

## 低速度衝突を受ける UFC パネルの耐衝撃性に関する実験的研究

大成建設(株) 正会員 工修 ○ 武者 浩透  
防衛大学校 建設環境工学科 博士 別府万寿博  
大成建設(株) 工修 岡本 修一  
大成建設(株) 正会員 龍 尊子

Abstract: In this study, in order to obtain the impact resistance of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete (UFC) panel, weight falling impact tests were conducted on several kinds of test pieces such as RC slab and prestressed UFC panel. The results obtained from this study as follows: 1) UFC panel has an impact resistance that corresponds to RC slab which has three times thickness of UFC panel: 2) the failure mode of UFC panel is punching shear.

Key words: UFC, falling of weight, low-velocity impact, impact resistance

### 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、トンネルの補修・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はなく、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)</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。

そこで、超高強度と耐久性を有する UFC を用いることにより、耐衝撃性能に優れた薄肉の繊維補強パネルが考えられる。この UFC 部材については、藤掛らによる UFC のひずみ速度効果に対しての研究<sup>4)</sup> や UFC 梁に対する衝撃荷重の研究<sup>5)</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、薄肉パネルに関する研究は海外において、TNT 火薬を爆発させて離れた位置に設置した UFC パネルの損傷状況の確認実験<sup>6)</sup>が有る程度である。

そのため、本研究では UFC の薄肉パネルを対象とし、重錐の自由落下を用いた低速度衝突実験を実施して、UFC パネルの耐衝撃性能とその破壊モードを確認した。

### 2. 重錐の自由落下を用いた低速度衝突実験の概要

UFC パネルの低速度衝突に対する耐衝撃性能とその破壊モードを確認するため、重錐落下実験を実施した。ここで、低速度衝突とは衝突速度が 1~20m/s 程度の範囲での衝突を示す事とし、具体的には数 cm から最大 20m 程度の高さから物体が自由落下してパネルに衝突すると言った現象を想定している。そのため、この実験で得られるパネルの耐力や破壊モードは、衝突速度に応じた動的な挙動によって決定され、その動的な耐力はひずみ速度効果などの影響を受けているため静的耐力とは異なり、破壊モードも静的載荷時と異なる場合が有る。また、本実験では薄肉パネルを対象としているため、落下させる重錐は 115kg と軽量なものを用いた。供試体の UFC パネル厚さは、既往の鋼製剛飛翔体を用いた高速衝突実験<sup>7)</sup>において、5 cm の厚さでは衝突速度 400m/s の鋼製剛飛翔体に対して、その厚さが十分でないことが確認されているため、その最小厚さを 6cm とした。その UFC パネルは、スパン方向 (長手方向) に PC 鋼より線を配置し、プレテンション方式でプレストレスを導入した。さ

らに、剛性の影響や短手方向（横方向）の補強鋼材の効果を確認するために2種類の板厚9cmのパネルも用意した。また、板厚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。

2.1 実験装置と計測項目

図-1に実験装置の概要を示す。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、重錘衝撃力は、RC版およびUFCパネル上に載荷版（直径15cm、厚さ3cm）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。UFCパネルは非常に薄肉で主方向を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が大きく跳ね上がることが想定されたため、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を用いて載荷点のパネルの裏側を計測した。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、UFC指針案<sup>8)</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Pu=2,800N/mm<sup>2</sup>、直径：0.2mm、長さ：15mm）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18cmとし、D13の異形鉄筋を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、9cmとした。供試体の一覧を表-2に、UFCパネルの断面図を図-3に示す。板厚6cmのUFCパネルは、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：784kN、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。プレストレスを80%に抑えたのは、パネル厚が6cmと薄いため、鋼材の純かぶりが20mm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。板厚9cmのUFCパネルは、かぶり増によりひび割れの懸念がないためプレストレスの導入力を100%（設計導入力：980kN、パネルに導入される圧縮応力度12.1N/mm<sup>2</sup>）とした（UFC-9-P）。PC鋼材の配置は、薄肉パネルへの配置であり、表-2に示すように導入されるプレ

