

論文 各種繊維補強モルタルの高速耐衝撃性能および耐爆性能の評価

金 圭庸*1・南 正樹*2・宮内 博之*1・金 武漢*3

要旨: 本研究は有機繊維, 鋼繊維および有機+鋼繊維の補強効果による繊維補強モルタルの耐衝撃および耐爆性能を評価したものである。繊維補強モルタルの耐衝撃および耐爆性能に関する評価の結果, 繊維補強なしモルタルの場合は衝撃荷重によって貫通および裏面破壊が発生したが, 繊維補強モルタルの場合では, 単一繊維, 複合繊維構成によって衝撃破壊が抑制される効果が見られた。また, 繊維補強モルタルの剛性に比べてセメント複合体の延性や靱性が耐衝撃や耐爆性能に大きく影響を及ぼすことを示した。従って, 耐衝撃および耐爆性能を向上させるためには複合的な材料補強が必要であることを明示した。

キーワード: 繊維補強モルタル, 高速飛翔体, 破壊性状, 耐衝撃性能, 耐爆性能

1. はじめに

建築物における安全性の確保のためには風, 地震などの自然的に発生する被害要因と人為的に発生する機械的な衝撃および爆発など, 大規模な人的・物的な被害を起こしうる極限荷重に対する安全性能の確保が必要である¹⁾。

一般的な鉄筋コンクリート構造物の場合は極限荷重に対する安全性を確保するために部材の寸法を大きくするなどの方法があるが, 一方で構造物における荷重の増加および空間活用の自由度が低下してしまう問題がある。このため構造材料の安全性能を高める方法として, コンクリートの場合は繊維補強した複合構成により脆性破壊を抑制し, 極限衝撃荷重に耐えることができる材料開発によって安全性能を確保する方法が検討されている。

本研究は高速飛翔体による耐衝撃性能と爆発による耐爆性能の評価を通じて, 繊維補強モルタルの強度・剛性および延性・靱性の向上が, 耐衝撃および耐爆性能にどのように影響を及ぼすのかを検討・分析したものである。

2. 実験計画および方法

2.1 実験計画

繊維補強モルタルの耐衝撃および耐爆性能の評価のための実験計画を表-1に示す。試験体の構成は一般的な鉄筋コンクリートと繊維補強モルタルであり, 補強の種類は補強なし, 単一繊維補強, 複合繊維補強とした。単一繊維補強においては PVA 繊維, PE 繊維および STF 繊維を各々2.0Vol%混入し, 複合繊維補強については PVA+STF 繊維, PE+STF 繊維を各々1.0Vol%混入した。

表-1 実験計画

実験要因および水準				評価項目
補強の種類	補強材の種類	補強材比率 (%)		
コンクリート	補強なし	— (耐衝撃)	—	<ul style="list-style-type: none"> 静的試験 <ul style="list-style-type: none"> 圧縮強度(N/mm²) 引張強度(N/mm²) 引張ひずみ(%) 曲げ強度(N/mm²) 曲げたわみ(mm) 衝撃・爆発試験 <ul style="list-style-type: none"> 破壊面積(%) 破壊深さ比 重量減少率(%) 破壊等級
	鉄筋補強	鉄筋 (耐爆)	D10@100 シングル	
モルタル	補強なし	—	0.0	
	単一補強	PVA	2.0	
		PE		
		STF (鋼繊維)		
複合補強	PVA+STF	1.0+1.0		
PE+STF				

表-2 使用材料の種類と特性

種類	物理・化学的性質	
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	
細骨材	珪砂	密度: 2.54g/cm ³ , 吸水率: 1.01%
	海砂	密度: 2.64g/cm ³ , 吸水率: 0.38%
粗骨材(砕石)	密度: 2.65g/cm ³ , 吸水率: 1.39% 最大寸法: 25mm	
鉄筋	D10, 異形鉄筋	
繊維	PVA	ポリビニールアルコール 密度: 1.30g/cm ³ , 直径: 40 μm, 長さ: 12mm, 引張強度: 1,300N/mm ²
	PE	ポリエチレン 密度: 0.95g/cm ³ , 直径: 12 μm, 長さ: 15mm, 引張強度: 2,700N/mm ²
	STF	スチールファイバー 密度: 7.85g/cm ³ , 直径: 700 μm, 長さ: 51mm, 引張強度: 1,140N/mm ²

