

# 論文 高速飛翔体の衝突に対する各種コンクリートの耐衝撃性能評価

南 正樹\*1・金 圭庸\*2・田 重圭\*3・金 武漢\*4

**要旨：**高速飛翔体の衝突を受けるコンクリートは表面の局部的貫入及び衝撃波による裏面破壊が発生する。これら衝撃破壊性状は、飛翔体の直径、質量、速度、並びにコンクリート試験体の厚さと力学特性に影響を受ける。本研究ではコンクリートの圧縮強度と曲げ引張強度の力学的性能の観点から、高速飛翔体に対するコンクリートの表面局部貫入及び裏面破壊性状を実験により評価した。その結果、コンクリートの圧縮強度の増加による表面局部貫入がやや抑制されたが、高強度化による裏面破壊の抑制効果は認められなかった。また、コンクリート試験体の裏面破壊は試験体の厚さ及び繊維補強によって抑制されることが分かった。  
**キーワード：**高強度コンクリート、表面貫入深さ、裏面剥離厚さ、裏面剥離限界厚さ、耐衝撃性能

## 1. はじめに

コンクリートは高い圧縮強度を有し、構造部材の材料として日常生活で発生する衝撃に対して、一般的に安全性が確保されている。しかし、コンクリート材料は脆性的な特性を持っており、飛翔体等の衝撃のような局所的な外力を受ける場合は局部破壊する可能性が高くなる。

高速飛翔体によって衝突を受けるコンクリートは図-1のように試験体に使った材料の力学性能が及ぼす影響が異なる。このような高速衝撃荷重の場合、コンクリートの破壊性状は飛翔体の直径及び質量、衝突速度、並びに試験体の強度、厚さ及び補強条件等の要因によって異なる。従って、コンクリートの耐衝撃性能評価は試験体や衝突条件を考慮して研究がなされている<sup>1)</sup>。

コンクリートの衝撃破壊に関して、飛翔体が衝突する表面は圧縮力により局部的に破壊し、裏面は衝撃波によって引張破壊するため破壊性状が異なる。これより、コンクリートの耐衝撃性能の向上のために、コンクリートの圧縮強度、曲げ及び引張強度、破壊エネルギーなどの力学特性が衝撃破壊に及ぼす影響に関して研究が行わ

れている<sup>2)</sup>。また、既往の研究結果によると高速衝撃を受ける場合、コンクリートの圧縮強度は表面破壊、曲げ及び引張強度、破壊エネルギー、変形能力は裏面破壊の抑制に関連性があると報告されている<sup>3)5)</sup>。

本研究では、高速飛翔体の衝突に対するコンクリートの圧縮強度の影響を表面及び裏面破壊性状から評価し、既往に提案されている関係式と比較した。また、繊維補強による裏面破壊の抑制効果についても比較検討した。

## 2. 実験計画及び方法

### 2.1 実験計画及び使用材料

表-1 に本研究の実験計画を示す。コンクリートの圧縮強度に対する表面破壊性状の影響を評価するために、試験体の設計圧縮強度は 50, 70, 90, 110, 130 及び 150 N/mm<sup>2</sup> の水準の高強度コンクリートを用いた。また、繊維補強による裏面破壊の抑制効果を評価するために設計圧縮強度 50N/mm<sup>2</sup> の条件で鋼繊維(steel fiber)及びポリアミド繊維(polyamide fiber)を各 0.5, 1.0vol.%混入した。

コンクリートの耐衝撃性状評価のための試験体の寸法は 100×100×20, 30, 35, 40, 50, 70mm(横×縦×厚さ)であり、コンクリート試験体に衝撃を与えるための飛翔体は直径 10mm, 質量 4.07g の鉄球で、衝突速度は約 350m/s とした。

また、評価項目は圧縮強度、曲げ及び引張強度、破壊エネルギー及び変形能力とし、耐衝撃性状は試験体の断面破壊性状によって破壊の程度を (I)表面破壊、(II)裏面剥離、(III)貫通破壊の 3 等級で分類した後に、表面貫入深さ、裏面剥離厚さ、飛翔体の衝突によって裏面に剥離しない状態の裏面剥離限界厚さにより評価した。表-2 に本研究で使用した材料及び繊維の物理的性質を示す。