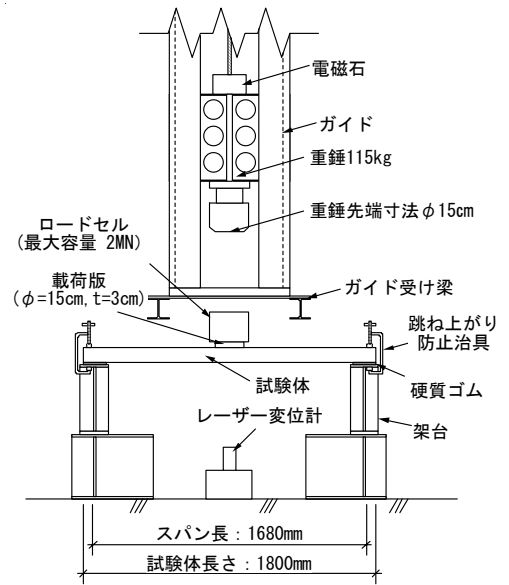


図-1 実験装置の概要

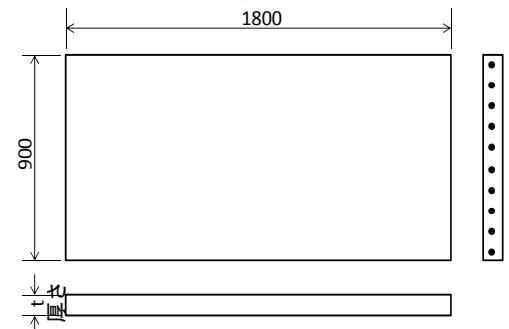


図-2 RC版およびUFCパネルの基本的な形状寸法

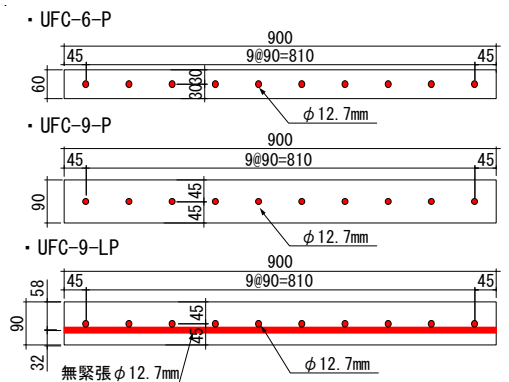


図-3 UFCパネルの断面図：補強鋼材の配置

表-1 UFC (RPC系) 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	高性能減衰剤	水
UFC (鋼繊維配合)	1,322	932	157 (2.0vol%)	28	162
単位水量: 180					

表-2 供試体一覧と実験結果

ケース名	供試体仕様							実験結果				
	板厚	圧縮強度 (引張強度) (N/mm <sup>2</sup> )	鋼材補強	プレストレス (パネルの 圧縮応力度)	補強 鋼材比(%) 主方向	静的曲げ 耐力に対応 する荷重(kN)	静的押抜き せん断耐力 (kN)	破壊形態	最終衝突速度 (最終落下 高さ)	最大 衝撃力 <sup>※1</sup> (kN)	最大変位 <sup>※1</sup> (mm)	最終 在留変位 (mm)
RC-18	18cm	56.4	D13@100 主・横両方向	————	2.00	93	251	押抜き せん断	11.0m/s (6.17m)	2,000 <sup>※2</sup>	17	14
UFC-6-P	6cm	212.4 (13.8)	鋼繊維+PC鋼材 (主方向のみ)	784kN (14.5N/mm <sup>2</sup> )	1.83	99	546	押抜き せん断	12.0m/s (7.35m)	1,755	63	33
UFC-9-P	9cm	207.5 (13.4)	鋼繊維+PC鋼材 (主方向のみ)	980kN (12.1N/mm <sup>2</sup> )	1.22	210	909	押抜き せん断	15.0m/s (11.45m)	1,909	31	15
UFC-9-LP	9cm	207.5 (13.4)	鋼繊維+PC鋼材 (主・横両方向)	980kN (12.1N/mm <sup>2</sup> )	1.22	210	909	押抜き せん断	16.0m/s (13.06m)	2,000 <sup>※2</sup>	13	6

※1: 計測機器は、その破損を防ぐため供試体の破壊前に撤去している場合がある。そのため、RC18の最大衝撃力と最大変位は、終局直前の載荷時の値である。  
 ※2: ロードセルの計測上限値。

