

# 論文 重錘落下実験による UFC パネルの耐衝撃性に関する実験的研究

武者 浩透<sup>\*1</sup>・別府 万寿博<sup>\*2</sup>・岡本 修一<sup>\*3</sup>

**要旨**：超高強度繊維補強コンクリート (UFC) は、その超高強度と優れた耐久性によって RC 構造に比べて薄肉の部材を実現できる。また、繊維補強コンクリートは従来の RC に比べて耐衝撃性能が大きく改善することも分かってきている。そのため、重錘の自由落下衝撃実験を実施し、薄肉の UFC パネルの耐衝撃性能を確認した。その結果、UFC パネルは補強鋼材を入れることにより耐衝撃性能が大きく増加し、それは3倍の厚さの RC 版に相当することが明らかになった。さらに、プレストレスの導入により、衝突後の残留変位を抑えることができることが分かった。また、その破壊モードは押し抜きせん断であることが確認された。

**キーワード**：超高強度繊維補強コンクリート, UFC, パネル, 重錘落下, 低速衝突, 耐衝撃性能

## 1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート (Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete; UFC) は、その優れた強度特性と耐久性を活用することにより、従来の鉄筋コンクリートに比べて部材厚を大幅に薄肉化することができ、構造物を軽量化することが可能である。そのメリットを活かして近年では、トンネルの補強・補強などに用いられるライニングパネル、塩害対策や耐摩耗対策に用いられる埋設型枠などといったコンクリート製品としての利用だけでなく、歩道橋や道路橋などの橋梁構造物、海上の滑走路床版などの大型構造物にも適用が広がりつつある。

一方、耐衝撃性の研究の分野でも繊維補強が注目され、有機繊維を混入した RC 梁部材の研究<sup>1)</sup>や RC 版部材の研究<sup>2)</sup>、連続繊維シートや有機繊維で補強された薄肉コンクリートパネルの局部破壊に関する研究<sup>3),4)</sup>もなされており、繊維補強が耐衝撃性向上に大きな効果があることが分かってきている。しかしながら、一般的な鋼繊維補強コンクリートでは、混入されている鋼繊維の腐食の問題が有り、耐久性に懸念が残る。また、腐食の心配がない有機繊維(ポリプロピレンなど)を用いた場合では、鋼繊維に比べ繊維補強効果が小さく、ひび割れ幅の抑制効果の低下が懸念される。また、いずれの繊維補強においても、実際の部材では RC 構造に対して繊維補強するため、鉄筋のかぶりや配置等を考慮するとその板厚は一般的な RC 版の厚さになり、耐衝撃性を備えた薄肉部材の実現は難しいのが現状である。

そこで、薄肉で耐衝撃性能に優れた部材を実現するために UFC の適用が考えられる。この UFC については、藤掛らによる UFC のひずみ速度効果に対する研究<sup>5)</sup>や UFC 梁に対する衝撃荷重の研究<sup>6),7)</sup>が有るものの、UFC 部材の耐衝撃性能に関する既往の研究は非常に少

なく、さらに薄肉パネルに関する研究となると海外の簡易な実験<sup>8),9)</sup>が有るのみである。

そのため本研究では、UFC パネルの耐衝撃性能とその破壊モードを確認するため、重錘落下実験を実施した。実験の条件として、落下させる重錘質量は 115kg、衝突速度は 1m/s~16m/s の範囲とした。供試体の UFC パネルは板厚を 6cm とし、長手方向の補強鋼材やプレストレスの有無をパラメータとして、補強鋼材やプレストレスの効果について考察を行った。また、板厚 12cm および 18cm の RC 版についても同様の実験を実施し、UFC パネルとの耐衝撃性能や破壊モードの比較を行った。