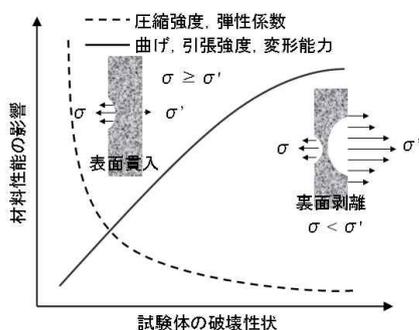


図-1 高速飛翔体の衝突による衝撃破壊性状

\*1 大韓民国 忠南大学校 大学院 建築工学科 博士課程 (正会員)  
 \*2 大韓民国 忠南大学校 建築工学科 教授 工博 (正会員)  
 \*3 大韓民国 (株)KOLON グローバル R&BD センター 責任研究員 工博 (正会員)  
 \*4 大韓民国 忠南大学校 建築工学科 名誉教授 工博 (正会員)

表-1 実験計画

実験要因及び水準			衝撃条件			評価項目 (材齢 28 日)
混入繊維の種類	試験体の種類 <sup>*1)</sup>	試験体の寸法 (mm)	飛翔体		速度 (m/s)	
			直径 (mm)	質量 (g)		
なし	F <sub>ck</sub> 50	横×縦 (100×100)  厚さ (20, 30, 35, 40, 50, 70)	10	4.07	350	245
	F <sub>ck</sub> 70					
	F <sub>ck</sub> 90					
	F <sub>ck</sub> 110					
	F <sub>ck</sub> 130					
	F <sub>ck</sub> 150					
鋼繊維	F <sub>ck</sub> 50SF0.5					
	F <sub>ck</sub> 50SF1.0					
ポリアミド繊維	F <sub>ck</sub> 50PA0.5					
	F <sub>ck</sub> 50PA1.0					

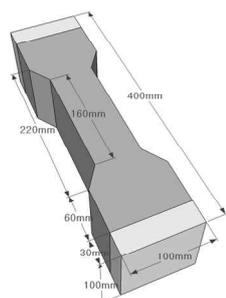
\*1) F<sub>ck</sub>NO.: 圧縮強度, SF: 鋼繊維, PA: ポリアミド繊維

表-2 使用材料の種類と物理的性質

種類	物理的性質
セメント	普通ポルトランドセメント 密度: 3.15g/cm <sup>3</sup> , 粉末度: 3,630cm <sup>2</sup> /g
フライアッシュ	密度: 2.20g/cm <sup>3</sup> , 粉末度: 3,228cm <sup>2</sup> /g
シリカフューム	密度: 2.22g/cm <sup>3</sup> , 粉末度: 200,000cm <sup>2</sup> /g
高炉スラグ	密度: 2.90g/cm <sup>3</sup> , 粉末度: 6,500cm <sup>2</sup> /g
無水石膏	密度: 2.90g/cm <sup>3</sup> , 粉末度: 3,550cm <sup>2</sup> /g
細骨材(海砂)	密度: 2.56g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.97%
粗骨材(砕石)	密度: 2.65g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.90% 最大寸法: 20mm
繊維	SF (steel fiber) 密度: 7.85g/cm <sup>3</sup> , 直径: 0.5mm, 長さ: 30mm, 引張強度: 810N/mm <sup>2</sup>
	PA (polyamide) 密度: 1.14g/cm <sup>3</sup> , 直径: 0.42mm, 長さ: 30mm, 引張強度: 594N/mm <sup>2</sup>

表-3 コンクリートの調合

F <sub>ck</sub>	W/B (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
			W	C	SF	BFS	FA	CaSO <sub>4</sub>	S	G
50	45	45	165	330	-	-	37	-	776	989
70	35			401	24	-	47	-	732	933
90	25	42	150	462	66	-	132	-	643	819
110	18			583	67	-	183	-	570	822
130	15	39	150	600	150	200	-	50	472	787
150	12			561	250	314	63	63	334	647



(a) 引張試験用試験体の形状及び寸法 (b) 加力器具

図-2 引張試験方法

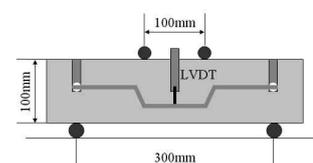
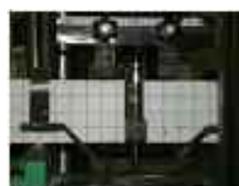


