

超高強度繊維補強セメント系材料の圧縮破壊挙動の高速変形画像計測

High Speed Measurement and Image Analysis for Compressive Failure Behavior of Ultra-High Strength Fiber Reinforced Concrete (UFC)

三木 朋 広 渡 邊 大 基 河 野 克 哉
Tomohiro Miki Daiki Watanabe Katsuya Kouno

1. はじめに

近年、橋梁やプレキャスト PC 部材において、橋梁上部構造の長スパン化、軽量化に加え、構造物の高耐久化などを目的として、超高強度繊維補強コンクリートが着目されている。既に我が国で材料開発されている高強度繊維補強コンクリートでは、高強度かつ耐摩耗性や耐塩害性などに優れ、約 200~250MPa ほどの圧縮強度があり、その実用化が展開されはじめている一方、近年、型枠への流込み成形が可能な世界最高強度のセメント材料が開発され、圧縮強度が 464MPa を発現する超高強度セメント硬化体が実現された¹⁾²⁾。このような材料は高強度という特性を活かし、長大橋のプレキャスト PC 部材としての活用や、既存構造物の補修・補強への実用展開が期待される。

この材料を用いた構造部材を実用化するためには、その構造部材の破壊制御や挙動予測の技術が求められる。その基礎情報として、本研究では部材の終局耐力に必要な、材料の破壊メカニズムを解明することを目指し、この材料における破壊進行、特にひび割れの発生、進展を計測することを試みる。ただし、その際の課題としては、材料が高強度ゆえに、超高強度繊維補強コンクリートの急激に進展する圧縮破壊挙動を的確にとらえることが極めて困難であることが挙げられる。

そこで本研究では、高速カメラとデータロガーを用いてこのような材料の急激に進展する破壊現象を映像としてとらえ、その結果を用いて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検討することを目的とした。そのため、円柱供試体に対して圧縮荷試験を行い、実験で得た高速撮影画像ならびに画像に同期した各種センサーデータを用いて、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の速度を測定し、比較検討した。さらに、高速撮影した画像を用いて画像解析を行い、画像の直接観察では判断が難しいひび割れの発生について供試体全体を対象とした領域でひび割れ分布を計測することを試みた。

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 | なし | 251.7* |
| UFC-14-2F | 2 | | | 217.5* |
| UFC-14-NF-1 | 0 | | | 271.5 |
| UFC-14-2F-1 | 2 | | | 259.7 |
| UFC-14-NF-2 | 0 | | | 232.7 |
| UFC-14-2F-2 | 2 | | | 241.9 |
| CPC-13-NF | 0 | 13 | あり | 303.4 |
| CPC-13-2F | 2 | | | 304.7 |
| CPC-13-IFB | 1 | | | 357.2 |
| CPC-17-NF | 0 | 17 | なし | 296.4 |
| CPC-17-2F | 2 | | | 288.5 |
| CPC-20-2F | 2 | 20 | | 249.6 |
| CPC2-NF-1 | 0 | 15 | なし | 334.6 |
| CPC2-2F-1 | 2 | | | 342.8 |
| CPC2-NF-2 | 0 | | | 320.3 |
| CPC2-2F-2 | 2 | | | 328.5 |

*5 体平均値

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紛体を使用した超高強度繊維補強コンクリート供試体 (UFC) であり、残りの 2 つは最密充填となる紛体構成とした超高強度セメント硬化体の試作供試体 (CPC)³⁾ と、それと等しい材料構成の供試体 (CPC2)⁴⁾ である。表-1 に供試体の概要を示す。短繊維には鋼繊維を用いた。実験パラメータは、鋼繊維の混入率、水結合材比、加熱処理の有無である。このうち CPC-13-1FB の供試体のみ脱型後 30 分の煮沸吸水処理²⁾ を実施し、その他の供試体に関しては、吸水処理は行っていない。また、すべての供試体に対して 90℃ の蒸気養生と、180℃ の加熱養生の 2 段階の熱養生を行った。

この供試体を対象に圧縮荷試験を行った。荷試験に用いた供試体数は、供試体 UFC に関しては繊維混入の有無の 2 つの条件 UFC-14-NF, UFC-14-2F に対して各 5 体、その他の UFC ならびに CPC に対して各 1 体である。

荷試験は油圧式 2000 kN 万能荷試験機を用いて行った。本実験では、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 (8,000 fps) とデータロガー (20,000 fps)、ならびに動ひずみ計測器を用いた。撮影時間は 3.488 秒であり、27 904 フレームの画像、69 760 個のデータを得た。

荷試験では、高速撮影画像の他、UFC-14-NF-1, UFC-2F-1, CPC2-NF-1, CPC2-2F-1 のそれぞれ 1 体ずつ合計 4 体に関しては、ロードセルを用いて、より正確な荷重変化をとらえられるようにした。また、UFC-14-NF-2, UFC-14-2F-2, CPC2-NF-2, CPC2-2F-2 の 4 体に関しては、上部荷板の端に印をつけて、それを画像解析によって追跡できるようにした。さらに、供試体を均等に明るく撮影するために LED 照明を 2 つ用いた他、破壊時破片が飛散するのを防ぐためにプラスチックカバーを用いるなどして、撮影環境を工夫した。