なお、供試体の呼び方については、UFC については薄肉であることから UFC パネルとし、RC については RC 版と呼ぶことで区別した。

## 2. 実験の概要

図-1 に実験の概要を示す。実験は、RC 版および UFC パネルを架台上に設置し、上方から質量 115kg の重錘を所定の位置から自由落下させた。重錘の衝突部の直径は 15cm で先端の形状は平坦である。RC 版および UFC パネルは、架台上に 2 辺支持し、跳ね上がり防止治具で固定している。なお、供試体と架台の間には非常に小さい隙間が生じるので、厚さ 1mm の硬質ゴムシートを敷設している。

計測項目は、重錘衝撃力および衝突位置の変位とした。重錘衝撃力は、RC 版および UFC パネル上に載荷版(直径 15 cm, 厚さ 3 cm)を配置し、その上に設置したロードセル(最大容量 2MN)を用いて計測を行った。なお、UFC パネルは非常に薄肉で後述するように主方向を PC 鋼材で補強されているため、重錘衝突後の変形が大きく、またその変形が急速に回復し版上に設置したロードセル

\*1 大成建設(株) 土木技術開発部 (正会員)

\*2 防衛大学校 システム工学群建設環境工学科 准教授 (正会員)

\*3 大成建設(株) 土木技術部 (正会員)

が大きく跳ね上がることが想定されたため、ロードセルをパネル上に固定する必要があった。しかし、ロードセル設置用の孔等をパネルに施工した場合、パネルが薄肉であるためその孔がパネルの損傷程度に影響する可能性が懸念されたので、ロードセルは固定ベルトを用いてパネルに固定した。変位は、非接触型レーザー変位計（応答周波数 915Hz, 分解能 50 μm）を用いて载荷点であるパネルの裏側中央（平面的に重錘中央）を計測した。衝突後には、ひび割れの発生状況をスケッチした。

## 2.2 供試体

RC 版に用いたコンクリートは、普通強度のコンクリートで、材齢 28 日の平均圧縮強度は 56.4N/mm<sup>2</sup>である。UFC パネルには、土木学会の超高強度繊維補強コンクリート設計・施工指針（案）（UFC 指針案）<sup>10</sup> で用いられている標準配合粉体（RPC 系 UFC）を使用し、配合繊維は鋼繊維（高張力鋼：引張強度  $P_u=2,800\text{N/mm}^2$ ,  $\phi=0.2\text{mm}$ ,  $L=15\text{mm}$ ）とし、その配合量は UFC として一般的な 2vol%とした（表-1）。供試体の製作は UFC 指針案に準じて行い、標準熱養生（90 度で 48 時間の蒸気養生）後の圧縮強度の平均値は 205N/mm<sup>2</sup>であった。

RC 版および UFC パネルの基本的な形状と寸法を図-2 に示す。いずれも、長さ 1800mm×幅 900mm とし、板厚は RC 版を 12cm, 18cm とし、それぞれ D10 および D13 の異型鉄筋を 10cm 間隔で 2 方向に配筋している。なお、純かぶりは 4cm である。UFC パネルは RC 版より大幅に薄肉化し、その板厚を 6cm とした。供試体の一覧を表-2 に示す。UFC パネルは、内部に鋼材を配置していないパネル（UFC-6）を基本とし、部材軸方向に PC 鋼材（PC 鋼より線 SWPR7B：7 本より 12.7 mm）を 10cm 間隔でプレストレスを与えないで配置したパネル（UFC-6-NP）、さらにプレストレスを PC 鋼材にとって導入可能な値の 80%（設計導入力：784 kN、パネルに導入される圧縮応力度 14.5N/mm<sup>2</sup>）まで導入したパネル（UFC-6-P）を製作した。ここで、プレストレスを 80%に抑えたのは、パネル厚が 6 cm と薄いため、鋼材の純かぶりが 20 mm 程度しかなく、100%導入した場合に部材に割裂によるひび割れが生じると想定されたためである。図-3 に、UFC パネルの断面図を示す。

## 2.3 载荷方法

载荷方法は、同じ供試体を用いて表-2 に示すように衝突速度を 1.0m/s から段階的に増加させながら重錘落下を繰り返し、破壊時まで漸増载荷を行った。なお、重錘の