図-3 コンクリートの曲げ強度試験方法

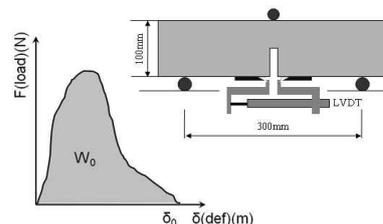


図-4 破壊エネルギーの評価及び荷重 - CMOD 曲線

## 2.2 コンクリートの調合及び試験体の作製

表-3 にコンクリートの調合を示す。設計圧縮強度による W/B は 45, 35, 25, 18, 15 及び 12% とし、目標スランプ及びフローは圧縮強度 50N/mm<sup>2</sup> の場合は 180±20 mm, 70 から 150N/mm<sup>2</sup> までは 600±50mm とした。また、空気量の場合は圧縮強度 50 から 90N/mm<sup>2</sup> までは 4±1.5%, 110 から 150N/mm<sup>2</sup> までは 2±1% の範囲で試験体を作製した。

一方、コンクリートの練り混ぜには 1000 容量の 2 軸シャフトコンクリートミキサーを使用した。試験体の作製について、KS F 2403「コンクリートの強度試験用試験体作製方法」に準じ、28 日の材齢まで温度 20±3℃ の標準養生を行なった。

## 2.3 力学特性試験方法

圧縮試験は寸法 φ100×200mm, 曲げ試験は寸法 100×100×400mm の試験体とし、4 点曲げ試験を行なった。

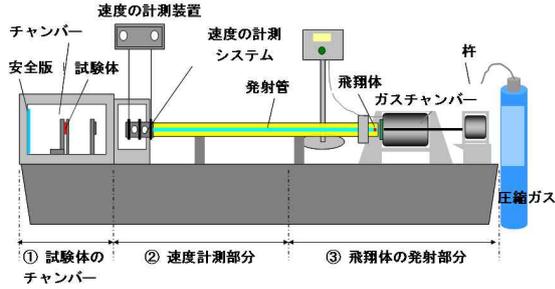


図-5 軽ガス圧力式衝撃試験装置

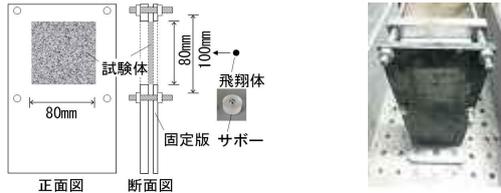


図-6 試験体の設置状況

また、図-2 に本研究における引張試験の方法を示す。試験体寸法は 100×100×400mm とし、曲げ試験用試験体をダンベル形にして作製し、一端固定一軸直接引張試験装置によって、0.25mm/分の速度で荷重引張応力とひずみの最大応力の時点の値を評価した。

圧縮強度は KS F 2405「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じ、曲げ強度は図-3 のように KS F 2408「コンクリートの曲げ強度試験方法」に準じ、4 点曲げ試験を行なった。

また、破壊エネルギーの試験方法は図-4 に示すように RILEM 50-FMC Draft Recommendation で提案されている試験体寸法 100×100×400mm の角型試験体の中央に 5mm 幅のノッチを入れ、3 点曲げ試験と荷重 - ひび割れ開口部変位(CMOD)曲線を用いて、式(1)から求めた。

$$G_f = \frac{W_0 + mg\delta_0}{A_{lg}} \quad (1)$$

ここで、 $G_f$ : 破壊エネルギー(N・m/m<sup>2</sup>)

$W_0$ : CMOD 荷重-変位の面積(N・m)

$m$ :  $m_1 + 2m_2$ (kg)

$m_1$ : 支持台間の梁の重さ(kg)

$g$ : 重力加速度(9.81m/s<sup>2</sup>)

$\delta$ : 梁の最終破壊時の変形(m)

$A_{lg}$ : 破壊断面積(m<sup>2</sup>)