3. 実験結果

3. 1 高速度画像計測結果

圧縮強度について、UFC に関して約 190~270 MPa、CPC に関して約 250~360 MPa、CPC2 に関して 320~340 MPa という結果を得ており、どの供試体においても高い圧縮強度を示した。

次に、図-1 に高速度カメラによって得た超高強度コンクリートの破壊の瞬間を捉えた画像の一例 (UFC-14-NF) を示す。図中に示す画像の下の数値は、撮影開始時の最初の画像を基準とした経過時間 (10⁻⁶ 秒) を示している。すべての供試体において、図-1 のように非常に短い時間で破壊が進展するといった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、破壊に至るまでのすべての供試体のひび割れ進展の違いを比較し、破壊の種類を大まかに以下の 4 つに分類した。それぞれの分類の例として、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 つ目は図-2 (1) に示すように、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、UFC では 1 体のみ、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、横方向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

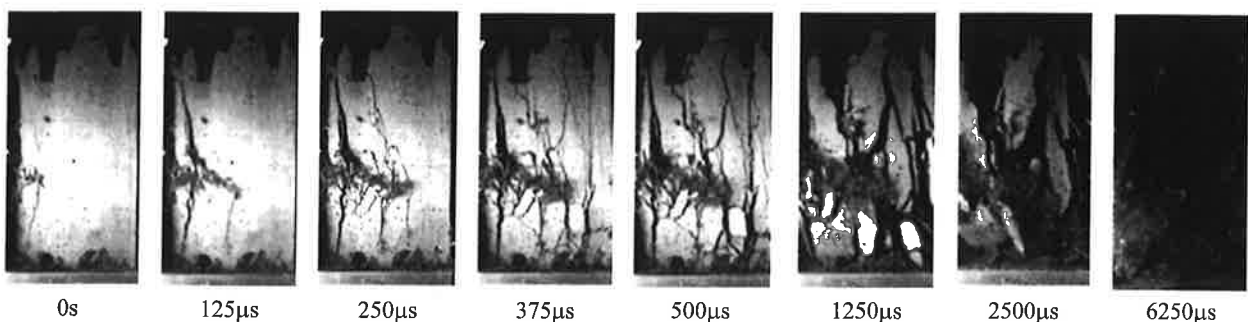
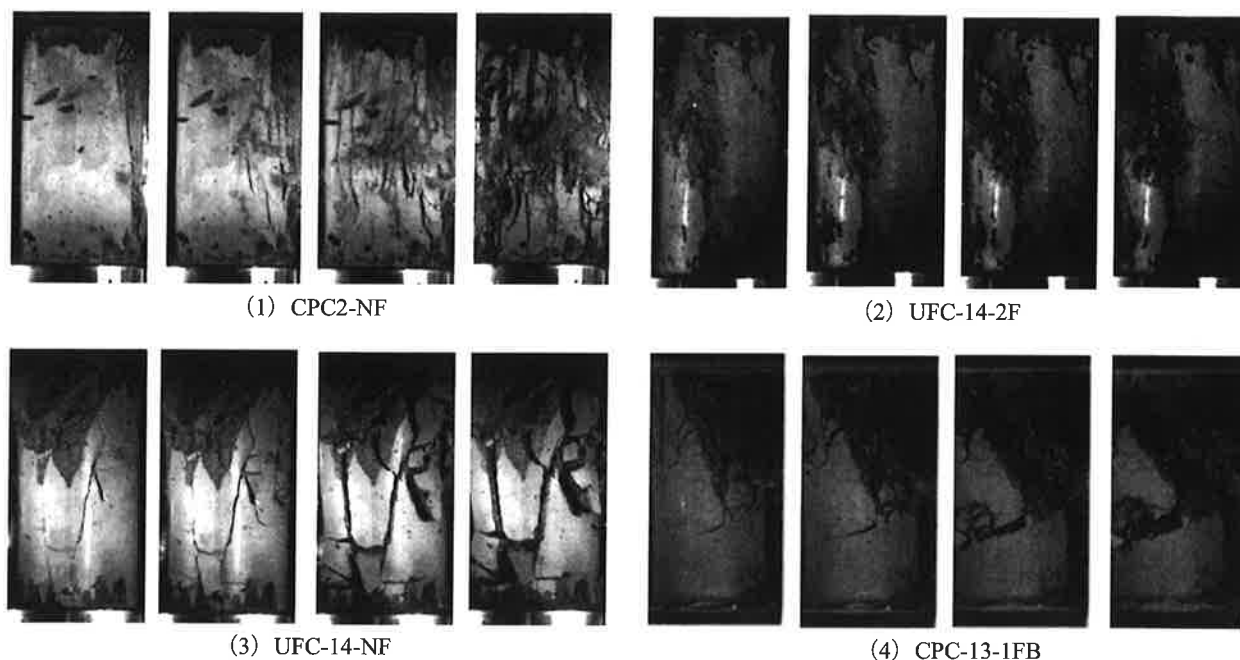


