

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

AN EXPERIMENTAL STUDY ON BLAST-RESISTANT STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE SLABS USING CONTINUOUS FIBER REINFORCEMENTS

山口 信*, 村上 聖**, 武田浩二***, 三井宜之****
久部修弘*****, 平居孝之*****

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

In this study, experimental investigations were conducted regarding blast resistance of reinforced concrete (RC) slabs with back surfaces strengthened with continuous fiber reinforcements. The main results obtained are as follows: 1) for preventing spall damage, the reinforcements are required to catch hold of the concrete fragments launched from the inside of the RC slab; 2) strengthening using continuous fibers is an alternative method which can prevent spall damage completely or cannot prevent at all; and 3) the damage of the slabs strengthened with continuous fiber sheets is lightened by increasing both fracture energy of the sheet and the modified-scaled concrete thickness of the slab.

Keywords : Reinforced concrete, Continuous fiber reinforcements, Blast-resistant strengthening, Contact detonation, Local failure
鉄筋コンクリート, 連続繊維補強材, 耐爆補強, 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^{1,2)}。

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、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）を抑止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、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RC版の損傷評価および損傷予測法の開発等に関する研究が実施されている³⁻⁶⁾。

著者ら⁷⁻⁹⁾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版の接触爆発試験を実施し、そのスポール低減効果を明らかにしてきた。ただ、これらの研究は主に新設構造物への耐爆性能付与を目的としたものであり、既存構造物の耐爆性能向上に資する形とはなっていない。現時点で既に建設済みの上記重要構造物が多数存在することを考慮した場合、それらを対象とした耐爆補強工法およびその設計方法を確立することは重要な課題であると考えられる。

ところで、上述のようにスポールがRC版裏面における引張応力波の反射に因るものであるならば、版裏面の引張抵抗力を高めることでその抑止を図れるものと考えられる。また、いつ遭うか判らない突発的な意図的攻撃からの防護を想定した場合、重機等を用いることなく迅速に施工可能な補強方法を適用することが望ましいと考えられ、この面で、耐震補強等において効果が確認されている、連続繊維補強材を用いた裏面補強が有効となる可能性が考えられる。このうち、連続繊維シート（炭素繊維シートおよびアラミド繊維シート）を用いた耐爆補強については別府ら¹⁰⁾により検討が行われ、補強層数や繊維方向を増加させることでRC版の局部破壊（2.1.4項で述べるように、本研究とその定義が異なる点に注意されたい）を低減させることが可能であることや、シート層の引張剛性が大きいほどその効果は顕著であること等が示されている。また、同報では、波動反射理論および押抜きせん断理論を用いて、シート補強による局部破壊低減効果に関して定量的な考察が行われている。

本研究では、既存RC部材を対象とした耐爆補強工法の確立に資するため、連続繊維ロッド・ネットを用いた増厚補強および連続繊維プレート・シートによる接着補強等の裏面補強を施したRC版に関して接触爆発試験を実施し、連続繊維補強材による補強形態の違いに起因するクレータ（爆発面破壊）、スポール、貫通孔等の局部破壊や、爆発面および裏面のひび割れ発生状況等の差異に関して考察

本論で取り扱った実験データの一部は、参考文献8)において既に公表している。

* 熊本大学大学院自然科学研究科
ポスドク研究者・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

***** 三菱樹脂(株)環境資材事業部 工博

***** 日本文理大学工学部建築学科 教授・工博

Postdoctoral Researcher, 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.

Environmental Materials Dept., Mitsubishi Plastics, Inc., Dr. Eng.

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

した（予備実験）。次に、予備実験の結果に基づき、既存 RC 版の耐爆補強の面で有用性が高いと判断された補強工法を対象に、繊維素材および爆薬量の違いがその耐爆補強効果に及ぼす影響について検討した（本実験）。最後に、各種連続繊維補強材の RC 版に対する耐爆補強効果を検証するため、両実験から得られた実験データと普通 RC 版を対象とした損傷予測式³⁻⁵⁾との対応性について調査し、特に繊維破断の有無に着目した損傷モードの差異に関して考察を試みた。

2. 予備実験「補強形態の違いが耐爆性能に及ぼす影響」

2.1 実験方法

2.1.1 使用材料

表 1 に使用材料を示す。母材となる RC 版には、呼び強度 30、指定スランブ 18cm のレディーミクストコンクリートを用いた。連続繊維補強材としては、既存 RC 部材の静的曲げ或いはせん断補強において効果が確認されている炭素繊維強化プラスチックロッド（以下、CFRP ロッド）^{例えば 11)}、ポリエチレン繊維ネット（以下、PEF ネット）^{例えば 12)}、炭素繊維強化プラスチックプレート（以下、CFRP プレート）^{例えば 13)}、ポリエチレン繊維シート（以下、PEF シート）^{例えば 14)} および高強度タイプの炭素繊維シート（以下、HSCF シート）^{例えば 15)} の 5 種類を用いた。これら連続繊維補強材の母材裏面への接着には、エポキシ樹脂系接着剤を用いた。また、CFRP ロッドおよび PEF ネットを用いた増厚補強においては、増厚材として、ポリエチレン短繊維（長さ 18mm）混入により引張靱性を向上させた高靱性ポリマーセメントモルタル（以下、HTPCM）¹¹⁾を用いた。

2.1.2 試験体条件

表 2 に接触爆発試験体の種類とその仕様を示す。予備実験で補強対象とした基準 RC 版は、幅 600mm、長さ 600mm、厚さ 75mm の平板であり、版厚中央に $\phi 5$ みがき棒鋼を縦横のピッチ 120mm で配した。なお、配筋が局部破壊に及ぼす影響は小さいことが森下・田中ら^{4,5)}によって明らかにされており、ここでは試験体運搬時の割れ防止程度の目的で鉄筋量および鉄筋間隔を決定している。基準 RC 版は 28 日間現場湿布養生後、気中養生を経て各種補強に供した。

予備実験で検討対象とした接触爆発試験体をその補強方法により分類すると、以下のようになる。

- ① 無補強試験体：裏面を補強していない基準 RC 版であり、比較の

ため作製した。

- ② CFRP ロッド補強増厚および PEF ネット補強増厚試験体：それぞれ CFRP ロッド（縦横のピッチ 120mm の格子状）および PEF ネットを、基準 RC 版裏面にエポキシ樹脂を用いて接着した後、増厚部の接着性向上のため一度ポリマーセメントモルタルを吹付けた上で HTPPCM による増厚を行ったもの。なお、増厚部の厚さはいずれも 25mm であり、従って、試験体の総厚は各 100 (=75+25)

