

プレキャスト薄板要素の積層による2層構造版の耐爆性能

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

BLAST RESISTANCE OF DOUBLE-LAYERED SLABS COMPOSED OF PRECAST THIN PLATES

Blast resistance of polyethylene fiber-reinforced concrete against contact detonation

山口 信*, 村上 聖**, 三井宜之***, 平居孝之****

*Makoto YAMAGUCHI, Kiyoshi MURAKAMI, Yoshiyuki MITSUI
and Takayuki HIRAI*

For rapid construction of blast-resistant structures and better blast resistance of PEFR (polyethylene fiber-reinforced concrete) slab, the double-layered PEFR slabs composed of precast thin plates with 50 mm thick were proposed and supplied for contact detonation tests. Based on the test results, numerical simulation with the ANSYS AUTODYN code was conducted to clarify fracture mechanism of double-layered normal concrete slab with an air space. The main results obtained are as follows: 1) making an air space of 15 mm thick in the middle of the double-layered PEFR slab is effective in reducing spall damage, however, an air space is disadvantageous in normal concrete; 2) breach in the lower layer of the air-sandwiched normal concrete slab is due to impact of concrete fragments occurred in the back surface of the upper layer; and 3) good blast resistance of the air-sandwiched PEFR slab can be explained qualitatively, considering high toughness of both layers due to bridging effects of polyethylene short fibers.

Keywords : Polyethylene fiber-reinforced concrete, Double-layered slab, Blast resistance, Contact detonation, Local failure, Numerical simulation

ポリエチレン繊維補強コンクリート, 2層構造版, 耐爆性能, 接触爆発, 局部破壊, 数値シミュレーション

1. はじめに

衝突・爆発等の意図的攻撃による衝撃外乱を, 政治・経済・運輸・エネルギー等に関係する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^{1,2)}。

特に, 爆発荷重を受ける鉄筋コンクリート版の局部破壊を考慮する場合, コンクリート片の飛散に伴う2次被害防止の観点から, 版裏面における引張応力波の反射に起因するスポール(裏面剥離)を低減することが設計上の重要課題となる^{1,2)}。また, 爆発源の分類としては, 構造物のごく至近距離での爆発(近接爆発), 構造物表面での爆発(接触爆発)および構造部材内部での爆発の3水準が考えられるが, 特に接触爆発は他の場合の基準として用いられるため重要視されており, 昨今より, 接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷予測法の開発³⁻⁵⁾や, 破壊状況の数値シミュレーション^{6,7)}等に関する研究が実施されている。著者らも前報までに, ポリエチレン繊維補強コンクリート(以下, PEFR)の耐爆構造部材への適用を目的に, PEFR版の接触爆発試験を実施し, その良好なスポール低減効果を明らかにした^{8,9)}。

ところで, いつ遭うか判らない突発的な意図的攻撃からの防護を考慮する場合, 施工の迅速化の観点から PEFR をプレキャストコンクリートとして適用することが望ましいと考えられるが, その際,

運搬・取り付け等の施工性向上の面で, 部材の寸法低減による軽量化が重要な課題となる。しかし, 例えば単に版厚を低減するだけであれば PEFR 版の耐爆性能低下を招くことは既往の研究⁹⁾からも明白であり, 所要の耐爆性能を付与しながら施工性向上および施工の迅速化を図るための部材構成方法の工夫が重要となるものと考えられる。

一方, 複数の鉄筋コンクリート部材を中空層やゴム等の緩衝材を介して積層することにより, 衝撃荷重による裏面損傷を低減する2層または3層積層構造の有効性が, 重錘落下や小型剛飛翔体衝突を対象として既に明らかにされている¹⁰⁻¹⁶⁾。こうした手法は, 爆発荷重を受ける鉄筋コンクリート版のスポール低減の面でも有効な手法となり得る可能性が一部の研究において示唆されているものの⁴⁾, 現在のところ爆発荷重に対する検討は実施されていない。

そこで, 本研究では, PEFR を用いて作製したプレキャスト薄板要素の現場積層により運搬・取り付け等の施工性向上および施工の迅速化を図り, 尚且つ総厚が等しい PEFR 単版と同等以上の耐爆性能を有する耐爆構造部材の開発を目的に, 中間補強型, 絶縁型および緩衝型等の種々の PEFR 2層構造版に関して接触爆発試験を実施し, 部材構成方法の違いに起因するクレータ(爆発面破壊), スポール等の局部破壊や, 表面および内部のひび割れ発生状況等の差異に関して実験的検討を行った。また, 普通コンクリートを用いた

* 日本文理大学工学部建築学科 助教・工博

** 熊本大学大学院自然科学研究科 教授・工博

*** 熊本大学 名誉教授・工博

**** 日本文理大学工学部建築学科 教授・工博

Assistant Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Nippon Bunri Univ., Dr. Eng.
Prof., Graduate School of Science and Technology, Kumamoto Univ., Dr. Eng.

Prof. Emeritus, Kumamoto Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Nippon Bunri Univ., Dr. Eng.

場合に関しても同様の試験を実施し、コンクリートの種類の違いが各種2層構造版の耐爆性能に及ぼす影響についても考察を行った。更に、得られた実験結果の中で、特に重要と思われる破壊性状を示した部材構成方法に関して数値シミュレーションを実施し、その損傷過程や損傷発生メカニズム等を検証した。

2. 実験的検討

2.1 実験方法

2.1.1 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、既往の研究¹⁷⁾で示した、曲げ靱性が最大となる材料および調合に準拠して決定した。比較用の普通コンクリートには、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、クロロプレンゴム(以下、HCR)とそのスポンジタイプ(以下、SCR)および発泡ポリスチレン(以下、EPS)の3種類を用いた。なお、PEFRCおよび普通コンクリートとの組合せにおいて、爆発荷重に対して十分な効果を有する緩衝素材を特定することは現時点で必ずしも容易ではないが、ここでは試験的に、重錘落下^{11,14)}や小型剛飛翔体衝突¹²⁾に対して既に効果が確認されている素材を検討対象としている。

PEFRCの混練には、容量55Lの強制2軸攪拌型ミキサーを使用した。混練手順としては、最初に結合材および骨材を15秒間空練りした後、水および高性能AE減水剤を投入して90秒間混練し、最後に短繊維を投入して3分間練り混ぜた。

2.1.2 コンクリートの素材特性

PEFRCおよび普通コンクリートの素材試験用供試体として、圧縮試験にはφ100×200mm円柱供試体、曲げ試験には100×100×400mm角柱供試体を各3体ずつ作製し、現場湿布養生材齢14日(普通コンクリートは28日)後、試験時まで気中養生とした。素材試験方法に関して、圧縮試験では圧縮応力-ひずみ曲線、曲げ試験ではスパン300mmの中央3点曲げ荷重による荷重-載荷点変位曲線をそれぞれ計測した。なお、曲げタフネスは、日本コンクリート工学協会規準¹⁸⁾に準拠し、載荷点変位が2.0mmに至るまでの荷重-変位曲線下の面積として求めた。

以上のようにして得られたPEFRCおよび普通コンクリートの素材特性を表3に示している。曲げタフネスは、繊維補強により最も顕著に改善される力学的特性であるが、PEFRCの曲げタフネス T_b は実験Aで $T_b=42.3\text{ J}$ 、実験Bで $T_b=38.6\text{ J}$ であった。