落下高さ  $h$  は、衝突速度  $V$  の算定式 ( $V = \sqrt{2gh}$ ) を用いて算定した。なお、パネル上のロードセルおよびパネル下方に設置したレーザー変位計については、それら機器の破損を防ぐため、供試体の損傷が激しくなった段階で撤去し、供試体の破壊まで実験を継続した。

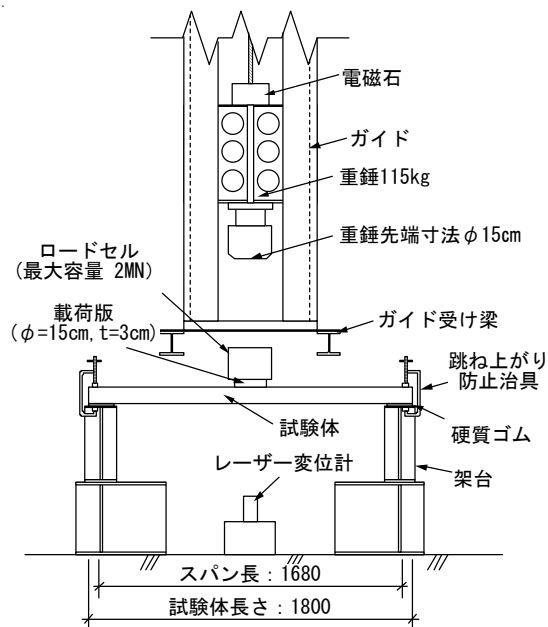


図-1 実験装置の概要

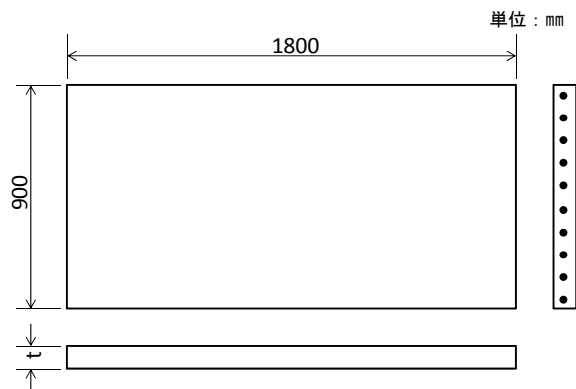


図-2 RC 版および UFC パネルの基本的な形状寸法

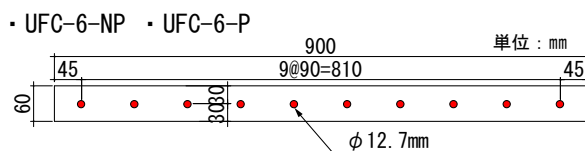


図-3 UFC パネルの断面図

表-1 UFC の配合

単位：kg/m<sup>3</sup>

| 種類             | プレミックス粉体 | 細骨材 | 鋼繊維              | 高性能減水剤   | 水   |
|----------------|----------|-----|------------------|----------|-----|
| UFC<br>(鋼繊維配合) | 1,322    | 932 | 157<br>(2.0vol%) | 28       | 162 |
|                |          |     |                  | 単位水量：180 |     |

表-2 供試体一覧

| 供試体名     | 板厚   | プレストレス         | 横方向鋼材 | 衝突速度：m/s, (落下高さ：m)  |
|----------|------|----------------|-------|---|
| RC-12    | 12cm | —              | —     | 1.0(0.05), 2.5(0.32), 5.0(1.28), 7.5(2.87)  |
| RC-18    | 18cm | —              | —     | 1.0(0.05), 2.5(0.32), 5.0(1.28), 7.5(2.87), 10.0(5.10), 11.0(6.17)                          |
| UFC-6    | 6cm  | 無し             | 無し    | 1.0(0.05), 2.5(0.32), 5.0(1.28), 7.5(2.87), 8.0(3.27)                                       |
| UFC-6-NP | 6cm  | 無し<br>(鋼材のみ配置) | 無し    | 1.0(0.05), 2.5(0.32), 5.0(1.28), 7.5(2.87), 8.0(3.27), 9.0(4.13),<br>10.0(5.10), 11.0(6.17) |
| UFC-6-P  | 6cm  | 有り (80%)       | 無し    | 1.0(0.05), 2.5(0.32), 5.0(1.28), 7.5(2.87), 10.0(5.10), 11.0(6.17),<br>12.0(7.35)           |

