特集>>>　新しい建設材料

# 鋼繊維補強 PFC（無孔性コンクリート）の開発と適用

河　野　克　哉

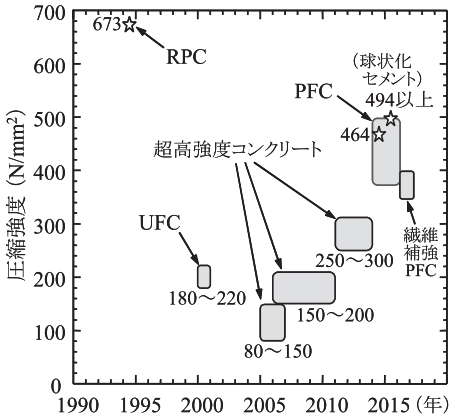
型枠への流し込み成型で最高水準の圧縮強度を得ることを目的として，最密粒度となる混合粉体のセメント混錬物に対して脱型直後の強制吸水処理および2段階の熱養生を行うことで，圧縮強度 400 N/mm$^2$ 以上を発現する無孔性の硬化セメントマトリクスが得られることを明らかにした。このマトリクスを鋼繊維で補強することで超高強度化にともなう脆性破壊を抑制して，曲げ特性，耐摩耗性，耐衝撃性および遮塩性を向上させるとともに，外ケーブル方式プレストレスト梁部材に適用することや，浸食を受けた海岸擁壁の補修パネル部材に適用することを検討した。

**キーワード**：最密粒度，無孔性，超高強度，鋼繊維補強，プレストレストコンクリート部材，補修パネル部材

## 1. はじめに

### (1) 超高強度コンクリート開発の現状

超高強度コンクリートは，構造物の超長大化，超高層化および超高寿命化に寄与でき，その開発で到達した圧縮強度は年々向上している（**図―1**）。国内では，2000 年頃に圧縮強度 200 N/mm$^2$ の超高強度繊維補強コンクリート（Ultra high strength fiber reinforced concrete，UFC）が開発され，橋梁の桁や滑走路の床版などのプレキャスト PC 部材に適用された[1)]。2013 年には圧縮強度 300 N/mm$^2$ の超高強度コンクリートが開発され，建築物のプレキャスト柱部材に用いられた[2)]。海外では，圧縮強度 673 N/mm$^2$ を発現する反応性粉体コンクリート（Reactive Powder Concrete，RPC）が開発され[3)]，1994 年には日本国内に出願された。




図―1　超高強度コンクリート開発で到達した圧縮強度の推移

ただし，RPC は，ファインセラミックスの製法であるホットプレス成型によるもので，型枠に打ち込むことで任意の形状が得られるコンクリートの大きな長所を犠牲にしている。このため，筆者らは実用化が可能なように通常の型枠に流し込んで成型することで，最高水準の圧縮強度を得るための開発を行った[4)]。

### (2) 最高水準の圧縮強度を発現するコンクリート開発

空隙率 p の均質な固体の強度は，$S = S_0 \cdot e^{-kp}$，（$S_0$：空隙率が 0 のときの固有の強度，k：定数）と表され，空隙率に反比例し，多くの固体材料で $S/S_0$ と空隙率との関係が同一曲線となる[5)]。また，Griffith の理論では，ヤング係数 E の薄い弾性体の板が内部に長さ 2c の扁平な楕円形の空隙を含むとき，この薄板の破壊強度は $\sigma_u = [(2E\gamma)/\{\pi_c(1-\nu^2)\}]^{1/2}$，（$\gamma$：単位面積当りの表面エネルギー，$\nu$：ポアソン比）で示される[6)]。すなわち，多孔体では，空隙が減少するほど指数的に強度が増加し，さらに空隙は微細であるほど強度が低下しにくいことを表している。実際に，Powers がモルタル中のゲル空隙量の減少とともに圧縮強度が指数的に向上すること[7)]を，田澤がモルタル中の空隙径の減少とともに高い圧縮強度が得られること[8)]を検証した。このように圧縮強度の向上には，硬化組織中の空隙を微細化して無くすこと，すなわち無孔性コンクリート（Porosity Free Concrete，PFC）を開発することが必要となる。

