

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

COMPARISON OF BLAST RESISTANCE WITH VARIOUS FIBER-REINFORCED CONCRETES

Blast resistance of polyethylene fiber-reinforced concrete against contact detonation

山口 信*, 村上 聖**, 武田浩二***, 三井宜之****

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

In this study, the contact detonation tests were conducted on six kinds of fiber-reinforced concrete slabs, and then spall damages created in them were compared with those in S-PEFRC (fiber-reinforced concrete with polyethylene fiber of strand type) slabs. The main results obtained are as follows: 1) all of fiber-reinforced concretes investigated in this study were effective in reducing spall damage as compared with normal concrete; 2) total damage depths in various fiber-reinforced concrete slabs could be generally estimated by formula for estimating that in the S-PEFRC slab; and 3) in case the modified-scaled concrete thickness was small, the S-PEFRC had somewhat better blast resistance than other fiber-reinforced concretes of which flexural toughness was equal to that of the S-PEFRC.

Keywords : *Fiber-reinforced concrete, Blast resistance, Contact detonation, Crater, Spall*

繊維補強コンクリート, 耐爆性能, 接触爆発, クレータ, スポール

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損傷を考慮する場合, コンクリート片の飛散に伴う被害防止の観点から, 版裏面における引張応力波の反射に起因した裏面剥離(スポール)を抑制することが設計上の許容限界となる^{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)および構造物材内部での爆発の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, 近年, 接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷予測手法の開発^{3,4)}や繊維シート補強による耐爆性能向上⁵⁾等に関する実験的研究が実施されている。

著者らも, 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, 集束タイプのポリエチレン繊維を用いた繊維補強コンクリート(以下, S-PEFRC)版の接触爆発試験を実施し, ① S-PEFRCの耐爆構造部材への適用は, 普通コンクリートと比較した場合, スポールおよび内部損傷の低減と裏面剥離片の飛散防止に有効であること, ② S-PEFRCの爆発面破壊(クレータ)の程度は普通コンクリートと同程度であり, 従って既往の普通コンクリートを対象とした損傷予測式^{3,5)}によりクレータ寸法の予測が可能であること, ③ S-PEFRCの曲げタフネス増大に伴いスポール直径, スポール深さ

および全損傷深さ(クレータ深さとスポール深さの和)は低減されること, ④ 修正換算コンクリート厚さと曲げタフネスを用いて, 接触爆発を受けるS-PEFRC版の全損傷深さを予測することが可能であること, 等の知見を得ている⁶⁾。但し, 補強用繊維としては他にもポリプロピレン繊維, ポリビニルアルコール繊維, 原糸カットタイプのポリエチレン繊維等があり, これらを用いた各種繊維補強コンクリートとの耐爆効果の比較が次なる検討課題として考えられる。

そこで, 本研究では, 前報⁶⁾で得た知見を発展させるため, 新たに補強用繊維やマトリックスが異なる6種類の繊維補強コンクリートの接触爆発試験を実施し, 繊維補強コンクリートの違いに起因するクレータ, スポール等の局部損傷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考察を行った。特に, 繊維補強コンクリートを耐爆構造部材へ適用する目的はスポール損傷の低減にあることから, 本論では, S-PEFRCと他の各種繊維補強コンクリートのスポール損傷低減効果の差異に関して検討することを主目的とした。

2. S-PEFRCを対象とした全損傷深さ予測式の概要

耐爆設計では, 構造部材の版厚方向の損傷を予測することが最重要となる³⁾。また, 耐爆設計者等の間には, 爆発荷重を受ける鉄筋コンクリート構造物の損傷を, 図表や計算式等により簡易的に評価したいという要望がある³⁾。そこで, 前報⁶⁾ではS-PEFRCのみを対象に, 版厚 T (cm), 爆薬量 W (g)および繊維補強コンクリートの静的エネルギー吸収能力の指標である曲げタフネス T_b (載荷点変

* 熊本大学大学院自然科学研究科 博士後期課程・工修

** 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 助教・工博

**** 熊本大学 名誉教授・工博

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

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

位 2.0mm に至るまでの曲げ荷重-載荷点変位曲線下の面積, kN・mm) ¹⁰⁾を考慮した全損傷深さ予測式として, 下式を提案した。

$$\frac{C_d + S_d}{T} = 1.946 - 0.5075 \cdot \frac{T}{W_m^{1/3}} - 0.01068 \cdot T_b \quad (1)$$

ここに, C_d はクレータ深さ (cm), S_d はスポール深さ (cm) であり, これらの寸法の定義を図 1 に示している。修正換算コンクリート厚さ $T/W_m^{1/3}$ (cm/g^{1/3}) は, 竹田ら ¹¹⁾が定義した換算コンクリート厚さ $T/W^{1/3}$ に爆薬の種類の影響を考慮した, 森下・田中らにより提案されている損傷評価パラメータであり ^{3,7)}, 下式で表される。

$$\frac{T}{W_m^{1/3}} = \frac{T}{W^{1/3}} \cdot \left(\frac{K_{TNT}}{K} \right)^{1/3} \quad (2)$$

ここに, W_m は使用爆薬のトリニトロトルエン (TNT) 換算量 (g), W は使用爆薬量 (g), K_{TNT} は TNT の Chapman-Jouguet 爆轟エネルギー (MJ/kg), K は使用爆薬の Chapman-Jouguet 爆轟エネルギー (MJ/kg) である。

式 (1) は結果として, 後述する森下・田中ら ^{3,7)}の普通コンクリートを対象とした全損傷深さ予測式 (9) と対応する形となっており, 即ち, 式 (1) に $T_b=0$ kN・mm を代入すれば式 (9) と概ね良く一致し, 曲げタフネス T_b の増減に応じて式 (9) が移動する形を取る。また, 同式を用いることにより, 妥当な精度 (予測値/測定値の平均値: 1.03, 変動係数: 13.8%) で接触爆発を受ける S-PEFRC 版の全損傷深さを予測することが可能であることを確認している ⁹⁾。

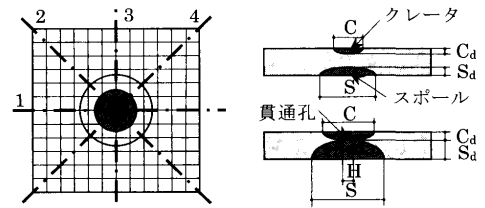
式 (1) の提案にあたり用いた実験データの範囲は, 修正換算コンクリート厚さ $T/W_m^{1/3}=0.897 \sim 2.26$ g/cm^{1/3}, 曲げタフネス $T_b=26.5 \sim 47.6$ kN・mm であり, 更なる実験データの蓄積により精度向上を図る必要がある。なお, 同式は S-PEFRC のみを対象として提案した実験式であり, 補強用繊維が異なる各種繊維補強コンクリートへの適用は考慮していない。本論では, 式 (1) の適用範囲を明確にするため, 同式の本実験データへの対応についても考察を試みた。

3. 実験方法

3.1 使用材料および調合

本実験で検討対象とした繊維補強コンクリートは, ポリプロピレン繊維補強コンクリート (以下, PPFRC), ポリビニルアルコール繊維補強コンクリート (以下, PVAFC), 原糸カットタイプのポリエチレン繊維補強コンクリート (以下, F-PEFRC), 炭素繊維補強コンクリート (以下, CFRC), 鋼繊維補強コンクリート (以下, SFRC) およびポリエチレン繊維補強モルタル (以下, PEFRM) の 6 種類である。なお, 本研究で対象とする短繊維補強コンクリートとは異なるが, 比較のため普通コンクリート版裏面をポリエチレン繊維メッシュにより積層補強した試験体 (以下, Mesh-RC 試験体) についても同様の検討を行った。製造に用いた材料を表 1 に示す。

