

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

準会員 ○磯田倫花*¹ 正会員 山口 信*² 同 劉 秀萍*³

1. 材料施工-4. 特殊仕様のコンクリート 材料・施工

ナイロン繊維, 短繊維補強, 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) 版の損傷を考える際, 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スポール (裏面剥離) を抑止することが設計上の許容限界となる。

前報¹⁾では, RC 部材の簡便な耐爆性能向上技術の開発に資するため, 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 (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。その結果, 繊維長さ 12mm のナイロン繊維を体積率で 0.30% 混入した NFC を適用することにより, スポールを抑止する上で必要な版厚を約 29% 低減できることを明らかにしている。

引き続き本研究では, 繊維長さ l_f を 12 および 36mm の 2 水準で, 繊維体積率 V_f を 0, 0.15, 0.30 および 1.3% の 4 水準でそれぞれ変化させ, これら因子が NFC 版の耐爆性能に及ぼす影響について実験的検討を行った。

2. 実験方法

2.1 使用材料および調査

表 1 にナイロン繊維の外観および物性値を, 表 2 に使用調査をそれぞれ示す。使用したナイロン繊維は, 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り, 本実験では l_f を 12 および 36mm で変化させた。マトリックスの調査条件に関して, $V_f=0$, 0.15 および 0.30% のケースでは普通コンクリート (NC) 調査とし, 繊維無混入時の設計基準強度 30MPa, 目標スランプ値 18cm の条件で調査設計した。また, 繊維混入に伴うスランプ低下を補償するため, 流動化剤をあと添加した。 $V_f=1.3\%$ のマトリックスには, 既報²⁾で提案した高繊維体積率対応型 (HV) 調査を適用した。

図 1 にスランプ値と繊維体積率との関係を示す。NC 調査を適用した $l_f=12\text{mm}$ のケースに着目すると, 同一 V_f であれば流動化剤添加によりスランプ値に約 10cm の増大が認められる。 $l_f=36\text{mm}$ とした場合には, $l_f=12\text{mm}$ と比較してスランプ値が約 4cm 低下したが,

表 1 ナイロン繊維の外観および物性値

外観	物性値
	材質 : ナイロン 66
	密度 : 1.16g/cm ³
	直径×長さ : 12~15μm×12mm
	: 12~15μm×36mm
	引張強度 : 550MPa
	引張弾性率 : 4200MPa
	吸水率 : 4.5~8.0%

表 2 使用調査

a) 普通コンクリート調査 ($V_f=0, 0.15$ および 0.30% に適用)

l_f [mm]	W/C [%]	s/a [%]	単位量 [kg/m ³]					Sp/C [%]
			C	W	S1	S2	G	
12	54	45.0	338	183	809	—	1115	0.6
36	54	44.4	341	184	—	745	1125	0.4

注) C : 普通ポルトランドセメント, W : 水, S1 : 山砂・砕砂混合品 (表乾密度 : 2.70g/cm³, 粗粒率 : 2.57), S2 : 山砂 (表乾密度 : 2.53g/cm³, 粗粒率 : 2.49), G : 砕石 2005 (表乾密度 : 3.05g/cm³, 実積率 : 57.1%), Sp : 高性能 AE 減水剤

b) 高繊維体積率対応型調査 ($V_f=1.3\%$ に適用)

l_f [mm]	W/B [%]	Sg/B [%]	s/a [%]	単位量 [kg/m ³]					Sp/C [%]
				C	Sg	W	S	G	
12, 36	50	50	65.0	325	325	325	722	461	0.5

注) C : 早強ポルトランドセメント, Sg : 高炉スラグ微粉末 6000 (密度 : 2.91g/cm³, 比表面積 : 6180cm²/g), B (=C+Sg) : 結合材, W : 水, S : 山砂 (表乾密度 : 2.53g/cm³, 粗粒率 : 2.49), G : 砕石 6 号 (表乾密度 : 3.00g/cm³, 実積率 : 59.4%), Sp : 高性能 AE 減水剤