2.1.3 試験体条件

表3には、接触爆発試験体の種類を併記している。また、図1に各種2層構造版の構成方法を示す。

各種2層構造版を構成する単版は、幅600mm、長さ600mm、厚さ50mmの平板とした。配筋がクレータ、スポール等の局部破壊に及ぼす影響は小さいことが既に明らかにされているが^{4,5)}、ここでは運搬・設置時における割れ等を防止するための目的で、φ5みがき棒鋼を用いたピッチ120mmのメッシュ筋を挿入した。構成単版の締固めは木槌、突き棒および棒状パイププレートを用いて行い、素材試験用供試体と同様に養生した後、各種2層構造版の作製に供した。

本実験で検討対象とした2層構造版は、以下の3種類に大別される。なお、記号は図1中に示す構成方法の記号と対応している。

表1 使用材料

普通コンクリート	レディーミクストコンクリート(普通-30-18-20-N) 実測スランプ: 13.5cm(実験A), 11.5cm(実験B)		
PEFRC	セメント	早強ポルトランドセメント 密度: 3.13g/cm ³	
	骨材	川砂 表乾密度: 2.63g/cm ³ 吸水率: 2.69% 最大寸法: 2.5mm 粗粒率: 2.58	砕石6号 表乾密度: 2.95g/cm ³ 吸水率: 1.27% 最大寸法: 15mm 実積率: 56.3%
	混和材料	高炉スラグ微粉末 密度: 2.89g/cm ³ , 比表面積: 6140cm ² /g 高性能AE減水剤	
	短繊維	ポリエチレン繊維(PP/PEカバーリング集束) 密度: 0.97g/cm ³ , 直径×長さ: 68μm×30mm 引張強度: 1870MPa, 引張弾性率: 43GPa	
鉄筋	φ5みがき棒鋼 0.2%耐力: 650MPa, 引張強度: 733MPa, 破断伸び: 12.8%		
連続繊維補強材	ポリエチレン繊維メッシュ 目付量: 44g/m ² (繊維: 27g/m ²), 厚さ: 0.27mm, ピッチ: 10mm(経×緯), 強力: 1.36~1.37kN/5cm		
緩衝材	クロロプレンゴム(HCR) 密度: 1.40g/cm ³ , JIS硬さ(A): 63.3 クロロプレンゴムスポンジ(SCR) 密度: 0.25g/cm ³ , JIS硬さ(A): 18.9 発泡ポリスチレン(EPS) 密度: 0.028g/cm ³ , 曲げ強度: 0.34MPa		
接着剤	ポリマーセメントモルタル(実験A) エポキシ樹脂(実験B)		

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	0.50	11.5(実験A) 18.5(実験B)

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

- 中間補強型: 2枚の構成単版を、中間に2枚のポリエチレン繊維メッシュ(格子目および菱目)を積層した上で、ポリマーセメントモルタルにより接着したもの。
- 絶縁型: 2枚の構成単版を、端部に所要の厚さのスペーサーを介して積層することにより、中間に中空層を設けたもの。なお、端部の積層に用いた材料が実験シリーズ間で若干異なるが、応力波の伝播が支配的となる接触爆発において、支承近傍の条件の影響は十分に小さいと考えられる³⁻⁵⁾。
- c, d) 緩衝型: b)の中空層内に、3種類の緩衝材をそれぞれ挿入したもの。なお、試験体PE-HCR-5(構成方法d)に限り、上版の自重により緩衝材が押圧される可能性は小さいと判断されたため、端部にスペーサーを設けていない。

なお、PEFRCと中空層との組合せに関しては中空層厚さを5, 15, 30mmの3水準、PEFRCと緩衝材HCRとの組合せに関しては緩衝材厚さ5, 15mmの2水準とした。

2.1.4 試験体および爆薬の設置方法

試験体および爆薬の設置方法は、図2に示す通り既往の研究³⁻⁵⁾に準拠し、2本の木製架台上に内法スパン510mmとなるように試験体を設置した後、試験体上面中央にて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)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

表3 接触爆発試験体の種類と使用したコンクリートの素材試験結果

実験シリーズ	試験体名	コンクリートの種類	中間層		構成方法	f_c (MPa)	E (GPa)	f_b (MPa)	T_b (J)	$\bar{\sigma}_b$ (MPa)
			種類	厚さ						
A	PE-Mesh	PEFRC	接着層メッシュ補強		a	70.6	23.2	10.2	42.3	9.52
	NC-Mesh	普通コンクリート	接着層メッシュ補強		a	41.5	32.1	—	—	—
	PE-AIR-15	PEFRC	AIR	15mm	b	70.6	23.2	10.2	42.3	9.52
	NC-AIR-15	普通コンクリート	AIR	15mm	b	41.5	32.1	—	—	—
B	PE-HCR-15	PEFRC	HCR	15mm	c	59.4	24.3	9.37	38.6	8.69
	NC-HCR-15	普通コンクリート	HCR	15mm	c	35.8	29.3	—	—	—
	PE-SCR-15	PEFRC	SCR	15mm	c	59.4	24.3	9.37	38.6	8.69
	NC-SCR-15	普通コンクリート	SCR	15mm	c	35.8	29.3	—	—	—
	PE-EPS-15	PEFRC	EPS	15mm	c	59.4	24.3	9.37	38.6	8.69
	NC-EPS-15	普通コンクリート	EPS	15mm	c	35.8	29.3	—	—	—
	PE-AIR-5	PEFRC	AIR	5mm	b	59.4	24.3	9.37	38.6	8.69
	PE-AIR-30	PEFRC	AIR	30mm	b	59.4	24.3	9.37	38.6	8.69
	PE-HCR-5	PEFRC	HCR	5mm	d	59.4	24.3	9.37	38.6	8.69

注1) 構成方法の記号は、図1と対応している。

注2) f_c : 圧縮強度, E: ヤング率, f_b : 曲げ強度, T_b : 曲げタフネス, $\bar{\sigma}_b$: 曲げ靱性係数 (T_b を2.0mmで除した平均耐力を曲げ強度に換算したもの¹⁹⁾)