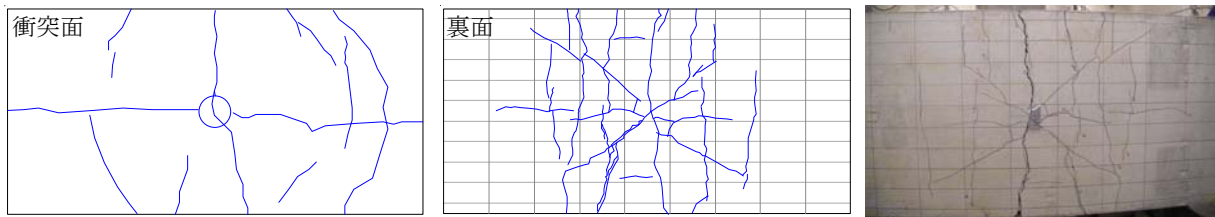


図-4 RC-12 の破壊状況 (衝突速度：7.5m/s)

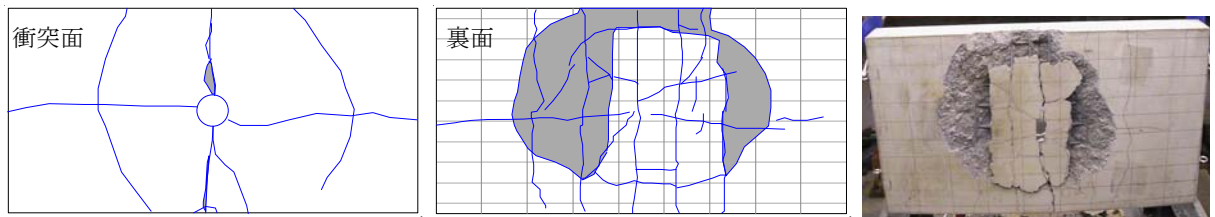


図-5 RC-18 の破壊状況 (衝突速度：11.0m/s)

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 破壊モード

##### 3.1.1 RC 版

図-4 に、板厚 12cm の RC 版の破壊状況(ひび割れ図、および終局破壊モードの写真)を示す。まず、衝突速度 2.5m/s において版中央に曲げひび割れが生じ、衝突速度が増加するにつれてひび割れが分散した。最終的に、衝突速度 7.5m/s において曲げひび割れが大きく開口したため実験を終了した。つぎに図-5 に、板厚 18cm の RC 版の破壊状況を示す。まず、衝突速度 5.0m/s で曲げひび割れが発生したのち、板厚 12cm の場合と同様に衝突速度が増加すると曲げひび割れは分散していった。しかし、衝突速度 11.0m/s において、押し抜きせん断破壊が生じ、終局に至った。結果として、板厚 12cm では曲げ破壊、板厚 18cm では直径 80cm 程度の押し抜きせん断破壊であった。

##### 3.1.2 板厚 6cm の UFC パネル

図-6 に、UFC-6 (内部に鋼材配置なし) の破壊状況を示す。衝突速度 2.5m/s の場合、外観上の損傷は生じなかった。衝突速度 5.0m/s になると、衝突部の裏面を中心とした放射状のひび割れが発生した。衝突速度 8.0m/s では、

表面に衝突部を中心とした円形のひび割れが分散して発生するとともに、裏面には曲げひび割れが中央部に集中して発生したため実験を終了した。終局限界時の衝突速度は板厚 12cm の RC 版では 7.5m/s、板厚 18cm の RC 版では 11m/s であったことから、板厚 6cm の UFC パネルは、板厚 12cm の RC 版とほぼ同等の耐衝撃性を有することがわかる。

