

# プレキャスト小型要素による部材構成方法の違いが耐爆性能に及ぼす影響 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

## INFLUENCES OF SLAB COMPOSITION USING PRECAST SMALL ELEMENTS ON BLAST RESISTANCE

Blast resistance of polyethylene fiber-reinforced concrete against contact detonation

山口 信\*, 村上 聖\*\*, 武田浩二\*\*\*, 三井宜之\*\*\*\*, 平居孝之\*\*\*\*\*

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

For rapid construction of concrete barriers against sudden terrorist bomb attacks, blast-resistant slabs composed of precast small elements such as thin plates and blocks, which were made of polyethylene fiber-reinforced concrete (PEFRC), were manufactured and used for contact detonation tests. The main results obtained are as follows: 1) the blast resistance of the 100-mm-thick solid-type slabs, which are constructed with thin plates or solid blocks, is almost equal to that of the 100-mm-thick PEFRC single slab; and 2) the hollow-type slabs composed of thin plates or hollow blocks possess better blast resistance than the single slab, because an element on the detonation side behaves as a sacrificial element in these slabs.

**Keywords :** Polyethylene fiber-reinforced concrete, Double-layered structure, Masonry structure, Blast resistance, Contact detonation, Local failure

ポリエチレン繊維補強コンクリート, 2層構造, 組積構造, 耐爆性能, 接触爆発, 局部破壊

### 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<sup>1-3)</sup>。

特に, 爆発荷重を受ける鉄筋コンクリート(以下, RC)版の局部破壊を考慮する場合, コンクリート片の飛散による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。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, この中で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RC版の損傷予測法の開発<sup>4-6)</sup>, 数値解析に基づく損傷評価<sup>7, 8)</sup>および連続繊維シートを用いたRC版の耐爆補強<sup>9, 10)</sup>等に関する研究が実施されている。著者らもこれまでに, 短繊維補強コンクリートの耐爆構造部材への適用を目的に, ポリエチレン繊維補強コンクリート(以下, PEFRC)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<sup>11, 12)</sup>。

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

考える場合, 施工の迅速化の観点からPEFRCをプレキャスト(以下, PCa)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PEFRC版の耐爆性能低下を招くことは既往の研究<sup>11)</sup>からも明らかであり, 所要の耐爆性能を維持しながら施工性向上および迅速施工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する。

前報<sup>13)</sup>では, PEFRCを用いて作製したPCa薄板要素の現場積層により運搬・取付け等の施工性向上および迅速施工化を図り, 尚且つ総厚が等しいPEFRC単版と同等以上の耐爆性能を有するPEFRC2層構造版を提案し, その有効性を明らかにした。本報では, 施工性向上および迅速施工化を目的とし, 尚且つ総厚が等しいPEFRC単版と同等以上の耐爆性能を有する新たな部材構成方法として, PEFRCを用いて作製したPCaブロックの組積による耐爆構造版を提案し, 先に提案した2層構造版と併せて, 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, 得られた実験結果に関して, 既往の損傷評価式等による計算

\* 熊本大学大学院自然科学研究科 助教・工博

\*\* 熊本大学大学院自然科学研究科 教授・工博

\*\*\* 熊本大学大学院自然科学研究科 准教授・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

Assist. Prof., Graduate School of Science and Technology, Kumamoto Univ., Dr. Eng.

Prof., Graduate School of Science and Technology, Kumamoto Univ., Dr. Eng.

Assoc. Prof., Graduate School of Science and Technology, Kumamoto Univ., Dr. Eng.

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

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

結果に基づく考察を試みた。

## 2. 実験方法

### 2.1 使用材料および調査

表 1 および 2 に PEFRC の使用材料および調査をそれぞれ示す。本実験は数期に分けて実施したため、骨材条件や後述する PEFRC の素材特性が若干異なっているが、PEFRC の使用材料および調査は、既報<sup>14)</sup>で示した曲げ靱性が最大となる材料および調査に準拠して決定した。

### 2.2 PEFRC の素材特性

素材試験用供試体として、圧縮試験には  $\phi 100 \times 200 \text{mm}$  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 14 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 点曲げ載荷による荷重-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会規準 (JCI-SF4)<sup>15)</sup>に準拠し、載荷点変位がスパンの 1/150 (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 の素材特性を表 3 に示す。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、本実験では、PEFRC の曲げタフネスは  $T_b=38.6 \sim 46.3 \text{kN} \cdot \text{mm}$  の範囲に分布していた。

### 2.3 接触爆発試験方法

#### 2.3.1 試験体条件

表 3 には、本実験で検討対象とした試験体の種類を併記している。表 4 に接触爆発試験体の構成要素および構成方法を示す。

本実験で検討対象とした接触爆発試験体は、以下の 6 種類である。

- ① 試験体 A : 厚さ 100mm の単版であり、比較のため作製した。
- ② 試験体 B : 2 枚の PCa 薄板 (厚さ 50mm) を、ポリマーセメントモルタル (以下、PCM) を用いて積層・接着したもの。
- ③ 試験体 C : 2 枚の PCa 薄板 (厚さ 50mm) を、端部にスペーサーを介して積層・接着することにより、中間に中空層 (厚さ 30mm) を設けたもの。
- ④ 試験体 D :  $100 \times 200 \times 600 \text{mm}$  の PCa ブロックを、シースに縦補強筋 (ねじ節異形棒鋼 D10) を挿入した上で、グラウトとして PCM を注入することで 3 体連結したもの。なお、爆発終了後における試験体の一体性を保持させるため、縦補強筋は端部ナット締めによりプレストレスが導入されない程度に PCa ブロック端部と定着させてある。
- ⑤ 試験体 E : 中間に厚さ 50mm の空洞を有する PCa ブロック (外法寸法 :  $150 \times 200 \times 600 \text{mm}$ ) を、シースに縦補強筋 (ねじ節異形棒鋼 D10) を挿入した上で、グラウトとして PCM を注入するこ

とで 3 体連結したもの。なお、縦補強筋端部の定着処理は上記④と同様である。

- ⑥ 試験体 F : 厚さ 100mm の単版の裏面中央に角形鋼管 (STKR400  $\square-100 \times 100 \times 4.5$ ) を取付けたもので、本研究主題とは異なるが、PEFRC を PCa カーテンウォールに適用した場合にその耐爆性能が構造躯体の損傷に及ぼす影響を把握するため実験項目に加えることとした。なお、爆発衝撃による鋼管の脱落を防止するため、鋼管はフック付きボルトを介して内部鉄筋と接続させてある。

