

論文 ポリウレア樹脂を吹付けた RC 版および UFC 版の裏面剥離片の飛散抑制効果に関する研究

島崎 利孝*1・武者 浩透*2・片岡 新之介*3・別府 万寿博*4

要旨：本研究は、RC 版単体とポリウレアを裏面に吹付けた RC 版、および超高強度繊維補強コンクリート (Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete, 以下、UFC) 版単体とポリウレアを裏面に吹付けた UFC 版に対して衝突実験を実施し、ポリウレアによる裏面剥離片の飛散抑制効果について検討を行ったものである。質量 8.3kg の剛飛翔体を 65m/s～100m/s の範囲で各版に衝突させ、破壊性状およびポリウレアの衝突前後の形状変化を考察した。その結果、本研究の範囲では、RC 版および UFC 版ともに、ポリウレア層による耐衝撃補強効果は小さいが、ポリウレア層を裏面に設けることによる裏面剥離片の飛散抑制効果が認められた。

キーワード：ポリウレア、耐衝撃性能、衝突実験、裏面剥離、剥離片飛散抑制効果、UFC

1. はじめに

近年、竜巻飛来物や火山噴石による建物の破損や死亡災害が報告されており¹⁾、電力設備や石油タンク等の重要構造物には高い耐衝撃性能が求められている。このような衝撃問題に関連して、既往の研究^{2),3),4)}では、飛来物の衝突を受けたコンクリート系構造物材の局所破壊は、表面破壊・貫入、裏面剥離および貫通の3種類に分類されており、局所破壊に対する耐衝撃対策の検討が必要とされている。さらに、局所破壊のうち、貫通と裏面剥離が危険な破壊モードとされている。これは、貫通と裏面剥離が生じた際に、建物内部の人命や重要設備が危険にさらされるためである。

著者らは局所破壊に対する耐衝撃対策に用いる材料として UFC の適用を検討しており、短繊維補強による高い引張抵抗力を有する UFC は、局所破壊に対して優れた耐衝撃性を示すことを報告している⁵⁾。また、構造物の耐衝撃対策としてのポリウレア樹脂(以下、ポリウレア)の適用に関する研究がある(例えば^{6), 7)}。ポリウレアはポリイソシアネートとポリアミンの化学反応により生成するウレア結合を主体とした2液混合樹脂であり、優れた伸び性能と引張強度を有している。日本では主に防水用途として工場の屋上や倉庫の床に使用されているが、海外では耐衝撃補強材料としても用いられている。

構造部材の衝突面裏面にポリウレア層を設けることで、裏面剥離に対して、裏面の剥離片の飛散を抑制する効果が期待される。そこで、本研究では、UFC 版にポリウレア層を設けた場合の裏面剥離片の飛散抑制効果を検討した。また、一般的な RC 部材にポリウレア層を設けた場合の裏面剥離片の飛散抑制効果も併せて検討した。

ポリウレア樹脂吹付による RC 版および UFC 版の裏面

剥離片の飛散抑制効果の検討は、飛翔体速度 65m/s～100m/s の範囲とした衝突実験(以下、衝突実験)により実施した。

2. 実験概要

2.1 実験装置の概要

図-1 に高圧空気式飛翔体発射装置の概要を示す。実験装置は、空気圧により質量 4～10kg の飛翔体を速度 20～100m/s で発射することが可能である。飛翔体の衝突速度は、試験体側面側から高速度カメラで記録した衝突の瞬間の映像を解析して求めた。写真-1 に本実験で使用した鋼製飛翔体を示す。鋼製飛翔体は先端部が直径 90mm の半球型であり、全長は 430mm、質量は 8.3kg である。なお、飛翔体の質量は竜巻飛来物を鋼製パイプとした場合の質量 8.4kg にほぼ相当する⁸⁾。

2.2 実験水準

表-1 に実験水準を示す。実験パラメータは材料、版厚、ポリウレア吹付の有無および衝突速度とした。同版厚ごとに、ポリウレア層の有無以外を同条件とすることで、ポリウレア層による剥離片の飛散抑制効果を検証した。衝突速度は、RC 版は局部破壊評価式である電中研式⁹⁾に基づき、各版厚の破壊モードが裏面剥離と想定されるように設定した(版厚 150mm:速度 70m/s, 版厚 200mm:速度 100m/s)。UFC 版においては既往の研究⁴⁾を参考に、各版厚の破壊モードが貫通限界付近と想定されるように衝突速度を設定した(版厚 90mm:速度 80m/s, 版厚 120mm:速度 100m/s)。ここで、実験では発射装置の設定速度と実測速度に差が生じたが、本研究の範囲では、5% 以内の差であった。

