

論文 ポリアリレート繊維シートにより裏面補強した鉄筋コンクリート版の接触爆発に対する耐爆性能

山口 信*1・森島 慎太郎*2・張 志成*3・片山 隆*4

要旨: 既存鉄筋コンクリート (RC) 版を対象とした耐爆補強技術の構築に資するため、衝撃エネルギー吸収性に優れたポリアリレート繊維シート (PAFRP シート) により裏面補強した RC 版の接触爆発に対する耐爆性能について実験的検討を行った。RC 版厚, PAFRP シート積層数および爆薬量が PAFRP シート補強 RC 版の局部破壊に及ぼす影響について検討した結果、同シートが既報の炭素繊維シートと同等の耐爆補強効果 (飛散物の発生抑止効果) を有することが実験的に明らかとなった。また、PAFRP シート補強 RC 版の破壊挙動を把握する上での一助とするため、裏面の変形性状およびシート剥離性状についても考察を加えた。

キーワード: ポリアリレート繊維シート, 鉄筋コンクリート版, 耐爆補強, 接触爆発, 局部破壊

1. はじめに

爆発等に起因する衝撃荷重を政治・経済・運輸・エネルギー等に関する重要構造物の設計において考慮の対象とし、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・近接爆発を受ける鉄筋コンクリート (以下、RC) 版の損傷を考える場合、コンクリート片の飛散による2次被害防止の観点から、反射引張応力波に起因する裏面剥離 (スポール) を抑止することが設計上の重要課題と位置付けられる¹⁾。

既存 RC 版のスポール抑止を目的とした補強方法としては、引張抵抗やエネルギー吸収性に優れた素材による裏面補強が有効になるものと考えられるが、補強作業の迅速化の観点から、重機等を用いることなく手作業により施工可能な補強技術の適用が望まれる。この面で、昨今より、連続繊維シートにより裏面補強したコンクリート板の耐爆性能に関する検討が行われ、その良好な耐爆補強効果が確認されている²⁾。

著者らの1人も、主に炭素繊維シート (以下、CFRP シート) により裏面補強した RC 版を対象に接触爆発試験を実施し、(i) 同方法がスポール片の飛散を完全に抑止できるか、或いはシート破断により無補強の場合と同規模のスポールが生じるかの二者択一の補強方法であることを示すとともに、(ii) シートの破断エネルギーと修正換算コンクリート厚さに基づく CFRP シートの破断条件式を提示している³⁻⁵⁾。但し、鋭利な破断形状を呈する CFRP シートにあつては、シートが破断した場合にその飛散による被害の発生が懸念され、また、隅角部を有する部材等を対象とした補強を想定した場合、よりしなやかな繊維素材の耐爆補強材としての適用が望まれる。

そこで、本研究では、衝撃エネルギー吸収性に優れた素

材として注目されるポリアリレート繊維シート (以下、PAFRP シート)⁶⁾に着目し、これを用いて裏面補強した RC 版の接触爆発に対する耐爆性能について実験的検討を行った。実験パラメータは RC 版厚, PAFRP シート積層数および爆薬量とし、これら因子が PAFRP シート補強 RC 版の損傷に及ぼす影響について考察した。また、PAFRP シート補強 RC 版の破壊挙動を把握する上での一助とするため、裏面の変形性状およびシート剥離性状についても現象論的な考察を加えた。

2. 実験方法

2.1 使用材料

表-1 に使用材料を、写真-1 にポリアリレート繊維シートの外観をそれぞれ示す。本研究で使用したポリアリレート繊維は、ベンゼン環成分とナフタレン環成分とをエステル結合で繋いだポリマーを高温で熔融紡糸することで得られ、パラ系アラミド繊維と同レベルの引張切断強度を有するものである⁶⁾。本実験では、同繊維のストランドを縦横2方向に編み込んだ平織状のシート