表 1 使用材料（予備実験）

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） 実測スランブ：17.5cm，実測空気量：3.8%， 圧縮強度：36.0N/mm ² ，ヤング係数：27.2kN/mm ² ， 割裂引張強度：2.78N/mm ²				
鉄筋	$\phi 5$ みがき棒鋼 引張強度：787N/mm ² ，破断伸び：8.6%				
連続繊維補強材	炭素繊維強化プラスチックロッド（CFRP ロッド） 公称断面積：73.3mm ² （D10 相当），溝の深さ：0.25mm， 溝の間隔：10mm，引張強度：2450N/mm ² ， 引張弾性率：147kN/mm ² ※ シングルスパイラル型溝押付け表面加工 ポリエチレン繊維ネット（PEF ネット） 網目寸法：45×45mm，公称断面積：5.15mm ² /本， 引張強さ：4030N/本，引張強度：783N/mm ² 炭素繊維強化プラスチックプレート（CFRP プレート） 質量：364g/m，公称厚さ：4.0mm，幅：50mm， 引張強度：1200N/mm ² ，引張弾性率：450kN/mm ² ポリエチレン繊維シート（PEF シート） 目付量：250g/m ² ，公称厚さ：0.258mm， 引張強度：1850N/mm ² ，引張弾性率：70kN/mm ² 炭素繊維シート（高強度タイプ，HSCF シート） 目付量：300g/m ² ，公称厚さ：0.167mm， 引張強度：3430N/mm ² ，引張弾性率：230kN/mm ²				
接着剤	エポキシ樹脂（無溶媒，2 液型）				
増厚材（HTPCM）	パウダー（P）	白色セメント：硅砂 6 号 = 40：60（質量%）			
	エマルジョン（Em）	ポリアクリル酸エステル：ポリスチレン：水 = 19：13：68（質量%）			
	混和材料	高炉スラグ微粉末（Sg） 密度：2.89g/cm ³ ，比表面積：6140cm ² /g 二水石膏（Gy） 密度：2.34g/cm ³ ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤（Sp）			
	短繊維	ポリエチレン繊維（原糸カットタイプ） 密度：0.97g/cm ³ ，寸法： $\phi 12\mu\text{m} \times 18\text{mm}$ ， 引張強度：2580N/mm ² ，弾性率：73kN/mm ²			
	※ 使用割合				
	V_f (%)	$Em : P : Sg$ (質量比)	Gy/B (%)	Sp/B (%)	Flow (mm)
	1.0	1.0 : 4.0 : 1.5	10	1.0	163

注 1) コンクリートの力学的特性は、圧縮および割裂引張試験用に $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱供試体を各 3 体作製し、28 日間現場湿布養生後、一定期間の気中養生を経て測定したもの（表中の値は平均値）。

注 2) 鉄筋の力学的特性は、試験片 3 体の平均値。

注 3) V_f ：繊維体積率， $B = (C+Sg)$ ：結合材

表 2 接触爆発試験体の種類とその仕様（予備実験）

試験体名	無補強（基準 RC 版）	CFRP ロッド補強増厚	PEF ネット補強増厚	CFRP プレート補強	PEF シート補強	HSCF シート補強
形状・寸法および配筋（単位：mm）						
補強材	—	CFRP ロッド@120mm	PEF ネット	CFRP プレート@120mm	PEF シート 2 層	HSCF シート 2 層
増厚材	—	HTPCM（厚 25mm）	HTPCM（厚 25mm）	—	—	—
T (mm)	75	100 (=75+25)	100 (=75+25)	75	75	75
W (g)	200	200	200	200	200	200

注) T：版厚，W：爆薬量

mm である。

③ CFRP プレート補強試験体：基準 RC 版裏面の爆発点直下に、3 枚の CFRP プレート（ピッチ 120mm）を後述の木製架台と平行方向にエポキシ樹脂を用いて接着したもの。

④ PEF シート補強および HSCF シート補強試験体：それぞれ 2 枚の PEF シートおよび HSCF シートを、その繊維方向が直交するように、エポキシ樹脂を用いて基準 RC 版裏面に積層・接着したもの。

上記②～④における補強作業は、連続繊維補強材の接着性向上のため、基準 RC 版裏面をディスクグラインダーにより研磨した上で実施した。ここで、現時点で良好な耐爆補強効果を有する連続繊維補強材とその補強量等を特定することは必ずしも容易ではないが、ここでは試行的に、静的曲げ或いはせん断補強において効果が確認されている仕様^{例えば 11-15}を参考に決定した。なお、以上の各試験体の爆発面および裏面には、損傷評価を容易にするため補強後所定の養生期間を経て白色塗料を塗布し、間隔 50mm のグリッドを記入した。

2.1.3 接触爆発試験方法

図 1 に接触爆発試験体および爆薬の設置方法を示す。試験体は、既往の研究³⁻⁵に準拠して 2 本の木製架台上に内法スパン 510mm となるように設置した後、試験体上面中央にて電気雷管により爆薬（密度：1.30g/cm³、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 200g 一定とした。

2.1.4 損傷寸法の測定方法

損傷寸法の測定は、手で取り除くことが可能な脆弱部を全て除去した上で実施した。測定項目は、図 2 に示す通り、クレータおよびスポールの直径および深さと、貫通孔が生じた場合にはその直径とした。ここで、別府ら¹⁰は、シート破断が生じていない連続繊維シート補強 RC 版の局部破壊に関して、破壊されたコンクリート片が RC 版から完全に分離した箇所をスポールと定義している（図 2 中の参考図参照）。本研究では、補強材の破断の有無による RC 版の損傷モードの差異を重点的に評価するため、通常の無補強 RC 版の場合³⁻⁵と同様に外観上明らかなスポールの寸法のみを測定対象とすることとし、参考図中の斜めひび割れ等の有無および程度は、内部損傷状況の目視観察に基づく定性的な評価に留めることとした。

測定方法に関して、クレータ、スポールおよび貫通孔の直径は、形状が非対称となるため図 2 中の直線 1-4 に沿って 4 箇所測定し、その平均値とした。また、クレータおよびスポールの深さは、それぞれ爆発面および裏面から、貫通孔が生じなかった場合には局部破壊最深部までの距離、貫通孔が生じた場合には貫通孔断面が最小となる位置までの距離として測定した。最後に、中央に配した鉄筋を避けるため図 2 中の直線 1 から 3cm 離れた平行線に沿って試験体を切断し、試験体内部の損傷状況を観察した。

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 3 に接触爆発試験体の破壊性状を示す。

無補強試験体の場合、極めて大きなクレータおよびスポールが発生し、貫通孔が生じた。また、版の上面から裏面へと貫通するひび割れが多数生じており、その発生形態としては、局部破壊箇所を起点として放射状に発生しているものと、版側面に平行方向に発生しているもの⁵とに分類される。なお、以上のひび割れは以降の全て

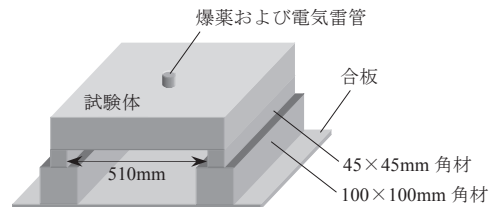


図 1 接触爆発試験体および爆薬の設置方法（両実験共通）

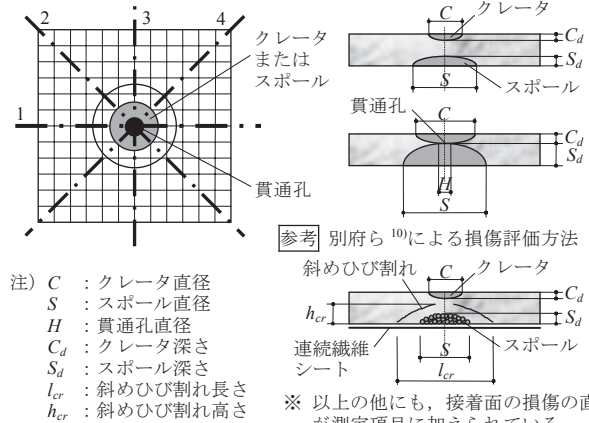


図 2 損傷寸法の測定方法（両実験共通）

の試験体において生じていたが、本試験体と CFRP プレート補強試験体において特に大きく開口しており、版の形状はその内部に配した鉄筋により辛うじて保持されている状態にあった。