ここで、通常のコンクリートブロックの製造においてはその上面が打設面となるが、スラブのような薄い部材であれば繊維補強コンクリート中の短繊維は打設面と平行方向に配向する傾向にあること<sup>16)</sup>を考慮し、本実験ではフェイスシェル側から PEFRC を打設し棒形振動機を用いて締固めた。また、空洞 PCa ブロックの製造にあたり、フレッシュ PEFRC (スランプ 12.0 cm) を空洞下部に密実に充填することが困難であると判断されたため、ここでは断面が L 字型のブロックピースを 2 体作製し、脱型後にエポキシ樹脂系接着剤を用いてその端部を接着することで空洞 PCa ブロックを成形した。なお、各試験体の配筋は表 4 に示す通りであるが、配筋が RC 版の局部破壊に及ぼす影響は小さいことが知られており<sup>5,6)</sup>、ここでは試験体運搬時の割れ防止程度の目的で配筋を決定している。

各構成要素は 14 日間現場湿布養生後、気中養生を経て各種構造版の作製に供した。また、損傷評価を容易にするため、接触爆発試験前に試験体表面に白色塗料を塗布し、爆発面および裏面に間隔 50mm のグリッドを記入した。

#### 2.3.2 接触爆発試験体および爆薬の設置方法

接触爆発試験体および爆薬の設置方法は、図 1 に示す通り既往の研究<sup>4,6)</sup>に準拠し、2 本の木製架台上に内法スパン 510mm となるよ

表 1 PEFRC の使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント 密度 : $3.13 \text{g/cm}^3$		
細骨材	川砂 (試験体 A~C, F) 表乾密度 : $2.63 \text{g/cm}^3$ 吸水率 : 2.81% 最大寸法 : 2.5mm 粗粒率 : 2.10	川砂 (試験体 D) 表乾密度 : $2.63 \text{g/cm}^3$ 吸水率 : 2.69% 最大寸法 : 2.5mm 粗粒率 : 2.58	川砂 (試験体 E) 表乾密度 : $2.57 \text{g/cm}^3$ 吸水率 : 2.69% 最大寸法 : 1.2mm 粗粒率 : 2.10
粗骨材	砕石 6 号 表乾密度 : $2.95 \text{g/cm}^3$ , 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 : $2.89 \text{g/cm}^3$ , 比表面積 : $6140 \text{cm}^2/\text{g}$ 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 : $0.97 \text{g/cm}^3$ , 寸法 : $68 \mu\text{m}$ (直径) $\times 30 \text{mm}$ (長さ), 引張強度 : $1870 \text{N/mm}^2$ , 引張弾性率 : $43 \text{kN/mm}^2$		

表 2 PEFRC の使用割合

$V_f$ (%)	$W/B$ (%)	$Sg/B$ (%)	$s/a$ (%)	$W$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$Sp/B$ (%)
4.0	33	50	65	325	0.5

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

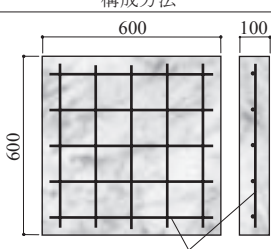
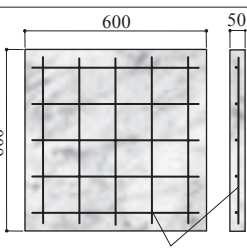
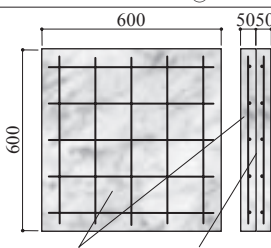
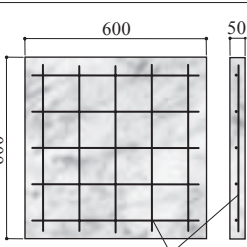
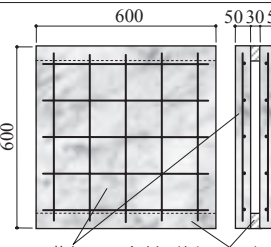
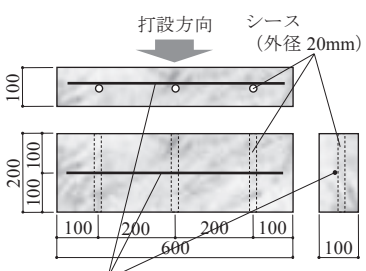
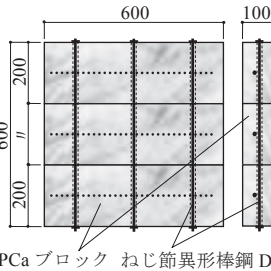
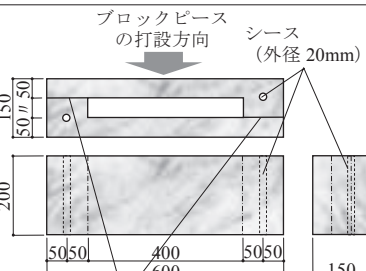
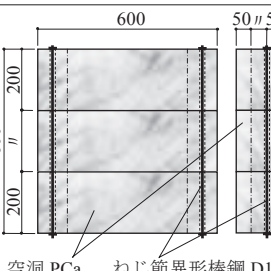
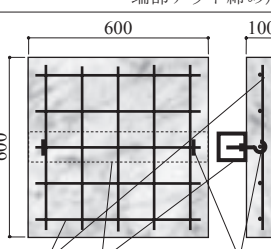
表 3 接触爆発試験体の種類および PEFRC の素材試験結果

記号	試験体の仕様	$T$ (mm)	$W$ (g)	$Slump$ (cm)	$F_c$ ( $\text{N/mm}^2$ )	$E$ ( $\text{kN/mm}^2$ )	$F_b$ ( $\text{N/mm}^2$ )	$T_b$ ( $\text{kN} \cdot \text{mm}$ )	$\bar{\sigma}_b$ ( $\text{N/mm}^2$ )
A	単版	100	200	13.0	59.4	22.3	11.4	46.3	10.4
B	一体型 2 層構造版	100	200	13.0	59.4	22.3	11.4	46.3	10.4
C	絶縁型 2 層構造版 (中空層厚さ : 30mm)	100	200	18.5	59.4	24.3	9.37	38.6	8.69
D	PCa ブロック版	100	200	13.0	59.4	22.3	11.4	46.3	10.4
E	空洞 PCa ブロック版 (空洞厚さ : 50mm)	100	200	12.0	64.3	22.4	10.8	44.8	10.1
F	鋼管付き単版	100	200	13.0	59.4	22.3	11.4	46.3	10.4

注 1)  $T$ : 版厚,  $W$ : 爆薬量,  $F_c$ : 圧縮強度,  $E$ : ヤング係数,  $F_b$ : 曲げ強度,  $T_b$ : 曲げタフネス,  $\bar{\sigma}_b$ : 曲げ靱性係数<sup>17)</sup>

