

アラミド繊維シート補強によるRC版の局部破壊抑制効果 に関する基礎的研究

A fundamental study on mitigation effects by aramid fiber sheet reinforcement on the scabbing of RC slabs

清田翔吾*, 片岡新之介**, 別府万寿博***, 市野宏嘉****, 佐藤和幸*****

Shogo kiyota, Shinnosuke Kataoka, Masuhiro Beppu, Hiroyoshi Ichino, Kazuyuki Sato

*防衛大学校, 理工学研究科前期課程 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

**修 (工), 防衛大学校, 理工学研究科後期課程 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

***博 (工), 防衛大学校教授, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

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

*****前田工織株式会社 (〒105-0011 東京都港区芝公園 2-4-1 芝パークビル A 館 12F)

Key Words: scabbing, aramid fiber sheet, RC slab, projectile impact

キーワード: 裏面剥離, アラミド繊維シート, RC版, 飛来物衝突

1. 緒言

近年, 気候変動や地殻変動などの影響を受けて竜巻や火山噴火が増加する傾向にあり, 竜巻飛来物や火山噴石が原子力施設などの重要構造物に衝突する事態が懸念されている^{1,2)}. 例えば, 2014年に発生した御嶽山の火山噴火では, 火山噴石の衝突により多くの人命が失われており, 火山噴石に対する退避シェルターの設計法の確立が求められている³⁾. このような災害報告や社会的要請を受け, 飛来物の衝突を想定した構造安全性の審査に関する指針類が示されている^{3,4)}. なお, これらの飛来物の衝突速度は40m/s~150m/s程度と想定されている^{3,4)}. 飛来物の衝突を受ける鉄筋コンクリート (RC) 版に関する研究は多く行われており⁵⁻⁸⁾, 衝突速度が大きい場合にはRC版に表面破壊・貫入, 裏面剥離および貫通の局部破壊が生じることが知られている. 著者らは, 竜巻飛来物や火山噴石の衝突速度帯においては, RC版に局部破壊が発生することを明らかにしている⁹⁻¹¹⁾. 火山噴石に対する補強としては, 木造の山小屋に対しては屋根にアラミド等の繊維シートを, RC退避壕 (版厚22cm~40cm程度) に対しては内側にFRPシートを貼付する補強の概念が提案されているが³⁾, 具体的な検討は行われていない. また, 衝撃荷重を受けるRC版に対して, 繊維強化プラスチック (Fiber Reinforced Plastic, FRP) シート等を貼付する補強方法について既往の研究を概観する. 三上ら¹²⁾は重量2.94kNの重錘を用いて, 衝突速度6m/s以下の重錘落下実験を行い, 繊維シートを裏面に貼付して補強したRC版の補強効果を確認している. また三輪ら¹³⁾は,

質量46gの飛翔体を用いて, 衝突速度200~300m/sの高速衝突実験を行い, 繊維シートで裏面補強したコンクリート板の局部破壊に対する繊維シートの補強効果を確認している. しかし, 前述した竜巻飛来物や火山噴石に相当する衝突速度帯 (40m/s~150m/s) における, RC版の破壊に対するFRPシートの補強効果について検討した例はない.

本研究は, 基礎的段階として約40~70m/sの衝突速度に対して, アラミド繊維シート補強によるRC版の局部破壊抑制効果について基礎的な実験を行ったものである. まず, 裏面を補強していないRC版 (無補強版) に鋼製飛翔体を衝突させる実験を行い, 無補強版の破壊性状を調べた. 次に, 目付量の異なるアラミド繊維シートを用いて裏面を補強したRC版に対して鋼製飛翔体を衝突させる実験を行い, 繊維シート補強によるRC版の局部破壊抑制効果を調べた.

