

これからのコンクリート材料

富田 六郎*1・田中 敏嗣*2・谷村 充*3

1. はじめに

プレストレストコンクリート（PC）を成立させる主要な構成要素は、高性能な鋼材と高品質のコンクリートであり、一般的なPC構造物では、高品質といえる圧縮強度50MPa程度のコンクリートで設計するケースが多い。近年、高い施工性を付与したまま100MPaを超える強度を得ることが技術的に容易となり、さらに最近では技術革新が進んで、200MPa程度の強度を安定的に確保する技術も実用化され、PC構造物の設計や意匠に幅広い選択肢が得られるようになってきた。コンクリートの高強度を支えている要素は、結合材と高性能減水剤の技術進歩といえるが、本稿では、これらの技術発展の流れを検証し、さらに今後へ向けてのPC構造物用コンクリートの展望を整理した。

2. 材料の最新動向

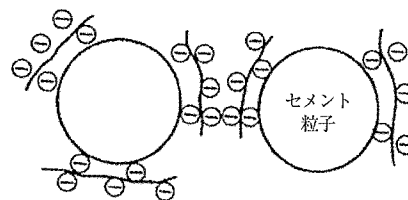
コンクリート材料の技術は、それぞれの時代における要求性能の高度化・多様化に対応してこれまでも発展してきたが、近年における急速なコンクリート高強度化の要求により、飛躍的に進展したといえる。コンクリートの高強度化の手法は、配合、成形方法、養生方法の工夫など多岐にわたるものがあるが、ここでは、材料的アプローチによる手法を中心にその最新動向を検証する。

2.1 混和剤

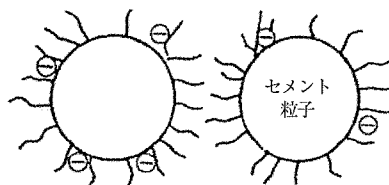
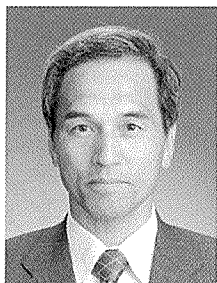
コンクリートを高強度化するには、水結合材比の低減が肝要であり、混和剤には高い減水性能が要求される。コンクリート用化学混和剤の技術進歩の歴史は、減水性能の向上の歴史でもある。とくに、1960年代初め日本において開発されたナフタリン系の高性能減水剤は、減水率の大幅な増大をもたらし、それまでの強度レベルを一変させた。高

性能減水剤は、1970年代に流動化剤の実用化へと発展し、1980年代中頃の高性能AE減水剤の登場につながった。減水剤によるセメント粒子の分散機構の解明も進み（図-1）、従来の静電反発作用に対し、立体障害作用による大きな分散効果を付与したポリカルボン酸系高性能（AE）減水剤が開発された。この結果、高強度コンクリートの製造・施工は非常に容易となった。現在では、強度レベルに応じた高性能（AE）減水剤の使い分けが一般化しており（図-2）、圧縮強度100～150MPaの超高強度クラスに対応したレベルまで開発・改良が進んでいる。さらに最近では、高強度コンクリートに固有の自己収縮を低減する機能を付与した高性能（AE）減水剤も開発されてきており^{4,5)}、化学混和剤も一つの機能を追求する時代から多機能化を目指す時代に移行しつつある。