*1 大韓民国 忠南大学校 建築工学科 教授 工博 (正会員)

*2 大韓民国 忠南大学校 大学院 建築工学科 博士課程 (正会員)

*3 大韓民国 忠南大学校 建築工学科 名誉教授 工博 (正会員)

表-3 コンクリートの調合

試験体種類	W/C (%)	S/a (%)	単位重量(kg/m ³)			
			W	C	S	G
コンクリート	30	45	160	533	750	948

表-4 モルタルの調合

試験体種類	W/B (%)	繊維混入率 (%)	単位重量(kg/m ³)				
			W	C	FA	S	Fiber
繊維無補強	40	0.0	452	960	169	395	0.0
PVA		2.0					25.5
PE							18.6
STF							153.9
PVA+STF							1.0+1.0
PE+STF		9.4+77.7					

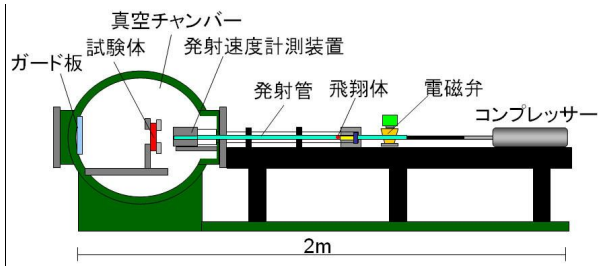
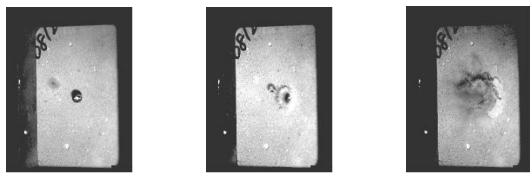


図-1 ガス圧力式飛翔体発射試験装置の概要図



(a) 衝突前 (b) 衝突瞬間 (c) 衝突後
写真-1 高速飛翔体の衝突過程

表-5 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)表面+裏面破壊	(IV)貫通+裏面破壊
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

2.2 使用材料および調合

表-2 にコンクリートおよびモルタルに使用した材料の種類および特性を示す。また、表-3 および表-4 にコンクリートおよびモルタルの調合を示す。コンク

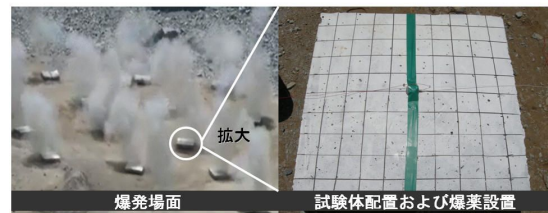
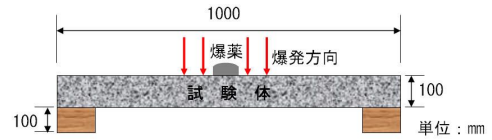


図-2 爆発実験の概要図

表-6 各試験体による静的試験¹⁾結果

区分	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	引張ひずみ (%)	曲げ強度 (N/mm ²)	曲げたわみ (mm)	
コンクリート	64.3	2.78	0.01	5.87	0.31	
モルタル	繊維無補強	43.7	1.71	0.05	4.13	0.14
	PVA	28.5	3.96	6.33	24.66	2.35
	PE	27.9	3.61	4.01	30.74	4.24
	STF	34.7	3.92	2.27	33.15	2.78
	PVA+STF	35.8	6.34	2.12	29.08	1.68
	PE+STF	36.7	8.88	2.87	29.37	3.16

リート設計強度 f_{c60} の場合は水-セメント比を 30%に設定し、モルタルの場合では繊維の種類および混入量を考慮して水-結合材比を 40%に設定した。

2.3 静的試験方法

圧縮試験は試験体寸法 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ 、曲げ試験はの試験体寸法 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ と作製し、3点曲げ試験を行なった。また、引張試験用の試験体厚さは 20mm のダンベル形薄板試験体を利用し、一端固定一軸直接引張試験装置によって、0.15mm/分の速度と載荷し引張応力とひずみを評価した。