注 2) 試験体 C および E における  $T$  は、中空層や空洞の厚さを除いた PEFRC 実質部の合計版厚を示している。

表4 接触爆発試験体の構成要素および方法

記号	構成要素	構成方法
A		 SD295A D10@120
B	 みがき棒鋼φ5@120	 PCa 薄板 PCMにより接着
C	 みがき棒鋼φ5@120	 PCa 薄板 角材(幅50mm), エポキシ樹脂接着
D	 異形鉄筋 SD295A D10	 PCa ブロック ねじ節異形棒鋼 D10 (PCM 注入の上, 端部ナット締め)
E	 エポキシ樹脂による接着箇所	 空洞 PCa ブロック ねじ節異形棒鋼 D10 (PCM 注入の上, 端部ナット締め)
F		 SD295A STKR400 フック付ボルト D10@120 □-100×100×4.5 (端部ナット締め)

(単位: mm)

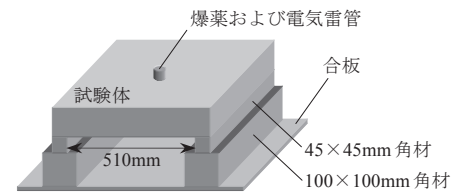
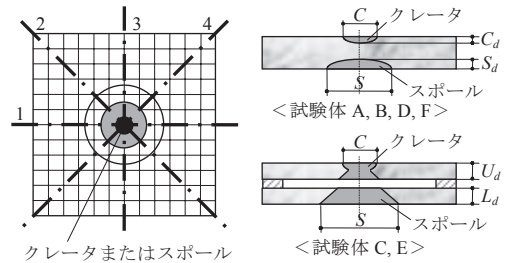


図1 接触爆発試験体および爆薬の設置方法



注) C: クレータ直径, S: スポール直径, Cd: クレータ深さ, Sd: スポール深さ, Ud: 上版損傷深さ, Ld: 下版損傷深さ

図2 損傷寸法の測定方法

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(密度: 1.30g/cm<sup>3</sup>, ペンスリット: 65%, パラフィン系: 35%, 爆轟速度: 6900m/s)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。

### 2.3.3 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可能な浮き部を除去した上で、図2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2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、一体型の試験体A, B, DおよびFに関しては通常のRC単版<sup>4)6)</sup>と同様にクレータおよびスポールの深さにより評価したが、絶縁型の試験体CおよびEに関しては、後述するようにクレータとスポールとの境界が明確でない破壊形態となるため、上下各版の最大損傷深さにより評価した<sup>13)</sup>。最後に、中央に配した鉄筋を避けるため、図2中の直線1(試験体Dに関しては直線3)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を観察した。

## 3. 実験結果

### 3.1 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。

本実験における試験体の裏面側の破壊形式は、① スポール破壊型、② 曲げ破壊型および③ その他に大別されるものと考えられる。以下に、その破壊形式毎に分類して各試験体の破壊性状を説明する。

#### ① スポール破壊型: 試験体A, BおよびD

厚さ100mmの単版である試験体Aでは、裏面の爆発点直下にスポールを伴う顕著な浮きが観察されるものの、スポール片はいずれも飛散には至っておらず、ポリエチレン繊維の架橋作用により版から分離していない状態に

あった。また、裏面には、スポールを起点とした放射状の微細なひび割れの発生が確認される。

これを比較対象として他の2試験体について見ると、一体型2層構造版である試験体Bにおいては、上下のPCa薄板の接着面が剥離し、下版裏面に十字型のひび割れが発生しているものの、下版裏面中央には試験体Aと同様のスポールが生じている。また、一体型のPCaブロック版である試験体Dにおいてもこれらと同様のスポールの発生が確認されるが、本試験体においては、爆発点直下のPCaブロックが隣接するブロックに比して若干大きく撓んでおり、全体的にひび割れ本数が少なくなっている点が他の2試験体と異なっている。

以上の結果より、部材の構成要素および方法が異なる場合においても、空洞等を設けずに一体型とした試験体においては、その破壊形式が単版のそれに類似した「スポール破壊型」となるものと考えられる。

② 曲げ破壊型：試験体CおよびE

絶縁型2層構造版である試験体Cにおいては、上版単味の破壊形式は単版のそれに類似しており、上版裏面のスポール片が中空層内に飛散することで上版に貫通が生じた。一方、下版にはクレータ・スポール等の局部破壊は生じておらず、その裏面に静的曲げひび割れに類似したごく微細な放射状のひび割れが生じた程度である。これは、前報<sup>13)</sup>において示した通り、上版で発生したスポール片が下版上面に2次的な衝撃荷重として作用するためである。空洞PCaブロックを用いて構成した試験体Eでは、ひび割れが爆発点直下の裏面側フェイスシェルだけに集中的に発生しているが、その発生形態が静的曲げ破壊に類似したものとなっている点で試験体Cに類似している。

以上の結果より、爆発面側と裏面側の要素を絶縁することにより、裏面側要素の破壊形式を「スポール破壊型」から「曲げ破壊型」へと変化させ、耐爆性能向上を図ることが可能であるものと考えられる。

③ その他：試験体F

裏面中央に鋼管を設置した試験体Fに関して、単版のみであればスポールが生じるはずの爆発点直下近傍には軽微なひび割れが生じた程度であり、PEFRCの剥離・剥落は一切認められなかった。また、短繊維の架橋作用によりスポールが抑止された場合には、繊維無混入であればスポール破壊面を形成する微細ひび割れが内部に観察されるのが通常であるが<sup>例えは 12)</sup>、本試験体では版内部のひび割れも殆ど観察されていない。なお、鋼管側には、爆発点直下のPEFRC単版との接触箇所に若干の窪み(写真中の点線内)が見られた程度で、目立った損傷は認められなかった。

