

論文 衝撃荷重を受けるコンクリートと UFC の比較解析

小尾 博俊^{*1}・加納 宏一^{*1}・七井 慎一^{*2}・末田 隆敏^{*2}

要旨：超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC）は、優れた耐力，変形性能を有することから耐衝撃性が求められる構造物への適用が期待される。そこで本研究では、衝撃荷重として爆風圧の载荷と高速飛翔体の衝突を例に、コンクリートと UFC の比較解析を実施し、耐衝撃性について検討した。なお、解析にはひずみ速度効果を考慮した材料特性を用い、解析手法には陽解法 FEM を採用した。

キーワード：UFC，ひずみ速度効果，爆風圧，衝突，耐衝撃性

1. はじめに

UFC は高強度・高靱性・高耐久性を有した高性能な材料であり，その優れた力学特性から衝撃荷重を受ける構造物への適用が期待される。本研究では UFC の有効性を検討するため，衝撃荷重として，水素爆発事故を想定した爆風圧の载荷および高速飛翔体の衝突を取り上げ，コンクリート造と UFC 造の比較解析を試みた。

一般に，衝撃荷重を受ける構造物には高いレベルのひずみ速度が生じるため，構造物の挙動を予測するためには，高ひずみ速度下における材料特性を導入する必要がある。そこで，比較解析ではコンクリートと UFC について，ひずみ速度効果を考慮した材料特性を用い，両者の耐衝撃性について検討した。

2. 高ひずみ速度下における材料特性

2.1 コンクリート

コンクリートのひずみ速度効果は，文献 1) を参考に設定した。急速载荷時の圧縮強度，引張強度は式(1)～(4)に示すようにひずみ速度と静的な圧縮強度の関数として表される。

$\dot{\epsilon} \leq 30s^{-1}$ に対して，

$$f'_{cd} / f'_{cs} = (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^{1.026\alpha} \quad (1)$$

$$f_{td} / f_{ts} = (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^{1.016\delta} \quad (2)$$

$\dot{\epsilon} > 30s^{-1}$ に対して，

$$f'_{cd} / f'_{cs} = \gamma (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^{1/3} \quad (3)$$

$$f_{td} / f_{ts} = \beta (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^{1/3} \quad (4)$$

ここで，

f_{cd}, f_{td} ：急速载荷時の圧縮，引張強度

f'_{cs}, f_{ts} ：静的载荷時の圧縮，引張強度

$\dot{\epsilon}$ ：急速载荷時のひずみ速度

$\dot{\epsilon}_s$ ：静的载荷時のひずみ速度

(圧縮载荷に対して， $30 \times 10^{-6}s^{-1}$ ，

引張载荷に対して， $3 \times 10^{-6}s^{-1}$)

$$\alpha = 1 / (5 + 0.9 f'_{cs}) ; \delta = 1 / (10 + 0.6 f'_{cs}) ;$$

$$\gamma = 10^{(6.156\alpha - 2)} ; \beta = 10^{(7.112\delta - 2.33)}$$

2.2 UFC

UFC のひずみ速度効果は，文献 3)～4) を参考に設定した。このときの圧縮強度，引張強度は式(5)，(6)で表される。なお，本研究では体積比で 2% の鋼繊維を混入した UFC を対象とした。

$$f'_{cd} / f'_{cs} = \frac{\xi}{2.26} \left(-A_1 + \sqrt{A_1^2 - 4A_3} \right) \quad (5)$$

$$f_{td} / f_{ts} = (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^{0.0013 [\text{Log}_{10}(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)]^{1.95}} \quad (6)$$

ここで，

$f_{cd}, f_{td}, f'_{cs}, f_{ts}, \dot{\epsilon}$ ：2.1 に同じ

*1 大成建設（株） 土木技術研究所

*2 大成建設（株） 技術企画部

$\dot{\epsilon}_s$: 静的载荷時のひずみ速度

(圧縮载荷に対して, $12 \times 10^{-6} s^{-1}$,
引張载荷に対して, $1 \times 10^{-6} s^{-1}$)

$$\xi = (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^{0.006 \text{Log}_{10}(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)} ; A_1 = -0.733 - 2a ;$$

$$A_3 = -0.267 - 5.29a + a^2 ;$$

$$a = 3.34 / 137.65\eta ; \eta = (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^{0.0032 [\text{Log}_{10}(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)]^{1.8}}$$