2. 実験の概要

2.1 鋼製飛翔体および実験装置

実験では, 図-1に示す高圧空気式飛翔体発射装置を用いた. この装置は空気圧を調節 (0.8MPa~4MPa) することで, 図-2に示す質量8.3kgの飛翔体を20m/s~100m/sで衝突させることが可能である. この質量8.3kgは「原子力発電所設計の竜巻影響評価ガイド⁴⁾」で想定されている鋼製パイプの質量8.4kgに相当するものである. また, 火山噴石の密度を2.5g/cm³とすると, 直径18cmの球形噴石の質量に相当する. 飛翔体の先端形状につい

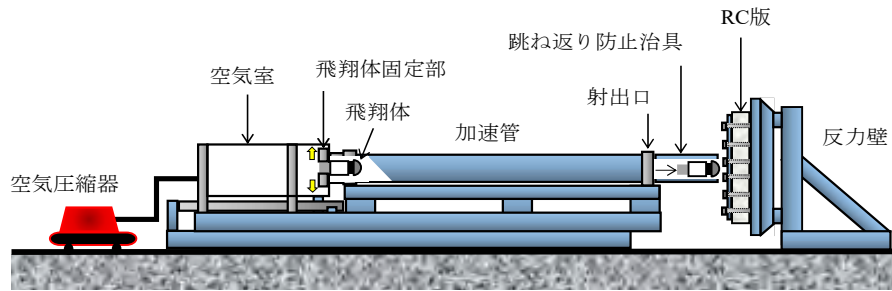


図-1 高圧空気式飛翔体発射装置



図-2 飛翔体の寸法

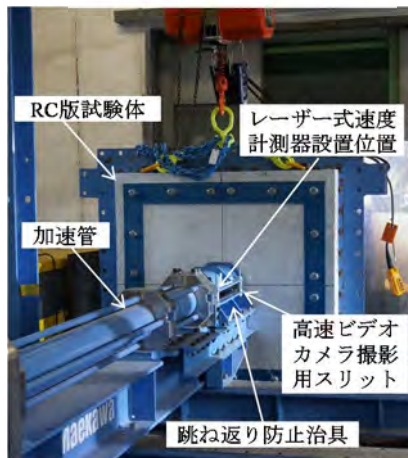


図-3 RC版試験体の設置要領

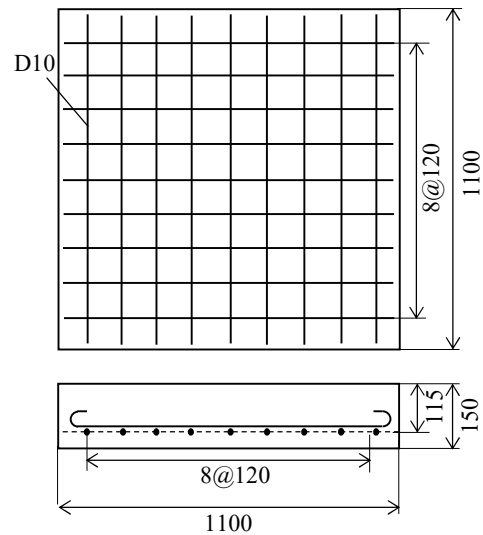


図-4 RC版の寸法

ては、直径 90mm の半球型で、先端部の材質は合金工具鋼 (SKS93)、胴体部には超々ジュラルミン (A7075B) を用いた。衝突直前の飛翔体の速度については図-3 に示すように、発射装置の発射口に取り付けたレーザー式速度計測器を用いて 2 点間 (10cm) の時間差を計測し、サンプリング周波数 230MHz で計測した。さらに、跳ね返り防止治具のスリットから、衝突前後における飛翔体の挙動を解像度 14 万画素 (横 512×縦 272)、撮影速度 100,000 フレーム/秒の高速ビデオカメラにより撮影し、連続画像を解析して変位の時刻歴を算出した。また、この変位～時間関係を時間について微分することで速度を算定した。

