

論文 少量のナイロン繊維をあと添加したコンクリートの接触爆発に対する耐爆性能

米田 ひかり^{*1}・山口 信^{*2}・北村 塔子^{*1}・長友 法樹^{*3}

要旨：耐爆構造部材の簡便な構築に資するため、普通コンクリートに少量のナイロン繊維をあと添加して製造したナイロン繊維混入コンクリート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。その結果、(1) ナイロン繊維を体積率で 0.30%混入することにより、スポール（裏面剥離）を抑止する上で必要な版厚を約 29%低減できること、(2) 換算コンクリート厚さがスポール限界を下回り、スポールが生じた場合であっても、ナイロン繊維混入がスポール破壊片飛翔速度の低減を図る上で有効であることが明らかとなった。

キーワード：ナイロン繊維、あと添加、耐爆性能、接触爆発、局部破壊

1. はじめに

接触爆発を受ける鉄筋コンクリート (RC) 版の損傷としては、裏面側コンクリートが破片化して飛散し、裏面剥離（スポール）が生じる点に特徴がある。建物内部の人命を防護するためにはこのスポールを抑止することが許容限界であり、著者らはこれまでに、繊維補強セメント複合材料 (FRCC) の適用がスポール抑止の面で有効であることを明らかにしてきた^{例え ば 1),2)}。

ところで、FRCC の高靱性、ひいては良好な耐爆性能（スポール抑止性能）を得るためには、FRCC の繊維体積率はある程度高くする必要がある。それを可能にするため、FRCC のマトリックスとしては、単位粗骨材量が通常よりも少ないコンクリート調合^りもしくはモルタル調合^りが適用される場合が多い。しかし、これら FRCC では低ヤング係数に起因する部材剛性低下等の問題が懸念される。さらには、これら FRCC は調合が特殊であるが故に実施工で採用され難い点に難点がある。この面で、アジテータトラックで現場に運搬された通常のコンクリートに、短繊維を現場であと添加することである程度の耐爆性能を確保できれば、利便性の観点から有用と成り得るものと思われる。

そこで本研究では、イスラエルで開発され、繊維分散性を向上させた補強用繊維であるナイロン繊維^{3),4)}に着目し、普通コンクリートにそれをあと添加して製造したナイロン繊維混入コンクリート (NFC) 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。

2. 実験方法

2.1 使用材料・調合および製造方法

表-1 に使用材料を示す。補強用繊維として用いたナイロン繊維は、アスペクト比が 800~1000 と大きく、尚且つ繊維分散性を向上させるための特殊な表面処理が施

されたものである。ベースコンクリートは、表-2 に示す通り、設計基準強度 30MPa、目標スランブ 18cm の条件で調合設計した。繊維体積率 V_f は、0, 0.026, 0.15, 0.30 および 0.60% の 5 水準で変化させたが、 V_f が 0.15% 以上の調合では、繊維混入によるスランブ低下を補償するため流動化剤を対セメント質量比で 1.5%（同製品の標準添加量の最大値）添加した。また、 $V_f=0.60\%$ においてはスランブが著しく低下し、密実な試験体の作製が困難と判断されたため、スランブ試験のみの実施とした。なお、 $V_f=0.026\%$ は、収縮ひび割れ低減を目的に選定された、本繊維の標準添加量である。

混練には容量 55L の強制 2 軸攪拌型ミキサを用いた。 $V_f=0.026\%$ では、練り上がったベースコンクリートに繊維を加えて 3 分間練り混ぜた。 V_f が 0.15% 以上の調合では、流動化剤を添加して 90 秒間攪拌した後、繊維を加えて上記と同様に混練した。

