

論文 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

南 正樹*1・田 重圭*2・金 圭庸*3・金 武漢*4

要旨: コンクリートの耐衝撃性能を評価するために、高速飛翔体の衝突による貫入深さ、裏面剥離限界厚さに関する評価式が提案されている。しかし既往の評価式はコンクリートの裏面破壊抑制に大きな影響を及ぼす曲げ強度及び引張強度を考慮していない。従って、本研究では曲げ強度及び引張強度を高めた繊維補強コンクリートを使って、既往の裏面剥離限界厚さの評価式による結果と高速飛翔体の衝突によるコンクリート試験体の裏面剥離限界厚さの実験結果を比較・検討した。また、コンクリートの曲げ強度及び引張強度と裏面剥離限界厚さの関係について考察し、曲げ強度及び引張強度が裏面破壊抑制効果に及ぼす影響を検証した。

キーワード: 繊維補強コンクリート, 高速飛翔体, 耐衝撃性能, 貫入深さ, 裏面剥離限界厚さ

1. はじめに

原子力発電施設の爆発事故、飛行機衝突事故及び爆発物テロなどによる事故は人命及び財産に大きい被害を発生させる。特に、原子力発電施設の場合は放射能の流出による2次被害がさらに深刻であるため、信頼性のある安全性の確保が非常に重要である¹⁾。

最近、このような国の主要施設物の安全性向上のためにコンクリートの耐衝撃性能に関する研究が関心を集めている。しかし、実験を行うためには特別な装置が必要であることから、高速衝突によるコンクリートの耐衝撃性能に関する実験はあまり行われていないのが現状である²⁾。

コンクリートの耐衝撃性能に関する既往の研究では、理論的な背景により高速飛翔体の衝突条件によって、コンクリートの貫入深さ及び裏面剥離限界厚さの算定できるChang式、Hughes式、修正NDRC式などの評価式が提案された³⁾⁻⁵⁾。

しかし、これらの提案式は飛翔体の質量、直径、衝撃速度、試験体の圧縮強度などを考慮しているが、図-1のように裏面破壊に大きな影響を及ぼす曲げ及び引張強度は考えられていない。

一方、既往の研究によれば、材料の耐衝撃性能の項目中に、裏面破壊抑制はコンクリートの引張及び曲げ性能と密接な関係があると報告されている⁶⁾。

本研究は、コンクリートの圧縮、引張、曲げ強度などの力学特性と耐衝撃性能の関係を確認し、特に曲げ及び引張強度を既往の評価式に適用する必要性について考察した。

それから、高速飛翔体の衝突によるコンクリートの裏

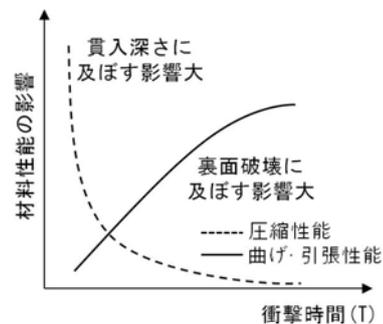


図-1 衝撃時間による材料性能がコンクリートの耐衝撃性能に及ぼす影響

面剥離限界厚さの既往の評価式に曲げ及び引張強度を考慮するために、鋼繊維とポリアミド繊維の混入率によってコンクリートの曲げ及び引張強度を変化させ、曲げ及び引張性能を考慮した裏面剥離限界厚さを実験的に求めた。

2. 実験計画及び方法

2.1 実験計画及び使用材料

表-1 に鋼繊維とポリアミド繊維を使用したコンクリートの圧縮強度、引張強度などの力学特性及び貫入深さ、裏面剥離限界厚さなどの耐衝撃性能を、既往の評価式と比較・検討するための実験計画を示す。

一般コンクリートに比べて繊維の混入による曲げ及び引張性能が裏面剥離限界厚さに及ぼす影響を確認するために鋼繊維とPA繊維(Polyamide fiber)の混入条件を実験要因と水準とした。また、繊維混入率は鋼繊維 0.5, 1.0vol.%, PA 繊維 0.5, 1.0, 1.5, 2.0vol.%とし繊維補強

*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 (株)KOLON グlobal R&BD センター 責任研究員 工博 (正会員)