試験体の平面寸法は、1150mm×1150mm の正方形であ

*1 大成建設(株) 技術センター 生産技術開発部 都市再生技術開発室 (正会員)

*2 大成建設(株) 技術センター 生産技術開発部 都市再生技術開発室 室長 修(工) (正会員)

*3 防衛大学校 理工学研究科後期課程 修(工) (学生会員)

*4 防衛大学校 システム工学群建設環境工学科 教授 博士(工) (正会員)

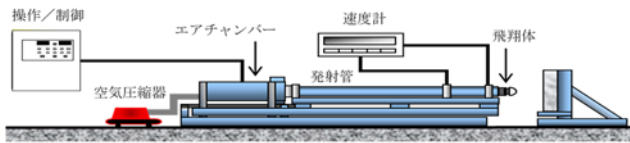


図-1 高圧空気式飛翔体発射装置の概要

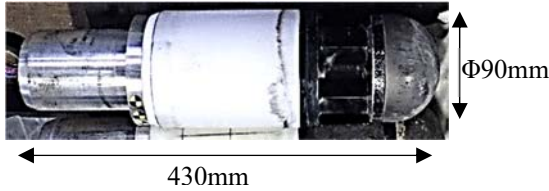


写真-1 鋼製飛翔体

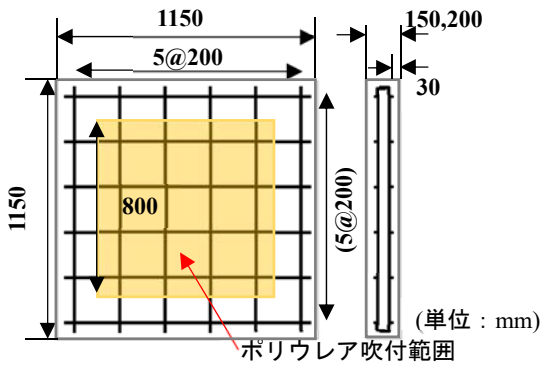


図-2 RC版配筋図

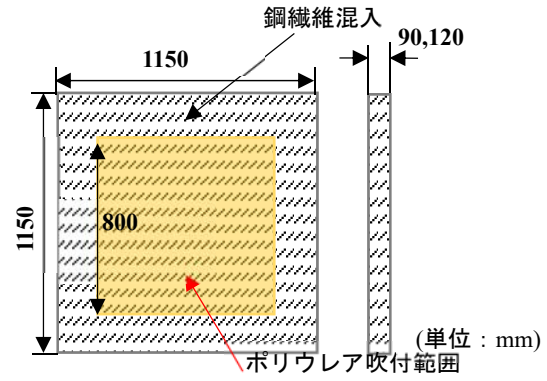


図-3 UFC版寸法図

表-1 実験水準

ケース名	材料	版厚 (mm)	ポリウレア厚 (mm)	衝突速度 (m/s)	(参考)静的押抜きせん断耐力 (kN)
R150	RC	150		67(設定速度:70)	92
RP150	RC	150	7.5	71(設定速度:70)	
R200	RC	200		96(設定速度:100)	195
RP200	RC	200	7.5	95(設定速度:100)	
U90	UFC	90		77(設定速度:80)	133
UP90	UFC	90	6.0	83(設定速度:80)	
U120	UFC	120		95(設定速度:100)	237
UP120	UFC	120	6.5	95(設定速度:100)	

表-2 コンクリートの配合

水セメント比	細骨材率	粗骨材の最大寸法	スランプ	単位量(kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
W/C	s/a	(mm)	(cm)	W	C	s	G	Ad
(%)	(%)	(mm)	(cm)	175	302	880	918	3.62

