

論文 超高強度繊維補強コンクリート板の裏面剥離評価に関する基礎的検討

上野 裕稔*1・別府 万寿博*2・武者 浩透*3・岡本 修一*4

要旨：本研究は、超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC という）板の高速衝突実験を行って、局部破壊の特徴を調べるとともに損傷評価法に関する基礎的な検討を行ったものである。実験では、板厚 40～60mm の UFC 板に対して質量 46g の鋼製飛翔体を衝突速度 200m/s～450m/s で衝突させ、UFC 板の表面破壊および裏面剥離抑制効果について確認した。次に、修正 NDRC 式を準用することで、UFC 板の貫入深さや裏面剥離限界板厚を評価する方法を検討した。また、UFC 板および他の繊維補強コンクリート板の動的力学特性と裏面剥離抑制効果の関係について考察を行った。

キーワード：高速度衝突、超高強度繊維補強コンクリート、局部破壊、防護設計、繊維補強コンクリート

1. 緒言

近年、世界的に不測の爆発事故や爆破テロが頻発している。このような爆発災害が生じると、爆風圧による直接的な被害が生じるだけでなく、周囲へ飛散した爆発物の金属破片や爆発による破片等が衝突することによって構造物に 2 次的な被害が生じる。したがって、社会的に重要な構造物に対しては、耐爆設計に加え高速衝突に対する防護設計法が必要である。コンクリート部材が高速衝突を受けると、表面破壊・貫入（以下、表面破壊という）、裏面剥離および貫通などの局部破壊が発生する。構造物内部の機器や人命を防護する観点からは、これらの破壊モードの中でも裏面剥離を防止する設計法や補強方法を確立する必要がある。

著者らは、高速衝突に対する補強方法の一つとして有機繊維を混入した繊維補強コンクリートに着目して研究を行ってきた¹⁻³⁾。その結果、繊維補強コンクリートは繊維の架橋効果や優れた動的強度特性によって耐衝撃性が向上することが明らかとなった。本研究は、繊維補強コンクリートの中でもより高強度で靱性が高い超高強度繊維補強コンクリート⁴⁾(Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete, 以下 UFC と呼ぶ)の耐衝撃性およびその評価方法について基礎的な検討を行ったものである。UFC は、優れた強度特性や耐久性を有しており、部材を薄肉・軽量化できることから道路橋や滑走路床版等へ使用されている^{例えば 5), 6)}。UFC 板の耐衝撃性については、限定的では

あるが既にいくつかの研究例があり、UFC 板は非常に高い衝撃性を示すことが報告されている⁷⁻¹⁰⁾。ただし、これらの研究は弾丸による速度 600m/s 以上の衝突あるいは 100m/s 以下の中速度領域に対する耐衝撃性を検討したものであり、速度 200m/s～500m/s の衝突に関する研究例はない。またいずれも破壊状況の観察など定性的な考察にとどまっており、局部破壊の限界板厚に関する評価法については全く検討されていない。

本研究は、鋼製飛翔体の高速衝突を受ける UFC 板の耐衝撃性について実験的な検討を行ったものである。また、高速衝突を受ける UFC 板の貫入深さおよび裏面剥離限界板厚を評価する方法として、プレーンコンクリート板の局部破壊評価式である修正 NDRC 式を準用する方法を検討した。最後に、UFC 板と繊維補強コンクリート板等の動的力学特性や限界板厚を比較して、UFC 板の力学特性が耐衝撃性能に及ぼす影響について考察した。

2. UFC 板に対する高速衝突実験

2.1 実験の概要

図-1 に、実験に用いた高圧空気式飛翔体発射装置¹²⁾を示す。この装置は、圧縮機、増圧器、エアチャンバーおよび発射管で構成されており、圧縮空気圧力を調整することにより、質量約 50g～1,000g の飛翔体を速度約 100m/s～500m/s で発射することができるものである。飛翔体の速度は、発射口付近に 50cm 間隔で設置された 2