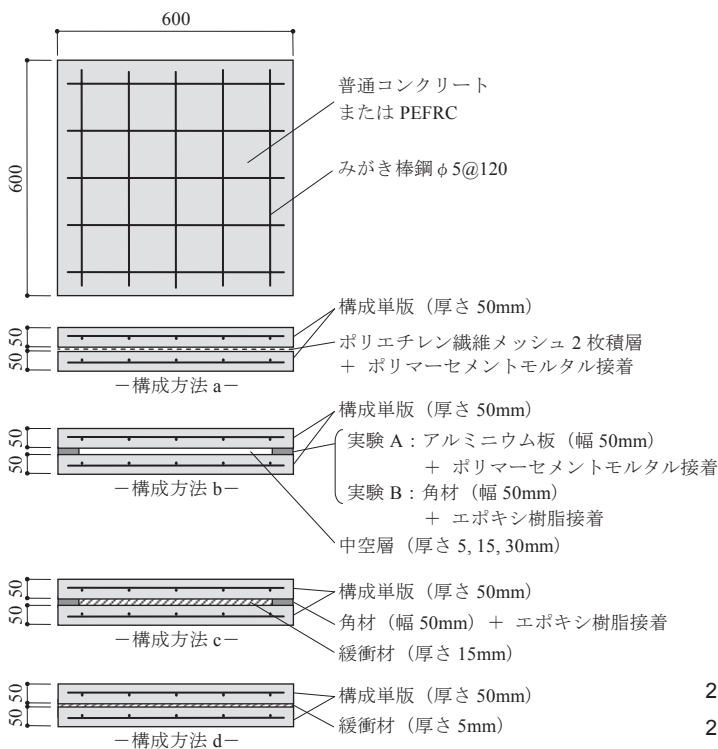


図1 各種2層構造版の構成方法

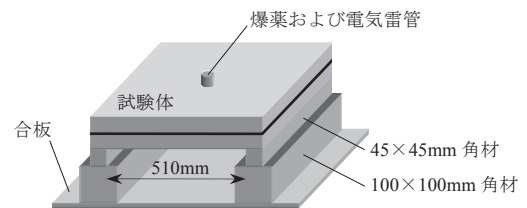
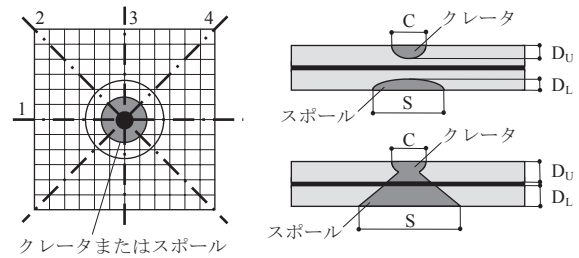


図2 試験体および爆薬の設置方法



測定項目) C: クレータ直径, S: スポール直径, D_U : 上版損傷深さ, D_D : 下版損傷深さ

図3 損傷寸法の定義

量は全試験体について200g一定とした。

2.1.5 損傷寸法の測定方法

接触爆発試験後、試験体に生じた外部損傷を目視で観察し、手で取り除くことができる浮き部を除去した上で、図3に示す損傷寸法を測定した。クレータおよびスポールの直径は、形状が非対称となるために、図3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。ここで、損傷深さは、クレータおよびスポールの深さをを用いて評価されるのが一般的であるが²⁶⁾、本実験では、後述するようにクレータとスポールの境界が明確でない損傷形態が多く見受けられたため、上下各版の最大損傷深さにより評価することとした。最後に、中央に配した鉄筋を避けるため図3中の直線1から3cm離れた平行線に沿ってコンクリートカッターにより試験体を切断し、試験体内部の損傷状況の観察を行った。

2.2 実験結果および考察

2.2.1 接触爆発試験体の破壊性状

表4に接触爆発試験体の破壊性状を示す。なお、同表中において、支承位置は左右両端である。

各試験体の破壊性状を、その傾向毎に分類して以下に示す。

- ① 試験体 PE-Mesh: 試験終了時点で、構成単版間の接着面に剥離の発生が認められた。下版裏面の爆発点直下には、スポールを伴う若干の浮きを確認されたものの、裏面剥離片の飛散はほぼ完全に抑止された状態にあった。下版裏面のひび割れ発生状況に関して、スポールを起点とした放射状の微細なひび割れが多数認められるが、これらと併せて、架台と平行方向に、やや開口幅の大きな直線状のひび割れが発生している様相が観察される。
- ② 試験体 NC-Mesh: 接着層に貫通は生じなかったものの、爆発点直下で接着層が大きく湾曲し、上下各版で損傷深さは版厚に達していた。下版裏面の爆発点直下には顕著なスポールの発生が認められ、それを起点とした放射状のひび割れはかなり大きく開口していることが判る。また、版の上面から下面へと貫通するひび割れの発生が

表 4 接触爆発試験体の破壊性状

	PE-Mesh	NC-Mesh	PE-AIR-15	NC-AIR-15			
爆発面							
切断面							
裏面							
	PE-HCR-15	NC-HCR-15	PE-SCR-15	NC-SCR-15			
爆発面							
切断面							
裏面							
	PE-EPS-15	NC-EPS-15	PE-AIR-5	PE-AIR-30			PE-HCR-5
爆発面							
切断面							
裏面							

上下両版において認められる。

③ 試験体 PE-AIR-15: 上版裏面で発生した剥離片が下版上面と接触することによりその飛散が抑止されている様相が観察され、上版には貫通は生じていない。下版には、クレータ、スポール等の局部破壊は発生しておらず、その上面には圧痕が、裏面には爆発点直下を中心とした十字型のひび割れの発生がそれぞれ観察された。これらは、上版裏面で発生した剥離片が下版上面と接触することにより形成されたものであることが予想される。また、下版の裏面から 25mm ほど内部には、版裏面に沿ったごく微細なひび割れの発生が認められた。

④ 試験体 NC-AIR-15: 上述の試験体 PE-AIR-15 とは異なり、上下版ともに貫通が生じている。また、下版に生じた局部破壊の形状はクレータ、スポールといった接触爆発によるものとはやや異なり、どちらかと言えば、押抜きせん断破壊に類似した円錐台形状の破壊形態を呈していることが判る。なお、本試験体に発生したひび割れは上述の試験体 NC-Mesh の場合よりも更に大きく開口しており、特に上版には、版側面に平行なひび割れが 4 辺全てに沿って発生している様相が認められる。

⑤ 試験体 PE-HCR-15, PE-SCR-15 および PE-EPS-15: いずれの場合も上版裏面で凸状に変形（本研究では、便宜的に隆起と称する）した PEFRC が緩衝材を押圧している様相が観察されるが、その程度は緩衝材の種類に応じて異なっている。すなわち、低硬度の緩衝材 SCR および EPS を用いた場合には爆発点直下で緩衝材がほぼ完全に圧潰し、特に試験体 PE-EPS-15 では上版裏面で発生した隆起部が下版上面と接触しているのに対して、高硬度の緩衝材 HCR を用いた場合には隆起部と下版上面との接触が抑制されていることが判る。しかし、緩衝材の種類に関わらず下版の損傷程度に大差はなく、いずれの試験体においてもスポールは完全に抑止され、爆発点直下を中心とした十字型のひび割れが卓越している様相が観察される。

⑥ 試験体 NC-HCR-15, NC-SCR-15 および NC-EPS-15: 試験体 NC-HCR-15 においてスポールの規模がやや大きくなっているが、上下版ともに貫通が生じている点や、上面から下面へと貫通する開口幅の大きなひび割れが上下両版において生じている点で、上述の試験体 NC-AIR-15 と類似した破壊性状を示している。また、試験体 NC-EPS-15 においては、爆発点直下で緩衝材が完全に圧潰している様相が観察される。

⑦ 試験体 PE-AIR-5 および PE-AIR-30: 前者の場合、先述の試験体 PE-AIR-15 の場合と同様に、上版裏面で隆起した PEFRC が下版上面と接触している様相が認められた。但し、試験体 PE-AIR-15 と比較した場合、上版の局部破壊は低減され、逆に下版のひび割れ発生程度は大きくなる傾向にあることが判る。なお、下版裏面の爆発点直下には PEFRC の顕著な隆起が認められたが、裏面剥離片の飛散は十分に抑止された状態にあった。一方、後者の場合、上版裏面で発生した剥離片が中空層内に飛散することで上版に貫通が生じたが、下版裏面では、爆発点直下を起点としたごく微細な放射状のひび割れが生じた程度であった。

⑧ 試験体 PE-HCR-5: 下版裏面には、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確認され、若干ではあるがスポールの発生が認められる。また、試験体 PE-HCR-15 と比較した場合、下版内部のひび割れがやや広域にわたって進展している様相が観察される。