り、版厚はRC版では150mmおよび200mmとし、UFC版では90mmおよび120mmとした。RC版の配筋図を図-2に示す。鉄筋間隔を200mm、純かぶりを30mmとした。配筋量は、厚さ150mmのRC版ではD13を用い引張鉄筋比0.42%、厚さ200mmのRC版ではD16を用い引張鉄筋比0.50%とした。ここで、引張鉄筋比は、全断面積における1方向の引張鉄筋比である。UFC版の形状寸法を図-3に示す。UFC版には鉄筋は配置していない。なお、表-1には参考として、RC版およびUFC版の静的押抜きせん断耐力¹⁰⁾、¹¹⁾を示した。

2.3 コンクリートおよびUFCの材料特性

コンクリートおよびUFCの配合を表-2、表-3に示す。実験に用いたUFCは超高強度繊維補強コンクリート設計・施工指針(案)¹¹⁾に適合するもので、鋼繊維(引張強度:2800N/mm²、直径:0.2mm、繊維長:15mm)が2.0(Vol.%)混入されている。試験体の養生は、標準熱養生(90℃で48時間の蒸気養生)とした。実験時における圧縮強度はRC版で40.3N/mm²(材齢:約3カ月)、UFC版で210.6N/mm²(材齢:約3カ月)であった。

2.4 ポリウレアの物性および吹付

表-4にポリウレアの物性を示す。吹付範囲を図-2、

表-3 UFCの配合

単位量				
水 (kg)	標準配合粉体 (kg)	細骨材 (kg)	鋼繊維 (kg)	高性能減水剤 (kg)
180	1278	934	157	18

図-3に示す。試験体の衝突裏面に800mm四方で吹き付けた。試験体は上下二辺を支持具で固定するため、ポリウレアが支持具と干渉しないように、ポリウレアの衝突裏面全面への吹付は行わなかった。ポリウレアの吹付状況を写真-2に示す。

ポリウレアの吹付に際しては、事前に吹付面をサンドペーパーで目荒しし、目荒し面にプライマーを塗布した後、ポリウレアの吹付を実施した。吹付後に超音波式膜厚計を用いて吹付厚さを計測した。結果、平均吹付厚さはRP150、RP200で約7.5mm、UP90で約6.0mm、UP120で約6.5mmであった。吹付厚さは、多少のばらつきが生じたが、6.0mm~7.5mmの範囲であった。

2.5 計測項目

飛翔体の衝突速度、試験体の破壊モード、貫入深さ、裏面損傷面積の計測を実施した。貫入深さは衝突面から

局部破壊の最も深い位置までの距離とした。裏面損傷面積は衝突裏面の剥離部分の面積であり、ポリウレア吹付版は試験後にポリウレア層を除去して、剥離部分を計測した。なお、裏面損傷面積は、遠近によるゆがみを補正した試験体裏面剥離部の写真をCAD上でスケッチして、計測した。

さらに、ポリウレア吹付版においては、ポリウレアの剥離面積(接着切れ範囲の面積)、ポリウレアの最大残留隆起高さ、衝突時の隆起高さ、最大残留伸び率の計測を実施した。ポリウレアの剥離面積は、衝突実験後のポリウレア面の目視観察および打音により、接着が切れている範囲を判定して求めた。計測は裏面損傷面積の場合と同様にCAD上で計測した。最大残留隆起高さは、写真-3に計測状況を示すように、ポリウレア表面の隆起高さをデジタルノギスで計測した。衝突時の隆起高さは側面から撮影した高速度カメラの映像から求めた。残留伸び率は、図-4に示すように、事前に表面に100mm間隔のメッシュを描き、衝突実験後に中央部を交差する2直線上のメッシュ間隔を計測し、次式で算出した。

$$x = \frac{(L_1 - L_0)}{L_0} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 x は残留伸び率、 L_0 は衝突前のメッシュ間隔(100mm)、 L_1 は衝突後のメッシュ間隔(mm)である。最大残留伸び率は、算出した残留伸び率の中で最大のものである。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

表-5、表-6にRC版、UFC版の実験結果をそれぞれ示す。裏面損傷面積割合は試験体裏面面積に対する裏面損傷面積の割合である。残留接着面積はポリウレア吹付面積におけるポリウレアと試験体の接着が保持されていた面積である。