3.2 部材構成方法の違いが損傷寸法に及ぼす影響

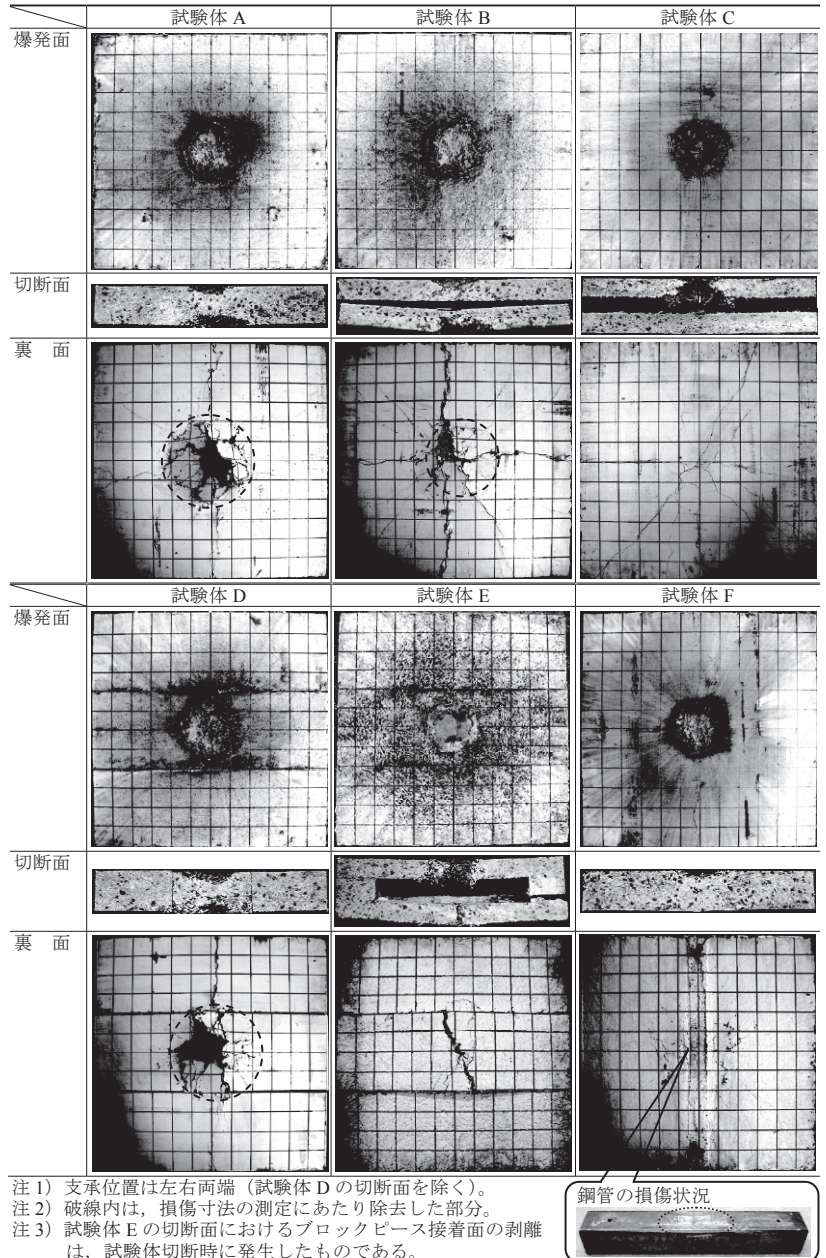
表6に損傷寸法の測定結果を示す。

(1) PCa薄板を用いた場合

図3にPCa薄板を用いた部材構成方法の違いが損傷寸法に及ぼす影響を示す。

クレータ直径に関しては、3試験体間で有意差はほとんど認めら

表5 接触爆発試験体の破壊性状



注1) 支承位置は左右両端(試験体Dの切断面を除く)。  
 注2) 破線内は、損傷寸法の測定にあたり除去した部分。  
 注3) 試験体Eの切断面におけるブロックピース接着面の剥離は、試験体切断時に発生したものである。

表6 損傷寸法の測定結果

	C (mm)	$C_d(U_d^*)$ (mm)	S (mm)	$S_d(L_d^*)$ (mm)	局部破壊モード
試験体A	151	33	189	40	クレータ+スポール
試験体B	139	35	122	29	クレータ+スポール
試験体C	133	50°	0	0°	上版のみ貫通
試験体D	164	38	169	39	クレータ+スポール
試験体E	134	50°	0	0°	爆発面側フェイスシェルのみ貫通
試験体F	132	31	0	0	クレータのみ

れておらず、C=130~150mm程度の範囲にある。また、クレータ深さ(絶縁型2層構造版に関しては、上版損傷深さ)は、単版と一体型2層構造版との間で顕著な差異は認められていないが、絶縁型2層構造版では他に比してやや大きくなっており、これは、上版裏面のスポール片が中空層内に飛散することで上版に貫通が発生していることに対応している。

一方、裏面側の損傷に関して、一体型2層構造版のスポール直径および深さは、総厚が等しい単版に比してわずかに低減される傾向

にあった。これは、前節にて述べた通り、爆発終了時点でPCa薄板間の接着面に剥離が生じていたことから、これにより衝撃エネルギーの一部が解放されたことに起因しているものと推察される。PCa薄板間のより強固な接合方法に関しては今後更なる検討が必要であるが、以上の因子を考慮した場合、一体型2層構造版の損傷程度は総厚が等しい単版と大差ないものと判断される。これに対して、絶縁型2層構造版では、下版に局部破壊は全く生じておらず、表5に示した通り、下版裏面には微細な放射状のひび割れの発生が認められた程度である。即ち、中間に中空層を設けることで、上下版が共働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。

以上の結果より、PCa薄板を用いて耐爆構造部材を構成する際、一体型とした場合には総厚が等しい単版と同等の、また、絶縁型とした場合にはそれ以上のスポール低減効果が得られることが判る。

### (2) PCaブロックまたは空洞PCaブロックを用いた場合

図4に、PCaブロックまたは空洞PCaブロックを用いた部材構成が損傷寸法に及ぼす影響を示す。

空洞を有さないPCaブロックを用いて部材を構成した場合においては、総厚が等しい単版に比してごく若干損傷深さが拡大する傾向にある程度で、概ね同程度の損傷寸法を示していることが判る。一方、空洞PCaブロックを用いた場合においては、PCa薄板の場合と同様に、フェイスシェル間に空洞を設けることで裏面側フェイスシェルの局部破壊が完全に抑止されていることが確認される。

ところで、既報<sup>13)</sup>では、絶縁型2層構造版を対象に、中空層の厚さを増すほどひび割れも含めた下版の損傷が低減されることを示したが、前掲の表5より、試験体E(空洞厚さ:50mm)において試験体C(中空層厚さ:30mm)よりも開口幅の大きなひび割れが観察される。この理由として、上述のように下版のひび割れは上版裏面で発生したスポール片の衝突に起因するものであると考えられるが、試験体Dの場合には爆発点直下に配した空洞PCaブロックの裏面側フェイスシェルのみでそれを負担しているためであると考えられる。被災後の修復性も併せて考慮した場合、ひび割れ等の2次的な損傷も出来る限り軽減されることが望ましいと考えられ、この面で、フェイスシェル部への縦筋の設置も検討する必要がある。また、局部破壊よりも曲げ・せん断等の全体破壊が卓越的となる、比較的遠方での爆発に起因する爆風圧荷重<sup>2,3)</sup>の作用を考慮した場合においても、今後配筋の検討が必要であると考えている。

### (3) 裏面中央に鋼管を設置した場合

図5に、裏面中央への鋼管の設置が損傷寸法に及ぼす影響を示す。クレータの直径および深さに関しては、鋼管の設置によりごく若干低減されている程度であり、両試験体間で顕著な差異は認められない。これに対して、スポールは、鋼管の設置により完全に抑止されていることが判る。

RC版裏面を鋼製ライナー等で補強することの有効性は飛翔体衝突等を対象として既に明らかにされているが<sup>鋼えば 18-21)</sup>、上記のようなスポール低減効果が生じる理由として、コンクリートよりもインピーダンス(密度と応力波速度の積)が大きい鋼材を裏面側に設置することにより、鋼材からコンクリートへと透過する応力波が低減され、スポール破壊の原因である反射波としての引張応力低減に寄与するためであると考えられる。本件に関しては、後述の4.2節に

