10,000 tons of concrete was recycled)

3.4 コンクリートの寿命を延ばす（超高耐久性コンクリート）

資源、廃棄物、エネルギー・CO₂というコンクリートの環境負荷を低減する技術が求められている。しかし、コンクリート構造物の長寿命化ができれば間接的にこれらの負荷を削減することができる。寿命が2倍になれば、ライフサイクルで見たコンクリートの使用量は半分となり、環境負荷も半減するのである。当社で500年コンクリートと名付けて超高耐久性

コンクリートの技術を発表したのは1986年である。コンクリートの中性化速度を低減し、鉄筋位置までコンクリートが中性化するのに要する時間を長くすることによって長寿命化を図った技術^{13), 14)}である。アミノ

アルコールとグリコールエーテル誘導体という、それまでコンクリートに使用されたことのない化合物を見つけ中性化を抑制したものである（Fig.15）。当時、当社で研究を進めていた中性化進行の信頼性理論¹⁵⁾による予測法により寿命を推定すると寿命500年という結果が得られた。そのため500年コンクリートと名付けたのである。

推定・500年という長寿命は、宗教関係の建物で評価をいただき適用が進んだ（Photo 14等）。その後、寿命100年、200年のバージョンを加え、集合住宅や学校建築への適用も進んだ。

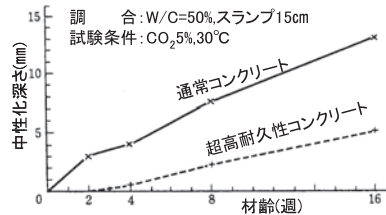


Fig.15 超高耐久性コンクリートの中性化速度
Carbonation rate of the super durable concrete



Photo 14 平城宮朱雀門（基壇に超高耐久性コンクリートを適用）
Heijo-kyu Suzaku Gate (Super durable concrete was used for the base)



Photo 15 高流動コンクリートのスランプ
Slump of the high flow concrete

4 コンクリート施工の生産性向上をめざして

生コンクリート工場で製造されアジテータカーで運搬されたコンクリートをコンクリートポンプで圧送し、棒状バイブレーターで締め固めてコンクリートを打設するというコンクリート工事は、約30年前に確立されたものであり、基本は現在も変わっていない。型枠工事、鉄筋工事、ポンプ筒先の作業員による引き回し、バイブレーターによる締め固め等、コンクリート工場の工業化・生産性向上という点から見れば、いずれも合理化されるべきものと思う。少子高齢化の時代に生産性の高い利益率の高い産業として存続するために、様々な技術が必要である。

高流動コンクリートは、バイブレーターによる締め固めの不要なコンクリートである。1990年代の始め、バブルの時代の作業員不足を背景に開発された技術でありコンクリート工場の生産性向上の第一歩であった。このコンクリートは、通常のコンクリートに比べて締め固め不要な著しく高い流動性と分離抵抗性および間隙通過性を有するものであり、流動性を付与するためのセメント分散剤、分離抵抗性を付与する粉体ないし増粘剤で構成されている。これらを組み合わせて間隙通過性も確保している。このコンクリートのスランプフローをPhoto 15に示す。スランプフロー50～60cmでも分離しないコンクリートを製造することができる。このコンクリートの最初の本格的な適用例をPhoto 16¹⁶⁾に示す。複雑な形状をした配筋の密な開閉式ドーム屋根の走行レールである。

高流動コンクリートを普通強度のコンクリートに使用すると若干のコストアップとなった。そのため一般のコンクリート工事への普及は、今のところ、進展していない。粉体量の多い高強度コンクリートを用

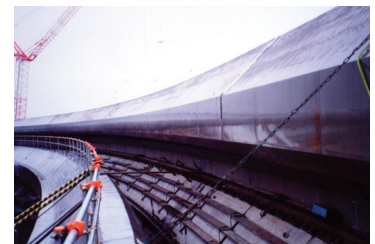


Photo 16 高流動コンクリートを適用した開閉式ドーム屋根の走行レール
Concrete rail for a open dome roof; the high flow concrete was applied



Photo 17 プレキャスト工法の施工例
An example of construction using a precast concrete method

いた鋼管コンクリートの圧入工事では、材料コストのアップをほとんど伴わずに施工が合理化されるので高流動コンクリートが定着した。型枠も締め固めも必要としないコンクリート工事であり、きわめて合理的である。

