

論文 ポリウレア樹脂塗布によるRC版の裏面剥離抑制効果に関する基礎的研究

清田 翔吾*1・別府 万寿博*2・市野 宏嘉*3・折戸 広志*4

要旨：本研究は、飛来物の衝突を対象として、ポリウレア樹脂（ポリウレア）塗布によるRC版の裏面剥離抑制効果に関する検討を行ったものである。実験では、裏面にポリウレアを塗布して補強したRC版に、質量8.3 kg、直径90 mmの鋼製飛翔体を速度40 m/s～100 m/sで衝突させた。ポリウレアの塗布厚は4 mmおよび7 mmとした。実験結果から、ポリウレアをRC版の裏面に塗布することは、コンクリート片の飛散を防ぐとともに裏面剥離を抑制すること、また塗布厚4 mmに比べて塗布厚7 mmの方が高い裏面剥離抑制効果を示すことがわかった。

キーワード：飛来物衝突, 裏面剥離, RC版, ポリウレア樹脂

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40 m/s～150 m/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）版に関する研究によると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。これまでに著者らは、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⁾⁻¹⁰⁾。

さて近年、構造物の耐衝撃補強において、ポリウレア樹脂（ポリウレア）に関する研究が行われている^{11),12)}。ポリウレアは高い伸びを有しており、海外では耐衝撃補強としても用いられている。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（40～150 m/s）において、RC版の破壊に対するポリウレアの補強効果について検討した例はない。本研究は、速度40～100 m/sの衝突速度における、ポリウレアによるRC版の裏面剥離抑制効果について基礎的な実験を行ったものである。塗布厚の異なるポリウレアで裏面に補強したRC版試験体に対する鋼製飛翔体の衝突実験を行い、ポリウレア塗布によるRC版の裏面剥離抑制効果を調べた。

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（0.1MPa～4MPa）することで、図-2に示す質量8.3kgの飛翔体を20～100 m/sで衝突させることが可能である。この質量8.3 kg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8.4 kgに相当するものである。また、火山噴石の密度を2.5 g/cm³とすると、直径18 cmの球形噴石の質量に相当する。飛翔体の先端形状については、直径90 mm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（10 cm）の時間差をサンプリング周波数230 kHz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

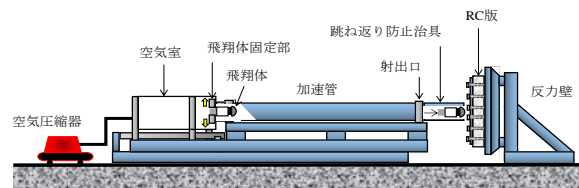


図-1 高圧空気式飛翔体発射装置

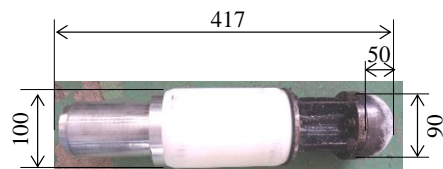


図-2 飛翔体の寸法

*1 防衛大学校 理工学研究科前期課程学生 (学生会員)
 *2 防衛大学校 建設環境工学科教授 博(工) (正会員)
 *3 防衛大学校 建設環境工学科准教授 博(工) (正会員)
 *4 日本通信エレクトロニクス株式会社

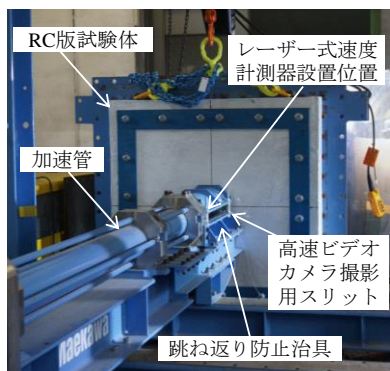


図-3 RC版試験体の設置要領

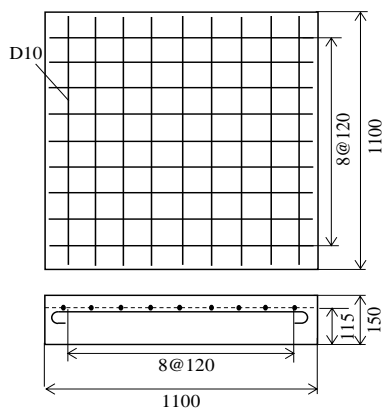


図-4 RC版の寸法

表-1 コンクリートの示方配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 CA
15	9	2.4	46.8	53	173	370	954	856	4.63

