

流し込み成型で世界最高強度を 発現するコンクリートの開発

太平洋セメント株式会社 中央研究所第2研究部TBCチーム主任研究員 河野 克哉
太平洋セメント株式会社 中央研究所第2研究部TBCチーム 中山 莉沙
太平洋セメント株式会社 中央研究所第2研究部TBCチームリーダー 多田 克彦

1 開発の背景と目標

超高強度コンクリートの適用は、鉄筋コンクリート造建築の高層化やコンクリート土木構造物の長大化などを可能にする技術であり、その強度開発が進んでいます。図-1は、超高強度コンクリートの開発競争において到達した圧縮強度の推移を示したものです。当社ではDuctal®（超高強度繊維補強コンクリート、UFC）の販売を2000年から開始し、鋼材と同等の圧縮強度200N/mm²を実現できるプレキャストコンクリート技術を国内にいち早く普及させました。また2006年には圧縮強度150N/mm²を発現するSFPC®（シリカフェウムプレミックスセメント）の販売ならびに2010年には圧縮強度200N/mm²を発現するSFPC200®の開発を行い、超高強度となるレディーミキスト

コンクリート技術を確認させています。なお、この間にも、国内の大手建設会社を中心に超高強度コンクリートの開発競争が進展し、2013年には国内最高となる設計基準強度300N/mm²の超高強度コンクリートがプレキャスト柱部材として実用化されています¹⁾。

海外では、1994年に反応性粉体コンクリート（RPC）と呼ばれる圧縮強度673N/mm²を発現する材料がフランスで開発されており、現在までコンクリート強度の最高記録となっています²⁾。ただし、RPCは、図-2に示すようなホットプレス成型という高温（250～400℃）で加熱しながらフレッシュコンクリートを加圧することで内部空隙を低減させる特殊な製造方法によって超高強度化を実現したものです。これはファインセラミックスの製造方法を応用したもので、この方法で得られるコンクリートは固定形状に限定されてしまいます。本来、コンクリートは型枠の中に流し込んで任意な形状を得られることが最大の長所であり、この施工上の特長が建設材料としてコンクリートを広く普及さ

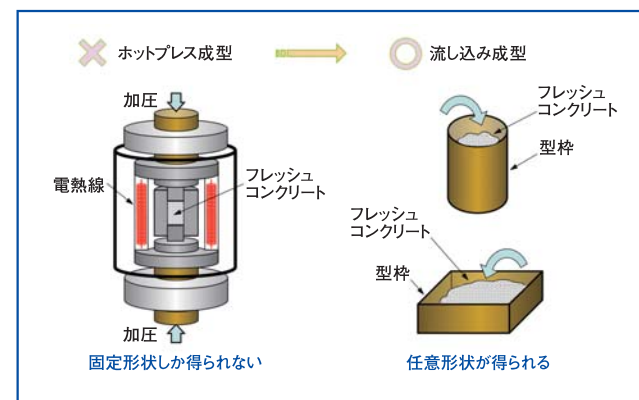


図-2 実用的なコンクリートの成型方法

せている理由といえます。

このような背景のもと、世界最高の圧縮強度を発現するコンクリートの開発にあたって、コンクリートがもつ本来の施工性を犠牲にすることがない流し込み成型で、さらに200℃を超えるような高温加熱をすることなく、実用的な条件においてコンクリート強度の世界記録に挑戦しました。そのためには、材料と製造の両面から内部空隙をできるだけ減らして、いかに緻密な組織を形成させることができるかがポイントになります。

2 新しい結合材の開発

材料面では、結合材に様々な粉体を組み合わせて（多成分化）、空隙を物理的に充填することが重要になります。一般に超高強度コンクリートは、セメントに超微粉材料であるシリカフェウムを高性能減水剤とともに用いて、できるだけ少ない量

の水で練り混ぜています。平均粒径15～25μmのセメント粒子同士の隙間を、平均粒径0.1～1μmの細かいシリカフェウム粒子で埋めることで充填性を高めた結合材です。しかし、2成分のみの粉体で構成された結合材では粉体間の空隙がまだまだ多く、さらにその隙間を埋めるような複数の粉体粒子を適切な成分と組成比にて加えることで、最密粒度の結合材が得られます。新しい結合材では、粉体の物性、成分、組成比、粒径分布が混合物の空隙率に与える影響を粉体工学における古典的な簡易計算手法³⁾や数値計算シミュレーション⁴⁾にて算出し、実際にその混練物を写真-1に示した流動性試験（フロー試験）と圧縮強度試験に供することで、セメント・コンクリートの分野で適用されていない新素材微粒子を採用して最高強度化が果たせることを見出しました。なお、Ductal®の材料設計コンセプトと同様に強度低下を避けるために粗骨材は用いないこととし、強度増進に有利となる高強度砂や高い分散性を示す高性能減水剤を新たに採用しています。