使用した補強用繊維について概説すると, ① ポリプロピレン繊維 ¹²⁾: 混練時にメッシュ状に解繊するタイプで, メッシュ内にマトリックスが充填されることにより繊維-マトリックス間の機械的な付着力が確保されることを意図したもの。② ポリビニルアルコール繊維 ¹²⁾: セメント基マトリックスとの付着力が高いため, 終局時に繊維破断が生じ易いとされていた原糸カットタイプの改良を目的に, 太径フィラメントとしたもの。③ 原糸カットタイプのポリエチレン繊維 ¹³⁻¹⁵⁾: 既報 ⁹⁾で使用した集束タイプの高分子量ポリエチレン



* C: クレータ直径 (cm), C_d : クレータ深さ (cm), S: スポール直径 (cm), S_d : スポール深さ (cm), H: 貫通孔直径 (cm)
* C, S および H は, 直線 1-4 に沿った 4 つの測定値の平均値。
* C_d および S_d は, 試験体表面から損傷最深部までの距離。

図 1 外部損傷寸法の定義

表 1 使用材料

a) PPFRC, PVAFC, F-PEFRC, CFRCおよびSFRC		
セメント	早強ポルトランドセメント	
細骨材	川砂 (PPFRC, PVAFC) 表乾密度: 2.59g/cm ³ 吸水率: 3.77% 最大寸法: 2.5mm 粗粒率: 2.75	川砂 (F-PEFRC, CFRC, SFRC) 表乾密度: 2.63g/cm ³ 吸水率: 2.81% 最大寸法: 2.5mm 粗粒率: 2.10
粗骨材	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	ポリプロピレン繊維 (メッシュタイプ) 密度: 0.91g/cm ³ , 長さ: 55mm, 引張強度: 600N/mm ² , 引張弾性率: 3.5kN/mm ² ポリビニルアルコール繊維 (太径フィラメントタイプ) 密度: 1.30g/cm ³ , 径×長さ: 0.15mm×30mm, 引張強度: 1850N/mm ² , 引張弾性率: 44kN/mm ² ポリエチレン繊維 (原糸カットタイプ, コンクリート調合用) 密度: 0.97g/cm ³ , 径×長さ: 12μm×30mm, 引張強度: 2620N/mm ² , 引張弾性率: 79kN/mm ² 炭素繊維 (水溶性接着剤による集束タイプ) 密度: 1.90g/cm ³ , 径×長さ: 7μm×40mm (12K), 引張強度: 4410N/mm ² , 引張弾性率: 226kN/mm ² 鋼繊維 (異形カットワイヤー) 密度: 7.85g/cm ³ , 径×長さ: 0.6mm×25mm, 引張強度: 1079N/mm ² 以上	
b) PEFRM		
セメント	早強ポルトランドセメント	
骨材	豊浦珪砂 絶乾密度: 2.70g/cm ³	
短繊維	ポリエチレン繊維 (原糸カットタイプ, モルタル調合用) 密度: 0.97g/cm ³ , 径×長さ: 12μm×18mm, 引張強度: 2620N/mm ² , 引張弾性率: 79kN/mm ²	
c) Mesh-RC		
母材	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: 17.3cm	
接着材	ポリマーセメントモルタル (エマルジョンとコンパウンドを現場調合して用いる補強材料) エマルジョンの内訳 (質量比) ポリアクリル酸エステル: ポリスチレン: 水 = 19: 13: 68 コンパウンドの内訳 (質量比) 白色セメント: 6号珪砂 = 40: 60	
連続繊維補強材	ポリエチレン繊維メッシュ 目付量: 44g/mm ² , 厚さ: 0.27mm, ピッチ: 10mm (経・緯) 強力 (経): 1.37kN/5cm, (緯): 1.36kN/5cm	

維と同一素材による汎用型であり, 直径 12μm のフィラメントをコンクリート調合用は 30mm, モルタル調合用は 18mm の長さにそれぞれ切断したもの。④ 炭素繊維 ^{14, 16)}: せん断攪拌時の破断や折損といった欠点を改善するために, 水溶性接着剤により緩く集束した

もの。⑤ 鋼繊維¹⁷⁾：表面にインデント加工を施した汎用型。⑥ ポリエチレン繊維メッシュ：高分子量ポリエチレン繊維のストランドを格子状に配列させたもので、主にコンクリートの剥落防止を目的に用いられる。

PEFRMを除く繊維補強コンクリートのマトリックスには、製造条件の制約により細骨材の品質に若干の差異はあるが、流動性付与を目的に高炉スラグ微粉末と高性能 AE 減水剤を併用し、プレキャストコンクリートへの適用を想定して早強ポルトランドセメントを用いることを基本とした。PEFRMのマトリックスには、早強ポルトランドセメントと豊浦硅砂を用いた。また、Mesh-RC 試験体の母材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）、接着材にはポリマーセメントモルタルを用いた。

表 2 に各種繊維補強コンクリートの使用調査を示す。ここで、繊維の素材や形状に応じて補強効果が最大となる調査は異なり、使用繊維の性能を十分に発揮できる調査での比較が重要であると考え。そこで、PEFRMを除く 5 種類の繊維補強コンクリートには、既往の研究¹²⁻¹⁷⁾を参考に、補強用繊維の種類に応じた良好な曲げ靱性と 10cm 程度のスランプを得る上で適切と判断された調査を用いた。また、PEFRMの調査は、既報¹⁸⁾の高靱性繊維補強セメント複合材料の調査を参考に決定した。

各種繊維補強コンクリートの混練は、容量 55L の強制 2 軸攪拌型ミキサー（CFRCのみ、容量 30L のオムニミキサー）を用いて行った。混練手順としては、最初に結合材と骨材を 15 秒間空練りした後、水および高性能 AE 減水剤を加えて 90 秒間混練し、最後に繊維を投入して 3 分間（CFRCのみ、1 分間）練り混ぜた。なお、CFRCのみ混練方法が他と異なるが、これは炭素繊維のせん断攪拌時における破断・折損を抑制するためであり、既往の研究¹⁶⁾において適切と判断された方法に準拠している。

3.2 素材特性

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 3 点曲げ荷重による曲げ荷重-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標準（JCI-SF4）¹⁰⁾に準拠し、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各種繊維補強コンクリートおよび普通コンクリートの素材特性を表 3 に示す。先述のように、前報⁹⁾では S-PEFRC の耐爆性能を評価する上で曲げタフネス T_b が重要な材料パラメータであることを示したが、本実験では PVAFC が $T_b=40.2\text{kN}\cdot\text{mm}$ と 6 水準中最大の曲げタフネスを示した。

3.3 接触爆発試験方法

3.3.1 試験体条件

図 2 に接触爆発試験体の形状・寸法および配筋を示す。試験体は全て幅 60.0cm、長さ 60.0cm および厚さ 10.0cm の平板とした。補強筋には異形鉄筋 SD295 A D10 を使い、配筋は、前報⁹⁾と同様の格子状シングル配筋（間隔 12.0cm）とした。なお、締固めは棒状バイブレータを用いて行い、素材試験用供試体と同様に養生した。

ここで、図 3 に Mesh-RC 試験体におけるポリエチレン繊維メッ

表 2 各種繊維補強コンクリートの使用調査

	V_f (%)	W/B (%)	Sg/B (%)	s/a (%)	S/B (%)	Sp/B (%)	W (kg/m^3)	Slump (cm)
PPFRC	1.5	50	50	65	—	0.25	325	12.2
PVAFC	5.0	33	50	65	—	0.35	325	11.7
F-PEFRC	1.0	50	50	65	—	0.50	325	14.7
CFRC	1.0	50	50	65	—	0.50	325	9.0
SFRC	2.0	50	50	65	—	0.50	230	11.4
PEFRM	1.5	45	0	—	40	0	481	9.0