*3 大韓民国 忠南大学校 建築工学科 教授 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			評価項目(材齢 28 日)
試験体の種類 ^{*1)}	繊維の種類	繊維混入率 (vol.%)	
Plain	なし	—	<ul style="list-style-type: none"> 静的試験 圧縮強度(N/mm²) 引張強度(N/mm²) 曲げ強度(N/mm²)
SF-0.5	鋼繊維	0.5	
SF-1.0		1.0	
PA-0.5	PA 繊維	0.5	<ul style="list-style-type: none"> 耐衝撃性能 衝撃破壊等級 貫入深さ(mm) 裏面剥離限界厚さ(mm)
PA-1.0		1.0	
PA-1.5		1.5	
PA-2.0		2.0	

*1) 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 ³ ， 粉末度：3,770cm ² /g
フライアッシュ	密度：2.30g/cm ³ ， 粉末度：3,228cm ² /g
細骨材(海砂)	密度：2.56g/cm ³ ， 吸水率：0.97%
粗骨材(砕石)	密度：2.82g/cm ³ ， 吸水率：0.64% 最大寸法：13mm
繊維	SF (steel fiber) スチールファイバー 密度：7.85g/cm ³ ， 直径：0.5mm， 長さ：30mm， 引張強度：810N/mm ²
	PA (polyamide) ポリアミド 密度：1.14g/cm ³ ， 直径：0.42mm， 長さ：30mm， 引張強度：594N/mm ²

表-3 コンクリートの調合

試験体種類	W/B (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)					
			W	C	FA	S	G	F ^{*1)}
Plain	40	44.4	163	326	82	749	938	0.00
SF-0.5	40	50.0	180	360	90	822	822	39.25
SF-1.0	40	55.0	180	360	90	904	740	78.50
PA-0.5	40	50.0	180	360	90	822	822	5.70
PA-1.0	40	55.0	180	360	90	904	740	11.40
PA-1.5	40	55.0	188	376	94	883	722	17.10
PA-2.0	36	55.0	188	418	104	857	701	22.80

*1) F：繊維の混入量(体積に対する単位量)

※ 目標スランプ：120±20mm， 目標空気量：4.5±1.5%

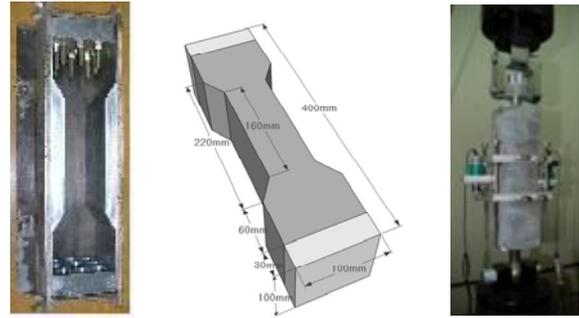
コンクリートの力学特性及び耐衝撃性能を検討した。

一方、評価項目として力学特性は圧縮強度、引張強度、曲げ強度及び等価曲げ強度比を、耐衝撃性能は衝撃破壊等級、貫入深さ、裏面剥離限界厚さなどを評価し、裏面剥離限界厚さは Chang 式、Hughes 式、修正 NDRC 式を考慮した。

表-2 に本研究で使用した材料及び補強繊維の物理的性質を示す。

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。コンクリートの圧



(a) 引張試験用の試験体の形状及び寸法 (b) 加力器具

図-2 本研究における引張試験の方法

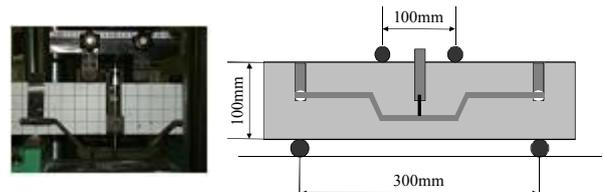
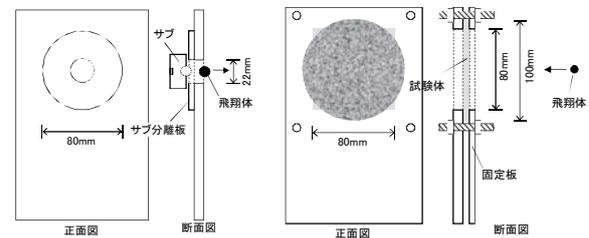
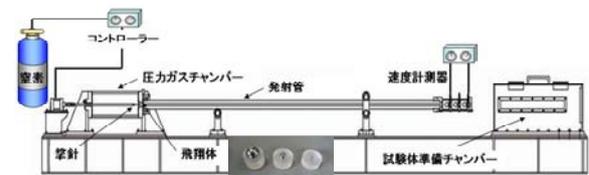


