

論文 PEFRC 2 層構造版における中空層および緩衝材挿入が耐爆性能に及ぼす影響

山口 信^{*1}・村上 聖^{*2}・武田 浩二^{*3}・日高 修^{*4}

要旨: 本研究は、薄板部材によるポリエチレン繊維補強コンクリート(PEFRC)2層構造版の耐爆設計に資する新たな知見を得ることを目的に、中間に中空層および各種緩衝材を挿入したPEFRC2層構造版の接触爆発試験を実施し、その損傷評価を行ったものである。その結果として、主として以下の知見が得られた。1) PEFRC単版間に中空層を設け、その中空層の厚さを増すことにより、裏面損傷低減効果を向上させることが可能である。2) PEFRC2層構造版において、中間に挿入した緩衝材は単版間の間隔を保持する効果を有する程度で、緩衝材自体が直接的に耐爆性能に及ぼす影響は小さい。

キーワード: ポリエチレン繊維補強コンクリート、接触爆発、2層構造、中空層、緩衝材、損傷

1.はじめに

衝突・爆発などの意図的攻撃による衝撃外乱を重要構造物の設計において考慮し、より高い安全性を確保することの必要性が生じている。

特に、接触爆発を受ける鉄筋コンクリート部材の局部損傷を考える場合、コンクリート片の飛散に伴う被害防止の観点から、応力波の伝播に起因した裏面剥離(スポール)を抑制することが設計上の許容限界とされており、近年、接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷程度の把握¹⁾やスポール損傷低減²⁾を目指した実験的研究が実施されている。一方、複数の鉄筋コンクリート部材を積層することで衝撃荷重による損傷を低減する2層あるいは3層積層構造の有効性が、重錐落下^{3),4),5)}や小型飛翔体衝突⁶⁾を対象として既に明らかにされている。こうした手法は爆発荷重を受ける鉄筋コンクリート部材のスポール損傷抑制に対しても有効な手法となる可能性を有しており⁷⁾、実験的研究の着手が望まれる。

ところで、著者らはこれまでに、ポリエチレン繊維補強コンクリート(以下、PEFRC)の耐爆構造部材への適用を目的に、PEFRC版の接触爆発試験を実施し、PEFRCの使用が接触爆発によるスポール損傷低減に有効であることを明らかにした⁷⁾。また、運搬・取り付け等の施工性向上を目的に、PEFRC薄板の現場積層によるPEFRC2層構造版を提案し、特に単版間に中空層を設けることで、施工性の向上と更に高い損傷低減効果を同時に満足する耐爆構造部材が得られることを示している⁸⁾。

本研究では、既報⁸⁾の知見を発展させ、PEFRC2層構造版の耐爆設計に資する新たな実験データを得ることを目的に、1) 中空層の厚さがPEFRC2層構造版の耐爆

性能に及ぼす影響、2) 緩衝材の種類がPEFRCおよび普通コンクリート2層構造版の耐爆性能に及ぼす影響、3) 緩衝材の厚さがPEFRC2層構造版の耐爆性能に及ぼす影響等に関して、実験的検討を行った。なお、本報では比較のため既報⁸⁾の実験データの一部も併せて考察しており、実験シリーズ間で仕様等が若干異なる部分に関しては、既報⁸⁾の実験シリーズを実験A、今回新たに実施した実験シリーズを実験Bと称して区別する。

2. 実験方法

2.1 使用材料および調合

表-1に使用材料、表-2にPEFRCの使用調合をそれぞれ示す。PEFRCの使用材料および調合は、著者らが既往の研究⁹⁾で示した静的曲げ韌性が最大となる材料および調合に準拠した。表-2にはスランプの測定値も併記しているが、高炉スラグ微粉末と高性能AE減水剤の併用により、プレキャストコンクリートへの適用を想定する上で十分なスランプが得られた。比較用の普通コンクリートとしては、レディーミクストコンクリート(普通-30-18-20-N)を用いた。緩衝材としては、飛翔体衝突に対する効果が確認されているクロロブレンゴムについて、硬度を2水準で変化させたもの(HCRおよびSCR)および建築用断熱材としても汎用のポリスチレンフォーム(PS)の3種類を用いた。