2.2 RC 版試験体および繊維シート

RC 版の寸法は、図-4 に示すように縦 1,100mm、横 1,100mm、厚さ 150mm とした。鉄筋比は既往の研究¹¹⁾を参考に 0.65% とし、D10 鉄筋を 2 方向の格子状に配筋した。鉄筋の両端については、定着を確保するために半円形フック状に折り曲げ加工を行った。なお、コンクリートの一軸圧縮強度の平均値は 38.5N/mm²であった。図-5 に、RC 版試験体の設置要領を示す。RC 版は鋼製反力

壁に付属されている鋼製フレームに、M20 ボルトを用いて固定した。

前述した FRP シートを用いた耐衝撃補強効果に関する実験では、炭素繊維やアラミド繊維等が用いられている¹²⁻¹⁴⁾。本研究では、これらの材料の中で高い耐衝撃性が確認されているアラミド繊維を用いた。表-1 に、実験で用いたアラミド繊維シートの力学特性を示す。本実験に用いたアラミド繊維シートは二方向の平織である。なお、アラミド繊維の引張強度は 2,060N/mm²、破断伸びは 2% である。本実験のパラメータの一つである目付量についても既往の研究を参照して以下のように決定した。三上らの実験¹²⁾では、6m/s 以下の衝突速度に対して、目付量 415~435g/m² のアラミド繊維シートを用いて繊維シート補強の効果を検討している。三輪らは、200~300m/s の衝突速度において目付量 330~650 g/m² のアラミド繊維シートによる裏面剥離抑制効果を確認している¹³⁾。本研究では局部破壊を対象としているので、三輪らの研究を参考にして目付量 330g/m² を基準とした。その上で、目付量の大小が補強効果に与える影響を調べるため、目付量 180 g/m² のアラミド繊維シートについても検討を行った。繊維シートの特性として、目付量にほぼ比例して設計厚さが変化する。繊維シートの補強効果を表す指標である引張剛性は、ヤング係数に設計厚さを乗じたものとして定義される。本研究における引張剛性は、

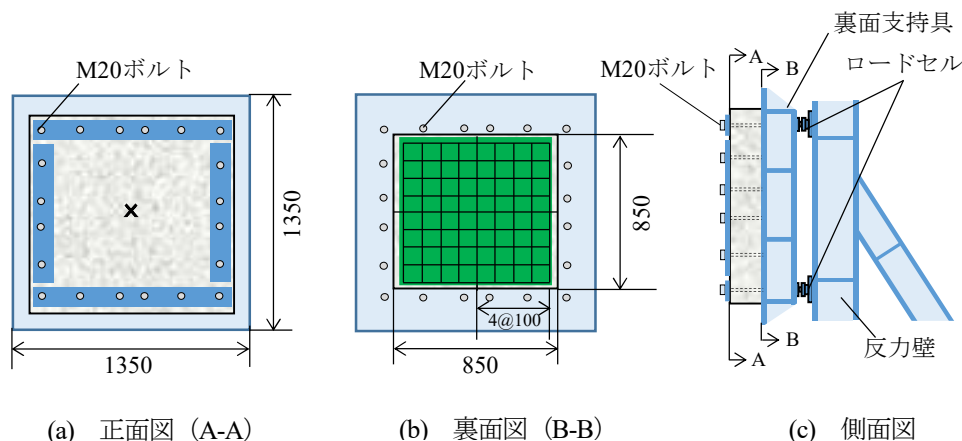


図-5 RC版試験体の設置要領

表-1 アラミド繊維シートの力学特性

目付量 (g/m ²)	密度 (g/cm ³)	引張強度 (N/mm ²)	設計厚さ (mm)	ヤング係数 (kN/mm ²)	引張剛性 (kN/mm)	破断伸び (%)
180	1.45	2060	0.062	118	7.3	2
330			0.095		11.2	