静電的反発力による分散



立体障害作用による分散

図-1 減水剤によるセメント粒子の分散機構²⁾

*1 Rokuro TOMITA

本協会監事、太平洋セメント(株)
取締役常務執行役員



*2 Satoshi TANAKA

太平洋セメント(株) 中央研究所
研究開発1部 ダクトル技術
開発チームリーダー



*3 Makoto TANIMURA

太平洋セメント(株) 中央研究所
技術企画部 TBC チーム主任研
究員

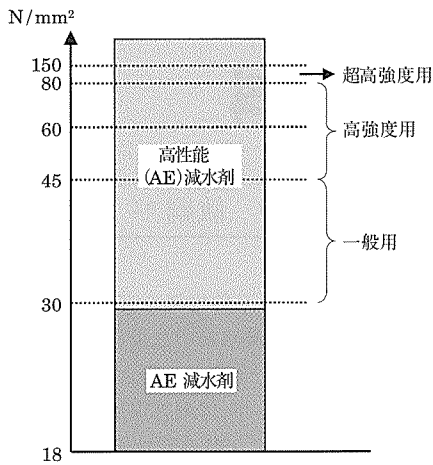


図 - 2 圧縮強度による化学混和剤使用区分の概略³⁾

2.2 混和材

高強度コンクリートに活用されている混和材として、高強度混和材、膨張材およびシリカフェウムがあげられる。

2.2.1 高強度混和材

高強度混和材の種類は、エトリンガイト系とスラグ石こう系に大別される。このタイプの混和材は、石こう系の材料を主原料に、二酸化けい素や酸化カルシウムなどを主成分としている。これら混和材成分がセメント中のエーライト等の鉱物と反応し、微細なエトリンガイトを多く生成して、組織を緻密化することにより高強度が得られるものと考えられている⁶⁾。エトリンガイト系高強度混和材の強度増進効果の例を図 - 3 に示す。高強度混和材の用途は、これまで高強度 PC パイルなど常圧蒸気養生を行うコンクリート工場製品が中心であったが、今後、部材の軽量化、長スパン化などが求められる橋梁等の PC 構造物への利活用が期待される。

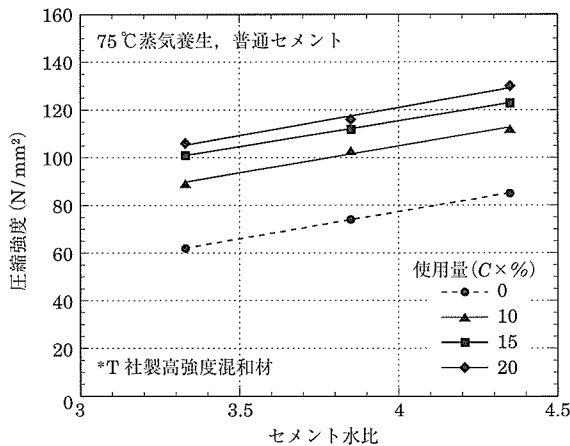


図 - 3 高強度混和材の使用効果

2.2.2 膨張材

コンクリートの高強度化に伴い自己収縮が増大することはよく知られており、水和発熱と自己収縮の双方の作用によるひび割れ発生への影響が指摘されている⁷⁾。材料的アプローチによる高強度コンクリートの自己収縮制御の研究

は比較的古くから行われており⁸⁾、膨張材の有効性が広く認められている^{9~11)}。一方、通常膨張材を水結合材比が 30% 程度以下の高強度コンクリートに比較的多量に用いると、一定期間経過後に異常な膨張を生じる場合がある¹²⁾。従来よりも比表面積を高めた膨張材による超強度コンクリートの自己収縮低減効果の例を図 - 4 に示すが、材齢初期の自己収縮が効果的に抑制され、長期的にも異常な膨張を生じる危険性が少なく、高強度コンクリート向けの膨張材として適切に活用できる。

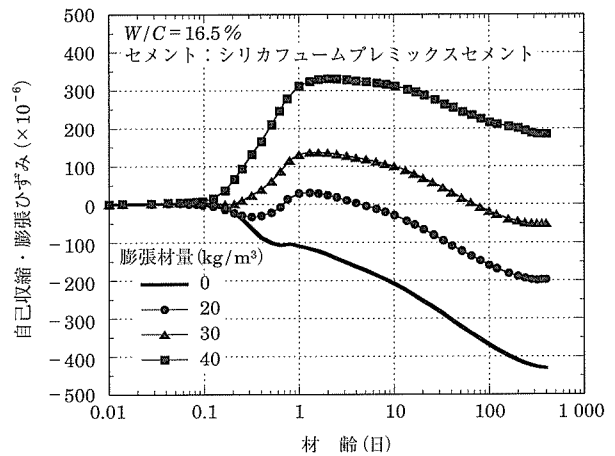


図 - 4 膨張材による自己収縮低減効果¹³⁾

2.2.3 シリカフェウム

シリカフェウムがコンクリートの高強度化に効果的であることは、DSP (Densified System Containing Homogeneously Arranged Ultra-Fine Particles) として広く知られている (図 - 5)。DSP 技術は、高性能減水剤による粒子分散効果、および微粒子による充填効果の双方を利用した手法であり、極低水セメント比であっても流動性を維持して、セメント硬化体組織の緻密化を可能にする。シリカフェウムについては、近年その産出国が多様化しており、コンクリートの強度レベルにより、発揮される特性が異なる可能性がある¹⁵⁾。また、最近では高強度コンクリートの流動性改善の観点より、従来の一般的なシリカフェウム (BET 法による比表面積: 20 m²/g 程度) に比べて比表面積の小さいシリカフェウムが注目されている^{16~18)}。200 MPa レベルの圧縮強度の安定的確保には、高性能 (AE) 減水剤とともに必須の材料といえ、今後も多様化するシリカフェウムの活用により新しい技術が生まれる可能性もあろう。