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、曲げ強度は写真-2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3点曲げ試験を行なった。また引張性能は図-2のようなダンベル形薄板試験体を作製し、一軸直接引張試験装置によって、0.15mm/分の速度と載荷し引張応力とひずみを評価し、引張ひずみは最大応力の時点の値を記録した。

2.4 耐衝撃性能の評価方法

耐衝撃性能評価に使用した試験装置(ガス圧力式飛翔体発射試験装置)を図-1に示す。試験体に衝撃を加えるための飛翔体は直径 4mm、重さ 0.26g の鉄球とし、試験体の寸法は $100 \times 100 \times 10 \text{mm}$ のものを使用した。また、飛翔体の速度はモルタル試験体については約 350m/s とし、コンクリート試験体では約 900m/s を加えた 2 水準と

した。試験体への衝突観察において、写真-1 に示すように超高速カメラを使用し、高速飛翔体が試験体に衝突する前、衝突する瞬間、および衝突した後の場面を撮影した。

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-5²⁾に示すように、試験体の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)表面+裏面破壊、(IV)貫通+裏面破壊の4等級で分類した。

2.5 耐爆性能の評価方法

爆発試験では図-2 に示すように試験体の表面に岩盤破砕用の爆薬を付着して爆破を行った。試験体の寸法は1,000×1,000×100mmとし、約90日間の常温乾燥養生後、爆発試験を行った。その後試験体の破壊深さと破壊面積を算出し、耐衝撃および耐爆性能の指標として式(1)の破壊面積により評価を行った。

$$\text{破壊面積} = \frac{\text{破壊した部分の面積}}{\text{部材の全面積}} \times 100 \quad (1)$$

3. 実験結果および考察

3.1 静的試験の評価結果

試験体は同じ流動性をもつ条件とし、コンクリートはフロー550±50mm、モルタルはテーブルフロー170±20mmの範囲とした。表-6 にコンクリートおよびモルタルの材齢28日における各試験体による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60N/mm²を満足し、繊維無補強は約40N/mm²、有機繊維補強モルタルは約28N/mm²、鋼繊維補強モルタルは約35N/mm²を示した。

繊維補強モルタルの場合、圧縮強度は相対的に低くなったが、引張強度および曲げ強度は向上した。

3.2 耐衝撃および耐爆性能の評価

(1) 耐衝撃性能の評価

高速飛翔体の衝突後、試験体の破壊性状を評価するために、表-7 に試験体の衝撃表面、断面および裏面の破壊状態をスキャナーを用いて画像化した結果を示す。また、衝撃破壊深さ、破壊面積および重量減少率の結果を表-8 に示す。

補強なしのコンクリート試験体は衝撃速度342m/sでは表面のみの破壊であったが、906m/sでは裏面が大きな

区分	補強方法	破壊性状												
		表面	断面	裏面	表面	断面	裏面							
コンクリート	補強なし													
		342m/s((II)表面破壊)			906m/s((IV)貫通+裏面破壊)									
		(a) コンクリート												
モルタル	補強なし				/									
		350m/s((III)表面+裏面破壊)												
		(b) 繊維無補強モルタル												
	単一繊維補強	(c) PVA												
			358m/s((III)表面+裏面破壊)					351m/s((III)表面+裏面破壊)						
			(d) PE											
		(e) STF							/					
			359m/s((III)表面+裏面破壊)											
			(f) PVA+STF											
			(g) PE+STF											
複合繊維補強	補強なし													
		363m/s((II)表面破壊)			353m/s((II)表面破壊)									
		(f) PVA+STF												