式(1)~(6)を図化し, 静的強度に対する倍率とひずみ速度との関係を図-1に示す。

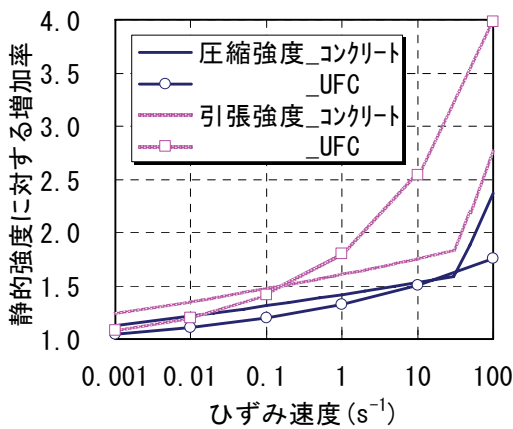


図-1 強度の増加とひずみ速度

3. 解析事例 1 : 爆風圧の载荷

3.1 概要

本例では水素爆発事故を想定し, 爆風圧を受ける独立壁がどの程度の衝撃力で, どの程度の損傷を受けるか検討する。独立壁としては RC 造と, これと比較するため, プレストレスを導入した UFC 造を対象とした。なお, 解析にあたっての諸条件は文献 5)を参考に設定した。

3.2 解析条件

図-2 および 3 に独立壁の形状寸法を示す。UFC 壁の形状設定にあたっては, RC 壁と同じ断面形状では無筋であっても, UFC 壁の方が有利であったので, UFC 壁は壁厚を可能な限り薄くすることを試み, かつ, 高い圧縮強度を活かすため PC 鋼棒で補強することにした。

爆風圧の時刻歴は図-4 を仮定し, 最大爆風圧により相似形をなすものとし爆風圧: 小~特大

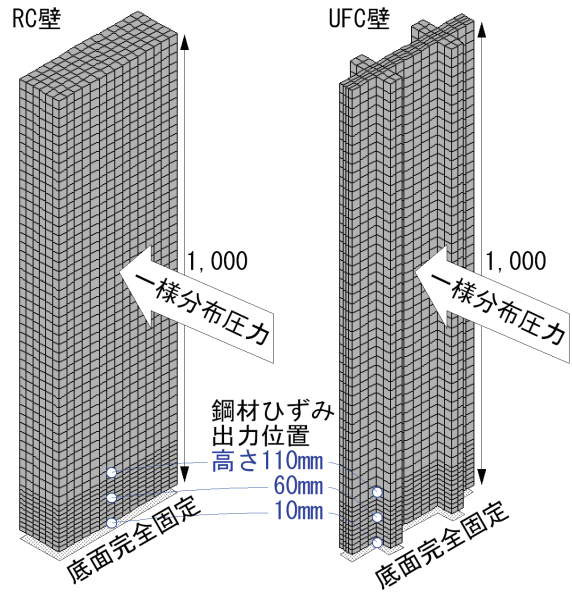
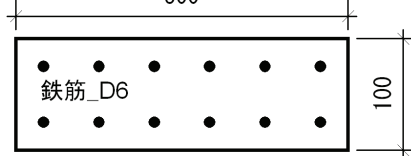