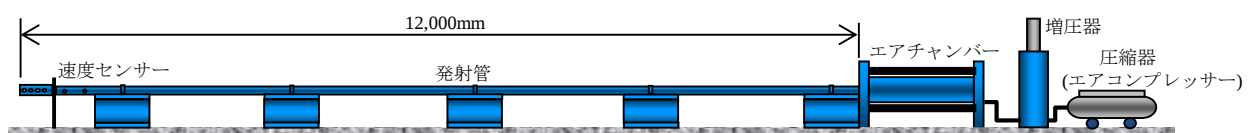


図-1 高圧空気式飛翔体発射装置の模式図

*1 防衛大学校 理工学研究科後期課程学生 修士（工学）（学生会員）

*2 防衛大学校 システム工学群建設環境工学科教授 博士（工学）（正会員）

*3 大成建設（株） 技術センター 土木技術開発部（正会員）

*4 大成建設（株） 土木本部 土木技術部 工学修士（正会員）

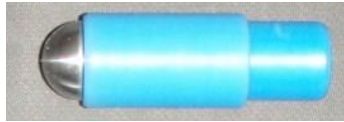


写真-1 鋼製飛翔体および固定具

表-1 鋼繊維の寸法等

繊維				
材料	直径 (mm)	長さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)	混入量 (vol%)
鋼繊維	0.2	15.0	2,800	2.0

表-2 UFC の力学特性

	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)	
		ひび割れ発生時	最大
UFC	219	12.5	24.5

表-3 実験ケースおよび実験結果

No	実験ケース	衝突速度 (m/s)	板厚 (mm)	貫入 深さ (mm)	破壊モード
1	FM-40	211	40.5	9.0	表面破壊
2		259	40.1	-	貫通
3	FM-50	205	50.0	10.0	表面破壊
4		217	52.1	7.3	表面破壊
5		301	50.0	11.8	表面破壊
6		302	50.0	11.8	裏面剥離
7		343	54.8	12.9	表面破壊
8		408	52.0	15.1	裏面剥離
9	FM-60	305	63.3	11.2	表面破壊
10		411	63.5	12.0	表面破壊
11		(450)	62.9	16.7	裏面剥離
12		454	62.5	19.5	表面破壊

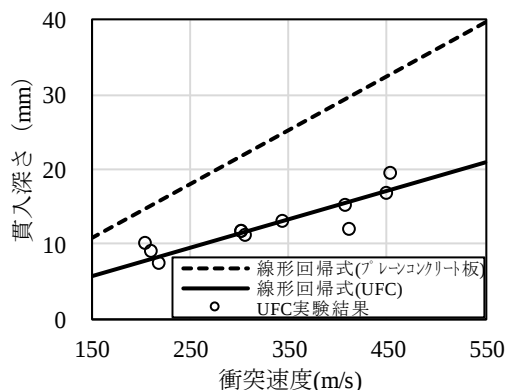


図-2 貫入深さ～衝突速度関係

つのレーザーセンサーにより、飛翔体の通過時刻を計測して算出した。写真-1 に、実験で使用した鋼製飛翔体および固定具を示す。飛翔体の先端部は直径 25mm の半球形状であり、質量は 46g である。試験体の寸法は縦 500mm×横 500mm で、板厚は 40mm～60mm とした。また、局部破壊現象は支点条件の影響が小さいことがわかっていて¹²⁾、試験体を木製板および L 型クランプを用いて上下 2 辺を固定した。

2.2 UFC の材料特性

実験に用いたUFC板は、超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）⁴⁾に適合する標準配合粉体に、

鋼繊維を体積比で2%混入したものである。表-1および表-2に、鋼繊維の寸法およびUFCの力学特性をそれぞれ示す。なお、UFCの引張強度は割裂試験によって求めた値であり、ひび割れ発生時の値および最大値を併記している。表から、UFCの圧縮強度および引張強度は、普通強度コンクリート（圧縮強度：30N/mm²）に比べて極めて高い（圧縮強度：約7倍、引張強度：約4倍）ことがわかる。

2.3 実験ケースおよび計測項目

表-3に実験ケースを示す。実験パラメータは、飛翔体の衝突速度およびUFC板の板厚とし、板厚40mm～60mmのUFC板に対して、質量46gの飛翔体を速度約200m/s～450m/sで衝突させた。計測項目は、貫入深さと破壊モードである。破壊モードはプレーンコンクリート板と同様に、表面破壊・貫入（以下、まとめて表面破壊と呼ぶ）、裏面剥離および貫通の3種類のモード¹³⁾に区分した。本研究では、裏面剥離限界板厚の評価法を検討することが目的の一つであるため、各板厚に対して破壊モードが裏面剥離または貫通となるまで衝突速度を増加させて実験を行った。