図-3 コンクリートの曲げ強度試験方法



(a) 試験装置及びチャンパー内部の模式図



(b) 発射部 (c) 速度計測部 (d) 試験体チャンパー
図-4 高速飛翔体の衝突による耐衝撃性能試験装置

縮強度は約 40N/mm²として、目標スランプの範囲は 120 ±20mm で、空気量は 4.5 ±1.5%と設定した。

また、コンクリートの練り混ぜは 60L 容量の 1 軸シャフトコンクリートミキサーを使った。試験体の作製は K S 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℃の標準養生を行った。

2.3 静的試験方法

圧縮試験は寸法 φ100×200mm，曲げ試験は寸法 100 ×100×400mm の試験体を作製し，4 点曲げ試験を行なった。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 の曲げ試験用試験体をダンベル形で作製し、一端固定一軸直接引張試験装置によって、0.25mm/分の速度と载荷し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」に準じて4点曲げ試験を行なった。

2.4 裏面剥離限界厚さの評価式と耐衝撃性能の評価方法

本研究で考慮した裏面剥離限界厚さの評価式は Chang 式(1)、修正 NDRC 式(2)、Hughes 式(3)である。

$$s = 1.84D \left(\frac{6I}{V_0} \right)^{0.13} \left(\frac{MV_0^2}{D^3 f_c' \times 10^6} \right)^{0.4} \quad (1)$$

ここで、 s = 裏面剥離限界厚さ(mm)

D = 飛翔体の直径(mm)

V_0 = 衝撃速度(m/s)

M = 飛翔体の質量(kg)

f_c' = コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

$$s = 2.12D + 1.36x \quad ; x \geq 0.65D \quad (2)$$

ここで、 s = 裏面剥離限界厚さ(mm)

D = 飛翔体の直径(mm)

x = 貫入深さ(mm)

$$s = 1.74x + 2.3D, \quad I = \frac{MV_0^2}{f_t D^3} \quad (3)$$

ここで、 s = 裏面剥離限界厚さ(mm)

D = 飛翔体の直径(mm)

x = 貫入深さ(mm)

I = 衝撃係数

M = 飛翔体の質量(kg)

V_0 = 衝突速度(m/s)

f_t = コンクリートの引張強度(N/mm²)

また、耐衝撃性能評価に使用した試験装置を図-4に示す。試験体に衝撃を加えるための飛翔体は直径 20mm、質量 0.319kg の鉄球とし、コンクリート試験体は混入繊維の向きを考慮してシリンダー形状とした。また、試験

表-4 飛翔体の衝撃による試験体の評価等級

区分	(I)破壊なし	(II)表面破壊	(III)裏面破壊	(IV)貫通破壊
破壊 形象				
評価 内容	衝突面の損傷なし	衝突面にひび割れ、及び弾痕が発生した状態	衝撃力により裏面が破壊した状態	大きな破壊とともに完全に貫通した状態

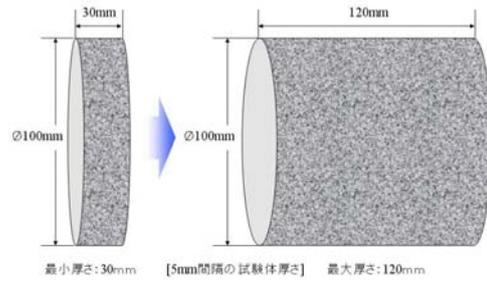


図-5 試験体の概要

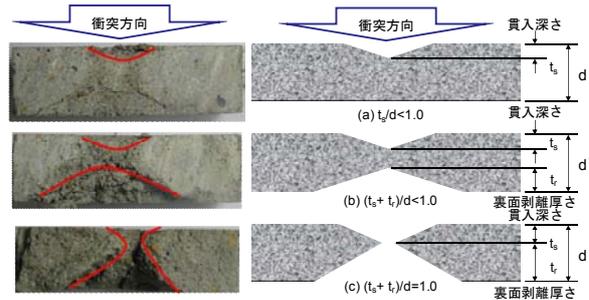


図-6 試験体の貫入深さ及び裏面剥離厚さの算定方法

体寸法は図-5のようにφ100、厚さ 30mm から 5mm 間隔で厚さ 120mm まで作製し、高速飛翔体の衝撃速度はガス圧力によって約 120, 240, 360m/s とした。

一方、高速飛翔体の衝突による試験体の衝撃破壊等級は表-4⁷⁾に示すように、試験体の断面破壊性状によって破壊の程度を(I)破壊なし、(II)表面破壊、(III)裏面破壊、(IV)貫通破壊の4等級で分類した。