2.2.2 損傷寸法の測定結果

本項では、表 5 に示す損傷寸法の測定結果を基に、各種 2 層構造版の耐爆性能について比較検討を試みる。

(1) 中間補強が耐爆性能に及ぼす影響

図 4 に中間補強が損傷寸法に及ぼす影響を示す。なお、同図および後述の図 5 中には単版（厚さ 100mm）に関する実験データ⁸⁾も併記しているが、これらに限り、クレータ深さおよびスポール深さを用いて損傷深さを表示している。

普通コンクリートを用いた場合、総厚が等しい単版と比較して、中間メッシュ補強によるスポール低減効果は認められず、両者ともに全損傷深さ（上版損傷深さと下版損傷深さ（単版に関しては、クレータ深さとスポール深さ）の合計）は総厚に達していることが判る。一方、PEFRC を用いた場合に関して、中間補強型試験体の全損傷深さは、総厚が等しい単版のそれよりもやや低減される傾向にあった。この理由として、前者に使用した PEFRC の曲げタフネスが後者のそれよりもやや大きかったことや⁸⁾、試験終了時点で接着面に剥離が発生していたこと等が考えられる。

構成単版相互のより有効な接合方法に関しては今後更に検討する必要があるが、以上の因子を考慮した場合、ポリエチレン繊維メッシュを用いて接着層を補強しても、スポール破壊の要因である応力波の下版への透過を有効に遮断することはできないために、総厚が等しい単版よりも良好な耐爆性能を得ることは難しいと考えられる。

(2) 中空層挿入が耐爆性能に及ぼす影響

図 5 に中空層（厚さ 15mm）挿入が損傷寸法に及ぼす影響を示す。

PEFRC を用いた場合においては、中空層挿入により明確にスポール破壊が低減されており、これは、スポール破壊の要因である応力波の下版への透過が中空層において遮断されたためであると考えられる。しかし、普通コンクリートを用いた場合では、中空層を挿入しても総厚が等しい単版と損傷寸法に大きな差異は認められず、上下版ともに損傷深さは版厚に達していることが判る。

すなわち、中空層挿入の効果は使用するコンクリートとの組合せに応じて異なり、検討対象とした中空層厚さ（15mm）であれば、PEFRC と中空層との組合せは下版損傷低減の面で有効であるのに

表 5 損傷寸法の測定結果

試験体名	T (mm)	C (mm)	S (mm)	D _U (mm)	D _L (mm)
PE-Mesh	100	127	54	35	19
NC-Mesh	100	164	378	50	50
PE-AIR-15	100	131	0	49	0
NC-AIR-15	100	180	306	50	50
PE-HCR-15	100	134	0	38	0
NC-HCR-15	100	192	408	50	50
PE-SCR-15	100	138	0	43	0
NC-SCR-15	100	195	329	50	50
PE-EPS-15	100	139	0	50	0
NC-EPS-15	100	186	320	50	50
PE-AIR-5	100	139	0	35	0
PE-AIR-30	100	133	0	50	0
PE-HCR-5	100	141	47	40	19

注 1) T: コンクリート総厚, C: クレータ直径, S: スポール直径, D_U: 上版損傷深さ, D_L: 下版損傷深さ

注 2) T は、中空層や緩衝材の厚さを除いたコンクリート実質部の合計版厚を示している。

対して、普通コンクリート単版間に中空層を挿入してもその効果は得られないものと判断される。なお、以上の中空層付き2層構造版の破壊メカニズムに関しては、次章において、数値解析による検証を試みる。

(3) 中空層内への緩衝材挿入が耐爆性能に及ぼす影響

図6に、中空層（厚さ15mm）内への緩衝材挿入が損傷寸法に及ぼす影響を示す。なお、同図中には比較のため、緩衝材と同厚の中空層を挿入した2層構造版の損傷寸法も併記している。

PEFRCを用いた場合、4試験体全てにおいて下版裏面に十字型のひび割れを生じており（表4参照）、その程度に若干の差異はあるものの、いずれも下版の局部破壊は完全に抑止されている。このため、全損傷深さは上版損傷深さのみによって決定されているが、その程度は、中空層および緩衝材EPSを挿入した場合においてはほぼ上版の版厚（50mm）に達しており、以下、緩衝材SCR、HCRの順に低減されていることが判る。これは、中空層の場合も含め、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り、そ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。

普通コンクリートを用いた場合に関して、緩衝材を挿入した試験体のスポール直径は中空層のみの場合と比較してやや大きくなっており、その程度は緩衝材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衝撃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なく、4試験体全てにおいて上下各版の損傷深さは版厚に達していることが判る。

以上の結果より、PEFRCおよび普通コンクリートいずれを用いた場合においても、緩衝材は同厚の中空層以上の効果は有しておらず、緩衝材挿入が直接的に耐爆性能に及ぼす影響は小さいと判断される。

(4) 中空層および緩衝材の厚さが耐爆性能に及ぼす影響

図7に、中空層および緩衝材の厚さがPEFRC2層構造版の損傷寸法に及ぼす影響を示す。

中空層厚さの影響に関して、上版の損傷寸法に着目すると、中空層厚さを増すほど上版損傷深さは拡大する傾向にあり、これは、2.2.1項で述べた通り、中空層厚さの増大により上版裏面で発生した剥離片が中空層内に飛散し易くなるためである。一方、下版の損傷に関して、いずれの試験体においてもクレータ、スポール等の局部破壊は完全に抑止されているが、表4を参照すると、下版裏面のひび割れは中空層厚さを増すほど軽減される傾向にあることが判る。すなわち、中空層厚さを増せば、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。耐爆設計の要点は裏面の損傷を低減することであり、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、下版の損傷を低減させる点で、耐爆性能向上に効果を有すると考えられる。

緩衝材HCRを挿入した場合においては、上版裏面で発生した剥離片の飛散が緩衝材により阻害されるため、上版損傷深さは緩衝材厚さに関わらず同程度となっている。一方、下版の損傷に着目すると、緩衝材厚さ5mmでは若干ではあるがスポールが生じているのに対し、緩衝材厚さ15mmになるとそれが完全に抑止されていることから、緩衝材厚さを増すほど耐爆性能は向上する傾向にあるものと推察される。但し、緩衝材が下版損傷低減の面で同厚の中空層以