(1) RC版、ポリウレア吹付RC版の破壊性状

RC版(R150, R200)では裏面剥離が生じた。一方で、ほぼ同じ速度に対して、ポリウレア吹付RC版(RP150, RP200)では、外観上は裏面のポリウレア層に膨らみが生じたが、剥離片は飛散しなかった。この破壊性状は、高速度(200~500m/s)で行われた既往の報告と同様の結果であり¹²⁾、RC版の衝突裏面にポリウレア層を設けることで裏面剥離片の飛散が抑制された。また、図-5に示すポリウレア吹付RC版の断面写真から、RC版部ではコンクリートの裏面剥離が生じたが、ポリウレア層によって剥離片の飛散が抑制されたと考えられる。試験体に裏面剥離が生じているが、剥離片の飛散が抑制されているため、本研究では、この破壊状況を内部剥離と呼ぶこととした。

表-4 ポリウレアの物性

密度(g/cm ³)	引張強度(N/mm ²)	伸び率(%)	圧縮強度(N/mm ²)
1.10~1.12	19.3~22.1	400~500	5.52

※メーカーの技術資料をもとに作成



写真-2 ポリウレアの吹付状況



写真-3 残留隆起高さの計測状況

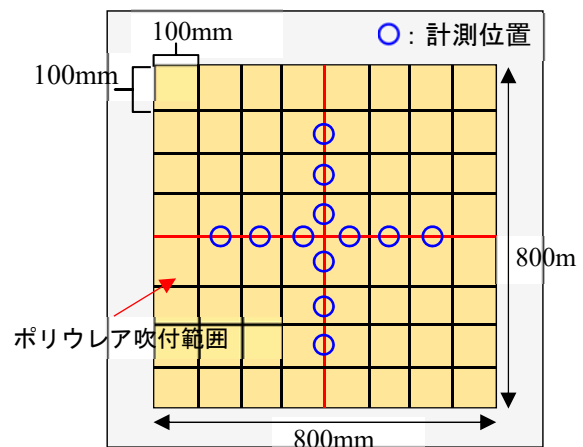


図-4 ポリウレア吹付版の伸び率計測位置

ポリウレア層の有無によるRC版母材の破壊状況に着目すると、試験体の断面観察結果から、RP150では貫通孔が確認され、R150と同様に貫通限界に相当すると評価される。RP200についても内部剥離が生じたことからR200と同様の破壊性状を示したと評価される。したがって、ポリウレア層を衝突裏面に設けても母材の破壊性状はポリウレア層を設けない場合と同様であり、ポリウレアのRC版衝突裏面への吹付は、剥離片飛散抑制には効果が認められるが、局部破壊を低減するような補強効果は小さいと考えられる。これは、ポリウレアの剛性は小さく、補強材としての効果が小さいためと考えられる。な

表-5 RC版実験結果


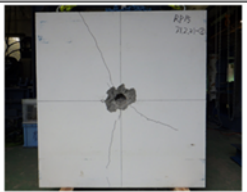

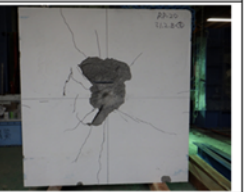

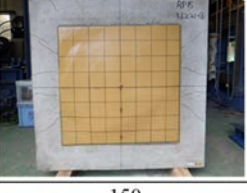


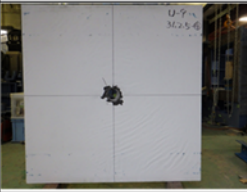
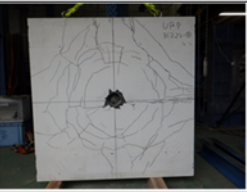



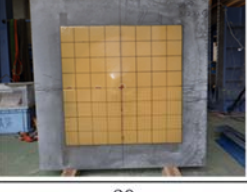

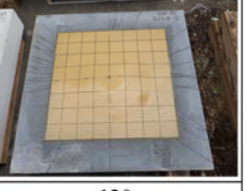
ケース名	R150	RP150	R200	RP200
衝突面				
衝突裏面				
厚さ(mm)	150	150	200	200
衝突速度(m/s)	67	71	96	95
破壊状況	貫通限界	内部剥離	裏面剥離	内部剥離
貫入深さ(mm)	(貫通孔が生じ計測不可)	(貫通孔が生じ計測不可)	63.8	58.8
裏面損傷面積(mm ²)	2.41×10 ⁵	3.71×10 ⁵	3.03×10 ⁵	3.52×10 ⁵
裏面損傷面積割合(%)	18.2	28.1	22.9	26.6
ポリウレアの剥離面積(mm ²)		4.72×10 ⁵		4.51×10 ⁵
残留接着面積(mm ²)		1.68×10 ⁵		1.89×10 ⁵