CFRP ロッド補強増厚試験体の場合、爆発終了時点で裏面中央に配した CFRP ロッドが繊維方向に裂けるように破断し、その片端が剥落していた。また、版裏面に配した CFRP ロッドに沿うように方形に近い形状のスポールが生じ、貫通孔の発生が認められた。

PEF ネット補強増厚試験体の場合、ほぼ円形の顕著なスポールと貫通孔が生じ、爆発面と裏面に局部破壊箇所を中心とした十字型のひび割れの発生が見られた。ただ、PEF ネット自体の破断は観察されていないことから、スポール片は PEF ネットの間隙を通過して飛散に至ったことが予想される。

CFRP プレート補強試験体の場合、裏面中央に接着した CFRP プレートが爆発点直下にて破断・剥落し、その周囲の 2 枚のプレートも爆発終了時点で剥落していた。剥落したプレートを観察したところ、スポール破壊箇所直下のプレート接着面には多量のコンクリートが付着していたことから、内部コンクリートの破壊が母材-補強材界面の付着剥離に先行して生じ、その飛散圧により中央のプレートが破断に至ったことが予想される。また、上述のように比較的開口幅が大きいひび割れが観察されたが、これは、裏面に接着したプレートが爆発荷重により全て剥落したために、それ以降のクラックアレスターとしての機能が内部鉄筋のみに転嫁されたためであると推察される。

PEF シート補強および HSCF シート補強試験体に関しては、爆発面にはクレータと微細な放射状および版側面に平行なひび割れが見られた程度であるが、裏面において爆発点直下を起点としてシートが破断し、その破断口からコンクリート片の剥落が見られた。また、CFRP プレート補強の場合と同様に、スポール破壊箇所直下のシート接着面には多量のコンクリートが付着している様相が観察された。ところで、別府ら¹⁰が指摘している斜めひび割れに関して、予備

実験では PEF シート補強および HSCF シート補強試験体においてその発生が認められ、中心線から 3cm 離れた切断面における結果ではあるが、斜めひび割れ長さ（図 2 参照）は前者で約 380mm、後者で約 360mm であった。但し、両試験体ともに貫通が生じたため、斜めひび割れ天端位置は明確でない。なお、シートの引張剛性 E_t (E : シートの弾性率, t : シートの厚さ) は、PEF シートで 18.1kN/mm, HSCF シートで 38.4kN/mm であるから、シートの引張剛性が増加するほど斜めひび割れ領域が縮小する傾向にあるとする別府ら¹⁰⁾の知見と一致している。

2.2.2 損傷寸法の測定結果

表 4 に損傷寸法の測定結果を示す。爆薬量 200g、基準 RC 版厚 75mm とやや厳しい条件設定であったため、全ての連続繊維補強 RC 版において貫通孔の発生が見られ、損傷程度は無補強試験体と同程度となった。但し、繊維破断の有無に基づきこれらの破壊性状を定性的に考察した場合、以下の 3 タイプに分類できると考えられた。

- ① 補強材の破断によりスポール片が飛散に至ったもの：PEF シート補強および HSCF シート補強試験体
- ② 補強材の間隙をスポール片が通過して飛散に至ったもの：PEF ネット補強増厚試験体
- ③ ①および②の複合によりスポール片が飛散に至ったもの：CFRP ロッド補強増厚および CFRP プレート補強試験体

以上の考察に基づいた場合、連続繊維を用いて外観上明らかなスポールを抑止するためには、版内部で破砕されたコンクリート片の飛散を捕縛可能な裏面補強形態を適用することが重要であるものと推察される。このことを考慮すると、連続繊維補強材が RC 版裏面に全面的に密着する①のタイプは、補強材の破断を抑止することができれば、②および③のタイプに比して、既存 RC 版の耐爆補強の面で有用な工法となる可能性があると考えられる。また、②および③のタイプに関しても、補強材をより密に配することで、より良好な耐爆補強効果が得られる可能性があると考えられる。

そこで、次章の本実験においては、上記①のタイプに属する連続繊維シート補強 RC 版を主な検討対象とし、繊維素材や爆薬量とその耐爆性能に及ぼす影響について検討を行うこととした。なお、表 4 に示す損傷寸法の測定結果については、後掲の本実験の結果と併せて、第 4 章にて、普通 RC 版を対象とした損傷予測式³⁻⁵⁾との対応性について検証を試みる。

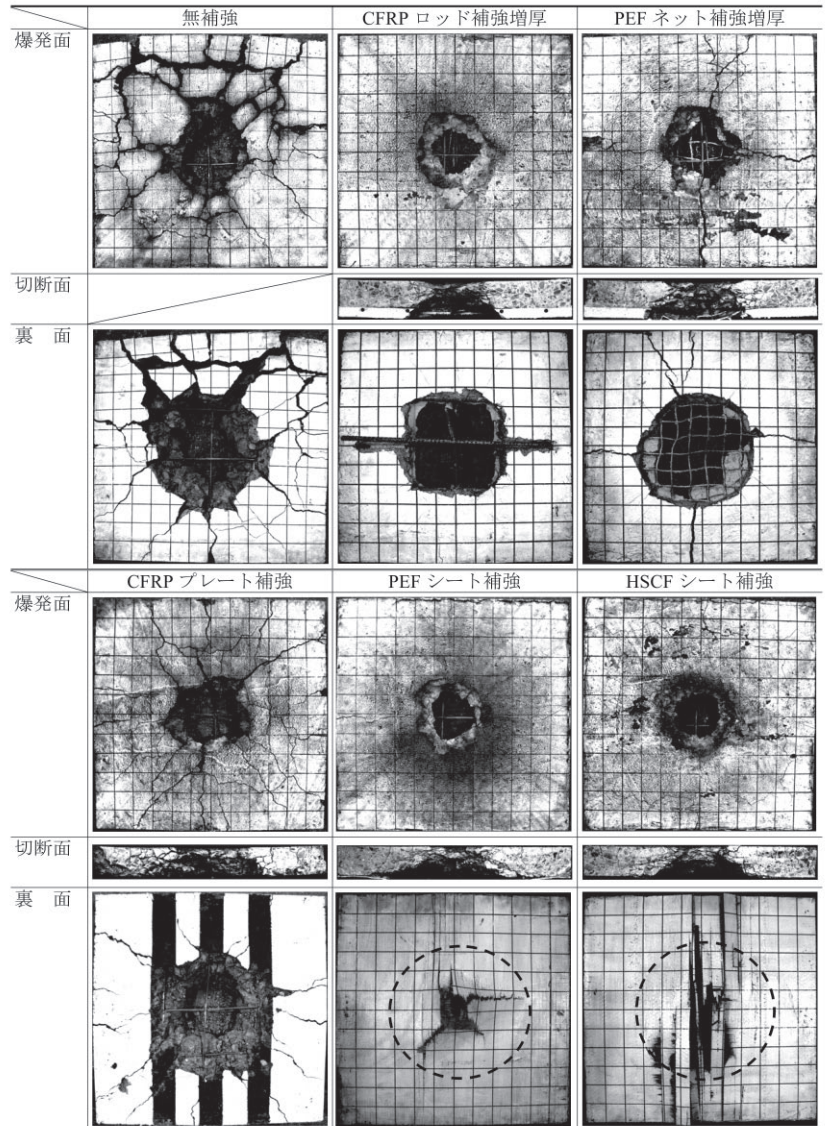
3. 本実験「繊維素材および爆薬量の違いが連続繊維シート補強 RC 版の耐爆性能に及ぼす影響」

