

論文 高速度カメラを用いた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

渡邊 大基^{*1}・三木 朋広^{*2}・河野 克哉^{*3}

要旨：非常に脆性的な圧縮破壊挙動を示す超高強度繊維補強コンクリートの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。本研究では、高速度カメラとデータロガーを用いてこの材料が破壊する瞬間をとらえ、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検討することを目的とした。円柱供試体に対して圧縮載荷試験を行い、実験によって得たセンサデータ、高速撮影画像を用い、これら 2 つの計測結果を基にいくつかの破壊基準を設けることによって、供試体毎の異なる破壊進展速度を比較し、高強度コンクリートにおける繊維補強の影響を評価することができた。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、高速度画像計測、圧縮破壊、高速度カメラ

1. はじめに

近年、橋梁やプレキャスト部材において、橋梁上部構造の長スパン化、軽量化、薄肉化、構造物の高耐久化などを目的として、超高強度コンクリートの利用が広がっている。さらに、高強度繊維補強コンクリートについては、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、その実用化が進んでいる。最近では、型枠に流し込んで世界最高強度の硬化体を成形できる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^{1),2)}が実現された。高強度という特性を持つので、長大橋のプレキャスト PC 部材としての活用、既存構造物の補修や補強への応用が期待される。これらを実用化するためには、破壊の制御や予測などの技術につなげるために、破壊メカニズムを解明することが重要である。そのためにはまず、このような材料においてどのように破壊が進行していくか目視観察、もしくは計測できることが必要であるが、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のは極めて困難である。

そこで本研究では、高速度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検討することを目的とした。円柱供試体に対して圧縮載荷試験を行い、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。

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) である。表-1 に供試体の概要を示す。実験パラメータは、繊維混入率、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

表-1 供試体概要

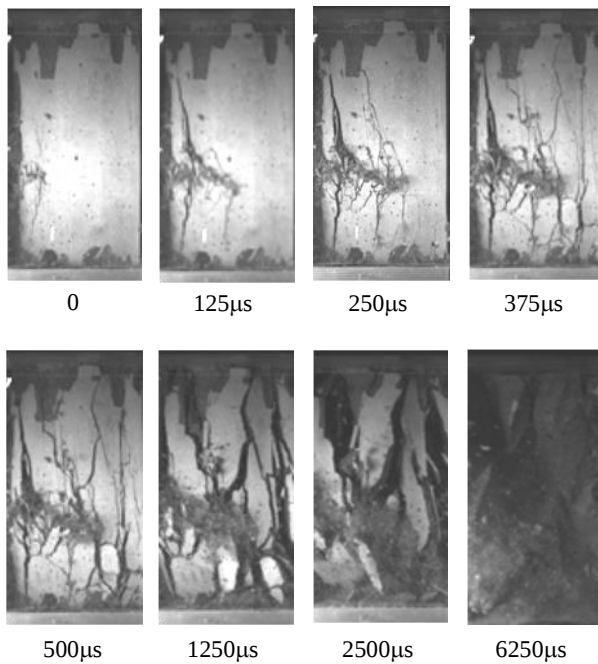
供試体概要	繊維混入率 (%)	水結合材比 (%)	吸水処理	圧縮強度 (MPa)
UFC-14-NF	0	14	なし	251.7*
UFC-14-2F	2	14	なし	217.5*
UFC-14-NF-1	0	14	なし	271.5
UFC-14-2F-1	2	14	なし	259.7
UFC-14-NF-2	0	14	なし	232.7
UFC-14-2F-2	2	14	なし	241.9
CPC-13-NF	0	13	なし	303.4
CPC-13-2F	2	13	なし	304.7
CPC-13-1FB	1	13	あり	357.2
CPC-17-NF	0	17	なし	296.4
CPC-17-2F	2	17	なし	288.5
CPC-20-2F	2	20	なし	249.6
CPC2-NF-1	0	15	なし	334.6
CPC2-2F-1	2	15	なし	342.8
CPC2-NF-2	0	15	なし	320.3
CPC2-2F-2	2	15	なし	328.5

*5 体平均値

*1 神戸大学 大学院工学研究科市民工学専攻 (学生会員)

*2 神戸大学 大学院工学研究科市民工学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 太平洋セメント(株) 中央研究所第 2 研究部 主席研究員 博士(工学) (正会員)



図－1 破壊に至る瞬間の画像 (UFC-14-NF)