表-1 使用材料

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) スランプ値: 16.0cm, 気乾単位体積重量: 21.6kN/m ³ , 圧縮強度: 38.9MPa, ヤング係数: 27.3GPa
連続繊維シート	ポリアリレート繊維シート (平織状) 目付量: 185.3g/m ² (1方向あたり 92.65g/m ²), 公称厚さ: 0.131mm (1方向あたり 0.066mm), 引張強度: 2190MPa, 引張弾性率: 75.0GPa
接着用樹脂	エポキシ樹脂 密度: 1.17g/cm ³ , 混合物粘度: 20000mPa・s 以下, 引張強さ: 30MPa 以上, 曲げ強さ: 40MPa 以上, 引張せん断強さ: 10MPa 以上

注1) コンクリートの圧縮特性は、φ100×200mm 円柱供試体3体を作製し、材齢28日目まで現場湿布養生後、1か月間の気中養生を経て測定した (以上の養生条件は、接触爆発試験体のそれと同様である)

注2) ポリアリレート繊維シートの引張特性は、JIS A 1191「コンクリート補強用連続繊維シート」に準拠して測定した

注3) エポキシ樹脂の物性値はいずれもカタログ値である

*1 熊本大学 大学院先端科学研究部 物質材料科学部門 助教 博(工) (正会員)

*2 熊本大学 大学院自然科学研究科 博士前期課程 建築学専攻 (学生会員)

*3 熊本大学 大学院自然科学研究科 博士前期課程 建築学専攻

*4 (株)クラレ 繊維カンパニー 産資開発部 主管

(1枚あたりの総目付量は $185.3\text{g}/\text{m}^2$) を用いた。なお、コンクリートとしては呼び強度 30 のレディーミクストコンクリートを用い、プライマー、パテおよび接着剤としては全てエポキシ樹脂系のものを用いた。

2.2 試験体

図-1 に接触爆発試験体の形状・寸法および配筋を示す。補強対象である RC 版は 600mm 四方の平板であり、版厚を 80 および 100mm の 2 水準で変化させた。配筋が局部破壊に及ぼす影響は小さいことが既往の研究⁷⁾において明らかにされているが、ここでは版の割れ防止程度の目的で、縦横のピッチ 120mm の格子状鉄筋を版厚中央に配した。補強作業に際しては、28 日間現場湿布養生後、約 14 日間気中養生した RC 版の裏面をディスクグラインダにより研磨し、プライマー塗布およびパテによる不陸調整を経て PAFRP シートを 1 層ずつ積層・接着した。また、裏面の変形状を把握する上での一助とするため、裏面中央から 50 , 100 および 150mm 離れた位置に検長 30mm のひずみゲージを貼付した。

表-2 に試験体一覧を示す。無補強、PAFRP シート積層数 2, 3 層の各ケースについて、(RC 版厚, 爆薬量) の組合せを A: (100mm , 100g), B: (100mm , 200g) および C: (80mm , 200g) の 3 水準で変化させた。ここで、普通 RC 版のスポールおよび貫通限界は、修正換算コンクリート厚さ $T/W_m^{1/3}$ を用いて、以下のように表される⁷⁾。

$$\frac{T}{W_m^{1/3}} = \begin{cases} 3.6\text{cm}/\text{g}^{1/3}; & \text{スポール限界} \\ 2.0\text{cm}/\text{g}^{1/3}; & \text{貫通限界} \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 T : RC 版厚 (cm), W_m : 爆薬のトリニトトルエン (TNT) 等価質量 (= $W \times (K/K_{\text{TNT}})$, g), W : 実際の爆薬量 (g), K : 使用した爆薬の Chapman-Jouguet (C-J) 爆轟エネルギー (= $3.71\text{MJ}/\text{kg}$), K_{TNT} : TNT の C-J 爆轟エネルギー (= $4.29\text{MJ}/\text{kg}$) である。上記 A, B および C の各ケースにおいて、 $T/W_m^{1/3}$ の値はそれぞれ 2.3, 1.8 および $1.4\text{cm}/\text{g}^{1/3}$ である。従って、式(1)と比較した場合、無補強の RC 版であれば、局部破壊モードは A でスポール, B および C で貫通となる。また、上記 C の条件は、既報⁵⁾の CFRP シート補強 RC 版(シートの総目付量は $600\text{g}/\text{m}^2$) におけるシート破断限界に近い条件として採用した。