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材	山砂+砕砂 混合品 表乾密度：2.70g/cm ³ ，吸水率：2.32%， 最大寸法：2.5mm，粗粒率：2.57
粗骨材	碎石 2005 表乾密度：3.05g/cm ³ ，吸水率：0.41%， 最大寸法：20mm，実積率：57.1%
化学混和剤	高性能 AE 減水剤 ポリカルボン酸系エーテル化合物 流動化剤（増粘剤一液タイプ） ポリカルボン酸系化合物と界面活性剤系特殊増粘剤の複合体
補強用繊維	ナイロン繊維 材質：ナイロン 66，密度：1.16g/cm ³ ， 直径×長さ：12~15μm×12mm， 引張強度：550MPa，引張弾性率：4200MPa

表-2 ベースコンクリートの調合

W/C [%]	s/a [%]	単位量 [kg/m ³]				Sp/C [%]	Slump [cm]
		C	W	S	G		
54	45.0	338	183	809	1115	0.6	19.0

注) W/C：水セメント比，s/a：細骨材率，C：セメント，W：水，S：細骨材，G：粗骨材，Sp：高性能 AE 減水剤

*1 熊本大学 大学院自然科学教育部 博士前期課程（学生会員）

*2 熊本大学 大学院先端科学研究部 准教授・博(工)（正会員）

*3 (株) エイオービー アンド ダヴィンチ インターナショナル 代表取締役

2.2 スランプ値

図－1 にスランプ値と繊維体積率との関係を示す。図中には既報³⁾の目標スランプ 18cm のベースコンクリート(流動化剤無添加)を用いた試験結果を併記している。流動化剤を添加することにより、 $V_f=0.15\%$ 程度までであればベースコンクリートと同等のスランプ値が得られていることが判る。また、 $V_f=0.15\%$ 一定で比較した場合、流動化剤添加によりスランプ値に約 10cm の増加が認められる。 V_f が 0.15%を超えるとスランプ値に低下が認められたが、 $V_f=0.30\%$ 程度までであれば、マッシブな部材や 2 次製品への適用を想定する上では十分なワーカビリティが得られることが確認された。

2.3 静的力学特性

表－3 に静的力学特性の測定値を示す。ここで、本研究のように少量の繊維を含有する FRCC の靱性評価方法として、ASTM C1018 に示される残存強度係数が有効であることが示されている⁴⁾。表－3 を見ると、 $V_f=0.30\%$ に至るまで繊維体積率の増加に伴い残存強度係数が増大していることが確認される。それ以外の力学特性に着目すると、 $V_f=0.15\%$ において圧縮および曲げ強度に低下が認められ、その理由は現段階で判然としないが、それを除けば繊維混入による圧縮特性および曲げ強度の変化はそれほど顕著でないことが判る。

2.4 接触爆発試験方法

(1) 試験体

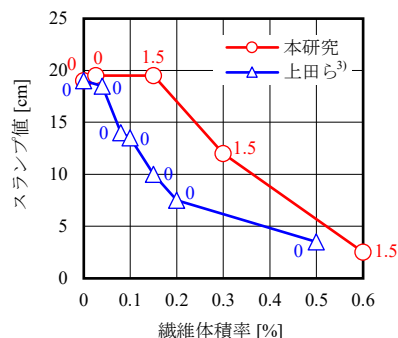
試験体は図－2 に示す通り、500mm 四方、厚さが 80mm の正方形版とした。配筋が局部破壊に及ぼす影響は小さいことが知られているが⁵⁾、割れ防止程度の目的で 120mm ピッチの格子状鉄筋を版厚中央に配した。打込みにあたっては、爆発面が打設面となるようにフレッシュ状態にある NFC を打ち込んだが、棒形振動機は用いずに金ごてで抑え込みながら型枠を加振することで締め固めた。また、鉄筋は NFC を版厚中央まで打ち込んでから吊り下げ、その後残りの NFC を打ち込んだ。従って、本実験では NFC は打設面(爆発面)に平行な面内で 2 次元ランダム配向に近い状態になっていたと考えられる。

表－4 に試験体一覧を示す。 $V_f=0.026, 0.15$ および 0.30%のそれぞれについて、爆薬量を 40, 60 および 80g の 3 水準で変化させた。繊維無混入の試験体については、既往の普通コンクリート版を対象とした損傷評価式⁵⁾の精度を検証する程度の目的で、爆薬量は 60g のみとした。

