

論文 樹脂補強コンクリート供試体の飛散片抑止効果

足立 国明^{*1}・原木 大輔^{*2}・香月 智^{*3}・福井 秀平^{*4}

要旨：本研究は、アクリル樹脂を含浸、もしくはポリウレタ樹脂塗膜による補強したコンクリートの衝撃的荷重を受けた際の飛散片の抑制効果について検討したものである。すなわち、標準供試体にアクリル樹脂を含浸させたものと、その上にポリウレタ樹脂を塗膜した供試体に対して急速載荷実験を行い、飛散片の速度および供試体に入力されたエネルギーと飛散片の運動エネルギーの関係を比較・考察して樹脂補強による飛散抑止効果について検討した。

キーワード：アクリル樹脂，ポリウレタ樹脂，急速載荷実験，飛散エネルギー，コンクリート飛散片

1. 緒言

コンクリート構造物が衝突や爆発などの衝撃荷重を受けると、その衝撃荷重により構造全体が破壊に至らなくとも、局所的な破壊により発生するコンクリート片の飛散によって構造物内外部の人命および財産を脅かす二次被害の可能性がある。例えば、2004年沖縄で大学の校舎にヘリコプターが墜落し、その衝撃で墜落位置から約60m離れた民家までコンクリート片が飛散して器物に損害を与えたことが報告されている。このように、飛散物の危険性が認識されるとともにその安全対策が注目され、コンクリート構造物の局部破壊に関する研究^{1)~3)}が多く行われている。しかしながら、局部破壊に伴う飛散片の性状に関する研究^{1),2)}、さらには飛散片に対する安全対策に関する研究は実例が少なく、十分な知見が得られているとは言い難い。

ところで、近年コンクリート構造物を補強するために多種多様な樹脂が使用されている。その用途も、表面保護、ひび割れ処理、断面修復、防水・止水等多種多様である。本研究で対象とするアクリル樹脂³⁾は水のように低粘度で、コンクリート等への浸透性が高く、低温時の硬化性や耐候性にも優れることからひび割れ注入材、表面被覆材またポリマー含浸コンクリート⁴⁾の含浸材として幅広く利用されている。よって、表面塗布により十分な含浸ができれば、小片への破壊片形成を抑止でき、飛散片のエネルギー低減が期待できる。

一方、ポリウレタ樹脂³⁾は下水道施設の紡織塗料

や床版・屋上防水材料に使用され、ウレタン樹脂と比較して硬化時間が数秒と早く対薬品性、耐酸性に優れており、最近使用されることが多くなった素材である。これは、塗膜の強度もあり、その厚さを比較的容易に変えて施工することができるので、飛散抑止効果が期待できる。

そこで本研究は、これらの樹脂によるコンクリート構造物の飛散片抑止効果を検証するため、コンクリート標準供試体にアクリル樹脂を含浸させたものと、その上にポリウレタ樹脂を塗膜した供試体について、構造物が衝撃荷重を受ける際に想定されるひずみ速度 $10^0 \sim 10^2(1/s)$ に相当する高速度急速載荷実験を実施し、直接危害の要因となるコンクリート飛散片の性状について実験的に検討したものである。

2. 実験概要

飛散片抑止効果の定量的な確認実験要領は全く確立されていないことから、本研究では、やや定性的な比較要領を基本とする表-1に示す実験を行った。すなわち、樹脂補強を行う前の標準供試体(プレーン)と補強供試体について、(1)まず、静的な荷重～変形関係の比較を行ったのち、(2) $v \approx 2m/s$ の急速載荷実験を行い、その荷重

表-1 実験要領

比較要因	静的載荷実験	急速載荷実験
標準供試体	・圧縮・引張強度および軟化特性の比較	・荷重～変形関係の比較 ・飛散片形状、質量、速度、運動エネルギーの比較
アクリル樹脂含浸		
ポリウレタ塗膜(1~2mm)		

表-2 コンクリート配合表

粗骨材 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 s/a (%)	単位量						28日 強度 (N/mm ²)	実験時 強度 (N/mm ²)
					水 W (kg)	セメント C (kg)	細骨材 S (kg)	粗骨材 G (kg)	減水剤 A (g)	AE剤 A (g)		
20.0	8.0	6.0	57.1	45.1	163.76	288.80	835.30	994.00	1239.13	92.42	18.3	21.9