高流動コンクリートによる合理化は、現場打ちコンクリートの生産性を向上させる第一歩であるが、一方でプレキャスト化を進め現場打ちコンクリートを少なくすることが求められている。従来、プレキャスト化の進展をコントロールしていたのは現場打ちコンクリートとプレキャストコンクリートの原価の優劣であり、多くの場合、現場打ちコンクリートが優位であった。しかし、少子高齢化の時代に向けて、このバランスがプレキャストコンクリートにシフトし始めている。最近のプレキャスト化の進展(施工例Photo 17)はその現れである。しかし、これもまだ入口だと思う。現場での型枠、鉄筋工事は合理化されたが、これらの労働集約作業がプレキャスト工場に移動しているのであり、産業としてのトータルの生産性向上を図るには工場での部材製造の合理化等システム全体の効率化が必要である。Fig.16は、3時間で12N/mm²の吊上げ強度を確保し、工場でのマルチサイクルの部材生産を可能とするために1990年代前半に開発したコンクリートの例¹⁷⁾である。性能は出るようになったが高コストであるためコストダウンを含めた研究を継続している。

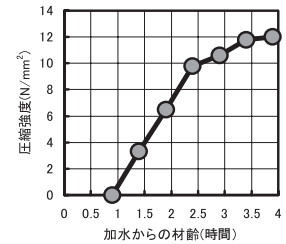


Fig.16 プレキャスト部材用超速硬コンクリートの強度発現性
Strength development of a super quick setting concrete

5 ひび割れのない高品質コンクリートをめざして

コンクリートは、数10ナノメートルから数100ミクロンの空隙で形成される多孔体であり、空隙中に水和していない自由水が存在する。その結果、空隙の壁面で式(1)のような引張応力(毛細管張力)が発生する。コンクリートが宿命的に乾燥収縮する原因の多くはそのためと考えられている。

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{\gamma_k} = \frac{RT\rho}{M} \ell_n \frac{P}{P_0} \quad (1)$$

ここに ΔP : 毛細管張力 (N/m²), γ : 液体の表面張力 (N/m)
 γ_k : 毛細管の半径 (m), R : 気体定数 (J/K·mol)
 M : 液体の分子量 (kg/mol), T : 絶対温度 (k)
 ρ : 液体の密度 (kg/m³)

現場打ちのコンクリート外壁と非耐力の間仕切り壁を多用してきた我が国の建築において、コンクリートの乾燥収縮によるひび割れは、この数10年克服すべきコンクリートの品質課題として存在し続けてきた。

コンクリートの乾燥収縮は単位水量が多い程大きくなる傾向にある。そのため、1975年頃、当時開発されつつあった高性能減水剤を現場で添加して流動性を確保し、単位水量の少ないコンクリートを打設する工法¹⁸⁾を開発した(Fig.17)。このために竹本油脂(株)と共同開発した減水剤が「ハイフルード」であり、この工法を流動化コンクリートと呼んだ。

この技術は、スランプは出てもすぐ低下してしまう当時の高性能減水剤を現場で添加することにより、初期の高い流動性を活用できるようにした点に特徴がある。当社はコンクリートのスランプを18cm以下、単位水量を185kg/m³以下とするルールをいち早く定め、流動化コンクリートと組み合わせてひび割れ対策を進めた。やがて、スランプ低下の少ない高性能AE減水剤が開発され流動化コンクリートは使命を終えることとなる。

その後、骨材事情の悪化もあり、ひび割れによる不具合は、断続的に続いた。2000年頃、乾燥収縮ひび割れを抜本的に解決すべく、低収縮コンクリートの基礎研究に着手した。Fig.18は、その頃取得したデータであり、式(1)による毛細管張力説がおおよそ妥当であることを改めて確認した。このような考え方をベースとして、効果の高い乾燥収縮低減剤の研究を竹本油脂(株)と共同で進めた。その結果、2005~2007年にかけて2種類の低収縮コンクリートを実現した。一つは、コンクリートの流動性を出すための高性能AE減水剤と収縮低減剤の一液化を図り^{19), 20)} コ

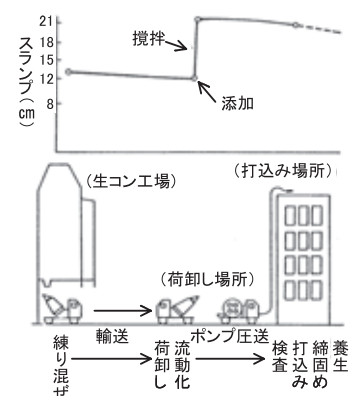


Fig.17 流動化コンクリート工法
Fluid concrete method

ストも抑制した汎用の低収縮コンクリート（乾燥収縮率 650×10^{-6} 程度）。今一つは、 500×10^{-6} 以下の収縮率を実現する超低収縮コンクリートである。これらのコンクリートの乾燥収縮率と乾燥期間の関係の測定例をFig.19に示す。超低収縮コンクリートを適用した特殊形状の外壁を有する建物をPhoto 18に示す。