図-2 解析モデル

RC壁_断面寸法 300 100
コンクリート_圧縮強度20N/mm², 引張強度1.7N/mm²
鉄筋_降伏強度400N/mm²



UFC壁_断面寸法 300 100
UFC_圧縮強度180N/mm², 引張強度8.8N/mm²
PC鋼棒降伏強度930N/mm²

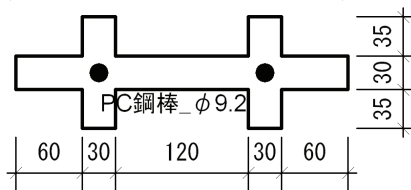


図-3 モデル断面寸法

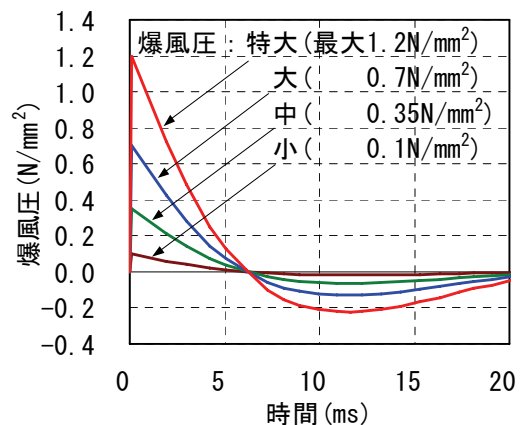


図-4 仮定した爆風圧の時刻歴

の 4 ケースを想定した。また、爆風圧は壁面に一様に分布するものと仮定した。

解析に用いたコンクリートおよび UFC の材料構成則は、2 章で述べたひずみ速度の影響を考慮するとともに、圧縮・引張強度後の軟化特性は文献 1)~4)を参考に仮定した。また、解析コードには汎用 FEM 解析コード ABAQUS/Explicit (陽解法)を用いた。

3.3 解析結果

図-5 に RC 壁および UFC 壁頂部の水平変位の時刻歴を示す。頂部の変位は爆風圧が大きくなるに従って増大し、最大変位が生じる時刻は遅くなっていくことが分かる。また、壁厚の薄い UFC 壁には RC 壁の約 2 倍の変位が生じる。

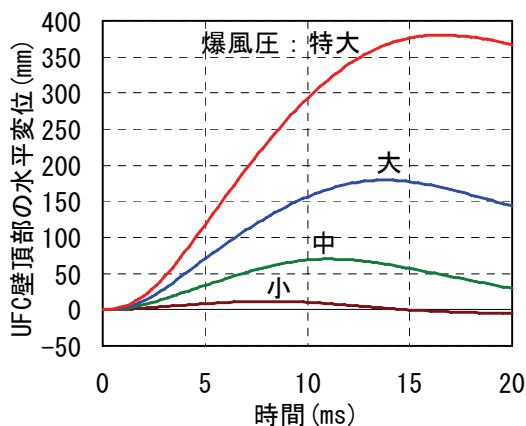
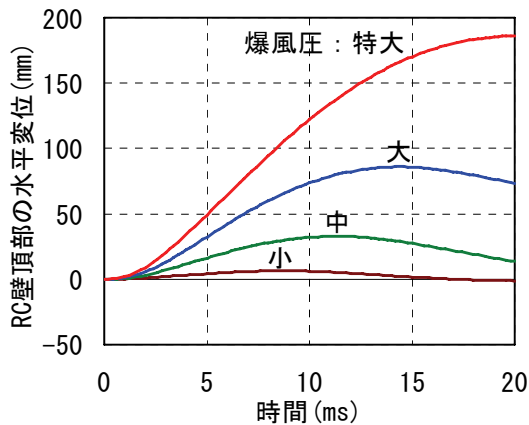


図-5 RC 壁・UFC 壁頂部の水平変位の比較

図-6 に爆風圧が中の場合の変形モードを示す。RC・UFC 両壁とも爆風圧を受けた直後は脚部のせん断変形が卓越するが、時間の経過に伴い、曲げ変形に移行していくことが分かる。

| | T=0.2ms | T=1.2ms | T=2.4ms | T=7.8ms |
|-------|---------|---------|---------|---------|
| RC 壁 | 0.015mm | 0.926mm | 4.487mm | 27.35mm |
| UFC 壁 | 0.031mm | 1.950mm | 9.759mm | 57.75mm |

図-6 変形モードの変化 (爆風圧：中)

図-7, 8 には RC 壁の鉄筋および UFC 壁の PC 鋼棒についてひずみの時刻歴を示した。併せて最大変位を 100mm に正規化した変形モードも示した。鋼材ひずみの出力位置は図-2 に示すように、底面からの高さがそれぞれ 10, 60, 110mm の位置であり、RC 壁の鉄筋は載荷面側の鉄筋とした。また、PC 鋼棒のひずみが 2,700 μ から始まるのはプレストレスとして 36kN を導入したことによる。