図-1 破壊に至る瞬間の画像(UFC-14-NF)



図－2 破壊性状の分類

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性状のいずれか1種類の破壊性状、または2種類の破壊性状が複合的に発生するような破壊挙動を示した。

3. 2 画像相関法による画像解析結果

UFC-14-NF, UFC-14-2F, CPC2-NF, CPC2-2F の4体の供試体において、脆性的な破壊に至る瞬間における、目視でとらえることが困難なひび割れ進展状況を可視化し、各供試体のひび割れの特徴を把握するために、画像解析によって表面ひずみの計測を行った。解析手法として、デジタル画像相関法を用いた。ここでデジタル画像相関法とは、デジタル画像内に設定した解析対象範囲内において、変形前後の測定対象ピクセル中の輝度値分布を用いて、任意の輝度値分布に類似する領域を算出する手法である。本研究で行った画像相関法による画像解析の手順は以下の通りである。まず、高速度カメラによって撮影した破壊に至る瞬間（ここではその後の変化の有無で判断した）のデジタル画像における基準画像と、変形後画像の輝度値を比較し、類似点の移動量を計測する。このように計測した類似点の移動量を、有限要素の節点変位として用いて、9節点アイソパラメトリック要素を用いることで要素内の二次元的なひずみ分布を算出する。

画像解析に用いた画像の一例として、最終的な破壊に関連するひび割れが発生する直前と直後の連続画像を図－3に示す。各供試体において、図－3(1)を基準画像とし、同図(2)を変形後画像として画像解析を行った。同図(3)は、それぞれの供試体が最終的にどのように破壊性状に至るかを理解するためにその状況の写真を示している。

画像解析結果として、図－4に各供試体の最大主ひずみ分布（引張ひずみを正）を示す。まずUFC-14-NFでは、画像解析の範囲の両側端部に载荷軸方向に直線的にひずみが発生していることがわかる。図－3(3)を見るとその部分に割裂ひび割れが発生している様子がわかる。UFC-14-2Fにおいては、画像解析結果より供試体上部に面的にひずみが広がっていることがわかる。対応する供試体の図－3(3)を見ると、この箇所よりひび割れが生じている様子がわかる。CPC-NFにおいては、画像解析結果より、供試体中央から下部にかけて面的にひずみが発生していることがわかる。CPC-NFの図－3(3)を見ると割裂ひび割れが発生しているが、UFC-14-NFと比較すると割裂ひび割れが密集して発生し、そのひび割れ間隔が小さいことがわかる。つまり、これらのひび割れが同時に発生したことにより、ひずみが面的に生じるような画像解析結果となり、供試体で見るとあるボリュームで体積的にひずみが発生したと推察される。最後に、CPC2-2Fにおいては、画像解析結果より载荷軸方向に直線的にひずみが発生していることがわかる。同様に図－3(3)を見ると、この箇所からUFC-2Fと同様の微細なひび割れが密集して発生している様子がわかる。

これら画像計測結果、ならびに高速撮影した画像から、繊維補強なしの供試体 UFC-NF, CPC2-NF においては、載荷軸方向に直線的にひずみ発生し、その後そこから大きな割裂ひび割れが開口することがわかった。その後の挙動としては、UFC-NF においては割裂ひび割れの間隔が広がるといった挙動を示すのに対し、CPC2-NF においては割裂ひび割れが比較的密集して生じ、それらが供試体全体に伝播するように最終的な破壊に至ることがわかった。

繊維補強ありの供試体に関しては、CPC2-2F は最終的な破壊性状は UFC-14-2F と同様部分的に潰れ、破裂するような破壊挙動を示したが、ひび割れが発生する段階では、直線的ではなく細かい線、もしくは点のようなひび割れが集まって面的にひずみが大きくなり破壊に至る UFC-14-2F と比較すると、UFC-14-NF や CPC2-NF に比べて短いが、これらの供試体と同様載荷軸方向に直線的にひずみが発生し、伝播している特徴があり、CPC2-NF と類似していることがわかった。