表-8 高速飛翔体衝突後の試験体破壊性状の結果

試験体種類	補強	衝撃速度 (m/s)	最大破壊深さ (mm)		破壊面積 (%)		重量減少率 (%)	破壊等級
			表面	裏面	表面	裏面		
コンクリート	補強なし	342	3.3	0.0	2.47	0.00	0.4	(II)
	補強なし	906	5.7 (貫通)	4.3 (貫通)	4.27	7.79	2.4	(IV)
モルタル	補強なし	350	3.2	6.0	2.98	8.35	1.8	(III)
	PVA	358	4.7	0.1	0.46	0.34	0.3	(III)
	PE	351	3.8	0.1	0.39	0.01	0.4	(III)
	STF	359	3.7	1.2	2.41	1.91	0.6	(III)
	PVA+STF	363	3.8	0.0	1.21	0.00	0.4	(II)
	PE+STF	353	2.1	0.0	0.97	0.00	0.3	(II)

破壊した状態で貫通し、重量減少率も最も大きくなった。

一方、モルタル試験体の場合、繊維無補強試験体は衝撃速度 350m/s で貫通しなかったが、裏面は表面に比べて破壊が大きくなった。また、単一繊維補強の PVA, PE および STF 試験体では裏面破壊が発生したが、繊維補強によって、その程度が低減した。有機繊維(PVA, PE)と鋼繊維を複合した補強試験体では、有機繊維と鋼繊維の複合化によってマトリックスの付着性が向上し、試験体の表面に飛翔体がめり込む程度で裏面は全く破壊しなかった。

(2) 耐爆性能の評価

表-9 に同一爆薬量を用いて爆発試験を行った各種試験体の破壊性状を示す。また、表-10 に各試験体の裏面破壊深さおよび破壊面積を示す。

鉄筋コンクリートの場合、表面および裏面破壊し、特に、裏面では鉄筋が見えるほどのかぶりコンクリートが剥落する破壊が発生し、鉄筋補強の効果が見られなかった。また、繊維無補強モルタル試験体でも、表面と裏面が大きく剥落する貫通破壊が発生した。鉄筋コンクリートと繊維無補強モルタル試験体は裏面の破壊面積が約 20% となり、破壊等級が IV 級となったことから耐爆性能が最も低かった。

しかし、繊維補強したモルタル試験体は裏面の面積損失がほとんど生じなかった。そして爆発による試験体の破壊性状においては、2vol%繊維の単一および複合補強によって軽微な表面破壊と裏面に小さなひび割れが発生する程度であり、破壊等級が II 級となり耐爆性能が高かった。

(3) 圧縮強度と耐衝撃および耐爆性能の関係

図-3 に圧縮強度と衝撃爆発試験での破壊面積との関係を示す。圧縮強度が 60N/mm² のコンクリート試験体の場合は、飛翔体の衝撃速度 342m/s に対しては II 級程度の耐衝撃性能を示した。しかし、衝撃速度 906m/s に対しては破壊等級が IV 級となり、貫通と裏面破壊が発生した。繊維無補強モルタル試験体は、繊維補強モルタル試験体に比べて圧縮強度が約 10N/mm² 以上高いにも関わらず、裏面が大きく破壊し、本研究の範囲では圧縮強度による耐衝撃性能に及ぼす影響は見られなかった。