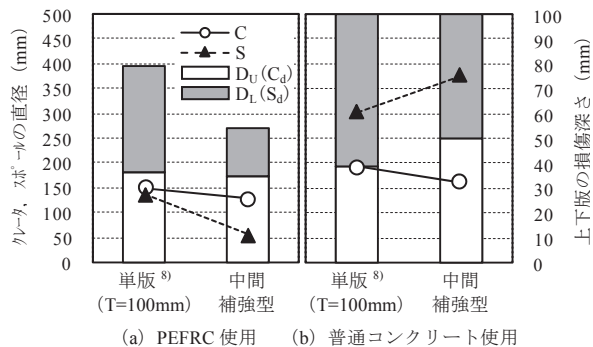


図4 中間補強が損傷寸法に及ぼす影響

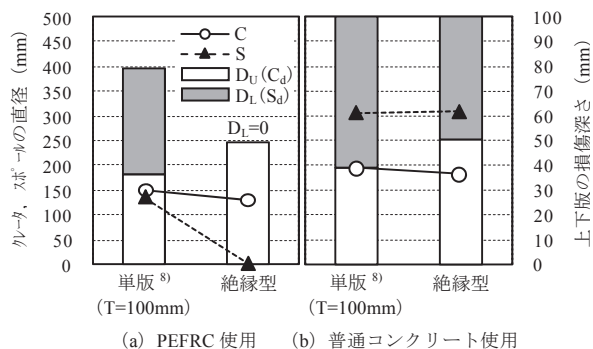


図5 中空層（厚さ15mm）挿入が損傷寸法に及ぼす影響

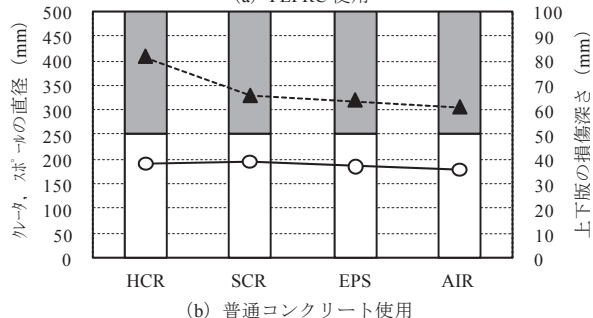
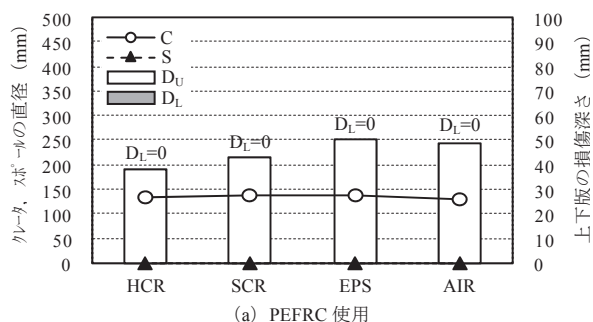


図6 中空層（厚さ15mm）内への緩衝材挿入が損傷寸法に及ぼす影響

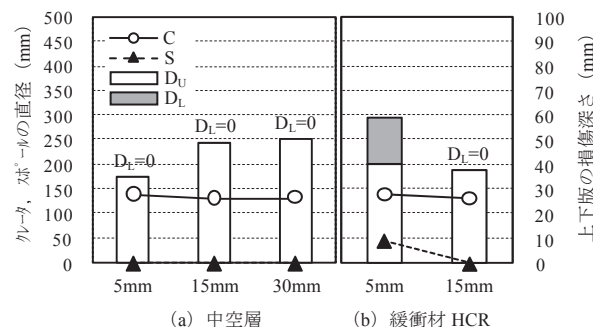


図7 中空層および緩衝材の厚さがPEFRC2層構造版の損傷寸法に及ぼす影響

上の効果を有していないことは、先に述べた通りである。

3. 解析的検討

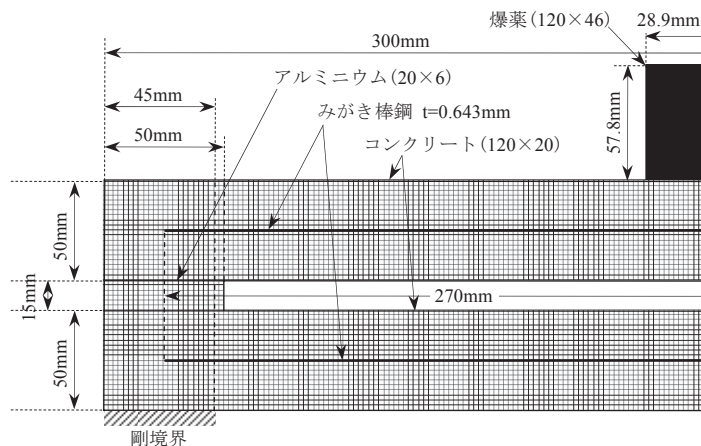
前章の実験結果に基づいた場合、特に中空層を挿入した2層構造版の破壊メカニズムを明らかにすることが重要であると考えられる。但し、PEFRCの動的構成則は未だ明らかになっておらず、これを対象に衝撃解析を実施することは現時点で必ずしも容易ではない。そこで、本章では、普通コンクリートを用いた中空層付き2層構造版（試験体 NC-AIR-15）を対象に数値シミュレーションを実施し、そのシミュレーション結果を基に、PEFRCを用いた中空層付き2層構造版（試験体 PE-AIR-15）の破壊メカニズムに関して定性的な考察を加えることとした。なお、数値解析には、流体・構造連成を適切に模擬することが可能な汎用衝撃解析コード ANSYS AUTODYN を用いた。

3.1 解析方法

3.1.1 解析体系

数値解析モデルは、図8に示す通り、2次元軸対称系とした。本問題のように、爆薬が燃焼後に気体として振舞う問題においては、爆薬の流動性をより良く模擬することが可能な Euler 座標系を適用することが望ましく、且つ上述のように、本解析コードは他のコードと比較してロバストな流体・構造物相互作用解析機能を有している。しかし、本問題の場合、途中で普通コンクリート版に貫通が生じ、バルクの少ない構成要素（鉄筋）と爆発生成気体とが相互作用することが想定される。こうした、太さが流体を模擬するための Euler 要素のメッシュサイズよりも小さくなるような対象に対しては、Euler と Lagrange の相互作用計算を精度良く適用することができない。そこで、本解析では、全て Lagrange 座標系により模擬することとした（シェルやビーム要素も Lagrange 要素の1種である）。なお、このようなモデル化方法によっても十分な精度を確保できることが、既往の研究⁹⁾において確認されている。

図8には、本解析における材料配置図、寸法図、計算メッシュ図および境界条件図の概要を同時に示している。普通コンクリート、爆薬およびアルミニウム板を Lagrange 要素で、みがき棒鋼をシェル要素でそれぞれ模擬した。接着層のポリマーセメントモルタルについては無視することとした。軸対称モデルの制約上、φ5 みがき棒鋼は等価質量の円板で置き換えるものとした。但し、格子状に配筋



注) () 内の数値は、メッシュ分割数を示す。

図8 数値解析モデル図

された鉄筋の場合には面内2方向には曲げに対する強度を有するが、その他の方向にも一様に曲げを評価すると過大評価となることが懸念されるため、膜応力によってモデル化するものとした。

また、本来3次元形状の矩形断面を有する物体を2次元軸対称で置き換える場合には、物体全体の質量が等しくなるように、等価断面積とすることが多い。しかし、本問題の場合、RC版は2本の角材上に設置されており、RC版の上面中央に設置された爆薬の衝撃力が爆源から最も近い角材の頂点にせん断力として作用し、RC版に損傷を及ぼすことが考えられるため、この境界条件を優先し、RC版断面の内接円をRC版の断面であるものとした。但し、角材は剛であるものと仮定し、境界条件によって模擬した。

3.1.2 材料モデル

(1) 爆薬

爆薬には、JWLの状態方程式²⁰⁾を適用した。但し、構成則は無視して流体的であるものと仮定した。この状態方程式における係数値と関連する爆轟特性は Cylinder Test および数値解析によって決定され、多くの爆薬についてそれらの値が公開されているが、本爆薬は特殊な薬種であるため、爆轟特性解析プログラム KHT²¹⁾を用いて計算した。JWLの状態方程式を式(1)に、本爆薬に関する物性値の一覧を表6にそれぞれ示す。

$$p = A \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_1} \right) \exp \left(-\frac{R_1}{\eta} \right) + B \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_2} \right) \exp \left(-\frac{R_2}{\eta} \right) + \omega \eta \rho_{ref} e \quad (1)$$