3.1 実験方法

3.1.1 使用材料

表 5 に使用材料を示す。本実験は 2 期に分けて実施したため、使用したコンクリートおよび鉄筋の素材特性が若干異なっているが、

表 3 接触爆発試験体の破壊性状（予備実験）



注 1) 支承位置は左右両端。 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) 無補強試験体は脆弱化が著しく、コンクリートカッターによる切断が困難であると判断された。

表 4 損傷寸法の測定結果（予備実験）

	$T/W_m^{1/3}$ (cm/g ^{1/3})	C (mm)	C_d (mm)	S (mm)	S_d (mm)	H (mm)	補強材の破壊挙動
無補強	1.35	232	23	343	52	165	—
CFRP ロッド補強増厚	1.79	198	25	287	75	107	中央のロッドのみ破断
PEF ネット補強増厚	1.79	216	35	307	65	133	破断なし
CFRP プレート補強	1.35	205	15	323	60	147	中央のプレートのみ破断
PEF シート補強	1.35	174	21	316	54	112	シート破断
HSCF シート補強	1.35	188	12	269	63	113	シート破断

注) 修正換算コンクリート厚さ $T/W_m^{1/3}$ は、後掲の式 (5) により算出。

実験 A, B のいずれにおいてもコンクリートには呼び強度 30、指定スランブ 18cm のレディーミクストコンクリートを、鉄筋には異形鉄筋 SD295A D10 をそれぞれ用いた。補強用の連続繊維シートとしては、予備実験でも使用した PEF シートおよび HSCF シートと併せて、高弾性タイプの炭素繊維シート（以下、HECF シート）を用いた。また、予備実験の考察に基づき、PEF ネットよりも補強材間隔が密なポリエチレン繊維メッシュ（以下、PEF メッシュ）についても併せて検討を行った。接着剤に関して、PEF メッシュの積層にはポリマーセメントモルタル、PEF シート、HSCF シートおよび HECF シートの貼付にはエポキシ樹脂系接着剤をそれぞれ用いた。

3.1.2 試験体条件

図3に基準RC版(無補強試験体)の形状・寸法および配筋,表6に検討対象とした接触爆発試験体の種類をそれぞれ示す。予備実験の試験条件(爆薬量200g,基準RC版厚75mmおよびシート2層貼付)がやや厳しいと考えられたため,本実験では,シート補強層数は変えずに基準RC版厚を100mmに増加し,爆薬量を100および200gの2水準で変化させた。なお,基準RC版の幅および長さは予備実験と同様に各600mmとし,版厚中央に異形鉄筋SD295A D10を縦横のピッチ120mmにて配した。以上の基準RC版を28日間現場湿布養生後,気中養生を経て各種補強に供した。

各試験体の表面には,補強後所定の養生期間を経て白色塗料を塗布し,爆発面および裏面に間隔50mmのグリッドを記入した。

3.1.3 接触爆発試験方法

接触爆発試験は,予備実験と同様の方法により行った(2.1.3項参照)。但し,上述のように,本実験では爆薬量を100および200gの2水準で変化させている点で予備実験と異なっている。

3.1.4 シート剥離の非破壊診断方法

接触爆発試験の結果,連続繊維シート補強試験体においてシート剥離の傾向が認められたため,剥離診断器¹⁶⁾を用いてシート剥離の非破壊診断を実施した。使用した剥離診断器の仕様を表7,本器打撃部の外観および本器による剥離診断状況を写真1にそれぞれ示す。

本器は,ハンマーの打撃による振動音をマイクロフォンで検出・解析することにより,剥離状況を青(剥離なし),黄(剥離の恐れ有)

表5 使用材料(本実験)

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) (実験A) 実測スランプ:17.5cm, 実測空気量:3.9%, 圧縮強度:41.6N/mm ² , ヤング係数:31.9kN/mm ² , 割裂引張強度:3.48N/mm ² (実験B) 実測スランプ:17.5cm, 実測空気量:5.5%, 圧縮強度:37.9N/mm ² , ヤング係数:27.3kN/mm ² , 割裂引張強度:2.30N/mm ²
鉄筋	SD295A D10 (実験A) 降伏強度:363N/mm ² , 引張強度:512N/mm ² , 破断伸び:25.1% (実験B) 降伏強度:370N/mm ² , 引張強度:520N/mm ² , 破断伸び:35.8%
連続繊維補強材	ポリエチレン繊維メッシュ(PEF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 ポリエチレン繊維シート(PEFシート) 目付量:250g/m ² , 公称厚さ:0.258mm, 引張強度:1850N/mm ² , 引張弾性率:70kN/mm ² 炭素繊維シート(高強度タイプ, HSCFシート) 目付量:300g/m ² , 公称厚さ:0.167mm, 引張強度:3430N/mm ² , 引張弾性率:230kN/mm ² 炭素繊維シート(高弾性タイプ, HECFシート) 目付量:300g/m ² , 公称厚さ:0.152mm, 引張強度:1940N/mm ² , 引張弾性率:704kN/mm ²
接着剤	エポキシ樹脂(無溶媒, 2液型) ポリマーセメントモルタル P:Em=3.5:1.0(質量比) ※パウダー(P)とエマルジョン(Em)の仕様は表1参照

注)コンクリートおよび鉄筋の力学的特性の測定要領は表1参照。

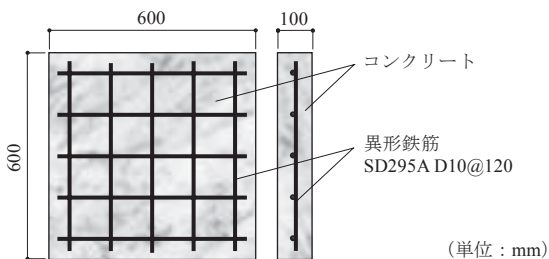


図3 基準RC版の形状・寸法および配筋(本実験)

および赤(完全に剥離)の3色ランプで表示するものである。なお,表7中に示す通り,本器は本来タイルやモルタルの剥離診断を目的としたもので,シートへの適用性は未知であるが,ここでは試行的に,弾性塗装を許容するタイルの仕様により診断を実施した。診断要領としては,試験体裏面に記入したグリッドの交点に打撃部を当て,その時のランプ表示色を記録した。また,以上の非破壊診断法の適用妥当性を調べるため,試験体切断面におけるシート剥離状況の目視観察結果と非破壊診断結果との対応性を調査した。

3.1.5 損傷寸法の測定方法

損傷寸法は,予備実験と同様の方法により測定した(2.1.4項参照)。

3.2 実験結果および考察

3.2.1 接触爆発試験体の破壊性状

表8に接触爆発試験体の破壊性状を示す。

(1) 爆薬量100gの場合

爆発面の損傷状況に関しては,5試験体全てにおいて爆発点近傍のコンクリートが破砕され,ほぼ碗型のクレータを生じた。しかし,その規模に試験体間で顕著な差異は認められない。ひび割れ発生状況に関しても,クレータを中心とした微細な放射状のひび割れが見られる程度で,試験体間で有意な差異は認められなかった。

裏面および切断面の損傷状況に関しては,試験体間で明らかな差異が認められ,その特徴を分類して説明すると,以下ようになる。

① 無補強試験体:裏面中央に顕著なスポールを生じ,中央に配した鉄筋の露出が観察される。また,裏面にはスポールを起点とした

表6 接触爆発試験体の種類(本実験)