トレスが大きいと、パネルにそりや曲げ応力が生じないように高さ方向の中央(図心配置)とした。また、横方向を補強するために主方向と同様のPC鋼材(無緊張)を配置したパネル(UFC-9-LP)を製作した。衝突速度は、RC版および板厚6cmのUFCパネルについては、速度を1.0m/sから増加させ、破壊時まで漸増荷重を行った。板厚9cmのUFCパネルの場合は、速度5.0m/sから漸増荷重を行った。なお、表-2には参考として、各供試体の静的な曲げ耐力および静的な押し抜きせん断耐力に相当する本実験での支持条件における荷重値を算定して示している。

### 2.3 荷重方法

荷重方法は、同じ供試体を用いて衝突速度を、RC-18とUFC-6-Pのケースについては1.0m/sから2.5m/s、5.0m/s、7.5m/s、10.0m/s、11.0m/s、12.0m/sと、また9cm厚のUFCパネルのケース(UFC-9-PおよびUFC-9-LP)については、5.0m/sから7.5m/s、10.0m/s、11.0m/s、12.0m/s、13.0m/s、14.0m/s、15.0m/s、16.0m/sと段階的に増加させながら重錘落下を繰り返し、破壊時まで漸増荷重を行った。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。また、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。

## 3. 実験結果

表-2の右側に、実験結果の数値データを示す。

### 3.1 破壊モード

#### (1) RC版 (RC-18)

図-4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、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10.0m/sまでは前兆はなかったが衝突速度11.0m/sにおいて押し抜きせん断破壊が生じ、下面のかぶり部分のコンクリートが大きく落下し終局に至った。その破壊は、脆性的で激しいものであった。

#### (2) 板厚6cmのUFCパネル (UFC-6-P)

図-5は、6cmのUFCパネルの結果を示している。図から分かるように、主方向に導入されたプレストレスにより曲げひび割れが抑制されているが、横方向の補強は鋼繊維のみであるため、縦方向のひび割れが生じている。この縦方向のひび割れは、衝突速度5.0m/sと比較的早い段階から確認された。その後、衝突速度を増していく度に曲げひび割れが分散して発生するが、最終的には衝突速度12.0m/sの時点で押し抜きせん断破壊が生じた。しかしながら、RCのケースとは異なり、UFCの繊維補強効果により下面部の大きな剥落は見られなかった。衝突速度の観点から述べれば、プレストレス補強さ

れた 6cm の UFC パネルは、厚さ 18cm の RC 版と同等以上の耐衝撃性を有することが確認された。

(3) 板厚 9cm の UFC パネル (UFC-9-P, UFC-9-LP)

図-6 は、板厚 9cm の UFC パネル (UFC-9-P) の実験結果を示している。本ケースは、プレストレスを 100%導入しており、厚いこともあって UFC-6-P よりも高い曲げ補強効果を有している。衝突速度 5.0m/s ではほとんど損傷は生じていないが、衝突速度 10.0m/s になると縦方向のひび割れが発生し、速度 15.0m/s で押し抜きせん断破壊が生じるとともに衝突側に縦方向の大きな貫通ひび割れが生じた。衝突側と裏面のひび割れ図をみると、その曲げひび割れの少なさから、部材厚を大きくしたこととプレストレスを増やしたことで曲げ抵抗が増大していることがわかるが、最終的な破壊はやはり押し抜きせん断であり、板厚 6cm (破壊時の衝突速度 12.0m/s) から部材厚を 50%増大しても耐衝撃性の向上効果は比較的少なかった。

図-7 は、UFC-9-P に横方向(短辺方向)にも無緊張の PC 鋼材を入れて補強した UFC-9-PL の実験結果である。横方向鋼材の効果によって縦方向のひび割れが抑制され、曲げひび割れが発達している。しかし、最終的には他のケースと同じく押し抜きせん断で破壊 (破壊時の衝突速度 15.0m/s) に至った。ここで、表-2 で参考として示した、静的耐力に相当する本実験での荷重とその破壊モードを比べると、曲げに関して言えば、RC-18 は UFC-6-P と同等の静的曲げ耐力を有しており、実験結果とは一致はするが、静的にははるかに高い耐力を有する押し抜きせん断で破壊している。これは、UFC-6-P において低速度衝突を受ける場合の動的耐力では、曲げ耐力とせん断耐力が逆転していることを示している。この事は、9cm の UFC パネルにおいても同様のことが言える。