PEFRCの混練は、容量55Lの強制2軸攪拌型ミキサーを用いて行った。混練手順としては、最初に結合材および骨材を投入して15秒間空練り後、水および高性能AE減水剤を投入して90秒間混練し、最後に繊維を投入して3分間練り混ぜた。

*1 熊本大学大学院 自然科学研究科環境共生工学専攻博士後期課程 工修 (正会員)

*2 熊本大学大学院 自然科学研究科環境共生工学専攻教授 工博 (正会員)

*3 熊本大学大学院 自然科学研究科環境共生工学専攻助教 工博 (正会員)

*4 熊本大学大学院 自然科学研究科建築学専攻博士前期課程

2.2 素材試験方法

素材試験用供試体として、圧縮および割裂引張試験には $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱供試体、曲げ試験には $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 角柱供試体を各3体作製し、現場湿布養生材齢28日(PEFRCは14日)後、試験時まで気中養生とした。

強度試験方法として、圧縮試験では圧縮応力-ひずみ曲線、割裂引張試験では最大荷重、曲げ試験ではスパン300mmの3点曲げ載荷による曲げ荷重-載荷点変位曲線をそれぞれ計測した。

2.3 接触爆発試験方法

図-1に接触爆発試験体構成単版の形状・寸法および配筋を示す。構成単版は $600 \times 600 \times 50\text{mm}$ の平板とした。ここで、配筋のスパール低減への寄与はごく僅かであること¹⁾を考慮し、版の断裂を防止する程度の目的で、丸

鋼 $\phi 5$ によるピッチ120mmの格子状シングル配筋とした。なお、構成単版は素材試験用供試体と同様に養生した。

表-3に接触爆発試験体の種類、図-2にその作製方法をそれぞれ示す。検討対象とした接触爆発試験体は、単版間に中空層を設けた絶縁型と、中空層内に緩衝材を挿入した緩衝型の2種類に大別される。ここで、絶縁型の試験体に関して、普通コンクリート単版間に中空層を設けることはスパール損傷低減の面で逆に不利であることが実験A⁸⁾で明らかとなつたため、実験BではPEFRCのみを対象として検討した。なお、実験AとBで積層に用いた材料が若干異なるが、応力波の伝播が支配的となる接触爆発において支持部の影響は小さいこと¹⁾から、両者の比較は十分に可能であると考えられる。

接触爆発試験体および爆薬の設置方法は図-3に示す

表-1 使用材料

普通コンクリート	レディーミックスコンクリート 普通-30-18-20-N
PEFRC	セメント 早強ポルトランドセメント 密度: 3.13 g/cm^3
	細骨材 川砂 表乾密度: 2.63 g/cm^3 吸水率: 2.69 % 最大寸法: 2.5 mm 粗粒率: 2.58
	粗骨材 碎石6号 表乾密度: 2.95 g/cm^3 吸水率: 1.27 % 最大寸法: 15 mm 実積率: 56.3 %
	混和材料 高炉スラグ微粉末 密度: 2.89 g/cm^3 比表面積: $6140 \text{ cm}^2/\text{g}$ 高性能AE減水剤
緩衝材	ポリエチレン繊維 (融着糸巻付け集束タイプ) 密度: 0.97 g/cm^3 寸法: $68 \mu\text{m} \times 30 \text{ mm}$ 引張強度: 1870 MPa 引張弾性率: 43 GPa
接着剤	クロロブレンゴム (HCR) 密度: 1.4 g/cm^3 , JIS硬さ(A): 63.3 多孔質クロロブレンゴム (SCR) 密度: 0.25 g/cm^3 , JIS硬さ(A): 18.9 ポリスチレンフォーム (PS) 密度: 0.028 g/cm^3 , 曲げ強度: 0.34 MPa

表-2 PEFRC の使用調合

V_f (%)	W/B (%)	Sg/B (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	Sp/B (%)	Slump (cm)
4.0	33	50	65	325	0.5	実験A: 11.7 実験B: 18.3