まず、爆風圧が小のケースでは、鉄筋、PC 鋼棒に生じるひずみ値から、コンクリートおよび UFC にはひび割れが生じていると容易に推察できる。爆風圧が中以上のケースでは、鉄筋、PC 鋼棒ともに降伏ひずみを超える。RC 壁は爆風圧が大から特大に増すと、鉄筋ひずみの最大出力位置が高さ 10mm から 60, 110mm へと移り、変形モードも曲げによる降伏から脚部のせん断破

壊に転じる可能性を示している。

一方、UFC 壁は爆風圧が特大のケースでも PC 鋼棒に生じるひずみは出力位置による大差はな

く、変形モードも曲げ降伏が支配的であり、UFC の優れた靱性を示している。

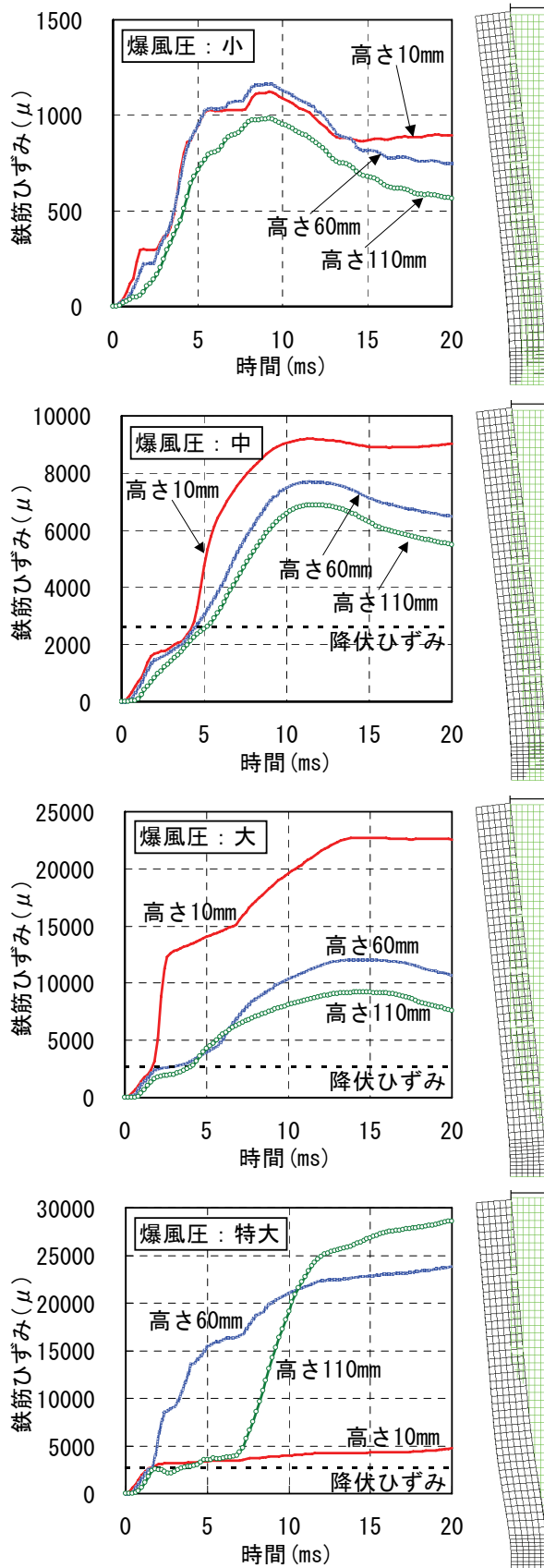


図-7 RC 壁の鉄筋ひずみと変形モード

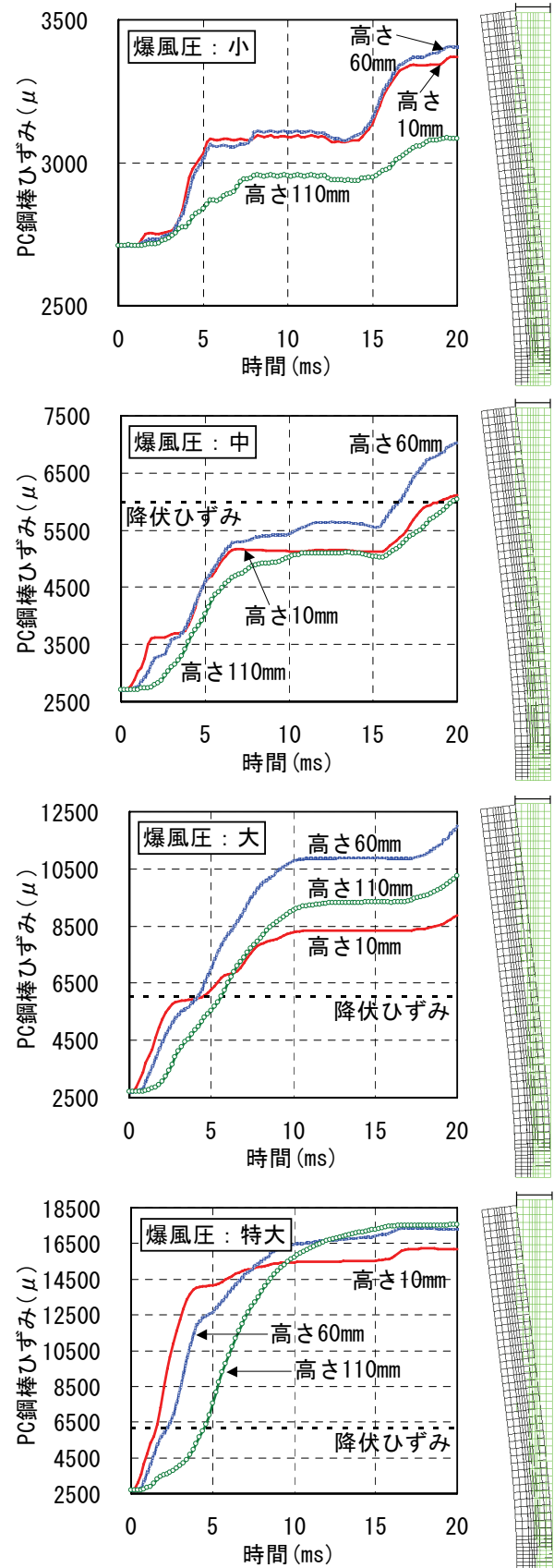


図-8 UFC 壁の PC 鋼棒ひずみと変形モード

4. 解析事例 2：高速飛翔体の衝突

4.1 概要