*1 防衛大学校 理工学研究科前期課程地球環境科学専攻 (正会員)

*2 防衛大学校 理工学研究科後期課程装備基盤工学系専攻 修(工)

*3 防衛大学校 建設環境工学科教授 工博 (正会員)

*4 ジャスト・フィット・マテリアル(株)

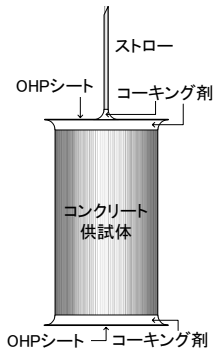


図 - 1 含浸前の処置



写真 - 1 浸透中の供試体

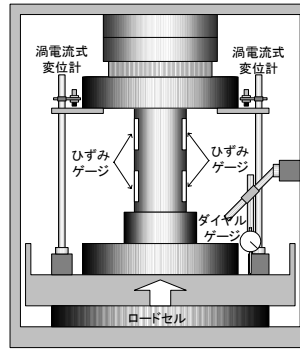


図 - 2 静的圧縮実験装置

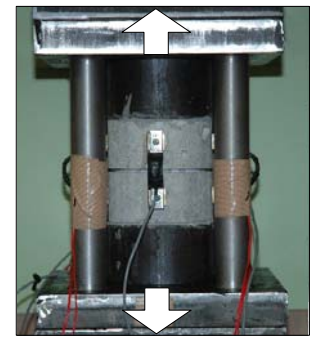


写真 - 2 直接引張実験装置

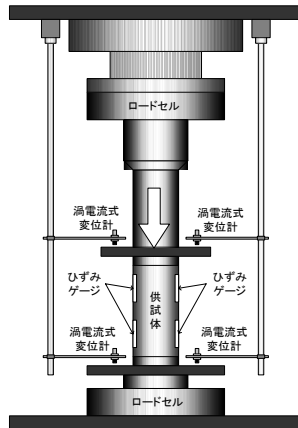


図 - 3 急速載荷実験装置

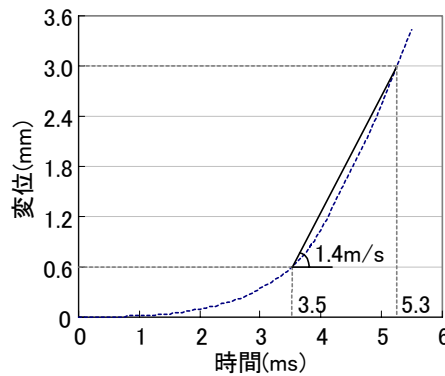


図 - 4 変位 - 時間関係

表 - 3 樹脂の性能

項目	アクリル樹脂	ポリウレア樹脂
引張強さ	2.0N/mm ²	30N/mm ²
破断伸び	50%	450%

- 変形関係への影響を破壊飛散片の形状や運動エネルギーについて比較した。

2.1 アクリル樹脂含浸コンクリート供試体

樹脂補強を施す基となる標準供試体は表 - 2 に示す配合の直径 100mm、高さ 200mm のコンクリート円柱供試体である。樹脂補強を施す必要のあるコンクリートは概して劣化している可能性が高いと考え、水セメント比を大きくした低強度コンクリートを用いている。コンクリート供試体にアクリル樹脂を浸透させる際、供試体側面からのみ含浸する状態にするために図 - 1 のように上下端面を OHP シートおよびコーキング材で密封し、上部端面にストローを取り付けて、樹脂によって追い出されたコンクリート内の空気を排出できる構造とした。次に、写真 - 1 に示すように塩化ビニル製の円筒型ケースに約 50 時間後に硬化し始めるように配合した液状のアクリル樹脂を入れ、そこに OHP シートで端面を被覆した供試体を設定した浸透時間ごと 12, 24, 48 時間浸した。アクリル樹脂を浸透させ、ケースから取り出した供試体は樹脂の硬化を促進させるため、供試体表面のべたつきが完全なくなるまでの約 2 週間、日光に当て養生した。計測した養生後の質量増分から推算された平均浸透厚は 0.7 ~ 1.4mm(12h), 1.0 ~ 1.5mm(24h), 1.3 ~ 2.3mm(48h)であった。参考までに硬化した後のアクリル樹脂の引張強さと破断伸びの公称値は表 - 3 に示すものである。