2.3 接触爆発試験方法

図-2 に接触爆発試験方法を示す。2 本の木製架台上に内法スパンが 510mm となるように試験体を設置し、その表面中央で 6 号電気雷管および発破器を用いて SEP 爆薬を起爆させた。なお、爆薬の形状は直径と高さが等しい円柱形とした。また、図-1 に示した 3 点のひずみ履歴をオシロスコープにより計測するとともに、高速度カメラを用いて裏面の変形状況を側面から撮影した。

2.4 局部破壊寸法の測定方法

試験終了後、図-3 に示す局部破壊寸法を測定した。

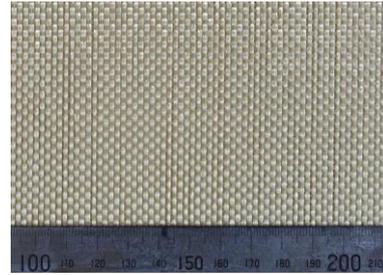


写真-1 ポリアリレート繊維シート（平織状）の外観

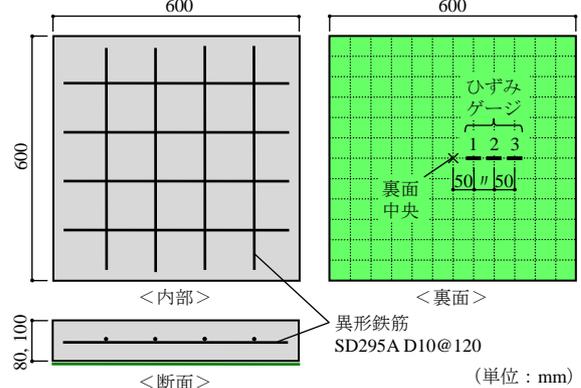


図-1 接触爆発試験体の形状・寸法および配筋

表-2 接触爆発試験体一覧

No.	試験体名	PAFRP シート積層数 (総目付量)	T (mm)	W (g)	$T/W_m^{1/3}$ ($\text{cm}/\text{g}^{1/3}$)
1	N-100-100	0 層 ($0\text{g}/\text{m}^2$)	100	100	2.3
2	PA2-100-100	2 層 ($370.6\text{g}/\text{m}^2$)	100	100	2.3
3	PA3-100-100	3 層 ($555.9\text{g}/\text{m}^2$)	100	100	2.3
4	N-100-200	0 層 ($0\text{g}/\text{m}^2$)	100	200	1.8
5	PA2-100-200	2 層 ($370.6\text{g}/\text{m}^2$)	100	200	1.8
6	PA3-100-200	3 層 ($555.9\text{g}/\text{m}^2$)	100	200	1.8
7	N-80-200	0 層 ($0\text{g}/\text{m}^2$)	80	200	1.4
8	PA2-80-200	2 層 ($370.6\text{g}/\text{m}^2$)	80	200	1.4
9	PA3-80-200	3 層 ($555.9\text{g}/\text{m}^2$)	80	200	1.4