ここで、接触爆発を受ける普通コンクリート版のスポール限界および貫通限界は下式⁵⁾により求められる。

$$\frac{T}{W_m^{1/3}} = \frac{T}{W^{1/3}} \cdot \left(\frac{K_{TNT}}{K} \right)^{1/3} = \begin{cases} 3.6; \text{スポール限界} \\ 2.0; \text{貫通限界} \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 T : 版厚 [cm], W_m : 爆薬のトリニトロトルエン (TNT) 等価質量 [g], W : 爆薬量 [g], K_{TNT} : TNT の熱



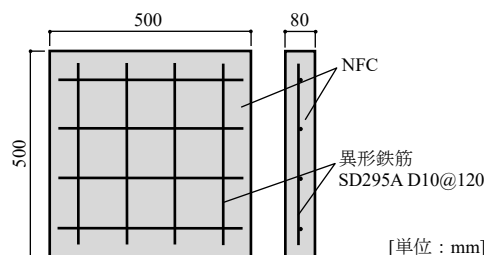
注) プロットエリア中の数値は流動化剤添加率(対セメント質量比) [%]

図－1 スランプ値と繊維体積率との関係

表－3 静的力学特性の測定値

V_f [%]	γ [kN/m ³]	σ_B [MPa]	E [GPa]	ϵ_{co} [μ]	σ_f [MPa]	$R_{45,60}$ [%]
0	24.1 [1.00]	42.3 [1.00]	30.8 [1.00]	2870 [1.00]	6.60 [1.00]	0 [—]
0.026	23.3 [0.965]	41.5 [0.982]	30.3 [0.983]	2710 [0.944]	7.24 [1.10]	2.88 [—]
0.15	24.0 [1.00]	33.0 [0.780]	28.9 [0.939]	2820 [0.985]	5.83 [0.883]	7.02 [—]
0.30	24.4 [1.01]	47.1 [1.11]	30.4 [0.988]	3400 [1.19]	7.04 [1.07]	7.21 [—]

注) γ : 気乾単位体積重量, σ_B : 圧縮強度, E: ヤング係数, ϵ_{co} : 圧縮強度時のひずみ, σ_f : 曲げ強度, $R_{45,60}$: 残存強度係数 ($n_1=45, n_2=60$), 【 】内は $V_f=0\%$ に対する比を表す。圧縮試験は $\phi 100 \times 200$ mm 円柱供試体により、曲げ試験は $100 \times 100 \times 400$ mm 角柱供試体の中央 3 点曲げ載荷(スパン長 300mm)によりそれぞれ実施した。

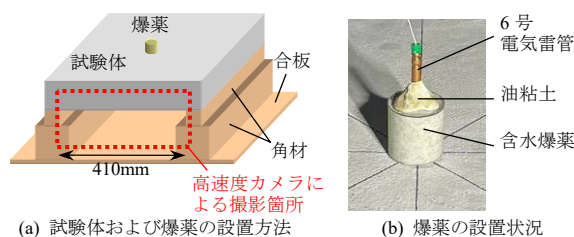


図－2 試験体の形状・寸法および配筋

表－4 試験体一覧

No.	ID	V_f [%]	T [mm]	W [g]	$T/W_m^{1/3}$ [cm/g ^{1/3}]
1	0-60	0	80	60	2.25
2	0.026-40	0.026	80	40	2.57
3	0.026-60	0.026	80	60	2.25
4	0.026-80	0.026	80	80	2.04
5	0.15-40	0.15	80	40	2.57
6	0.15-60	0.15	80	60	2.25
7	0.15-80	0.15	80	80	2.04
8	0.30-40	0.30	80	40	2.57
9	0.30-60	0.30	80	60	2.25
10	0.30-80	0.30	80	80	2.04