表-6 UFC版実験結果

ケース名	U90	UP90	U120	UP120
衝突面				
衝突裏面				
厚さ(mm)	90	90	120	120
衝突速度(m/s)	76.7	83	95	95
破壊状況	貫通限界	内部剥離	貫通限界	内部剥離
貫入深さ(mm)	(貫通孔が生じ計測不可)	(貫通孔が生じ計測不可)	(貫通孔が生じ計測不可)	(貫通孔が生じ計測不可)
裏面損傷面積(mm ²)	0.66×10 ⁵	0.69×10 ⁵	0.89×10 ⁵	1.03×10 ⁵
裏面損傷面積割合(%)	5.0	5.2	6.7	7.8
ポリウレアの剥離面積(mm ²)		3.24×10 ⁵		2.71×10 ⁵
残留接着面積(mm ²)		3.16×10 ⁵		3.69×10 ⁵

お、RC版単版およびポリウレア吹付RC版ともに、鉄筋には折れ曲がる等の大きな変状は確認されなかった。

貫入深さに関しては、R200で63.8mm、RP200で58.8mmであり、ポリウレア層の有無による貫入深さの大きな違いは確認されなかった。なお、R150、RP150は貫通孔が生じたため、計測していない。

残留接着面積は、RP150で1.68×10⁵ mm²、RP200で1.89×10⁵ mm²であった。局部破壊の進展とともに、徐々に接着切れが拡大したが、最終的には、この面積の接着により、剥離片の飛散が抑制されたことになる。

(2) UFC版、ポリウレア吹付UFC版の破壊性状

UFC版(U90、U120)では、飛翔体は貫通しなかったが、貫通孔が生じるとともに、裏面剥離となった。一方、ほぼ同じ速度に対して、ポリウレア吹付UFC版(UP90、UP120)は、外観上は裏面のポリウレアに膨らみが生じたが、剥離片の飛散は確認されなかった。RC版と同様に、UFC版においても衝突裏面にポリウレア層を設けることで裏面剥離片の飛散が抑制された。また、図-6に示すポリウレア吹付UFC版の断面写真から、ポリウレア吹付UFC版の破壊モードは、UFC版部で裏面剥離が生じ、ポリウレアにより剥離片の飛散が抑制された内部剥離に

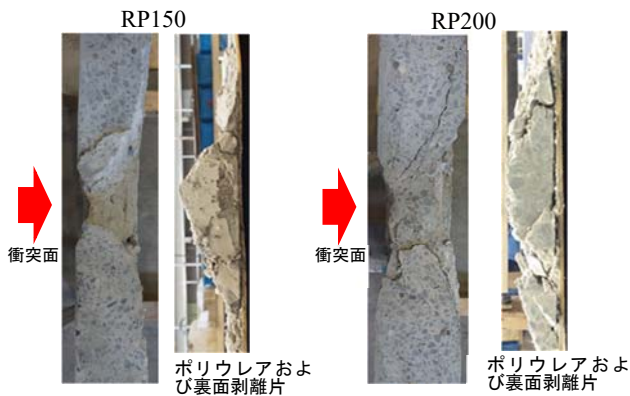


図-5 ポリウレシア吹付 RC 版の断面状況

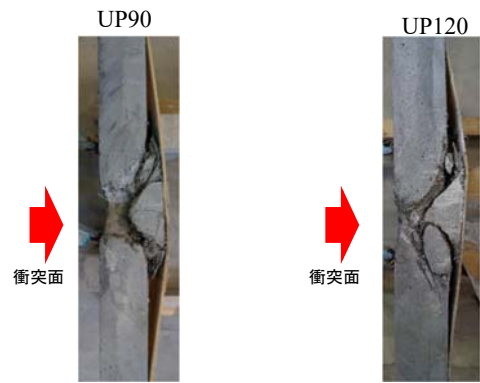


図-6 ポリウレシア吹付 UFC 版の断面状況

分類される。ポリウレシア層の有無による UFC 版母材の破壊状況に着目すると、UP90 においても貫通孔が確認されたので、U90 と同様の貫通限界に相当する破壊性状と評価される。UP120 についても貫通孔が確認され、U120 と同様に貫通限界と評価される。したがって、RC 版同様に UFC 版においてもポリウレシア層の存在は、裏面の剥離片飛散抑制が可能である一方で、局部破壊を低減する補強効果は小さいことがわかった。