次に、板厚 6cm の UFC パネルの内部に PC 鋼より線 (SWPR7B：7 本より 12.7 mm) を配置した供試体の結果を図-7 に示す。このケースでは、パネルの部材軸方向を鋼材で補強しているため、UFC-6 で発生した曲げひび割れが抑制される。そのため、衝突速度 5.0m/s ではまず、図-7 に示されている部材軸方向の縦ひび割れが生じた。衝突速度が増大するにしたがって、曲げひび割れが発生し、最終的に衝突速度 11.0m/s において曲げ破壊と押し抜きせん断の複合型のような破壊が生じた。終局時の衝突速度の観点からは、板厚 18cm の RC 版とほぼ同等の耐衝撃性を有することがわかる。UFC-6 の終局時の重錐の運動エネルギーは 3.68kJ であり、本ケースでは 6.96kJ であることから、内部に鋼材を配置することで吸収エネルギーは、鋼材なしに比べて 90% 向上したことがわかる。

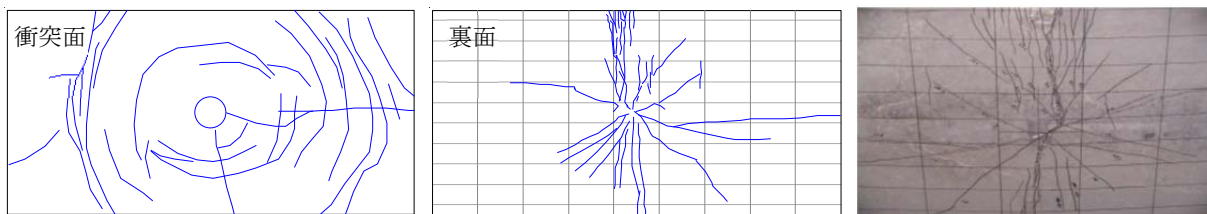


図-6 UFC-6 の破壊状況（衝突速度：8.0m/s）

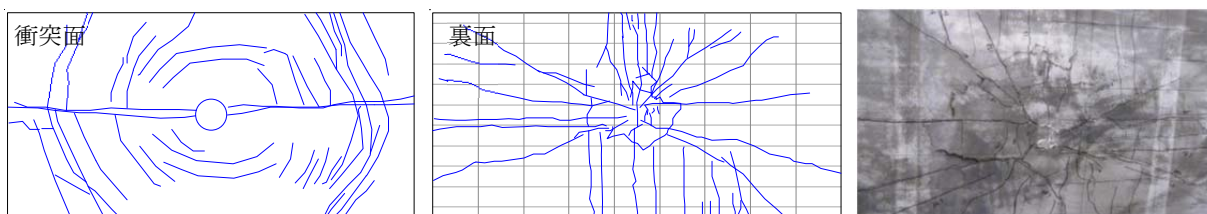


図-7 UFC-6-NP の破壊状況（衝突速度：11.0m/s）

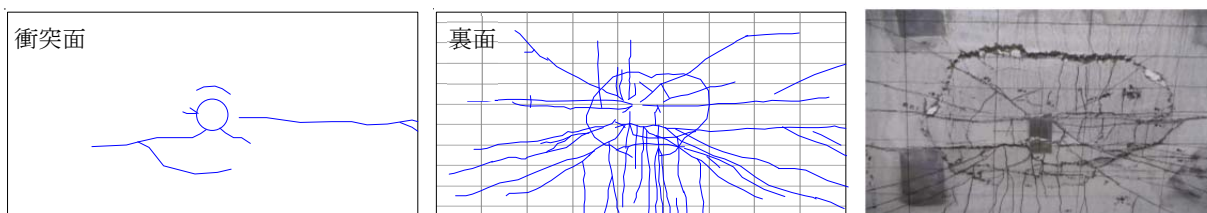


図-8 UFC-6-P の破壊状況（衝突速度：12.0m/s）

図-8 は、さらにパネルに配置した鋼材を用いてプレストレスを導入した場合の結果を示している。このプレストレスは、導入可能な値の 80% である。図から、UFC-6-NP と同様に、曲げひび割れが抑制されるとともに、縦方向のひび割れが生じることがわかる。その後、曲げひび割れが分散して発生し、最終的には押し抜きせん断破壊が生じた。UFC-6-NP では、曲げとせん断の複合破壊であったため、衝突面側に円形のひび割れが認められたが、本ケースでは衝突面側には衝突部を中心とした円形のひび割れは発生していないことから、押し抜きせん断破壊が支配的なモードと言える。プレストレスを導入することで、耐衝撃性がやや向上し、プレストレス無しに比べて、吸収エネルギーが約 19% 向上した。なお、速度 11.0m/s からの繰り返し載荷実験でも、漸増載荷とほぼ同様の破壊結果であった。