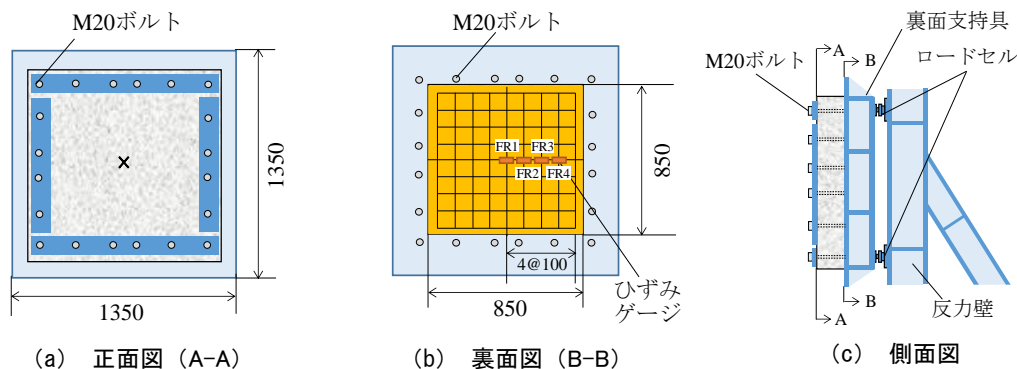


図-5 RC版試験体の設置要領

度 14 万画素 (横 512×縦 272), 撮影速度 100000 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 版試験体およびポリウレア樹脂

(1) RC 版試験体

RC 版の寸法は, 図-4 に示すように縦 1100 mm, 横 1100 mm, 厚さ 150 mm とした。局部破壊において, 鉄筋の影響は小さいとされているため^{7),8)}, 衝突後のコンクリートの破片化を防ぐために D10 鉄筋を配置した。表-1 にコンクリートの示方配合を示す。試験時の平均材齢は 143 日であり, コンクリートの一軸圧縮強度の平均値は 39.6 N/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。

(2) ポリウレア樹脂

本研究では, 高い伸びを有しているポリウレアを使用した。表-2 に, 実験で用いたポリウレアの力学特性を示す。ポリウレアの引張強度は 26 N/mm², 伸び率は 350% である。塗布厚の大小が補強効果に与える影響を調べる

表-2 ポリウレア樹脂の力学特性

塗布厚 (mm)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	伸び率 (%)
試験方法	ASTM D412	ASTM D790	ASTM D412
4	26	1035	350
7			

ため, 塗布厚は 4 mm, 7 mm とした。なお, ポリウレアの塗布厚については, 施工上, 正確な管理が困難であったため, 実測値 3 mm~4 mm の厚さを塗布厚 4 mm, 実測値 6 mm~7 mm の厚さを塗布厚 7 mm としている。なお, ポリウレアの塗布厚については, 定規を用いて計測した。ポリウレアの塗布は RC 版の裏面全体に対して, スプレーを用いて行った。

2.3 実験ケースおよび破壊モード

(1) 実験ケース

表-3 に実験ケースを示す。なお, 衝突速度は実測値である。試験体は裏面を厚さ 4 mm および 7 mm で塗布した RC 版を使用した。衝突速度は, 本実験条件に対して比較的良好に適合する¹⁰⁾ 局部破壊評価式である CRIEPI 式⁷⁾を参考にして, 裏面を補強していない RC 版

表-3 実験ケース

No.	塗布厚(mm)	衝突速度(m/s)
1	4	40
2		52
3		73
4		97
5	7	41
6		54
7		73
8		100

(無補強版)に裏面剥離が生じる衝突速度(約42 m/s)を基準にした。さらに、無補強版に貫通が生じる衝突速度(約110 m/s)の範囲で4ケースを設定した。すなわち、塗布厚4 mmおよび7 mmに対してそれぞれ4体の試験体を用いて、合計8ケースの実験を行った。

