

# 超高強度繊維補強セメント系材料の圧縮応力下におけるひびわれ進展挙動に関する高速度計測と可視化

市民工学専攻：渡邊 大基

指導教員：三木 朋広

## 1. 研究背景と目的

近年、約 200~250MPa ほどの圧縮強度がある超高強度繊維補強コンクリートの実用化が展開されている。また最近では、型枠に流し込んで世界最高強度の硬化体を成型できるセメント材料が開発され、圧縮強度が 464MPa を発言する超高強度セメント硬化体<sup>1)</sup>が実現された。このような材料の急激に進展する圧縮破壊現象を理解するためには、破壊に至る瞬間を計測することが重要である。そこで本研究は、高速度カメラとデータロガーを用いて急激に進展する破壊現象をとらえ、圧縮強度と繊維補強の有無が破壊進展にどのような影響を及ぼすかについて検討することを目的とする。円柱供試体に対して圧縮載荷試験を行い、実験より得られた画像を用いて、いくつかの破壊基準を設けることで供試体によって異なる破壊進展を比較した。

## 2. 実験概要

供試体は直径 50mm、高さ 100mm の円柱であり、3 種類の材料を用意した。1 つは市販のプレミックス粉体を使用した超高強度繊維補強コンクリート (UFC) であり、残りの 2 つは最密充填となる粉体構成とした超高強度セメント硬化体の試作供試体 (CPC) と、それと等しい材料構成の供試体 (CPC2) である。表 1 に示す条件のもと、UFC に関しては繊維混入率の有無の 2 つの条件に対してそれぞれ 3 体、CPC、CPC2 に関してはそれぞれの条件に対して 1 体の円柱供試体を対象として、油圧式 2000kN 万能試験機を用いて圧縮載荷試験を行った。

本研究では、急激に進展する圧縮破壊挙動を計測するために、高速度カメラ (8000fps) とデータロガー (20000fps) を用いた。撮影時間は 3.488 秒、つまり 27904 フレームの画像、69760 個のデータを得た。

## 3. 実験結果

圧縮強度において、前出の表 1 に示すように、どの供試体においても高い圧縮強度を示した。

また、いずれの供試体においても非常に脆性的な破壊挙動を示したが、破壊に至る性状は供試体条件によってそれぞれ異なるものであった。そこで、破壊の種類を大

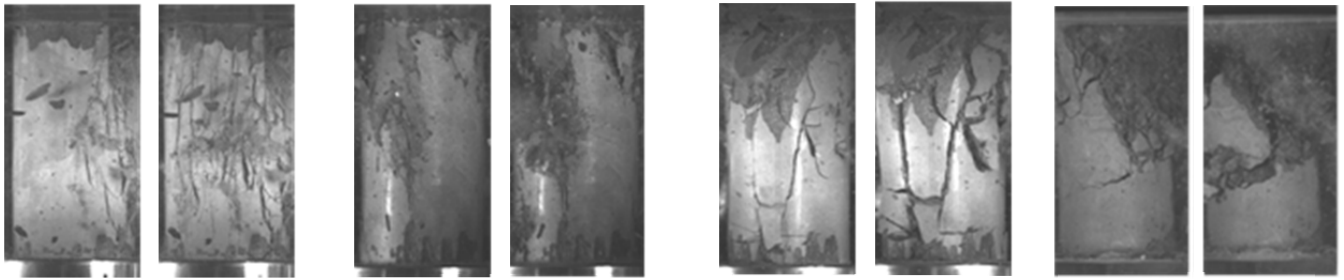
表-1 供試体概要

供試体概要	繊維混入率 (%)	水結合材比 (%)	吸水処理	圧縮強度 (MPa)
UFC-14-NF	0	14	×	251.7*
UFC-14-2F	2	14		217.5*
CPC-NF	0	17		296.4
CPC-2F	2	17		288.5
CPC-1FB	1	13	○	357.2
CPC2-NF	0	14	×	320.3
CPC2-2F	2	14		328.5

\*5 体平均値

まかに以下の 4 つに分類した。図 2 に特徴が顕著な破壊挙動を示した 4 つの供試体の画像を示す。1 つは図 1 (1) のように、載荷軸方向に発生した割裂ひび割れが供試体全体に伝播し広がるような破壊挙動を示したもので、CPC、CPC2 に特に見られたものである。2 つ目は、同図 (2) のように破壊が一部に集中し、破裂し潰れるような破壊挙動を示したものである。このような破壊挙動を示したのは UFC-14-2F、CPC2-2F のみであった。3 つ目は同図 (3) のように割裂ひび割れ、横ひび割れなどが直線的に発生し、ひび割れが広がっていく破壊挙動を示したもので、UFC-14-NF においてよく見られた。最後の 4 つ目は、同図 (4) のように上部にひび割れが網羅的に亀甲状に広がり、供試体が折れるような挙動を示したものである。いずれの供試体においてもこれらの破壊形状のいずれか 1 種類、または 2 種類の破壊形状が複合的に発生するような破壊挙動を示した。