2.2 ポリウレア塗膜コンクリート供試体

ポリウレア樹脂補強供試体は、アクリル樹脂を 48h 含浸させた供試体にひずみゲージを貼付した後、その上から 1mm および 2mm の厚みを目標としてスプレーで塗装した。なお、ポリウレア樹脂の強度等は表 - 3 に示すものである。

2.3 載荷要領等

静的圧縮実験は、図 - 2 に示すような通常の油圧式の圧縮実験装置を使用し、変形量は渦電流式変位計で計測した。

直接引張実験⁵⁾は、写真 - 2 に示すような弾性鋼棒によって 4 点を結合された内部に直接引張実験用の供試体(高さ 100mm)を鋼治具に樹脂接着して、4 点鋼棒と一緒に引張するものである。そのうえで、鋼棒に働いた力を全体の引張力から差し引くことによって供試体の引張力と変形の関係を求める。

急速載荷実験は、図 - 3 に示す急速載荷実験装置を使用し、油圧と空気圧によって載荷速度を制御するものであり、その変位 - 時間関係は図 - 4 のようになる。本実験では、最大強度が約 0.6mm で得られ、概ね 3.0mm で強度を失うので、その平均的載荷速度は 1.4m/s となる。

2.4 飛散片運動エネルギーの計測

飛散片の運動エネルギーを求めるために、まず、実験後に飛び散った破片の位置(x, y)を図 - 5 の要領で記録した。また、各破片の大きさおよび質量を記録した。

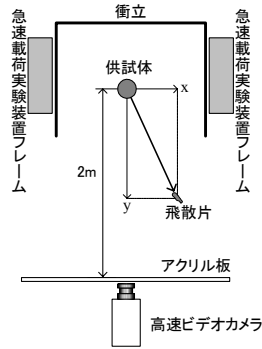


図 - 5 飛散方向の算定

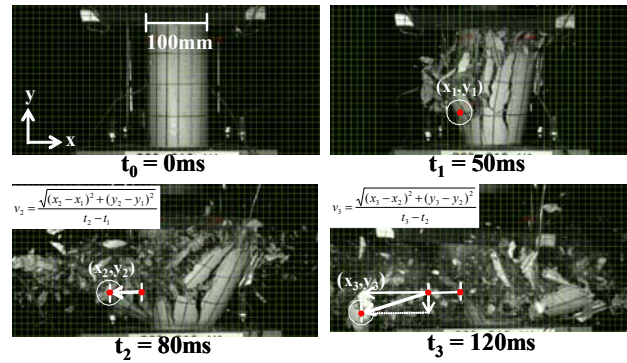


写真 - 3 飛散速度の算定

表 - 4 実験ケース

実験ケース	供試体パラメータ			実験回数		
	アクリル樹脂		ポリウレア樹脂 塗厚(mm)	静的圧縮 実験	直接引張 実験	急速載荷 実験
	浸透時間(h)	浸透厚(mm)				
プレーン				3	3	6
12H	12	1.2		3	3	6
24H	24	1.3		3	3	6
48H	48	1.9		3	3	6
48H-P1	48	1.7	1	3		6
48H-P2	48	1.8	2	3		6

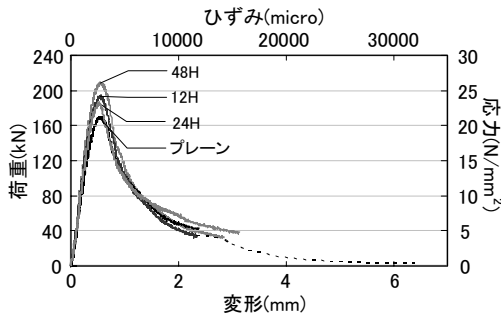


図 - 6 静的圧縮荷重 - 変形関係 (アクリル)