## 2.4 耐衝撃性評価

耐衝撃性能評価に使用した高速衝撃試験装置を図-5 に示す。また、試験体の寸法及び設置状況を図-6 に示す。また、試験体の断面破壊性状によって破壊の程度を (I)表面破壊、(II)裏面剥離、(III)貫通破壊の3等級で分類した。

一方、衝撃試験後に試験体の表面貫入深さ及び裏面剥離厚さは、図-7 のような算定方法によって評価した。

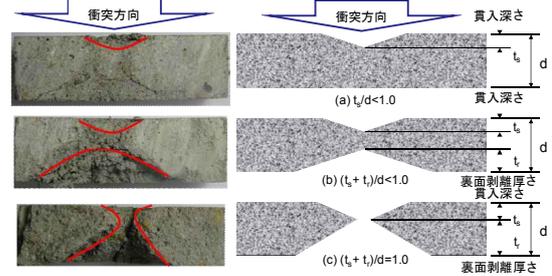


図-7 試験体の表面貫入深さ、及び裏面剥離厚さの算定方法

また、本研究では表面貫入深さ及び裏面剥離限界厚さの評価式として修正 NDRC 式(2)<sup>4)</sup>と US ACE 式(3)<sup>5)</sup>を参考にした。本研究においては高強度コンクリートから超高強度コンクリートまでの範囲で試験体の破壊性状の関係を検討した。

$$x/D = 3.813 \times 10^{-5} \frac{NM}{D\sqrt{f_c}} \left( \frac{V_0}{D} \right)^{1.8} \quad (2)$$

$$\frac{s}{D} = 2.12 + 1.36 \left( \frac{x}{D} \right) \quad 0.65 \leq \frac{x}{D} \leq 11.75$$

$$\frac{x}{D} = \frac{3.5 \times 10^{-4} M V_0^{1.5}}{(f_c)^{0.5} D^{2.785}} + 0.5 \quad (3)$$

ここで、 $x$ : 表面貫入深さ(m)

$N$ : 先端形状係数

$s$ : 裏面剥離限界厚さ(m)

$D$ : 飛翔体の直径(m)

$M$ : 飛翔体の質量(kg)

$V_0$ : 衝突速度(m/s)

$f_c$ : コンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 力学特性の評価結果

表-4 力学特性の評価結果

試験体の種類	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張変形 (%)	破壊エネルギー (N・m/m <sup>2</sup> )
F <sub>ck</sub> 50	56.6	6.5	3.38	0.016	307
F <sub>ck</sub> 70	73.57	10.9	4.42	0.015	331
F <sub>ck</sub> 90	94.18	11.2	4.88	0.016	371
F <sub>ck</sub> 110	121.6	11.3	4.50	0.007	460
F <sub>ck</sub> 130	138.3	11.6	4.91	0.010	480
F <sub>ck</sub> 150	153.7	11.6	4.69	0.007	498
F <sub>ck</sub> 50SF0.5	51.50	9.1	4.98	0.216	7887
F <sub>ck</sub> 50SF1.0	52.30	12.2	5.75	0.385	14642
F <sub>ck</sub> 50PA0.5	55.40	8.2	4.25	0.180	3854
F <sub>ck</sub> 50PA1.0	50.40	11.4	5.37	0.270	6908

表-4 にコンクリートの材齢 28 日における各試験体の力学特性の評価結果を示す。

コンクリートの圧縮強度は 28 日の材齢において設計圧縮強度を上回った。また、鋼繊維及びポリアミド繊維の混入が圧縮強度に及ぼす影響は見られなかった。

また、曲げ強度、引張強度及び破壊エネルギーは同じ圧縮強度の範囲では、繊維補強コンクリート試験体の方が高くなり、繊維の混入率が増加するほど向上する傾向を示した。混入繊維の種類においては鋼繊維を混入したコンクリート試験体の方が曲げ引張性能が良好であった。

