

繊維補強PFC(無孔性コンクリート)の開発と適用

太平洋セメント(株) 正会員 博(工) ○河野 克哉
 太平洋セメント(株) 正会員 修(工) 安田 瑛紀
 太平洋セメント(株) 博(工) 兵頭 彦次
 太平洋セメント(株) 修(工) 小亀 大佑

キーワード：無孔性コンクリート，繊維補強，PC構造，海岸擁壁

1. はじめに

1.1 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し，その研究開発で到達した圧縮強度は図-1のように年々向上している。国内では，2000年頃に圧縮強度200N/mm²程度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年に圧縮強度300N/mm²の超高強度コンクリートが開発され，建築のプレキャスト柱部材に適用された²⁾。海外では，圧縮強度673N/mm²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年に日本国内に出願された。しかし，RPCは，特殊製法の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方法で最高水準の圧縮強度を得るための研究を行った⁴⁾。

1.2 超高強度を発現する新しい材料開発のコンセプト

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 $\sigma_u=[(2E\gamma)/\{\pi c(1-\nu^2)\}]^{1/2}$ (γ : 単位面積当りの表面エネルギー， ν : ポアソン比)で表される⁶⁾。つまり，多孔体では，空隙が減少すると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低下が生じにくくなることを示唆している。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⁾を検証している。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し，できるだけ無孔性としたコンクリート(Porosity Free Concrete, PFC)の開発が重要となる。

2. PFCマトリクス of 構成材料と製造方法

2.1 構成材料の最適化

PFCのマトリクスは，低熱ポルトランドセメントにシリカフュームを加えてから高性能減水剤にて低水結合材比にすることを基本とし，これら大小2つの粉体粒子の隙間(空間)を第3の中間粒子粉体を加えて減らすことで，さらに少ない水量で流動できる濃密な粉体混合物とし，硬化後の強度を高めることができる。このため，粉体の粒度分布を考慮した上で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，低熱ポルトランドセメント(比表面積3330cm²/g)とシリカフューム(比表面積20m²/g)を混合したときの空隙率を最小にできる中間粒子の粒度分布を見出した。この計算では，図-2に示すように m 成分内の着目粒子と接触粒子の接触パターンは $\varepsilon(1, 1)$, $\varepsilon(1, 2)$, \dots , $\varepsilon(m, m)$ の m^2 種類となり，各接触パターンで幾何学的な粒径比から

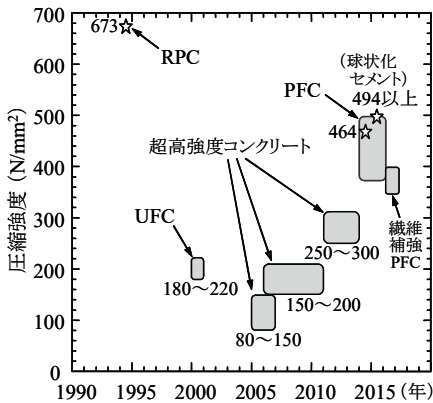


図-1 コンクリート開発の到達強度

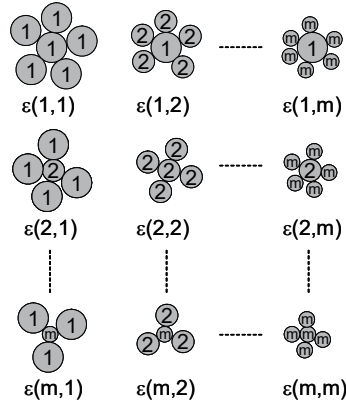


図-2 粒子接触の組合せ

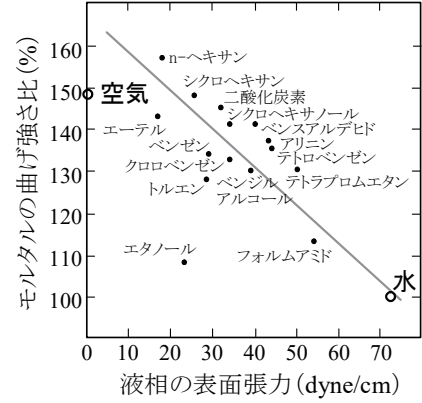


図-3 液体で満たした多孔体強度

算出される m^2 種類の部分的な空間率を組み合わせることで、 m 成分全体の空間率 ϵ が表現される。鈴木モデル式から導いた最適な粒度分布をもつ中間粒子粉体を、建設分野以外の他産業で用いられている超微粉体を複数組み合わせることで製作した。なお、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粗骨材は用いず、強度増進に有効な超高強度砂を用い、さらに最密粒度をもつ結合材の混合粉体を分散できる新規高性能減水剤を採用することで、フロー300mm程度(無振動)の高流動性が得られる。