試験体名	実験	試験体の仕様	T (mm)	W (g)
無補強	A	補強していない基準RC版であり,比較のため作製した。	100	100 200
PEFメッシュ補強	A	2枚(格子目と菱目)のPEFメッシュを,ポリマーセメントモルタルを用いて基準RC版裏面に積層・接着したものの。	111	100 200
PEFシート補強	B	2枚のPEFシートを,繊維方向のなす角度が90°となるように基準RC版裏面に積層・接着したものの。	100	100 200
HSCFシート補強	B	2枚のHSCFシートを,繊維方向のなす角度が90°となるように基準RC版裏面に積層・接着したものの。	100	100 200
HECFシート補強	B	2枚のHECFシートを,繊維方向のなす角度が90°となるように基準RC版裏面に積層・接着したものの。	100	100 200

注)PEFメッシュ補強試験体の版厚の内訳は,基準RC版厚100mm+ポリマーセメントモルタルの塗布厚11mm。

表7 剥離診断器の仕様(本実験)

適用条件	タイル:厚さ30mm以内 モルタル:鏝仕上げ,弾性塗装のない壁面 ※いずれも下地はRC構造とする。			
検出深度	40mm以内			
診断目安	3色ランプ(LED)表示			
	表示色	青	黄	赤
	目安	剥離なし	剥離の恐れ有	完全に剥離
使用環境	温度:0~40℃, 相対湿度:85%以下			

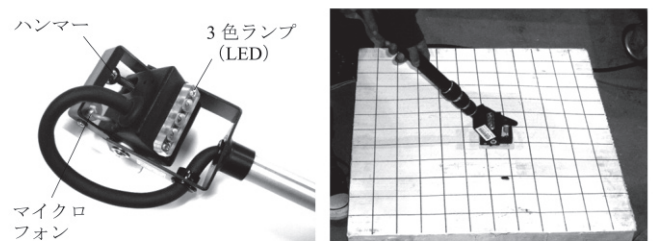


写真1 剥離診断器打撃部の外観および剥離診断状況(本実験)

表 8 接触爆発試験体の破壊性状 (本実験)

		無補強	PEF メッシュ補強	PEF シート補強	HSCF シート補強	HECF シート補強
爆薬量 100g	爆発面					
	切断面					
	裏面					
爆薬量 200g	爆発面					
	切断面					
	裏面					

注 1) 支承位置は左右両端。 注 2) 破線内は、損傷寸法の測定にあたり除去した部分。

放射状のひび割れが、切断面にはスポール破壊面に沿う微細なひび割れ⁹⁾が多数生じているのが確認される。

- ② PEF メッシュ補強, PEF シート補強および HSCF シート補強試験体：外観上スポールは完全に抑止された状態にあったものの、切断面を見ると、裏面の爆発点直下近傍を中心とした同心円状のひび割れが複数生じている様相が認められ、その発生範囲は①のスポールの規模と概ね良く一致している。また、裏面には、PEF メッシュ補強試験体においては爆発点直下を中心とした円形のひび割れが、シート補強試験体においては円形の浮き部がそれぞれ観察され、これは、内部で発生したコンクリート片の飛散を裏面の補強材が捕縛したことで生じたものであると推察される。なお、3 試験体全てにおいて、母材-補強材界面の剥離は見られなかった。
- ③ HECF シート補強試験体：爆発点直下を起点として裏面のシートが十字型に破断し、スポールの発生が見られた。スポール片に関して、その大部分は質量 20g 以下と非常に細かく破砕されていたが、その中に質量 200g 程度の比較的大きなスポール片が 1 つだけ観察された。これは、切断面に斜めひび割れ¹⁰⁾の発生が確認されていないことから、シート破断時に斜めひび割れより下部が脱落

することで発生したものであることが予想される。なお、本試験体においても、母材-補強材界面の剥離は認められていない。

(2) 爆薬量 200g の場合

爆発面の損傷状況に関して、クレータの規模はいずれの試験体においても爆薬量 100g の場合に比して拡大しているが、爆薬量 100g の場合と同様に、その規模および形状に試験体間で顕著な差異は認められていない。

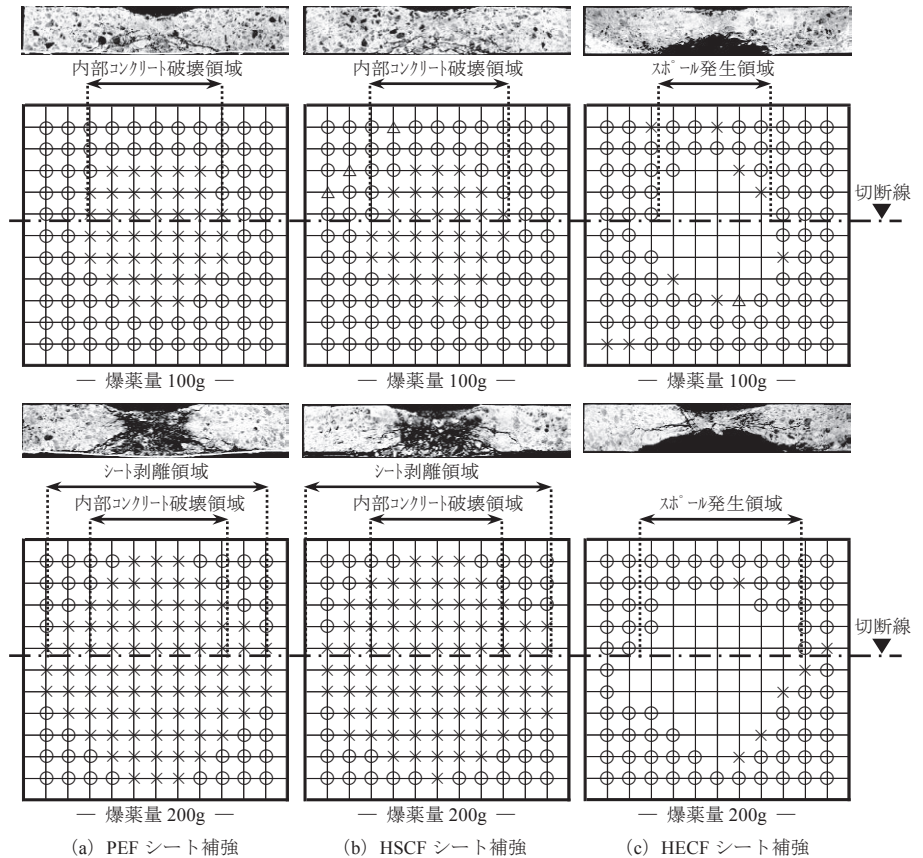
裏面および切断面の損傷状況に関しては、以下のような傾向が認められる。

- ① 無補強試験体：スポールの規模は爆薬量 100g の場合に比して顕著に拡大しており、裏面には、版側面に至る開口幅の大きな放射状ひび割れの発生が見られる。また、切断面全域にわたってひび割れの発生が認められ、中央に配した鉄筋が緩やかに湾曲している様相が観察される。
- ② PEF メッシュ補強試験体：PEF メッシュの破断により、裏面の爆発点直下に噴火口に類似した剥離を生じ、メッシュ破断口から質量 20g に満たない細かなコンクリート片の剥落が多量に観察された。また、その破断口を起点とした放射状のひび割れの発生が確

認される。

③ PEF シート補強および HSCF シート補強試験体：スポールは外観上完全に抑止されたものの、裏面には、爆発点直下を中心とした円形の浮き部が観察され、その規模は爆薬量 100g の場合よりも大きく、一部で版側面付近にまで及んでいた。また、裏面側の爆発点直下近傍において内部コンクリートが破壊されている様相が観察されるが、その程度は爆薬量 100g の場合に比して顕著であり、同箇所のコンクリート片が裏面のシートを押圧し、これにより、母材-補強材界面に剥離が生じている様相が観察された。