(2) CRIEPI 式

ポリウレアによる裏面剥離抑制効果は、破壊モードの変化に基づいて評価した。また、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。CRIEPI式は、電力中央研究所が行った実験データに基づいた裏面剥離および貫通限界版厚を評価するために提案された実験式であり次式で表される。

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

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

ここに、 t_s :裏面剥離限界厚(mm)、 t_p :貫通限界厚(mm)、 V_0 :基準速度(60.96 m/s)、 V :衝突速度(m/s)、 M :飛翔体の質量(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。

(3) 破壊モード

破壊モードの分類は、裏面のコンクリートの状態を直接確認できないため、既往の区分⁷⁾を参考にして以下のように定義した。裏面のポリウレアに剥離や盛上がりが生じない、あるいは剥離や盛上がりが生じるが裏面のコンクリートおよびポリウレアの剥落がない状態を表面破壊とした。また、ポリウレアの盛上がりが大きくなり、一部でもポリウレアが破断している状態を裏面剥離限界とした。さらに破壊が顕著となり、ポリウレアが破断し、試験体裏面の剥離片が飛散した場合は裏面剥離と定義した。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

(1) 破壊性状

図-6にRC版の表面、裏面および断面の破壊性状を示す。なお、RC版の裏面には打診棒を用いて打音の違いから判定した、ポリウレアに生じた剥離部の外周を黒の実線で示している。また、ポリウレアに破断が生じた部分を白の実線で囲んでいる。塗布厚4 mm、衝突速度40 m/sのケースでは、試験体裏面に直径約49 cmの範囲でポリウレアの剥離が生じたが、ポリウレアの破断および剥離片の飛散は生じなかったため、表面破壊と判定した。塗布厚4 mm、衝突速度52 m/sのケースにおいても、衝突速度40 m/sのケースと同様にポリウレアの剥離が生じたが、試験体断面のひび割れ性状はほぼ同様であり、表面破壊であった。塗布厚4 mm、衝突速度73 m/sのケースでは、衝突速度40 m/sおよび52 m/sのケースと比べて、試験体裏面のポリウレアの盛上がり面積および高さが大きくなっている。また、試験体断面をみるとひび割れが大きくなり、ひび割れが多く発生した。また、貫入が大きくなり、衝突部に孔が生じていることが確認できる。そして、試験体裏面の中央には、白線で示すようにポリウレアの破断が確認されたため、破壊モードは裏面剥離限界とした。塗布厚4 mm、衝突速度97 m/sのケースでは、衝突速度73 m/sのケースと同様に衝突部に孔が生じた。また、試験体裏面のポリウレアは完全に破断し、剥離片が飛散した。よって、破壊モードは裏面剥離とした。図-7に、高速ビデオカメラで撮影した本ケースにおけるポリウレアの変形および破断の進展を示す。図には、図-5(b)に示した、ひずみゲージの位置を略号(FR1~FR3)で示している。また図-8に、同ケースのひずみ~時間関係を示す。図-7および図-8から時刻1.0 ms付近ではポリウレアが盛上がり、ひずみFR1は37000 μ以上でひずみゲージの計測限界に至り、ひずみFR2が約10000 μを示している。ひずみFR3およびFR4については、盛上がり部分の境界部分に位置しているため、圧縮ひずみが生じたものと考えられる。時刻3.0 msではひずみFR3の位置も大きく変形して15000 μを示し、ポリウレアの盛上がりがさらに大きくなっている。時刻5.0 msにおいては、ポリウレアの破断が始まり、時刻10.0 msで完全に破断し、裏面に剥離片が飛散している。

図-6に示す塗布厚7 mm、衝突速度41 m/sおよび54 m/sのケースでは、塗布厚4 mmとほぼ同様の破壊性状をしており、破壊モードは表面破壊となった。衝突速度73 m/sのケースをみると、塗布厚4 mm、衝突速度73 m/sではポリウレアが破断していたのに対し、塗布厚7 mmのケースではポリウレアが破断することなく表面破壊となった。

さらに衝突速度が大きくなった塗布厚7 mm、衝突速

実験ケース	塗布厚4 mm							
衝突速度	40 m/s		52 m/s		73 m/s		97 m/s	
破壊モード	表面破壊		表面破壊		裏面剥離限界		裏面剥離	
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	