一方、破壊エネルギーの場合は圧縮強度及び繊維の種類に関わらず繊維補強によって大きく向上した。

### 3.2 破壊等級の評価結果

図-8 に試験体の厚さによる破壊等級を示す。(I)表面破壊、(II)裏面剥離、(III)貫通破壊を生じた試験体の厚さ 20、30mm の場合について比較した結果、圧縮強度に関わらず繊維無補強コンクリート試験体は 20mm の厚さで(III)貫通破壊、30mm の厚さでは(II)裏面剥離が発生した。しかし、繊維補強コンクリート試験体の場合は 20mm の厚さで(II)裏面剥離及び(III)貫通破壊、30mm の厚さでは(I)表面破壊及び(II)裏面剥離となり、繊維補強によって高速衝撃に対する破壊が抑制された。繊維補強試験体の場合はコンクリートマトリックスと繊維の付着性によって飛散物の発生が低減した。

### 3.3 圧縮強度による表面及び裏面破壊性状

表-5 に高速飛翔体の衝突に対する圧縮強度別の表面貫入性状の評価結果を示す。断面性状はコンクリート試験体の厚さ 50mm の場合を例として示し、貫入深さはコンクリート試験体厚さ 20、30、35、40、50 及び 70mm に対して表面貫入深さを試験体 3 個以上から測定し平均値を求めた。裏面破壊が生じなかった厚さ 40mm 以上の試験体の表面貫入深さは、圧縮強度が高いほどやや低減する傾向が見られた。

図-9 にコンクリートの圧縮強度による表面貫入深さ及び算定式との比較結果を示す。本研究の表面貫入深さの評価結果は、既往のコンクリート表面貫入深さの算定式と比べると類似した傾向を示したが、110N/mm<sup>2</sup> 以上からは既往の算定式より低い値であった。

図-10 に試験体の厚さに対する表面貫入深さの結果を示す。同じ圧縮強度のコンクリート試験体の表面貫入深さは試験体厚さの増加の影響を殆ど受けない。

図-11 に試験体の厚さ 30mm の条件で、圧縮強度に対する裏面剥離厚さ及び裏面剥離面積損失率の結果を示す。圧縮強度に関わらず裏面剥離厚さは 20mm 以上、裏面剥離面積損失率は約 20~50%となった。この結果から

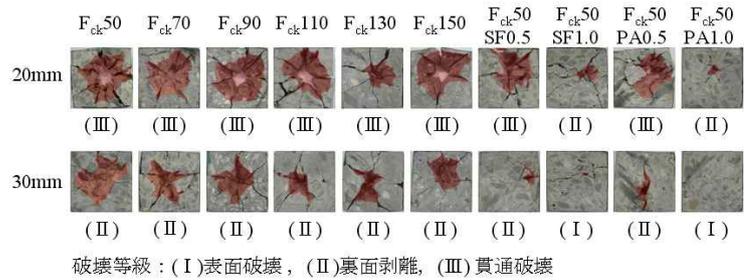


図-8 試験体の破壊等級(試験体の裏面)

表-5 圧縮強度に対する表面破壊性状

圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	Fck50	Fck70	Fck90	Fck110	Fck130	Fck150
	56.6	73.57	94.18	121.6	138.3	153.7
試験体の破壊性状 (断面) t=50mm						
貫入深さ (mm)	10.59	9.08	8.88	7.74	6.61	6.22