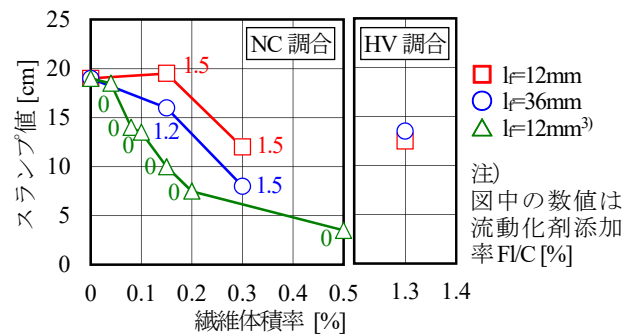


図 1 スランプ値と繊維体積率との関係

その場合も型枠の加振等を適切に行うことで密実な NFC を製造することができた。また, HV 調査を適用した NFC では, $V_f=1.3\%$ であってもマッシュな部材への適用を想定する上では十分なスランプ値が得られた。

2.2 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, 繊維補強コンクリートの曲げ靱性は曲げ靱性係数により評

価されるのが一般的であるが、NC 調合を適用した NFC ではひずみ軟化型の挙動が確認されたため、残存強度係数により曲げ靱性を評価した。表より残存強度係数は、 V_f の増加に伴い増大し、 V_f 一定であれば $l_f=36\text{mm}$ の方で高くなる傾向にある。 $V_f=1.3\%$ の調合においても、 $l_f=36\text{mm}$ の方で高い曲げ靱性が得られた。

2.3 試験体

試験体は、図 2 に示す通り 500mm 四方、厚さ 80mm の平板とし、版厚中央に縦横の間隔 120mm の格子状鉄筋を配した。試験体は、NC 調合で材齢 28 日目まで、HV 調合で材齢 14 日目までそれぞれ標準養生後、気中養生を経て試験に供した。接触爆発試験は、爆薬量を 40, 60 および 80g の 3 水準で変化させて行った。

ここで、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⁴⁾で表される。

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

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。本実験条件における換算コンクリート厚さ $T/W_m^{1/3}$ は、 $W=40\text{g}$ で $2.57\text{cm/g}^{1/3}$ 、 $W=60\text{g}$ で $2.25\text{cm/g}^{1/3}$ 、 $W=80\text{g}$ で $2.04\text{cm/g}^{1/3}$ であるため、いずれも普通コンクリート版であればスポールが生じ、特に $W=80\text{g}$ は貫通限界となる条件であることが判る。

2.4 接触爆発試験方法

試験体は図 3 に示す通り 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を起爆させた。また、高速度カメラを用いてスポール破壊片の飛翔状況を側面から撮影した。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊性状

表 4 に NFC 試験体の破壊性状を示す。なお、普通コンクリート試験体の破壊性状は紙数の都合上割愛するが、破壊モードは式(1)による計算結果と一致していた。

$l_f=12\text{mm}$ の場合、爆薬量 40g では $V_f=0.15\%$ でスポールが生じたものの、 $V_f=0.30$ および 1.3% ではスポールが抑止された。爆薬量 60g 以上では、 V_f に関わらず全ての試験体でスポールが生じたが、貫通孔の発生は認められなかった。

$l_f=36\text{mm}$ の場合、 $V_f=0.15$ および 0.30% では爆薬量

表 3 静的力学特性の測定値

l_f [mm]	V_f [%]	調合	γ [kN/m ³]	σ_B [MPa]	E [GPa]	σ_f [MPa]	$R_{45,60}$ [%]	$\bar{\sigma}_b$ [%]
12	0	NC	24.1	42.3	30.8	6.60	0	—
	0.15	NC	24.0	33.0	28.9	5.83	7.02	—
	0.30	NC	24.4	47.1	30.4	7.04	7.21	—
	1.3	HV	21.4	54.7	19.8	4.77	—	2.92
36	0	NC	23.1	35.0	34.0	6.26	0	—
	0.15	NC	23.2	37.4	30.5	5.89	14.3	—
	0.30	NC	23.8	40.8	30.6	5.64	16.2	—
	1.3	HV	21.3	55.3	22.6	4.08	—	3.14

