

## (35) 剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の裏面剥離 に対する繊維補強の効果

Effects of fiber reinforcements on scabbing damage of concrete plates subjected to high velocity impact

別府万寿博\*, 三輪幸治\*\*, 高橋順\*\*\*, 小川敦久\*\*\*\*  
Masuhiro Beppu, Koji Miwa, Jun Takahashi, Atsuhisa Ogawa

\*博(工), 防衛大学校准教授, 建設環境工学科(〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

\*\*博(工), 陸上自衛隊 システム開発隊(〒162-0845 新宿区市谷本村町 5-1)

\*\*\*博(工), 電気化学工業(株) 中央研究所(〒194-8560 町田市旭町 3-5-1)

\*\*\*\*博(工), (株)クラレ 岡山事業所産資開発部(〒702-8045 岡山市南区海岸通 1-2-1)

*Key Words: high velocity impact, scabbing damage, concrete plate, fiber reinforcement*

キーワード: 高速衝突, 裏面剥離, コンクリート板, 繊維補強

### 1. はじめに

コンクリート構造物が飛翔体の高速衝突を受けると、曲げやせん断による全体破壊や表面破壊、裏面剥離などの局部破壊が生じる。特に、コンクリート部材に発生する局部破壊については現象が複雑であることに加え実験データが少ないため、破壊メカニズムや設計法に関する研究はあまり行われていない。こうした背景から、著者らはこれまでに、剛飛翔体の高速衝突問題において衝突速度や被衝突体であるコンクリート板の板厚・強度の相違が局部破壊の発生に及ぼす影響について実験的研究<sup>1)</sup>を行ってきた。同時に、数値シミュレーションにより、局部破壊の発生メカニズムについても検討を行った<sup>2)</sup>。さらに、局部破壊の一つである貫入深さを評価するための理論モデルについても基礎的な検討を行っている<sup>3),4)</sup>。

飛翔体の高速衝突を対象としたコンクリート構造物の防護設計法では新設および既設構造物に対する補強方法が必要であるが、検討した例は少ない。過去に行われた衝撃荷重を受けるコンクリート部材に対する補強方法としては、耐震補強やコンクリートの剥落防止に用いられている連続繊維シートや短繊維補強コンクリートの適用<sup>5),6)</sup>に関する研究がある。

本研究は、剛飛翔体が高速衝突する場合にコンクリート板に生じる裏面剥離に対する補強を対象として、連続繊維シート補強および短繊維補強の効果

を調べたものである。連続繊維シートには、カーボンおよびアラミド繊維を用いた。また、短繊維補強コンクリートとして、短繊維とモルタルやコンクリートを組合せた3種類の材料を用いている。

### 2. 実験の概要

#### 2.1 高速衝突実験の概要

実験は、図-1に示す高圧空気式飛翔体発射装置を用いて行った。飛翔体は鋼製で、写真-1に示すように先端の形状が半球型で質量は50gである。コンクリート供試体は、寸法が縦50cm×横50cmとし、板厚は8cmとした。コンクリートの圧縮強度は、後述する連続繊維シート補強の実験ケースでは38.9N/mm<sup>2</sup>、短繊維補強の実験ケースでは76.6N/mm<sup>2</sup>であった。また、連続繊維シート補強のケースにおける衝突速度は300m/sに設定した。短繊維補強のケースでは300m/sおよび400m/sの衝突速度で実験を行った。

#### 2.2 連続繊維シートおよび短繊維補強コンクリートの力学特性

連続繊維シート補強の実験ケースでは、補強の基準として鋼板接着補強した供試体を作製した。表-1に、鋼板の力学的特性値を示す。鋼板には、SS400の亜鉛メッキ塗装鋼板を用いる。鋼板の厚さは、0.3mmおよび1.0mmである。鋼板とコンクリート板は、アクリル系接着剤樹脂を用いて接着した。連