ここに、 p : 圧力、 η : ρ / ρ_{ref} 、 ρ : 密度、 ρ_{ref} : 参照（初期）密度、 e : 比内部エネルギー、 A, B, R_1, R_2, ω は爆薬に固有の値である。なお、爆薬の燃焼は定常爆轟速度で伝播するものと仮定している。

(2) コンクリート

コンクリートは、密度 2.4g/cm^3 、スポール強度（裏面剥離が生じる負の限界静水圧力） -7.0MPa であると仮定した。状態方程式は、圧力 p が密度に比例する、式(2)に示す線型の方程式を仮定した。

$$p = K\mu, \quad \mu \equiv \rho / \rho_{ref} - 1 \quad (2)$$

ここに、 K : 体積弾性率、 μ : 圧縮度、 ρ : 密度、 ρ_{ref} : 参照密度である。コンクリートのポアソン比 ν は 0.2 であるものと仮定し、体積弾性率 K および横弾性率 G は、ヤング率 E とポアソン比 ν から、式(3)に基づいて計算した。

表6 爆薬の材料データ

状態方程式	JWL
参照（初期）密度 ρ_{ref} (g/cm^3)	1.3189
JWL式第1項係数 A (GPa)	578.4123
JWL式第2項係数 B (GPa)	10.1342
JWL式第1項指数係数 R_1 (-)	5.711761
JWL式第1項指数係数 R_2 (-)	1.425701
JWL式第3項係数 ω (-)	0.279831
爆轟速度 V_{det} (m/s)	6278
単位体積あたりの内部エネルギー E_0 (GJ/m^3)	5.8409
C-J圧力 P_{C-J} (GPa) *	12.774
構成則	無 (Hydro)
エロージョン則 ²²⁾ (幾何学的ひずみ (%))	500

* 参考値であり、直接計算には使用していない。

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}, G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

コンクリートの構成則は、Drucker-Prager 則²³⁾に従うものとした。本モデルは、図9にその模式図を示すように、降伏応力 Y が圧力 p に依存し、比例することを仮定するものであるが、本解析では降伏応力は最大値 Y_{max} を超えないものと仮定した。本構成式は、直線の傾き a と縦軸切片 b を用いて、式 (4) で表される。

$$Y = \min(Y_{max}, aP + b) \quad (4)$$

静的引張強度 f_t は、静的圧縮強度 f_c を用いて、式 (5) により算出した²⁴⁾。

$$f_t = 0.23 \times f_c^{2/3} \quad (5)$$

また、本解析で支配的と考えられるひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ を、 10^4 (単位: 1/s) オーダであると仮定し、式 (6), (7) により動的圧縮強度 f_c^d および動的引張強度 f_t^d を算出した^{25,26)}。

$$f_c^d = f_c \times (1.021 - 0.05076 \cdot \log \dot{\epsilon} + 0.02583 \cdot (\log \dot{\epsilon})^2) \quad (6)$$

$$f_t^d = f_t \times (0.8267 + 0.02987 \cdot \log \dot{\epsilon} + 0.04379 \cdot (\log \dot{\epsilon})^2) \quad (7)$$

但し、両式中の $\dot{\epsilon}$ の単位は $1/\mu\text{s}$ である。

ところで、粘着力 c と摩擦角 ϕ との間には、以下の関係がある。

$$f_c^d = 2c \cos \phi / (1 - \sin \phi), f_t^d = 2c \cos \phi / (1 + \sin \phi) \quad (8)$$

ここで、 $n \equiv f_c^d / f_t^d$ とすると、以下の関係が導かれる。

$$c = \sqrt{n} f_t^d / 2, \cos \phi = 2\sqrt{n} / (n+1), \sin \phi = n-1 / (n+1) \quad (9)$$

一方、Drucker-Prager モデルの破壊曲面は、係数 α と κ を用いて、

$$\alpha I_1 + \sqrt{J_2} - \kappa = 0 \quad (10)$$

但し、 $I_1, \sqrt{J_2}$ はそれぞれ 1 次, 2 次の応力の不変量である。Drucker-Prager モデルの破壊曲面が Mohr-Coulomb 則の偏 6 角形に内接する条件を適用することにより、下式が得られる。

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}, \kappa = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (11)$$

式 (11) より、Drucker-Prager モデルの傾き a および切片 b は、式 (12) のようになる。

$$a = 3\sqrt{3}\alpha, b = \sqrt{3}\kappa \quad (12)$$

式 (12) を n と f_c^d のみを用いて書き換えると、以下のようになる。

$$a = \frac{3(n-1)}{n+2}, b = \frac{3}{n+2} f_c^d \quad (13)$$

式 (13) に動的圧縮強度 f_c^d , 動的引張強度 f_t^d , $n \equiv f_c^d / f_t^d$ を代入し、傾き a および切片 b を算出した。表7にコンクリートに対して用いた物性値を示す。

(3) 鋼材

鋼材に強い衝撃力が作用するような問題では、本来、高圧に対応した、密度や内部エネルギーに依存する状態方程式を適用すべき

であるが、本解析ではそれらの状態量の依存性を考慮しないビーム要素を適用するため、線型の状態方程式を適用した。 $E = 205.9\text{GPa}$, $\nu = 0.3$ を仮定し、コンクリートと同様の方法により体積弾性率と横弾性率を決定した。

構成則には、Johnson-Cook のモデル²⁷⁾を適用した。このモデルにおける降伏応力 Y は、相当塑性ひずみ ϵ_p , 無次元化相当塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}_p / \dot{\epsilon}_0$ (但し、 $\dot{\epsilon}_0 = 1.0$ (1/s)) および相同温度 T^* の関数として、下式で表される。

$$Y = [A + B \epsilon_p^n][1 + C \ln \dot{\epsilon}^*][1 - T^{*m}] \quad (14)$$

ここで、 A, B, n, C, m は物質に固有の物性値である。相同温度 T^* は、式 (15) のように表される。

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad (15)$$

ここに、 T : 物質の温度, T_{room} : 室内温度, T_{melt} : 融解温度である。

表8に鋼材に対して用いた材料データの一覧を示す。Johnson-

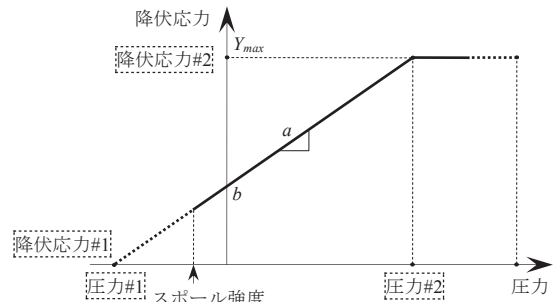


図9 Drucker-Prager モデルの模式図

表7 コンクリートの材料データ

状態方程式	線型
参照密度 ρ_{ref} (g/cm ³)	2.4
体積弾性率 K (GPa)	17.833
構成則	Drucker-Prager
横弾性率 G (GPa)	13.375
圧力#1 P_1 (MPa)	-14.71
圧力#2 P_2 (MPa)	55.38
降伏応力#1 Y_1 (MPa)	0
降伏応力#2 Y_{max} (MPa)	150
破壊則	無 (Hydro)
スポール強度 P_{min} (MPa)	-7.0
エロージョン則 ²²⁾ (幾何学的ひずみ (%))	100