注) γ : 気乾単位体積重量、 σ_B : 圧縮強度、E : ヤング係数、 σ_f : 曲げ強度、 $R_{45,60}$: 残存強度係数 ($n_1=45$, $n_2=60$)、 $\bar{\sigma}_b$: 曲げ靱性係数 (限界変位 2.0mm)

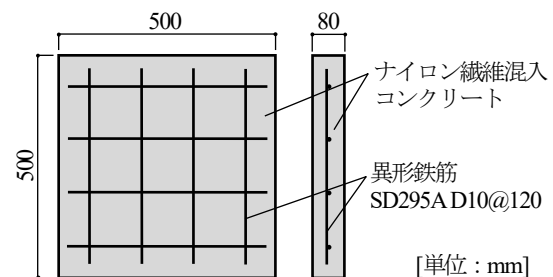


図 2 試験体の形状・寸法および配筋

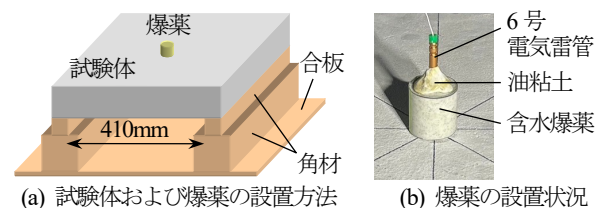


図 3 接触爆発試験方法

に関わらず全ての試験体にスポールが生じた。これに対し $V_f=1.3\%$ では、爆薬量 40g においてはスポールが完全に抑止され、爆薬量 60g では裏面に顕著な浮きが生じたものの、ナイロン繊維の架橋作用によりスポール破壊片が飛散から免れている様相が確認された。

なお、いずれの試験体においても裏面中央近傍を起点とする放射状ひび割れの発生が認められる。さらに、試験体側面に平行なひび割れが見られるが、これは側面で反射した引張応力波によるものと推察される。

3.2 局部破壊寸法

図 4 にクレータ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) を $T/W_m^{1/3}$ で整理した結果を示す。なお、図中には、普通コンクリート版を対象とした下式⁴⁾による計算値を併記している。

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

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

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

表 4 NFC 試験体の破壊性状

V_f [%]	$l_f=12\text{mm}$			$l_f=36\text{mm}$		
	爆薬量 40g	爆薬量 60g	爆薬量 80g	爆薬量 40g	爆薬量 60g	爆薬量 80g
0.15						
0.30						
1.3						

注) 左：断面，右：裏面，支持位置は，裏面では左右両端，切断面では上下両端である。

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

ここに， C_d ：クレタ深さ [cm]， S_d ：スポール深さ [cm]。

クレタ深さは，若干のばらつきはあるが式(2)による計算値と概ね良く一致しており，ナイロン繊維混入がクレタ深さに及ぼす影響は小さいと考えられる。

全損傷深さに関して，図中には参考のため PPFRC 板 ($V_f=2.0\%$) に関する損傷評価式⁵⁾による計算値を併記しているが，NFC 版の全損傷深さは PPFRC 版のそれと同等もしくはそれ以下となっている。また，本実験の範囲内でスポール限界に近いと思われる結果が得られたのは① $l_f=12\text{mm}$ かつ $V_f=0.30\%$ ，② $l_f=12\text{mm}$ かつ $V_f=1.3\%$ および③ $l_f=36\text{mm}$ かつ $V_f=1.3\%$ の 3 条件であるが，普通コンクリート版のスポール限界である式(1)と比較すると，①および②で $1.03\text{cm/g}^{1/3}$ ，③で $1.35\text{cm/g}^{1/3}$ の低減となり，③において最もスポール限界が低減されている。しかし，これを $V_f=1.0\%$ あたりの低減効率に換算すると表 5 に示す通り，①で $3.43\text{cm/g}^{1/3}\%$ ，②で $0.792\text{cm/g}^{1/3}\%$ ，③で $1.04\text{cm/g}^{1/3}\%$ となり， V_f が高い調査ではスポール限界低減効率が低下する傾向にある。さらに，高い V_f を実現するためには HV 調査のように単位結合材量が多い調査を適用せざるを得ない。以上のことを考慮すると，ナイロン繊維混入にあたっては V_f を必要以上に高くするよりも，NC 調査を適用し V_f を 0.30% 程度に抑える方がスポール限界低減効率の面で有用であると考えられる。