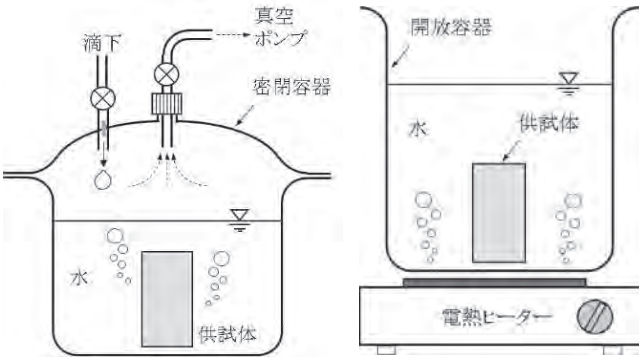
## 2. PFC の開発

### (1) 構成材料

PFC は，ビーライト系ポルトランドセメント（C）にシリカフューム（SF）を加えてポリカルボン酸系の高性能減水剤にて低水結合材比にすることを基本とする。そして，これら大小 2 つの粉体粒子の空隙を第 3 の中間粒子（M）を加えて空隙を埋めることで，少ない水量で流動できる濃密な粉体混合物として，硬化後の強度を高める。粉体の粒度分布を考慮でき，混合する粉体の成分数に制約が無い鈴木らの多成分粒子ランダム充填シミュレーション（鈴木モデル式）[9] を参考にして，C（比表面積 3330 $cm^2/g$）と SF（比表面積 20 $m^2/g$）を混合したときの空隙率を最小にできる M の粒度分布を見出した。鈴木モデル式から導いた最適な粒度分布をもつ M は建設分野以外の他産業で用いられている超微粉末を複数組み合せて試作し，C，SF および MS の各粉体の構成比率は，それらを混合したときの空隙量が鈴木モデル式で最小になるように決定した。なお，PFC は，UFC の材料設計コンセプトと同様に強度低下を抑制する観点から砂利（粗骨材，粒径 5 mm 以上）は用いず，強度増進に有効な超高強度砂（最大粒径 0.3 mm）のみとし，さらに最密粒度の混合粉体を分散できる新しい高性能減水剤を採用することで，フロー 300 mm 程度（無振動）の高流動性とした。

### (2) 製造方法

最密粒度の混合粉体は，水結合材比 15％にてミキサで練り混ぜて型枠に流し込んだ後，蒸気養生（最高温度 40 ℃，12 時間，1 気圧）を行って材齢 1 日で脱型し，その直後に吸水処理を実施する。これは，少ない水で練り混ぜられた場合，セメントとの反応で必要となる水の不足分を外部から内部に補給する目的がある。i）脱型直後の供試体を予め設置した密閉容器内を真空ポンプで減圧した後，完全に浸漬するまで水を滴下することで内部に吸水する方法（脱気吸水処理，**図―2**（a））と，ii）開放容器内で脱型直後の供試体を完全に水中に浸漬した状態で電熱源にて 100 ℃に達するまで加熱して煮沸させた後，水温が 20 ℃になるまで水中にて自然冷却することで内部へ吸水する方法（煮沸吸水処理，**図―2**（b））がある。これらの吸水処理のいずれか一方を行ってから，蒸気養生（最高温度 90 ℃，48 時間，1 気圧）を行った後，さらに加熱養生（最高温度 180 ℃，48 時間，1 気圧）を行う 2 段階の熱養生に供することで硬化反応を促進させる。こ




(a) 脱気吸水処理　　(b) 煮沸吸水処理

図―2　脱型直後の強制吸水処理の方法

のようにして製造した PFC は，450 ～ 464 $N/mm^2$ の圧縮強度（$f_c'$）を発現し，この硬化組織の反射電子像から算出したマイクロ空隙は体積率で 1％未満となり（UFC の場合で 7％程度），きわめて空隙が少ないことがわかった [4]。