* V_f : 繊維体積率, W/B: 水結合材比, Sg: 高炉スラグ微粉末, s/a: 細骨材率, W: 単位水量, Sp: 高性能AE減水剤

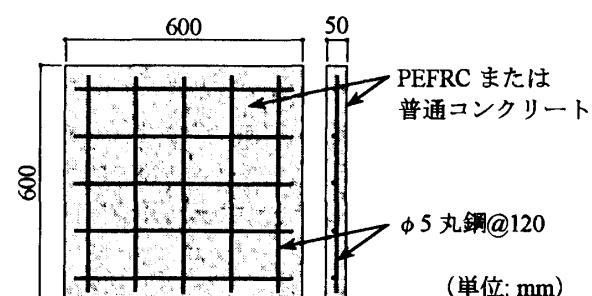
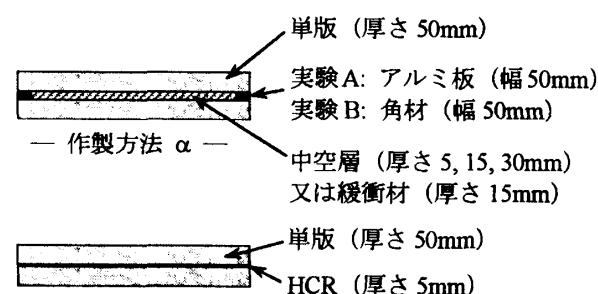


図-1 試験体構成単版の形状・寸法および配筋

表-3 接触爆発試験体の種類

試験体名	実験	コンクリート の種類	単版間		作製 方法
			種類	厚さ	
PE-AIR-5	B	PEFRC	AIR	5mm	α
PE-AIR-15	A	PEFRC	AIR	15mm	α
PE-AIR-30	B	PEFRC	AIR	30mm	α
NC-AIR-15	A	普通コンクリート	AIR	15mm	α
PE-HCR-15	B	PEFRC	HCR	15mm	α
NC-HCR-15	B	普通コンクリート	HCR	15mm	α
PE-SCR-15	B	PEFRC	SCR	15mm	α
NC-SCR-15	B	普通コンクリート	SCR	15mm	α
PE-PS-15	B	PEFRC	PS	15mm	α
NC-PS-15	B	普通コンクリート	PS	15mm	α
PE-HCR-5	B	PEFRC	HCR	5mm	β

* 作製方法の記号は図-2と対応している。



* 接着には、実験A: 特殊ポリマーセメントモルタル、実験B: エポキシ樹脂系接着剤を用いた。

図-2 接触爆発試験体の作製方法

ように、既報¹⁾の普通コンクリート版に関する実験データとの整合を図るために同報に準拠し、内法スパン 510mm となるように試験体を設置した後、試験体上面中央で電気雷管を用いて爆薬（ベンスリット：65%，パラフィン系：35%，密度：1.30g/cm³，爆速 6900ms⁻¹）を起爆させた。なお、爆薬の形状は直径と高さが等しい円柱形であり、爆薬量は全試験体について 200g 一定とした。

接触爆発試験後、損傷寸法を測定した。測定項目は、図-4 に示すように、爆発面破壊（クレータ）、スパールおよび貫通孔の直径と、クレータおよびスパールの最大深さとした。ここで、直径は形状が非対称となるために、図中に示す直線 1-4 に沿って 4 箇所測定し、その平均値とした。また、絶縁型の試験体については、中空層をはさむ上下版それぞれに関して損傷寸法を測定した。なお、PEFRC を用いた試験体については、クラックスケールを用いて下版裏面の最大ひび割れ幅を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 素材試験結果

表-4 に素材試験結果を示す。既報²⁾では、繊維補強コンクリートの耐爆性能を評価する上で曲げ靭性が重要な指標であることを示したが、本研究で検討対象とした PEFRC の曲げ靭性係数 $\bar{\sigma}_b$ は実験 A で $\bar{\sigma}_b = 9.54$ MPa、実験 B で $\bar{\sigma}_b = 8.69$ MPa であった。

3.2 接触爆発試験体の破壊性状

表-5 に接触爆発試験体の破壊性状を示す。

試験体 PE-AIR-5 の場合、上版にはクレータは生じたもののスパールは生じておらず、上版裏面では PEFRC が円形状に隆起し、下版上面と接触することにより圧密された状態にあった。また、下版には局部損傷は生じていないが、下版裏面には PEFRC の隆起と開口幅の大きなひび割れが観察され、これらは上版裏面の隆起部が下版上面と接触した際に形成されたものと推察される。