2つ目の事例として、高速飛翔体がコンクリート板に衝突する例を取り上げる。一般に、飛翔体の衝突によるコンクリート構造物の破壊モードは、構造全体の破壊と局部破壊に大別されることが知られている。本例の破壊モードは局部破壊に該当するもので、板厚および材料をパラメータとした比較解析を行った。なお、解析にあたっての諸条件は文献 6)を参考に設定した。

4.2 解析条件

図-9に解析モデルを示す。周辺境界が完全固定された180mmの正方形板に、飛翔体が垂直に衝突するものとし、解析モデルは1/2モデルとした。解析ケースは表-1に示すように、板厚3種類と材料をUFCにした計4ケースとした。

飛翔体は直径6mm、長さ15mm、質量約4gの鉛製を仮定し、衝突時の初速を720m/sとした。

コンクリートおよびUFCには3章と同様にひ

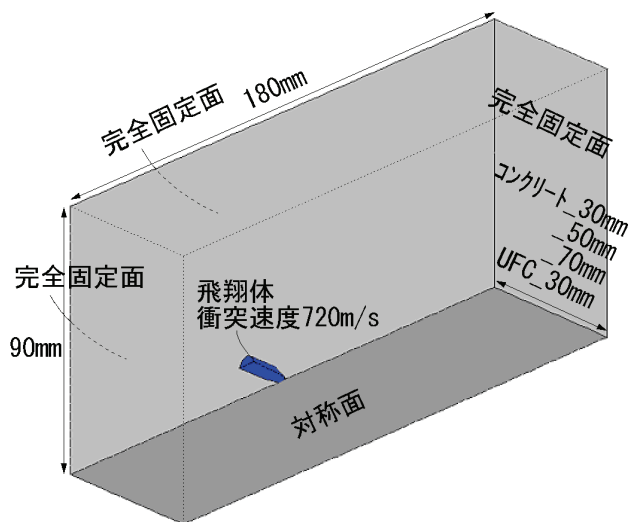


図-9 解析モデル

表-1 解析ケース

| 材料強度(N/mm ²) | | 板厚(mm) |
|--------------------------|----|--------|
| コンクリート | 圧縮 | 28.5 |
| | 引張 | 2.2 |
| UFC | 圧縮 | 180 |
| | 引張 | 8.8 |
| | | 30 |