2.4 実験結果

表-3に、各実験ケースにおける貫入深さと破壊モードをまとめて示す。なお、No.11の実験ケースでは衝突速度が計測不良であったため、設定速度を括弧書きで記している。

(1) 貫入深さ

図-2に、貫入深さ～衝突速度関係を示す。図中に記した実線は実験結果から得られた線形回帰式であり、破線は同じ飛翔体を用いたプレーンコンクリート板（圧縮強度25.9N/mm²）に対する実験¹²⁾で得られた貫入深さの線形回帰式である。以下に、それぞれの線形回帰式を示す。

$$\text{プレーンコンクリート板} \quad x = 0.072 V \quad (1)$$

$$\text{UFC板} \quad x = 0.038 V \quad (2)$$

ここに、 x : 貫入深さ (mm)、 V : 衝突速度 (m/s) である。

図から、貫入深さは衝突速度に比例して大きくなることがわかる。また UFC 板は、プレーンコンクリート板に対して貫入深さが約 48%低減した。この理由は、UFC 板の圧縮強度 (219N/mm²) がプレーンコンクリート板の圧縮強度 (25.9N/mm²) に対して約 8.5 倍と高いことによって、飛翔体の貫入に抵抗したためと考えられる。

(2) 表面、裏面および断面の破壊状況

写真-2 に、破壊の一例として板厚が 60mm (FM-60) の場合の破壊状況を示す。なお、試験体については、図中に示すように上下二辺を支持している。また、断面の写真は支持方向に対して垂直（表面および裏面写真の上下方向）に切断して撮影したものである。破壊モードは衝突速度 411m/s で表面破壊、衝突速度 450m/s で裏面剥