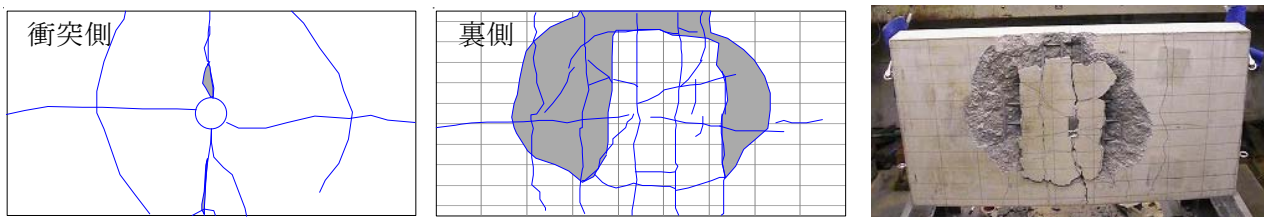


図-4 RC-18 の破壊状況 (11.0m/s)

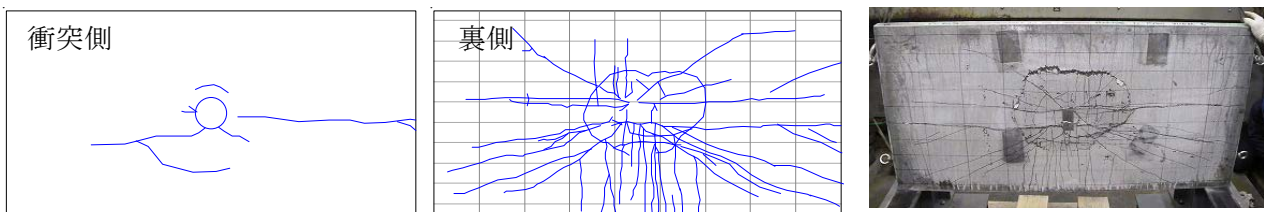


図-5 UFC-6-P の破壊状況 (12.0m/s)



図-6 UFC-9-P の破壊状況 (13.0m/s, 写真は衝突速度 15.0m/s)

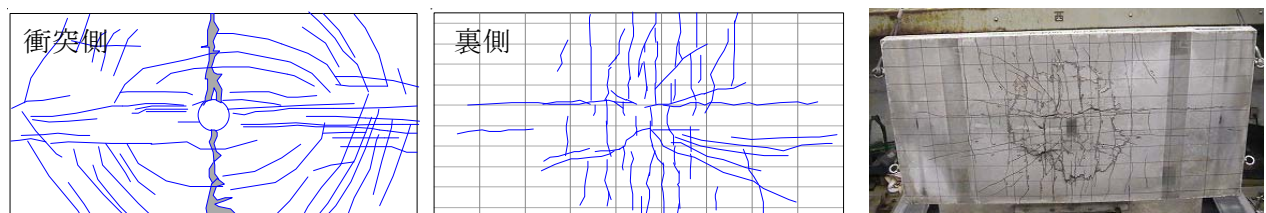


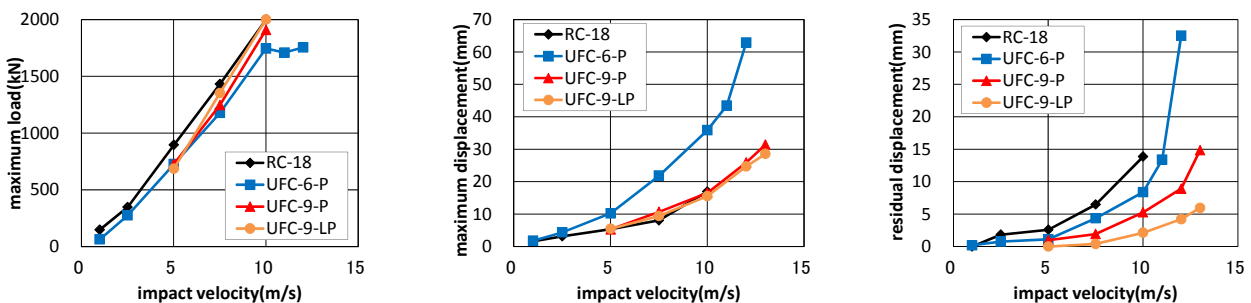
図-7 UFC-9-LP の破壊状況 (13.0m/s, 写真は衝突速度 15.0m/s)