また、図-6⁸⁾に高速飛翔体の衝突によるコンクリート試験体の貫入深さ及び裏面剥離厚さの算定方法を示す。

3. 実験結果及び考察

3.1 静的試験の評価結果

表-5にコンクリートの材齢 28 日における各試験体の静的試験結果を示す。

コンクリートの圧縮強度は 28 日の材齢において最小 4 2.3 から最大 47.8N/mm² と Plain 試験体が最も大きく、引張強度、曲げ強度及び破壊エネルギーは繊維の混入率が增加するほど向上する傾向が認められたが、PA 繊維補強コンクリートの場合は繊維混入率 1.5、2.0vol.% の水準でほぼ同じ性能を確認した。

このように、圧縮強度のみの評価では Plain 試験体が最も高く、繊維補強による引張性能、曲げ性能などを考慮しなければ繊維補強コンクリートの耐衝撃性能のための厚さを過大設計する可能性があるため、材料の基礎性能の考慮が重要である。

3.2 耐衝撃性能の評価結果

表-6に、飛翔体直径 20mm、質量 0.319kg、衝撃速度

表一五 各試験体の静的試験結果

区分	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	破壊エネルギー (J/m ²)
Plain	47.8	2.78	5.87	104
SF-0.5	44.1	3.98	7.34	9077
SF-1.0	47.5	5.04	8.42	12076
PA-0.5	42.3	3.82	6.35	5357
PA-1.0	48.2	3.89	6.87	6317
PA-1.5	42.4	4.87	7.47	8081
PA-2.0	43.0	4.43	7.54	8336

360m/s における試験体の衝撃破壊等級、貫入深さ、裏面剥離限界厚さ及び試験体の表面と裏面の破壊形状などの耐衝撃性能評価の結果を示す。試験体の破壊形状として、試験体寸法φ100、厚さ90mmを例として挙げる。

圧縮強度が高い Plan 試験体及び鋼繊維補強試験体では貫入深さが低減したが、裏面剥離限界厚さは増加する傾向が認められた。また、試験体の破壊形状において Plain 試験体は飛翔体の衝突後に試験体の裏面の大部分が剥離したが、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 力学性能と裏面剥離限界厚さの関係

図一七に圧縮強度と貫入深さ及び裏面剥離限界厚さの関係を示す。本研究の範囲では、高速飛翔体の衝突によって試験体に発生する貫入深さは圧縮強度が増加するほど低下する傾向を示し、コンクリートの圧縮強度と貫入深さの関連性があることが考えられる。

しかし、裏面剥離限界厚さについては圧縮強度の影響が少ない。また、繊維の補強によって裏面破壊が抑制されることを確認した。

コンクリートの引張強度、曲げ強度と裏面剥離限界厚さの関係を図一八に示す。試験体の引張強度及び曲げ強度が増加するほど裏面剥離限界厚さが低減し、曲げ強度及び引張強度がコンクリートの裏面剥離限界厚さに及ぼすことを確認できた。この高速飛翔体の衝突後のコンクリートの裏面破壊は、繊維補強による曲げ及び引張性能の向上によって衝撃エネルギーとして吸収したと考

えられる。また、同じ圧縮強度の条件では曲げ及び引張性能の向上によって裏面破壊抑制のような耐衝撃性能の確保が可能である。

3.4 裏面破壊限界厚さの算定のための評価式の検討

図一九に既往の裏面剥離限界厚さの評価式と本研究の実験結果を示す。引張強度を考慮する Hughes 式と貫入深さの範囲を考慮する修正 NDRC 式は本研究の繊維補強コンクリート中で最も耐衝撃性能が高い PA-1.5, PA-2.0 試験体の実験結果とほぼ同じ裏面剥離厚さであると示した。

表一六 高速飛翔体の衝突による耐衝撃性能評価の結果
(飛翔体の直径 20mm, 質量 0.319kg, 衝撃速度 360m/s の最高衝撃範囲)

試験体の種類	衝撃破壊等級	貫入深さ (mm)	裏面剥離限界厚さ (mm)	試験体の破壊形状 ^{*1)}	
				表面	裏面
Plain (繊維補強なし)	(IV)貫通破壊 (最初形態確認不可)	26.5	115		
SF (鋼繊維補強)	0.5 (III)裏面破壊	29.3	95		
	1.0 (II)表面破壊	26.0	85		
PA (ポリアミド繊維)	0.5 (III)裏面破壊	32.1	95		
	1.0 (II)表面破壊	27.0	90		
	1.5 (II)表面破壊	30.5	80		
	2.0 (II)表面破壊	30.4	80		