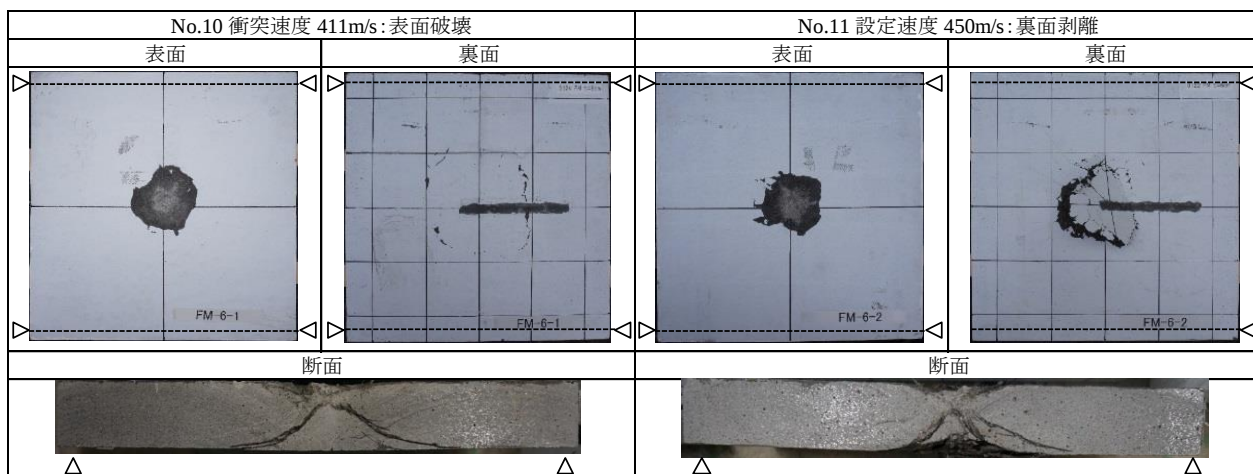


写真-2 FM-60 の破壊性状

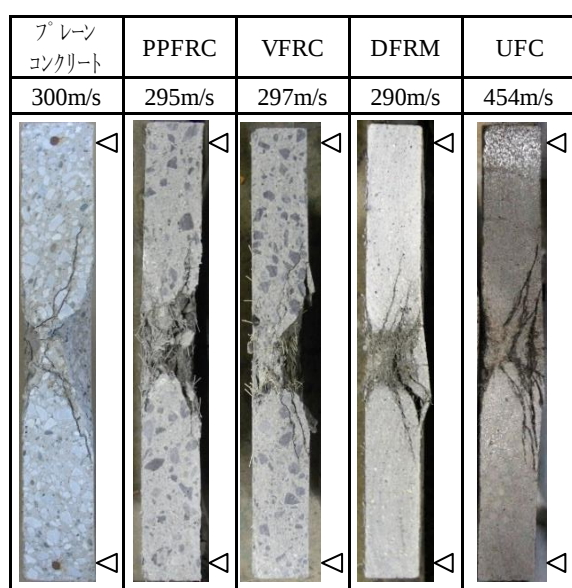


写真-3 プレーンコンクリート板、繊維補強コンクリート板および UFC 板の破壊断面

離となった。衝突速度 411m/s の場合、断面内に衝突部から斜め方向に発生したひび割れが明瞭に形成され、また裏面には円弧状のひび割れが生じている。しかし、裏面における剥離は生じていないため、破壊モードは表面破壊とした。衝突速度 450m/s では裏面が剥離しかけているが、一部がつながったままとなり、裏面剥離が発生するかしないかの限界（裏面剥離限界）であった。なお、同じ板厚（60mm）のプレーンコンクリート板に対する実験¹²⁾では、本研究と同じ飛翔体を用いた際に衝突速度 198m/s で裏面剥離が生じることが報告されている。すなわち、プレーンコンクリート板に裏面剥離を発生させる速度の 2 倍以上の衝突速度に対しても、UFC 板の破壊モードは表面破壊あるいは裏面剥離限界に抑制されたことがわかる。

(3) UFC、プレーンコンクリートおよび繊維補強コンクリート板に生じる破壊性状の比較

UFC 板の断面に生じた破壊性状をプレーンコンクリ

ート板¹²⁾および繊維補強コンクリート板²⁾と比較する。なお繊維補強コンクリートは、ポリプロピレン繊維（直径 0.7mm、長さ 30mm、引張強度 500N/mm²）をコンクリートマトリックスに混入した PPFRC、ポリビニルアルコール繊維（直径 0.66mm、長さ 30mm、引張強度 900N/mm²）および直径 0.1mm、長さ 12mm、引張強度 1,200N/mm²）をそれぞれコンクリートおよびモルタルマトリックスに混入した VFRC および DFRM である。繊維の混入量はいずれも体積比で 2.0vol% であり、それぞれの圧縮強度は約 47N/mm²、48N/mm² および 40N/mm² である。写真-3 に、板厚 60mm の場合に裏面剥離を示したプレーンコンクリートに板、繊維補強コンクリート板および UFC 板の破壊断面を示す。写真は、図中に示すように支持方向に対して垂直に切断して撮影したものである。なお、衝突速度については、プレーンコンクリート板および繊維補強コンクリート板がそれぞれ約 300m/s で、UFC 板が約 450m/s である。写真から、DFRM 板および UFC 板には、相対的に多くのひび割れが発生していることがわかる。この理由はいずれもマトリックスがモルタルであることや、混入した繊維の比表面積が大きいためと考えられる。著者ら²⁾は、高いひび割れ分散性能によって DFRM 板が優れた裏面剥離抑制効果を示すことを報告しているが、UFC 板についても極めて高い強度特性に加え高いひび割れ分散性能によって裏面剥離を効果的に抑制したものと考えられる。

3. 超高強度繊維補強コンクリート板の局部破壊評価方法に関する検討

現在までに、プレーンコンクリート板に対する局部破壊評価式は数多く提案されている¹⁴⁾。これらの局部破壊評価式は約 20 年～60 年前に提案された式であり、UFC 板のような超高強度コンクリートや短繊維補強コンクリートについては適用することができない。超高強度コン

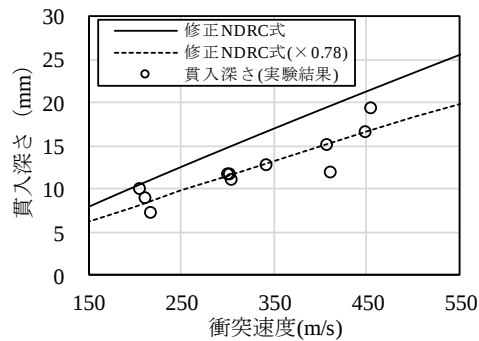


図-3 修正 NDRC 式による貫入深さの評価

クリート板や繊維補強コンクリート板に対する局部破壊の限界板厚評価については、現在までに別府ら¹⁵⁾や Tarek et al.¹⁶⁾が検討した例もある。しかし、これらは実験データが少なく、式中のパラメータに繊維補強コンクリートの力学特性を考慮していないなど課題も多い。今後、高強度や繊維補強コンクリート板に対する局部破壊を合理的に評価する手法の確立が望まれる。