## 3. PFC の適用

### (1) 特性

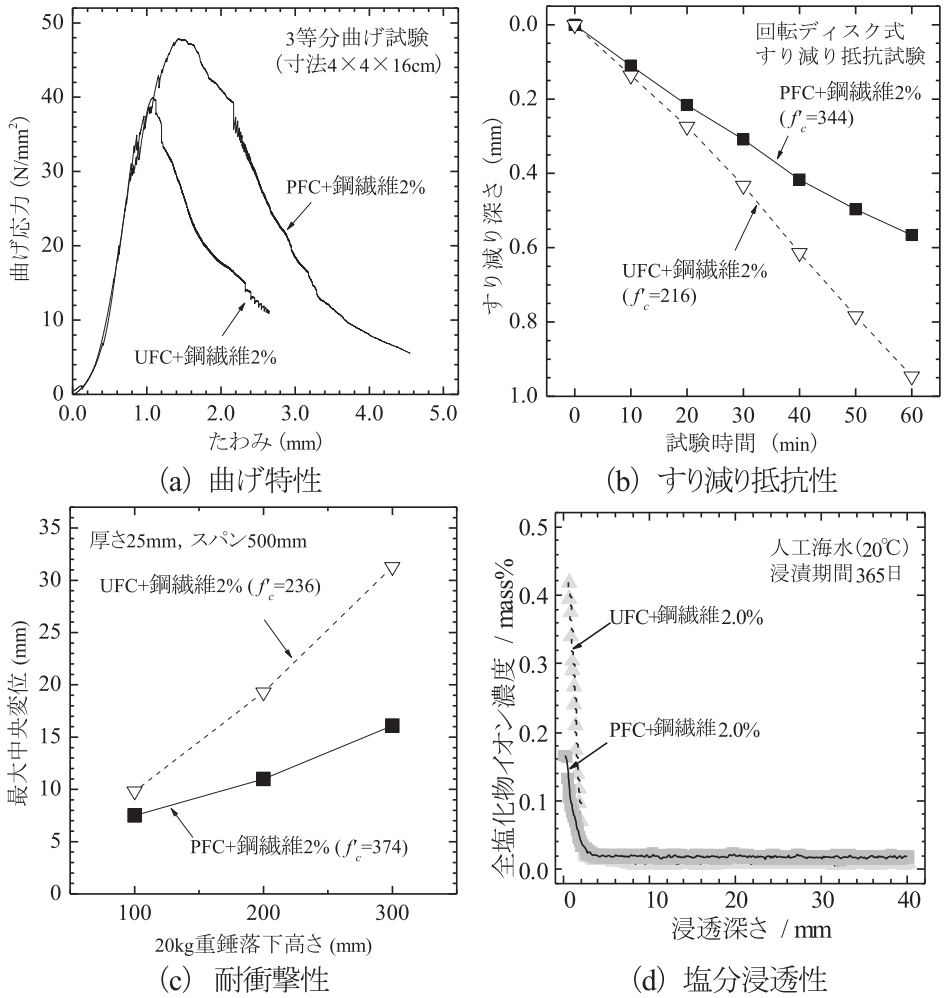
圧縮強度が 400 $N/mm^2$ を超えるような PFC のマトリクスは破壊時に著しく脆性化するため，その実用化に当たってはマトリクスを繊維で補強することが必須となる。PFC のマトリクスを 2 vol.％の鋼繊維（直径 0.2 mm ×長さ 15 mm，引張強度 2.8 GPa，引張弾性率 210 GPa）で補強したときの圧縮強度は，340 ～ 380 $N/mm^2$ 程度となる。これは，フローを 270 mm 程度に抑制してマトリクスとの密度差による鋼繊維の沈降を防止し，通常のミキサによる練混ぜでエントラップトエアの混入が避けられないことによるものである。鋼繊維補強 PFC は，曲げ試験結果，すり減り抵抗性試験結果，重錘落下衝撃試験結果および人工海水浸漬試験結果（**図―3**（a）～（d））から，UFC よりも曲げ特性，耐摩耗性，耐衝撃性および遮塩性が向上できることがわかった。

### (2) 実用化

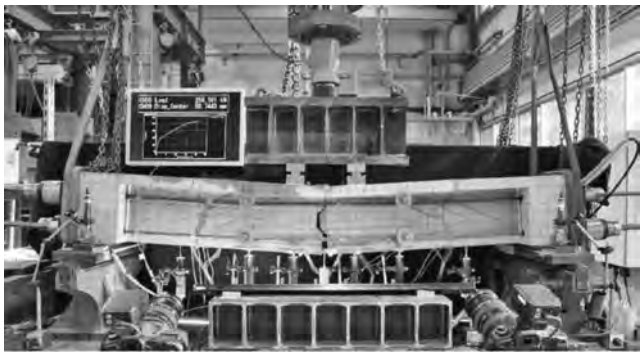
PFC は，その高い圧縮強度によって大きなプレストレスを蓄積できることからコンクリート部材の軽量化に寄与できるともに，無孔性に近い硬化組織によってコンクリート部材の高耐久化を可能にする。このような PFC の特性を活用した適用例を以下に述べる。

（a）プレストレストコンクリート部材への適用

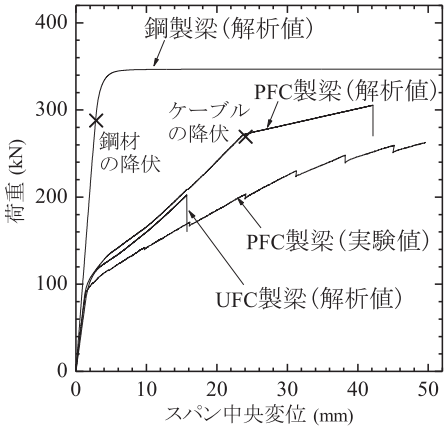
鋼繊維補強 PFC の T 断面セグメント 4 個を外ケーブルで連結した PC 梁（長さ 1860 mm，ウェブ厚さ