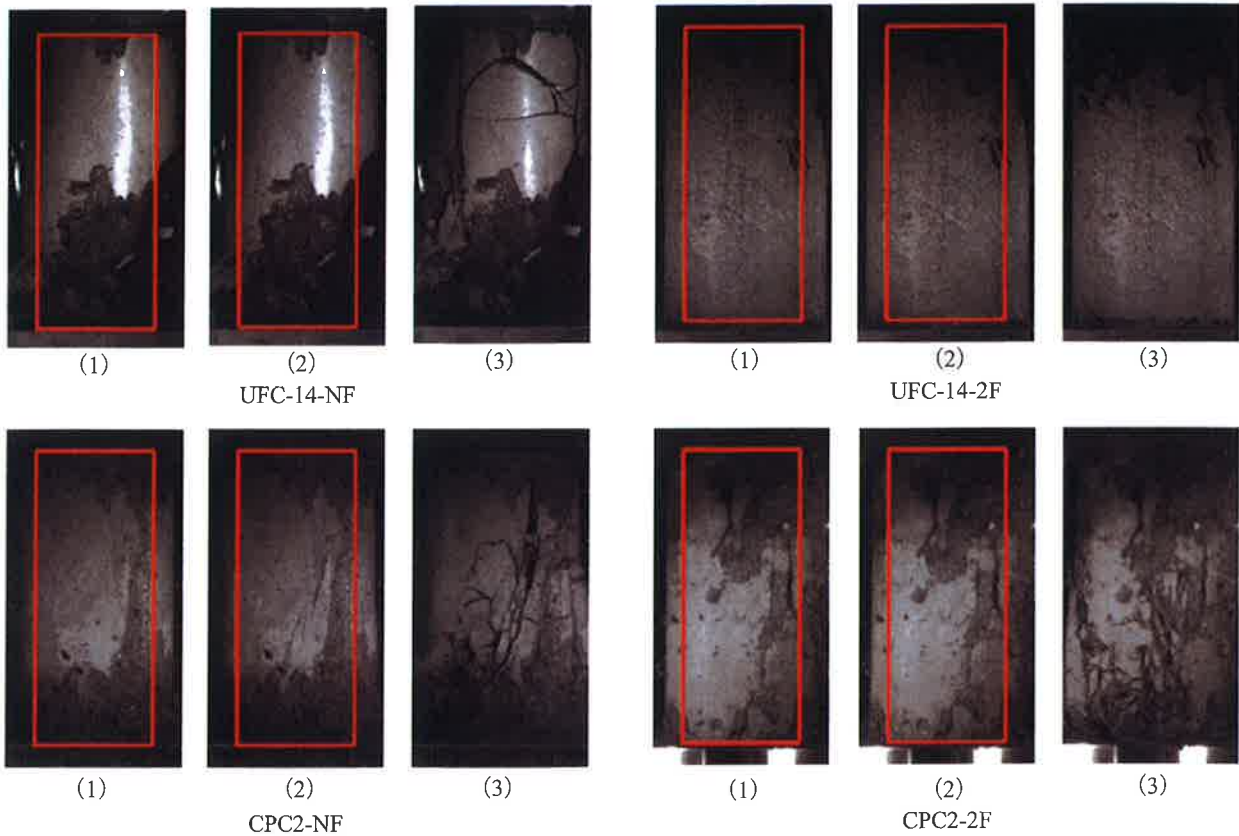


図-3 画像解析範囲

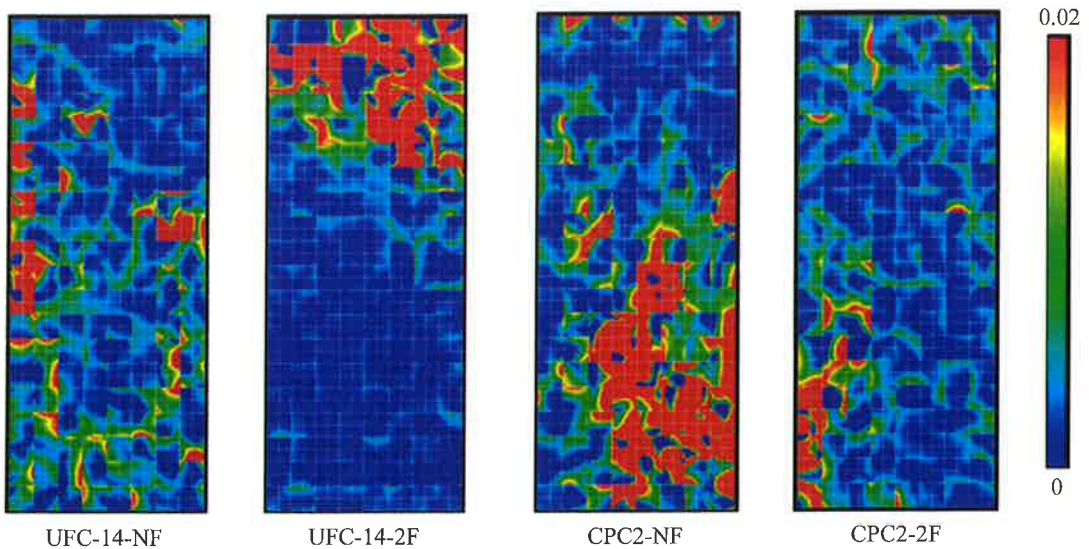


図-4 画像解析結果 (最大主ひずみ分布)