本研究では、プレーンコンクリート板の局部破壊評価に広く用いられている修正 NDRC 式¹⁷⁾に着目する。別府ら¹²⁾の研究によると、本研究と同じ実験条件（実験装置、飛翔体）の場合、修正 NDRC 式はプレーンコンクリート板の貫入深さを 10%程度過大に評価するが、裏面剥離および貫通限界板厚を良好に評価することが報告されている。また著者ら^{2),3)}は、修正 NDRC 式に低減係数を考慮することで、繊維補強セメント複合材料に対する局部破壊の評価を行っている。本研究では一つの試みとして、UFC 板に対しても修正 NDRC 式を準用することで、貫入深さおよび裏面剥離限界板厚を評価する手法を検討する。また、本手法によって求められた UFC 板と繊維補強コンクリート板の限界板厚についても比較検討を行う。

3.1 修正 NDRC 式の概要

修正 NDRC 式は、剛飛翔体が無限厚さのコンクリート板に衝突したときの力の釣り合いから貫入深さを求めた式であり、裏面剥離や貫通限界板厚は貫入深さを変数とした回帰式となっている。下記に修正 NDRC 式の貫入深さおよび裏面剥離限界板厚をそれぞれ示す。

貫入深さ

$$\left(\frac{x_{NDRC}}{d}\right) = 2G^{\frac{1}{2}} \quad \frac{x_{NDRC}}{d} \leq 2 \quad (3a)$$

$$\left(\frac{x_{NDRC}}{d}\right) = G + 1 \quad \frac{x_{NDRC}}{d} \geq 2 \quad (3b)$$

ただし、

$$G = 3.8 \times 10^{-5} \frac{NM}{d\sqrt{f'_c}} \left(\frac{V_o}{d}\right)^{1.8} \quad (3c)$$

裏面剥離限界板厚

$$\frac{s_{NDRC}}{d} = 7.91 \left(\frac{x}{d}\right) - 5.06 \left(\frac{x}{d}\right)^2 \quad \frac{x_{NDRC}}{d} \leq 0.65 \quad (4a)$$

$$\frac{s_{NDRC}}{d} = 2.12 + 1.36 \left(\frac{x}{d}\right) \quad 0.65 \leq \frac{x_{NDRC}}{d} \leq 11.75 \quad (4b)$$

ここに、 x_{NDRC} ：貫入深さ(m)、 d ：飛翔体直径(m)、 N ：飛翔体の形状係数（半球形の場合 0.84）、 M ：飛翔体の質量(kg)、 V_o ：飛翔体の衝突速度(m/s)、 f'_c ：コンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 s_{NDRC} ：裏面剥離限界板厚(m)である。

修正 NDRC 式の適用範囲は、衝突速度：30.5～914m/s、直径：40.6mm 以下、質量：0.005 d³～0.166 d³kg である。なお、圧縮強度の適応範囲は明確に記されていないが、約 10～50N/mm² 程度のコンクリート板に対して行った実験結果に基づいて定式化されている。修正 NDRC 式は、材料パラメータとしては圧縮強度だけしか考慮していない。UFC に対しては、圧縮強度の他に引張強度、破壊エネルギーおよびひずみ速度効果等の材料特性を考慮する必要があるが、高速衝突時の破壊メカニズムに不明な点が多いため、ここでは便宜的に低減係数を乗じる方法を用いることとした。

3.2 修正 NDRC 式による UFC 板の局部破壊評価方法

(1) 貫入深さ

図-3 に、修正 NDRC 式を用いて算出した貫入深さと UFC 板の実験結果を比較して示す。図から、修正 NDRC 式による評価式は実験の貫入深さを約 30%程度過大に評価していることがわかる。そこで、修正 NDRC 式と実験結果が適合するような低減係数を求めたところ、図-3 に示すように 0.78 となった。すなわち、本実験条件における UFC 板の貫入深さは次式により求めることができる。

$$x_{UFC} = 0.78 \times x_{NDRC} \quad (5)$$

ここに、 x_{UFC} ：UFC 板の貫入深さである。

著者らが過去に行った、有機繊維を混入した繊維補強コンクリート板の実験³⁾においては、プレーンコンクリート板と繊維補強コンクリートの貫入深さには差がほとんど生じなかった。また、繊維の材料や直径、長さおよび混入量等のパラメータの影響は小さく、修正 NDRC 式による評価値は実験結果を 10～20%程度過大に評価した。すなわち、有機繊維を混入した繊維補強コンクリートに対する低減係数は 0.85～0.90 であり、UFC 板の低減係数はこれらよりもやや小さいことがわかる。この理由は、UFC は強度の高い鋼繊維が混入されているため、貫入深さが低減されたことが考えられる。