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。

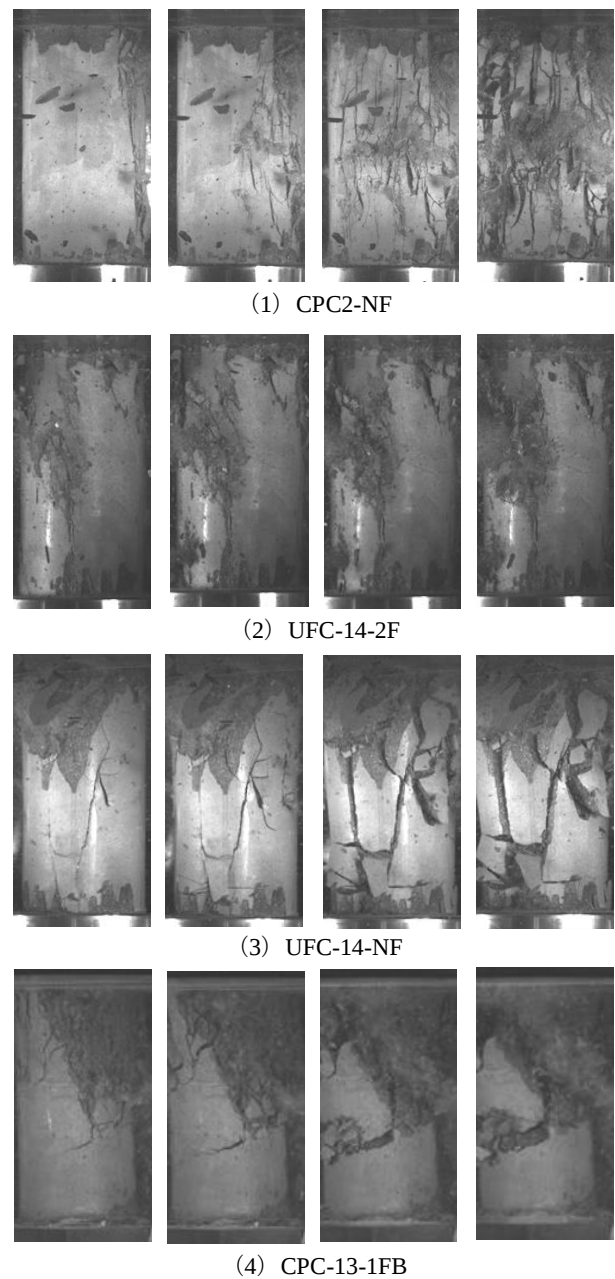
用いた供試体数は、UFC に関しては繊維混入率の有無の2つの条件 UFC-14-NF, UFC-14-2F に対してそれぞれ5体, その他の UFC ならびに CPC に対して1体である。これらの円柱供試体を対象に圧縮載荷試験を行った。

載荷は油圧式2000kN 万能載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(8000fps)とデータロガー(20000fps), 動ひずみ計測器を用いた。撮影時間は3.488秒であり, 27904 フレームの画像, 69760 個のデータを得た。

載荷試験では、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、上部載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、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

圧縮強度について、UFC に関して約 190~270MPa, CPC に関して約 250~360MPa, CPC2 に関して 320~340MPa 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。



図－2 破壊性状の分類

次に、高速度カメラによって得た、超高強度コンクリートが破壊する瞬間を捉えた画像の1例を図－1に示す。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つは図－2(1)に示すように、載荷軸方向に発生した割

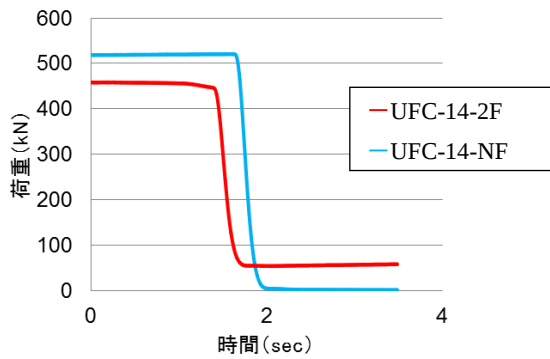


図-3 試験機の荷重計測による荷重の経時変化

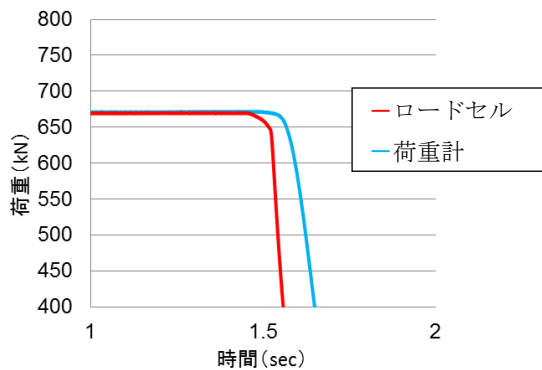


図-4 荷重の経時変化 (CPC2-2F-1)