目付量 180 g/m² および 330 g/m² に対して、それぞれ 7.3kN/mm および 11.2kN/mm である。アラミド繊維シートは、以下の手順により RC 版に貼付した。まず、プライマーとエポキシ樹脂系接着剤（エポキシ樹脂）を下塗りした。プライマーを 12 時間養生した後、再度エポキシ樹脂を塗布してアラミド繊維シートを含浸し、アラミド繊維補強プラスチック（Aramid Fiber Reinforced Plastic, AFRP）とした。なお、補強した RC 版を設置する鋼製フレームの内寸は図-5(b)で示したように 850mm×850mm であるため、繊維シートで補強できる範囲はその制約を受ける。本研究では、実験装置の制約内で極力広範囲に補強を施すため、繊維シートの寸法は 835mm×835mm とした。

2.3 実験ケースおよび破壊モード

試験体は、無補強の RC 版（無補強版）および目付量が異なる 2 種類の AFRP シートで補強された RC 版（AFRPRC 版）を使用した。また、無補強版の耐衝撃性を確認するため、速度 25~80m/s の衝突実験を行った。AFRPRC 版については、既往の局部破壊評価式である CRIEPI 式⁷⁾による評価結果を参考に、無補強版のケースにおいて裏面剥離が生じる衝突速度 (40m/s および 50m/s) に設定した。さらに作用外力が増大した場合の補強効果について検討するため、衝突速度を 70m/s に設定したケースも行った。なお、基準ケースである目付量 330g/m² に対しては、限界性能のばらつきを把握する目的で衝突速度 70m/s のケースのみ 2 回の実験を行った。すなわち、目付量 180g/m² の試験体を 2 体、目付量 330g/m² の試験体を 4 体用いた。この際、CRIEPI 式によって算出される RC 版に裏面剥離が生じる速度（裏面剥離限界速度）

との比較を行った。以下に示す CRIEPI 式については、電力中央研究所が行った実験データに基づく実験式である。

$$t_s = \alpha_s \times \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0.13} \frac{(MV^2)^{0.4}}{d^{0.2} f'_c{}^{0.4}} \quad (1)$$

$$t_p = \alpha_p \times \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0.25} \left(\frac{MV^2}{d \cdot f'_c} \right)^{0.5} \quad (2)$$

ここに、 t_s ：裏面剥離限界厚さ (mm)、 t_p ：貫通限界厚さ (mm)、 V_0 ：基準速度 (60.96m/s)、 V ：衝突速度 (m/s)、 M ：飛来物の質量 (kg)、 d ：飛翔体の直径 (m)、 f'_c ：コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)、 α_s および α_p は係数でそれぞれ 6.96×10^{-3} 、 8.96×10^{-4} である。

無補強版の破壊モードの分類は、既往の研究^{6,8)}を参考にし、表面破壊、裏面剥離および貫通に加え、裏面に円周状のひび割れが生じているが剥離片が飛散していない状態を裏面剥離限界、衝突部に孔が生じているが飛翔体が RC 版を通り抜けていない状態を裏面剥離（孔）とした。AFRPRC 版では、裏面のコンクリートの状態を直接確認できないこともあり、破壊モードを以下のように定義した。裏面の AFRP シートに剥離や盛り上がりが生じない、あるいは剥離や盛り上がりが生じるが裏面のコンクリートおよび AFRP シートの剥落がない状態を表面破壊とした。また、RC 版のひび割れの範囲が広がり、AFRP シートの剥離や盛り上がり AFRP シートの端部まで到達しているものを裏面剥離限界とした。さらに破壊が顕著となり、AFRP シートが RC 版から完全に剥落した場合は裏面剥離と定義した。

実験ケース	無補強							
衝突速度	27m/s		42m/s		55m/s		83m/s	
破壊モード	表面破壊		裏面剥離限界		裏面剥離		裏面剥離（孔）	
破壊性状	表面	断面	表面	断面	表面	断面	表面	断面
	裏面		裏面		裏面		裏面	