ところで図 4 中の(a)に示す通り， $l_f=36\text{mm}$ かつ

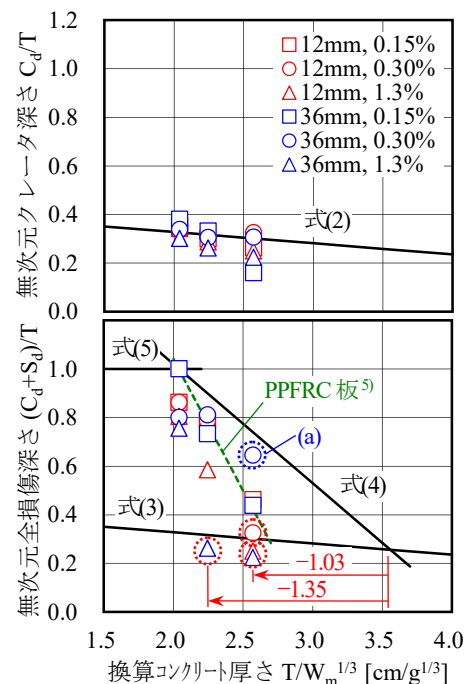


図 4 換算コンクリート厚さで整理した損傷深さ

表 5 スポール限界低減効率

	l_f [mm]	V_f [%]	スポール限界低減量 [cm/g ^{1/3}]	$V_f=1.0\%$ あたりの低減率 [cm/g ^{1/3} %]
①	12	0.30	1.03	3.43
②	12	1.3	1.03	0.792
③	36	1.3	1.35	1.04

$V_f=0.30\%$ において他に比して全損傷深さがやや大きい結果となっている。また，同試験体では図 5 に示す通り，質量が繊維無混入と比較して 6 倍以上と大きなスポール破壊片の発生が認められた。このことから，破壊片自体が強化されて質量が増加したために飛散時

の運動エネルギーも増大し、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。

3.3 スポール破壊片の飛翔状況

図6に爆薬量60gの場合のスポール破壊片（爆薬直下）の飛翔（または変位）履歴を示す。高速度画像の撮影は起爆直後から3.5～5ms前後までの間行なったが、 l_f に関わらず V_f が0～0.30%の範囲ではスポール破壊片は等速直線的に飛翔している様相が確認された。一方、 $V_f=1.3\%$ ではスポール破壊片が経時とともに減速する性状を示した。なお、 $l_f=36\text{mm}$ かつ $V_f=1.3\%$ では上述の通りスポール破壊片の飛散が抑止されたため、最終的な変位速度は0となるはずであるが、撮影時間内にその様相は確認されなかった。

以上の履歴に基づき算出した飛翔（または変位）速度を図7に示す。なお、 $V_f=1.3\%$ に関しては便宜上、撮影時間終了間際の4ms前後の速度を記載している。 $V_f=0\sim0.30\%$ のケースに着目すると、 $l_f=12\text{mm}$ では V_f の増加に伴い飛翔速度が低下する性状を示したが、 $l_f=36\text{mm}$ では $V_f=0.30\%$ において飛翔速度が増大しており、全損傷深さと同様の傾向を示した。また、 $V_f=1.3\%$ においては、最終的に5ms前後まで速度が低下していることが確認される。前報¹⁾では、スポール破壊面を架橋するナイロン繊維が破断することでスポールが生じることを明らかにしたが、本実験結果によれば、架橋繊維数の増加に伴いスポール破壊面における繊維の破断エネルギーが増大し、スポール破壊片の運動エネルギー低減に繋がったものと考えられる。