注) T: 版厚, W: 爆薬量, $T/W_m^{1/3}$: 換算コンクリート厚さ



図－3 接触爆発試験方法

エネルギー [=4.29MJ/kg], K : 使用した爆薬の熱エネルギー [=3.23MJ/kg] である。表－4 には各試験体の換算コンクリート厚さ $T/W_m^{1/3}$ を併記しているが、普通コン

リート版であれば、爆薬量 40 および 60g で破壊モードは‘スポール’、爆薬量 80g で‘貫通限界’と予想される。

(2) 試験方法

図-3 に示すように試験体を 2 本の木製架台上に設置し、その上面中央で 6 号電気雷管を用いて含水爆薬（密度：1.15～1.23g/cm³、爆速：5800～6000m/s、熱エネルギー：3.23MJ/kg）を起爆させた。装薬の形状は直径と高さが等しい円柱形とし、試験中は起爆後のスポール破壊片の飛翔状況を高速度カメラにより側面から撮影した。

(3) 局部破壊深さの測定方法

接触爆発試験終了後、試験体に生じた局部破壊の深さを測定した。なお、図-4 に示す通り、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クレータおよびスポールの最深部までの距離とした。

が生じるとともに、裏面中央にはそれよりも大規模なスポールが生じたが、貫通孔の発生は認められなかった。すなわち、この試験体の破壊モードは‘スポール’であり、式(1)による計算結果と一致していることが判る。

表-6 に NFC 版の破壊性状を示す。爆薬量 40g は、上述の通り普通コンクリート版であれば破壊モードが‘スポール’となる条件である。しかし、 $V_f=0.30\%$ の試験体

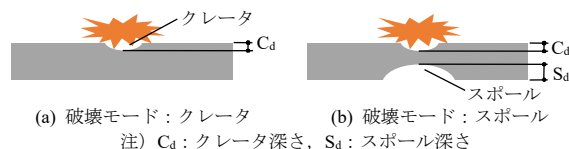


図-4 破壊モードおよび局部破壊深さの定義

表-5 プレーンコンクリート版の破壊性状

		爆薬量 60g	
左：爆発面 右：裏面			
	切断面		

表-6 NFC 版の破壊性状

a) $V_F=0.026\%$							
		爆薬量 40g		爆薬量 60g		爆薬量 80g	
左：爆発面 右：裏面							
	切断面						
b) $V_F=0.15\%$							
		爆薬量 40g		爆薬量 60g		爆薬量 80g	
左：爆発面 右：裏面							
	切断面						
c) $V_F=0.30\%$							
		爆薬量 40g		爆薬量 60g		爆薬量 80g	
左：爆発面 右：裏面							
	切断面						

では、裏面中央付近で剥離に伴う浮きが生じたものの、スポール破壊片の飛散は完全に抑止された状態にあった。すなわち、0.30%程度の繊維体積率であっても、耐爆性能の向上が明確に認められた。なお、同試験体の切断面には、スポール破壊面を形成するはずであった斜めひび割れが発達している様相が確認されるが、ナイロン繊維の架橋作用により、それより下部の飛散が十分に抑止されていることが判る。

爆薬量 40g、 $V_f=0.026\%$ の試験体では、スポールは生じたもののごく小さなスポール破壊片が少量脱落した程度であった。また、 $V_f=0.15\%$ では、 $V_f=0.026\%$ よりもスポールの規模が増大しているが、その理由として、 $V_f=0.15\%$ の試験体では層状に剥離した比較的大きなスポール破壊片が生じていたことから、破壊片自体が強化されて質量が大きくなった結果、その飛散を抑止するための繊維架橋力が不足した可能性が考えられる。

爆薬量 60g では、繊維体積率に関わらず全試験体で破壊モードは‘スポール’となった。また、爆薬量 80g は、上述の通り普通コンクリート版であれば‘貫通限界’となる条件であるが、NFC 版全てにおいて貫通孔の発生は認められなかった。

3.2 局部破壊深さ

(1) プレーンコンクリート版

接触爆発を受ける普通コンクリート版の損傷評価式（修正 McVay 式）⁵⁾によれば、普通コンクリート版の損傷深さは、式(1)に示した換算コンクリート厚さ $T/W_m^{1/3}$ を用いて、以下のように求められる。