試験体 PE-AIR-15³⁾の場合、上版裏面で一旦押し抜けた剥離片が下版上面との接触により上版のスパール部に圧密されている様相が観察され、上版には見かけ上貫通は生じていない。また、下版裏面には十字型の曲げひび割れが観察されるが、その開口幅は試験体 PE-AIR-5 の場合よりも軽微である。

試験体 PE-AIR-30 の場合、上版裏面の剥離片が中空層内に押し抜け、上版に貫通孔が生じた。また、下版上面には上版裏面で生じた剥離片が付着しているが、下版裏面にはごく微細な放射状のひび割れが生じた程度で、目立った損傷はほとんど認められなかった。

試験体 NC-AIR-15³⁾の場合、先述の試験体 PE-AIR-15 とは異なり、上下版ともに貫通孔が生じている。これは、普通コンクリートの場合上版で衝撃エネルギーを十分

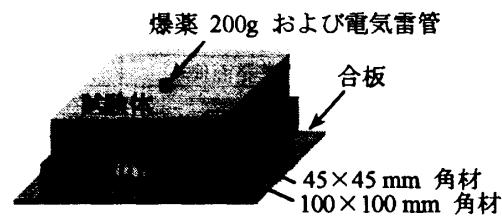


図-3 接触爆発試験体および爆薬の設置方法

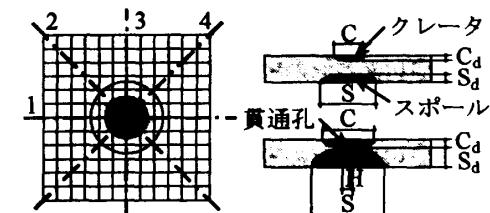


図-4 損傷寸法の測定方法
C: クレータ直径, C_d : クレータ深さ, S: スパール直径, S_d : スパール深さ, H: 貫通孔直径
* 絶縁型の試験体については、上下各版の損傷寸法を測定した。

図-4 損傷寸法の測定方法

表-4 素材試験結果

	実験	F_c (MPa)	E (GPa)	F_t (MPa)	F_b (MPa)	$\bar{\sigma}_b$ (MPa)
普通コンクリート	A	41.5	32.1	3.33	—	—
	B	35.8	29.3	2.78	—	—
PEFRC	A	70.6	23.2	7.28	10.2	9.54
	B	59.4	24.3	7.94	9.37	8.69

* F_c : 圧縮強度, E: ヤング係数, F_t : 割裂引張強度, F_b : 曲げ強度, $\bar{\sigma}_b$: 曲げ靭性係数

に吸収できないために、上版で粉碎された飛散片が衝撃荷重として下版に作用するためであると考えられる。このことは、下版の破壊性状がクレータやスパールの発生に代表される接触爆発によるものとは異なり、押抜きせん断破壊に類似した円錐状の破壊形態を呈していることからも推察される。

試験体 PE-HCR-15, PE-SCR-15 および PE-PS-15 の破壊性状は、下版裏面のひび割れ発生状況に若干の差異が見られることを除き大差なく、また、先述の試験体 PE-AIR-15 の破壊性状と類似している。

試験体 NC-SCR-15 および NC-PS-15 の破壊性状は、試験体 NC-AIR-15 のそれと大きく異なる点は見られないが、試験体 NC-HCR-15 の場合は他よりもスパールの規模が大きくなる傾向が認められる。

試験体 PE-HCR-5 の場合、裏面には開口幅の大きな十字型のひび割れと爆発点直下の隆起が観察され、また若干ではあるがスパールの発生が認められた。

3.3 損傷評価

表-6 に損傷寸法の測定結果を示す。

(1) 中空層の厚さが PEFRC 2 層構造版の耐爆性能に及ぼす影響

図-5 に中空層の厚さが PEFRC 2 層構造版の損傷に及

表-5 接触爆発試験体の破壊性状

		爆発面側	裏面側		爆発面	裏面
PE-AIR-5	上版			PE-HCR-15		
	下版					
PE-AIR-15	上版			PE-SCR-15		
	下版					
PE-AIR-30	上版			PE-PS-15		
	下版					
NC-AIR-15	上版			PE-HCR-5		
	下版					