* V_f ：繊維体積率，W/B：水結合材比，Sg：高炉スラグ微粉末，s/a：細骨材率，S/B：砂結合材比，Sp：高性能 AE 減水剤，W：単位水量

表 3 素材試験結果

	F_c (N/mm^2)	E (kN/mm^2)	F_b (N/mm^2)	T_b ($\text{kN}\cdot\text{mm}$)	$\bar{\sigma}_b$ (N/mm^2)
PPFRC	40.5	17.8	6.27	24.1	5.42
PVAFC	62.7	22.4	9.64	40.2	9.05
F-PEFRC	36.2	15.9	6.61	23.4	5.27
CFRC	57.0	22.3	11.3	22.0	4.95
SFRC	47.2	27.1	8.59	30.4	6.84
PEFRM	49.6	17.6	9.54	36.7	8.26
普通コンクリート	41.6	31.9	—	—	—

* 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（ 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⁾

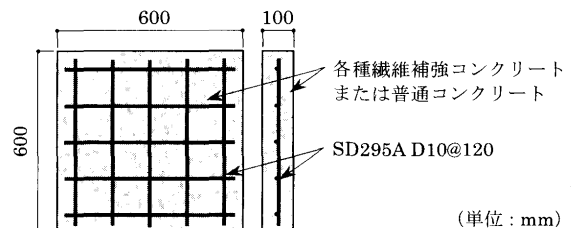
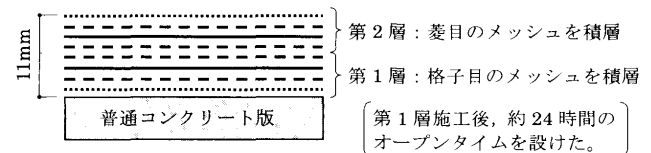


図 2 接触爆発試験体の形状・寸法および配筋



* ポリマーセメントモルタル（下塗りおよび仕上げ用，Em：Co=1:3.5），厚さ 1.0mm
 --- ポリマーセメントモルタル（中塗り用，Em：Co=1:4.0），厚さ 2.0mm
 — ポリエチレン繊維メッシュ（Em：エマルジョン，Co：コンパウンド）

図 3 Mesh-RC 試験体におけるポリエチレン繊維メッシュ積層方法

シュ積層方法を示す。普通コンクリート版表面を研磨した後、格子目と菱目のメッシュを、ポリマーセメントモルタルを用いて積層・接着した。なお、ここで使用したポリマーセメントモルタルは、無機系コンパウンドと複合高分子エマルジョンを現場調合して用いる材料であり（表 1 参照）、母材との接着強度が高い特長を有する（下塗り用調合の場合、母材コンクリートとの接着強度 $1.5\text{N}/\text{mm}^2$ 以上（母材破壊）、建研式接着力試験機による）。ここでは、下塗りおよび仕上げ用と中塗り用の 2 種類の調査を併用した。また、積層の結果、Mesh-RC 試験体の合計版厚は $11.1 (=10.0+1.1)$ cm となった。

以上の試験体には、損傷評価を容易にするために爆発面および裏面に間隔 5.0cm のグリッドを記入した。

3.3.2 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 4 に示す通り既往の研究³⁻⁹⁾に準拠し、2 本の木製架台の上に内法スパン 51.0cm となるように試験体を設置した後、試験体上面中央で電気雷管を用いて爆薬（物

性は写真1に示す)を起爆させた。なお、爆薬の形状は写真1に示すように直径と高さが等しい円柱形であり、爆薬量 W は、PPFRC および PVAFRC 試験体に関しては $W=100\text{g}$ の1水準、他の試験体に関しては $W=100$ および 200g の2水準とした。

3.3.3 外部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、ノギスを用いて外部損傷寸法を測定した。測定項目は図1に示したように、クレータおよびスポールの直径および深さとした(本実験では貫通孔は生じなかったため、貫通孔直径の測定は行っていない)。測定後に、中央に配した鉄筋を避けるために図1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、内部損傷状況の観察を行った。

4. 実験結果および考察

4.1 接触爆発試験体の破壊性状

ここでは、クレータおよびスポールの発生状況、試験体表面および内部のひび割れ発生状況等について述べる。

4.1.1 外部損傷状況

表4に接触爆発試験体の外部損傷状況を示す。

(1) 爆薬量 100g の場合

爆発面の損傷状況に関して、7試験体すべてにおいて爆発点近傍が粉砕され、クレータが生じた。その形状は、CFRC試験体で非対称性が若干大きくなっている程度で、総じて碗型に近い形状となる傾向にある。また、いずれの試験体においてもクレータ内部が若干白色化しており、これは熱によるマトリックスの脱水に起因するものであると考えられる⁹⁾。爆発面のひび割れ発生状況に関して、全試験体においてクレータ周辺に微細な放射状のひび割れの発生が見られたが、試験体間でその程度に顕著な差異は認められなかった。

裏面の損傷に関しては、試験体間で様相が明らかに異なっている。スポール損傷が軽微な方から順にその様相を説明すると、

- ① PEFRC および Mesh-RC 試験体：裏面に微細なひび割れを生じた程度で、剥離・剥落は全く認められない。
- ② F-PEFRC および SFRC 試験体：爆発点直下に剥離に伴う軽微な浮きが観察されるが、いずれも剥落は殆ど生じていない。
- ③ PVAFRC 試験体：爆発点直下に剥離に伴う浮きが見られ、その程度は F-PEFRC および SFRC 試験体よりも顕著であるが、剥落には至っていない。なお、剥離部分は繊維のスポール破壊面架橋により辛うじて版から分離していない状態にあった。
- ④ PPFRC 試験体：PVAFRC 試験体と同様の剥離に伴う顕著な浮きが観察され、その一部が剥落し、質量 240g 程度の剥落片が単独で生じた。
- ⑤ CFRC 試験体：爆薬量 100g で既に顕著なスポールが生じ、中央に配した鉄筋の露出が見られる。また、クレータの場合と同様に、その形状はやや非対称性が大きくなっている。

なお、繊維補強コンクリートを用いた6試験体全てにおいて、爆発点直下を中心とした放射状の微細ひび割れの発生が観察された。このことから、繊維補強コンクリートの種類に応じてその効果に差異はあるものの、いずれも繊維の架橋作用による靱性増大により衝撃力が分散する傾向にあるものと推察される。一方、Mesh-RC 試験

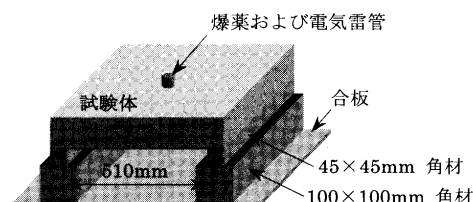


図4 接触爆発試験体および爆薬の設置方法

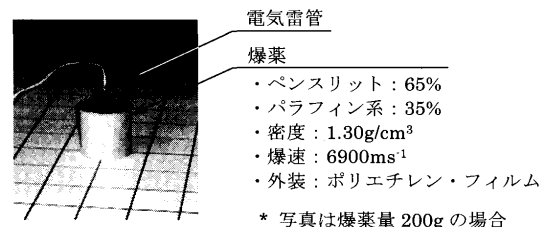


写真1 爆薬の物性および設置状況

体の場合には、爆発点直下を中心とした円形状のひび割れの発生が見られたが、その直径は約 30cm と、版厚 10.0cm の普通コンクリート版におけるスポール直径 (27.7cm)⁹⁾より若干大きい程度であった。これは、版内部で生じたコンクリート片の版からの分離をポリエチレン繊維メッシュが抑止した結果生じたものであると考えられる。