(2) 裏面剥離限界板厚

図-4 に、修正 NDRC 式により算出した裏面剥離限界板厚と実験で得られた破壊モードを比較して示す。なお図中の裏面剥離限界板厚は、前項で提案した貫入深さ x_{UFC} を式(4a)および式(4b)に代入して算出している。図から、貫入深さ x_{UFC} を代入した場合の裏面剥離限界板厚についても実験の結果には適合せず、裏面剥離限界板厚を

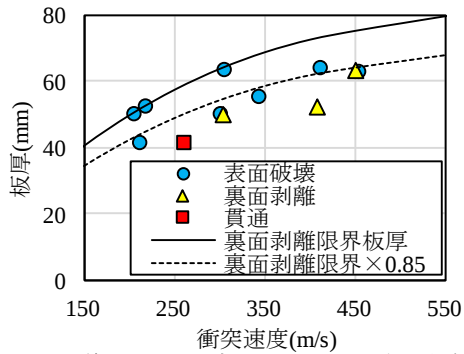


図-4 修正 NDRC 式による貫入深さの評価

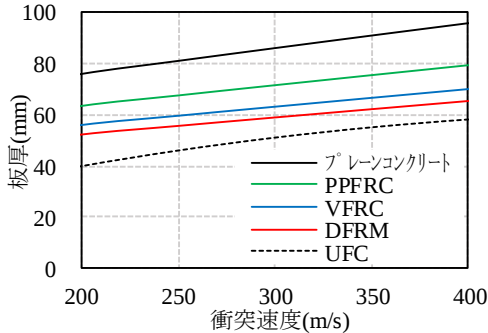


図-5 修正 NDRC 式による繊維補強セメント複合材料の裏面剥離限界板厚

表-4 静的および動的引張強度および破壊エネルギー

種類	引張強度			破壊エネルギー		
	静的 (N/mm ²)	動的 (N/mm ²)	動的 倍率	静的 (N/mm)	動的 (N/mm)	動的 倍率
プレーン コンクリート	2.2	5.5	2.50	0.035	0.060	1.71
PPFRFRC	2.89	5.98	2.07	4.82	2.46	0.51
VFRC	3.09	5.36	1.73	2.30	2.29	0.99
DFRM	2.06	6.22	3.01	1.18	3.48	2.95
UFC	11.2	13.5	1.21	22.6	25.8	1.15

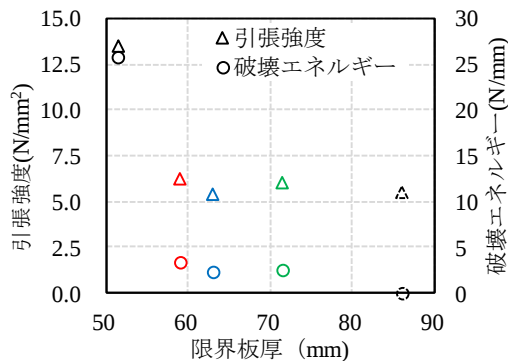


図-6 裏面剥離限界板厚と動的引張強度および破壊エネルギーの関係

17%程度過大に評価していることがわかる。そこで、裏面剥離限界板厚についても実験結果に適合するような低減係数を検討した結果、修正 NDRC 式による裏面剥離限界板厚に 0.85 を乗じると実験結果と適合した。すなわち、本実験条件においては UFC 板の裏面剥離限界板厚は次式により評価することができる。

$$s_{UFC} = 0.85 \times s_{NDRC} \quad (6)$$

ここに、 s_{UFC} : UFC 板の裏面剥離限界板厚である。

3.3 材料の動力学特性と裏面剥離限界板厚の関係

修正 NDRC 式を準用した方法を用いて、UFC 板、プレーンコンクリート板¹²⁾および繊維補強コンクリート板²⁾の裏面剥離限界板厚を比較する。また、これらの動力学特性が裏面剥離限界板厚に及ぼす影響について考察する。