ずみ速度の影響と圧縮・引張強度後の軟化特性を仮定した材料構成則を用い、解析コードはABAQUS/Explicitを使用した。さらに、本例では剥離・貫通等の局部破壊を表現できるように、全てのコンクリート(1辺3mmの立方体ソリッド)要素の表面間に粘着要素を定義した。

4.3 解析結果

図-10に飛翔体最後部における載荷方向の速度の時刻歴を示す。まず、板厚30mmのケースは衝突後減速し始め、 $T=150\mu\text{s}$ 以降定速状態となり貫通に至る。一方、板厚50、70mmのケースでは減速後、 $T=40\mu\text{s}$ 前後で負の速度、すなわち、跳ね返りが生じる。さらに、UFC板厚30mmのケースでは、 $T=30\mu\text{s}$ の時点で跳ね返りに転じることが分かる。

図-11には板裏面中央におけるコンクリートの速度時刻歴を示す。飛翔体の衝突によって生じる裏面のコンクリート速度は、コンクリート

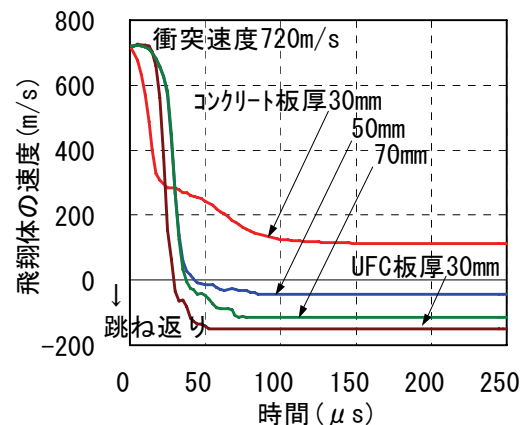


図-10 飛翔体の速度履歴

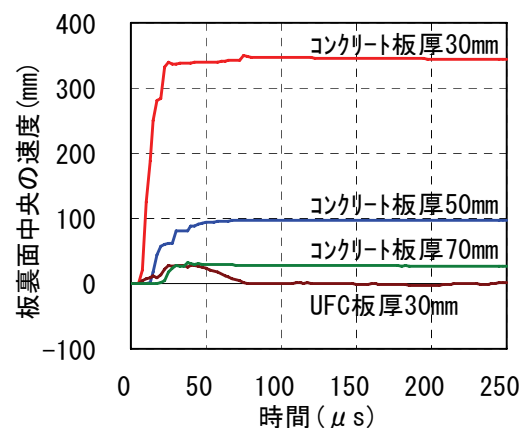


図-11 板裏面中央の速度履歴

の板厚が増すにつれて、345, 97, 27m/s と小さくなり、UFC30mm のケースでは $T=80 \mu s$ 前後で殆ど 0m/s になっている。

図-12 には $T=250 \mu s$ における板の破壊状況を示す。コンクリートの板厚が 30, 50, 70mm と増すにつれて、局部破壊は貫通→裏面剥離→表面破壊へと軽微になる様子が分かる。この破壊状況の変化は文献 6) の実験結果とほぼ一致し