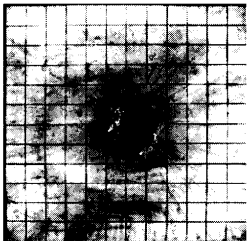
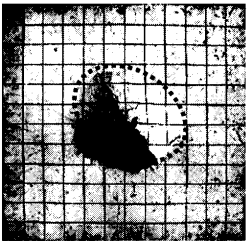
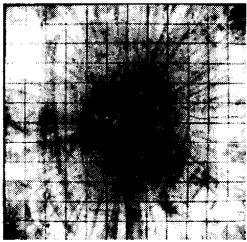
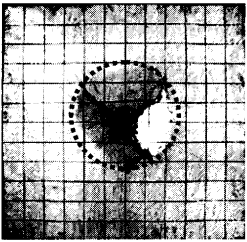
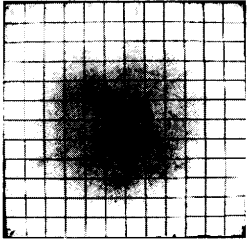
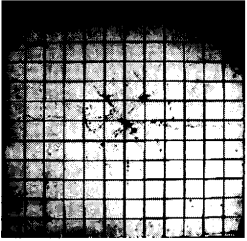
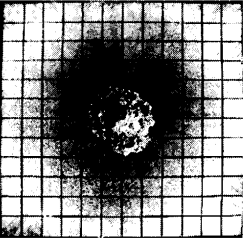
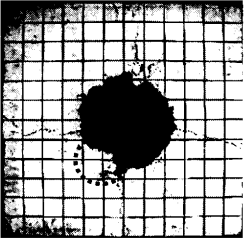
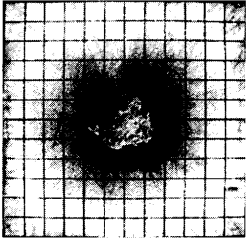
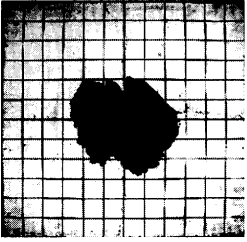
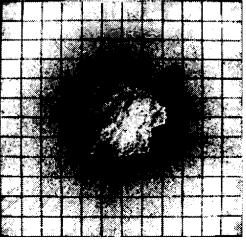

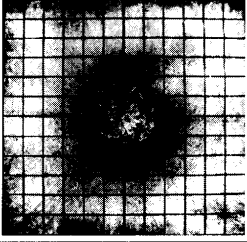
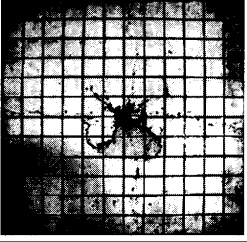
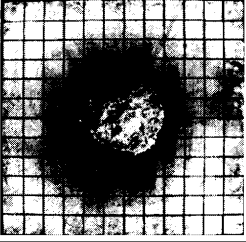
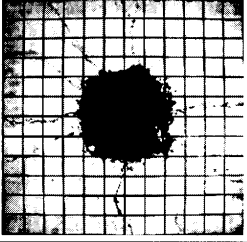
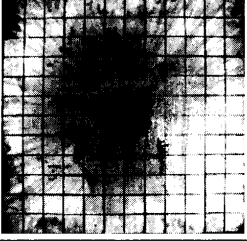

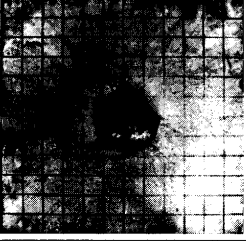
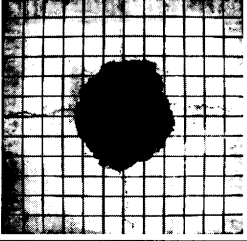
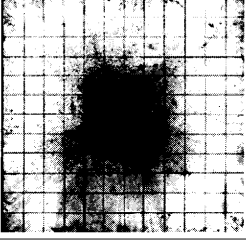
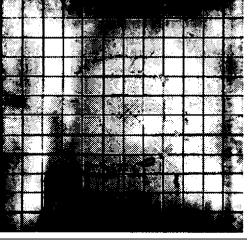
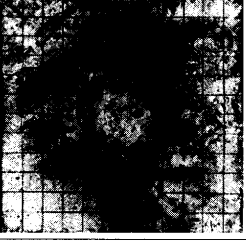
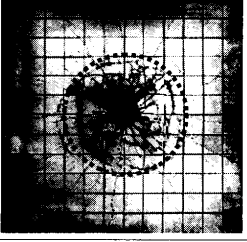
(2) 爆薬量 200g の場合

爆発面の損傷に関しては、全ての試験体において爆薬量 100g の場合よりもクレータの規模が拡大していることが判る。また、爆薬量 100g の場合と同様にクレータ周辺に微細な放射状のひび割れの発生が見られたが、その程度は、PEFRM 試験体において微細ひび割れの数が他よりも若干多い程度で、いずれもごく軽微であった。

裏面の損傷状況に関して、5試験体全てにおいて顕著なスポールが生じ、中央に配した鉄筋の露出が観察された。その中でも、CFRC および Mesh-RC 試験体に生じたスポールの規模は特に大きく、後述するように全損傷深さは版厚に達していた。スポールの形状に関して、繊維補強コンクリートを用いた場合には概ね碗型に近い形状となる傾向にある。一方、Mesh-RC 試験体の場合にはこれらと若干異なり、ポリエチレン繊維メッシュの破断により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多量のコンクリート片の剥落が見られた。また、CFRC を除く4試験体ではスポールを起点とした放射状の微細ひび割れの発生が観察されたが、CFRC 試験体の場合にはひび割れがやや局所化しており、他に比して若干大きく開口した十字型のひび割れの発生が見られた。

ここで、写真2に爆薬量 200g により生じた裏面剥離片の外観を示す。前報⁹⁾では、S-PEFRC を用いた場合、裏面剥離片が普通コンクリートのように粉砕されることなく、塊状となる傾向にあることを示した。ここに示す繊維補強コンクリートのうち F-PEFRC、CFRC および PEFRC に関しては、破片の大きさに差異はあるものの、概ねそれと同様の傾向が認められる。しかし、SFRC の場合はそれらと異なり、裏面剥離片が細かく粉砕されている。この理由として、繊維が破壊面を架橋する際、マトリックスにはスナッピング(破壊面を繊維が斜めに架橋する際に、繊維がマトリックスに引っ掛かることによって架橋力が増大する現象)により局所的な引張応力が作用するが、鋼繊維は他の繊維に比して曲げ剛性が高いために、

表 4 接触爆発試験体の外部損傷状況

	爆薬量 100g		爆薬量 200g	
	爆発面	裏面	爆発面	裏面
PPFRC (厚さ 100mm)				
PVAFRFC (厚さ 100mm)				
F-PEFRC (厚さ 100mm)				
CFRC (厚さ 100mm)				
SFRC (厚さ 100mm)				
PEFRM (厚さ 100mm)				
Mesh-RC (厚さ 111mm)				

* 支承位置は上下両端。 * 外部損傷寸法の測定にあたり除去した浮き部を破線で囲んで示している。

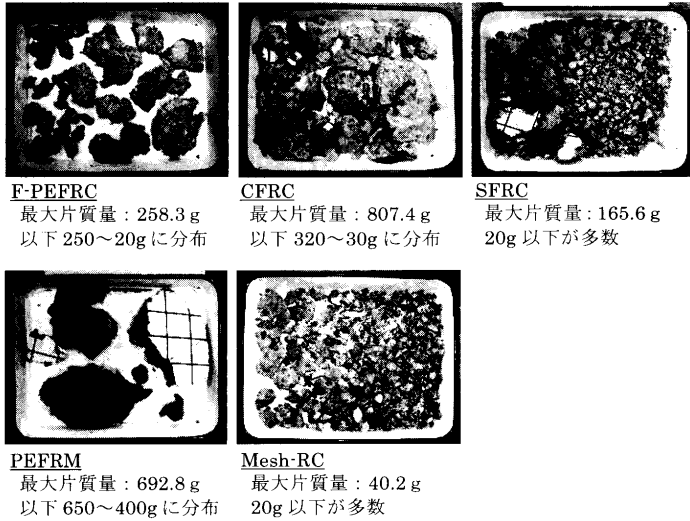


写真 2 爆薬量 200g により生じた裏面剥離片の外観

繊維抜け出し口近傍よりマトリックスを破壊している可能性が考えられる^{例え}ば²⁰。また、Mesh-RC 試験体において生じた裏面剥離片は既報⁹の無補強の普通コンクリート試験体におけるそれよりもさらに細かく、これは、メッシュが破断するまでの間に引張応力波がスポール破壊箇所を複数回にわたり伝播したためであると推察される。