注) T : RC 版厚, W : 爆薬量, $T/W_m^{1/3}$: 修正換算コンクリート厚さ, W_m : 爆薬のトリニトトルエン (TNT) 等価質量

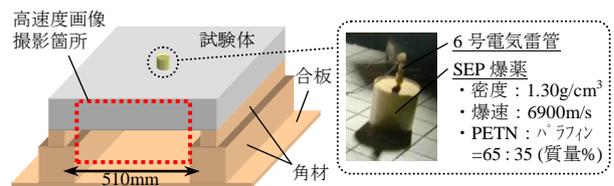


図-2 接触爆発試験方法

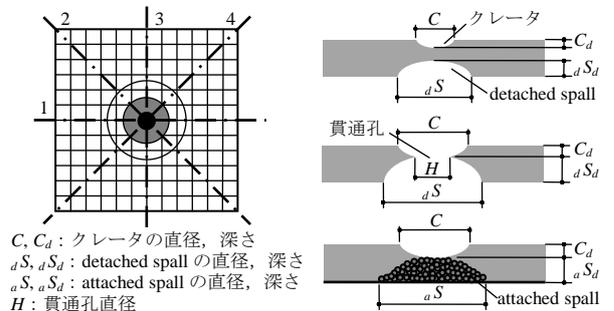


図-3 局部破壊寸法の定義

但し、連続繊維シート補強 RC 版においては、外観上はスポールが抑止された場合であっても RC 版内部に甚大なスポール破壊が生じるため、外観上明らかなスポールを detached spall, RC 版内部に生じ飛散に至っていないスポールを attached spall と称して区別することとした。

2.5 シート剥離の非破壊診断方法

シート剥離は、図-4 に示す剥離診断器を用いて非破壊的に検出した。本器は、ハンマーの打撃による振動音を検出・解析し、剥離状況を青（健全）、黄（剥離の恐れ有）、赤（剥離）の3色ランプで表示するものである。なお、本器は本来モルタルやタイルの剥離診断を目的としたものであるが、連続繊維シートへの付着剥離も精度良く検出可能であることが確認されている³⁾。診断要領としては、試験体裏面に記入した間隔50mmのグリッドの交点に打撃部を当て、その際のランプ表示色を記録した。



図-4 剥離診断器の概要

3. 実験結果および考察

3.1 破壊性状

表-3 に接触爆発試験体の破壊性状を示す。

無補強試験体の局部破壊モードは、(RC 版厚, 爆薬量)の組合せが(100mm, 100g)のケースでスポール, (100mm, 200g)および(80mm, 200g)のケースで貫通となっており, 式(1)と良い対応を示していることが判る。また, 爆発面および裏面ともに局部破壊箇所を起点とする放射状ひび割れの発生が見られるが, 爆発面にはそれらと併せてクレータを取り囲むような円形状のひび割れの発生が認められることから, 局部破壊箇所近傍が局所的に押し出されるように変形していた可能性が考えられる。

PAFRP シート補強試験体に関して, 試験体 PA2-80-200 において爆発点直下近傍で裏面のシートが破断することにより detached spall が生じたが, それ以外の PAFRP シート補強試験体においては, attached spall の発生は認められるもののシートが破断することなく, スポール片の飛散は完全に抑止されていた。また, CFRP シート補強 RC 版 (シートの総目付量 600g/m²) においてシート破断限界となる $T/W_m^{1/3}$ が 1.4cm/g^{1/3} 程度であり⁵⁾, それとほぼ同一条件である試験体 PA3-80-200 でシート破断が抑止されていることを考慮すると, 目付量が同程度であれば, PAFRP シートは CFRP シートと同等の耐爆補強効果を有しているものと判断される。

PAFRP シート補強試験体における爆発面のひび割れ発生状況は無補強の場合と概ね同様であるが, 切断面には爆発点直下の版厚中央付近から支承位置近傍へと至る

表-3 接触爆発試験体の破壊性状

		無補強		PAFRP シート 2 層積層		PAFRP シート 3 層積層	
T=100mm, W=100g	左:爆発面 右:裏面						
	切断面						
T=100mm, W=200g	左:爆発面 右:裏面						
	切断面						
T=80mm, W=200g	左:爆発面 右:裏面						
	切断面	著しい脆弱化のため切断不可能					

注 1) 支承位置は左右両端である

注 2) PAFRP シート補強試験体に関しては, 試験体 PA2-80-200 を除き, シートが膨らんだように変形していた範囲を破線で囲んで示している

注 3) 爆発面および裏面 (PAFRP シート補強試験体にあつては爆発面のみの) のひび割れを強調して示している

注 4) 試験体 PA2-100-200, PA3-100-200 および PA3-80-200 では, 内部に停留していた attached spall 片の多くが試験体切断時に脱落した