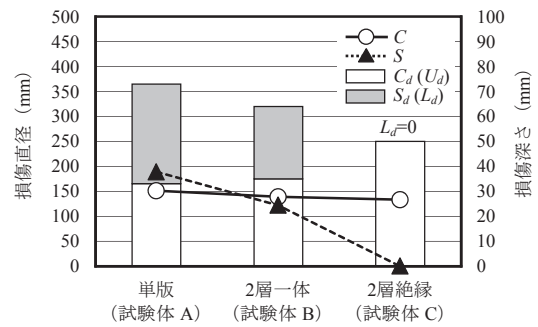


図3 PCa薄板を用いた部材構成方法の違いが損傷寸法に及ぼす影響

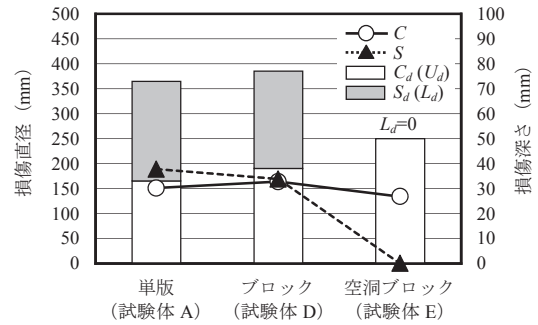


図4 PCaブロックおよび空洞PCaブロックを用いた部材構成が損傷寸法に及ぼす影響

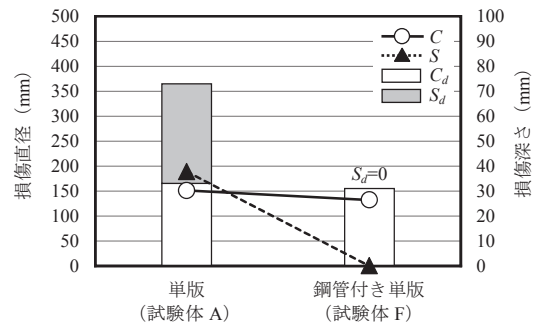


図5 裏面中央への鋼管の設置が損傷寸法に及ぼす影響

において、1次元波動問題を対象とした計算に基づき考察を試みる。

## 4. 実験結果の考察

ここでは、普通RC単版を対象とした既往の損傷評価式による計算結果との比較から、各試験体の耐爆性能に関して若干の考察を試みる(4.1節)。また、本研究の主旨からは若干逸れるが、試験体Fにおいて確認された、裏面中央への鋼管設置によるスポール低減効果について考察することは耐爆設計上意義を有すると思われるため、ここでは1次元波動問題を対象とした応力波の透過および反射に関する計算に基づき考察を加えることとする(4.2節)。

### 4.1 普通RC単版との損傷深さの比較検討

耐爆性能評価においては、特に部材の厚さ方向の損傷程度を評価することが重要となる。そこで、本節では、普通RC単版を対象とした損傷深さ評価式による計算結果と本実験結果との対応性を調べることに、普通RC単版との比較から各種耐爆構造版の耐爆性能を考察する。なお、接触爆発を受ける普通RC版の損傷評価法は、竹田ら<sup>22)</sup>、Lonnqvist<sup>23)</sup>、森下・田中ら<sup>4,6)</sup>により提案されているが、ここでは、他者の実験データとの対応性も考慮した上で比較的近年に提案された、森下・田中らの評価式<sup>4,6)</sup>を用いることとした。

図6および7にクレータ深さ(試験体CおよびEに関しては、上版損傷深さ)および全損傷深さ(クレータ深さとスポール深さの和)。但し、試験体CおよびEに関しては上版損傷深さと下版損傷深さの和)を修正換算コンクリート厚さで整理した結果をそれぞれ示す。なお、修正換算コンクリート厚さ  $T/W_m^{1/3}$  は、森下・田中ら<sup>46)</sup>によって提案されている損傷評価パラメータであり、下式で算出される。

$$\frac{T}{W_m^{1/3}} = \frac{T}{W^{1/3}} \cdot \left( \frac{K_{TNT}}{K} \right)^{1/3} \quad (\text{単位: cm/g}^{1/3}) \quad (1)$$

ここに、 $T$ : 版厚 (cm),  $W_m$ : 爆薬のトリニトロトルエン (TNT) 換算量 (g),  $W$ : 使用爆薬量 (g),  $K_{TNT}$ : TNT の Chapman-Jouguet (C-J) 爆轟エネルギー (MJ/kg),  $K$ : 使用爆薬の C-J 爆轟エネルギー (MJ/kg) である。なお、本実験で使用した爆薬の成分はペンスリットが65%であり、その C-J 爆轟エネルギーは  $K_{PETN}=5.71\text{MJ/kg}$  であるから、 $K=3.71 (=5.71 \times 0.65)$  MJ/kg として  $T/W_m^{1/3}$  を算出した。

また、図6および7には、普通RC単版を対象とした以下の損傷深さ評価式<sup>46)</sup>による計算結果も併記している。

a) クレータ深さ

$$\frac{C_d}{T} = -0.046 \frac{T}{W_m^{1/3}} + 0.42 \quad (2)$$

b) 全損傷深さ

$$\frac{C_d + S_d}{T} = -0.49 \frac{T}{W_m^{1/3}} + 2.0 \quad (2.0 \leq \frac{T}{W_m^{1/3}} \leq 3.6) \quad (3)$$

$$\frac{C_d + S_d}{T} = 1.0 \quad (\frac{T}{W_m^{1/3}} < 2.0) \quad (4)$$

ここに、 $C_d$ : クレータ深さ (cm),  $S_d$ : スポール深さ (cm) である。更に、図6および7中には、本実験と同一調合 ( $V_f=4.0\%$ ,  $W/B=33\%$ ) のPEFRC単版に関する実験データ<sup>11)</sup>も併記している。

本実験で検討対象とした修正換算コンクリート厚さ  $T/W_m^{1/3}=1.76\text{cm/g}^{1/3}$  であれば、普通RC単版の損傷モードは「貫通」であり、無次元クレータ深さ  $C_d/T$  および無次元全損傷深さ  $(C_d+S_d)/T$  の計算値はそれぞれ0.34および1.0となる。これを比較対象とした場合、PEFRCを用いた各種耐爆構造版に関して、以下の考察が得られる。

① PEFRCを単版として用いることにより、繊維の分散状態の変動<sup>24)</sup>に起因するばらつきはあるものの、 $(C_d+S_d)/T$ を普通RC単版よりも21~44%程度低減させることが可能である。また、PCa薄板やPCaブロックを用いて作製した一体型構造版(試験体BおよびD)は、 $T/W_m^{1/3}$ が一定であれば、単版と概ね同等の全損傷深さ低減効果を有することが明らかである。なお、これらPEFRC単版および一体型構造版の  $C_d/T$  は普通RC単版のそれと同程度であり、これは、圧縮応力波に起因するクレータ破壊に対して、短繊維の架橋作用による引張靱性向上が殆ど寄与しないためであると考えられる<sup>11)</sup>。