図-6 無補強版の破壊性状

3. 実験結果および考察

3.1 無補強版の破壊性状

図-6に、無補強版の破壊性状を示す。衝突速度 27m/s のケースでは、無補強版の裏面に放射状のひび割れが生じているが、断面には目視で確認できる斜めひび割れは生じていないため、破壊モードは表面破壊とした。衝突速度 42m/s のケースでは、衝突速度 27m/s のケースと同様に無補強版の裏面に放射状のひび割れが生じていることに加え、円周状のひび割れが生じて右上の一部が剥離している。このことから破壊モードは裏面剥離限界と判定した。衝突速度 55m/s のケースでは、無補強版の断面に斜めひび割れが生じるとともに、裏面のかぶり部分のコンクリートが飛散し、裏面剥離が生じた。かぶり部分内側のコンクリート片は、鉄筋の拘束により押さえられたため剥落はしていないが、断面の写真からは版内部まで破壊が進展している。さらに、衝突速度が 83m/s に増大すると、無補強版の衝突部には孔が生じており、鉄筋は衝突方向に大きくたわんでいるが、飛翔体は通り抜けていないため破壊モードは裏面剥離（孔）と判定した。

3.2 AFRPRC 版の破壊性状

図-7に、AFRPRC 版の破壊性状を示す。なお、試験体裏面の写真には、打診棒によって打音の変化から判定した、試験体裏面にシートの剥離が生じた部分の外周を白線で示した。目付量 180g/m²、衝突速度 43m/s のケースでは、試験体の裏面中央に直径約 56cm の範囲に AFRP シートの剥離が生じた。また、RC 版の断面には斜めひび割れが生じている。この斜めひび割れの一部は版裏面にも到達して、裏面の AFRP シートには円形状の剥離が生じている。このケースの破壊モードは、版内部に生じたコンクリートの剥離を取り囲む領域における AFRP シー

トと RC 版の付着が十分保たれていることから、表面破壊と判定した。目付量 180g/m²、衝突速度 53m/s のケースでは、目付量 180g/m²、衝突速度 43m/s のケースよりもひび割れの開口が進展するとともに破壊の範囲が拡大した。それに伴い、AFRP シートの剥離もより広範囲に及び、AFRP シートの端部まで到達した。よって、破壊モードは裏面剥離限界と判定した。ちなみに、無補強版では、本ケースとほぼ同等の衝突速度 55m/s で顕著な裏面剥離が生じていた。したがって、目付量 180g/m² の AFRP シートによる補強によって、裏面剥離が抑制されたことがわかる。

次に、目付量 330g/m²、衝突速度 43m/s のケースをみると、RC 版裏面の AFRP シートに直径約 47cm の円形状のシート剥離が生じており、目付量 180g/m²、衝突速度 43m/s のケースとほぼ同様の破壊性状であり、破壊モードは表面破壊と判定した。目付量 330g/m²、衝突速度 51m/s のケースでは、衝突速度 43m/s のケースと比較して断面のひび割れの開口が進展して破壊の範囲が拡大したが、AFRP シートの剥離は AFRP シートの端部まで至っていないため、破壊モードは表面破壊とした。さらに、衝突速度を 73m/s に増加すると、RC 版裏面の AFRP シートは右上の角部から広い範囲でシートが剥離した。ただし、AFRP シートが剥落することなくコンクリート片の飛散を抑止したため、破壊モードは裏面剥離限界と判定した。なお、2 回目の衝突速度 73m/s のケースでも、シート剥離は AFRP シートの端部まで到達したため、裏面剥離限界と判定した。

AFRPRC 版の破壊性状を無補強版と比較すると、RC 版の断面に生じる斜めひび割れの発生や進展に対する抑制効果はあまり認められなかった。しかし、RC 版の裏面に生じるコンクリート片の飛散を防止し、裏面剥離を抑制する効果は大きいことがわかった。ただし、シートの剥

実験ケース	目付量180g/m ²			
衝突速度	43m/s		53m/s	
破壊モード	表面破壊		裏面剥離限界	
破壊性状	表面	断面	表面	断面
	裏面	裏面		