4. まとめ

本研究の範囲内で、以下に示す知見が得られた。

- (1) ナイロン繊維混入にあたっては、 V_f を必要以上に高くするよりも、NC調合を適用し V_f を0.30%程度に抑える方がスポール限界低減効率の面で有用であると考えられた。
- (2) スポール破壊片の飛翔（または変位）速度は、 $l_f=36\text{mm}$ かつ $V_f=0.30\%$ でやや逸脱したことを除き、 V_f の増加に伴い低下する性状が確認された。

【謝辞】

本研究は、(株)エイオービーアンドダヴィンチインターナショナル、(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。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、田中茂教授、徳田誠助教、大

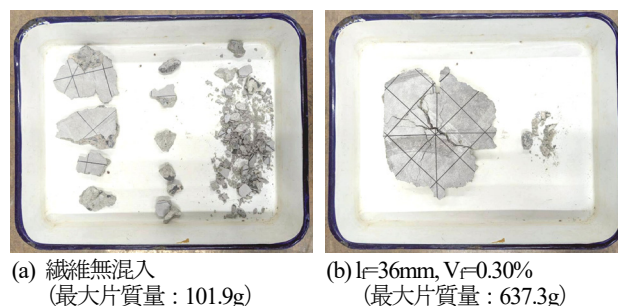


図5 スポール破壊片の外観例

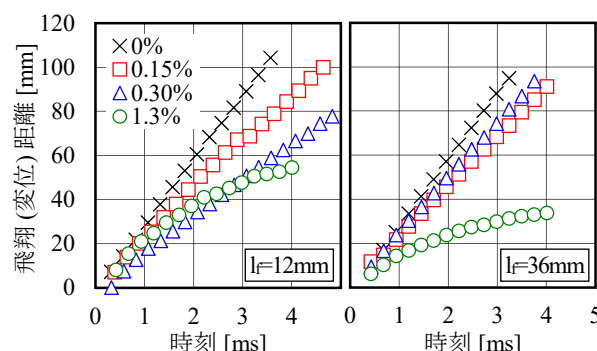


図6 爆薬直下におけるスポール破壊片飛翔（または変位）履歴（爆薬量60gの場合）

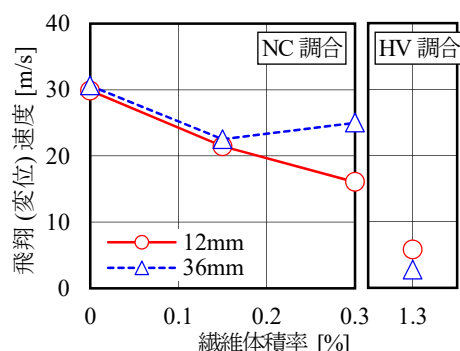


図7 爆薬直下におけるスポール破壊片飛翔（または変位）速度（爆薬量60gの場合）

石将範産学連携研究員よりご協力を賜りました。また、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、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。また、日鉄高炉セメント(株)からは資材提供を受けました。ここに記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 北村塔子，米田ひかりほか：比較的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，日本建築学会九州支部研究報告，No. 64，pp.25-32，2005
- 2) 山口信ほか：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査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，Vol. Vol. 73，No. 634，pp.2091-2100，2008
- 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) 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
- 5) 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

*1 熊本大学工学部土木建築学科 学部生

Under Grad., Dept. of Civil and Env't. Eng. and Arch., Faculty of Eng., Kumamoto Univ.

*2 熊本大学大学院先端科学研究部 准教授・博(工)

Assoc. Prof., Faculty of Advanced Science and Technology, Kumamoto Univ., Dr. Eng.

*3 熊本大学大学院自然科学教育部 博士前期課程

Master's Course, Graduate School of Science and Technology, Kumamoto Univ.