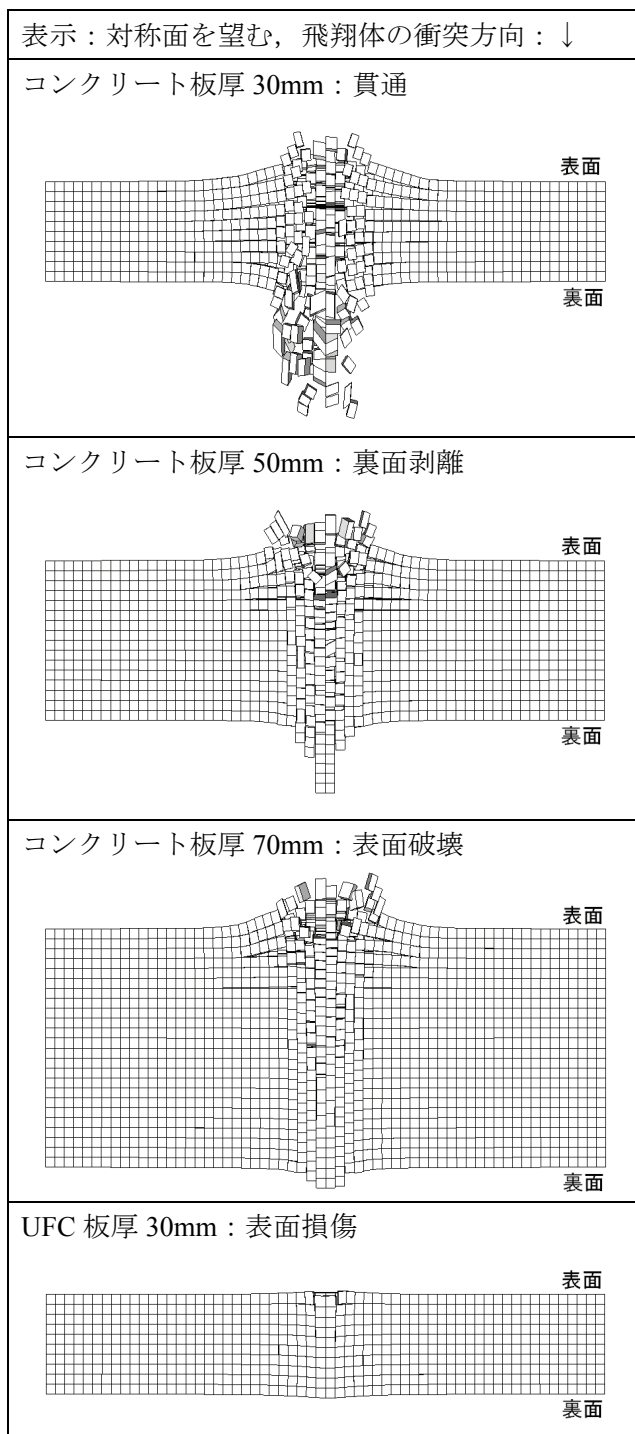


図-12 板の破壊状況 ($T=250 \mu s$)

ている。一方、UFC では板厚 30mm でも、衝突面がわずかに損傷するだけであり、解析結果からは極めて優れた耐衝撃性を有している。

5. まとめ

衝撃荷重を受けるコンクリートと UFC の比較解析から以下のことが分かった。

- (1) RC 壁は爆風の最大圧力が大きくなるに従って、曲げ降伏から脚部のせん断破壊に転じる可能性がある。
- (2) UFC 壁は壁厚を薄くすることで頂部の水平変位は大きくなるが、脚部のせん断破壊には至らず優れた靱性を示す。
- (3) 高速飛翔体の衝突を受けるコンクリート板は板厚が増すと、局部破壊は貫通から表面破壊へと軽微になり、この結果は実験⁶⁾と概ね一致する。
- (4) UFC 板は板厚 30mm でも、衝突面に軽微な損傷を負うにとどまり、耐衝撃性を有している。

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 土木学会, pp.249-251, 2002
- 2) 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案), コンクリートライブラリー113, 土木学会, pp.7-24, 2004
- 3) 藤掛一典ほか: 高速度の三軸圧縮載荷を受ける鋼繊維補強高強度モルタルの動的挙動とその特性モデル, 土木学会論文集 No.704/V-55, pp.37-53, 2002.5
- 4) 千賀孝宣ほか: 超高強度繊維補強コンクリートの動的引張特性に関する実験的研究, 土木学会関東支部第 32 回技術研究発表会, 2005.3
- 5) 長沼一洋ほか: 水素関連施設の安全性に関する研究その 2 : 水素爆発衝撃力を受ける RC 壁の動的非線形 FEM 解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.269-270, 2004.8
- 6) 田中信行ほか: 高速飛翔体の斜め衝突を受けるコンクリート板の損傷評価, 第 7 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.147-152, 2004.11