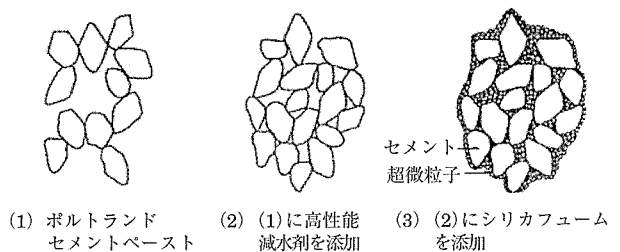


図 - 5 DSP の機構¹⁴⁾

2.3 セメント

PCでは早強ポルトランドセメントが使用されることが多く、圧縮強度レベルは30~50 MPa程度が一般的である。一方、圧縮強度60 MPa以上の高強度コンクリートになると、低水セメント比での流動性の確保や過大な水和発熱による長期的な強度増進の停滞の抑制のため、低発熱系のポルトランドセメントが有効であることが明らかとなっている¹⁹⁾。この種のセメントは反応速度が速く水和熱の大きいエーライト(C₃S)やアルミネート相(C₃A)が少ない反面、長期強度の発現に優れるビーライト(C₂S)の含有量が多い特徴を有する。さらに80 MPa以上の高強度になると、低発熱系ポルトランドセメント単独では十分な施工性を確保しつつ高強度を安定的に得ることが難しくなり、シリカフェュームや高炉スラグ微粉末などの混和材が用いられる。これらの混和材をセメント工場であらかじめプレミックスしたセメントが市販されており、品質の安定性や取扱いの簡便さにより、レディーミクストコンクリート工場で多く用いられている。高層鉄筋コンクリート造建築物(以下、高層RC)の設計基準強度と使用セメントの関係を表-1に示すが、高強度化の進展に対応したセメントの選択肢は着実に増えてきていることが理解される。

表-1 高層RCにおけるセメントの使用区分の概略

設計基準強度 (N/mm ²)	セメント種類
130~80	低熱ポルトランドセメント+シリカフェューム ^{*)}
	普通ポルトランドセメント+高炉スラグ微粉末+シリカフェューム ^{*)}
	高ビーライト系セメント+シリカフェューム
	普通ポルトランドセメント+高強度混和材
80~42	低熱ポルトランドセメント
	高ビーライト系セメント
	中庸熱ポルトランドセメント
60~39	普通ポルトランドセメント
50~42	高炉セメントB種

*) プレミックスセメントも市販されている

2.4 骨材

高強度コンクリートでは、セメントマトリクス強度が骨材強度に近くなり、骨材強度がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響が顕著になる。このため、高強度コンクリートに用いる骨材は、一般のコンクリートに求められる品質基準を満足することに加え、所定の強度が得られることをコンクリートで確認する必要がある。120 MPa級までは一般的に良質といわれる骨材が、150 MPa級を超えるものにはさらに厳選された骨材が用いられ、岩種としては、硬質砂岩砕石や安山岩砕石などが使用されることが多い。最近では、超高強度コンクリートの出現に伴い、その品質の安定化に向けて、岩種や産地だけでなく、砕石の力学特性に基づいた評価手法などの骨材品質評価手法の重要性が指摘されている²⁰⁾。

単位セメント量が多い高強度コンクリートでは、コンクリート中に含まれるアルカリ総量が高くなる。このため、アルカリ骨材反応性対策として、土木学会「コンクリート標準示方書」や日本建築学会「高強度コンクリート施工指