修正 NDRC 式をプレーンコンクリート板¹²⁾、繊維補強コンクリート板²⁾および UFC 板の実験結果へ適合させた裏面剥離限界板厚を図-5 に示す。衝突速度 200m/s～400m/s の範囲では UFC 板の裏面剥離限界板厚は、プレーンコンクリート板の 50～60%程度となっている。また、繊維補強コンクリート板の中で最も耐衝撃性が高く裏面剥離限界板厚が小さい DFRM 板と比較すると、70～90%程度の板厚となっていることがわかる。この比較から、UFC 板はプレーンコンクリート板や繊維補強コンクリート板に比べて裏面剥離抑制効果が高いことがわかる。

別府ら³⁾によると、繊維補強コンクリート板の裏面剥離抑制効果は高い動的強度や引張破壊エネルギーによって発現されることが報告されている。そこで参考のために、各材料の動的引張強度特性と裏面剥離限界板厚の関係を考察する。表-4 に、各材料の静的およびひずみ速度約 $10^{-1}(1/s)$ における引張強度および破壊エネルギーを比較して示す。なお表中の動的倍率は、動的な引張強度および破壊エネルギーを静的な値で除したものである。なお、プレーンコンクリートは藤掛らの研究¹⁸⁾を、繊維補強コンクリートは神田らの研究¹⁹⁾を、また UFC は Fujikake らの研究²⁰⁾を引用した。それぞれの研究で使用されている供試体の寸法等は異なっており、プレーンコンクリートは縦横 70mm、高さ 200mm で断面中央部に鋼材を配置した角柱供試体、繊維補強コンクリートは直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体、UFC は縦横 50mm、高さ 100mm の角柱供試体を使用されている。なお、UFC の破壊エネルギーについては Fujikake らが提案した引張軟化モデル²⁰⁾を用いて算出した。プレーンコンクリート、繊維補強コンクリートおよび UFC の引張強度および破壊エネルギーは大きく異なること、また UFC の動的引張強度は 13.5N/mm^2 、動的破壊エネルギーは 25.8N/mm と他の繊維補強コンクリートの値と比べてそれぞれ約 2～3 倍および約 7 倍～50 倍と突出して大きいことがわかる。動的倍率については、各材料によって引張強度は 1.2～3.0 倍、破壊エネルギーは 0.5～3.0 倍と大きく変動することがわかる。このことは、高速衝突によって生じる局部破壊に影響する動的な強度特性が各材料特性に応じて変化することを示している。表-4 から、UFC 板については動的倍率は小さいが、動的引張強度および破壊エネルギーは相対的に非常に高いため、本実験条件下で生じ

る高ひずみ速度下¹²⁾(約 $10^1 \sim 10^2$ (1/s))においても、高い引張強度および破壊エネルギーを示すことがわかる。

次に、動的引張強度および破壊エネルギーと裏面剥離限界板厚の関係を考察する。図-6 は、各材料の動的引張強度および破壊エネルギーと速度 300m/s に対する裏面剥離限界板厚の関係を示している。図から、動的引張強度が高くなるにつれて、また破壊エネルギーが大きくなるにつれて裏面剥離限界板厚が小さくなる傾向が明瞭に示されている。すなわち、動的引張強度および破壊エネルギーが高くなるほど、裏面剥離抑制効果が高くなることからわかる。UFC 板の裏面剥離限界板厚が特に小さい理由としては、写真-3 で確認されたひび割れ分散効果の影響が考えられる。すなわち、UFC 板は高い動的引張強度および破壊エネルギーに加えて、ひび割れ分散性能に優れるためにプレーンコンクリート板や繊維補強コンクリート板よりも裏面剥離抑制効果が高くなったものと考えられる。

4. 結言

本研究は、鋼製飛翔体の高速衝突を受ける UFC 板の貫入深さおよび裏面剥離限界板厚の評価方法について実験的な検討を行ったものである。本研究の成果を以下に示す。

(1) UFC 板は、プレーンコンクリート板に対して貫入深さを約48%低減することがわかった。また UFC 板は、プレーンコンクリート板に対して裏面剥離が大幅に抑制されることがわかった。