以上の実験結果から、次のことが考察される。まず、主方向のみをプレストレスで補強した UFC パネルは、衝撃を受けた際にその主方向（縦方向）に沿ったひび割れが生じる傾向が有る。次に、板厚 6cm の UFC パネルでは、まず曲げひび割れが先行するが、最終的には押し抜きせん断破壊となる。また、板厚を 9cm とした場合においても、板厚の増大ほどには耐衝撃性は向上せず、やはり押し抜きせん断による破壊となる。この理由は、大きな曲げ補強を有する UFC パネルにおいて、曲げ強度に対して UFC の動的なせん断強度が小さい、もしくはせん断に対するひずみ速度効果が小さいことが考えられる。

### 3.2 最大重錘衝撃力と最大載荷点変位の特徴

図-8 に、最大重錘衝撃力、最大変位および残留変位の推移を示す。なお、重錘衝撃力は、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。そのため、UFC-6-P のケース以外では、図-8 に示されている最終点は最終荷重（終局時）の前段階のデータである。また、UFC パネルの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。



(a) 最大荷重～衝突速度関係 (b) 最大変位～衝突速度関係 (c) 残留変位～衝突速度関係

図-8 最大重錘衝撃力、最大変位および残留変位の推移

まず、最大重錘衝撃力に着目すると、RC-18 は衝突速度とともにほぼ線形に増加している。板厚 6cm および 9cm の UFC パネルでは、最大重錘衝撃力はパネルの厚さやプレストレス量や横方向鋼材の有無によらず、ほぼ同じ挙動を示している。重錘衝撃力は衝突速度 10.0m/s までは、RC 版と同様に衝突とともにほぼ線形に増加するが、UFC-6-P では、衝突速度 11.0m/s 以降は損傷の影響を受け、ほぼ一定の値であった。最大変位をみると、6cm の UFC パネルは、パネルが薄く剛性が 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。また、厚さを 6cm から 9cm に増すことにより最大変位が約半分押しえられているが、9cm パネルの比較では横方向鋼材の有無による差はない。残留変位については、RC-18 は最大変位との差が小さく、衝撃による曲げ変形がそのまま残留変位として留まっている。一方、UFC-6-P では、残留変位が最大変位の 1/2 ～1/4 程度に留まっており、重錘衝突の瞬間にはパネルが大きく変形するものの、プレストレスと鋼繊維補強の効果により、変形が大きく回復している。

すなわち、6cm の UFC パネルは RC 版や 9cm の UFC パネルに比べ、重錘衝突時に大きくパネルが変形することにより、衝撃エネルギーを吸収し曲げによるパネル損傷を緩和していることが確認された。9cm の UFC パネルでは、UFC-9-P の残留変位は最大変位の 1/2 程度、UFC-9-LP では 1/4 程度に留まっており、横方向の補強鋼材が残留変形低減に寄与していることが分かった。

### 3.3 実験結果のまとめ

本実験は、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。以下に本実験の成果を要約する。

(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 でプレストレス補強の UFC パネルは、板厚 18cm の RC 版 (D13 が 10cm 間隔で配筋、破壊モード：押し抜きせん断) とほぼ同等以上の耐衝撃性を有していた。

- (2) 横方向に補強されていない UFC パネルは、主方向 (縦方向) に比較的大きなひび割れが生じる傾向が有る。
- (3) UFC パネルの破壊モードは、パネル厚さ、プレストレス量、内部の鋼材設置に関わらず押し抜きせん断破壊であった。また、板厚 9cm の UFC パネルは、板厚 6cm の UFC パネルに比べてそれほど高い耐衝撃性を示さなかった。
- (4) RC 版および UFC パネルともに、最大重錘衝撃力は、衝突速度にほぼ比例することがわかった。UFC パネルのプレストレスおよび横方向補強の効果は、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。

#### 4. 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厚さ (6cm および 9cm) 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、動的な曲げ耐力が動的な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ににより、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。今後、UFC パネルにおける衝撃実験データの集積に努め、解析等を含めた検討を加えることにより、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。

謝辞：本研究の重錘落下実験を行うにあたり、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：ピ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) 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
- 5) 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, 2006.2
- 6) Mark Rebstrost, 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
- 7) 武者浩透，別府 万寿博，岡本修一，龍尊子：鋼製剛飛翔体の高速衝突を受ける UFC パネルの耐衝撃性に関する実験的研究，土木学会第 67 回年次学術講演会，第 V 部門，pp.419-420，2012
- 8) 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