② 絶縁型構造版(試験体CおよびE)に関して、爆発面側の損傷はPEFRC単版や一体型構造版のそれよりも拡大する傾向にあるが、全損傷深さはそれらよりも更に低減されていることが判る。これは、爆発面側要素と裏面側要素とを絶縁することにより、前者に集中的に損傷が生じるためである。このことから、本手法は爆発面側要素を犠牲要素として有効に機能させ、裏面側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。

③ 裏面中央に鋼管を設置した場合(試験体F)には、クレータ損傷

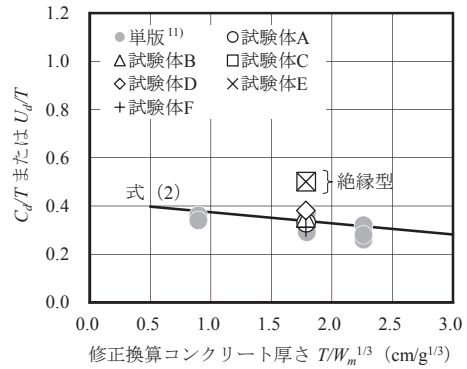


図6 修正換算コンクリート厚さで整理したクレータ深さまたは上版損傷深さ

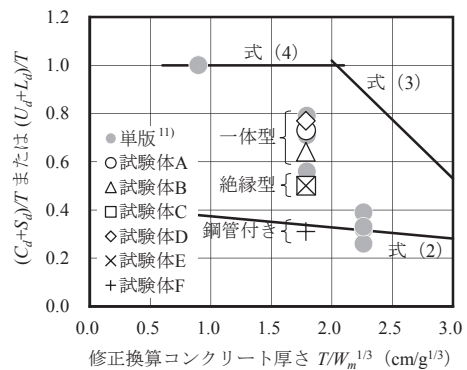


図7 修正換算コンクリート厚さで整理した全損傷深さ

程度は上記①と同程度であるが、PEFRC単版のスポール破壊が内部から抑止されるために、その  $(C_d+S_d)/T$  はクレータ深さ予測式(2)による計算値と概ね良く一致し、他の試験体に比して更に良好な損傷低減効果が得られていることが確認される。

ところで、上記②に関連して、普通RC版を用いた2層或いは3層積層構造の有効性が重錘落下や飛翔体衝突を対象として既に明らかにされており<sup>25-31)</sup>、損傷評価法も併せて提案されているが、荷重の作用機構や速度が大きく異なる爆発問題に対してこれらを用いることは難しい。一方、著者らは、前報<sup>13)</sup>において普通RC2層構造版(中空層厚さ15mm)を対象とした数値シミュレーションを実施し、上版裏面で発生したスポール片が下版に2次飛来物として作用することで下版に貫通を伴うスポール破壊が生じることを明らかにしている(図8参照)。物体の衝突によって生じる衝撃力  $F$  は、衝突体の質量  $m$ 、衝突速度  $V$  および衝突体と被衝突体との接触時間  $\Delta t$  から推定されるが ( $F=mV/\Delta t$ )<sup>32)</sup>、中空層厚さ(即ち、衝突体である上版スポール片の飛翔距離)を15mmから30, 50mmに増加したとしても、これら3因子が大きく変化するとは考え難い(数値解析から得られたスポール片(爆発点直下)の初速度は図8(c)より約745m/sであるが、例えば文献<sup>33)</sup>では、爆発後10ms程度までの間コンクリート片が殆ど減速することなく飛翔する様相が示されている)。従って、本実験で検討対象とした中空層(或いは空洞)厚さ30, 50mmのケースにおいても、普通RC版を用いる限りであれば、下版には貫通を伴うスポールが生じるのが推測される。

PEFRC使用による絶縁型構造版の耐爆性能向上については、その破壊性状の目視観察結果より、①上版裏面でのポリエチレン繊維の引抜け過程におけるスポール片の減速効果と、②下版でのポリエチ

レン繊維の架橋作用によるスポール抑止効果との相互作用に因るものであると考えられる(写真1参照)。これらのメカニズムを定量的に明らかにするとともに、これらを適切に導入した損傷評価式を構築することは、今後の重要な課題となるものと考えている。

#### 4.2 裏面中央への鋼管設置によるスポール低減に関する一考察

裏面中央への鋼管設置によるスポール低減効果に関して、図9に示すモデルを用いて考える<sup>22,32)</sup>。即ち、コンクリート製棒材の先端に鋼製棒材が接合されており、コンクリート製棒材を伝播して不連続面に到達した応力波の一部は反射し、残りは鋼製棒材へと透過する。なお、ここでは説明を簡単にするために、コンクリートはPEFRCではなく通常のコンクリートを想定する。

入射波、反射波、透過波の変位および応力をそれぞれ  $u_i, u_r, u_t$  および  $\sigma_i, \sigma_r, \sigma_t$  とすると、不連続面においては以下の2つの条件を満足する必要がある。

$$\text{力の釣り合い条件} : (\sigma_i + \sigma_r)A_1 = \sigma_t A_2 \quad (5)$$

$$\text{粒子速度の連続条件} : \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_r}{\partial t} = \frac{\partial u_t}{\partial t} \quad (6)$$

入射波および透過波は前進波、反射波は後退波であることを考慮すると、各変位は以下のように表される。

$$\text{入射波による変位} : u_i = f_i(x - c_1 t) \quad (7a)$$

$$\text{反射波による変位} : u_r = f_r(x + c_1 t) \quad (7b)$$

$$\text{透過波による変位} : u_t = f_t(x - c_2 t) \quad (7c)$$

このときの各応力は、

$$\sigma_i = E_1 \varepsilon_i = E_1 \frac{\partial u_i}{\partial x} \quad (8a)$$

$$\sigma_r = E_1 \varepsilon_r = E_1 \frac{\partial u_r}{\partial x} \quad (8b)$$

$$\sigma_t = E_2 \varepsilon_t = E_2 \frac{\partial u_t}{\partial x} \quad (8c)$$

ここで、入射波を対象に、 $\xi = x - c_1 t$  とおいて次の微分を考える。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = \frac{\partial f_i}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial t} = -c_1 \frac{\partial f_i}{\partial \xi} \quad (9)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x} = \frac{\partial f_i}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{\partial f_i}{\partial \xi} \quad (10)$$

式(9)および(10)より、下式が成立する。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -c_1 \frac{\partial u_i}{\partial x} \quad (11a)$$

反射波および透過波についても同様に、

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} = c_1 \frac{\partial u_r}{\partial x} \quad (11b)$$

$$\frac{\partial u_t}{\partial t} = -c_2 \frac{\partial u_t}{\partial x} \quad (11c)$$

粒子速度の連続条件式(6)に式(11)を代入すると、

$$-c_1 \frac{\partial u_i}{\partial x} + c_1 \frac{\partial u_r}{\partial x} = -c_2 \frac{\partial u_t}{\partial x} \quad (12)$$