残留接着面積は、UP90 で $3.16 \times 10^5 \text{ mm}^2$ 、UP120 で $3.69 \times 10^5 \text{ mm}^2$ であり、ポリウレシア吹付 RC 版に比べて大きい。これは RC 版の場合と比較して、UFC 版の場合の裏面損傷面積が小さかったためと考えられる。

また、U90 は R150 に対し、版厚が小さく、衝突速度が速い一方で同様の破壊性状を示すことから、RC 版に対し、UFC 版の耐衝撃性が優れていることが確認された。

(3) 裏面損傷面積および斜めひび割れの角度

図-7 に各試験ケースの裏面損傷面積を示す。UFC 版と RC 版ではいずれのケースもほぼ同様な破壊性状を示しているが、UFC 版は RC 版と比較して、裏面損傷面積が一樣に小さい。主たる要因は版厚の違いであると考えられるが、斜めひび割れ角度が UFC 版と RC 版で異なることも考えられた。斜めひび割れの角度は、写真からは判別が困難であったため、図-8 に示したように、剥離面積から算出した仮想半径と版厚の関係から見掛けの斜めひび割れ角度を評価した。ただし、後述するように、ポリウレシア吹付版はポリウレシアの影響で裏面損傷面積が変化するため、単版の結果のみを示した。図には原点を通る近似直線を示したが、UFC 版、RC 版の区別なく、版厚と仮想半径には線形の関係があると考えられた。既往の研究¹³⁾では繊維混入率が増加すると破壊が局所化し、裏面剥離の直径が小さくなるとの報告もあるが、本研究の範囲では、斜めひび割れ角度は RC 版と UFC 版で大きく異ならないと考えられた。

裏面のひび割れ発生状況では、UFC 版(U90, U120)は RC 版(R150, R200)と比べてひび割れ本数が多く、ひび割れ間隔が非常に狭いことが特徴的である。これは、UFC

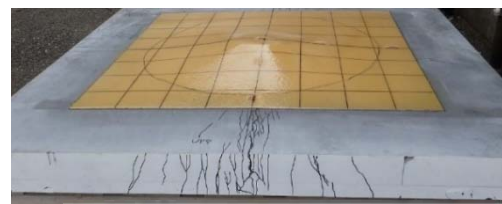


写真-4 ポリウレシアの隆起状況

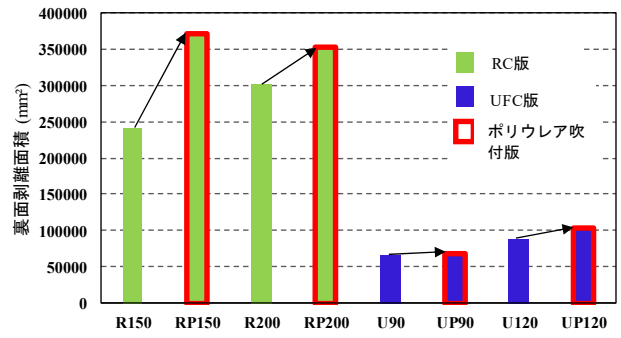


図-7 各試験ケースの裏面損傷面積

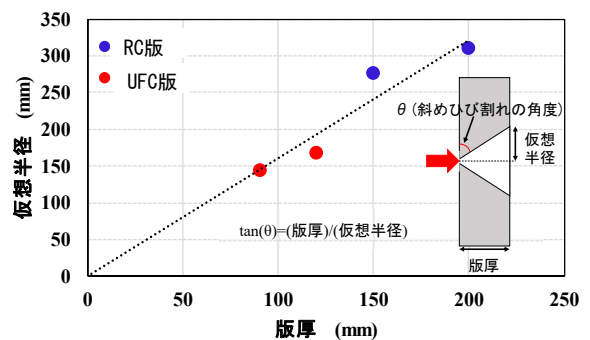


図-8 単版における仮想半径と版厚の関係

の鋼繊維の架橋によるひび割れ分散効果と考えられる。また、ひび割れが中心部で水平方向に多く入っているのは、上下2辺支持の影響と考えられる。

3.2 衝突後のポリウレシア吹付範囲の隆起状況

写真-4 に、例として UP90 の側面の状況を示す。衝突裏面中央部を中心にポリウレシアが隆起していることが分かる。表-7 に衝突実験後のポリウレシアの形状データをまとめて示す。最大残留隆起高さに関しては、RP200 がもっとも小さい値を示したが、これは RP200 には貫通孔が生じず、破壊の程度が小さかったことによると考えら