ひび割れのない高品質なコンクリートを目指した研究開発が始まって約30年が経過した。若干のコストは要するものの、ようやく乾燥収縮によるひび割れを抑制したコンクリートを実現できる時代になってきたのである。

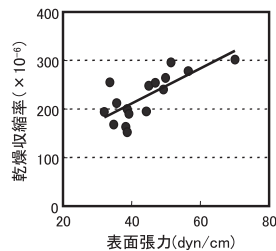


Fig.18 水の表面張力とモルタルの乾燥収縮率の関係の測定例（乾燥3週）
A relation between drying shrinkage of mortar and surface tension of water

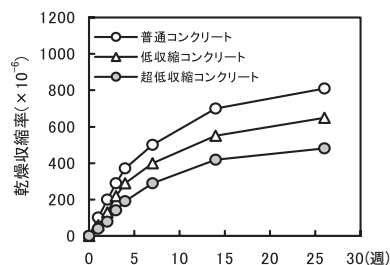


Fig.19 低収縮コンクリートの乾燥収縮率の測定例
An example of drying shrinkage of low shrinkage concretes

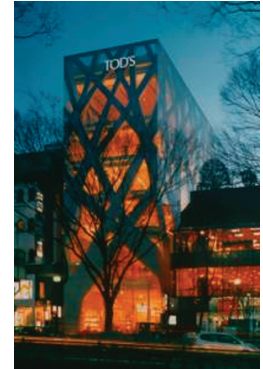


Photo 18 トップ表参道ビルディング
A special frame structure using super low shrinkage concrete

6 これからの進化の方向

超高強度、環境、生産性、高品質の四つを基軸に据え、この数10年間コンクリートを進化させ続けてきた。今後これらの基軸に変化は起こるのであろうか。

まず、超高強度である。200N/mm²の超高性能コンクリート（APC）の研究開発を終えている。現在の技術の延長で300N/mm²前後のコンクリートが実用化されると思う。300N/mm²前後の超高性能コンクリートにより100階を上回る超高層RCに対応できるのではないかと推定される。これにより現在の架構に適用されるコンクリートの強度としてはほぼ極限に到達するように思える。それでは、コンクリートの超高強度化は一段落することになるのか。必ずしもそうとは言えない。一つの方向が繊維補強超高強度モルタルである。フランスでRPC（Reactive Powder Concrete）として始まったこの技術はセメントメーカーによって我が国に技術導入され圧縮強度200N/mm²程度の繊維補強モルタルとして商品化されている。現在の建築の架構への適用を考えれば、剛性、発熱、収縮、クリープ、コスト等の点で超高性能コンクリート（APC）の方が優れているのは明白である。しかし、さらに高強度化・高靱性化すれば話は別である。鉄の領域に近付いたモルタルに変身できれば、新しい部材・架構を生み出す可能性がある。鉄の価格が高騰する環境で将来の構造材料としての研究開発が必要とされているのではないと思う。

環境への対応は待ったなしである。資源、廃棄物、エネルギー・CO₂という環境問題の核心にコンクリートは関わっている。超高耐久性コンクリートと高品質再生骨材サイクリイトは、これらの問題に今後とも貢献していく技術である。しかし、エネルギー・CO₂という最重要の課題がなかなか攻めきれないのである。高炉スラグセメントやフライアッシュセメントの利用を拡大する技術等、様々の試みが行われている。しかし、いずれも核心に届いていないと言えまい。間違いなく今後の基軸となる研究領域である。

高流動コンクリートは現場打ちコンクリートの生産性向上に第一歩を印した。高強度コンクリートを使用する鋼管コンクリートの圧入施工でこのコンクリートが定着しているが、普通強度のコンクリートでも少子高齢化の進展とともに適用領域が拡大すると考えられる。もう一つの生産性向上の方向がプレキャスト化である。プレキャスト化は構造、構工法、材料等の総合技術として展開されるものである。したがって、コンクリート技術のみで大きな進展がある訳ではない。しかし、部材を製造する領域等でコンクリート技術の活躍する領域があると思う。この分野もこれからの基幹となる研究開発領域と思う。

低収縮・超低収縮コンクリートが研究開発され、ある程度のコストをかければコンクリート躯体の収縮ひび割れを抑制することが可能となりつつある。この技術のコスト低減を図る必要があるが、これからは低収縮に加え、生産性も向上させる等、複合的・総合的な品質を有するコンクリートとして研究が必要と思う。

四つの基軸となる領域の今後について記述したが、環境と生産性は、さらに基幹領域として、超高強度と高品質

は、これまでとは少し形を変えた新しい領域として研究開発が必要と思う。

20世紀の末から21世紀の始めにかけてコンクリートの技術革新は大きく進んだ。ローテクとされていたコンクリートがナノ領域を制御するハイテク材料に近づきつつあると思う。コンクリートは、まだまだ進化するのである。研究開発の手綱をゆるめてはならない。