クレータ深さ

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

全損傷深さ（クレータ深さとスポール深さの和）

$$(C_d + S_d)/T = C_d/T \quad (3.6 < T/W_m^{1/3}) \quad (3)$$

$$(C_d + S_d)/T = -0.49 \cdot T/W_m^{1/3} + 2.0 \quad (2.0 \leq T/W_m^{1/3} \leq 3.6) \quad (4)$$

$$(C_d + S_d)/T = 1.0 \quad (T/W_m^{1/3} < 2.0) \quad (5)$$

なお、スポール深さは式(3)～(5)による計算値から式(2)による計算値を減じることににより求められる。

爆薬量 60g のプレーンコンクリート版に関する局部破壊深さの実測値と式(2)～(5)による計算値との関係を図-5 に示す。スポール深さの計算値が実測値よりやや大きいものの、実測値と計算値とは概ね良く一致していることから、式(2)～(5)により妥当な精度でプレーンコンクリート版の局部破壊深さを評価できると考えられる。

(2) NFC 版

図-6 にクレータ深さを換算コンクリート厚さで整理した結果を示す。若干のばらつきはあるものの、NFC 版のクレータ深さは式(2)による計算結果と平均的に良く一致する傾向にある。すなわち、ナイロン繊維を

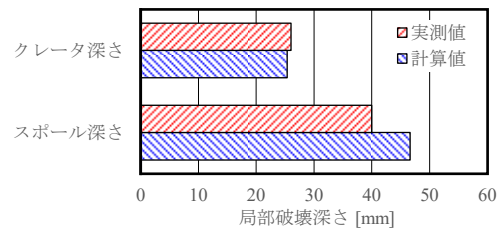


図-5 プレーンコンクリート版における局部破壊深さの実測値と計算値との比較

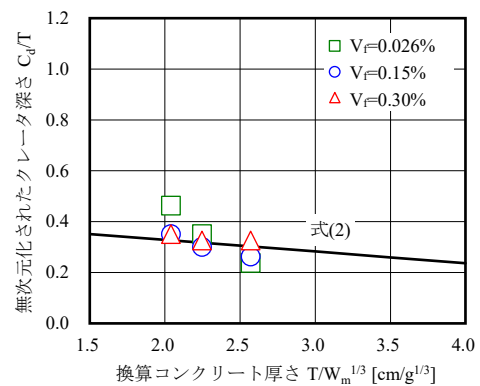


図-6 換算コンクリート厚さで整理したクレータ深さ

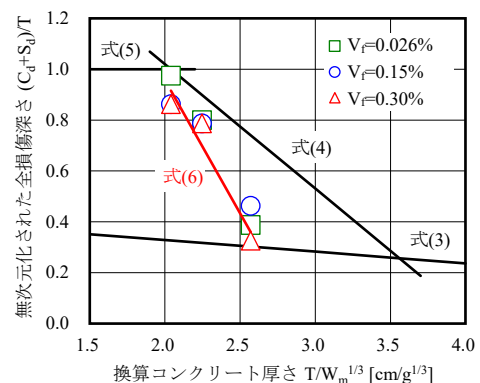


図-7 換算コンクリート厚さで整理した全損傷深さ

$V_f=0.30\%$ まで混入しても、クレータ深さはほとんど変化しないことが判る。

図-7 に全損傷深さを換算コンクリート厚さで整理した結果を示す。本実験の範囲内で、スポール限界に近いと考えられる実験データが得られたのは $V_f=0.30\%$ の試験体であり、そのときの換算コンクリート厚さ $T/W_m^{1/3}$ は $2.57\text{cm/g}^{1/3}$ である。式(1)に示した通り、普通コンクリート版のスポール限界は $T/W_m^{1/3}=3.6\text{cm/g}^{1/3}$ であることから、 $V_f=0.30\%$ の NFC を適用することでスポールを抑止するために必要な版厚を約 29%低減できることが判る。また、本実験の範囲内で、NFC 版 ($V_f=0.30\%$) に関する回帰式として、下式が得られる（決定係数は 0.932）。

$$(C_d + S_d)/T = -1.05 \cdot T/W_m^{1/3} + 3.06 \quad (6)$$

なお、式(6)は式(4)に比してやや急勾配になっており、これは、NFC ではスポール破壊片が繊維により補強されることでやや大きな破片となり、それが飛散に至ることで