裂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。

図-1 の UFC-14-NF と図-2 の CPC2-NF は 1 つ目の例であるが、破壊形状が等しい場合、強度が高い供試体ほどひび割れ間隔が小さく、密に生じており、ひび割れ本数も多い傾向がみられ、特に CPC2-NF ではひび割れ間隔の小さいことが顕著であった。

最後に、載荷荷重の経時変化を図-3, 図-4 に示す。図-3 では試験機の荷重計測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-4 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、

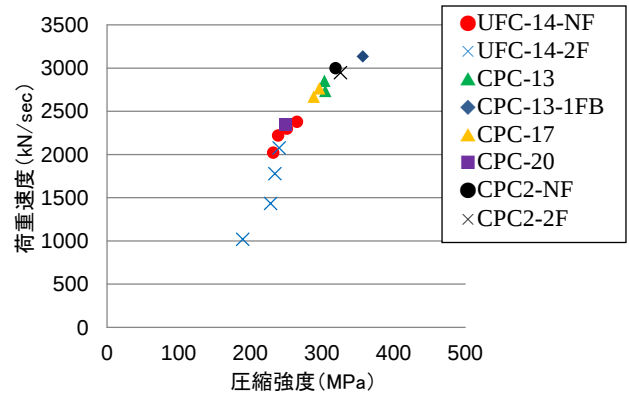


図-5 荷重速度と圧縮強度 (荷重計)

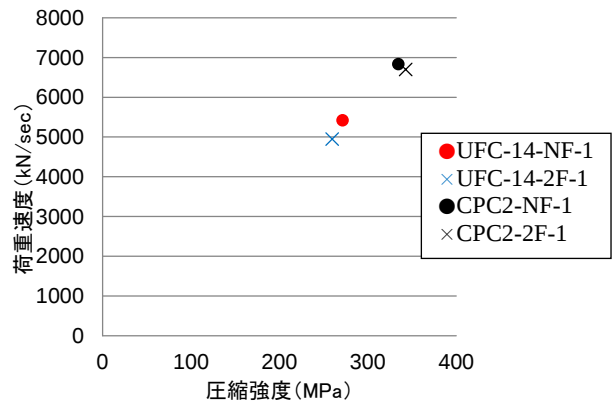


図-6 荷重速度と圧縮強度 (ロードセル)

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-4 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

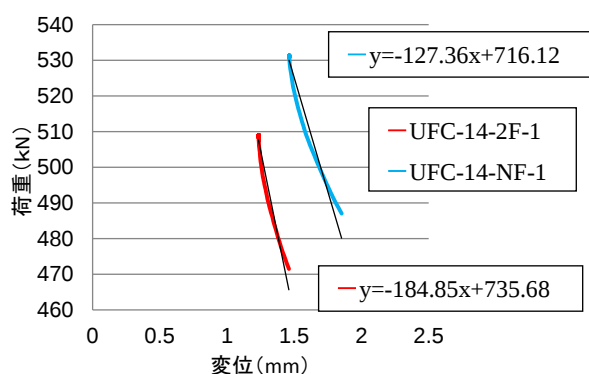


図-7 荷重低下開始直後の荷重－変位関係 (UFC)

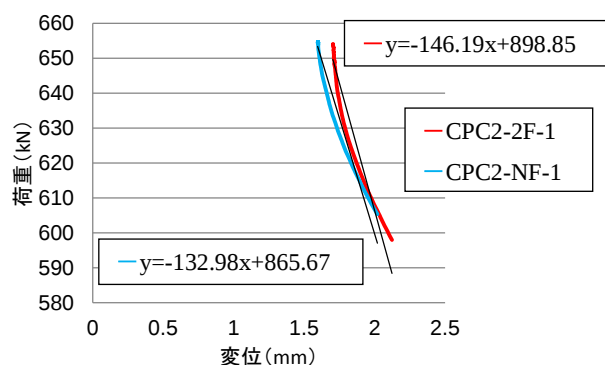


図-8 荷重低下開始直後の荷重－変位関係 (CPC2)

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-5 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-6 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を示した。その範囲は最大で 2000 点程度であったため、図-5 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-6 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-5 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