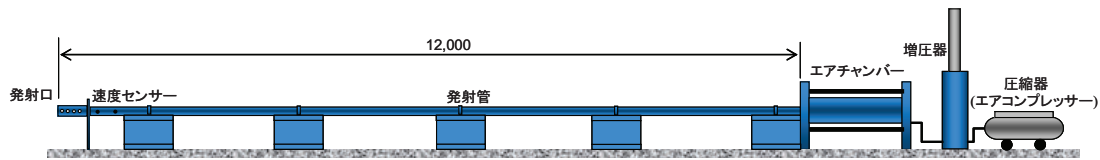


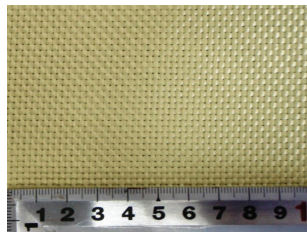
図-1 高圧空気式飛翔体発射装置の概要

表-1 鋼板の力学的特性値

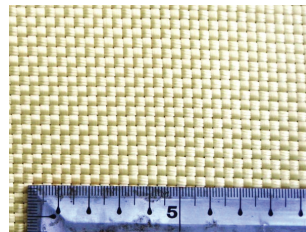
材料	厚さ t(mm)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	縦弾性係数 E(N/mm <sup>2</sup> )	引張剛性 Et(kN/mm)	破断伸び (%)
鋼板	0.3	7.7	400	200000	60	21
	1	7.7		200000	200	21

表-2 連続繊維シートの力学的特性値

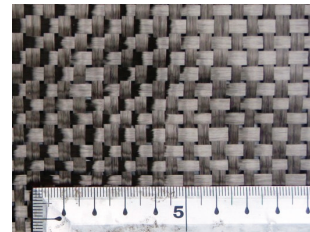
繊維シートの種類	織込・枚数	目付量 (g/m <sup>2</sup> )	設計厚さ t(mm)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	縦弾性係数 E(kN/mm <sup>2</sup> )	引張剛性 Et(kN/mm)	破断伸び (%)
アラミド繊維	2方向1枚	330	0.095	1.45	2060	118000	11.2	2
	2方向2枚		0.19					
	2方向1枚	650	0.193					
カーボン繊維	2方向1枚	330	0.091	1.7	2500	245000	22.3	1.3



(a) アラミド繊維シート  
(目付量 330g/m<sup>2</sup>)



(b) アラミド繊維シート  
(目付量 650g/m<sup>2</sup>)



(c) 炭素繊維シート  
(目付量 330g/m<sup>2</sup>)

写真-2 繊維シートの種類

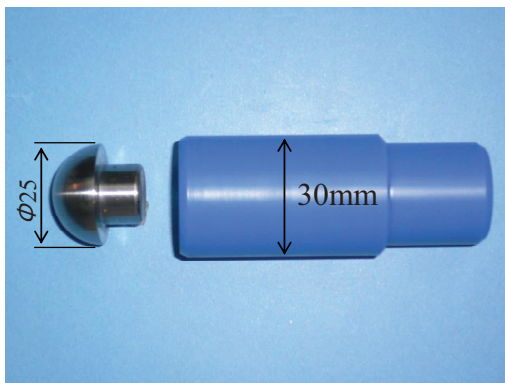


写真-1 飛翔体および固定具

連続繊維シートには、アラミド繊維、炭素繊維、ビニロン繊維、ポリエチレン繊維等がある。これらの繊維シートは、構造物の耐震補強やトンネルにおけるコンクリートの剥離防止のために使用されている。実験では連続繊維シートのうち、コンクリート板を裏面補強することで耐爆性能の向上が確認されている<sup>5)</sup>、アラミド繊維シートおよび炭素繊維シート

を用いる。写真-2 に、実験に用いるアラミド繊維シートおよび炭素繊維シートを、表-2 に、それぞれの連続繊維シートの力学的特性値を示す。アラミド繊維および炭素繊維シートはともに平織の2方向繊維シートであり、アラミド繊維シートの目付量は330g/m<sup>2</sup>および650g/m<sup>2</sup>、炭素繊維シートの目付量は330g/m<sup>2</sup>である。表から、ヤング係数および引張強度は炭素繊維の方がアラミド繊維よりも大きいことがわかる。連続繊維シートとコンクリート板は、アクリル系接着剤樹脂を用いて接着した。

表-3 に、短繊維補強コンクリートの作製に用いた短繊維の種類と力学的特性値を示す。供試体 TypeA から TypeC の順に、短繊維の直径は太く、また長さは長くなる特徴がある。一方、ヤング係数と引張強度は TypeA から TypeC の順に小さくなる。表-4 に短繊維補強コンクリートの力学的特性値を示す。TypeA と TypeB はモルタルに短繊維を混入し、TypeC はコンクリートに短繊維を混入して作製した。ヤング係数は、TypeA から TypeC の順に大

表-3 短繊維の力学的特性値

種類	直径 (mm)	長さ (mm)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
TypeA	0.04	8	1.3	38	1600
TypeB	0.10	12	1.3	28	1200
TypeC	0.66	30	1.3	23	900

表-4 短繊維補強コンクリートの力学的特性値

種類	マトリックス の種類	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
TypeA	モルタル	1.96	23.8	0.15	66.5
TypeB	モルタル	2.26	30.6	0.25	80.2
TypeC	コンクリート	2.28	37.2	0.20	65.9