実験ケース	目付量330g/m ²							
衝突速度	43m/s		51m/s		73m/s		73m/s	
破壊モード	表面破壊		表面破壊		裏面剥離限界		裏面剥離限界	
破壊性状	表面	断面	表面	断面	表面	断面	表面	断面
	裏面	裏面	裏面	裏面	裏面	裏面	裏面	裏面

図-7 AFRPRC 版の破壊性状

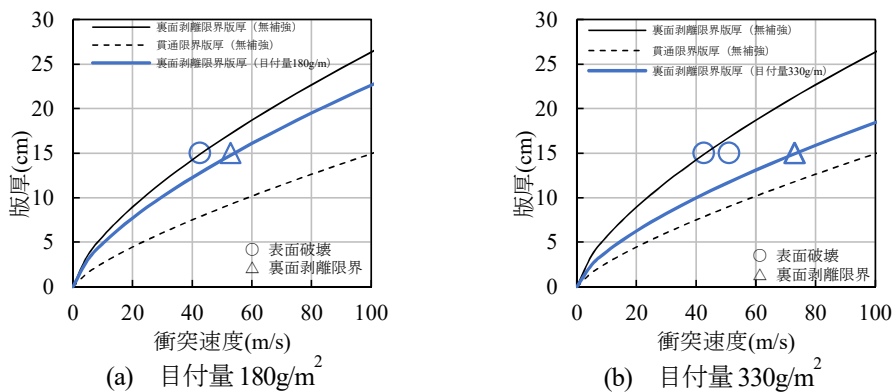


図-8 CRIEPI 式による評価結果

離がシート端部に到達すると裏面剥離限界となるため、裏面剥離の直径に対する効果的な貼付範囲を検討する必要があります。

3.3 AFRPRC 版の破壊モードおよびシート補強の効果

図-8 に、AFRPRC 版の破壊モードと、CRIEPI 式による無補強版に対する評価を重ねて示す。目付量 180g/m²

のケースでは、無補強版の裏面剥離限界速度である約 43m/s に対して表面破壊であったが、衝突速度が約 50m/s に増加すると裏面剥離限界となった。目付量 330g/m² のケースでは、衝突速度が約 50m/s に到達しても表面破壊であり、目付量 180g/m² よりも裏面剥離限界速度が大きいことがわかる。全体的に、AFRPRC 版の裏面剥離限界速度は、CRIEPI 式よりも大きくなることがわかる。図中

には、CRIEPI 式に対して、本実験結果と整合するように低減係数を乗じた式も示している。目付量 180 g/m^2 および 330 g/m^2 に対する低減係数は、それぞれ 0.88 および 0.7 であった。すなわち、無補強版と比較すると、同じ衝突速度に対して、目付量 180 g/m^2 および 330 g/m^2 の AFRPRC 版の裏面剥離限界版厚はそれぞれ 12% および 30% 小さくなることを示している。また、この式から目付量 180 g/m^2 の AFRPRC 版の裏面剥離限界速度は約 52 m/s 、目付量 330 g/m^2 の場合は約 73 m/s と算定される。ここで、目付量 180 g/m^2 の裏面剥離限界速度に対応する無補強版の版厚は 18 cm 、目付量 330 g/m^2 の裏面剥離限界速度に対応する無補強版の板厚は 23 cm であることから、本実験における AFRP シートの補強効果は、コンクリートに換算して約 $3 \text{ cm} \sim 8 \text{ cm}$ の版厚となる。また、無補強版と AFRPRC 版の裏面剥離限界速度の差から、AFRP シートを貼付したことによる吸収エネルギーを算定すると、目付量 180 g/m^2 では約 8175 kJ 、目付量 330 g/m^2 の場合は約 11408 kJ と算定される。質量 8.3 kg の飛翔体が無補強版に裏面剥離を発生させる運動エネルギー（裏面剥離限界エネルギー）は約 7673 kJ となることから、AFRP シートを貼付することによって、裏面剥離限界エネルギーの約 1.07 倍～ 1.49 倍に相当するエネルギーを吸収したことがわかる。