式(12)に式(8)の関係を考慮すると、下式が導かれる。

$$\sigma_i = \frac{c_1 E_2}{c_2 E_1} (\sigma_i - \sigma_r) \quad (13)$$

式(5)および(13)を用い、 $E_1 = \rho_1 c_1^2$  および  $E_2 = \rho_2 c_2^2$  の関係を考慮すると、入射応力と透過および反射応力との関係が以下のように

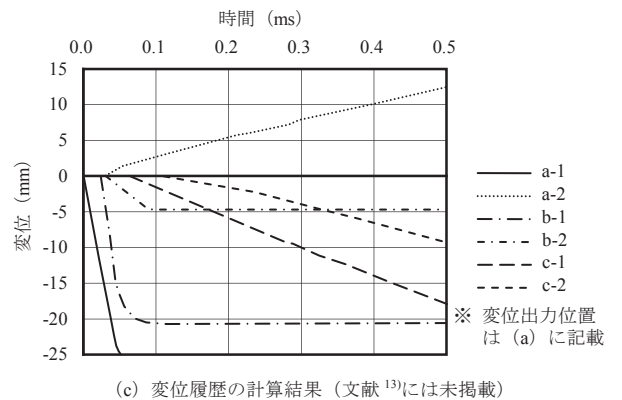
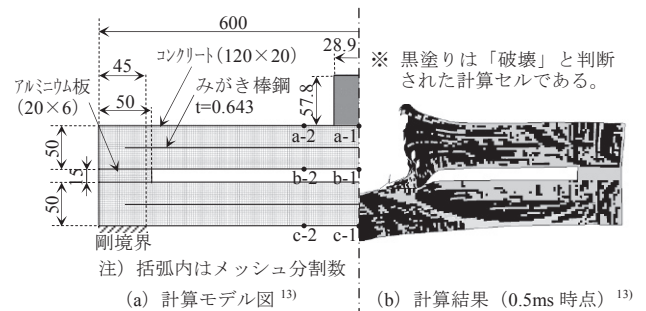


図8 普通RC2層構造版(中空層厚さ15mm)の解析概要  
注1) 解析には汎用衝撃解析コード ANSYS AUTODYN を用いており、解析条件等の詳細は既報<sup>13)</sup>を参照されたい。  
注2) b-1 および b-2 点の変位履歴が途中から一定となっているのは実現象ではなく、計算メッシュが著しく歪んだ結果、数値的エロージョン機能<sup>33)</sup>によって削除されたためである。

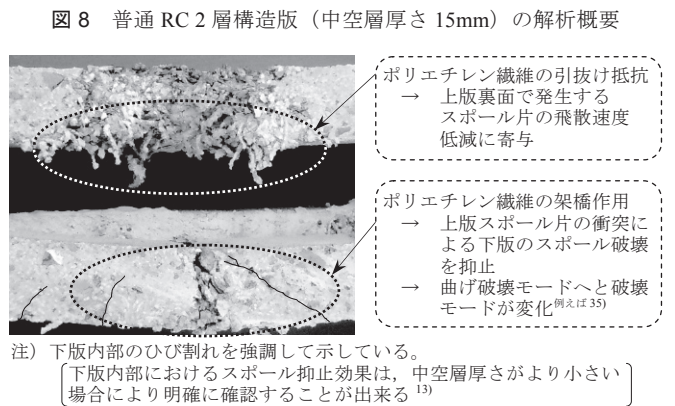


写真1 絶縁型構造版におけるPEFRC使用の効果の定性的考察(試験体Eの例)

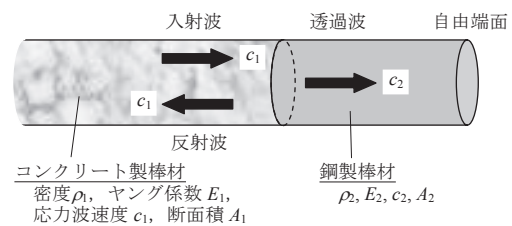


図9 不連続面における応力波の透過および反射のモデル図

導かれる。

$$\sigma_r = \frac{2A_1 \rho_2 c_2}{A_1 \rho_1 c_1 + A_2 \rho_2 c_2} \sigma_i \quad (14a)$$

$$\sigma_r = \frac{A_2 \rho_2 c_2 - A_1 \rho_1 c_1}{A_1 \rho_1 c_1 + A_2 \rho_2 c_2} \sigma_i \quad (14b)$$

ここに、式(14a)および(14b)における $\sigma_i$ の係数は、それぞれ透過率および反射率を表している。各物体のインピーダンス  $z_1 = \rho_1 c_1$

および  $z_2 = \rho_2 c_2$  を導入して式 (14) を書き換えると、

$$\sigma_t = \frac{2A_1 z_2}{A_1 z_1 + A_2 z_2} \sigma_i \quad (15a)$$

$$\sigma_r = \frac{A_2 z_2 - A_1 z_1}{A_1 z_1 + A_2 z_2} \sigma_i \quad (15b)$$

更に、インピーダンス比  $q = z_1/z_2$  および断面積比  $s = A_1/A_2$  を導入すると、式 (15) は以下のように書き換えられる。

$$\sigma_t = \frac{2s}{1+qs} \sigma_i \quad (16a)$$

$$\sigma_r = \frac{1-qs}{1+qs} \sigma_i \quad (16b)$$

以上のように、不連続面における入射波、透過波および反射波の関係は、インピーダンス比  $q$  および断面積比  $s$  で表される透過率および反射率によって決定されると考えられる。

いま、簡単のため  $s = 1$  ( $A_1 = A_2$ )、 $c_1/c_2 = 0.5$  (厳密には 0.65 程度である<sup>32)</sup>)、鋼製棒材の長さ  $\lambda/2$  と仮定し、コンクリート製棒材から不連続面へと入射する圧縮応力波 (強さ  $p$ 、波長  $\lambda$ ) の挙動を表 7 (b) に示している。コンクリートおよび鋼材のインピーダンスはそれぞ

れ  $z_1 = 7.7 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s/m}^3$  ( $\approx 2350 \text{ kg/m}^3 \times 3262 \text{ m/s}$ ) および  $z_2 = 4.0 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{s/m}^3$  ( $\approx 7850 \text{ kg/m}^3 \times 5048 \text{ m/s}$ ) であるから<sup>32)</sup>、 $q = z_1/z_2 \approx 0.2$  であり、式 (16) に示される透過率および反射率はそれぞれ約 5/3 および 2/3 となる。即ち、入射波と比較して、透過波および反射波はそれぞれ約 5/3 および 2/3 倍の振幅を有する圧縮応力波となる。