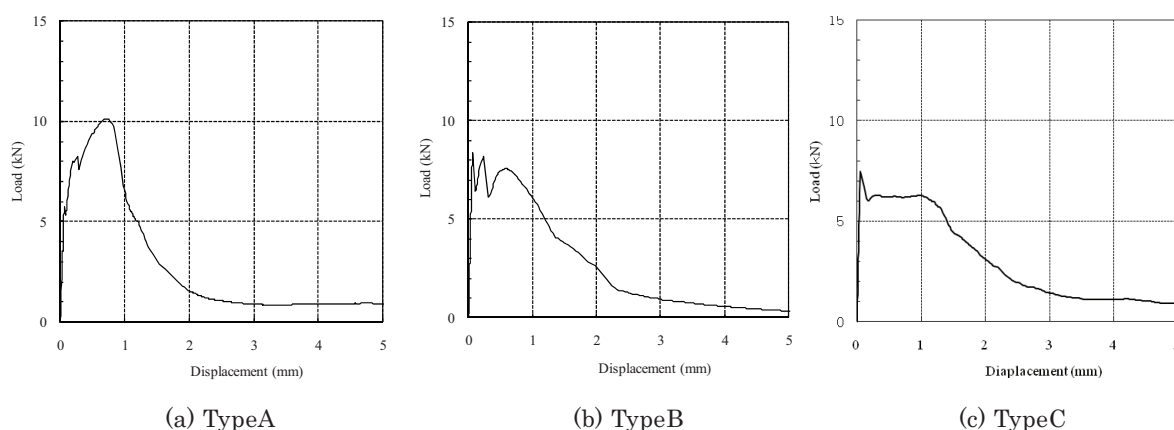


図-2 静的曲げ試験で得られた荷重～変位関係

きくなる。圧縮強度は、65～80N/mm<sup>2</sup>の値であった。図-2は、静的曲げ試験で得られた荷重～変位関係を示している。これより、最大荷重は TypeA が最も大きいことがわかる。また、最大荷重後の軟化挙動については、TypeA に比べて TypeB および TypeC では荷重が緩やかに低下する傾向がある。

### 3. 連続繊維シート補強の効果

図-3に、無補強および鋼板で裏面補強した場合の破壊状況について示す。無補強供試体の破壊モードは裏面剥離で、裏面剥離の直径の大きさは約29cmであった。鋼板で補強した場合の貫入深さは、いずれも2.2cmであり、無補強の場合とほぼ同じであった。厚さ0.3mmの鋼板によって補強した板の場合は、裏面の鋼板に損傷は認められない。また、板の断面をみると、板の内部から斜めひび割れが発生して裏面まで到達しているが、板の内部のひび割れ発生が低減しており、斜めひび割れが連結していないため、剥離片が形成されていないことがわかる。したがっ

て、破壊モードは表面破壊と判定した。鋼板の厚さが1.0mmの場合は、斜めひび割れが2層に発生しており、板の表面に近い方の斜めひび割れは裏面に到達していないが、裏面に近い方のひび割れが裏面に到達しており、裏面剥離が生じていることがわかる。剥離領域の直径は約22cmであり、無補強板の場合に比べて小さい。すなわち、鋼板で補強した場合は、裏面の剥離領域が小さくなることがわかる。また、鋼板はほとんど損傷していないため、剥離片の飛散は防止されている。

図-4に、連続繊維シートで裏面補強した場合の破壊状況について示す。連続繊維シートで補強した場合の貫入深さは、2.2cm～2.3cmであり、無補強の場合とほぼ同じ大きさであった。図では、目付量330g/m<sup>2</sup>のアラミド繊維シート（以後、アラミド繊維330シートという）で補強した場合は、衝突後に繊維に損傷は認められなかったが、アラミド繊維に含浸させた接着剤にひび割れが生じているため、ひび割れの位置を強調して示している。板の断面を見ると、斜めひび割れは裏面に到達しているが、板の