④ HECF シート補強試験体：爆発点直下を起点とした十字型のシート破断が見られるが、その規模は爆薬量 100g の場合に比して顕著に拡大しており、一部で版側面にまで及んでいる。また、内部には、その延長が版側面近傍にまで至る顕著な斜めひび割れが生じている。なお、本爆薬量においても、シート破断により発生したスポール片の大部分は 20g 以下と非常に細かく破砕されていた。



注) ○：剥離なし，△：剥離の恐れ有，×：完全に剥離，空白：スポール発生による測定不能

図 4 シート剥離の非破壊診断結果（本実験）

3.2.2 シート剥離の非破壊診断結果

図 4 にシート剥離の非破壊診断結果を、

試験体切断面の目視観察結果と対比させて示す。

爆薬量 100g の PEF シート補強および HSCF シート補強試験体において、切断面にシート剥離が観察されていないにも関わらず「完全に剥離」と診断された箇所が存在しているが、これは図中に示す通り、剥離診断器が内部コンクリートの破壊箇所を検出しているためである。このことを併せて考慮すると、本非破壊診断法は、接触爆発による内部損傷領域（シート剥離領域と内部コンクリート破壊領域とを併せた領域）の検出方法として十分に適用することが可能であると考えられる。

ここで、スポールが抑止された PEF シート補強および HSCF シート補強試験体に着目すると、爆薬量 100g の場合には内部コンクリートの破壊、爆薬量 200g の場合にはシート剥離によってそれぞれ内部損傷領域の規模が決定されていることが判る。このことから、シート剥離は内部コンクリート片の飛散圧が大きい場合に顕著になる損傷形態であることが推察される。なお、爆薬量 200g の場合には、両試験体ともにシート剥離が非常に広範囲に及んでおり、コンクリートとの接着が保持されているのは、版側面近傍のごく僅かな部分のみであることが判る。

ところで、スポールを生じた HECF シート補強試験体の場合、目視観察および非破壊診断のいずれにおいてもスポール近傍のシート剥離はほとんど認められなかった。このことから、シート剥離は、シート層の引張剛性或いはスポール発生の有無等によっても影響される可能性が考えられる。データ数が少ないため本実験の範囲内で明確なことは言い難いが、これについては、今後更なる実験データ

表 9 損傷寸法の測定結果（本実験）

	W (g)	$T/W_m^{1/3}$ (cm/g ^{1/3})	C (mm)	C_d (mm)	S (mm)	S_d (mm)	補強材の破壊挙動
無補強	100	2.26	161	34	277	48	—
	200	1.79	194	39	304	61	—
PEF メッシュ補強	100	2.51	154	30	0	0	破断せず
	200	1.99	214	44	278	67	破断
PEF シート補強	100	2.26	153	35	0	0	破断せず
	200	1.79	201	41	0	0	破断せず，界面剥離
HSCF シート補強	100	2.26	159	31	0	0	破断せず
	200	1.79	208	41	0	0	破断せず，界面剥離
HECF シート補強	100	2.26	137	34	259	45	破断
	200	1.79	200	41	310	59	破断

注) $T/W_m^{1/3}$ は、後掲の式 (5) により算出。

の蓄積により明らかにしていく必要がある。

3.2.3 損傷寸法の測定結果

表 9 に損傷寸法の測定結果を示す。なお、爆薬量 200g の無補強、PEF メッシュ補強および HECF シート補強試験体に関しては、見かけ上貫通は生じていないものの、全損傷深さ（クレータ深さとスポール深さの和）は版厚に達していた。

各種連続繊維シート補強試験体の損傷に着目すると、HECF シート < HSCF シート ≒ PEF シートの順に補強効果が大きくなっていることが判る。また、PEF メッシュ補強試験体と PEF シート補強試験体とを比較した場合、爆薬量 200g の場合において、目付量が大きい後者の方が補強効果は大きくなっている。以上の結果と併せて、いずれの場合もスポールは繊維破断によって生じていることを考慮すると、後述するように、補強材の破断エネルギーの大小がこれら連続繊維補強 RC 版の損傷モードに影響していることが推察される。

4. 実験結果の考察

4.1 普通 RC 版を対象とした損傷予測式との対応性

森下・田中ら^{3,5)}は、接触爆発を受ける普通 RC 版の損傷に及ぼすコンクリート強度、配筋、爆薬量等の影響について検討し、実用的な損傷予測式を提案している。ここでは、予備実験および本実験から得られたデータとこれら損傷予測式による計算値とを比較することで、各種連続繊維補強材による耐爆補強効果の検証を試みる。

4.1.1 クレータおよびスポールの形状

図 5 にクレータの直径と深さとの関係、図 6 にスポールの直径と深さとの関係をそれぞれ示す。なお、これらの図中には、普通 RC 版を対象とした以下の損傷予測式^{3,5)}による計算値も併記している。

a) クレータの形状

$$\frac{C_d}{T} = 0.20 \frac{C}{T} \quad (\text{貫通孔が生じない場合}) \quad (1)$$

$$\frac{C_d}{T} = 0.016 \frac{C}{T} + 0.30 \quad (\text{貫通孔が生じる場合; } 1.6 \leq \frac{C}{T}) \quad (2)$$

b) スポールの形状

$$\frac{S_d}{T} = 0.15 \frac{S}{T} \quad (\text{貫通孔が生じない場合}) \quad (3)$$

$$\frac{S_d}{T} = -0.017 \frac{S}{T} + 0.71 \quad (\text{貫通孔が生じる場合; } 2.9 \leq \frac{S}{T}) \quad (4)$$

ここに、 C_d : クレータ深さ (cm)、 C : クレータ直径 (cm)、 S_d : スポール深さ (cm)、 S : スポール直径 (cm)、 T : 版厚 (cm) である。

図より、予備実験で検討対象とした 2 データ (CFRP プレート補強および HSCF シート補強試験体、図中に破線で囲んで示す) が若干ではあるが計算値から逸脱し、相対的にスポール深さが大きくなっているが、これらはいずれも貫通が生じ、母材コンクリートの脆弱化によりクレータとスポールとの境界の特定が難しかった試験体であり (表 3 参照)、そのことを考慮すると、実験データと式 (1) ~ (4) による計算値とは概ね妥当な一致を示しているものと考えられる。但し、クレータ形状に関しては、その貫通限界が後述する繊維破断等の影響を受けると考えられるため、それが生じない場合には、図 5 中にて実線で囲んで示すように、貫通限界 $C/T=1.6$ に関わらず式 (1) を適用する等の配慮が必要である。

4.1.2 クレータ深さおよび全損傷深さ

図 7 および 8 に、クレータ深さおよび全損傷深さ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。ここで、修正換算コンクリート厚さ $T/W_m^{1/3}$ とは、森下・田中ら^{3,5)}によって提案されている損傷評価パラメータであり、下式で表される。

$$\frac{T}{W_m^{1/3}} = \frac{T}{W^{1/3}} \cdot \left(\frac{K_{TNT}}{K} \right)^{1/3} \quad (\text{単位: cm/g}^{1/3}) \quad (5)$$

ここに、 W_m : 使用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 (=4.29MJ/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、 $K=3.71$ (=5.71×0.65) MJ/kg として $T/W_m^{1/3}$ を算出した。