その後、鋼製棒材の自由端面において逆位相の引張応力波が反射し、鋼材側から不連続面へと入射するが、この際のインピーダンス比は  $q' = z_2/z_1 \approx 5.0$  であり、式 (16) より透過率および反射率はそれぞれ約 1/3 および -2/3 であるから、当初の圧縮応力波と比較して、コンクリート製棒材へは約 5/9 ( $= 5/3 \times 1/3$ ) 倍の引張応力波が透過し、鋼製棒材へは約 10/9 ( $= 5/3 \times 2/3$ ) 倍の圧縮応力波が反射することになる。

一方、表 7 (a) に示す通り、コンクリート製棒材単味の場合においては、入射波である圧縮応力波は自由端面にて位相が反転し、絶対値が等しい引張応力波となって反射する。従って、コンクリートの端部に鋼材を接合することで反射波としての引張応力が低減され、母材であるコンクリートのスポール破壊低減に寄与しているものと考えられる。

表 7 自由端面および不連続面における応力波の透過および反射

時間 $t$	(a) 自由端面 (コンクリート製棒材単味)		(b) 不連続面 (コンクリート製棒材+鋼製棒材)		
	入射波・反射波	合成波	入射波・透過波・反射波	合成波	
0					
$\lambda/(4c_1) = \lambda/(2c_2)$					
$\lambda/(2c_1) = \lambda/c_2$					
$(3\lambda)/(4c_1) = (3\lambda)/(2c_2)$					
$\lambda/c_1 = 2\lambda/c_2$					

注 1)  $\sigma_i$ : 入射波,  $\sigma_t$ : 透過波,  $\sigma_r$ : 反射波

注 2) 引張応力波を正, 圧縮応力波を負として記載している。



## 5. まとめ

本研究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) PEFRCを用いて作製したPCa薄板またはPCaブロックにより一体型の耐爆構造版を構成することで、総厚が等しいPEFRC単版と同等の耐爆性能を維持しながら運搬・取付け等の施工性向上および迅速施工を図れる可能性を示した。
  - 2) PEFRCを用いて作製したPCa薄板または空洞PCaブロックにより絶縁型の耐爆構造版を構成した場合においては、爆発面側の薄板またはフェイスシェルが犠牲要素として有効に機能することで、総厚が等しい単版よりも更に良好な耐爆性能が得られることを示した。また、ポリエチレン繊維の架橋作用に起因する、爆発面側要素裏面におけるスポール片減速効果ならびに裏面側要素におけるスポール抑止効果の相互作用がこれら絶縁型構造版の良好な耐爆性能に寄与していることが推察された。
  - 3) 本実験で検討対象とした版厚(100mm)および爆薬量(200g)では、PEFRC単版の裏面中央に構造躯体を模擬して設置した角形鋼管に顕著な損傷の発生は認められず、鋼管を設置したことによりPEFRC単版自体のスポールが内部から低減される傾向が認められた。また、そのスポール低減機構を、1次元波動問題を対象とした応力波の透過および反射に関する計算に基づき考察した。
- なお、各種耐爆構造版の損傷評価法の構築および提案は、今後の重要な課題となるものと考えている。

## 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端拠点」(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(当時)、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、甲斐定夫技術専門職員、伊東研究室ならびに建築材料・施工研究室の皆様にも多大なご協力を賜りました。東洋紡績(株)、(株)フジコンケミカル、BASF ポゾリス(株)の各社からは実験資材をご提供いただきました。また、本研究の一部は、平成23年度科学研究費補助金基盤研究(C)(課題番号：23560675、研究代表者：村上聖)の助成を受けて行われました。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) 大野友則 編著：基礎からの爆発安全工学—構造物の耐爆設計の基礎—, 森北出版, 2011
- 4) 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.1787-1791, 2000.3
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 大久保一徳ほか4名：C4爆薬の接触・近接爆発によ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) M. Katayama 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, pp.1546-1561, 2007
- 9) 岸徳光ほか3名：爆破荷重を受けるAFRPシート接着されたコンクリート版の弾塑性衝撃応答解析手法の妥当性検討, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.1011-1021, 2008.3
- 10) 別府万寿博ほか3名：接触・近接爆発に対する繊維シート補強コンクリート版の耐爆性能, 土木学会論文集A, 第66巻, 第4号, pp.700-716, 2010.10
- 11) 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
- 12) 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—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73巻, 第631号, pp.1681-1690, 2008.9
- 13) 山口信ほか3名：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—, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.654, pp.1577-1586, 2010.8
- 14) 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
- 15) 日本コンクリート工学会：繊維補強コンクリートの試験方法に関する規準(JCI-SF), 1984
- 16) 小林一輔 著：繊維補強コンクリート—特性と応用—, オーム社, 1981
- 17) 土木学会：コンクリート標準示方書[規準編], 丸善, 2007
- 18) 小暮幹太ほか4名：鋼板で補強されたRC板の耐衝撃性と補強鋼板の等価コンクリート厚の推定, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.1599-1608, 1993.3
- 19) 森川博司ほか5名：飛来物の高速衝突を受ける鋼製ライナー付き鉄筋コンクリート版の耐衝撃性に関する実験と解析, 日本建築学会構造系論文集, 第477号, pp.107-114, 1995.11
- 20) 森川博司：飛来物の高速衝突を受ける鋼製ライナー付き鉄筋コンクリート版の局部損傷評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第502号, pp.105-111, 1997.12
- 21) 丹羽一邦ほか3名：飛翔体に対する鋼板コンクリート版の耐衝撃強度解析, 第8回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.127-130, 2006.11
- 22) 林卓夫ほか1名 編：衝撃工学, 日刊工業新聞社, 1988
- 23) L. Lonnqvist: The effects of high explosives in contact with reinforced concrete slabs, Proceedings of the 6th International Symposium on Interaction of Nonnuclear Munitions with Structures, pp.262-266, 1993
- 24) 山口信ほか3名：高性能AE減水剤添加率および細骨材としての砕砂の使用がポリエチレン繊維補強コンクリートの力学的特性に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.64, pp.464-469, 2011.2
- 25) 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
- 26) 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
- 27) 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
- 28) 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
- 29) 佐藤昌志ほか3名：三層緩衝構造の伝達衝撃力算定法に関する一考察, 第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.279-284, 1996.5
- 30) 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173号, pp.149-158, 1995.7
- 31) T. Shirai et al.: Experiment and numerical simulation of double-layered RC plates under impact loadings, Nuclear Engineering and Design, Vol.176, pp.195-205, 1997
- 32) 石川信隆ほか3名 著：基礎からの衝撃工学—構造物の衝撃設計の基礎—, 森北出版, 2008
- 33) Z. Tu et al.: Evaluation of typical concrete material models used in hydrocodes for high dynamic response simulations, International Journal of Impact Engineering, Vol.36, pp.132-146, 2009
- 34) 矢川元基ほか1名 編：計算力学ハンドブック, 朝倉書店, 2007
- 35) 津田祐介ほか4名：ビ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

(2011年12月9日原稿受理, 2012年4月18日採用決定)