(4) 静的引張ひずみと耐衝撃および耐爆性能の関係

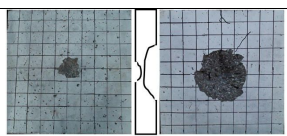
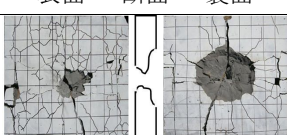
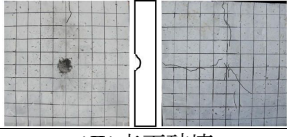
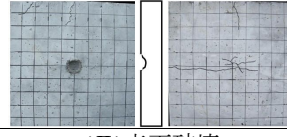
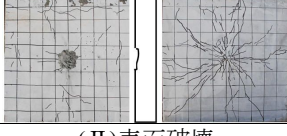
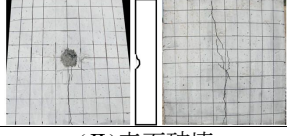
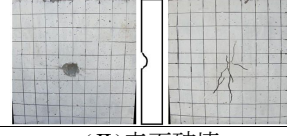
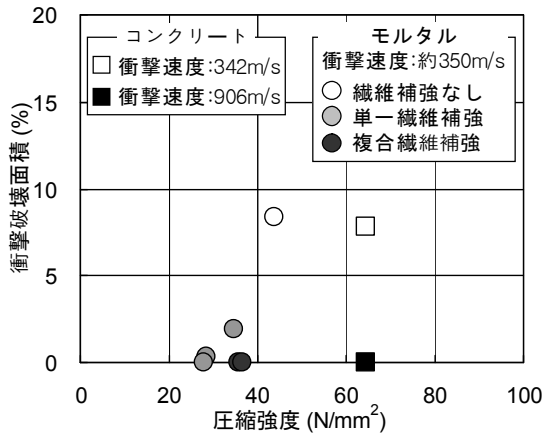
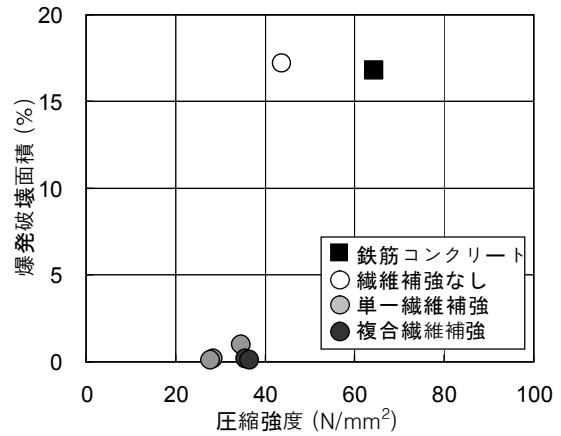
区分	補強方法	破壊性状			
コンクリート	鉄筋補強	表面	断面	裏面	
					
		(III) 表面+裏面破壊			
		(a) コンクリート			
	補強なし	表面	断面	裏面	
					
		(IV) 貫通+裏面破壊			
		(b) 繊維無補強モルタル			
モルタル	単一繊維補強	表面	断面	裏面	
					
			表面	断面	裏面
					
			(II) 表面破壊		
			(c) PVA		
		(d) PE			
	単一繊維補強	表面	断面	裏面	
					
		(II) 表面破壊			
		(e) STF			
	複合繊維補強	表面	断面	裏面	
					
		表面	断面	裏面	
					
		(II) 表面破壊			
		(f) PVA+STF			
		(g) PE+STF			

表-10 爆発後の破壊性状の評価結果

試験体種類	最大破壊深さ (mm)		破壊面積 (%)		破壊等級	
	表面	裏面	表面	裏面		
鉄筋コンクリート	36.0	55.1	2.72	16.80	(III)	
モルタル	繊維補強なし	48.6 (貫通)	51.4 (貫通)	3.61	17.20	(IV)
	PVA	33.7	0.0	1.20	0.14	(II)
	PE	29.2	0.0	1.32	0.09	(II)
	STF	19.5	0.0	3.80	0.98	(II)
	PVA+STF	29.2	0.0	2.24	0.13	(II)
	PE+STF	37.2	0.0	1.08	0.06	(II)