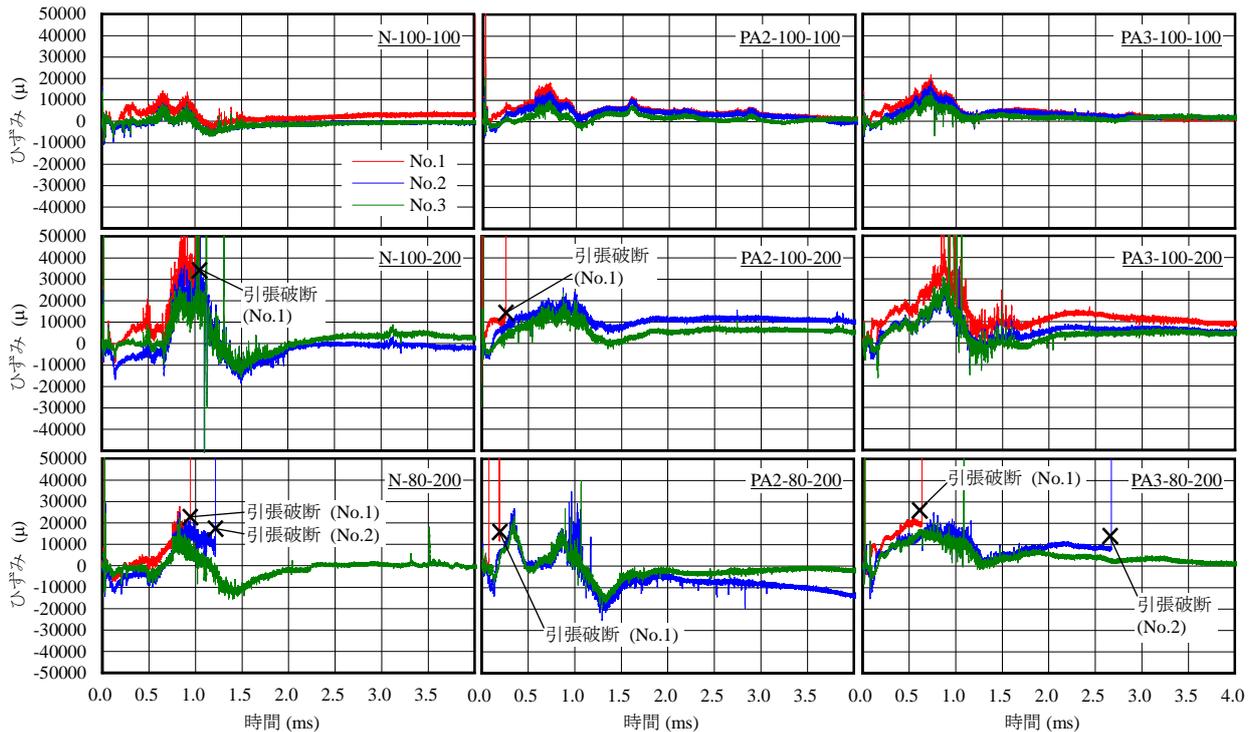


図-5 裏面のひずみ履歴

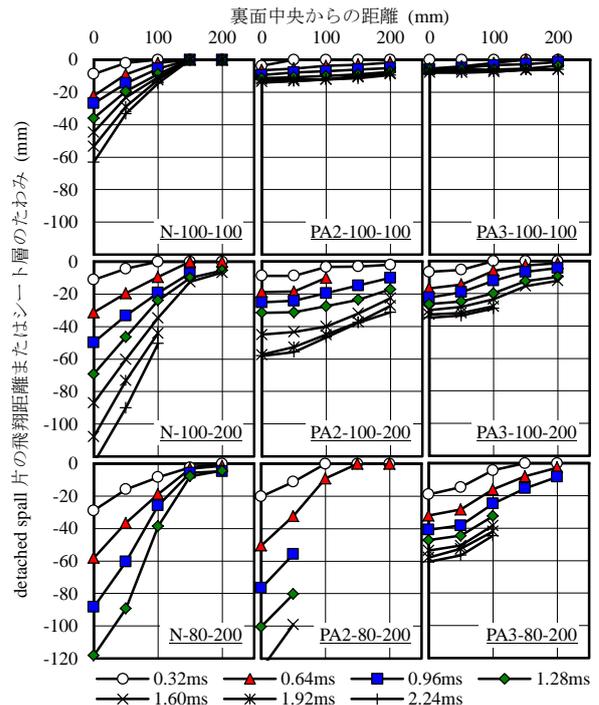
ひび割れの発生が認められ、これらはたわみ変形が生じたシート層にコンクリートが引張られることで生じた可能性が考えられる。なお、裏面補強の有無に関わらず、RC版自体の曲げたわみに類似した全体変形の残留は試験終了時点で殆ど認められなかった。