3. 3 載荷荷重の経時変化

最後に、載荷荷重の経時変化を図-5、図-6に示す。

図-5では試験機の荷重計によるものをデータロガーで記録した値を示しており、図-6ではそれに加えロードセルによって得た荷重の履歴を示している。すべての供試体で多少違いはあるものの、いずれの供試体でもある点から急激に荷重が低下する挙動を示した。一方、UFC-14-2Fのみ、徐々に荷重が若干低下した後、一気に荷重が低下するといった挙動を示した。これは、繊維補強の効果によって、短時間ではあるが、ひび割れが徐々に発生し、その後急激に進展したことが要因だと考えられる。また、図-6より、CPC2-2F-1における試験機の荷重計からのデータとロードセルからのデータを比較すると、試験機の荷重計からのデータでは、UFC-14-NFと近い挙動を示しているのに対して、ロードセルからのデータでは、荷重が急激に低下する瞬間にわずかに荷重が下がってから、荷重計からのデータよりもさらに急激に荷重が低下していることがわかる。このようにロードセルを用いたことで、載荷板や様々な器具の慣性力を排除した、供試体に作用している力に近い荷重を計測することができ、荷重が変化する瞬間をより高い精度で計測することに成功した。これにより、CPC2においても、繊維補強の効果を検証できるようになったため、以後の章でその影響について詳細に調べていく。

4. 破壊進展速度に与える強度、繊維補強の影響

4. 1 荷重速度と変位速度

ここでは、圧縮強度、繊維補強の有無の違いが、圧縮破壊挙動に及ぼす影響を検討する。まず、すべての供試体において、荷重が低下し始める直前の点を基準点（時刻0の点）とし、その点以降のデータ2000点（約0.1秒間）を直線近似し、その傾きの絶対値を荷重速度と新たに定義した。図-7に、ロードセルを用いた4体の供試体以外のすべての供試体において、試験機の荷重計によって得たデータによる荷重速度と圧縮強度の関係を示す。UFCに関してはそれぞれの供試体から得た結果を示している。また、ロードセルを用いた4体の供試体においては、ロードセルによって得たデータを用いた。基準点以降1000点（0.05秒間）を直線近似した荷重速度と、圧縮強度の関係を図-8に示す。ここで、試験機の荷重計によって得たデータでは、荷重が急激に落ち始めてから落ち終わるまでに、短くて3000点、長くて5000点ほどのデータ数があり、その範囲の中においていずれの供試体においても荷重が直線的に低下する挙動

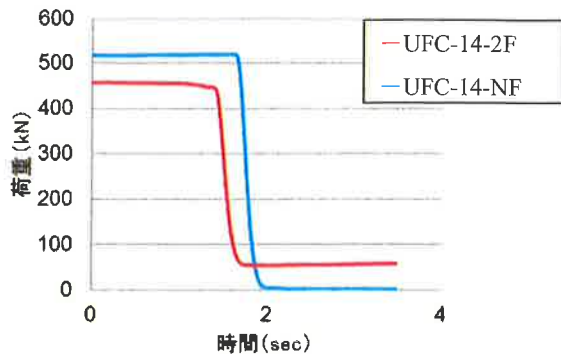


図-5 試験機の荷重計測による荷重の経時変化

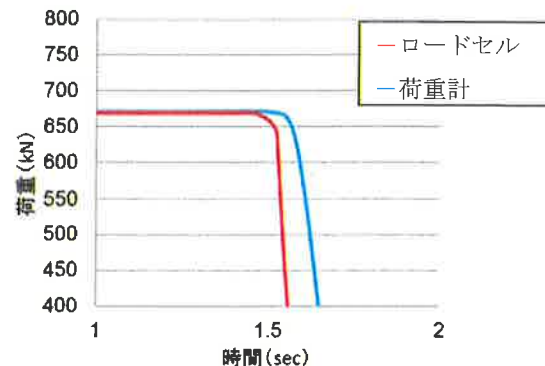


図-6 荷重の経時変化 (CPC2-2F-1)

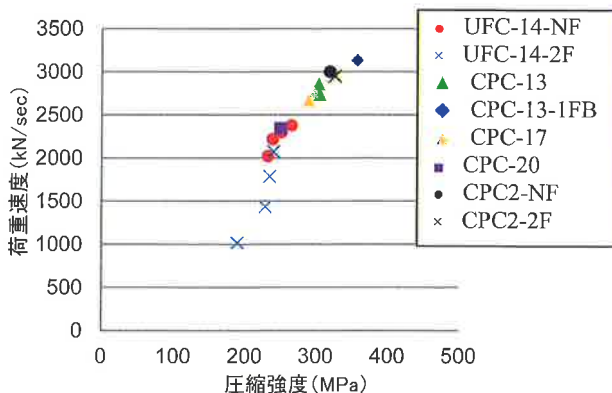


図-7 荷重速度と圧縮強度 (荷重計)