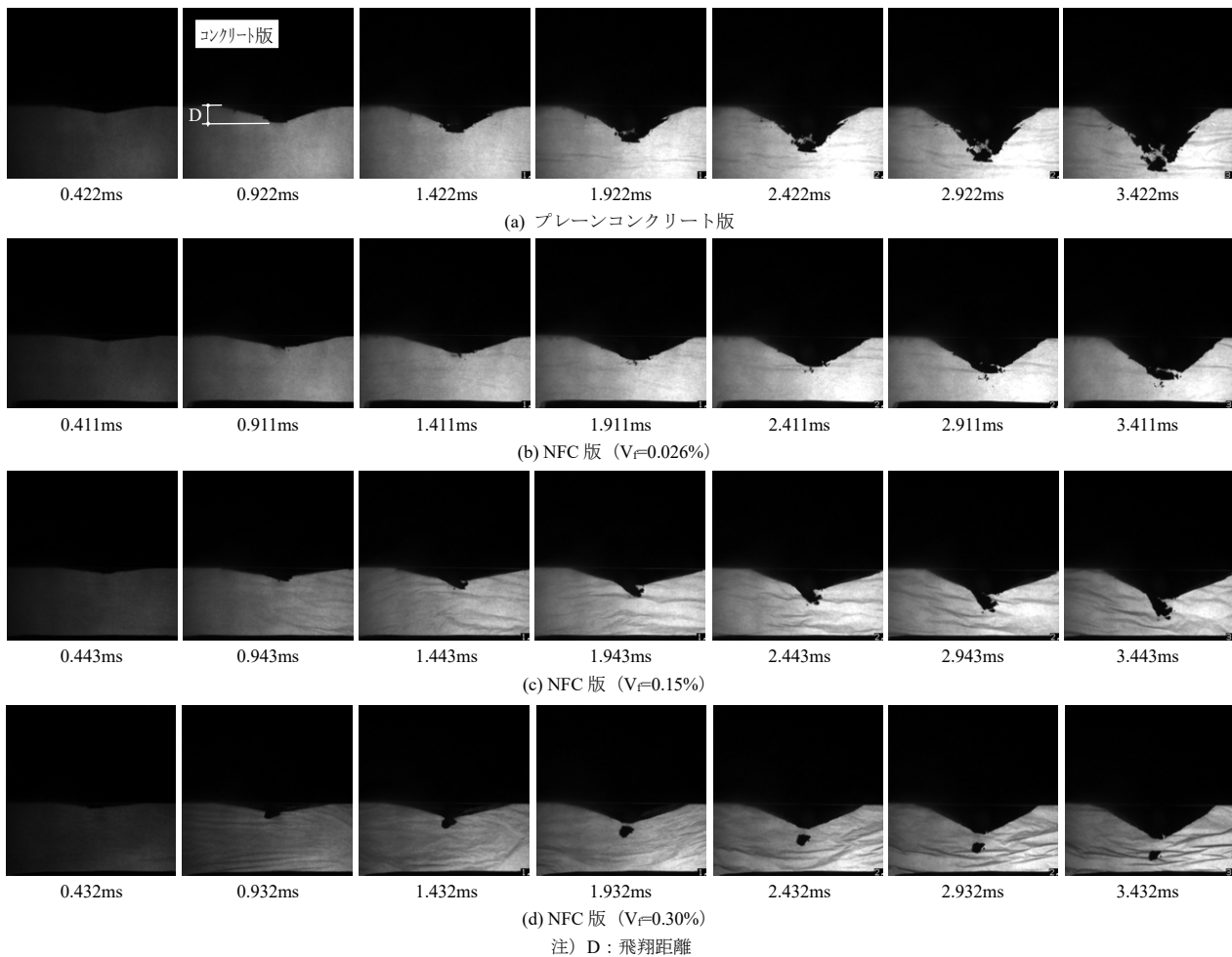


図-8 爆薬量 60g の場合のスポール破壊片の飛行状況

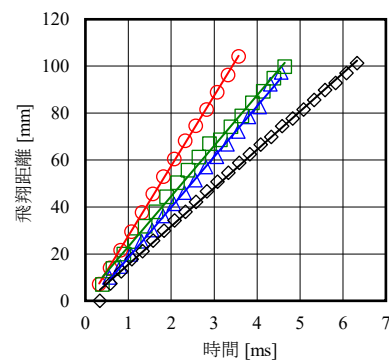
急速にスポール深さが増大するためであると推察される。

ところで長谷川ら⁶⁾は、ポリプロピレン繊維（密度： 0.91g/cm^3 ，寸法： $\phi 0.7 \times 30\text{mm}$ ，引張強度： 500MPa ，引張弾性率： 10GPa ）を $V_f=2.0\%$ で混入したコンクリートのスポール限界が $T/W_m^{1/3}=2.7\text{cm/g}^{1/3}$ であることを報告しており，この値は本研究で対象とした NFC ($V_f=0.3\%$) のそれと比較して若干大きい。このことは，補強用繊維のアスペクト比（ポリプロピレン繊維で 43.0，ナイロン繊維で 800～1000）の違いが耐爆性能に大きく影響する可能性²⁾を示唆している。

3.3 スポール破壊片の飛行状況

図-8 に，例として爆薬量 60g の場合のスポール破壊片の飛行状況を示す。なお，撮影は $50\mu\text{s}$ おきに行ったが，紙数の都合上一部を抜粋して示している。いずれの試験体においても，スポール破壊部はかさぶた状に剥離している訳ではなく，破碎されたコンクリート片が爆薬直下近傍を頂点として飛行する挙動を示していることが判る。