参考文献

- 1) 米澤敏男, 和泉意登志, 三井健郎, 奥野 享:「高強度コンクリートのワーカビリティに関するL型フロー試験法による研究」, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.171-176, 1989年
- 2) 米澤敏男, 三井健郎, 奥野 享, 沼倉紀章, 大浦鉄男, 佐藤光男:「シリカフェームを用いた超高強度コンクリートの鋼管圧入施工」コンクリート工学, Vol.31, No.12, pp.22-33, 1993年
- 3) 米澤敏男, 柳橋邦生, 池尾陽作, 朝倉悦郎:「高強度コンクリート中でのシリカフェームの分散状態の研究」, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.69-74, 1993年
- 4) 米澤敏男, 三井健郎, 柳橋邦生, 池尾陽作, 奥野 享, 朝倉悦郎, 吉田久嗣, 佐藤光男, 木之下光男:「水硬性材料の製造方法」, 特許第3300993号, 2002年
- 5) K. Mitsui, T. Yonezawa, M. Kinoshita, T. Shimono: Application of a New Super plasticizer for Ultra High-Strength Concrete, American Concrete Institute SP-148, pp.27-45, 1994
- 6) 藤中英生, 三井健郎, 米澤敏男, 古平章夫:「ポリプロピレン繊維を混入した高強度RC柱の耐火性能」, 日本火災学会論文集, Vol.54, No.1, pp.17-23, 2004年
- 7) 米澤敏男, 古平章夫, 藤中英生, 三井健郎, 井上孝之, 山崎康行, 西田 朗, 森田 武:「耐爆裂性コンクリート」, 特許第3584171号, 2004年
- 8) 三井健郎, 米澤敏男, 上田忠男, 佐藤敏之:「 $F_c = 100\text{N/mm}^2$ 超高強度高耐火コンクリートの超高層RC建造物への大量施工」, 日本建築学会技術報告集, No.20, pp.47-52, 2004年
- 9) 三井健郎, 米澤敏男, 古平章夫, 藤中英生, 武田浩二:「耐爆裂性コンクリート」, 特許第4071983号, 2008年
- 10) 米澤敏男, 佐久間 護, 柳橋邦生:「緑化コンクリートの開発と実用化」, 竹中技術研究報告, No.54, pp.9-16, 1998年12月
- 11) 柳橋邦生, 池尾陽作, 米澤敏男, 佐久間 護, 半田栄一, 久松國男:「緑化基盤コンクリート」, 特許第2981071号, 1999年
- 12) 米澤敏男, 神山行男, 柳橋邦生, 小島正朗, 荒川和明, 山田 優:「高品質再生骨材製造技術の研究」, 材料, Vol.50, No.8, pp.835-842, 2001年
- 13) 佐久田昌治, 柳橋邦生, 齊藤俊夫, 和泉意登志, 押田文雄, 嵩 英雄:「超高耐久性コンクリートの開発」, 竹中技術研究報告, No.38, pp.137-148, 1987年
- 14) 江原光雄, 齊藤俊夫, 柳橋邦生:「超高耐久性コンクリートを用いた建築物の施工」, コンクリート工学, Vol.29, No.12, pp.43-50, 1991年
- 15) 和泉意登志:「鉄筋のかぶり厚さの信頼性設計による耐久性向上技術の提案」, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.6, pp.185-188, 1984年
- 16) 松尾健次郎, 小野順一郎, 牟田有宏, 和泉意登志, 池田美和:「開閉屋根の走行路に1万 m^3 を施工・福岡ドーム」, セメント・コンクリート, No.558, pp.15-21, 1993年8月
- 17) 押田文雄, 和泉意登志:「硬化促進剤混入コンクリートを用いたプレキャスト部材の1日多サイクル製造の検討」, 日本建築学会大会学術講演概要 (A, 材料施工), pp.887-888, 1992年
- 18) 嵩 英雄, 小林昌一, 井口昌彦, 金岡伸幸, 麓 勉, 池田正志, 佐藤忠博, 大竹和夫:「高性能減水剤の遅延添加による高流動コンクリートの研究」, 竹中技術研究報告, No.16, pp.134-153, 1976年
- 19) 井上和政, 三井健郎, 池尾陽作:「各種混和剤を用いたコンクリートの収縮低減特性および諸物性」, 日本建築学会大会学術講演概要 (A-1, 材料施工), pp.319-320, 2004年
- 20) 井上和政, 柿沢忠弘, 鈴木 健, 木之下光男, 稲垣順司, 近藤慎一:「収縮低減特性を有する混和剤を用いたコンクリートのひび割れ抑制効果」, 日本建築学会大会学術講演概要 (A-1, 材料施工), pp.225-226, 2006年