3.2 裏面の変形性状

図-5 に裏面のひずみ履歴を、図-6 に高速度カメラによる撮影画像より求めた detached spall 片の飛翔履歴またはシート層のたわみ履歴をそれぞれ示す。

無補強試験体のひずみ履歴に着目すると、いずれも起爆から 0.7~1.0ms 前後で引張ひずみがピークを迎えているが、その際のピーク値はいずれも 10000 μ 程度以上と顕著に大きくなっていることから、検長区間内でコンクリートにひび割れが発生し、その開口をひずみゲージが検出していた可能性が考えられる。更に、図-6 中の 0.96ms のデータに着目すると、この時点で検長区間内の detached spall 片の多くは既に飛翔段階にあると考えられることから、飛翔しているコンクリート塊の内部をひび割れが進展することで detached spall 片に細片化が生じていた可能性が推察される。なお、試験体 N-100-100 において、上記時間帯で引張ひずみのピークが 2 度発生しているが、その原因は現時点で明らかでない。

PAFRP シート補強試験体に関して、起爆から 1.0~1.5ms 前後までの間に大きな引張ひずみの増減が繰返されており、この段階で RC 版内部に発生した attached spall 片が裏面の PAFRP シートに捕縛された可能性が考えられる。また、(RC 版厚, 爆薬量)の組合せが(100mm, 100g)



注) データが存在しない箇所は、爆発生成ガスの回り込みによりデータを取得できなかった箇所である

図-6 高速度画像に基づく detached spall 片の飛翔履歴またはシート層のたわみ履歴

および(100mm, 200g)のケースに着目すると、PAFRP シート積層数が多い場合に引張ひずみのピーク値が大きくなる傾向にある。その理由として、図-6 より、シート積層数 2 のケースでは積層数 3 のケースに比してシート層全体にたわみが生じる性状が認められることから、シート積層数が小さくなるほどシート層の曲げ剛性が低減され、シート全体にたわみ変形が生じ易くなった結果と

して attached spall 直下の局所的な引張ひずみが低減された可能性が考えられる。また、シート破断が生じた試験体 PA2-80-200 では、No.2, 3 の位置で 0.35~0.50ms 前後に除荷が生じていることから、この段階で裏面のシートが破断した可能性が推察される。

ところで、図-7 に示す detached spall 片 (爆薬直下) の飛行履歴および飛行速度に着目すると、いずれの試験体においても概ね等速直線的に飛行している様相が認められ、その飛行速度は、無補強試験体では $T/W_m^{1/3}$ の増加に対してほぼ比例的に低下する傾向にある。一方、シート破断が生じた試験体 PA2-80-200 では、 $T/W_m^{1/3}$ が等しい無補強試験体よりも飛行速度が 13% 程度低減されていることから、若干ではあるが、シート層が変形することにより detached spall 片の運動エネルギーを吸収し、飛行速度低減に寄与していた可能性が推察される。

なお、上述の 1.0~1.5ms 前後以降の時間帯は、シートに捕縛された attached spall 片が減速し、シート層に緩やかなたわみ変形が生じる時間帯であると考えられ、図-5 より、RC 版厚が一定であれば、爆薬量が大きいほど、シート積層数が小さいほど、尚且つ裏面中央に近くなるほど引張ひずみが大きくなっていることが確認される。

