論文 PEFRC2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,重錘落下^{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¹⁾,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PEFRC 2 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、PEFRC 2 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 PEFRC 2 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 PEFRC 2 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⁾で示した静的曲げ靭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プレンゴムに関し 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 o 100×200mm 円柱供試体,曲げ試験には 100×100× 400mm 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600×600×50mmの平板とした。 ここで、配筋のスポ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φ5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 設けることはスポール損傷低減の面で逆に不利である ことが実験 A⁸⁾で明らかとなったため,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

50

α

 α

α

α

α

α

α

α

α

α

ß

単版(厚さ 50mm) HCR (厚さ5mm)

* 接着には,実験 A: 特殊ポリマーセメントモルタル,

図-2 接触爆発試験体の作製方法

実験 B: エポキシ樹脂系接着剤を用いた。

600



表-1 使用材料

表-2 PEFRCの使用調合

V_{f}	W/B	Sg/B	s/a	W	Sp/B	Slump
(%)	(%)	(%)	(%)	(kg/m^3)	(%)	(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

- 作製方法 β -

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(ペンスリット: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),スポール および貫通孔の直径と,クレータおよびスポールの最大 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⁷⁾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 $\overline{\sigma}_b$ は実験 A で $\overline{\sigma}_b$ = 9.54 MPa, 実験 B で $\overline{\sigma}_b$ = 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 もののスポ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-15⁸⁾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ポール部に 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-15⁸⁾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



<測定項目>

C: クレータ直径, C_d: クレータ深さ, S: スポール直径, S_d: スポール深さ, 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

表一4 素材試験結果

実	Fc	Е	Ft	F _b	$\overline{\sigma}_{b}$
験	(MPa)	(GPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Α	41.5	32.1	3.33	—	_
В	35.8	29.3	2.78	—	-
Α	70.6	23.2	7.28	10.2	9.54
В	59.4	24.3	7.94	9.37	8.69
	実験 A B A B	実 F _c 験 (MPa) A 41.5 B 35.8 A 70.6 B 59.4	実 F _c E 験 (MPa) (GPa) A 41.5 32.1 B 35.8 29.3 A 70.6 23.2 B 59.4 24.3	実 F _c E F _t 験 (MPa) (GPa) (MPa) A 41.5 32.1 3.33 B 35.8 29.3 2.78 A 70.6 23.2 7.28 B 59.4 24.3 7.94	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$

* 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, **ō**_x: 曲げ靱性係数

に吸収できないために、上版で粉砕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ポールの発生 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ポールの規 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 干ではあるがスポ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 PEFRC2層構造版の損傷に及

		爆発面側 裏面側			爆発面	裏面
PE-AIR-5	上版			PE-HCR-15		
	下版			NC-HCR-15		
PE-AIR-15	上版			PE-SCR-15		
	下版			NC-SCR-15		
PE-AIR-30	上版			PE-PS-15		
	下版			NC-PS-15		
NC-AIR-15	上版			PE-HCR-5		
	下版				* 絶縁型 ては, 性状を * 支点伯	型の試験体に関し 上下各版の破壊 と示している。 2置は上下両端。

表-5 接触爆発試験体の破壊性状

ぼす影響を示す。なお、図中では損傷部直径を版幅で除 す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

討除休	Т	C	Cd	S	Sd	Η	W _{cr}
时间天 14	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
PE-AIR-5 (上岗	ī) 50	139	35	0	0	-	10
(下別	<i>ī</i>) 50	0	0	0	0	—	10
PE-AIR-15(上尚	ī) 50	131	49	181	0	_	11
(下別	<i>ī</i>) 50	0	0	0	0	—	11
PE-AIR-30 (上岗	ī) 50	133	17	191	33	89	5
(下別	ī) 50	0	0	0	0	—	5
NC-AIR-15 (上岗	ž) 50	180	16	268	34	131	
(下別	<i>ī</i>) 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ったため、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。



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



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ポ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PEFRC2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、若干ではあるがスポールの発生 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。

- 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) PEFRC2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。
- 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。



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

- 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
- 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
- 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
- 佐藤昌志ほか:三層緩衝構造を用いた実規模 PC 製 落石覆工の重錘落下衝撃挙動,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
- 门口信ほか: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
- 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靭性繊維補強 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