5. 結言

本研究は、速度約 $40 \sim 70 \text{ m/s}$ の飛翔体衝突に対して、AFRP シートによる RC 版の局部破壊抑制効果について基礎的な実験を行ったものである。本研究の成果を以下に要約する。

(1) 目付量 180 g/m^2 および 330 g/m^2 の AFRP シートで RC 版を補強した結果、RC 版の裏面剥離が抑制されることがわかった。

(2) CRIEPI 式による無補強版の裏面剥離限界版厚に対する低減係数を試算したところ、目付量 180 g/m^2 および目付量 330 g/m^2 に対して、それぞれ 0.88 および 0.7 となった。すなわち、無補強版に対して、裏面剥離限界版厚が目付量 180 g/m^2 のシート補強で 12% 、目付量 330 g/m^2 のシート補強で 30% 小さくなることがわかった。

(3) AFRP シートによる補強の効果は、コンクリート版厚に換算して、目付量 180 g/m^2 で版厚 3 cm の増加、目付量 330 g/m^2 で版厚 8 cm の増加に相当した。また、AFRPRC 版の裏面剥離限界エネルギーは、無補強版と比較して目付量 180 g/m^2 で 1.07 倍、目付量 330 g/m^2 で 1.49 倍となった。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人建築研究所：平成 24 年に 5 月 6 日に茨城県つくば市で発生した竜巻による建築物被害（速報），2012.
- 2) 日本保全学会：軽水型原子力発電所の竜巻影響評価における設計竜巻風速および飛来物速度の設定に関するガイドライン，2015.
- 3) 内閣府（防災担当）：活火山における避難壕等の充実に向けた手引き，2015.
- 4) 原子力規制委員会：原子力発電所の竜巻影響評価ガイド，原規技術第 1409172 号，2013，改正，2014.
- 5) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法，構造工学シリーズ 6，1994.
- 6) Q. M. Li: Local impact effects of hard missiles on concrete targets, *International Journal of Impact Engineering* 32, pp. 224-284, 2005.
- 7) 伊藤千浩，大沼博志，白井孝治：飛来物の衝突に対するコンクリート構造物の耐衝撃設計手法，電力中央研究所総合報告，U24，1991.
- 8) 防衛施設学会：衝突作用を受ける構造物の局部破壊に関する評価ガイドライン—評価手法と対策技術，2018.
- 9) 片岡新之介，上野裕稔，別府万寿博，市野宏嘉：剛飛翔体の中速度衝突を受けるコンクリート版の衝撃応答に関する基礎的研究，*構造工学論文集*，Vol.62A，pp.1084-1096，2016.
- 10) 片岡新之介，別府万寿博：飛翔体の座屈変形が RC 版の局部破壊特性に及ぼす影響に関する考察，*土木学会論文集 A2(応用力学)*，Vol. 74，No.2(応用力学論文集 Vol. 21)，pp.I_381-I_392，2018.
- 11) 片岡新之介，別府万寿博，市野宏嘉：飛来物衝突を受ける RC 版の裏面剥離メカニズムに関する研究，*構造工学論文集*，Vol.65A，pp.876-889，2019.
- 12) 三上浩，岸徳光，安藤智啓，栗橋祐介：FRP シートで下面補強した RC 版の耐衝撃性に関する実験的研究，*構造工学論文集*，Vol.48A，pp.1531-1542，2002.
- 13) 三輪幸治：剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート版の裏面剥離の発生メカニズムと耐衝撃補強に関する研究，*防衛大学校理工学研究後期課程博士論文*，2010.
- 14) 別府万寿博，三輪幸治，高橋順：高速衝突を受けるコンクリート版の裏面剥離発生メカニズムと連続繊維シート補強の効果，*土木学会論文集*，A1，Vol.68，No.2，pp.398-412，2012.