*1) 飛翔体の直径 20mm, 質量 0.319kg, 衝撃速度 360m/s, 試験体の寸法φ100, 厚さ 90mm の場合

しかし貫入深さと試験体の引張性能を考慮しない Chang 式による結果は実験結果に比べて過大評価する傾向があると考えられる。

また、繊維補強のないコンクリート試験体の場合では最大 35mm の裏面剥離限界厚さの差が発生し、既往の評価式とは異なる結果を確認した。

図一十に繊維混入率による衝撃速度別の裏面剥離限界厚さを示す。繊維補強によって裏面剥離限界厚さの低

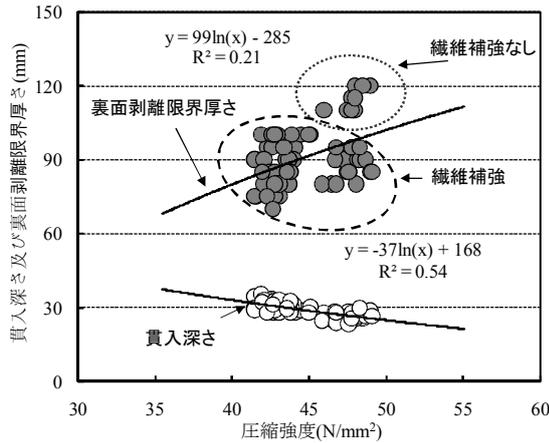


図-7 圧縮強度と貫入深さ及び裏面剥離限界厚さの関係

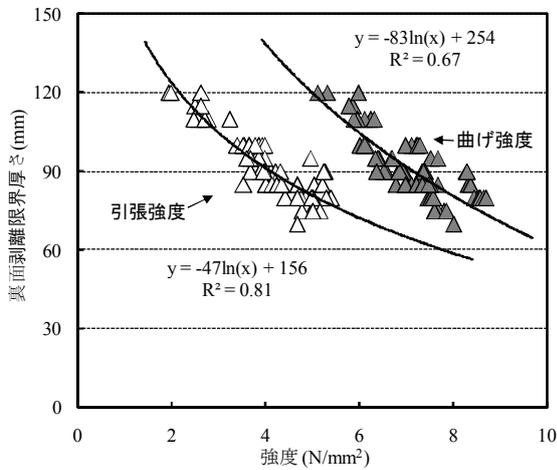


図-8 コンクリートの引張強度、曲げ強度と裏面剥離限界厚さの関係

減が可能であり、これは飛翔体の衝撃速度が増加するほど繊維補強のないコンクリートに比べて低減効果が大きく傾向を見られた。

図-11 に本研究の実験による裏面剥離限界厚さ及び Hughes 式による裏面剥離限界厚さを示す。本研究の範囲である衝撃速度 360m/s まではほぼ同じ傾向であったが、衝撃速度が増加する場合、裏面剥離限界厚さの差の程度が増加することで予測されている。

なお、既往の Hughes 式を修正した式(4)は本研究の実験結果による裏面剥離限界厚さの結果として表面貫入深さの係数の増加によって、試験体の裏面破壊抑制のための安全率を考慮した。

$$s = 2.3x + 2.3D \quad (4)$$

ここで、 s = 裏面剥離限界厚さ(mm)

x = 貫入深さ(mm)

D = 飛翔体の直径(mm)