2.2 製造方法の最適化

最密粒度の結合材は、通常の流し込みで型枠に打ち込んだ後に1~2日で脱型し、その直後に吸水処理を実施する。これは、きわめて少ない水で練り混ぜられた場合にセメントとの反応に必要な水分が圧倒的に不足しており、その反応水を外部から内部に補給する目的がある。i)密閉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、真空ポンプにて上層空気を排出させて減圧することで供試体内部に吸水する方法(脱気吸水処理)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供試体内部へ吸水する方法(煮沸吸水処理)がある。これらの吸水処理のいずれか一方を施してから、蒸気養生(最高温度90℃,1気圧,48時間)を行った後、さらに加熱養生(最高温度180℃,1気圧,48時間)を行うといった2段階の熱養生に供することで硬化反応を促進させる。このように製造したPFCマトリクスは、450~464N/mm²の圧縮強度を発現し、硬化組織の反射電子像を画像解析から内部空隙率は約0.2vol.%と算出された⁴⁾。なお、多孔体の液体中強度 σ は、Benedicksの法則に従って $\sigma \propto (\gamma_s - \gamma_l)$ (γ_s : 固体の表面張力, γ_l : 液体の表面張力)のように空隙に保持された液体の表面張力とともに直線的に低下し、このことは、図-3に示すようにモルタルでも成立することが検証されている¹⁰⁾。脱型時に内部空隙に供給された水は90℃の蒸気養生過程でセメントと反応して空隙を充填し、その水和反応で余剰となった水は180℃の加熱養生過程で外部に蒸発することで空隙から表面張力が高い水がなくなり、PFCマトリクスの強度増進に寄与したものと考えている。

3. PFCの実用化

3.1 構造物に対する適用の検討

PFCは、きわめて高い圧縮強度によって断面縮小や大きなプレストレスの蓄積を可能にし、コンクリート部材の超軽量化をもたらし、長大橋や超高層ビルにおいてPFCを適用することで、その長さや高さを限界まで伸ばした新構造形式の実現が期待できる。また、PFCは、無孔性に近い硬化組織によってコンクリート部材の超高耐久化がもたらされ、従来の超高強度コンクリートでは十分に対応できなかった超過酷環境においても長期間の供用を可能にすることが期待される。ただし、圧縮強度が400N/mm²を超えるようなPFCは