図―３　鋼繊維補強 PFC の各種特性



写真―１　鋼繊維補強 PFC を用いた外ケーブル方式 PC 梁の載荷試験




図―４　鋼繊維補強 PFC 製梁の耐荷性能（同一重量の鋼製梁や UFC 製梁との比較）

40 mm，せん断スパン有効高さ比 3.43）を製作し（**写真―１**），梁下縁に 40 N/mm$^2$ のプレストレスを導入して載荷試験に供することで，構造部材に対する適用性を検討した。鋼繊維補強 PFC 製 PC 梁の荷重－たわみ関係の載荷実験結果と FEM 解析結果を，同じ T 断面で同じ重量となる UFC 製梁の場合ならびに I 型断面で同じ重量となる鋼製梁の場合の解析結果と比較すると，PFC 製梁の場合では，最大荷重が UFC 製梁の場合よりも倍増し，鋼製梁の場合とおおよそ同程度まで向上できることがわかった（**図―４**）。

（b）浸食を受けた海岸擁壁の補修パネル部材への適用

国道 336 号（北海道）の黄金道路と呼ばれる太平洋側の海岸擁壁コンクリートは，激しい波が運ぶ砂や礫で磨耗や衝撃を受けるとともに，海水や凍結融解の作用などの複合的な要因で著しい浸食を受けている（**写**

写真―２　海岸擁壁の浸食（黄金道路）

写真―３　鋼繊維補強 PFC 製パネルを用いた補修

**真―２**）。そのため，鋼繊維 PFC 製パネル（高さ 2124 mm ×幅 1000 mm ×厚さ 100 mm，圧縮強度 350 N/mm$^2$）を，浸食された海岸擁壁の前方に設置してから裏込めのレディーミクストコンクリートにて固定させる補修工事に適用し，2018 年 10 月に施工した（**写真―３**）。

## 4. おわりに

圧縮強度 400 N/mm$^2$ を発現する PFC マトリクスを開発し，そのマトリクスを鋼繊維で補強することで脆性破壊を抑制し，UFC の場合にくらべて，曲げ特性，耐摩耗性，耐衝撃性および遮塩性が向上した。鋼繊維補強 PFC を外ケーブル方式プレストレスト梁部材に適用し，耐食性を有する鋼部材の代替となる可能性を見出した。また，超過酷環境下で激しい浸食を受けた海岸擁壁の補修工事に鋼繊維補強 PFC 製パネルを適用し，PFC の耐久性を長期に渡って実地検証する予定である。

**謝　辞**

PFC の適用に向けた研究では，東京工業大学二羽研究室，国土交通省北海道開発局帯広開発建設部広尾工事事務所，㈱構研エンジニアリングおよび室蘭工業大学小室・栗橋研究室の関係者の皆様に多大なるご協力を頂きました。ここに記して深謝致します。

JCMA

《参考文献》

1）Hiroyuki Musha, Hikari Ohkuma, Takeshi Kitamura：Innovative UFC structures in Japan, Proceedings ofr RILEM-fib-AFGC International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, pp.17-26,（2013）
2）今井和正，山本佳城，加藤雅樹，村松晃次：設計基準強度 300 N/mm$^2$ 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）
3）鵜澤正美，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）
4）河野克哉，中山莉沙，多田克彦，田中敏嗣：450 N/mm$^2$ 以上の圧縮強度を発現するセメント系材料の製造方法と硬化組織の変化，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.1443-1448，（2016）
5）P. Kumar Mehta, Paulo J. M. Monteiro: 2nd Edition Concrete-Microstructure Properties, and Materials-, Prentice-Hall, pp.44-46,（1993）
6）岩崎訓明：コンクリート・セミナー１ コンクリートの特性，共立出版，pp.73-75，（1975）
7）T. C. Powers：Journal of American Ceramics Society, Vol.41, No.1, pp.1-6,（1958）
8）田澤榮一：樹脂含侵コンクリートに関する基礎研究，東京大学博士論文，（1978）
9）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系ランダム充填層の空間率，化学工学論文集，第 11 巻，第 4 号，pp.438-443，（1985）

［筆者紹介］
河野　克哉　（こうの　かつや）
太平洋セメント㈱
中央研究所　第２研究部　高機能コンクリートチームリーダー