針(案)」では、無害と判定された骨材を用いるように限定している。

3. 高性能コンクリートの動向

高性能コンクリートとは、強度、作業性、耐久性などに優れ、従来のものに新しい機能を付与したコンクリートの総称であり、高強度、高流動、高耐久、超軽量などのキーワードがあげられる。ここでは、無機系結合材、細・粗骨材、化学混和剤を基本構成材料とした、従来の延長線上に位置づけることができる高強度コンクリートの実用化の最新動向に加え、セメント系材料の弱点である引張抵抗性を期待した、高強度・高じん性材料の技術動向を検証する。

3.1 高強度コンクリート

高強度コンクリート技術は、土木構造物ではPC構造の橋梁やタンク、オートクレープ養生等の特殊な促進養生を行うPCパイルなどのコンクリート工場製品を中心に発展してきた。一方、建築構造物では、1988年から5カ年にわたって実施された建設省総合技術開発プロジェクト「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」(New RC総プロ)が計画され、設計基準強度120 MPaまでのコンクリートの開発が進められた(図-6)。その結果、高層RCの分野において高強度化技術が大きく進展した(図-7)。2000年頃より100 MPa級のコンクリートを用いた超高層集合住宅の建設が急増し、2004年には設計基準強度130 MPaのコンクリートが実工事に使用された²³⁾。

高強度コンクリートと超高強度コンクリートの明確な区分はなく、土木学会「コンクリート標準示方書」では60~100 MPa、日本建築学会「建築工事標準仕様書」では36~60 MPa、同学会「高強度コンクリート施工指針(案)」では36~120 MPa、本協会の「高強度コンクリートを用いたPC構造物の設計施工規準」では60~160 MPaの高強度コンクリートを適用の対象としている。

クリープ・収縮特性はPC構造物の設計において重要な特性である。高強度コンクリートのクリープは、材齢が経過してから載荷される場合は普通強度のコンクリートと比べて相当に小さくなる。また、収縮特性については、若材

ゾーンⅠ : 高強度材料を用いた RC 造
 ゾーンⅡ-1 : 超高強度コンクリートを用いた RC 造
 ゾーンⅡ-2 : 超高強度鉄筋を用いた RC 造
 ゾーンⅢ : 超高強度材料を用いた RC 造

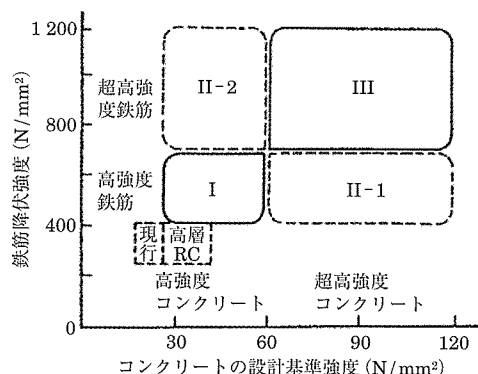


図-6 New RC 総プロにおける研究開発ゾーニング²¹⁾

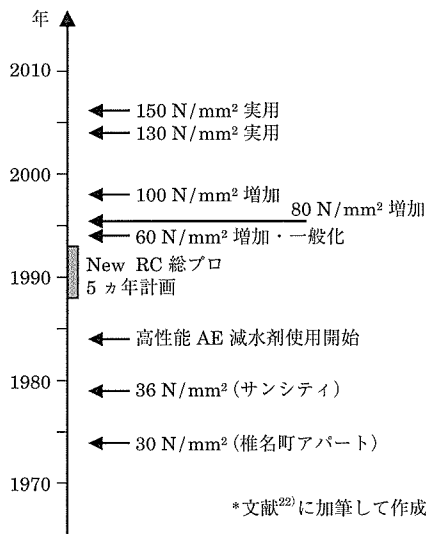


図 - 7 高層 RC における高強度コンクリートの変遷

齢時に大きな自己収縮が生じ、乾燥下の全体の収縮量に占める自己収縮の割合が高くなる、などの一般的な特徴がある。

3.2 超高強度コンクリート

現時点における高強度コンクリートの実用化レベルは、150 MPa まで至っている^{24, 25)}。PC 構造物では、120 MPa の幾つかの橋梁が施工されている^{26, 27)}。最新のトレンドとしては、200 MPa 級の実用化研究が活発化している^{18, 28~30)}。200 MPa レベルになると、砕石・砕砂の厳選に加えて、結合材や高性能減水剤の改良、さらに密度の高い細骨材や鋼繊維の混入などの多くの工夫がみられる。図 - 8 は 6 種類の骨材を使用し養生条件を変えた水結合材比 13.7% のコンクリート供試体での圧縮強度試験結果である。材齢の進行に伴う強度増進と加熱養生を組み合わせた場合に 200 MPa を超える強度が認められる。図 - 9 は配合や養生方法の異なる試験体からコアを採取して得た強度の結果である。高い温度を履歴した低水結合材比の条件で 200 MPa 超の強度を示している。