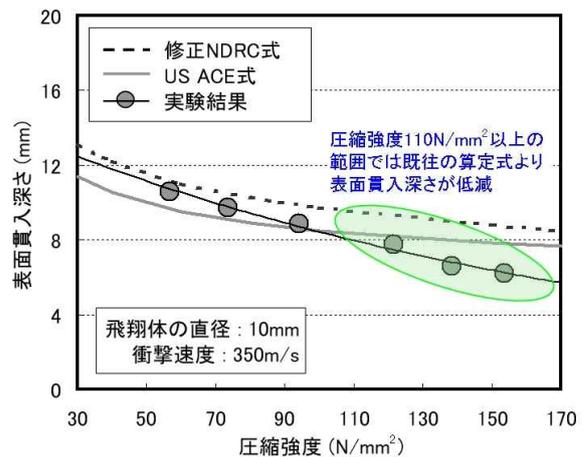


図-9 本実験結果と既往の算定式における表面貫入深さの比較

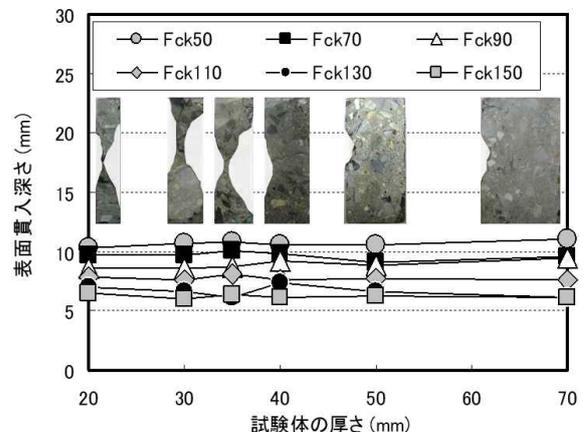


図-10 試験体厚さと表面貫入深さの関係

コンクリートの圧縮強度の増加による裏面破壊の抑制は期待できないと考えられる。

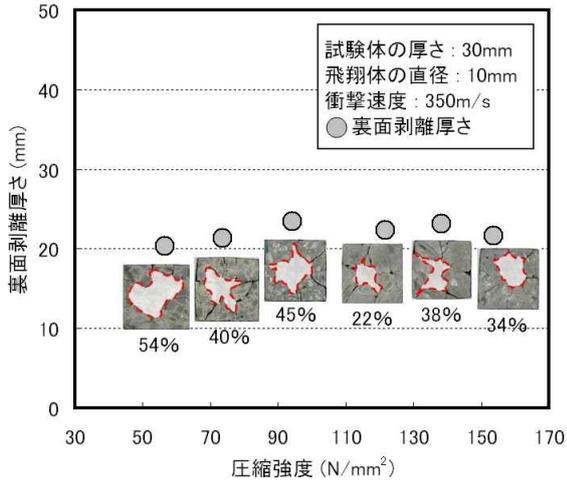


図-11 圧縮強度と裏面剥離厚さの関係

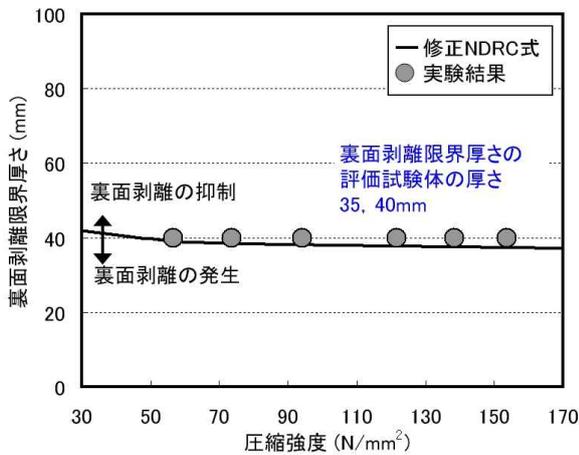


図-12 本実験結果、及び既往の評価式により求めた圧縮強度と裏面剥離限界厚さの関係

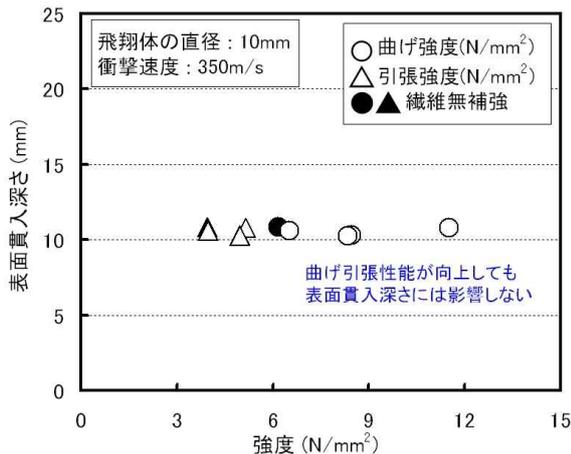


図-13 曲げ引張強度と表面貫入深さの関係

また、図-12にコンクリート試験体の圧縮強度に対する裏面剥離限界厚さの結果を示す。本研究の範囲では圧縮強度に関わらず試験体の厚さ 40mm 以上から裏面剥離が生じなかった。この結果は修正 NDRC 式による裏面剥離限界厚さと同じ傾向であったが、修正 NDRC 式では圧縮強度が増加するほど裏面剥離限界厚さが低減する傾