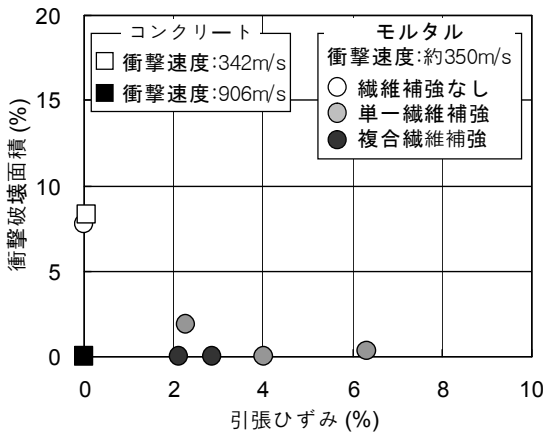


(a) 圧縮強度と衝撃破壊面積との関係

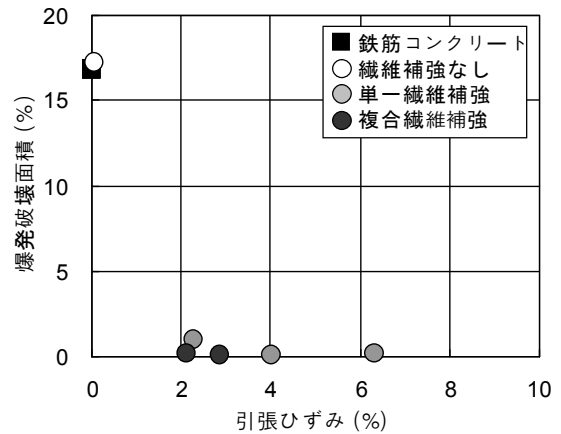


(b) 圧縮強度と爆発破壊面積との関係

図-3 圧縮強度と衝撃・爆発試験での破壊面積との関係

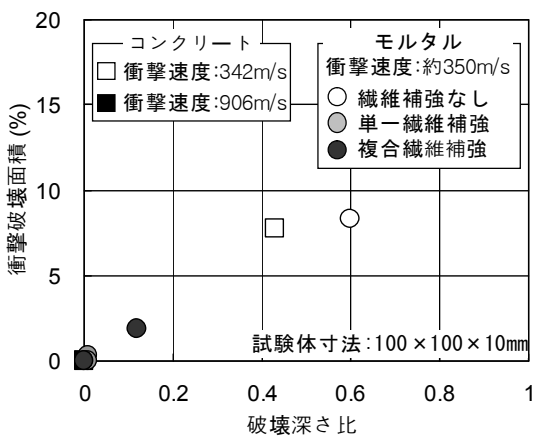


(a) 静的引張ひずみと衝撃破壊面積との関係

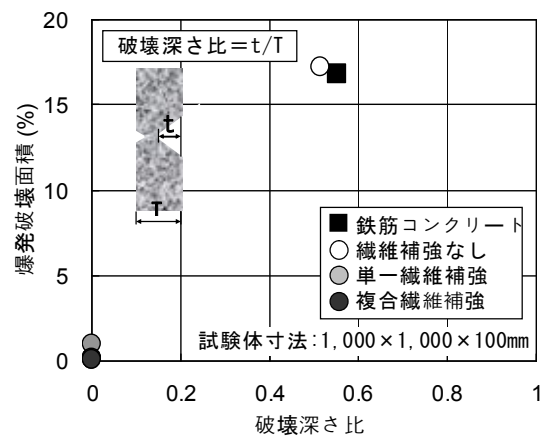


(b) 静的引張ひずみと爆発破壊面積との関係

図-4 静的引張ひずみと衝撃・爆発試験での破壊面積との関係



(a) 衝撃試験結果



(b) 爆発試験結果

図-5 衝撃・爆発試験における破壊深さと破壊面積の関係

図-4に静的引張ひずみと衝撃・爆発試験での破壊面積との関係を示す。耐衝撃性能における単一繊維補強および複合繊維補強モルタルは引張ひずみ能力が2.0%以上となり、裏面破壊がほとんど無かった。しかし、引張ひ

ずみ能力が低いコンクリートとモルタルは裏面破壊が大きくなった。また、引張ひずみと耐爆性能の関係においても、引張ひずみ能力が大きいほど裏面破壊が小さくなった。

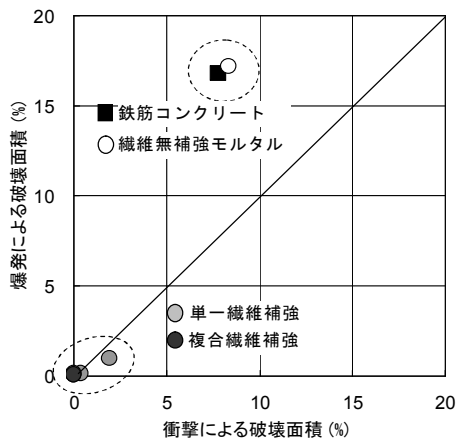


図-6 衝撃と爆発試験による破壊面積

これはセメントマトリックスを短繊維で補強したことにより靱性が向上し、その結果衝撃荷重が吸収・分散されたと考えられる。

(5) 破壊深さと破壊面積の関係

図-5 に破壊深さと破壊面積から評価した耐衝撃および耐爆性能の関係を示す。衝撃試験と爆発試験を比較した結果、破壊深さに対する破壊面積は衝撃試験結果より爆発試験の方が約2倍程度大きくなった。