超高強度コンクリートを上回る性能の可能性については、モルタル供試体のレベルではあるものの、加圧とオートクレーブ養生の併用によって圧縮強度 385 MPa を得た事例³¹⁾や、さらに鉄粉を混入し 400 °C 加熱を施すことにより 800

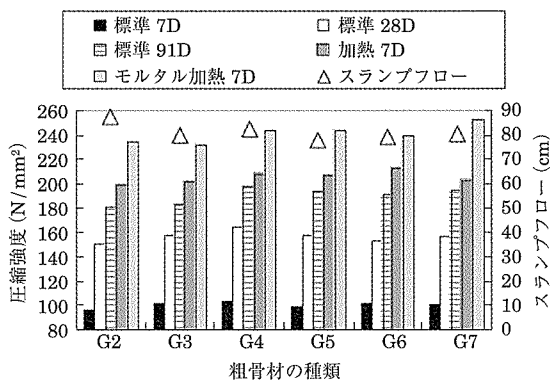


図 - 8 200 MPa 級超高強度コンクリートの強度特性¹⁸⁾

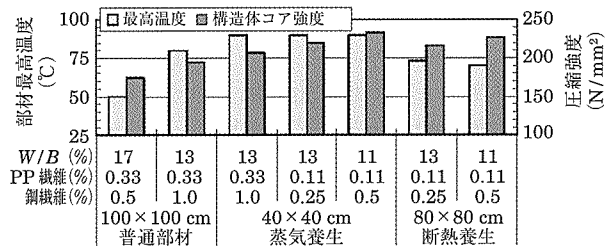


図 - 9 200 MPa 級超高強度コンクリートの構造体強度³⁰⁾

MPa 超を達成した研究³²⁾も報告されており、将来汎用的に 200 MPa 超のコンクリートが活用される可能性も期待できる。

3.3 超高強度繊維補強コンクリート

近年、200 MPa 以上の圧縮強度と繊維補強による高じん性を有した新しいセメント質複合材が開発された。この材料は、超高強度繊維補強コンクリート (Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete, 以下 UFC) と呼ばれており、土木学会において、その定義、使用材料、設計方法などの基本が指針案³³⁾に定められている。この指針案によると、UFC とは「圧縮強度の特性値が 150 MPa 以上、ひび割れ発生強度の特性値が 4 MPa 以上、引張強度の特性値が 5 MPa 以上の繊維補強を行ったセメント質複合材」と定義され、材料の性質・寸法なども規定されている。UFC の構成材料は粒径 2.5 mm 以下の骨材、セメントおよびポズラン材であり、水セメント比は 0.24 以下とされている。補強繊維は直径 0.1~0.25 mm、長さ 10~20 mm、引張強度が 2×10^3 MPa 以上で、2vol.% 以上混入したものを標準としている。現在この指針案に適合する材料として、2 種のものが使用されている^{34, 35)}。

UFC は自己充てん性に優れた材料であり、熱養生 (最高温度 90 °C - 48 時間保持が標準) を行うことで、緻密な硬化体組織となり、表 - 2 に示すようにきわめて高い物理的特性が得られる。また、繊維の架橋効果により優れた引張強度特性を示すことが、UFC の大きな特長の一つである。図 - 10 に、指針案に示される開口変位と引張応力の関係を示す。ひび割れ幅 0.5 mm 程度まで最大応力を保持し、その後の変位の増加に対して徐々に応力が軟化していく。このような引張強度特性を用いて終局曲げ耐力およびせん断耐力の算出が可能のため、部材のウェブ部や PC 定着部の補強鉄筋が不要になり、部材の大幅な薄肉化・軽量化を図ることが可能となる。