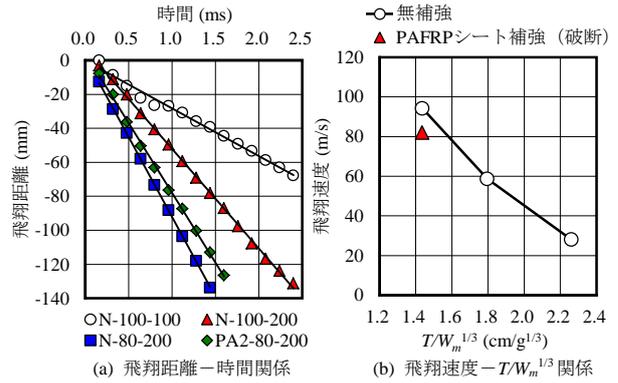
3.3 シート剥離性状

表-4 にシート剥離の非破壊診断結果を示す。表中のシート剥離総面積は、測定点における診断結果を、測定点を中心とする 50mm 四方の範囲の診断結果の代表値と見做して算出した。なお、試験体 PA3-80-200 では全測定点で診断結果が「剥離」となったが、測定範囲より外周の狭い範囲で付着が保持されていたことを確認している。

PAFRP シート積層数に関わらず、RC 版厚 100mm と爆薬量 100g との組合せでは attached spall 領域周辺に殆どシート剥離が生じていないが、RC 版厚 100mm 且つ爆薬量 200g になるとシート剥離が広範囲に進行し、試験体裏面のごく端部のみで付着が保持されている状態にあった。なお、最終的なシート剥離総面積は、シート積層数が大きい場合にごく僅かに大きくなる傾向にある。

RC 版厚 80mm 且つ爆薬量 200g のケースに着目すると、シートが破断していないシート積層数 3 の試験体ではシート剥離総面積が非常に大きくなっているのに対して、シート破断が生じた積層数 2 の試験体では、detached spall 周辺にごく僅かなシート剥離が認められた程度である。また、積層数 3 の試験体において、シート側の付着剥離面にはほぼ全面的にコンクリートが付着している様相が確認されている。

以上の剥離診断結果を総括すると、RC 版内部で生じた attached spall 片が直下のシートを押圧し、その反力がシートを介して attached spall 周辺のコンクリートに作用することで同箇所引張破壊が生じ、これによりシート



※ (a)における回帰式

試験体 ID	回帰式	決定係数
N-100-100	$y = -28.0x - 0.263$	0.990
N-100-200	$y = -58.7x + 6.64$	0.999
N-80-200	$y = -94.2x + 2.00$	1.00
PA2-80-200	$y = -82.0x + 4.03$	0.999

図-7 detached spall 片 (爆薬直下) の飛行履歴および飛行速度

表-4 シート剥離の非破壊診断結果

	PAFRP シート 2 層積層	PAFRP シート 3 層積層
T=100mm, W=100g		
T=100mm, W=200g		
T=80mm, W=200g		

注 1) ●: 健全, ▲: 剥離の恐れ有, ◆: 剥離, sA_d : シート剥離総面積
 注 2) 安全側の評価とするため、「剥離の恐れ有」の診断結果はシート剥離総面積中に含めることとした

剥離が生じていた可能性が推察される。

3.4 局部破壊寸法

図-8 に局部破壊寸法の測定値を示す。同図より、PAFRP シート補強 RC 版の局部破壊の特徴として、以下が挙げられる：(i) PAFRP シートによる裏面補強がクレータに及ぼす影響は小さい。(ii) detached spall が抑止された場合であっても、RC 版内部には無補強の場合の detached spall とほぼ同規模の attached spall が発生する。(iii) 本補強方法は、detached spall 片の飛散を完全に抑止できるか、或いはシート破断により無補強の場合と同等の detached spall が生じるかの二者択一の補強方法である。従って、耐爆補強設計法の構築のためには、PAFRP シートの破断条件を定量化することが重要な課題であると考えられ、本件については今後の検討課題と位置付けたい。