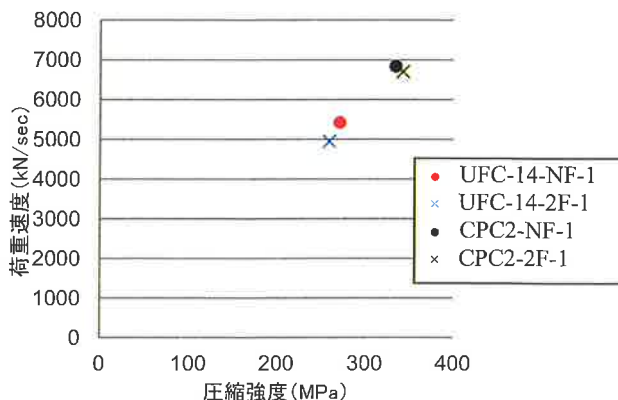


図-8 荷重速度と圧縮強度 (ロードセル)

を示した。その範囲は最大で2000点程度であったため、図-7では2000点分の結果を示している。一方、ロードセルを用いた図-8においては、挙動が少し異なり、荷重が落ち終わる際に曲線的に荷重が低下し、その後直線的な挙動を示したが、その範囲が1000点程度であったため、1000点分の結果を示している。

図-7より、強度が高い供試体ほど荷重速度が大きく、ほぼ比例関係を示していることがわかる。ただし、UFC-14-2Fにおいては、UFC-14-NFの結果から荷重速度の最も大きいCPC-13-1FBまでの直線的な荷重速度の変化に比べ、圧縮強度に対して荷重速度が小さい値となっていることがわかる。これは繊維補強の効果が影響していると考えられる。またCPC2においては、UFCほどではないが、CPC2-2FのほうがCPC2-NFより強度は高いが、荷重速度は少し小さくなるという結果となっている。ここで、今回着目した荷重速度の変化は、破壊によるエネルギー解放の時間変化の割合程度を意味していると考えるが、CPC2-2FではUFC-14-2Fと同様、繊維補強の影響によって図-2の(2)に示した結果と同様の破壊性状を示したので、供試体全体ではなく、部分的な領域を発端にエネルギーが解放されたことが要因となり、このような結果となったものと推察する。図-8においては、全体的に荷重速度は大きくなっているものの、図-7と同様の傾向が見られることもわかる。

次に動ひずみ計測器より得られたデータを用いて、荷重の変化が顕著に表れたロードセルを用いた4体の供試体を対象として、荷重低下開始直後の荷重-変位関係を図-9、図-10に示す。ここでは、基準点から200点(0.01秒間)のデータを示している。ここで、ロードセルを用いた計測結果では、数百点程度のデータの範囲において挙動に違いがみられ、200点程度以上であると、NFと2Fの供試体の荷重-変位関係の違いが明確であったためその範囲を対象として200点分の結果を示している。また、図中にそれぞれの供試体の変位に対する荷重の変化の直線近似式をあわせて示す。

図-9、図-10の2つの結果を比較すると、UFC、CPC2のどちらの供試体においても、繊維無混入のNFの方が鋼繊維2%を混入した2Fに比べて直線の傾きが小さいことがわかる。つまり、荷重の低下に対して変位の増加が大きいことを示している。これは、鋼繊維がひび割れの開口を防ぐことによって、2F供試体では載荷軸直交方向の変位の変化が小さくなったものと考えられる。このことにより、繊維補強の効果があることが推察されるが、UFCのほうが傾きの差が大きいことがわかる。これは繊維補強の影響と、荷重の大きさが異なることによって、荷重変化に違いがみられたものと考えられる。

これらセンサデータによって得た結果から、0.01秒間に相当する数百点以上のおおまかなデータの変化により繊維補強の影響は比較することができたが、さらに詳細に見ていくには、機材の応答周波数、微弱だが発生している計測ノイズを考慮にいれなければいけない点についてはさらに計測方法を改善する必要があり、今後の課題として残っている。

4.2 画像時間と画像解析による着目点変位の関係

高速度カメラによって得た画像を用いて、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するため、破壊基準画像を定義した。前出の図-2に示したように、いずれの供試体においても、ひび割れが伝播した後、もしくは進展しながら載荷軸直交方向に広がりながら破壊に至る、つまり破壊する瞬間には必ず横方向ひずみが増大することがわかった。そこで、すべての供試体において載荷軸直交方向の横方向ひずみが増大したときの画像を破壊基準画像とし、それぞれの供試体の破壊進展速度を比較した。

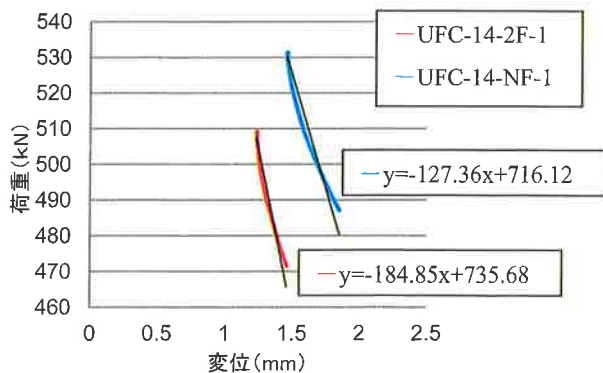


図-9 荷重低下開始直後の荷重-変位関係 (UFC)