実験ケース	塗布厚7 mm							
衝突速度	41 m/s		54 m/s		73 m/s		100 m/s	
破壊モード	表面破壊		表面破壊		表面破壊		表面破壊	
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 RC版の破壊性状

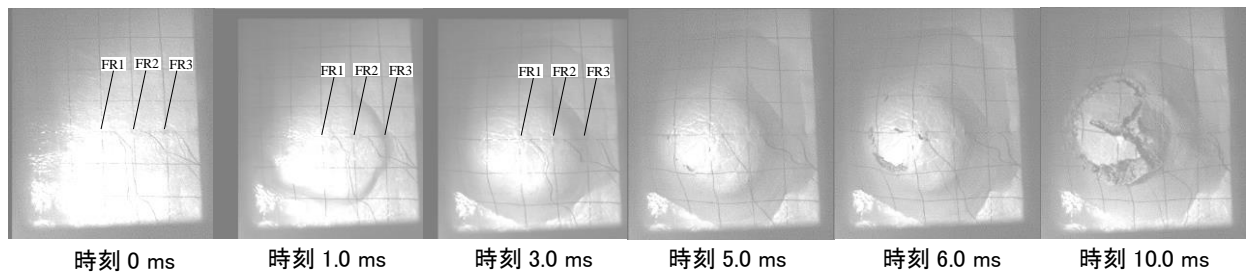


図-7 ポリウレア樹脂の変形および破断進展状況(塗布厚 4 mm, 衝突速度 97 m/s)

度 100 m/s のケースでは、衝突部に孔が生じていることがわかる。しかし、試験体裏面のポリウレアは破断せず、表面破壊となった。以上の結果から、塗布厚 4 mm に比べて塗布厚 7 mm の方が高い裏面剥離抑制効果を示すことがわかる。

(2) 貫入深さおよび裏面剥離面積

図-9 に、試験体表面に生じた貫入深さ～衝突速度関係を示す。なお、試験体に孔が生じたケースについては記載していない。また本研究と同じ実験装置を用いて得られた無補強版の貫入深さも比較して示している。図から、衝突速度が大きくなると、貫入深さは大きくなる向が認められる。衝突速度約 40 m/s に対する貫入深さは、