表8 鋼材の材料データ

状態方程式	線型
参照密度 ρ_{ref} (g/cm ³)	7.9
体積弾性率 K (GPa)	171.6
構成則	Johnson-Cook
横弾性率 G (GPa)	79.21
初期降伏応力 A (MPa)	650
加工硬化係数 B (MPa)	275
加工硬化乗数 n (-)	0.36
ひずみ速度係数 C (-)	0.022
温度軟化係数 m (-)	1.0
破壊則	Plastic Strain
破断ひずみ ϵ_{max}^p (%)	12.0
エロージョン則 ²²⁾ (塑性ひずみ (%))	12.1

Cook のモデルの係数値のうち、 A に対しては 0.2%耐力の値を用いたが、その他の係数値 B, n, C, m に関しては、1006 炭素鋼（米国鉄鋼協会規格）に関する値を用いた。但し、対象がビーム要素であり、衝撃圧縮に伴う温度上昇は評価対象外であることから、温度依存性に関する係数値である m に関しては、実際には意味を持たない。

計算で用いられる破断ひずみ（伸び）は、公称値（工学値）ではなく真値（対数値）であるため、12.8%を 12.6%としている。なお、上述の Johnson-Cook の式に係数値と限界ひずみ 12.6%を代入したときの引張強度の計算値は 778.1MPa となり、実測値である 733MPa よりも若干高い程度で、概ね整合している。

(4) アルミニウム

アルミニウムに対しては、Mie-Grüneisen モデル型 Shock Hugoniot の状態方程式と Johnson-Cook の構成則モデル²⁷⁾を適用した。物性値は、文献 27) の 2024Al に対する数値を用いたが、解析主眼ではないため、その詳細については省略する。

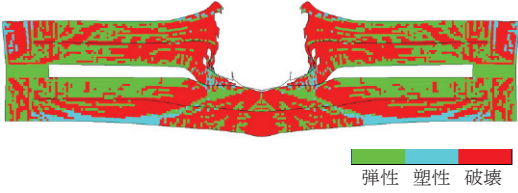
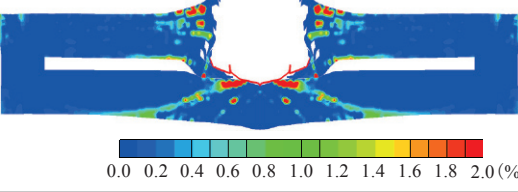
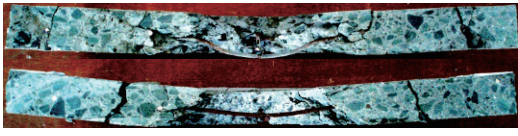
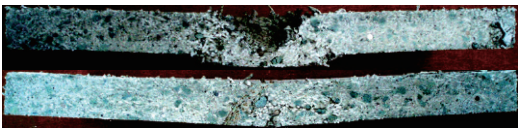
3.2 解析結果

表 9 に、計算終了時 ($T=0.5\text{ms}$) における解析結果と実験結果との比較を示す。同表より、本解析による破壊状況は、スポール直径をやや大きく評価する傾向にあるものの、上下版ともに貫通が生じていると考えられる点や、下版において円錐台形状の破壊形態を呈している点で、実験結果と概ね良好な対応を示しているものと考えられる。なお、コンクリートに適用した破壊条件は、負の限界静水圧力によって破壊が生じる、いわゆるスポール破壊であるが、コンクリートのような脆性材料の場合、ある方向にマイクロクラックが生じたとしても、他の方向に対しては健全な状態を保持している状況等が想定され、スポール破壊により直ちにほぼ完全に材料強度が失われるとは限らない。従って、破壊状況の図中で赤く表示された部分が全て粉砕されている訳ではない点には注意を要する。また、表 9 中には $T=0.5\text{ms}$ における相当塑性ひずみ分布も併記している。コンクリート内のひずみが 1.5%以上と評価されている部分が存在しているが、ごく局所に限られていることから、上下版ともに圧壊モードは支配的ではなく、スポール破壊モードが支配的であると考えられる。

図 10 に損傷分布の推移 ($T=0.02\sim 0.20\text{ms}$) を示す。同図より、上版裏面でスポール破壊により飛翔したコンクリート片が下版上面に衝突することにより、下版に貫通を伴うスポール破壊が生じている様相が観察される。すなわち、下版の損傷は、直接的に爆轟衝撃によって生じたものではなく、上版裏面のスポール破壊により発生したコンクリート片がいわゆる 2 次飛来物として下版に作用した結果生じたものであると判断される。

ところで、前掲の表 9 には、同厚の中空層を挿入した PEFRFC 2 層構造版（試験体 PE-AIR-15）に関する実験結果を併記している。普通コンクリートであれば完全に飛散しているはずの上版裏面の剥離片は下版上面と接触することで飛散が抑止され、また、下版では、スポール破壊の前兆と思われる微細な内部ひび割れの発生は見られるものの、スポール破壊は生じておらず、どちらかといえば曲げ破壊に類似した破壊モードを示していることが判る。すなわち、ポリエチレン繊維の架橋作用により、上版裏面のスポール部が直ちに粉砕・飛散することなく延性的な変形形状を示し、その下版上面への衝突力が緩和されたことや、衝突による下版スポール部のひび割れ

表 9 解析結果と実験結果との比較

破壊状況 ($T=0.5\text{ms}$)	
相当塑性 ひずみ分布 ($T=0.5\text{ms}$)	
破壊状況 (実験結果)	
参考) 試験体 PE-AIR-15	
破壊状況 (実験結果)	

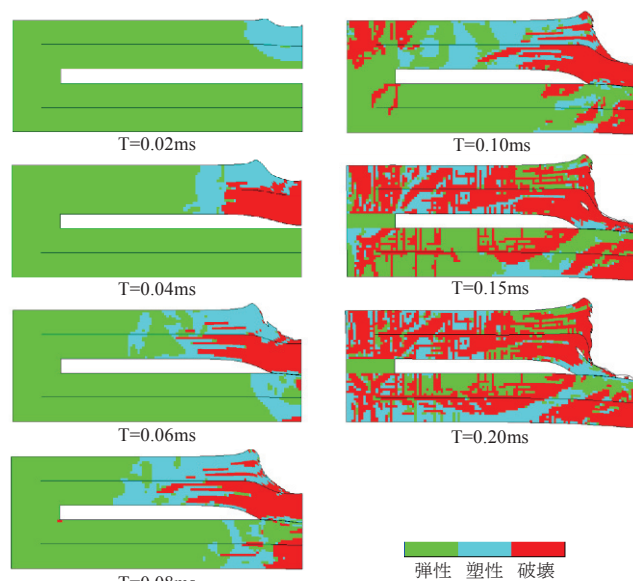


図 10 損傷分布の推移 ($T=0.02\sim 0.20\text{ms}$)

開口が抑止され、下版の破壊モードが局部破壊型から全体変形型へと変化したこと（例えば、²⁸⁾等の相互作用の結果として、上記のような比較的良好的な耐爆性能が得られているものと推察される。

4. まとめ

本研究は、突発的な意図的攻撃に対応するため、PEFRFC を用いて作製したプレキャスト薄板（厚さ 50mm）の現場積層により運搬・取り付け等の施工性向上および施工の迅速化を図り、尚且つ総厚が等しい PEFRFC 単版と同等以上の耐爆性能を有する PEFRFC 2 層構造版の開発を目的としたものである。