(6) 衝撃および爆発による破壊面積

図-6 に衝撃と爆発試験により得られた破壊面積の関係を示す。繊維補強モルタルはコンクリートや繊維無補強モルタルに比べて破壊面積が低減した。また、本研究の範囲では衝撃と爆発による破壊面積において爆発による破壊が大きくなった。

一方、図-7 に補強なしおよび各種補強材料構成による試験体の耐衝撃および耐爆性能を示す。本研究の範囲では、複合繊維補強モルタルは衝撃および爆発による裏面破壊が発生せず、破壊等級Ⅱ級となり高い安全性能が認められた。

4. まとめ

本研究で繊維補強効果によるモルタルの耐衝撃および耐爆性能を評価した結果、次のような結論を得た。

- (1) 鉄筋コンクリート試験体および繊維無補強モルタル試験体の圧縮強度は、繊維補強モルタル試験体に比べて $10\sim 40\text{N/mm}^2$ を上回る高強度だったが、高速衝撃荷重および爆発荷重については脆性的な裏面破壊が発生し、耐衝撃および耐爆性能が著しく低下した。
- (2) 繊維補強モルタルの耐衝撃および耐爆性能は、圧縮強度などの剛性に比べて、引張強度、引張ひずみ、曲げ強度、曲げたわみなどの延性や靱性に関わる特性の方が大きく影響を及ぼすと考えられた。
- (3) モルタルに 2vol% の単一および複合繊維を混入した試験体は、衝撃および爆発荷重に対して衝撃跡程度の表面破壊であった。

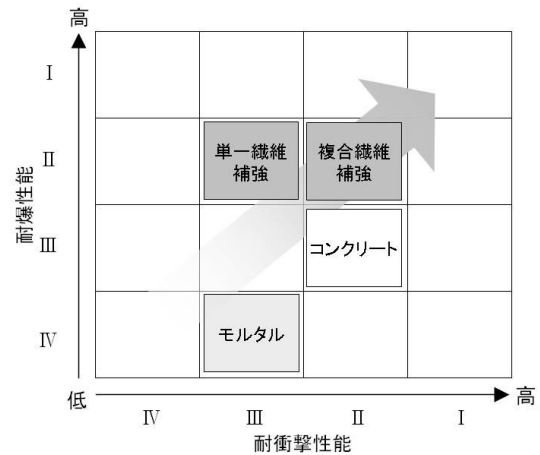


図-7 補強材料構成による耐衝撃および耐爆性能

- (4) 本研究の範囲で、複合繊維補強モルタルは衝撃および爆発による裏面破壊が生じなかった破壊等級Ⅱ級となり高い安全性能が認められた。これより繊維を補強することにより耐衝撃および耐爆性能が向上することを確認した。

謝辞

本論文は Sampyo Co., Ltd. の支援を受けて遂行された研究で、研究者の一部は 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, 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) 金圭庸, 南正樹, 宮内 博之, 金武漢, 田邊 靖博, 山田 昌義, 鄭鎔, 朴鍾豪: 高速飛翔体の衝突による繊維補強モルタルの耐衝撃性能評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 [A-1], pp.489-490, 2009
- 4) 閑田徹志, 齊藤忠, 坂田昇, 平石剛紀: PVA 繊維を用いた高靱性 FRC による吹付け補修材料の基礎的特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.485-480, 2001
- 5) 佐藤幸博, 福山洋, 諏訪田晴彦: 高靱性型セメント系複合材料の一軸引張一圧縮繰り返し試験方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, No.539, pp.7-12, 2001
- 6) Fariborz Vossoughi, Claudia P. Ostertag, Paulo J.M. Monteiro, George C. Johnson: Resistance of concrete protected by fabric to projectile impact, Cement and Concrete Research, 2006