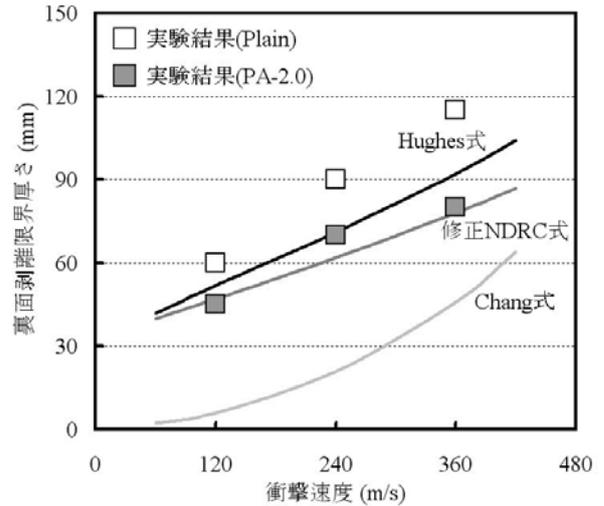


図-9 既往の裏面剥離限界厚さの評価式と本研究の実験結果

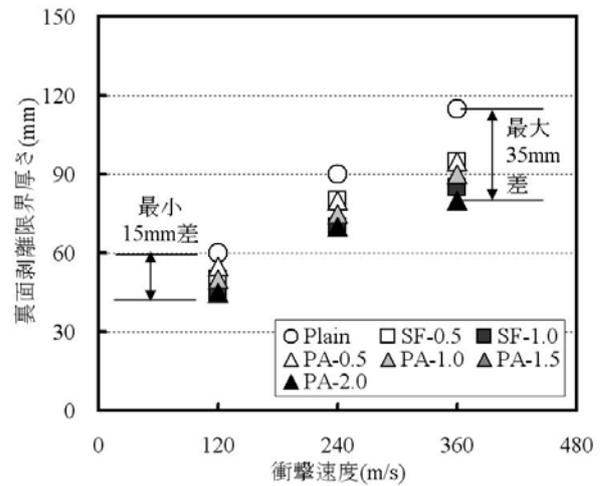


図-10 繊維混入率による衝撃速度別の裏面剥離限界厚さ

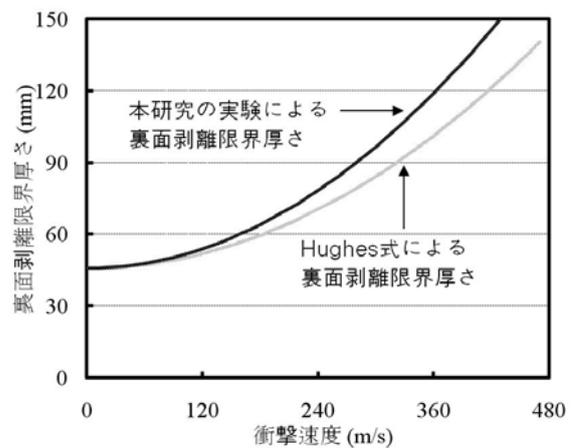


図-11 本研究の実験による裏面剥離限界厚さ及び Hughes 式による裏面剥離限界厚さを

4. まとめ

裏面剥離限界厚さの検討のために繊維補強コンクリートの耐衝撃性能を評価し、既往の評価式と比較した結果は次のようである。

- (1) 繊維補強コンクリート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高速飛翔体の衝突による飛散物の発生が低減した。
- (2) 裏面剥離限界厚さに及ぼす圧縮強度の影響は少なく、同じ圧縮強度の条件では曲げ及び引張性能の向上によって裏面破壊抑制が可能である。
- (3) 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、この結果は飛翔体の衝撃速度が増加するほど繊維補強のないコンクリートに比べて低減効果が大きく傾向を見られた。
- (4) 本研究の実験結果によって導出したコンクリートの裏面剥離限界厚さの評価式は、Hughes 式に比べて衝撃速度が増加するほど裏面剥離限界厚さの差が増加する傾向が示した。よって、今後、飛翔体の速度を変数として本評価式の妥当性を検証していく必要性がある。

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) 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
- 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) 牛田耕悟, 上原匠, 梅原秀哲, 深津章文: 鋼繊維の形状が高流動・高強度繊維補強コンクリートに及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.273-278, 2004.7
- 4) 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
- 5) 下澤和幸, 田村博, 永山勝: 鋼繊維補強モルタル中の鉄筋腐食モニタリング内陸暴露実験(6年間), 日本建築学会大会学術講演梗概集 [A-1], pp.555-556, 2003
- 6) 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
- 7) A.E. Naaman and H. Najm: Bond-slip mechanisms of steel fibres in concrete, ACI Materials Journal, pp. 135-145, 1991
- 8) 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, 700-716, 2010.12
- 9) 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, 844-858, 2009.10
- 10) 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.
- 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
- 12) D.Z. Yankelevsky: Local response of concrete slabs to low velocity missile impact, Journal of Impact Engineering, Vol. 19, pp 331-343, 1997
- 13) 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
- 14) Joosef Leppnen: Concrete subjected to projectile and fragment impacts Modelling of crack softening, International Journal of Impact Engineering, Vol. 32, pp 1828-1841, 2006
- 15) D. Habel: Response of ultra performance fiber reinforced concrete(UHPFRC) to impact and static loading, Cement & Concrete Composite, Vol. 30, pp 938-946, 2008