また、図 7 および 8 には、普通 RC 版を対象とした以下の損傷予測式^{3,5)}による計算値も併記している。

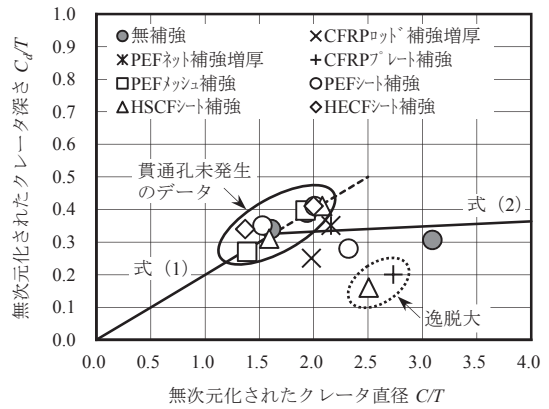


図 5 クレータの直径と深さとの関係 (両実験共通)

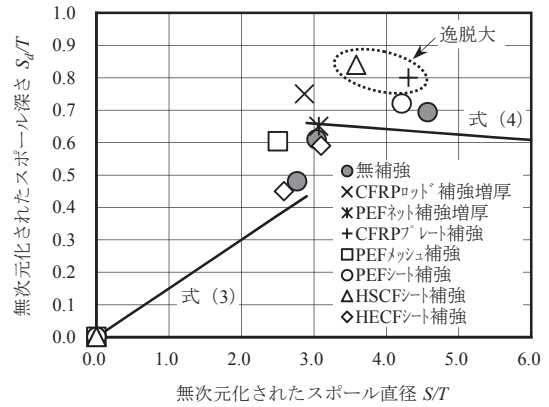


図 6 スポールの直径と深さとの関係 (両実験共通)

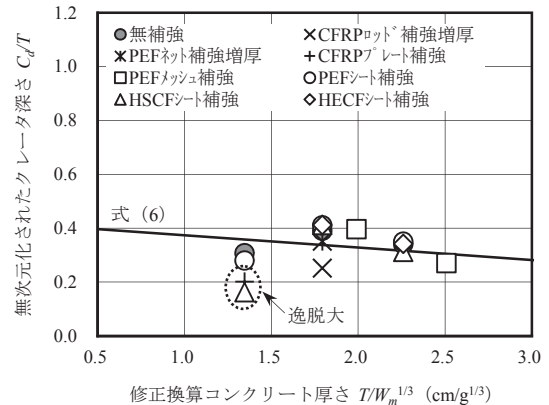


図 7 修正換算コンクリート厚さで整理したクレータ深さ (両実験共通)

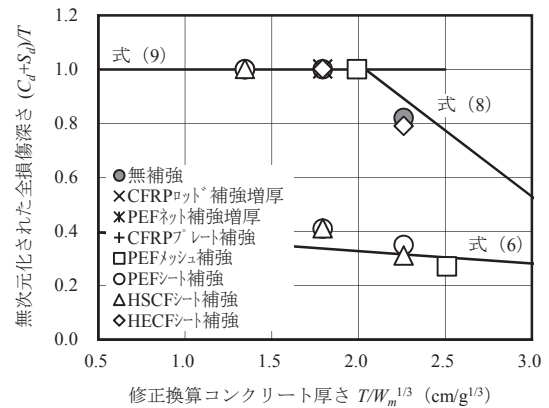


図 8 修正換算コンクリート厚さで整理した全損傷深さ (両実験共通)

a) クレータ深さ

$$\frac{C_d}{T} = -0.046 \frac{T}{W_m^{1/3}} + 0.42 \quad (6)$$

b) 全損傷深さ

$$\frac{C_d + S_d}{T} = \frac{C_d}{T} \quad (\text{クレータのみが生じる場合; } 3.6 < \frac{T}{W_m^{1/3}}) \quad (7)$$

$$\frac{C_d + S_d}{T} = -0.49 \frac{T}{W_m^{1/3}} + 2.0 \quad (\text{クレータとスポールが生じる場合; } 2.0 \leq \frac{T}{W_m^{1/3}} \leq 3.6) \quad (8)$$

$$\frac{C_d + S_d}{T} = 1.0 \quad (\text{貫通孔が生じる場合; } \frac{T}{W_m^{1/3}} < 2.0) \quad (9)$$

図7より、両実験で測定されたクレータ深さは、前項でも言及した2データ(図中で破線で囲んで示している)がやや逸脱していることを除けば、若干のばらつきはあるものの式(6)による計算値と概ね良好な一致を示していることが判る。前項の考察も併せると、このことは、連続繊維による裏面補強がクレータの規模・形状に及ぼす影響は小さいことを示しているものと考えられる。

図8より、各種連続繊維補強RC版に関する無次元全損傷深さ $(C_d+S_d)/T$ の測定値は、普通RC版を対象としたクレータ深さ予測式(6)による計算値または全損傷深さ予測式(8)および(9)による計算値のいずれかと概ね良く一致する傾向にあることが判る。このことは、連続繊維補強材による裏面補強が、スポールを完全に抑止できるか、或いは損傷程度が無補強の場合と同程度となるかの二者択一の補強方法であることを示唆している。これは、例えば連続繊維シート補強のように繊維破断によってスポールを生じる補強形態であれば、版内部で発生したコンクリート片の飛散圧により裏面の補強材が破断すると、それまで内部に停留していたコンクリート片(表8参照)が飛散に至り、急速に耐爆補強効果が失われるためであると推察される。また、例えばPEFネット補強増厚のように内部コンクリート片を有効に捕縛できない補強形態であれば、繊維破断の有無に関わらず損傷程度が無補強の場合と同程度となることは、前掲の表3および4からも明らかである。

4.1.3 貫通孔直径

図9に、貫通孔直径を修正換算コンクリート厚さで整理した結果を示す。なお、同図中には、普通RC版を対象とした以下の損傷予測式^{3,5)}による計算値も併記している。

$$\frac{H}{T} = -6.7 \log \left(\frac{T}{W_m^{1/3}} \right) + 2.7 \quad \left(\frac{T}{W_m^{1/3}} \leq 2.5 \right) \quad (10)$$

ここに、 H : 貫通孔直径 (cm) である。

測定された貫通孔直径は、図9に示す通り式(10)による計算値と良好な一致を示しており、各種連続繊維補強RC版に対しても上式を適用することが可能であると考えられる。

ここで、以上の4.1節における考察を総括すると、繊維破断等によりスポールを生じた連続繊維補強RC版に対しては、普通RC版を対象とした損傷予測式(1)~(10)が全面的に適用可能であるものと考えられる。従って、特に連続繊維シート補強のように繊維破断によってスポールが生じる補強形態においては、その発生条件を明らかにすることが、連続繊維補強RC版の損傷程度を把握する上

で重要な課題となってくることが推察される。

4.2 補強材の種類、爆薬量および版厚が連続繊維シート補強RC版の損傷モードに及ぼす影響

前節の考察より、特に繊維破断によって損傷モードが決定される補強形態においては、その発生条件を明らかにすることが重要であると考えられる。また、3.2.3項にて言及したように、繊維破断型の連続繊維補強RC版の損傷モードを把握する上で、補強材の破断エネルギー sG_F および修正換算コンクリート厚さ $T/W_m^{1/3}$ がその損傷モードに及ぼす影響について若干の考察を試みる。

図10に、上記2因子が連続繊維シート補強RC版の損傷モードに及ぼす影響を示す。ここで、 sG_F は、繊維素材が破断に至るまでの引張応力-ひずみ曲線下の面積を求め、これにシート厚さを乗じることで算出した。なお、いずれの繊維素材も引張強度時までは線形弾性とし、PEFシートに関しては、そこから破断時ひずみ5%に至るまでの伸びを考慮している^{17,18)}。