一連の UFC-6 シリーズの終局状態の写真を見比べると、補強するにしたがって、曲げ破壊から押し抜きせん断破壊へ移行している様子がわかる。また、UFC パネルは鋼繊維（ランダム配向）によってあらゆる方向に補強されているため、UFC-6 シリーズのいずれの場合も 1mm 以下のひび割れが分散して生じており、破壊に至る直前の段階までひび割れ幅の増大やコンクリート片の剥落が抑制されており、鋼繊維補強が耐衝撃性能の向上に大き

く寄与していることがわかった。

既往の静的な載荷実験によると<sup>11)</sup>、プレストレスによる補強を行っていない UFC パネルに比べ、プレストレスを導入したパネルは、耐力、じん性ともに大幅に向上することが報告されている。しかし、本実験で UFC-6-NP と UFC-6-P の結果を比較すると、UFC の高強度および延性的特性による耐衝撃性の効果は認められるものの、既往の静的実験結果におけるプレストレスによる大幅な耐力向上に比べ、今回パネルにおけるプレストレス導入の効果はさほど大きくないことがわかる。これは、実験では最終的な破壊形態が押し抜きせん断破壊であり、プレストレスによる大きな曲げ補強効果が有効に活用できていないことなどが考えられる。

### 3.2 最大重錐衝撃力と最大載荷点変位の特徴

図-9～10 に、最大重錐衝撃力、最大変位および残留変位の推移を示す。なお、重錐衝撃力は、ロードセルの最大容量 2MN を超えると予想された場合には計測していない。同様に、載荷点変位も破壊が大きくなり、変位計が壊れる恐れがあった場合には、計測していない。変位の値については、載荷前の裏面の位置を基準とし、最大変位、残留変位ともに載荷初期からの累計値を示している。