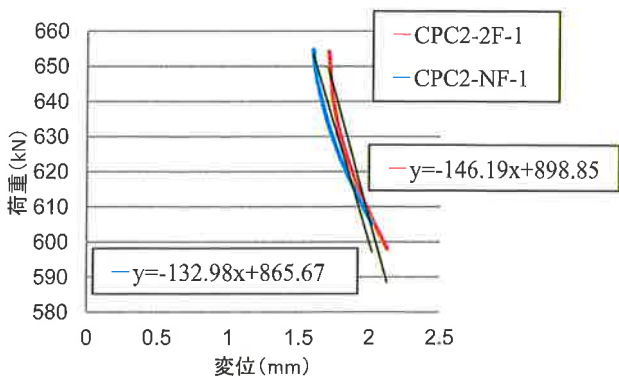


図-10 荷重低下開始直後の荷重-変位関係 (CPC2)

図-11は画像時間と圧縮強度の関係を示したものである。ここで、画像時間とは、脆性的な破壊に直結するひび割れ発生直後の画像から、破壊基準画像に至るまでの枚数に、1フレームあたりの時間125 μ 秒を乗じた時間である。図-11より、圧縮強度が高いと、ひび割れ進展が速くなる傾向があることがわかる。強度が最も低いUFC-2FがUFC-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。同じような傾向はCPC2-NFとCPC2-2Fにもみられた。

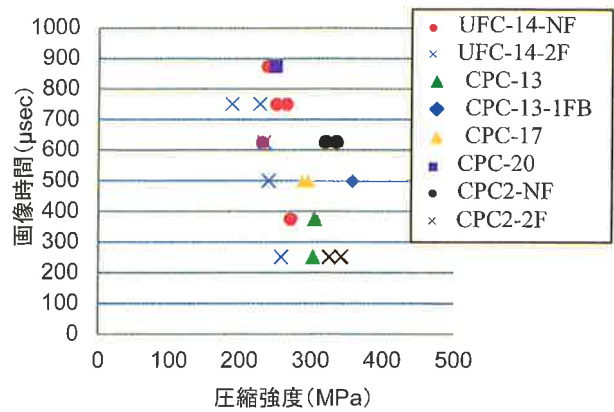


図-11 画像時間と圧縮強度

さらに詳細にみていくと、前出の図-2 (3), (4) の破壊性状を示した供試体では、強度が高くなるほど画像時間が短くなっていくという結果を示したが、図-2 (1) の破壊性状を示した2体のCPC2-NFは、圧縮強度は高いものの、ひび割れが広がってから横方向ひずみが増加するといった挙動を示したため、画像時間はあまり短くないことがわかった。画像時間が短い供試体は、繊維補強の影響がみられた図-2 (2) の破壊性状を示したUFC-2F, CPC2-2Fの3体と図-2 (1), (3) の破壊性状が複合的に発生したCPC-13-NFの供試体であった。以上の結果より、破壊進展速度は圧縮強度の大きさのみだけでなく、破壊の性状、繊維補強の有無に大きく依存するとともに、画像を用いて判断する変位場におけるひび割れの進展は、今回の測定対象の範囲では、ある一定以上の進展の速さになると、それ以上は大きくならないことがわかった。

次に、UFC-14-NF-2, UFC-14-2F-2, CPC2-NF-2, CPC2-2F-2, それぞれ1体ずつ合計4体の供試体において、急激に進展する供試体の圧縮変形の概略を把握するため、供試体上端の載荷板に印をつけ、画像解析を用いて、急激にひび割れが発生して破壊に至る瞬間の変位を高速撮影画像から求めた。それぞれの結果を図-12, 図-13に示す。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 μ 秒を乗じたもので、100枚のうちの初めの画像の時間を基準の0秒としている。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。図-12に示すUFCにおいては繊維補強の影響がみられる。直線的な変化を示したUFC-14-NF-2と比較すると、繊維補強した供試体においては徐々に変位が変化するような挙動を示した。これは鋼繊維が供試体内で均等に分布していても、微視的に見ると鋼繊維近傍とそれ以外で挙動が異なるため、鋼繊維と結合材間に存在する空隙などの弱点からひび割れが発生はするが、巨視的にみると鋼繊維がひび割れ発生後のひび割れの開口を抑制していることによるため、その結果、繊維補強の効果がみられたものと考えられる。また、基準画像以降も載荷軸方向の圧縮変形は大きくなっているが、鋼繊維を混入していないNFと比較すると急激な変化はみられないことがわかる。つまり、鋼繊維を混入することによって、ひび割れの進展、ならびに載荷軸直交方向の変位の増大を抑制し、軸方向の圧縮変位が急激に増大するのを遅らせていることによるものと推察する。