はじめに、中間補強型、絶縁型および緩衝型等の各種 2 層構造版に関して接触爆発試験を実施し、特に部材構成方法やコンクリートの種類の違いに起因する局部破壊およびひび割れ発生状況等の差異に関して考察を行った。本実験の範囲内で得られた知見を要約すると、以下ようになる。

- 1) 構成単版間の接着層をポリエチレン繊維メッシュにより補強しても、総厚が等しい単版よりも良好な耐爆性能を得ることは難しいと考えられた。
- 2) 構成単版間への中空層挿入の効果は使用するコンクリートの種類に応じて異なり、中空層厚さ 15mm 一定であれば、PEFRC と中空層との組合せは下版損傷低減に有効であるのに対して、普通コンクリート単版間に中空層を挿入してもその効果は得られないことが判った。また、PEFRC と中空層との組合せにおいて、中空層厚さを増すほど上版のみに損傷が集中し、下版の損傷は逆に低減される傾向が認められた。
- 3) 中空層内に緩衝材（クロロプレングム、クロロプレングムスポンジおよび発泡ポリスチレン）を挿入した 2 層構造版に関して、PEFRC および普通コンクリートのいずれを用いた場合においても、緩衝材は同厚の中空層以上の下版損傷低減効果は有しておらず、緩衝材挿入が直接的に耐爆性能に及ぼす影響は小さいと判断された。

以上の実験結果より、構成単版間に中空層を挿入した 2 層構造版の破壊メカニズムを明らかにすることが重要であると考えられた。そこで、普通コンクリートと中空層（厚さ 15mm）との組合せに関して、衝撃解析コード ANSYS AUTODYN を用いた数値シミュレーションを実施した結果、以下の知見が得られた。

- 4) 中空層を挿入した普通コンクリート 2 層構造版における下版の損傷（貫通を伴うスポール破壊）は、直接的に爆轟衝撃によって生じたものではなく、上版裏面のスポール破壊により発生したコンクリート片が 2 次飛来物として下版上面に作用したために生じたものであると判断された。
- 5) 中空層挿入による PEFRC 2 層構造版の耐爆性能向上に関しては、ポリエチレン繊維の架橋作用による上下両版の靱性向上を考慮することにより、定性的に説明することが可能であると考えられた。なお、PEFRC を対象とした数値解析法の検討は、今後の重要な課題となるものと思われる。

謝辞

本研究は、熊本大学工学部グローバル COE プログラム「衝撃エネルギー工学グローバル先導拠点」(拠点リーダー：秋山秀典教授)より研究支援を受け、接触爆発試験は同大学衝撃・極限環境研究センターの衝撃実験室にて実施されました。実験にあたり、伊東繁教授、秋丸進助手(当時)、松山賢一助教、田中茂技官、前原弘法研究支援推進委員、武田浩二助教、甲斐定夫技術専門職員、伊東研究室ならびに建築材料・施工研究室の皆様より多大なご協力をいただきました。また、東洋紡績(株)、有明生コン(株)、(株)フジコンケミカル、(株)ポソリス物産の各社からは実験資材の提供、伊藤忠テクノソリューションズ(株)の片山雅英氏からは数値解析における技術支援をそれぞれ賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 大野友則：飛翔体の衝突に対する RC 版の挙動に関する研究の現状、コンクリート工学, Vol.41, No.4, pp.20-28, 2003.4
- 2) 日本建築学会：重要構造物の耐衝突・耐爆性能評価と防止対策、2006 年度日本建築学会大会(関東)構造部門(応用力学)パネルディスカッション資料, pp.11-21, 2006.9
- 3) 森下政浩ほか 3 名：接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1787-1797, 2000.3
- 4) 田中秀明ほか 1 名：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, 第 14 巻, 第 1 号, pp.1-11, 2003.1
- 5) 森下政浩ほか 3 名：接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷に及ぼすコンクリート強度及び鉄筋間隔の影響, コンクリート工学論文集, 第 15 巻, 第 2 号, pp.89-98, 2004.5
- 6) Katayama, M. et al.: Numerical Analysis Method for the RC and Geological Structures Subjected to Extreme Loading by Energetic Materials, International Journal of Impact Engineering, Vol.34, Issue 9, pp.1546-1561, 2007
- 7) 大久保一徳ほか 4 名：C4 爆薬の接触・近接爆発に対するコンクリート版の損傷評価, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.1273-1283, 2007.3
- 8) 山口信ほか 3 名：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, 第 619 号, pp.187-194, 2007.9
- 9) 山口信ほか 3 名：各種繊維補強コンクリートとの耐爆性能の比較検討ー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ー, 日本建築学会構造系論文集, 第 73 巻, 第 631 号, pp.1681-1690, 2008.9
- 10) 大野友則ほか 4 名：緩衝材を有する 2 層 RC はりの耐衝撃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
- 11) 岸徳光ほか 3 名：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
- 12) 北川真ほか 3 名：高速飛来物の衝突を受ける 2 重 RC 板の局部損傷と耐衝撃性, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.1609-1619, 1993.3
- 13) 岡本貢一ほか 4 名：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
- 14) 岸徳光ほか 2 名：三層緩衝構造の緩衝性能に関する大型屋外実験, 構造工学論文集, Vol.41A, pp.1257-1265, 1995.3
- 15) 白井哲男ほか 4 名：小型剛飛翔体の高速衝突に対するサンドイッチ形式鉄筋コンクリート版の局部損傷とその推定法, 日本建築学会構造系論文集, 第 473 号, pp.149-158, 1995.7
- 16) Shirai, T. et al.: Experiment and Numerical Simulation of Double-Layered RC Plates under Impact Loadings, Nuclear Engineering and Design, Vol.176, pp.195-205, 1997
- 17) 山口信ほか 3 名：高分子量ポリエチレン繊維を用いた繊維補強コンクリートの靱性確保を目的とした調合とその基礎物性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 73 巻, 第 634 号, pp.2091-2100, 2008.12
- 18) 日本コンクリート工学協会：繊維補強コンクリートの試験方法に関する規準(JCI-SF), 1984
- 19) 土木学会：コンクリート標準示方書[規準編], 2007
- 20) Dobratz, B. M.: LLNL Explosives Handbook; Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants, UCRL-52997, Lawrence Livermore National Laboratory, 1981
- 21) 田中克己：改良木原一疋田式による煙火原料薬の爆発特性, Science and Technology of Energetic Materials, 第 64 巻, 第 4 号, pp.167-174, 2003.7
- 22) 矢川元基ほか 1 名編：計算力学ハンドブック, 朝倉書店, 2007
- 23) Chen, W. F.: Plasticity in Reinforced Concrete, McGraw-Hill International Book Company, 1982
- 24) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編], 1996
- 25) 山口弘ほか 2 名：高圧 3 軸圧縮応力下におけるコンクリートの応力-ひずみ関係式(その 2 高速載荷), 日本建築学会構造系論文報告集, 第 396 号, pp.50-59, 1989.2
- 26) 山口弘ほか 1 名：鉄筋コンクリート版の衝撃応答に及ぼすひずみ速度効果, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 406 号, pp.25-35, 1989.12
- 27) Johnson, G. R. et al.: A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High temperature, Proc. 7th Int. Symp. on Ballistics, The Hague, pp.541-547, 1983
- 28) 岸徳光ほか 4 名：ピニロン短繊維混入軽量コンクリート RC 梁の耐衝撃性状, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 60 号, pp.148-151, 2004.1

(2010年4月9日原稿受理, 2010年5月12日採用決定)