4. まとめ

- (1) 目付量が同程度であれば、PAFRP シートが既報の CFRP シートと同等の耐爆補強効果（飛散物の発生抑止効果）を有することが明らかとなった。
- (2) 無補強の RC 版では、飛翔段階にあるコンクリート塊の内部をひび割れが進展することで detached spall 片の細片化が生じていた可能性が推察された。
- (3) シートが破断していない PAFRP シート補強 RC 版における attached spall 直下のシート層の引張ひずみは、シート積層数が大きい場合ほどピーク値が増大する傾向にあり、その理由として、積層数が大きい場合ほどシート層のたわみ変形が attached spall 直下の局所に限定されるためであることが考えられた。
- (4) 無補強 RC 版における detached spall 片（爆薬直下）の飛翔速度は、 $T/W_m^{1/3}$ の増大に対してほぼ比例的に小さくなる傾向を示した。また、裏面の PAFRP シートが破断した場合であっても、若干ではあるが無補強 RC 版に比して detached spall 片の飛翔速度が低減されることが確認された。
- (5) シート層の付着剥離に関して、RC 版内部で発生した attached spall 片が直下のシート層を押圧し、その反力がシート層を介して attached spall 周辺のコンクリートに加わることで同箇所に引張破壊が生じ、これにより付着剥離に至った可能性が推察された。
- (6) 本補強方法が、detached spall 片の飛散を完全に抑止できるか、或いはシート破断により無補強の場合と同等の detached spall が生じるかの二者択一の補強方法であることが確認された。従って、補強設計法の構築のためには、PAFRP シートの破断限界を定量化することが今後の重要な課題である。

なお、接触爆発を受ける連続繊維シート補強 RC 版の挙動は現時点で十分に明確になっているとは言い難く、

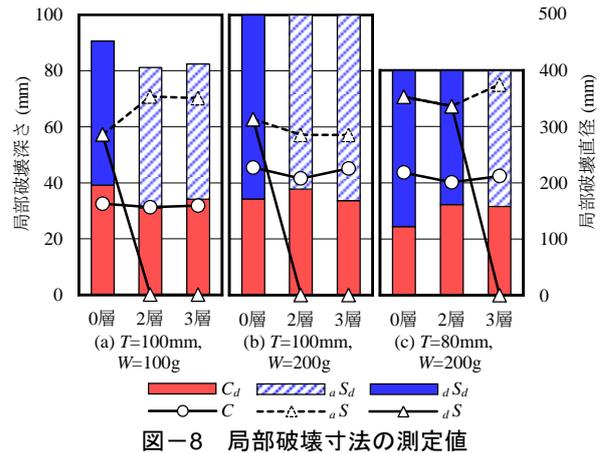


図-8 局部破壊寸法の測定値

シートの付着性状等も含めて今後も検討を継続していく。

謝辞

本研究は、熊本大学パルスパワー科学研究所（研究所長：勝木淳教授）の研究支援の下で実施されたものであり、ご協力いただいた外本和幸教授、田中茂助教、草野健技術補佐員、戸田善統技術専門職員、濱崎ありさ技術職員ならびに Danny Triputra Setiamanah 氏、山口菜摘氏、宮脇晃平氏をはじめとする学生諸氏に謝意を表します。

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) 大久保一徳，別府万寿博，大野友則，佐藤和幸：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) 山口信ほか：連続繊維補強材を用いた鉄筋コンクリート版の耐爆補強に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.77，No.674，pp.637-346，2012.4
- 4) 山口信ほか：補強量の違いが耐爆補強効果に及ぼす影響—連続繊維補強材を用いた鉄筋コンクリート版の耐爆補強に関する実験的研究—，日本建築学会構造系論文集，Vol.79，No.702，pp.1203-1213，2014.8
- 5) 山口信ほか：連続繊維シートの鉄筋コンクリート版に対する耐爆補強効果，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.14，pp.425-432，2014.10
- 6) 片山隆：高強力ポリアリレート繊維「ベクトラン®」の特徴と用途，繊維学会誌，Vol.73，No.11，2017.11
- 7) 森下政浩，田中秀明，安藤啓啓，萩谷浩之：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，Vol.15，No.2，pp.89-98，2004.5