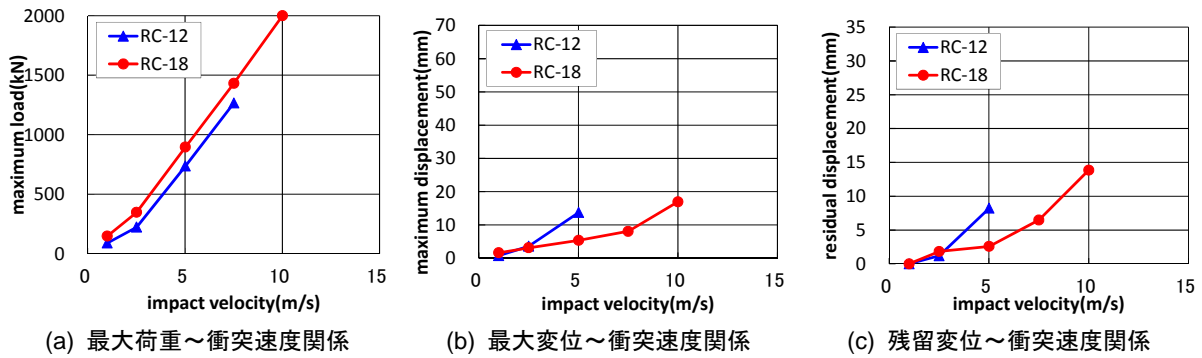


図-9 RC版の最大重錘衝撃力，最大および残留変位の推移

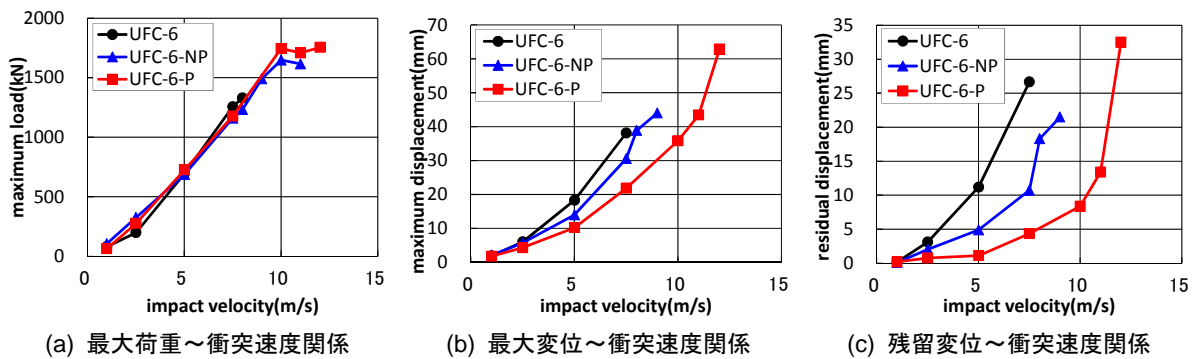


図-10 板厚6cm UFCパネルの最大重錘衝撃力，最大および残留変位の推移

図-9は、RC版の最大重錘衝撃力、最大変位および残留変位を示している。最大重錘衝撃力は衝突速度とともにほぼ線形に増加し、版厚18cmの方が版厚12cmよりもやや大きい値を示すことがわかる。これは、版厚が大きい方が版の剛性が高いためと考えられる。最大変位と残留変位をみると、曲げ破壊したRC-12の方が早い段階で大きな変位を示している。一方、RC-18は曲げ変形が少しずつ進行し、最終的に押し抜きせん断破壊が生じたため、最大および残留変位も緩やかに増加している。

図-10は、板厚6cmのUFCパネルの最大重錘衝撃力、最大変位および残留変位の推移を示す。図から、最大重錘衝撃力は、パネル内部の鋼材やプレストレスの有無によらず、ほぼ同じ挙動を示している。

重錘衝撃力は、RC版と同様に衝突とともにほぼ線形に増加するが、UFC-6-NPおよびUFC-6-Pでは、終局時には損傷の影響を受け、ほぼ一定の最大荷重であった。

最大変位と残留変位をみると、UFCパネルは、パネルが薄く剛性はRC版に比べて小さいことやUFCの延性的性質によって、RC版に比べて2倍程度の変位が生じていることがわかる。

また、鋼材配置やプレストレス導入があるほど、同じ速度に対する最大変位や残留変位が小さいことがわかる。特にプレストレス導入による残留変位の抑制効果が大きい。よって、これらの効果は最大変位よりも残留変位に大きな影響を与えていることが確認された。

### 3.3 今後の展開

本研究により、これまで未知であったUFCパネルの耐衝撃性を把握することができた。繊維補強とプレストレスにより曲げ補強されているUFCパネルは、今回の実験で用いた6cmの厚さにおいては、衝撃荷重に対して押し抜きせん断破壊が主な破壊モードとなる。すなわち、今回のパネルの仕様では、動的な曲げ耐力がせん断耐力を常に上回っていたと言える。この実験結果を基に、UFCパネルにおける動的な曲げ強度と押し抜きせん断強度のバランスを取ることで、衝撃に対して最も適した部材の設計が可能となると考えられる。現在、この重錘落下実験の結果に基づいて解析的検討を行っている。今後、UFCパネルにおける衝撃実験データの集積に努め、解析の精度を高めることにより、耐衝撃性に優れた薄肉UFCパネルの実用化に貢献できるものと考えている。