図より、 sG_F と $T/W_m^{1/3}$ が共に大きい場合においてシート破断が抑止され、損傷モードが軽微になっていることが判る。また、今回の実験データの範囲内で、 $sG_F=0.812 \sim 8.55 \text{ kN/mm}$ 、 $T/W_m^{1/3}=1.35 \sim 1.79 \text{ cm/g}^{1/3}$ の間(図中の網掛け部分)に、シート破断により損傷モ

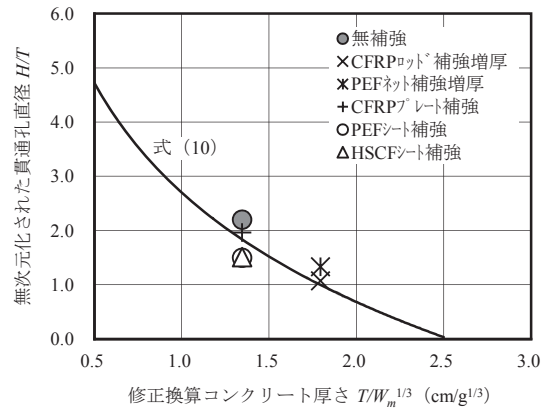


図9 修正換算コンクリート厚さで整理した貫通孔直径(両実験共通)

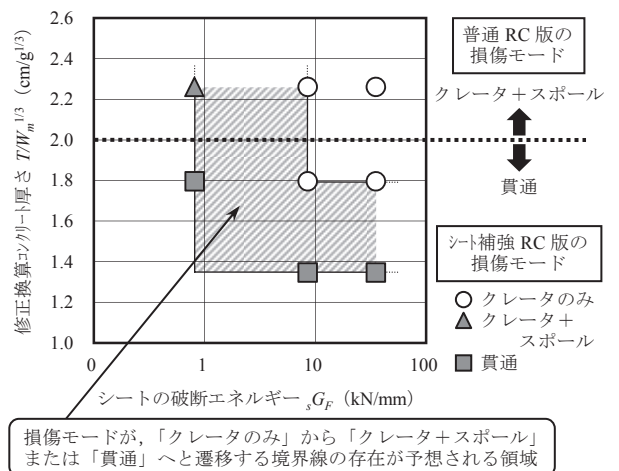


図10 シートの破断エネルギーおよび修正換算コンクリート厚さが連続繊維シート補強RC版の損傷モードに及ぼす影響(両実験共通)

ードが「クレータのみ」から「クレータ+スポール」または「貫通」へと遷移する境界線が存在することが予想される。このことは、版内部で発生したコンクリート片を捕縛できるだけの、シート補強材の種類、爆薬量および版厚に応じた適切な補強量が存在することを示唆しており、今回の実験でその定量化には至らないが、今後実験データの蓄積により明らかにしていく必要がある。なお、本実験結果によれば、 $T/W_m^{1/3}$ が普通 RC 版における貫通限界 ($2.0\text{cm/g}^{1/3}$) 以下となった場合においても「クレータのみ」の損傷モードが存在していることから、 $T/W_m^{1/3}$ に応じた適切な G_F を確保することで、本補強工法により良好にスポール片の飛散を抑止できることが判る。

ところで、図 10 中の「クレータ+スポール」および「貫通」のデータは、いずれもシート破断を生じた試験体に関するものであるが、これら試験体の損傷モードは普通 RC 版のそれと一致していることが判る。これは、前節でも述べた通り、連続繊維シートによる裏面補強がスポールを完全に抑止できるか、或いは繊維破断により損傷程度が無補強の場合と同程度となるかの二者択一の補強方法であることに起因しているものと考えられる。

5. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見を要約すると、以下のようになる。

- 1) 連続繊維補強材を用いて外観上明らかなスポールを抑止するためには、版内部で破砕されたコンクリート片の飛散を捕縛することが可能な裏面補強形態を適用する必要がある、この面で、補強材が RC 版裏面に全面的に密着する連続繊維シート補強工法の有用性が高いと判断された。
- 2) 連続繊維補強材による裏面補強が爆発面の損傷に及ぼす影響は小さく、クレータの規模・形状は、その貫通限界の取扱いに若干の配慮が必要ではあるものの、普通 RC 版を対象とした損傷予測式を用いて評価することが可能であると考えられた。
- 3) 連続繊維補強材による裏面補強は、スポールを完全に抑止できるか、或いは繊維破断等により損傷程度が無補強の場合と同程度となるかの二者択一の補強方法であることが示唆された。また、このことに関連して、繊維破断等によりスポールを生じた連続繊維補強 RC 版に対しては、普通 RC 版を対象とした損傷予測式を全面的に適用することが可能であると考えられた。
- 4) 連続繊維シート補強 RC 版において、シートの破断エネルギーおよび修正換算コンクリート厚さが共に大きい場合にシート破断が抑止され、その損傷モードが軽微になる傾向にあることが示された。また、上記 2 因子の相互関係から、連続繊維シート補強 RC 版におけるスポール限界および貫通限界を定量化できる可能性を示した。
- 5) 連続繊維シート補強 RC 版におけるシート剥離は、特に爆薬量が大きく、尚且つスポールが完全に抑止された場合に広域に進行する傾向にある。逆に、シート破断によりスポールを生じた HECF シート補強試験体においては、スポール近傍のシート剥離がほとんど進行しない傾向が認められた。

今後、実験データの蓄積を図るとともに、連続繊維補強材による耐爆補強メカニズムに関してより定量的な検討を実施していく必要があると考えている。

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。試験にあたり、伊東繁教授(当時)、丸丸進助手(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ご協力を賜りました。三菱樹脂(株)、東洋紡績(株)、アイサワ工業(株)、(株)フジコンケミカル、有明生コン(株)、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) 森下政浩ほか：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：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：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) 大久保一徳ほか：C4 爆薬の接触・近接爆発に対するコンクリート板の損傷評価, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.1273-1283, 2007.3
- 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, 第 619 号, pp.187-194, 2007.9
- 8) 山口信ほか：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
- 9) 山口信ほか：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 75 巻, 第 654 号, pp.1577-1586, 2010.8
- 10) 別府万寿博ほか：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) Y. Kakuno et al.: Flexural reinforcing effect of RC members reinforced by thickening with continuous fiber reinforcing materials, Cement Science and Concrete Technology, No.61, pp.494-501, 2008.2
- 12) 武田浩二ほか：ポリエチレン繊維ネットの巻付け方法が鉄筋コンクリート梁のせん断補強効果に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.56, pp.663-669, 2003.2
- 13) 久部修弘ほか：極厚 CFRP プレートを用いた既存 RC 梁の曲げ補強効果に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.1303-1308, 2010.7
- 14) 角野嘉則ほか：高靱性繊維補強モルタルで断面積層補強を施した鉄筋コンクリート梁に対する連続繊維シートの曲げ補強効果の改善に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻, 第 637 号, pp.433-440, 2009.3
- 15) 村上聖ほか：連続繊維シートによる鉄筋コンクリート梁の曲げ補強設計に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 561 号, pp.185-192, 2002.11
- 16) 村上聖ほか：GRC 打込み型枠による鉄筋コンクリートはりの構造特性に関する実験的研究ーその 2 ー 負荷の下での GRC 打込み型枠の付着剥離性状, 日本建築学会構造系論文集, 第 494 号, pp.29-36, 1997.4
- 17) 本宮達也著：ハイテク繊維の世界, 日刊工業新聞社, 1999
- 18) 日本コンクリート工学協会編：高靱性セメント複合材料を知る・作る・使うー高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書ー, 2002

(2011年10月5日原稿受理, 2011年12月22日採用決定)