写真 - 1 は国内初のプレストレス UFC 歩道橋である。上床版厚 5 cm、ウェブ厚 8 cm と非常に薄く、従来のコンクリートでは実現できなかったような部材厚の構造物が可能となっている。また、スパン 50 m で端部の桁高が 0.55 m と低い桁高スパン比を実現している。これ以外にいくつもの歩道橋が施工されており、車道橋³⁶⁾、モノレール³⁷⁾の桁部材への適用もなされている。桁部材の軽量化によるメリットは、基礎構造の軽減や長スパン化として表れ、経済設計を図ることができる。現在進められている羽田空港再拡張工事において、海上に新設される D 滑走路の棧橋外周部分の床版に UFC が大規模に使用されている。海洋環境下

での高耐久性が期待されるだけでなく、汎用的なPC床版と比較して重量を50%以上低減でき、下部工の鋼材量の低減にも貢献している。

UFCは高強度であることに加えて、緻密で硬いマトリクスを有するため、塩化物イオンなどの劣化因子の侵入を大幅に低減し、また磨耗に対しても高い抵抗性を示す。このような特性を活かし、塩害や磨耗などからコンクリート構造物を保護するための埋設型枠、トンネル覆工コンクリートのライニングパネルとしての利用も多い³⁸⁾。

表-2 UFCと普通コンクリートとの物性比較

項目	単位	UFC ^{*)}	普通コン ^{**)}	備考
水セメント比	—	0.22	0.4～0.6	
圧縮強度	N/mm ²	180	20～40	特性値
ひび割れ発生強度	N/mm ²	8.0	0	特性値
引張強度	N/mm ²	8.8	0	特性値
弾性係数	10 ⁴ N/mm ²	50	25～30	特性値
クリープ係数	—	0.4	2.0	
乾燥収縮	10 ⁻⁶	50	600～800	
中性化深さ	mm	0	10～20	
塩化物イオン拡散係数	cm ² /年	0.0019	0.9～1.3	
凍結融解抵抗性	%	100	95～100	

*) 指針案中の標準配合粉体のケース

**) 土木学会標準示方書などを参考に平均的な値を例として示した

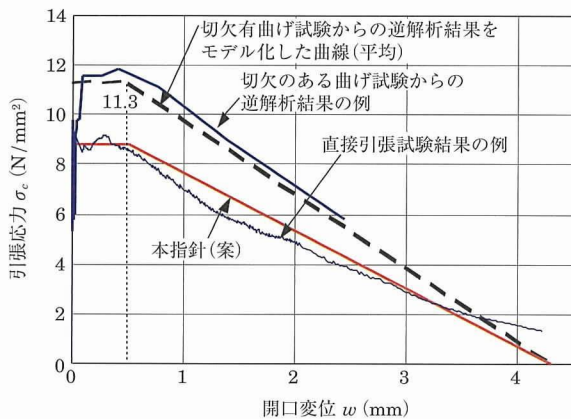


図-10 開口変位と引張応力の関係(引張軟化曲線)



写真-1 橋梁への適用例(酒田みらい橋, 酒田市)

4. 今後の展望

近年の技術開発がコンクリートの圧縮強度の増進を中心に展開され、PC構造物に一定の進歩をもたらしたことを述べてきた。しかし、品質の安定性、物理的特性のバランス、経済性など克服すべき課題も多く残されている。本稿の総括として、持続的な社会の発展に資するコンクリート材料技術の展望を概括的に取りまとめて結びとしたい。

① 環境への対応

近年、構造物建設に係る環境負荷の問題が問われている。100年の耐久性を有する半永久的構造物として、新設時の負荷は決して大きくはないという反論もできるが、環境の世紀といわれる現代では、環境負荷の定量的な把握は忠実に進められるべきであろう。負荷の大きい結合材や骨材など個々の材料や施工にかかるインベントリーの適切な評価手法は広く研究されており、また長期的な耐久性の予測精度を高める研究も進められている。維持・補修を含めた供用期間中の環境負荷が使用者の利便性と明瞭に対比されることが開かれたPC構造物発展への第一歩となるであろう。

② 限界への挑戦

長く100 MPaが実用上の限界といわれていたコンクリートの圧縮強度は、ここ10年200 MPaを巡る技術開発競争の時代に進んだ。この高い強度を活かせる分野の一つがPC構造物であり、部材のスリム化、スパンの長大化などの技術進歩に貢献できる可能性を秘めている。無機結合材を用いたコンクリートの理論的な強度の限界はさらに先にあり、200 MPaレベルのコンクリートの汎用化をステップに、今後も強度への挑戦は続けられるであろう。しかし、経済性とのバランスや圧縮に対する引張強度の低さなどが、材料として適用の可能性を低くしていることも事実で、この面での改善も大いに期待される技術領域である。