* 絶縁型の試験体に関しては、上下各版の破壊性状を示している。
* 支点位置は上下両端。

ぼす影響を示す。なお、図中では損傷部直径を版幅で除することで無次元化した値 (C/W および S/W)、全損傷深さを版厚で除することで無次元化した値 $(C_d+S_d)/T$ および裏面の最大ひび割れ幅 (W_{cr}) について比較している。

上版の損傷状況に関して、中空層厚さ 5mm の場合、上版裏面の爆発点直下で隆起した PEFRC が下版上面との接触により圧密されているために、貫通孔は生じていない。また、中空層厚さ 15mm の場合には、一旦押し抜けた上版裏面の剥離片が下版との接触により上版スポール部に圧密されているために、見かけ上貫通孔は生じていない。しかし、中空層厚さが 30mm になると、上版裏面の剥離片が中空層内に押し抜け、貫通孔が生じている。このことから、中空層の厚さを増すほど上版の損傷は拡大する傾向にあることが判る。

下版の損傷状況に関しては、中空層厚さ 5mm の場合に裏面の爆発点直下で若干の隆起を生じた程度であり、いずれの試験体においてもクレータやスポールは生じていない。しかし、3 試験体全てにおいて、上版裏面の剥離片が下版上面と接触した際に形成されたものと思われるひび割れが裏面に生じており、その最大幅は、中空層の厚さを増すほど低減される傾向にある。これは、中空層の厚さを増すほど上版の損傷が拡大し、その際に上版のみで吸収される衝撃エネルギーが増大するために、逆に下版の損傷は低減されるものと推察される。即ち、中空層の厚さを増せば、上下版が共同して爆発荷重に抵抗することなく、上版のみに損傷が集中する傾向にある。

耐爆設計における要点はスポール発生に伴う破片の飛散を抑制することにあり²⁾、中空層の厚さを増すことは上版を犠牲版として有効に機能させ、下版損傷を低減させる点で、版の耐爆性能向上に有効であると思われる。

(2) 緩衝材の種類が PEFRC および普通コンクリート 2 層構造版の耐爆性能に及ぼす影響

図-6 に緩衝材の種類が PEFRC 2 層構造版の損傷に及ぼす影響を示す。図中には比較のため、緩衝材と同厚の中空層を設けた試験体 PE-AIR-15 についても併記している。4 試験体全てにおいて裏面に十字型のひび割れが生じており、その最大幅に若干の差異はあるものの、いずれもスポールは完全に抑制されている。そのため、全損傷深さはクレータ深さのみによって決定されているが、その程度は、AIR および PS を挿入した場合でほぼ上版の版厚に達しており、以下、SCR, HCR の順に低減されている。これは、中間に挿入した緩衝材が低硬度であるほど上版裏面の剥離片が緩衝層内に埋没し易くなるためであると考えられ、このことを考慮すると、各試験体の損傷程度に大差はないものと判断される。即ち、PEFRC を用いた場合、緩衝材は単版間の間隔を保持する効果を有する程度で、緩衝材の有無による耐爆性能の差

表-6 損傷寸法の測定結果

試験体	T (mm)	C (mm)	C _d (mm)	S (mm)	S _d (mm)	H (mm)	W _{cr} (mm)
PE-AIR-5 (上版)	50	139	35	0	0	—	18
	(下版)	50	0	0	0	—	—
PE-AIR-15 (上版)	50	131	49	181	0	—	11
	(下版)	50	0	0	0	—	—
PE-AIR-30 (上版)	50	133	17	191	33	89	5
	(下版)	50	0	0	0	—	—
NC-AIR-15 (上版)	50	180	16	268	34	131	—
	(下版)	50	139	50*	306	50*	140
PE-HCR-15	100	134	38	0	0	—	19
NC-HCR-15	100	192	50	408	50	—	—
PE-SCR-15	100	138	43	0	0	—	10
NC-SCR-15	100	195	50	329	50	—	—
PE-PS-15	100	139	50	0	0	—	25
NC-PS-15	100	186	50	350	50	—	—
PE-HCR-5	100	141	50	47	19	—	35