(2) 修正 NDRC 式に低減係数を乗じて UFC 板の貫入深さおよび裏面剥離限界板厚を評価する方法を検討した。貫入深さについては修正 NDRC 式に 0.78 を、裏面剥離限界板厚には 0.85 を乗じることで実験結果に適合した。

(3) 修正 NDRC 式を準用した方法を用いて、UFC 板と各繊維補強コンクリート板の裏面剥離限界板厚について比較した。UFC 板は高い動的引張強度および破壊エネルギーに加えて、ひび割れ分散性能に優れるためにプレーンコンクリート板や他の繊維補強コンクリート板よりも裏面剥離抑制効果が高いものと考えられる。

参考文献

- 1) 別府万寿博, 小川敦久, 高橋順: 剛飛翔体の高速衝突を受ける繊維補強セメント系複合材料板の耐衝撃性能, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.70, No.2, pp.180-193, 2014.
- 2) 上野裕稔, 別府万寿博, 小川敦久: 高速衝突を受ける繊維補強セメント系複合材料板の局部破壊低減効果に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.36, No.2, pp.517-522, 2014.
- 3) 上野裕稔, 別府万寿博, 小川敦久: 高速衝突を受ける PVA 短繊維補強セメント複合材料板の局部破壊に短繊維混入量が及ぼす影響, 構造工学論文集,

Vol.61A, pp.899-911, 2015.

- 4) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリート繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), 2004.
- 5) 黒岩正, 西川孝一, 岩崎郁夫, 大熊光: 超高強度繊維補強コンクリートを用いた道路橋の開発～北九州 JCT 堀越 C ランプ橋～, 橋梁と基礎, Vol.41, pp.23-29, 2007.
- 6) 野口孝俊, 加藤浩司: 羽田空港再拡張事業における超高強度繊維補強コンクリートの活用, セメント・コンクリート論文集, No.62, pp.34-38, 2008.
- 7) Zhang, M. H., Shim, V.P.W., Lu, G., Chew, C.W.: Resistance of high-strength concrete to projectile impact, International Journal of Impact Engineering, Vol.31, pp.825-841, 2005.
- 8) Máca, P., Sovják, R., Konvalinka, P.: Mix design of UHPFRC and its response to projectile impact, International Journal of Impact Engineering, Vol.63, pp.158-163, 2014.
- 9) Tai, Y. S.: Flat ended projectile penetrating ultra-high strength concrete plate target, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol.51, No.2, pp.117-128, 2009.
- 10) 武者浩透, 別府万寿博, 岡本修一: 重錐落下実験による UFC パネルの耐衝撃性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.1273-1278, 2013.
- 11) 日本建築学会: 建設物の耐衝撃設計の考え方, 2015.
- 12) 別府万寿博, 三輪幸治, 大野友則, 塩見昌紀: 鋼製剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の局部破壊に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.63, No.1, pp.178-191, 2007.
- 13) 土木学会構造工学委員会: 構造工学シリーズ 6 構造物の衝撃挙動と設計法, 1994.
- 14) Li, Q.M., Reid, S. R., Wen, H. M., Telford, A. R.: Local impact effects of hard missiles on concrete targets, International Journal of Impact Engineering, Vol.32, No.1-4, pp.224-284, 2005.
- 15) 別府万寿博, 武藤聡明, 高橋順: 超高強度および補強コンクリート板の局部破壊評価に関する基礎的検討, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.1037-1047, 2013.
- 16) Tarek, H. A., Nadeem, A. S., Rizwan A. I., Husain, A.: Response of hybrid-fiber reinforced concrete slabs to hard projectile impact, International Journal of Impact Engineering, Vol.58, pp.17-30, 2013.
- 17) Kennedy, R. P.: A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects, Nuclear Engineering and Design, Vol.37, pp.183-203, 1976.
- 18) 藤掛一典, 上林勝敏, 大野友則, 江守克彦: ひずみ速度の影響を考慮したコンクリートの引張軟化特性の定式化, 土木学会論文集, No.669, Vol.50, pp.125-134, 2001.
- 19) 神田健輔, 別府万寿博, 小川敦久, 高橋順: 短繊維補強セメント系複合材料の動的引張特性に関する実験的研究, 第 38 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, 2013.
- 20) Fujikake, K., Senga, T., Ueda, N., Ohno, T. and Katagiri, M.: Effects of strain rate on tensile behavior of Reactive Powder Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.4, No.1, pp.79-84, 2006.