4.1.2 内部損傷状況

表 5 に接触爆発試験体の内部損傷状況を示す。

(1) 爆薬量 100g の場合

7 試験体全てにおいて、試験体裏面の爆発点直下を中心とした同心円状のひび割れの発生が観察される。以下に、その発生程度や残存部の破壊状況を、軽微な方から順に分類して説明する。

- ① PEFRC 試験体：他の試験体に比して良好な内部ひび割れ低減効果を示しており、裏面から 3cm ほど内部に非常に微細なひび割れが単独で生じた程度であった。
 - ② F-PEFRC 試験体：版裏面の爆発点直下を中心とした同心円状の内部ひび割れが多重に発生している様相が観察されるが、内部の著しい脆化は認められておらず、後述するように、発生したスポールもごく小規模であった。
 - ③ SFRC 試験体：版裏面の爆発点直下近傍の、直径約 20cm、深さ約 4cm の範囲で、マトリックスに著しいひび割れの発生が観察される。しかし、繊維の架橋作用により特に版幅方向へのスポール拡大が抑制されており、爆発点直下に小規模なスポールが生じた程度であった。
 - ④ PPFRC, PVAFRC および CFRC 試験体：スポール破壊面に沿う微細なひび割れの発生が観察され、これらは、スポール破壊面を新たな自由表面として引張応力波が多重に反射した結果生じたものであると考えられる³⁻⁵⁾。
 - ⑤ Mesh-RC 試験体：版裏面の爆発点直下近傍で普通コンクリートが著しく破壊されており、その範囲は、厚さ 10.0cm の普通コンクリート版におけるスポールの規模(直径 27.7cm、深さ 4.8cm)⁹と概ね良く一致している。また、裏面に積層したポリエチレン繊維メッシュが裏面剥離片の飛散を抑制している様相が観察される。これらのことから、裏面メッシュ補強により裏面剥離片の飛散を抑制することは可能であるが、内部から損傷を抑制することはできないことが明らかである。なお、母材-積層材間の層間剥離は認められなかった。
- (2) 爆薬量 200g の場合
- 5 試験体全てにおいて、スポール破壊面に沿った多重なひび割れ

表 5 接触爆発試験体の内部損傷状況

	爆薬量 100g	爆薬量 200g
PPFRC (厚さ 100mm)		
PVAFRC (厚さ 100mm)		
F-PEFRC (厚さ 100mm)		
CFRC (厚さ 100mm)		
SFRC (厚さ 100mm)		
PEFRM (厚さ 100mm)		
Mesh-RC (厚さ 111mm)		

* 爆発面は上面。 * 支承位置は左右両端。

の発生が観察される。但し、爆薬量 100g の場合と同様に、PEFRM 試験体に生じたひび割れは非常に微細であり、爆薬量 200g においても良好なひび割れ低減効果を示している。一方、CFRC および Mesh-RC 試験体の場合には断面全域にわたりマクロ・クラックが発生しており、いずれも爆薬量 100g では見られなかった版側面に平行なひび割れ⁹⁾が新たに生じていることが判る。なお、Mesh-RC 試験体に関して、母材-積層材間の層間剥離は爆薬量 200g においても認められていない。

4.2 外部損傷寸法の測定結果

本節では、表 6 に示す外部損傷寸法の測定結果に関して、既報の普通コンクリート版^{3,5,9)}や S-PEFRC 版⁹⁾との比較を試みた。

4.2.1 クレータおよびスポール寸法の比較

図 5 に、各種繊維補強コンクリート版におけるクレータおよびスポール寸法の比較を示す。図中には比較のため、既報⁹⁾の版厚 10.0cm の普通コンクリート版および S-PEFRC (V_f=4.0%) 版に関する損傷寸法の測定値 (S-PEFRC 版に関してはその範囲) を併記している。なお、Mesh-RC 試験体は先述の通り版厚が他と異なることから、直接的な比較はできないため、ここでは除外している。

クレータ直径は、爆薬量に関わらず、繊維補強コンクリートの使用により若干ではあるが低減される傾向にあることが判る。このことに関連して、クレータは基本的に圧縮応力波に起因する破壊であるが、爆発点からある程度離れた位置に放射状引張亀裂の進行により破壊する領域が存在することが知られており²⁾、即ち、繊維混入に伴う引張靱性増大によりその部分の脆化が低減される結果としてクレータ直径が若干減少する傾向にあるものと推察される。但し、その程度は後述するスポール損傷の低減効果に比して僅かであり、繊維補強コンクリート間での差異も小さい。クレータ深さも、爆薬量 100g において繊維補強コンクリートの使用により若干低減される傾向にあるが、その程度はごく微量でしかなく、繊維補強コンクリート間での有意な差異も殆ど認められない。

スポール寸法は、爆薬量 100g の場合に注目すると、全ての繊維補強コンクリートにおいて普通コンクリートよりも小さくなっていることが判る。このことから、検討対象とした全ての繊維補強コンクリートが、普通コンクリートと比較した場合、スポール損傷低減効果を有することが明らかとなった。但し、その程度は繊維補強コンクリートの種類に応じて異なっており、F-PEFRC および PEFRM は、S-PEFRC と同等のスポール損傷低減効果を有していることが判る。また、PVAFCR および SFRC に関して、特に PVAFCR は浮き部を除去した上で測定を行ったためスポール寸法が大きくなっているが、表 4 を参照すると、いずれも裏面剥離片の飛散に伴う被害防止の面では効果を有しているものと判断される。しかし、PPFRC および CFRC に関しては、浮き部を除去する以前に既にスポールを生じていたことから、爆薬量 100g において、十分なスポール損傷低減効果を有しているとは言い難い。

表 6 外部損傷寸法の測定結果

	T (cm)	W (g)	T/W _m ^{1/3} (cm/g ^{1/3})	C (cm)	C _d (cm)	S (cm)	S _d (cm)
PPFRC	10.0	100	2.26	15.8	3.3	25.1	4.3
PVAFCR	10.0	100	2.26	13.4	2.5	24.5	3.2
F-PEFRC	10.0	100	2.26	13.1	3.3	1.9	1.1
	10.0	200	1.79	15.9	5.0	23.9	4.9
CFRC	10.0	100	2.26	13.4	3.2	23.8	4.0
	10.0	200	1.79	19.5	4.2	29.5	5.8
SFRC	10.0	100	2.26	14.7	2.8	6.4	2.8
	10.0	200	1.79	18.4	4.3	24.8	5.4
PEFRM	10.0	100	2.26	11.5	3.0	0	0
	10.0	200	1.79	15.3	3.7	25.3	4.8
Mesh-RC	11.1	100	2.51	15.4	3.0	0	0
	11.1	200	1.99	21.4	4.4	27.8	6.7