* W_{cr} : 下版裏面の最大ひび割れ幅 (PEFRC のみ)

* ※は、 C_d と S_d が判別できない円錐状の破壊形態となつたため、便宜上全損傷深さ C_d+S_d で表示している。

* T は、以下の損傷評価で用いた基準版厚 (絶縁型: 単版厚さ、緩衝型: コンクリート 2 層の総厚) を示す。

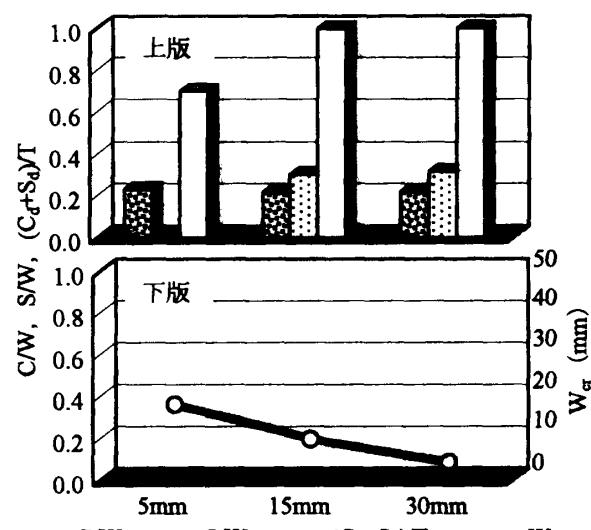


図-5 中空層の厚さが PEFRC 2 層構造版の損傷に及ぼす影響

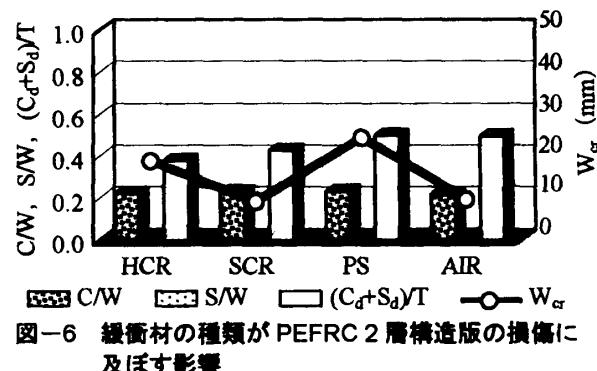


図-6 緩衝材の種類が PEFRC 2 層構造版の損傷に及ぼす影響

異は小さいものと考えられる。

次に、緩衝材の種類が普通コンクリート 2 層構造版の耐爆性能に及ぼす影響を図-7 に示す。なお、図中には

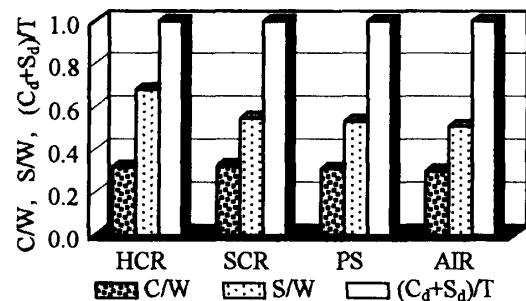


図-7 緩衝材の種類が普通コンクリート 2 層構造版の損傷に及ぼす影響

比較のため、緩衝材と同厚の中空層を設けた試験体 NC-AIR-15 についても併記している。図より、緩衝材を挿入した試験体のスパール直径は中空層のみを挿入した試験体のそれよりも一様に大きく、その傾向は特に HCR を挿入した場合において顕著である。このことから、緩衝材が高硬度になるほど伝達応力が広域に分散する傾向にあるものと推察される。しかし、各試験体の損傷深さに差異は無く、4 試験体全てにおいて全損傷深さは版厚に達していることが判る。