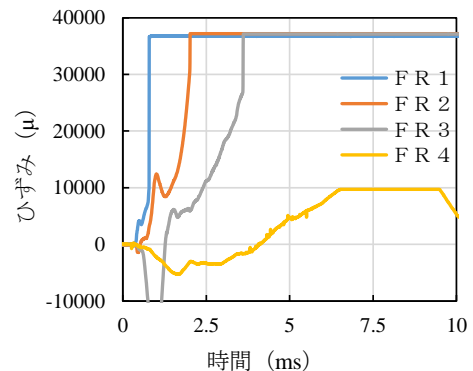


図-8 ひずみ～時間関係

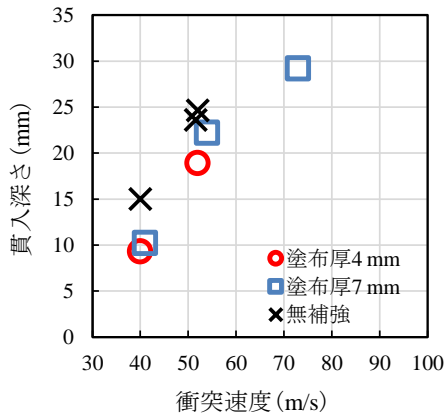


図-9 貫入深さ～衝突速度関係

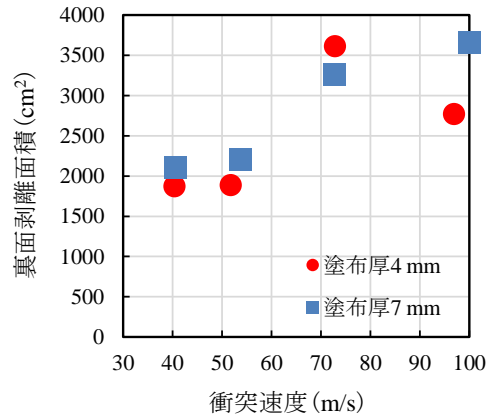
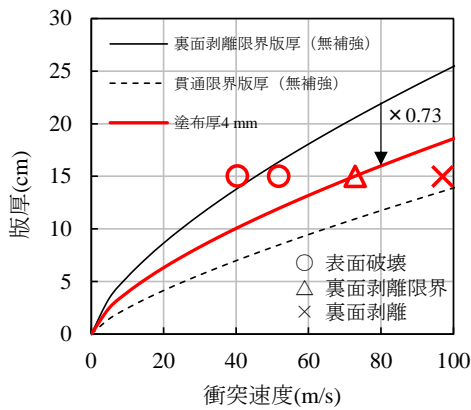
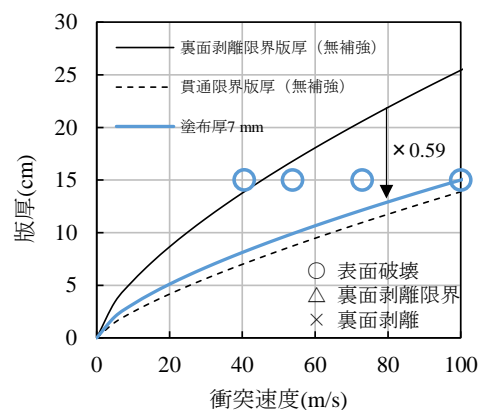


図-10 裏面剥離面積～衝突速度関係



(a) 塗布厚 4 mm



(b) 塗布厚 7 mm

図-11 CRIEPI 式による評価

塗布厚 4 mm および 7 mm のケースに対して、それぞれ 9 mm および 10 mm であった。また、衝突速度約 50 m/s に対しては、塗布厚 4 mm および 7 mm のケースで、それぞれ 19 mm および 22 mm の貫入深さであった。無補強版の貫入深さは、ポリウレアを塗布した RC 版に比べて衝突速度約 40 m/s は約 6 mm、衝突速度約 50 m/s ではやや大きい、その差は顕著ではなく、ポリウレアの塗布厚が貫入深さへ与える影響は小さいと言える。図-10 に、裏面剥離面積～衝突速度関係を示す。裏面剥離面積とは、図-6 に示すポリウレアの剥離部（黒線）を円形と仮定し、その直径を鉛直方向、水平方向および左右の斜め方向で平均し、円の面積として求めた値を示す。図から、ポリウレアが完全に破断したケース（塗布厚 4 mm、衝突速度 97 m/s）を除き、衝突速度が大きいほど裏面剥離面積が大きくなる傾向が認められる。ただし、塗布厚が裏面剥離面積に与える影響については明瞭ではなく、今後さらに検討が必要である。

3.2 ポリウレアによる裏面剥離抑制効果

(1) CRIEPI 式による評価

図-11 に、本実験の破壊モードと CRIEPI 式による無補強版の裏面剥離限界版厚（黒実線）および貫通限界版厚（黒破線）を重ねて示す。なお、版厚 15 cm の無補強版に対する裏面剥離限界速度は 43 m/s である。図-11(a)

に示す塗布厚 4 mm では、衝突速度 52 m/s で表面破壊であり、衝突速度が 73 m/s に増加すると裏面剥離限界となった。図-11(b) に示す塗布厚 7 mm では、全てのケースにおいてポリウレアが破断せず、剥離片の飛散を防止して、破壊モードは表面破壊であった。以上から、ポリウレアを塗布した RC 版の裏面剥離限界速度は、CRIEPI 式よりも大きくなるのがわかる。ポリウレア塗布による裏面剥離抑制効果を評価するため、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を示している。なお、塗布厚 7 mm については、衝突速度 100 m/s においても表面破壊であったため、この速度を裏面剥離限界速度として低減係数を求めた。各塗布厚に対する低減係数は、塗布厚 4 mm が 0.73、塗布厚 7 mm に対する低減係数が 0.59 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、ポリウレアを裏面に塗布した RC 版の裏面剥離限界版厚は塗布厚 4 mm が 27%、塗布厚 7 mm が 41% 小さくなることを示している。また、この式から塗布厚 4 mm の裏面剥離限界速度は約 73 m/s、塗布厚 7 mm の場合は約 100 m/s 以上と算定される。これらの裏面剥離限界速度に対応する無補強版の裏面剥離限界版厚はそれぞれ 21 cm および 26 cm であることから、本実験におけるポリウレアの補強効果はコンクリートに換算して塗布厚 4 mm で 6 cm、塗布