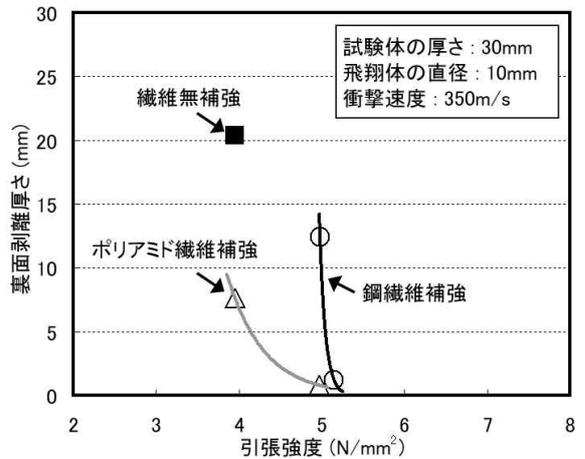
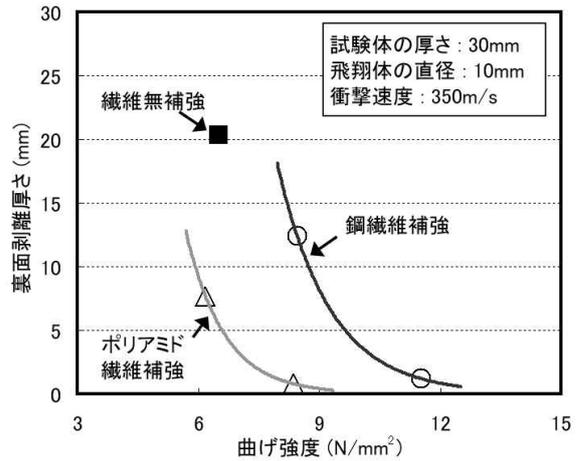


図-14 曲げ、引張強度と裏面剥離厚さの関係

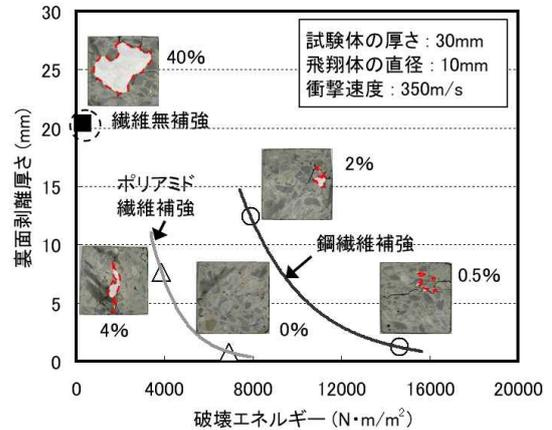


図-15 破壊エネルギーを基準とした裏面剥離厚さ及び裏面剥離面積損失率の結果

向が認められた。

### 3.4 繊維補強による表面及び裏面破壊性状

図-13 に圧縮強度 50N/mm<sup>2</sup> 級の繊維補強コンクリート試験体の曲げ引張性能と表面貫入深さの相関性を示す。鋼繊維及びポリアミド繊維の補強によって曲げ引張強度が増加したが、表面貫入深さは繊維無補強コンクリート試験体とほぼ同じ結果となり、繊維補強による表面破壊抑制効果が確認できなかった。

表-6 混入繊維の個体数及び比表面積

繊維種類	繊維混入率 (vol.%)	混入量 (kg)	個体数	比表面積 (mm <sup>2</sup> )
鋼繊維	1.0	78	1,560,000	73,476,000
ポリアミド繊維		11.4	3,800,000	178,980,000

また、図-14 に試験体の厚さ 30mm の条件で、曲げ引張性能と裏面剥離厚さとの関係を示す。鋼繊維及びポリアミド繊維の補強によって曲げ引張強度が向上し、裏面剥離厚さ及び裏面剥離面積損失率が低減することが分かった。この耐衝撃性状はコンクリートマトリックスが繊維補強によって飛翔体の衝突に対する裏面破壊を抑制したことによるものと考えられる。