爆薬直下におけるスポール破壊片の飛行距離と時間との関係を調べたところ，図-9 に示すように，いずれの試験体においても破壊片は飛行距離 100mm 前後に至るまで等速直線的に飛行していることが判った。そこで，



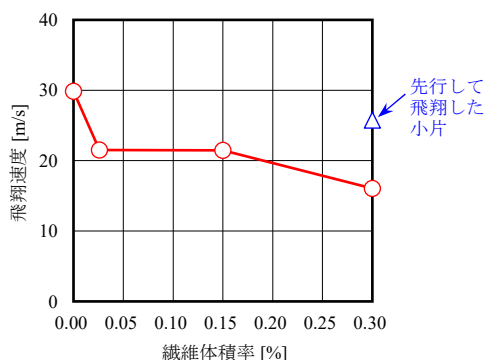
凡例	V_f [%]	回帰式	決定係数
○	0	$D = 29.9t - 2.21$	1.00
△	0.026	$D = 21.5t - 3.17$	0.998
□	0.15	$D = 21.5t - 1.76$	0.996
◇	0.30	$D = 16.3t - 0.672$	0.998

注) D : 飛行距離 [mm], t : 時間 [ms]

図-9 爆薬直下におけるスポール破壊片の飛行履歴（爆薬量 60g の場合）

これらのデータを線形回帰し，回帰式の傾きをもって飛行速度とした。

図-10 に，爆薬量 60g の場合のスポール破壊片飛行速度と繊維体積率との関係を示す。 $V_f=0.30\%$ において，繊維無混入と比較して 50%程度にまで飛行速度が低減され



図－10 爆薬直下におけるスポール破壊片飛翔速度と繊維体積率との関係（爆薬量 60g の場合）

ていることが判る。また、 $V_f=0.026\%$ とごく少量の繊維を混入した場合であっても、30%程度の飛翔速度低減が認められる。このことから、換算コンクリート厚さがスポール限界を下回り、スポールが生じた場合であっても、ナイロン繊維混入はスポール破壊片飛翔速度の低減を図る上で有効であると考えられる。