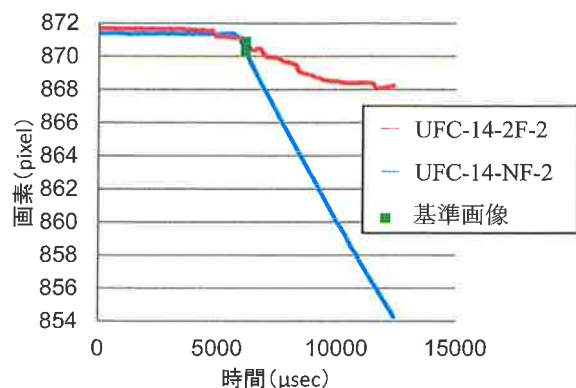


図-12 着目点変位 (UFC)

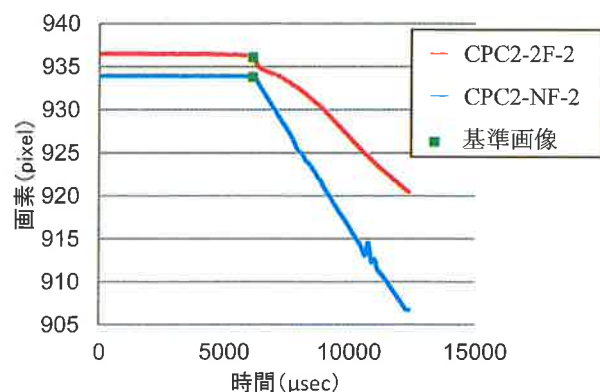


図-13 着目点変位 (CPC2)

一方、供試体 CPC2 に関してみると、CPC2-NF-2 においては UFC-14-NF-2 と同様の変化を示していたのに対して、UFC-2F-2 とは異なり、CPC2-2F-2 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-NF-2 よりも若干小さいことから、CPC2 においても鋼繊維が供試体の載荷軸直交方向の変位の増大を抑制していると考えられる。

以上の結果から、繊維補強した供試体 UFC-2F と CPC2-2F は、供試体に部分的にひび割れが生じるため、載荷軸直交方向の変位が早い段階で増大するが、繊維補強によってそれを抑制する効果があることがわかった。ただし、今回は各水準で供試体 1 体の結果と限られているため、今後実験ケースを増やして検討を続ける必要がある。

5. 結論

本研究では、3 種類の超高強度繊維補強コンクリート供試体を対象に圧縮載荷試験を行い、ハイスピード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計測した。さらに、圧縮強度、繊維補強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ために、荷重データと撮影画像の 2 つの観点から、それぞれの供試体においてみられる異なる破壊挙動を比較した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 3 種類の超高強度繊維補強セメント系材料の、急激に進展する破壊挙動を、実験・撮影環境を工夫することで破壊に至る瞬間の画像とセンサデータを得ることができた。また、実験結果に基づき、それぞれの破壊の性状を分類することができた。
- (2) 高速撮影した画像を用いた画像解析結果より、脆性的な破壊に直結するひび割れの性状を確認することができた。
- (3) 荷重の時間変化に関する実験データから、エネルギーの解放速度は圧縮強度が高くなるほど大きくなる傾向があるが、圧縮強度が異なる UFC と CPC2 においては、繊維補強の効果によって異なる挙動を示すことがわかった。
- (4) UFC, CPC2 のどちらの供試体においても、荷重の急激な低下に対する変位の変化は、繊維補強していない供試体と比較して、繊維補強した供試体のほうが小さいことがわかった。
- (5) 高速度カメラによって得た画像から、圧縮強度が高い供試体ほど破壊の進展が速くなる傾向がみられたが、分類した破壊の性状にも大きく依存し、また、ある一定まで速度が大きくなると、それ以上破壊の進展速度は大きくならない可能性があることがわかった。
- (6) 圧縮強度の高い CPC2 では、UFC に比べ、繊維補強した供試体の載荷軸方向の変位の変化は大きいですが、UFC, CPC2 のどちらの供試体においても、繊維補強した供試体は、繊維補強していない供試体に比べ、軸直交方向の変位は増大するが軸方向変位の変化は抑制されることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 中山莉沙, 河野克哉, 多田克彦: 圧縮強度 460MPa を発現する超高強度セメント硬化体の開発, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-303, pp.605-606, 2015.9
- 2) 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
- 3) 渡邊大基, 三木朋広, 河野克哉: 超高強度繊維補強コンクリートの圧縮破壊挙動に関する高速度画像計測, 土木学会第 71 回年次学術講演会, V-590, pp.1179-1180, 2016
- 4) 渡邊大基, 三木朋広, 河野克哉: 超高強度繊維補強セメント系材料の圧縮破壊挙動の同定, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.433-438, 2017

著 者

| | |
|-------|---------------------------------------|
| 三木 朋広 | 所員, 博士 (工学), コンクリート工学, コンクリート構造, 維持管理 |
| 渡邊 大基 | 神戸大学大学院生, 修士 (工学), コンクリート工学, コンクリート構造 |
| 河野 克哉 | 太平洋セメント株式会社, 博士 (工学), コンクリート工学 |