図-15 に破壊エネルギーに対する裏面剥離厚さ及び裏面剥離面積損失率の結果を示す。曲げ引張性能と同様の傾向を示し、破壊エネルギーが増加するほど裏面剥離厚さ及び裏面剥離面積損失率が低減した。また、ポリアミド繊維補強コンクリート試験体は鋼繊維補強コンクリート試験体に比べて曲げ引張性能及び破壊エネルギーは低い。しかし、同じ繊維混入率の場合は、表-6 のようにポリアミド繊維の方が繊維とコンクリートマトリックスの付着比表面積が大きく、裏面破壊が抑制されると考えられる。

高速飛翔体の衝撃に対するコンクリートの裏面剥離は、衝撃力によって発生するひび割れが裏面まで伝達してコンクリート破片が飛散する現象である。繊維無補強コンクリートは裏面剥離抑制のために試験体の厚さが必要となる。一方、繊維補強コンクリートの場合は繊維無補強コンクリートに比べて試験体が薄くても繊維補強の効果によって衝撃力の伝達が抑制されるため、耐衝撃性能が向上すると考えられる。

#### 4. まとめ

高速飛翔体の衝突に対するコンクリートの耐衝撃性状を評価した結果は以下の通りである。

- (1) コンクリートの圧縮強度が増加するほど高速飛翔体の衝突による表面貫入深さが低減する傾向は認められたが、その効果は大きくなかった。
- (2) 裏面剥離限界厚さに及ぼす圧縮強度の影響は認められず、同じ圧縮強度の条件では曲げ引張性能及び破壊エネルギーの向上によって裏面破壊が抑制された。
- (3) 繊維補強コンクリートの場合は高速飛翔体の衝突に対する繊維の架橋作用及び衝撃波の緩和作用によって、耐衝撃性能の確保ができることが分かった。
- (4) 繊維補強によって裏面剥離限界厚さの低減が可能であり、コンクリートの耐衝撃性能設計のためには材料力学特性と破壊限界厚さとの関係を考慮する必要

がある。

#### 謝辞

本研究は 2010 年度韓国エネルギー技術評価院原電技術革新事業(2010161010004K)及び 2 段階 BK21 事業の支援を受けました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 南正樹, 田重圭, 金圭庸, 金武漢: 裏面剥離限界厚さの検討のための繊維補強コンクリートの耐衝撃性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.274-279, 2012
- 2) 井上健二, 宮内博之, 田邊靖博, 田中享二: 飛翔体の高速衝突によるコンクリート材料の破壊性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.403-404, 2006
- 3) 別府万寿博, 大野友則, 大久保一徳, 佐藤和幸: 接触・近接爆発に対する繊維シート補強コンクリート板の耐爆性能, 土木学会論文集, Vol.66, No.4, pp.700-716, 2010.12
- 4) 三輪幸治, 別府万寿博, 大野友則, 伊東雅晴, 片山雅英: 改良理論モデルによるコンクリート板の局部破壊評価法, 土木学会論文集, Vol.65, No.4, pp.844-858, 2009.10
- 5) M.H. Zhang, V.P.W. Shim, G. Lu and C.W. Chew "Resistance of high-strength concrete to projectile impact". International Journal of Impact Engineering, Vol. 31, pp.825-841, 2005.
- 6) 井戸康浩, 菊田繁美, 梅本宗宏, 端直人: 鋼繊維補強した超高強度コンクリートの基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集[A-1], pp.527-528, 2008
- 7) 佐々木徹, 金子佳生, 三橋博三: 寸法・形状の異なる鋼繊維補強セメント系複合材料の力学的特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集[A-1], pp.503-504, 2002
- 8) 衝突・爆発などの衝撃的な外力による構造被害の低減について考える, 日本建築学会構造委員会応用力学運営委員会, pp.11-20, 2009
- 9) M. Beppu, K. Miwa, M. Itoh, M. Katayama and T. Ohno: Damage evaluation of concrete plates by high-velocity impact, International Journal of Impact Engineering, Vol. 35, pp.1419-1426, 2008
- 10) D.Z. Yankelevsky: Local response of concrete slabs to low velocity missile impact, Journal of Impact Engineering, Vol. 19, pp.331-343, 1997
- 11) Q.M. Li and D.J. Tong: Perforation thickness and ballistic limit of concrete target subjected to rigid projectile impact, J.Eng.Mech., ASCE, Vol. 129, pp 1083-1091, 2003