載荷試験において得た荷重の経時変化を図 2 に示す。すべての供試体多少違いはあるが、図 2 において見られるように、ある時点から急激に荷重が落ちる挙動を示した。ただし、UFC14-2F のみ一旦、徐々に荷重が落ちてから、一気に変化するといった挙動を示した。これは、繊維補強の影響で徐々にひび割れが発生したことが原因であると考えられる。



(1) CPC2-NF (2) UFC-2F (3) UFC-NF (4) CPC-1FB  
図-1 破壊の分類

#### 4. 破壊進展速度に与える強度、繊維補強の影響

圧縮強度、繊維補強の有無の違いが圧縮破壊挙動に与える影響を評価ため、まず、載荷軸直行方向の横方向ひずみが増大した時の画像を破壊基準し、それぞれの供試体の破壊進展速度を比較する。図3は画像時間と圧縮強度の関係を示したものである。画像時間は、脆性的な破壊に直結するひび割れ発生直後の画像から、破壊基準の画像に至るまでの枚数に、1フレームあたりの時間 125 $\mu$ 秒を乗じた時間である。図3より、圧縮強度が大きいとひび割れ進展が速くなる傾向があることがわかる。UFC、CPC2において2FがNFよりも画像時間が短いのは、繊維補強の影響で部分的に潰れるような破壊挙動を示したため、ひび割れが発生してから供試体が膨張するまでの時間が短くなったことが原因であると考えられる。

次に CPC2-NF、CPC2-2F、それぞれ1体の供試体において、供試体上端の載荷板に印をつけ、画像解析を用いて、破壊に至る瞬間の変位を高速撮影画像から求めた。横軸の時間は、基準画像を中心とした合計100枚(0.0125秒間)の連続した撮影画像に、1フレームあたりの時間125 $\mu$ 秒を乗じたもので、100枚のうちの初めの画像の時間を0secとしている。また、縦軸の画素は、供試体の載荷軸方向の変形に相当する、撮影範囲の下端から、印をつけた箇所までの画素数を表している。それぞれの結果を図4に示す。図4より、CPC2-NF、CPC2-2Fのどちらの供試体においても直線的な変化をしていることがわかる。ただし、変位の変化量はCPC2-2Fのほうが若干小さいことから、CPC2において繊維が供試体の載荷軸方向の変位の増大を抑制していると考えられる。

#### 5. 結論

3種類の超高強度繊維補強コンクリートの非常に脆性的な破壊現象をとらえ、破壊に至る瞬間の画像と荷重データを得ることができた。破壊に至る画像を用いて着目点変位を比較した結果、強度が高い供試体の破壊進展が速く、供試体 UFC、CPC2 において繊維補強の影響が大

きいことがわかった。

#### 参考文献

- 1) 河野克哉, 中山莉沙, 多田克彦, 田中敏嗣: 450N/mm<sup>2</sup>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

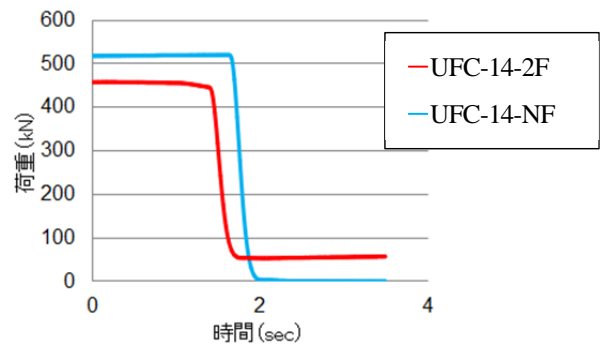


図-2 荷重の経時変化

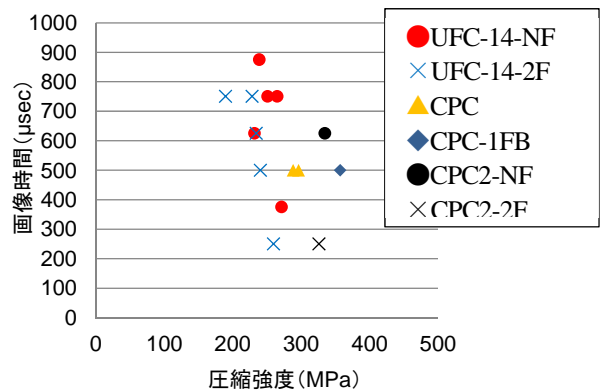


図-3 画像時間と圧縮強度

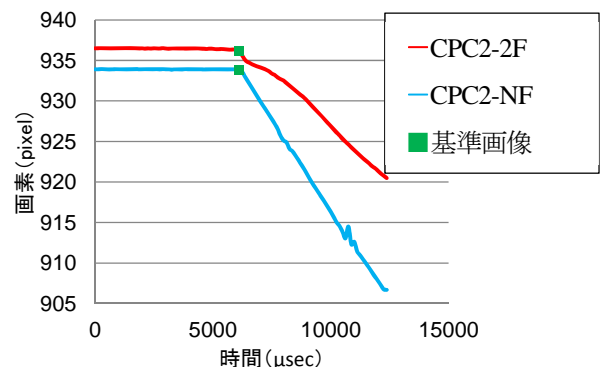


図-4 着目点変位