ここで、図－11 に $V_f=0.30\%$ 、爆薬量 60g におけるスポール破壊面の様相を示す。破壊面からの突出繊維長さの平均値 3mm（繊維長の 1/4）が繊維破断・非破断を判断する上での目安となるが⁷⁾、図中の突出繊維長さは 3mm を超えていないように見受けられることから、繊維破断によりスポール発生に至ったことが予想される。すなわち、スポール破壊面を架橋したナイロン繊維が破断に至るまで十分に伸長することでスポール破壊片の運動エネルギーを吸収した結果、スポール破壊片の飛翔速度が低減されたものと推察される。

4. まとめ

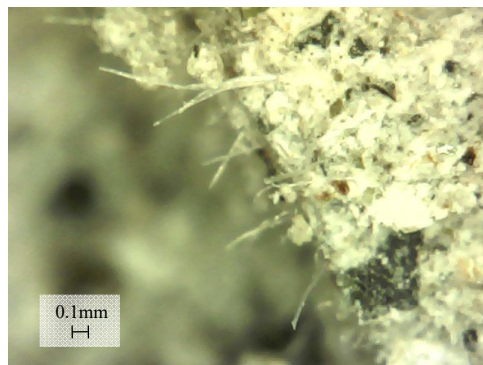
本研究では、耐爆構造部材の簡便な構築に資するため、普通コンクリートに少量のナイロン繊維をあと添加して製造した NFC の接触爆発に対する耐爆性能について実験的検討を行った。本研究の範囲内で得られた知見を要約すると、以下ようになる。

- (1) ナイロン繊維を体積率で 0.30%混入することにより、スポールを抑止する上で必要な版厚を約 29%低減できることが示された。
- (2) 換算コンクリート厚さがスポール限界を下回り、スポールが生じた場合であっても、ナイロン繊維混入がスポール破壊片飛翔速度の低減を図る上で有効であると考えられた。

但し、現段階で実験データ数が限定的であるため、今後更なる検討が必要である。

謝辞

本研究は、(株)エイオービー アンド ダヴィンチ イン



図－11 $V_f=0.30\%$ 、爆薬量 60g の NFC 版におけるスポール破壊面の繊維の様相

ターナショナル、(株)日本ランテック、岡三リビック(株)との共同研究として行われました。また、接触爆発試験は熊本大学産業ナノマテリアル研究所の衝撃実験棟にて行われたものであり、外本和幸教授、田中茂准教授、徳田誠助教、草野健技術補佐員よりご協力を賜りました。さらに、熊本大学技術部の戸田善統技術専門職員および濱崎ありさ技術職員より研究支援を受けるとともに、友廣康太氏、福島鉄平氏、村上智紀氏をはじめとする熊本大学 山口研究室の皆様より多大なご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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，Vol. 619，pp. 187-194，2007
- 2) 森島慎太郎ほか：接触爆発を受ける PVA 繊維補強モルタル版の局部破壊に及ぼす材料因子の影響，日本建築学会構造系論文集，Vol. 85，No. 771，pp. 779-789，2021
- 3) 上田賢司ほか：ナイロン繊維混入コンクリートの諸物性に関する研究（その 1. フレッシュ性状および初期ひび割れ），日本建築学会九州支部研究報告，Vol. 40，No. 1，pp. 89-92，2001
- 4) 黒野薫ほか：合成短繊維混入コンクリートの靱性評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 28，No. 1，pp. 419-424，2006
- 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，構造工学論文集，Vol. 46A，pp. 1787-1797，2000
- 6) 長谷川大ほか：接触爆発を受ける PPFRC 板の耐爆性能に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 65A，pp. 912-924，2019
- 7) 秋浜繁幸：炭素繊維補強セメント複合材（CFRC）について，日本複合材料学会誌，Vol. 10，No. 4，pp. 145-151，1984