③ 品質の安定性

「超」が付く性能は注目を浴びる競争分野であるが、コンクリート本来の欠点の改善も将来の課題といえる。ひび割れの主因である乾燥収縮の低減やコントロール、低品位の材料の活用も含めた多様化する材料に適応した技術の進展、最大の欠点である品質変動の極小化、3R社会の原点であるコンクリート再利用の確立などの課題に対しても地道な実績の積重ねが進められるべきである。

超高速鉄道、大深度地下空間利用、海洋都市構想など新たなインフラ形成のインパクトが続くなかで、構造物の主体を成すコンクリートへの新たなニーズや、高機能化の期待が絶えることはないであろう。PC構造物を支える最重要基材のコンクリートに対して、斬新な構造物を可能にする夢の材料への開発の挑戦と安全安心な構造物を約束する高い品質安定性を確保する技術開発がさらに進歩していくことを祈念している。

参考文献

- 1) 下山善秀, 鷗澤正美, 谷村充: 高強度コンクリート技術, 太平洋セメント研究報告, 第140号, pp.47-59, 2001
- 2) コンクリート用化学混和剤協会: 高性能 AE 減水剤について, コンクリート工学, Vol.37, No.6, pp.79-81, 1999
- 3) 日本建築学会: セメント・コンクリート用混和材料およびそれらの基準化に関する技術の現状と論文集, p.71, 2006
- 4) 中西 博, 山田一夫, 石森正樹, 矢口稔, 岡沢智, 玉木伸二, 木之下光男: 次世代型多機能・多目的高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの諸性能, 太平洋セメント研究報告, 145号, pp.3-10, 2003
- 5) 木之下光男: 高強度コンクリート用ハイブリッド混和剤の開発, コンクリートテクノ, Vol.26, No.3, pp.17-22, 2007
- 6) 副田孝一, 佐久間隆司: コンクリート用混和材料の開発, 太平洋セメント研究報告, 第150号, pp.86-111, 2006
- 7) 丸山一平, 鈴木雅博, 中瀬博一, 佐藤良一: 温度履歴が RC 柱の初期応力・初期欠陥に及ぼす影響に関する実験的検討—超高強度コンクリートを用いた RC 柱の初期応力・初期欠陥に関する研究その1—, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.629, pp.1035-1042, 2008
- 8) 田澤榮一, 宮澤伸吾: セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材および配合の影響, 土木学会論文集, No.502 / V-25, pp.43-52, 1994
- 9) 田中敏嗣, 三瀬あゆこ, 早川智浩, 佐藤良一: 高強度コンクリートの低収縮化と拘束応力に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.1123-1128, 1999
- 10) 谷村充, 兵頭彦次, 大森啓三, 佐藤良一: 高強度コンクリートの収縮応力の低減化に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.1075-1080, 2001
- 11) 高田和法, 柳井修司, 渡部貴裕, 一宮利通: 超高強度コンクリートの自己収縮低減に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1007-1012, 2003
- 12) 盛岡実, 坂井悦郎: 膨張材を混和した低水結合材比モルタルの膨張挙動, 膨張コンクリートによる構造物の高機能化/高耐久化に関するシンポジウム, pp.103-108, 2003
- 13) 郭度連, 谷村充, 佐竹紳也, 柴垣昌範: 膨張材による超高強度コンクリートの収縮低減, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.471-476, 2008
- 14) Bache, H.H.: Densified Cement / Ultra-Fine Particle-Based materials, Second International Conference on Superplasticizers in Concrete, Ottawa, Canada, 1981
- 15) JIS A 6207:2006 (コンクリート用シリカフューム) 解説
- 16) 神代泰道, 一瀬賢一, 都築正則, 齋藤賢: ジルコニア起源シリカ質微粉末混合セメントを用いた超高強度コンクリートの性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1057-1062, 2005
- 17) 石田聡, 松本健一, 谷村充: シリカフュームプレミックスセメントを用いた超高強度コンクリートの基本性状, 太平洋セメント研究報告, 第153号, pp.22-35, 2007