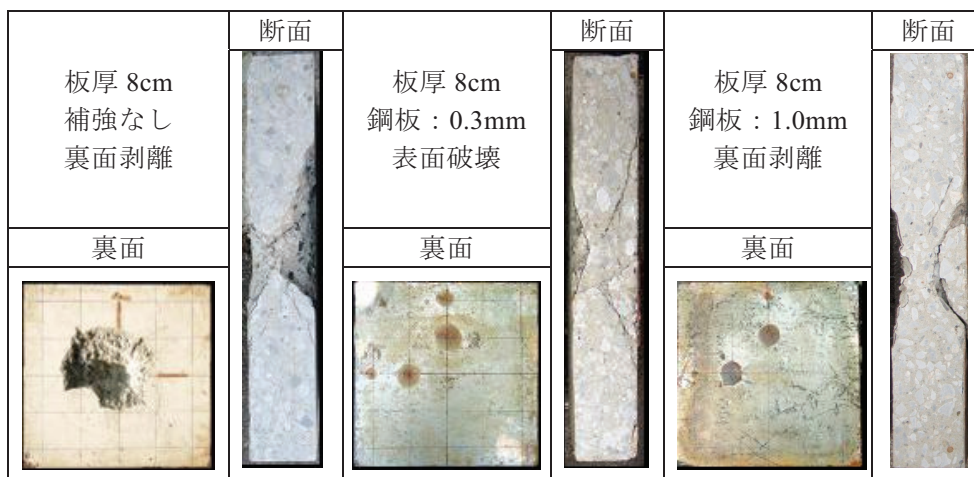


図-3 無補強および鋼板で裏面補強した場合の破壊状況

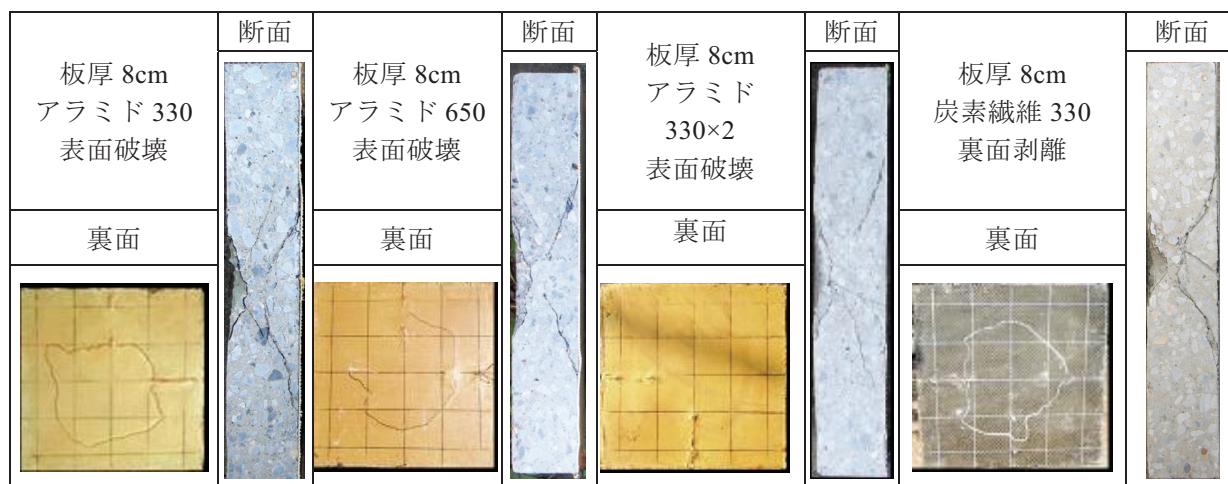


図-4 連続繊維シートで裏面補強した場合の破壊状況

内部で連結していないため、剥離片が形成されていないことがわかる。したがって、破壊モードは表面破壊と判定した。目付量 $650\text{g/m}^2$ のアラミド繊維シートによる補強板の場合は、アラミド繊維330シートの場合に比べて板内部のひび割れが低減している。また、アラミド繊維330シートを2枚重ねて貼付した場合は、斜めひび割れは生じているが、アラミド繊維330シート1枚で補強した場合よりも板内部のひび割れが低減していることがわかる。目付量 $330\text{g/m}^2$ の炭素繊維シートで補強した場合は、斜めひび割れによって剥離片が形成されたため、裏面剥離と判定した。

以上の結果より、連続繊維シート補強により、飛散物を防止するとともにコンクリート板内部の損傷を低減する効果があることがわかる。

#### 4. 短繊維補強コンクリートの効果

図-5 に、衝突速度  $300\text{m/s}$  の実験で得られた短繊維補強コンクリートの破壊状況を示す。無補強コンクリート板の場合は、裏面剥離であった。短繊維補