表-7 試験後のポリウレアの形状データ

ケース名	最大残留隆起高さ(mm)	衝突時の隆起高さ(mm)	最大残留伸び率(%)	貫通孔の有無
RP150	21	約60	2	有
RP200	10	約25	2	無
UP90	31	約115	2	有
UP120	43	約80	4	有

れる。ポリウレア吹付 RC 版 (RP150, RP200) に比べてポリウレア吹付 UFC 版 (UP90, UP120) の方が、隆起高さが大きかったのは、ポリウレア吹付 UFC 版の裏面損傷面積が小さかったため、衝突エネルギーが小さい範囲に集中し、ポリウレアが局所的に大きく伸びたためと考えられる。また、RP150 と RP200, UP90 では最大残留隆起高さは異なっているが、最大残留伸び率はほぼ同一であった。これは、隆起高さに応じて、隆起形状が異なるためと考えられる。

図-7 に示した単版とポリウレア吹付版の裏面損傷面積を比較すると、RC 版では同版厚において、ポリウレアを吹付けたケースの方が、裏面損傷面積が大きかった。これは、衝突時に裏面の剥離片がポリウレアを隆起させ、ポリウレアと接着していた RC 版の剥離発生箇所端部の表層の脆弱部が、ポリウレアとともに剥がれたためと考えられる。また、UFC 版でも同版厚において、ポリウレアを吹付けたケースの方が、わずかに裏面損傷面積が大きいが、RC 版のような顕著な傾向はみられなかった。これは、UFC 版はマトリクスが緻密であり、表層の脆弱部がほとんど生じないためと考えられる。

4. まとめ

本研究は、RC 版および UFC 版を対象として、裏面にポリウレア層を設けることによる剥離片の飛散抑制効果を衝突実験によって検討したものである。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) RC 版および UFC 版ともに、ポリウレア層による裏面剥離片の飛散抑制効果が認められた。一方で、ポリウレアの内側では試験体裏面の剥離が生じていたことから、ポリウレア層を設けることによる局部破壊の低減効果は小さいと考えられた。
- (2) 破壊状況が同様のケースにおいて、裏面損傷面積は UFC 版よりも RC 版が大きい傾向があったが、本研究の範囲では、版厚の違いが主たる要因と考えられた。
- (3) 本実験で実施した 4 体のポリウレア吹付版の、実験後の残留接着面積は、 $1.68 \times 10^5 \sim 3.69 \times 10^5 \text{ mm}^2$ 程度であった。

参考文献

- 1) 内閣府(防災担当), 消防庁, 国土交通省水管理・国土保全局砂防部, 気象庁: 火災防災マップ作製指針別冊資料, 2013.3
- 2) 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
- 3) 別府万寿博, 上野裕稔: 剛飛翔体の中速度衝突を受けるコンクリート版の損傷に関する基礎的考察, 防衛大学校理工学研究報告, 第 52 巻, 第 2 号, pp. 21-30, 2015
- 4) 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, 2016.3
- 5) 片岡新之介, 武者浩透, 別府万寿博, 岡本修一: 中速度衝突を受ける超高強度繊維補強コンクリートパネルの衝撃応答特性に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp757-762, 2016
- 6) 萩野谷学, 神谷隆, 野村敬之, 竹内一雄: 剛体の衝突を受ける板・壁部材の局部破壊防止に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.859-866, 2015.3
- 7) 市野宏嘉, 永田真, 別府万寿博, 大野友則: 接触・近接爆発を受けるコンクリート板の局部破壊に対する裏面補強法とその効果, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.72, No.2, pp146-164, 2016
- 8) 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
- 9) 電力中央研究所: 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法, 電力中央研究所報告, 総合報告 U24, 1991
- 10) 土木学会: コンクリート標準示方書, 設計編, 2017
- 11) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー第 113 号, 2004
- 12) 三輪幸治: 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科後期課程卒業論文, pp95-116, 2011
- 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, アップグレード論文報告集, Vol18, 1065, 2018