* T: 版厚, W: 爆薬量, T/W_m^{1/3}: 修正換算コンクリート厚さ,

C: クレータ直径, C_d: クレータ深さ, S: スポール直径,

S_d: スポール深さ

* T/W_m^{1/3} は式 (2) より算出した。但し、K_{TNT}=4.29MJ/kg, K_{PETN}=5.71MJ/kg であり³⁾、本実験で使用した爆薬の成分はペンスリット (PETN) 65% であるから、K=3.71 (=5.71×0.65) MJ/kg とした。

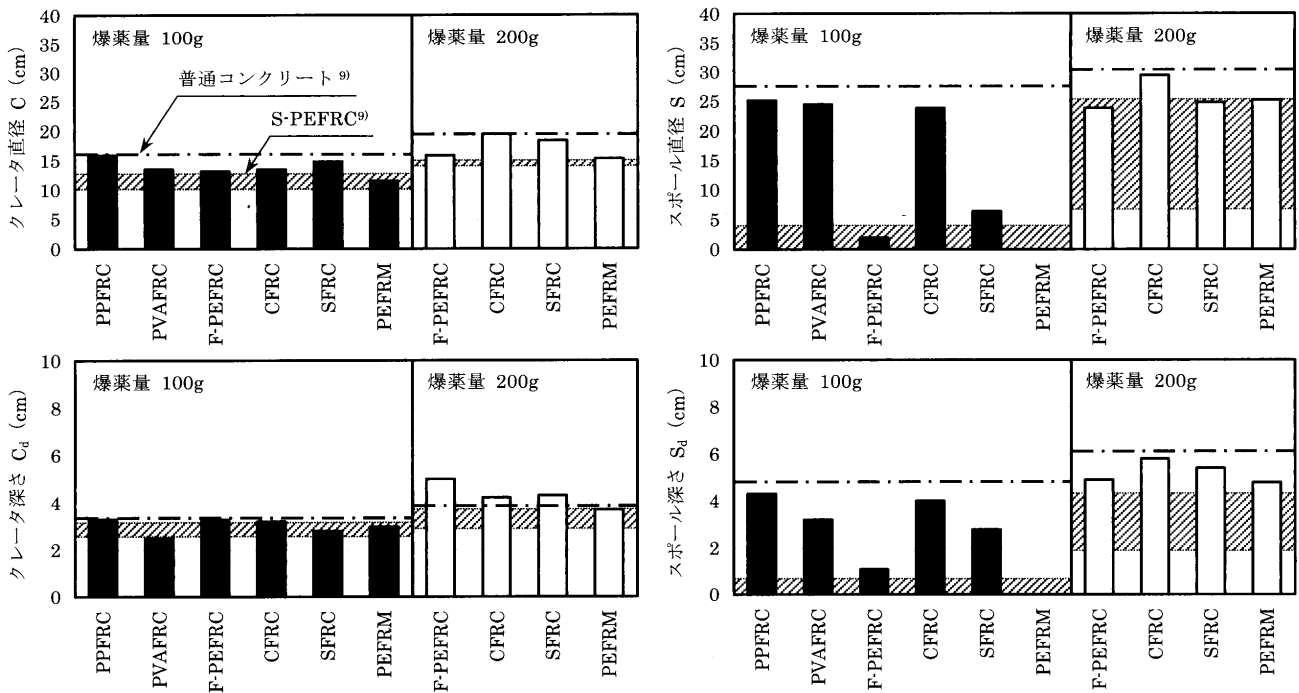


図 5 各種繊維補強コンクリートのクレータおよびスポール寸法の比較

なお、いずれの繊維補強コンクリートも爆薬量 200g になると急速にスポール直径および深さが増大し、特に CFRC は普通コンクリートと大差無くなっている。また、F-PEFRC、SFRC および PEFRM は、爆薬量 200g においても普通コンクリートよりスポール寸法が小さく、若干のスポール損傷低減効果が認められるが、いずれも S-PEFRC 以上の耐爆性能は有していないことが図より明らかである。

4.2.2 普通コンクリートを対象とした損傷予測式との対応

森下・田中らは、接触爆発を受ける普通鉄筋コンクリート版に関して、コンクリート強度、配筋、爆薬量等がその損傷に及ぼす影響について検討し、比較可能な他者の実験データも併せて、実用的な損傷予測式を提案している³⁾⁵⁾。本項では、本実験データとこれら損傷予測式との対応について調査した。

(1) クレータ寸法

図 6 にクレータ直径とクレータ深さの関係を示す。なお、図中には、既報の S-PEFRC 版に関する実験データ⁹⁾および普通コンクリートに関する以下の損傷予測式³⁾⁵⁾も併記している。

$$\frac{C_d}{T} = 0.20 \frac{C}{T} \quad (\text{貫通孔が生じない場合}) \quad (3)$$

$$\frac{C_d}{T} = 0.016 \frac{C}{T} + 0.30 \quad (\text{貫通孔が生じる場合; } 1.6 \leq \frac{C}{T}) \quad (4)$$

ここに、 C_d はクレータ深さ (cm)、 T はコンクリート版厚 (cm)、 C はクレータ直径 (cm) である。

図より、F-PEFRC 試験体 (爆薬量 200g、図中に矢印を付す) に関する実験データが上記予測線よりも深さ方向に大きくなっているが、殆どの実験データが上式の予測精度の目安である $\pm 25\%$ の範囲³⁾⁵⁾内に収まる形となる。従って、式 (3) および (4) は各種繊維補強コンクリート版および裏面メッシュ補強コンクリート版にも適用することが可能であると考えられる。

(2) スポール寸法

図 7 にスポール直径とスポール深さの関係を示す。なお、図中には、既報の S-PEFRC 版に関する実験データ⁹⁾および普通コンクリートに関する以下の損傷予測式³⁾⁵⁾も併記している。

$$\frac{S_d}{T} = 0.15 \frac{S}{T} \quad (\text{貫通孔が生じない場合}) \quad (5)$$

$$\frac{S_d}{T} = -0.017 \frac{S}{T} + 0.71 \quad (\text{貫通孔が生じる場合; } 2.9 \leq \frac{S}{T}) \quad (6)$$

ここに、 S_d はスポール深さ (cm)、 S はスポール直径 (cm) である。

図より、本実験の範囲内では SFRC 試験体 (爆薬量 100g、図中に矢印を付す) に関する実験データが式 (5) による計算値よりも深さ方向に大きくなっている。これは、4.1.2 節で述べたように、スポールに隣接する破壊箇所の剥落が繊維の架橋作用により抑制された結果、スポールが版幅方向に拡大していないためである。 $S/T=1.0 \sim 2.0$ の範囲の実験データが少ないため明確なことは言えないが、上記のような破壊性状を考慮すると、スポール直径が貫通限界より小さい範囲で、繊維補強コンクリートのスポール直径-スポール深さ関係は普通コンクリートのそれと異なってくる可能性が考えられる。このことは、今後更なる実験データの蓄積により明らかになる。なお、普通コンクリートを対象として、貫通限界に近くなるとスポールの形状が複雑になるために実験データのばらつきが大きくなり易いことが報告されているが³⁾⁵⁾、本実験結果によれば、各種繊維補