### 4. まとめ

本研究は、低速度衝突に対するUFCパネルの効果を調べるため、低速度の重錘落下実験を行ったものである。研究の成果を以下に要約する。

(1) 質量115kg、直径15cm、先端形状が平坦の重錘を用いて、UFCパネルの耐衝撃性を調べた結果、板厚6cmの鋼材無補強のUFCパネルは、板厚12cmのRC版(D10が10cm間隔で配筋、破壊モード：曲げ)とほぼ同等の耐衝撃性を有していることがわかった。また、パネル内

部に鋼材を設置すると、板厚 18cm の RC 版 (D10 が 10cm 間隔で配筋、破壊モード：押し抜きせん断) とほぼ同等の耐衝撃性を有していることが確認された。さらに、プレストレスを導入することで、耐衝撃性を向上できることがわかった。

(2) UFC パネルの破壊モードは、内部に鋼材を設置する場合は、プレストレス導入の有る無しに関わらず押し抜きせん断破壊であった。

(3) UFC パネルは鋼繊維の補強効果によって、ひび割れ幅の増大やコンクリート片の剥落が抑制され、耐衝撃性能が向していることが確認された。

(4) RC 版および UFC パネルともに、最大重錘衝撃力は、パネルの損傷が著しく生ずる以前の衝突速度である 10m/s までは、衝突速度にほぼ比例することがわかった。UFC パネル内部の鋼材設置、プレストレスの効果は、最大変位よりも残留変位に大きな影響を与えることが確認された。

謝辞：本研究を行うにあたり、九州大学大学院博士過程のチョン・ソン・ボン氏には、多大なるご協力を頂きました。ここに記して、謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 竹本伸一, 岸徳光, 三上浩, 栗橋祐介: ビニロン短繊維混入軽量コンクリートを用いた RC 梁の繰り返し衝撃載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1645-1650, 2004
- 2) 栗橋祐介, 岸徳光, 三上浩, 竹本伸一: PVA 短繊維を混入した軽量コンクリート製 RC 版の重錘落下衝撃載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1387-1392, 2006
- 3) 別府 万寿博, 三輪幸治, 高橋順, 小川敦久: 剛飛翔体の高速衝突を受ける繊維補強コンクリート板の耐衝撃性に関する研究, 防衛施設学会平成 22 年度年次研究発表会, pp.50-55, 2011.2
- 4) 小川敦久, 高橋順, 森田武, 別府 万寿博, 三輪幸治: コンクリートの局部破壊に対する補強法の現状と課題, 防衛施設学会平成 23 年度年次研究発表会, pp.51-56, 2012.2
- 5) K. Fujikake, T. Senga, N. Ueda, T. Ohno and M. Katagiri: Effects of strain rate on tensile behavior of reactive powder concrete, Journal of advanced concrete technology Vol.4, No.1, pp.79-84, 2006.2
- 6) K. Fujikake, T. Senga, N. Ueda, T. Ohno and M. Katagiri: Nonlinear analysis for reactive powder concrete beams under rapid flexural loadings, Journal of advanced concrete technology Vol.4, No.1, pp.85-97, 2006
- 7) K. Fujikake, T. Senga, N. Ueda, T. Ohno and M. Katagiri: Study on impact response of reactive powder concrete beam and its analytical model, Journal of advanced concrete technology Vol.4, No.1, pp.99-108, 2006.2
- 8) Mark Rebentrost, Gavin Wight: Behavior and Resistance of Ultra High Performance Concrete to Blast Effects, Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, pp.735-742, 2008.3
- 9) Mark Rebentrost, Gavin Wight: Investigation of UHPFRC Slabs under Blast Loads, Designing and Building with UHPFRC, pp.363-376, 2011
- 10) 土木学会: コンクリートライブラリー第 113 号 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), 2004
- 11) 渡辺典男, 宮田正史, 野口孝俊, 武者浩透: 大型 UFC 床版の載荷試験の結果と評価, 土木学会第 62 回年次学術講演会, 第 V 部門, pp.455-456, 2007