- 18) 小出貴夫, 長岡誠一, 西本好克, 河上浩司: 200 N/mm² 級超高強度コンクリートにおける使用材料が強度特性に及ぼす影響の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.61-66, 2008
- 19) 寺田了司, 富田六郎, 田中敏嗣: ビーライト系ポルトランドセメントを用いたコンクリートの諸特性, セメント・コンクリート論文集, No.47, pp.142-147, 1993
- 20) 渡邊悟士, 陣内浩: 超高強度コンクリートに注目した天然骨材選定例, コンクリート工学, Vol.46, No.5, pp.30-33, 2008
- 21) 室田達郎, 青山博之, 平石久廣: New RC プロジェクトの経緯および概要, コンクリート工学, Vol.32, No.10, pp.6-10, 1994
- 22) 菅俣匠, 太田晃: 100~150 N/mm² 級超高強度コンクリートと高性能 AE 減水剤, セメント・コンクリート, No.723, pp.7-17, 2007
- 23) 黒岩秀介, 河合邦彦, 小田切智明, 嵐山正樹: Fe130 N/mm² の高強度コンクリートを用いた超高層集合住宅の施工, コンクリート工学, Vol.42, No.10, pp.283-290, 2003
- 24) 陣内浩, 黒岩秀介, 寺内利恵子, 阿部剛士: 設計基準強度 150 N/mm² の低収縮型超高強度コンクリートの製造と施工, セメント・コンクリート, No.723, pp.18-24, 2007
- 25) 三井健郎, 小島正朗, 高尾全, 佐藤敏之: 設計基準強度 150 N/mm² 超高強度コンクリートによる超高層集合住宅の施工, セメント・コンクリート, No.723, pp.25-31, 2007
- 26) 岡本裕昭, 一宮利通: 低収縮型高強度コンクリートの PC 橋への適用—秋葉原公共デッキ, プレストレストコンクリート, Vol.48, No.1, pp.28-33, 2006
- 27) 桜田道博, 大山博明, 森拓也, 二羽淳一郎: 高強度繊維補強モルタルを使用した PC 構造物, コンクリート工学, Vol.45, No.7, pp.46-53, 2007
- 28) 都築正則, 一瀬賢一, 神代泰道: 150 N/mm² を超える超高強度コンクリートの各種性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.121-126, 2007
- 29) 渡邊悟士, 陣内浩, 黒岩秀介, 山本佳城, 並木哲, 寺内利恵子: 設計基準強度 200 N/mm² の超高級度コンクリートの開発に関する検討, 日本建築学会大会講演梗概集 (中国), pp.1077-1078, 2008
- 30) 小島正朗, 三井健郎, 辻大二郎, 鴉越元紀: Fe200 N/mm² 超高強度コンクリートの開発 (その1) フレッシュコンクリートおよび圧縮強度の発現性状, 日本建築学会大会講演梗概集 (中国), pp.1087-1088, 2008
- 31) 内田裕市, 片桐誠: さらなる超高強度高靱性コンクリートの可能性について, コンクリート工学, Vol.44, No.12, pp.16-22, 2006
- 32) Richard, P. and Cheyrezy, M.: Composition of Reactive Powder Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.7, pp.1501-1511, 1995
- 33) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案), コンクリートライブラリー, 第113号, 2004
- 34) 下山善秀, 鷗澤正美: ダクトル (Ductal®) の特性と応用分野, 太平洋セメント研究報告, 第142号, pp.55-62, 2002
- 35) 日紫喜剛啓, 五味秀明, 山田真人, 益子博志, 一宮利通: 超高強度繊維補強コンクリート「サクセム®」の開発, コンクリートテクノ, Vol.25, No.9, pp.41-46, 2006
- 36) 黒岩正, 岩崎 郁夫, 大熊光: 超高強度繊維補強コンクリートを用いた国内初の道路橋, コンクリート工学, Vol.43, No.10, pp.39-44, 2005
- 37) 田中良弘, 小林隆, 石堂正之, 大川真佐雄: 超高強度繊維補強コンクリートを適用した長大スパン・モノレール桁の技術開発, コンクリート工学, Vol.45, No.11, pp.27-34, 2007
- 38) 土木研究センター: 建設技術審査証明報告書「高強度セメント系材料を用いた高耐久性薄肉埋設型枠「ダクトルフォーム」, 2002.3
【2008年1月22日受付】