(3) 緩衝材の厚さが PEFRC 2 層構造版の耐爆性能に及ぼす影響

図-8 に緩衝材 (HCR) の厚さが PEFRC 2 層構造版の損傷に及ぼす影響を示す。中間に挿入した緩衝材の厚さが 5mm と薄くなると、若干ではあるがスパールの発生が見られるようになり、裏面の最大ひび割れ幅も拡大する傾向にある。このことから、緩衝材の厚さを増すことは下版の損傷低減の面で有効であると考えられる。しかし、いずれの場合も損傷程度は同厚の中空層を設けた場合と大差なく（表-5 参照）、緩衝材は単版間の間隔を保持する効果を有する程度であり、緩衝材自体が直接的に耐爆性能に及ぼす影響は小さいことが確認される。

4.まとめ

本研究では、中空層および緩衝材を挿入した PEFRC 2 層構造版の耐爆性能に関して実験的検討を行った。その結果として、本研究の範囲内で、以下の知見が得られた。

- 1) PEFRC 2 層構造版において、中間に中空層を設け、その中空層の厚さを増すことにより、下版損傷低減効果を向上させることが可能である。
- 2) PEFRC 2 層構造版において、緩衝材は単版間の間隔を保持する効果を有する程度で、緩衝材自体が直接的に耐爆性能に及ぼす影響は小さい。
- 3) 普通コンクリート 2 層構造版において、緩衝材挿入により損傷が若干広域に分散する傾向が見られるが、局部損傷を大幅に低減させることはできない。但し、上記知見は限られたデータから得られたものであり、今後はより広範囲の条件に対する検討が必要である。

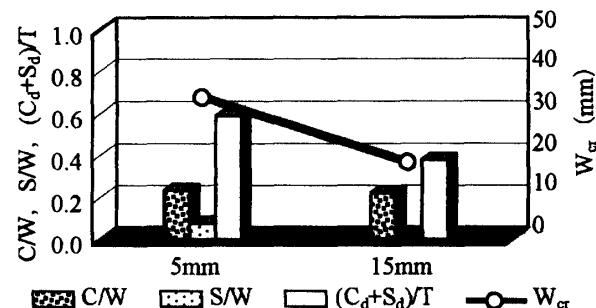


図-8 緩衝材 (HCR) の厚さが PEFRC 2 層構造版の損傷に及ぼす影響

謝辞

本研究は、熊本大学工学部 21 世紀 COE プログラム「衝撃エネルギー科学の深化と応用」(拠点リーダー：秋山秀典教授) より研究支援を受け、同大学衝撃・極限環境研究センター (センター長：伊東繁教授) にて実施されました。また、ポリエチレン繊維は東洋紡績 (株) よりご提供いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 田中秀明ほか：爆発荷重を受ける鉄筋コンクリート版の損傷に及ぼす配筋の影響、コンクリート工学論文集, Vol.14, No.1, pp.1-11, 2003.1
- 2) 大久保一徳ほか：繊維シート補強によるコンクリート板の耐爆性能向上に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.769-774, 2007.7
- 3) 岸徳光ほか：三層緩衝構造の緩衝効果に関する室内実験、構造工学論文集, Vol.38A, pp.1577-1586, 1992.3
- 4) 佐藤昌志ほか：三層緩衝構造を用いた実規模 PC 製落石覆工の重錐落下衝撃挙動、構造工学論文集, Vol.42A, pp.1347-1356, 1996.3
- 5) 大野友則ほか：緩衝材を有する 2 層 RC はりの耐衝撃性および多質点系モデルによる衝撃応答解析、構造工学論文集, Vol. 38A, pp.1565-1575, 1992.3
- 6) 岡本貢一ほか：小型飛翔体の高速衝突に対する 2 層構造 RC 板の衝撃挙動と局部損傷の推定、構造工学論文集, Vol.40A, pp.1567-1580, 1994.3
- 7) 山口信ほか：ポリエチレン繊維補強コンクリートの接触爆発に対する耐爆性能、日本建築学会構造系論文集, No.619, pp.187-194, 2007.9
- 8) Yamaguchi, M. et al.: Experimental Study on Explosive Resistance of Polyethylene Fiber-reinforced Concrete Slabs Composed of a Two-layer Structure, Cement Science and Concrete Technology, No.60, pp.477-482, Feb.2007
- 9) 武田浩二ほか：新素材繊維を用いた高韌性繊維補強コンクリートの開発研究、セメント・コンクリート論文集, No.58, pp.454-459, 2005.2