強コンクリートのケースでは、いずれのタイプも裏面に目視で確認できるひび割れは発生していなかった。短繊維補強コンクリートの貫入深さは  $1.7\text{cm}$  ~  $2.3\text{cm}$  であり、普通強度コンクリートよりもやや小さい傾向を示した。実験後に供試体を切断して内部を観察したところ、TypeA には押し抜きせん断ひび割れのような微小なひび割れが目視で確認された。一方、TypeB と TypeC は目視ではひび割れを確認することができなかったが、断面にアセトン浸透させたところ、小さな押し抜きせん断断面が確認された。図-6 は衝突速度  $400\text{m/s}$  の場合の破壊状況を示している。無補強コンクリート板は貫通したのに対して、短繊維補強コンクリートはいずれも裏面の剥離破壊は発生せず、破壊モードは表面破壊であった。図-7 は TypeB と TypeC のひび割れ面の拡大写真である。これより、ひび割れ面に渡って短繊維が架橋していることが確認できる。このような架橋効果によって、図-2 に示すような高いじん性を示し、局部破壊の進展を抑制する効果があると考えられる。ただし、本実験ではコンクリートあるいはモルタルマトリックスの圧縮強度が高かったため、高い




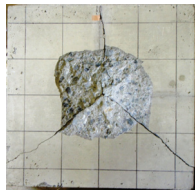



無補強 裏面剥離	TypeA 表面破壊	断面	TypeB 表面破壊	断面	TypeC 表面破壊	断面
裏面	裏面		裏面		裏面	
						

図-5 衝突速度 300m/s における短繊維補強コンクリートの破壊状況







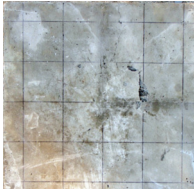
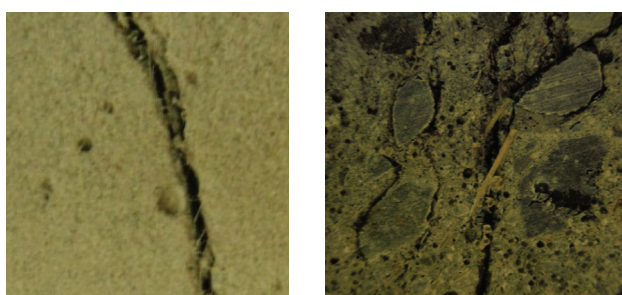
無補強 貫通	TypeA 表面破壊	断面	TypeB 表面破壊	断面	TypeC 表面破壊	断面
裏面	裏面		裏面		裏面	
						

図-6 衝突速度 400m/s における短繊維補強コンクリートの破壊状況



(a) TypeB

(b) TypeC

図-7 衝突速度 400m/s のケースのひび割れ面の拡大

圧縮強度と短繊維補強の効果が相乗した結果であると考えられる。今後は、普通強度のマトリックスを用いた材料の効果について検討する必要がある。

## 5. 結言

本研究は、剛飛翔体が高速衝突する場合にコンク

リート板に生じる裏面剥離に対する補強を対象として、連続繊維シートおよび短繊維補強の効果を調べたものである。本研究の成果を以下に要約する。

(1) 連続繊維シートで補強したケースでは、全てのケースで剥離片の飛散を防止できた。鋼板とカーボン繊維補強の場合では裏面剥離を抑制することができなかったが、アラミド繊維の場合には内部の破壊を抑制できた。

(2) 短繊維補強コンクリートの場合は、すべてのタイプで裏面剥離を抑制できた。すなわち、短繊維補強コンクリートのひび割れ面での架橋効果によって、局部破壊を抑制したものと考えられる。

(3) 貫入深さについては、繊維シート補強および短繊維補強コンクリートのいずれも、無補強の場合と同程度であった。

謝辞：本研究の実施にあたり、前田工織（株）から連続繊維シートを提供していただいた。ここに記し

て謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 別府万寿博, 三輪幸治, 大野友則, 塩見昌紀: 鋼製剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の局部破壊に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.63, No.1, pp.178-191, 2007.
- 2) 別府万寿博, 三輪幸治, 伊東雅晴, 片山雅英, 大野友則: 剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の局部破壊発生メカニズムに関する数値解析的検討, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.1293-1304, 2007.
- 3) 三輪幸治, 別府万寿博, 大野友則: 剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の表面破壊深さに関する理論的検討, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.1209-1218, 2006.
- 4) 三輪幸治, 別府万寿博, 大野友則: 剛飛翔体の高速衝突によって生じるコンクリート板の表面破壊に先端形状が及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.989-998, 2008.
- 5) M. Beppu, T. Ohno, K. Ohkubo, B. Li and K. Satoh: Contact Explosion Resistance of Concrete Plates Externally Strengthened with FRP Laminates, International Journal of Protective Structures, Vol.1, No.2, pp.257-270, 2010.6
- 6) 栗橋祐介, 岸 徳光, 三上 浩, 竹本伸一: PVA 短繊維を混入した軽量コンクリート製RC 版の耐衝撃性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.1239-1250, 2007.