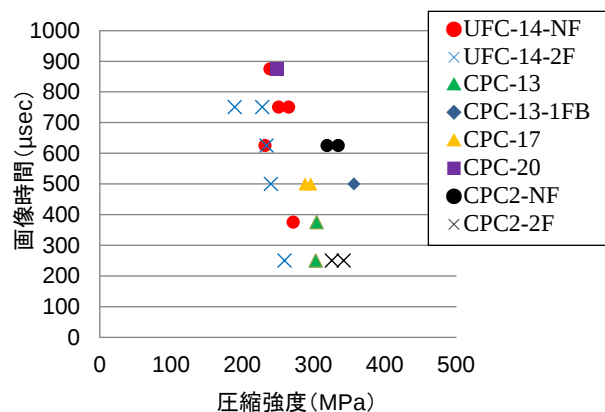


図-9 画像時間と圧縮強度

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形状を示したので、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-6 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-5 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-7、図-8 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-7、図-8 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 のほうが鋼繊維 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。

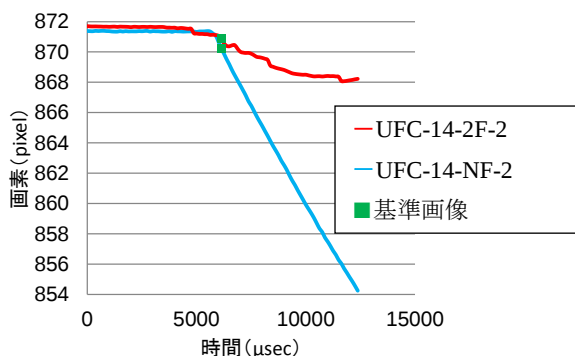


図-10 着目点変位 (UFC)

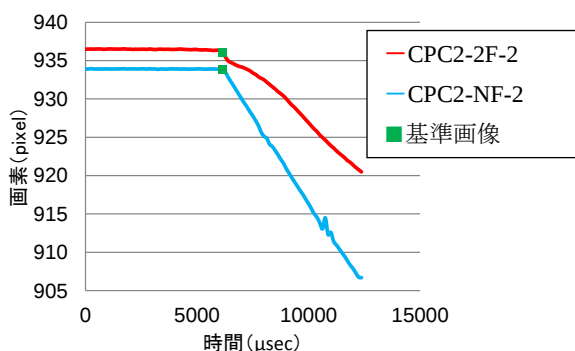


図-11 着目点変位 (CPC2)

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る、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。図-2 に示す供試体のように、ど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载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载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 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-9 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。

さらに詳細にみていくと、図-2 (3), (4) の破壊形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) の破壊形状を示した 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) の破壊形状を示した UFC-2F, CPC2-2F の 3 体と図-2 (1), (3) の破壊形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はなく、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、供試体上端の载荷板に印をつけ、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-10, 図-11 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 0sec としている。また、縦軸の画素は、供試体の载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-10 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、微視的に見ると繊維近傍とそれ以外で挙動が異なるため、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、基準画像以降も载荷軸方向の圧縮変形は小さくなっているが、繊維無混入していない 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、短繊維を混入することによって、ひび割れの進展、ならびに载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。

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 と同様の变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 においても繊維が供試体の载荷軸直交方向の変位の増大を抑制していると考ええる。

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、载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、今回はそれぞれ供試体 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. まとめ

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。以上から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) 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。
- (3) 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無混入の供試体より繊維補強した供試体のほうが小さいことがわかった。
- (4) 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。

- (5) 圧縮強度の高い CPC2 は、UFC に比べ、繊維補強した供試体の载荷軸方向変位の変化は大きかったが、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。

また本成果に対して残っている課題を示す。

- (1) 大まかなセンサデータを用いての評価は可能だが、より破壊に至る瞬間を詳細に計測できるように測定精度をあげるために、計測機材の応答周波数を考慮するとともに、微弱なノイズを除去できるようにする必要がある。
- (2) 結果として求めた応力は公称応力であるが、急激な破壊に至るまでに、表面が欠けることによって断面積が変わってしまうことがよく起こってしまうので、真応力も考慮に入れる必要がある。
- (3) 今後も供試体数を増やして、データを蓄積する必要がある。
- (4) さらに高い圧縮強度の供試体を対象として、450MPa 以上の圧縮強度¹⁾²⁾を有するセメント系材料を対象とした検証を行う必要がある。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 25709040 の助成を受けて行いました。援助いただきましたことに感謝致します。

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