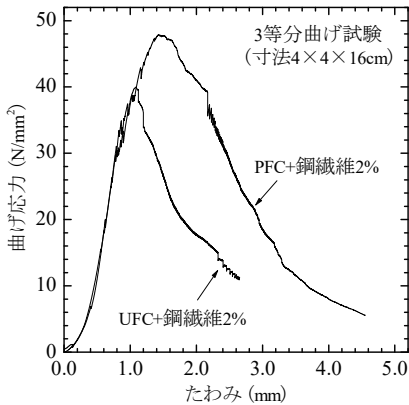


図-4 PFCの曲げ応力-たわみ関係

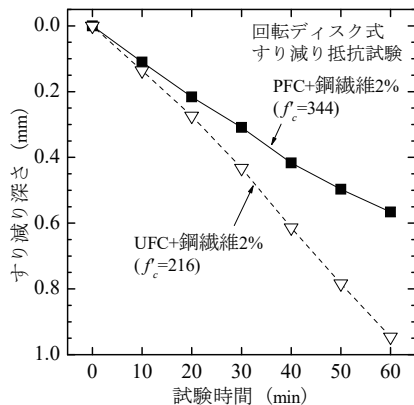


図-5 PFCの耐摩耗性

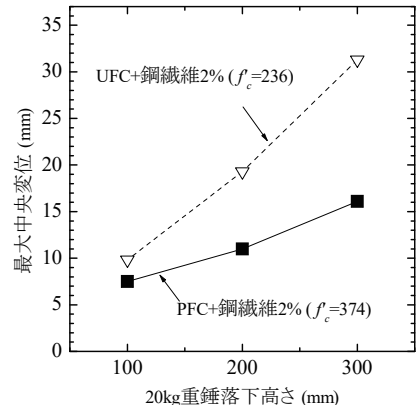


図-6 重錘落下による PFC の耐衝撃性

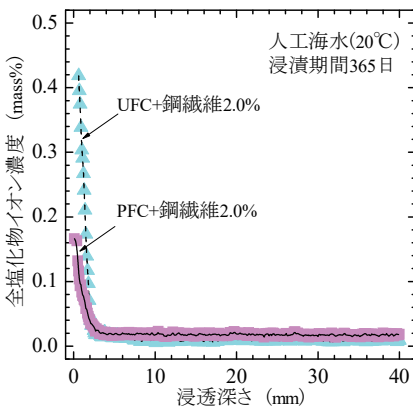


図-7 PFCの塩化物イオン浸透性

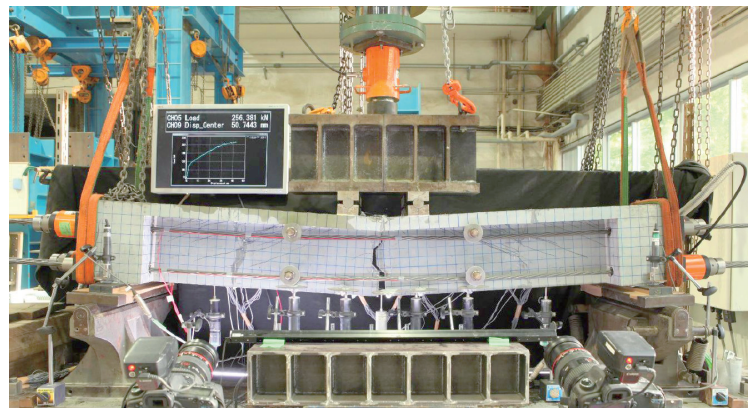


図-8 繊維補強 PFC を用いた外ケーブル方式 PC 梁の荷重試験

破壊が著しく脆性化するため、実用化には PFC マトリクスを繊維で補強することが必須となる。図-4、図-5、図-6 および図-7 は、PFC ならびに UFC のマトリクスに鋼繊維(直径 0.2mm×長さ 15mm, 引張強度 2.8GPa, 引張弾性率 210GPa)を 2vol.%混入したときの曲げ試験, すり減り抵抗性試験, 重錘落下衝撃試験および人工海水浸漬試験の各結果を示したものである。繊維補強 PFC は、UFC とくらべて曲げ特性, 耐摩耗性, 耐衝撃性および遮塩性がいずれも向上した。なお、PFC マトリクスに鋼繊維を混入する場合、フローを 270mm 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する必要があり、この場合は通常のみキサによる練混ぜでエントラップトエアが混入し、振動締固めを行っても圧縮強度は 350~380N/mm² 程度になる。

3.2 新構造形式における適用

図-8 のように鋼繊維を 2vol.%混入した 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 1860mm, ウェブ厚さ 40mm, せん断スパン有効高さ比 3.43)を製作し、梁下縁に 40N/mm²のプレストレスを導入して荷重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。図-9 は、鋼繊維補強 PFC 製 PC 梁の荷重-たわみ関係の荷重実験結果と鋼繊維補強 PFC の構成則を組み込んだ FEM 解析結果である。なお、PFC 製梁の場合に対して、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を併記した。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。

3.3 超過酷環境における適用

図-10 は、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の浸食状況を示したものである。この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

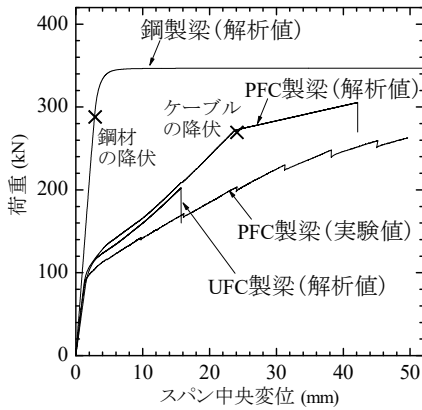


図-9 PFC 製梁の耐荷性能



図-10 海岸擁壁の浸食状況



図-11 PFC パネルを用いた補修

の複合的な要因で著しい浸食を受けている。そのため、PFC パネル(高さ 2124mm×幅 1000mm×厚さ 100mm, 圧縮強度 350N/mm², 鋼繊維量 2.0vol.%)を, 図-11 に示すように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た(2018年10月施工)。

4. まとめ

圧縮強度400N/mm²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いずれも向上した。この鋼繊維補強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PFCパネルを適用し, 供用中のPFCの耐久性を長期に渡って調査することで実地検証する予定である。

参考文献

- 1) Hiroyuki Musha, Hikari Ohkuma, Takeshi Kitamura : Innovative UFC structures in Japan, Proceedings of 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
- 3) 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
- 4) 河野克哉, 中山莉沙, 多田克彦, 田中敏嗣 : 450N/mm²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
- 10) 堀素夫 : 表面エネルギーから見たセメント硬化体の強さ, 窯業協会誌, Vol.70, No.7, pp.54-59, 1962