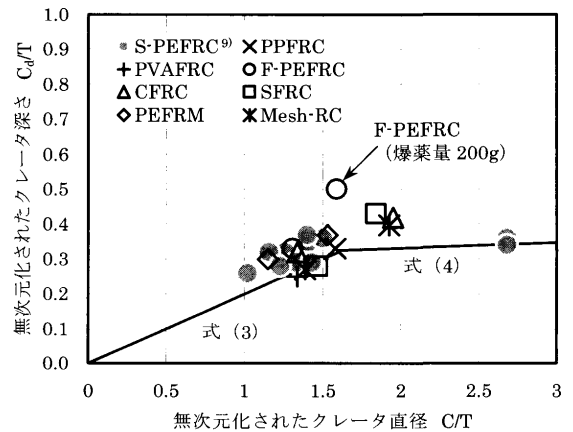


図 6 クレータ直径とクレータ深さの関係

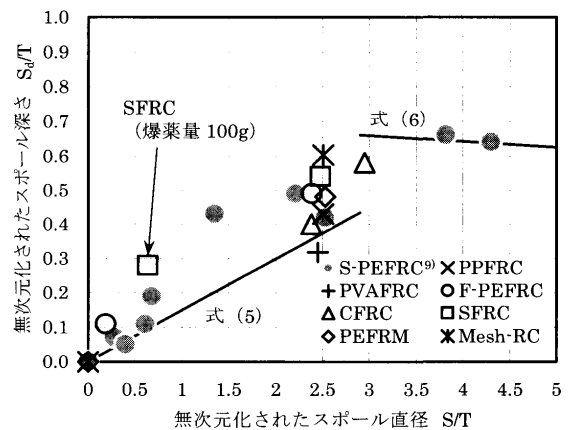


図 7 スポール直径とスポール深さの関係

強コンクリート版および裏面メッシュ補強コンクリート版に対しても同様のことが言えるものと思われる。

(3) クレータ深さおよび全損傷深さ

図 8 および 9 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。なお、図中には、既報の S-PEFRC 版に関する実験データ⁹⁾および普通コンクリートに関する以下の損傷予測式³⁾⁵⁾も併記している。

a) クレータ深さ

$$\frac{C_d}{T} = -0.046 \frac{T}{W_m^{1/3}} + 0.42 \quad (7)$$

b) 全損傷深さ

$$\frac{C_d + S_d}{T} = \frac{C_d}{T} \quad (\text{スポールが生じない場合; } 3.6 < \frac{T}{W_m^{1/3}}) \quad (8)$$

$$\frac{C_d + S_d}{T} = -0.49 \frac{T}{W_m^{1/3}} + 2.0 \quad (\text{クレータおよびスポールの発生; } 2.0 \leq \frac{T}{W_m^{1/3}} \leq 3.6) \quad (9)$$

$$\frac{C_d + S_d}{T} = 1.0 \quad (\text{貫通孔が生じる場合; } \frac{T}{W_m^{1/3}} < 2.0) \quad (10)$$

なお、修正換算コンクリート厚さ $T/W_m^{1/3}$ (cm/g^{1/3}) は式 (2) により算出される損傷評価パラメータであり、各試験体の $T/W_m^{1/3}$ の計算値は前掲の表 6 に併記している。

クレータ深さは、試験体の種類に関わらず式 (7) と概ね良く一致しており、各種繊維補強コンクリート版および裏面メッシュ補強

コンクリート版に対しても同式の適用が可能であると考えられる。

全損傷深さに関して、 $T/W_m^{1/3}=2.26\text{g/cm}^{1/3}$ (爆薬量 100g) 一定で比較した場合、本実験データは全て式 (9) よりも下側にあることから、検討対象とした全ての繊維補強コンクリートが全損傷深さ低減効果を有することが確認される。しかし、S-PEFRC 以外の繊維補強コンクリートの場合には、 $T/W_m^{1/3}=1.79\text{g/cm}^{1/3}$ (爆薬量 200g) になると急速に式 (10) に接近する傾向が認められ、これらの繊維補強コンクリートに関する 2 データ間を結ぶ線分は式 (9) よりもやや急勾配となる傾向にある。

本研究の範囲内で繊維補強コンクリートが爆発荷重に抵抗する機構について詳細に述べることはできないが、以上の原因推定の一助となるデータを得るため、ここではスポール破壊面の観察を行った。代表的な試験体のスポール破壊面における繊維の様相を写真 3 に示す。S-PEFRC および PEFRC に関して、共にスポール破壊面における大部分の繊維突出長さは繊維長さの 1/4 (S-PEFRC : 7.5mm, PEFRC : 4.5mm) を超えていたため、秋濱らの研究²²⁾に準じ、繊維引き抜けがスポール破壊を支配しているものと判断した。但し、その様相には差異が見られ、S-PEFRC の場合には集束繊維内部にセメントペーストが充填され、ドッグボーン状に固化している点で PEFRC とは異なっている。このことから、集束タイプのポリエチレン繊維の場合には、表面が平滑な原糸カットタイプのポリエチレン繊維に比して繊維引き抜けに伴う架橋力低下が生じにくいために、爆薬量 200g においても比較的良好なスポール損傷低減効果を保持しているものと推察される。PVAFC、F-PEFRC および SFRC に関しても同様の観察を行ったが、その様相はどちらかと言えば PEFRC に類似していた。なお、CFRC および PPFRC に関しては、繊維破断がスポール破壊の要因であると判断された。

ところで、図 9 において、2 データ間を結ぶ線分が式 (9) よりも急勾配となる傾向は Mesh-RC 試験体で一層顕著であり、これは、裏面に積層したポリエチレン繊維メッシュが一旦破断すると急速に耐爆効果が失われ、無補強の普通コンクリート版と大差無くなるためである。しかし、裏面メッシュ補強は、繊維シート補強⁸⁾と同様に既存構造物の耐爆補強の面で有用な工法となる可能性があるため、メッシュ補強量の影響等も含め、更なる検討が必要である。

4.2.3 S-PEFRC を対象とした全損傷深さ予測式との対応

ここでは、S-PEFRC を対象とした全損傷深さ予測式 (1) の、S-PEFRC 以外の各種繊維補強コンクリートへの対応について検討した。以下に、式 (1) を再度示す。

$$\frac{C_d + S_d}{T} = 1.946 - 0.5075 \cdot \frac{T}{W_m^{1/3}} - 0.01068 \cdot T_b \quad (1)$$

ここに、 T_b は曲げタフネス (kN・mm) である。図 10 に式 (1) の本実験データへの対応状況を示す。なお、図中には式 (1) 提案時の回帰線およびその推定値 (回帰式に基づいて推定される値) と実測値 (データに基づいて得られる母集団) の 95%信頼区間を併記している。また、Mesh-RC 試験体はここでは検討対象外としている。

式 (1) の本実験データへの対応を検討する上で、確率変数の将来の実現値を予測する観点から、実測値の 95%信頼区間に概ね収まっており、接触爆発を受ける各種繊維補強コンクリート版の全損傷深さは、著者が提案する式 (1) により大略予測す