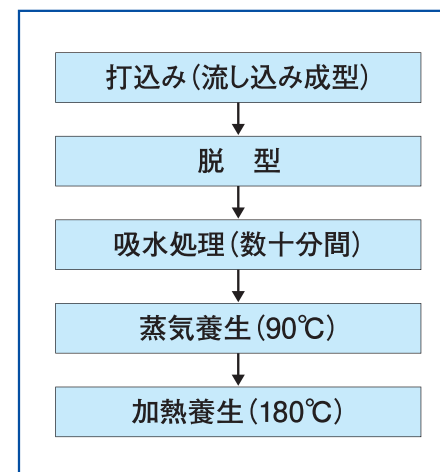


図-3 世界最高強度コンクリートの製造方法

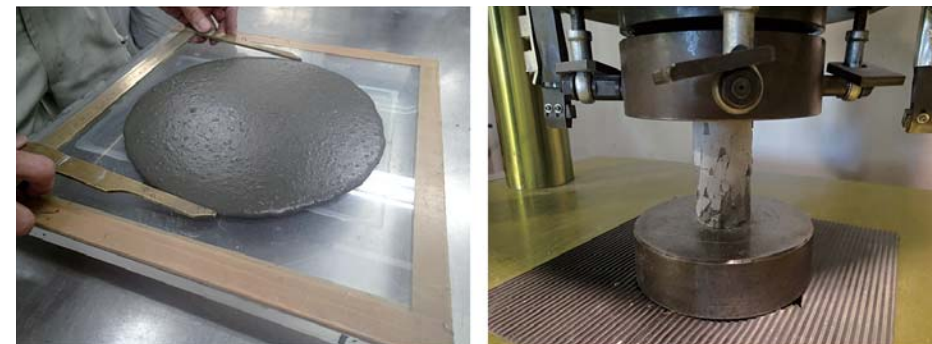


写真-1 世界最高強度コンクリートの流動性試験と圧縮強度試験

3 新しい製造方法の開発

超高強度コンクリートでは、きわめて少ない水量で結合材を練り混ぜるため、セメントの水和反応に必要な水分が圧倒的に不足しています。そのため、製造面では最密粒度の結合材の反応を高めて、空隙を化学的に充填することが重要になります。

新しい製造方法は図-3に示すように、型枠に流し込んで1～2日後に脱型し、脱型直後の硬化体に数十分間の吸水処理を行うことで、不足する反応水を外部から内部に補給します。以前にも超高強度コンクリートに水分を補給する方法としては、あらかじめ含水させた多孔材料（人工軽量骨材や吸水性ポリマー）を練混ぜ時に混入して内部的に補う方法がありましたが⁵⁾、多孔材料自体の強度が低いために最高記録となるような強度を引き出す方法としては必ずしも適切とはいえません。その

ため、図-4に示すように、密閉容器内で水中に漬けた状態で上層の空気を排出させて減圧することで、外表面から内部に吸水する方法（脱気吸水処理）、または開放容器内で水中に漬けた状態で煮沸して水中で自然冷却することで、外

表面から内部に吸水する方法（煮沸吸水処理）を検討しました。これらの吸水処理のうちのいずれか一つの方法を実施した後、蒸気ならびに加熱といった2段階の熱養生に供することで、流し込み成型で最高記録となる平均で圧縮強度451～464N/mm²のコンクリートを得ることができました。図-5に示すように、吸水処理によって脱型時に硬化体中の空隙

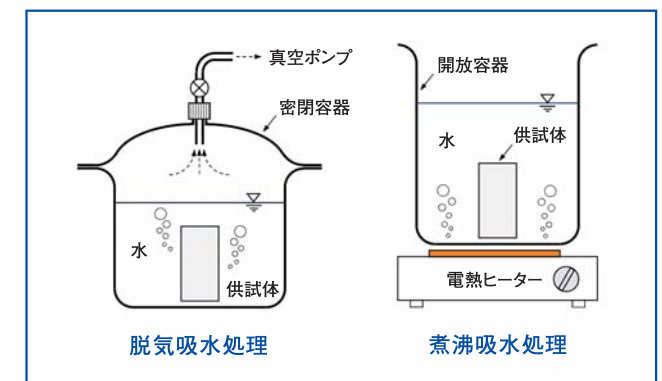


図-4 外部から内部への水分補給方法

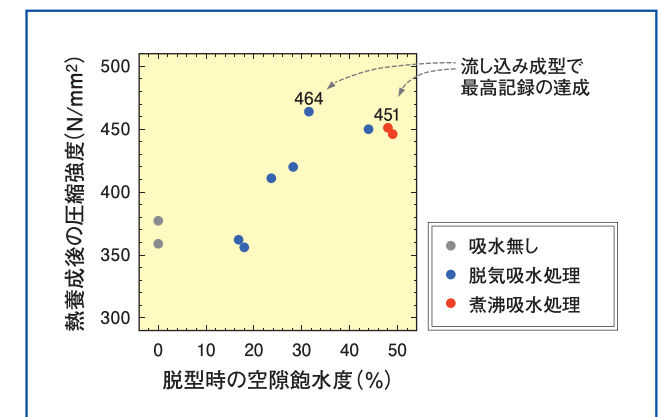


図-5 吸水処理と熱養生による強度増進

の飽水度が増加するほど熱養生後の圧縮強度は増進することが明らかになりました。このことから、外表面から内部に補給された水分が熱エネルギーを受けてセメントと活発に反応して緻密な硬化組織を形成し、きわめて高い圧縮強度を実現したものと考えられます。なお、このような吸水処理は、コンクリート製品工場において、高温高圧養生槽や熱温水槽などの既存設備を使って実用化できるものと考えています。