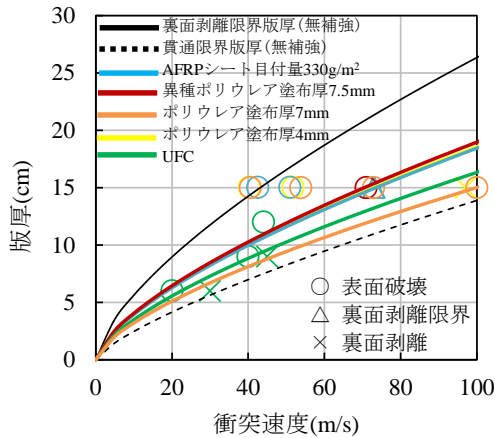


図-12 CRIEPI 式による既往研究との比較

厚 7 mm で 11 cm の版厚となる。

(2) 既往研究との裏面剥離限界版厚の比較

図-12に、RC版の補強に関する既往の研究^{12)~14)}との比較を示す。これらの研究では、RC版を補強するために本研究とは異なる性質を有するポリウレア（異種ポリウレア）の裏面塗布¹²⁾（塗布厚7.5mm）、UFC（鋼繊維混入率2%）の適用¹³⁾およびAFRPシート裏面貼付¹⁴⁾（目付量330g/m²）を行っている。異種ポリウレアを裏面に塗布したRC版については、図中の赤線で示すように無補強版に対して裏面剥離限界版厚が28%低減している。緑線で示すUFCでは、裏面剥離限界版厚が無補強版に対して37%低減している。また、青線で示すAFRPシートを裏面に貼付したRC版では、裏面剥離限界版厚が無補強版に対して30%低減している。以上の比較から、本研究で用いた塗布厚4mmのポリウレアによる補強効果は、異種ポリウレア塗布厚7.5mmと同等であり、塗布厚7mmのポリウレアによる補強効果が最も高いことがわかる。

4. 結言

本研究は、速度40~100m/sの飛翔体衝突に対して、ポリウレアによるRC版の裏面剥離抑制効果を検討したものである。本研究の成果を以下に要約する。

(1)塗布厚4mmおよび7mmのポリウレアでRC版を裏面補強した結果、無補強のRC版に対して裏面剥離が抑制されることがわかった。また、塗布厚7mmの方が塗布厚4mmよりも裏面剥離抑制効果が高いことがわかった。

(2)ポリウレアの塗布が貫入深さへ与える影響は小さいことがわかった。

(3)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。CRIEPI式に対する低減係数は、塗布厚4mmが0.73、塗布厚7mmに対する低減係数が0.59であった。

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），2012.5
- 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，2015.1
- 3) 内閣府（防災担当）：活火山における退避壕等の充実にに向けた手引き，2015.12
- 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6，1994.1
- 6) Q. M. Li, S.R.Reid, H.M.Wen, A.R.Telford: Local impact effects of hard missiles on concrete targets, International Journal of Impact Engineering 32, pp. 224-284, 2005.4
- 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，U24，1991.7
- 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
- 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, 2016.4
- 10) 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, 2019.3
- 11) 足立国明，原木大輔，香月智，福井秀平：樹脂補強コンクリート供試体の飛散片防止効果，コンクリート工学年次論文集，Vol. 30, pp. 847-852, 2008.7
- 12) 島崎利隆，武者浩透，別府万寿博，片岡新之介：ポリウレア塗布によるRC版の耐衝撃性向上効果に関する検討，令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会，pp. I-268, 2019.9
- 13) 片岡新之介，別府万寿博，武者浩透：飛来物衝突を受ける超高強度繊維補強コンクリートパネルの耐衝撃性に関する考察，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第18巻，pp. 47-52, 2018.10
- 14) 清田翔吾，片岡新之介，別府万寿博，市野宏嘉，佐藤和幸：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，第12回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，2019.12