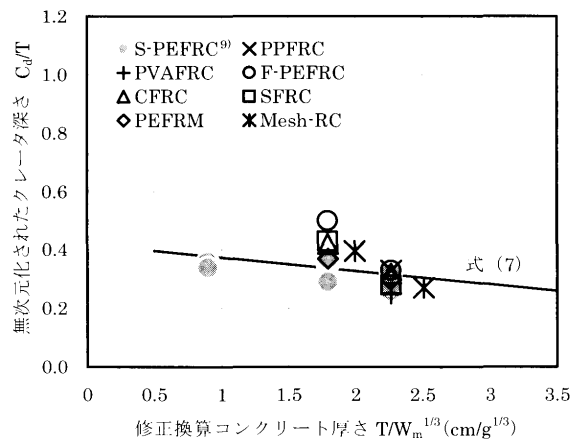


図 8 修正換算コンクリート厚さで整理したクレタ深さ

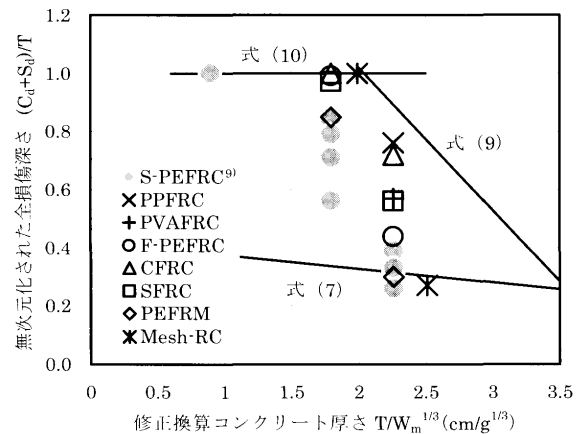


図 9 修正換算コンクリート厚さで整理した全損傷深さ

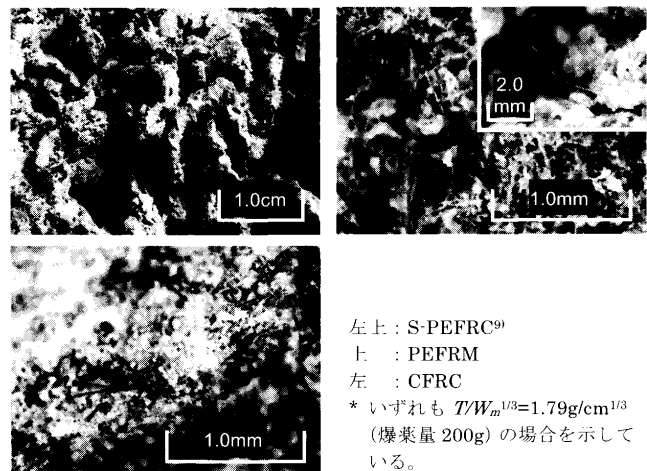


写真 3 代表的な試験体のスポール破壊面における繊維の様相

ることができるものと考えられる。

但し、より詳細に見ると、特に修正換算コンクリート厚さが小さい範囲で、式 (1) は S-PEFRC 以外の各種繊維補強コンクリートに対して若干危険側の予測値を与える傾向にあることが判る。第 2 章で述べたように、式 (1) は普通コンクリートに関する全損傷深さ予測式 (9) とほぼ同じ傾きを保持したまま、曲げタフネスの増減に応じて移動する形式を取っていることを考慮すると、以上の傾向は図 9 において見られた傾向 (2 データ間を結ぶ線分が式 (9) よりも急勾配となる傾向) と対応していると言える。即ち、補強用繊維の引き抜け易さ・破断し易さといった各種繊維補強コンクリートの

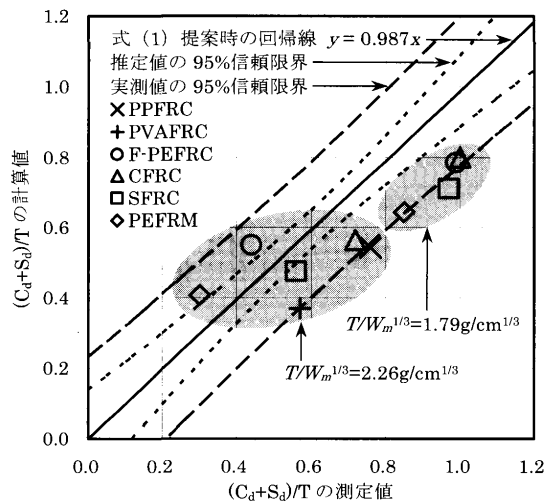


図 10 式 (1) の本実験データへの対応状況

終局破壊性状の差異は曲げタフネスにより正確に表示し得る範囲を超えており、このことが上記の誤差に関係しているものと推察される。式 (1) を S-PEFRC 以外の他の繊維補強コンクリートに適用する場合には、この点に注意する必要があるものと思われる。

また、以上のことは、特に修正換算コンクリート厚さが小さい(爆薬量が大きく、版厚が小さい)範囲で、曲げタフネスの差異を考慮した場合においても、本実験で検討対象とした各種繊維補強コンクリートに比して、S-PEFRC が良好な全損傷深さ低減効果を有していることを示唆するものであると考えられる。

5. まとめ

本研究は、S-PEFRC の耐爆性能評価に資するため、補強用繊維やマトリックスが異なる各種繊維補強コンクリートとの耐爆性能の比較検討を目的に、新たに 6 種類の繊維補強コンクリートの接触爆発試験を実施し、特に繊維補強コンクリートの違いに起因するスポール損傷低減効果の差異について実験的検討を行ったものである。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) 本実験で検討対象とした全ての繊維補強コンクリートが、普通コンクリートと比較した場合、スポール損傷低減効果を有することが確認された。
- 2) 各種繊維補強コンクリートのクレータ損傷程度は、マトリックスや補強用繊維の違いに関わらず、普通コンクリートを対象としたクレータ損傷予測式により予測することが可能である。
- 3) 各種繊維補強コンクリートの全損傷深さは、著者らが提案した、S-PEFRC を対象とした全損傷深さ予測式により大略予測することが可能である。
- 4) 但し、S-PEFRC を対象とした全損傷深さ予測式は、修正換算コンクリート厚さが小さい場合において、他の繊維補強コンクリートに対して若干危険側の予測値を与える傾向にある。このことは、爆薬量が大きく、版厚が小さい範囲で、曲げタフネスの差異を考慮した場合においても、本実験で検討対象とした各種繊維補強コンクリートに比して、S-PEFRC が良好な全損傷深さ低減効果を有していることを示唆しているものと思われる。

謝辞

本研究は、熊本大学工学部 21 世紀 COE プログラム「衝撃エネルギー科学の深化と応用」(拠点リーダー: 秋山秀典教授) より研究支援を受け、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、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、中村哲男氏をはじめとする熊本県産業技術センターの皆様より多大なご協力を賜りました。また、東洋紡績(株)、三菱樹脂(株)、(株)クラレ、(株)フジコンケミカル、(株)ボゾリス物産の各社からは実験資材をご提供いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 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
- 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) 森下政浩ほか 1 名: 繰り返し爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷, 土木学会論文集, No.752/I-66, pp.317-322, 2004.1
- 7) Morishita, M. et al.: Effects of Multiple Detonations on the Damage of Reinforced Concrete Slabs, Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE, Vol.22, No.1, pp.55s-60s, 2005.4
- 8) 大久保一徳ほか 3 名: 繊維シート補強によるコンクリート版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
- 9) 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
- 10) 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), pp.11-17, 1984
- 11) 林卓夫ほか 1 名編: 衝撃工学, 日刊工業新聞社, p.310, 1988
- 12) 武田浩二ほか 3 名: 新素材繊維を用いた高靱性繊維補強コンクリートの開発研究, セメント・コンクリート論文集, No.58, pp.454-459, 2005.2
- 13) 村上聖ほか 3 名: 合成繊維補強コンクリートの最適調合と各種力学的特性, セメント・コンクリート論文集, No.54, pp.737-743, 2001.2
- 14) 村上聖ほか 3 名: 新素材繊維補強コンクリートの開発研究, セメント・コンクリート論文集, No.55, pp.551-556, 2002.2
- 15) 山口信ほか 3 名: 繊維タイプ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.57, pp.464-470, 2004.2
- 16) 村上聖ほか 4 名: 粗骨材混入炭素繊維補強コンクリートの調合と力学的特性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 514 号, pp.35-41, 1998.12
- 17) 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
- 18) 福山洋ほか 1 名: スマートコンクリート—高じん性コンクリート—, コンクリート工学, Vol.39, No.1, pp.104-109, 2001.1
- 19) 土木学会: コンクリート標準示方書 [規準編], pp.267-269, 2007
- 20) RILEM: High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2 (HPFRCC2), Proceedings of the Second International RILEM Workshop, edited by Naaman, A. E. et al., pp.165-169, 1996
- 21) 佐々宏一ほか 1 名: 爆轟衝撃による材料の破壊と波動について, 材料, 第 21 巻, 第 221 号, pp.57-63, 1972.2
- 22) 秋濱繁幸著: 繊維補強コンクリート—新素材繊維を中心に—, 鹿島出版会, p.37, 1992

(2008年4月8日原稿受理, 2008年6月2日採用決定)