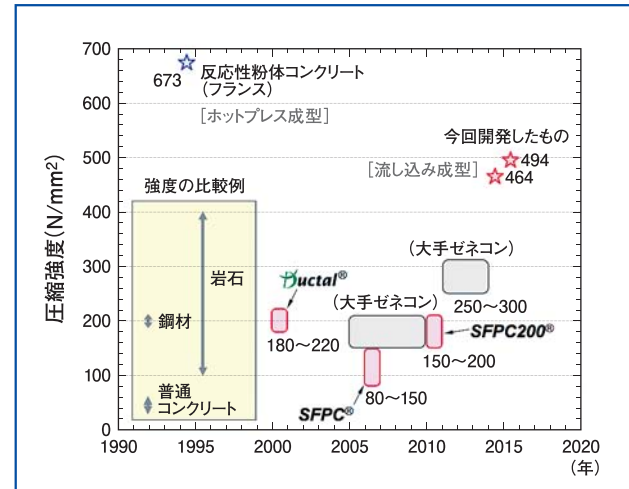


図-1 超高強度コンクリート開発における到達強度の推移（100N/mm²以上）



写真-2 同一荷重を受け持つことのできるコンクリートの断面積の比較

4 世界最高強度コンクリートの用途と圧縮強度記録の更新

写真-2は、同一荷重を受け持つことのできるコンクリートの断面を世界最高強度コンクリート(圧縮強度464N/mm²)、超高強度コンクリート(圧縮強度150N/mm²)および普通コンクリート(圧縮強度35N/mm²)の場合で比較したものです。世界最高強度コンクリートを適用することで、超高強度コンクリートの場合の約3分の1、普通コンクリートの場合の約13分の1に断面を低減できます。写真が示すように、世界最高強度コンクリートの超高圧縮強度と超軽量性を活用して、さらに高い超高層ビル、さらに長い超長大橋梁などの画期的な新構造を実現できる可能性があります。また、緻密な組織をもつ世界最高強度コンクリートは、新設コンクリート構造物だけでなく既設コンクリート構造物においても超高耐久性を活用した表面保護工法や補修・補強工法などの用途のほか、防災の分野でも適用機会を見出せる可能性があります。さらに土木・建築の分野だけでなく、鋼材の2倍以上の超高軸圧縮力に耐えられる強度性能や腐食しない耐久性能の面から、鋼材の代替材料として多様な分野で応用できる可能性も有しています。

現在、さらに粉体の充填性を高め、強度を高める研究に挑戦しています。高速気流で回転翼にぶつけて粒子表面を研削して、球形に近づけたセメントと多成分

化した結合材を用いることで、さらに水量を減じた練混ぜが可能となり、今回以上の超高強度を得ることが可能になります。この結合材を用いて同様に吸水処理と熱養生を行った場合には、平均で494N/mm²の圧縮強度を得ており、流し込み成型で作られたコンクリートの圧縮強度記録を更新しております。

【参考文献】

- 1) 今井和正,山本佳城,加藤雅樹,村松晃次:設計基準強度300N/mm²のコンクリートを用いたRC細柱の開発と適用,コンクリート工学,Vol.51, No.12,pp.959-966,2013
- 2) 鶴澤正美,山田一夫:PRCを用いた超高強度・高じん性のコンクリートの開発動向,コンクリート工学,Vol.39,No.2,pp.53~56,2001
- 3) C.C. Furnas : Grading aggregate I - Mathematical relations for beds of broken solids of maximum density, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 23, No.9, pp.1052-1058,1931
- 4) 鈴木道隆,市場久貴,長谷川勇,大島敏男:粒度分布のある多成分粒子ランダム充填層の空隙率,化学工学論文集,第11巻,第4号,pp.443-438,1985
- 5) 例えば,日紫喜剛啓,高田和法,大野俊夫,一宮利通,盛田行彦:自己収縮を低減した150N/mm²級超高強度コンクリートに関する実験的検討,土木学会論文集,V-66/No.781,pp.101-112,2005

こうの・かつや



【著者略歴】

1996年 日本セメント株式会社
(現 太平洋セメント株式会社)入社
2003年 東京工業大学大学院文部科学教官助手
2005年 太平洋セメント株式会社復職
現在 同社中央研究所第2研究部TBCチーム主任研究員
博士(工学)技術士(建設部門)

なかやま・りさ



【著者略歴】

2014年 太平洋セメント株式会社入社
現在 同社中央研究所第2研究部TBCチーム

ただ・かつひこ



【著者略歴】

1992年 小野田セメント株式会社
(現 太平洋セメント株式会社)入社
現在 同社中央研究所第2研究部TBCチームリーダー