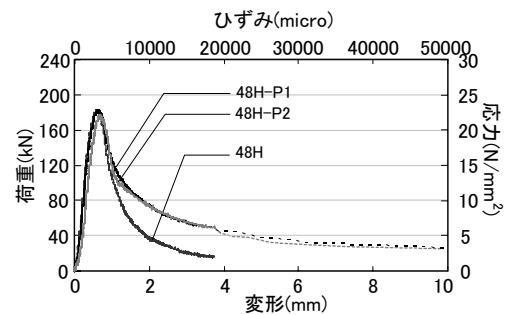


図 - 7 静的圧縮荷重 - 変形関係 (ポリウレア)

そのうえで、写真 - 3 に示すように高速ビデオ画像内の破片の移動量を時間差で除して、破壊直後の各飛散片の速度を算出した。なお、実験場の制約で裏面や側面に飛んだ破片については、このような算出はできないが、全体のエネルギーは破片数に基づく比例増分を仮定して算出した。

2.5 実験ケース

以上の供試体に対して、静的圧縮、引張および平均載荷速度 1.4m/s の急速載荷実験を表 - 4 に示すような回数で行った。

3. 実験結果と考察

3.1 静的圧縮実験

図 - 6, 7 にそれぞれ、アクリル樹脂およびポリウレア補強供試体の静的圧縮荷重 - 変形関係を示す。まず、図 - 7 におけるアクリル樹脂の浸透による効果を見ると、最大荷重に若干の増加が見られるが、その後の軟化領域の耐力には、アクリル樹脂の補強効果は見受けられない。一方、図 - 7 のポリウレア樹脂の場合には、最大荷重については効果が見られないが、軟化域における耐

力はポリウレア塗膜があると粘り強く抵抗する効果が明瞭に表れ、変形量 2.0mm で比較すると、アクリル樹脂を 48 時間含浸した供試体が約 40kN に対して、ポリウレア塗膜 (1mm, 2mm とともに) で約 70kN とポリウレア塗膜によって 2 倍程度の耐力増加が表れている。

3.2 静的引張実験

図 - 8 に静的引張実験の荷重 - 変形関係を示す。興味深いことに、最大荷重を迎えた後に長い軟化領域が続くことがわかる。その荷重 - 変形関係において、アクリル樹脂の浸透時間を多くすると、強度が若干増加している。図 - 9 に最大荷重とアクリル樹脂浸透時間の関係を示す。これによると、明らかに浸透時間が増加すると、引張荷重が増加する傾向が見受けられる。すなわち、圧縮時にはあまり影響はないものの、引張破壊には供試体の外縁の小さな損傷を被膜して補強することの影響が大きいことが推察される。

3.3 急速破壊における破壊形状

写真 - 4, 5 にそれぞれプレーンおよびアクリル樹脂 48 時間含浸供試体の急速載荷実験の破片とその破片を再度組み上げた様子を示す。また、写真 - 5 にポリウレ

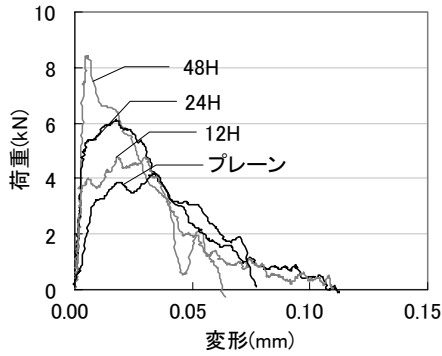


図 - 8 荷重 - 変形関係 (引張)

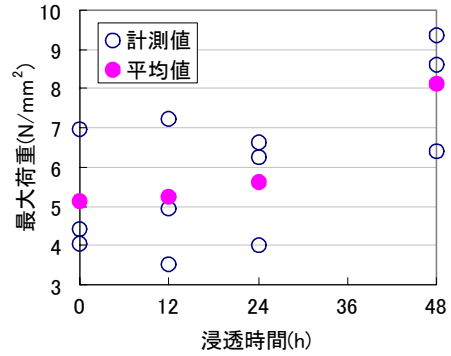
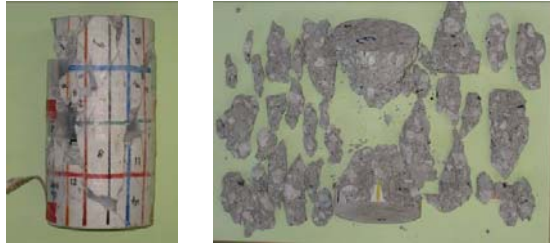
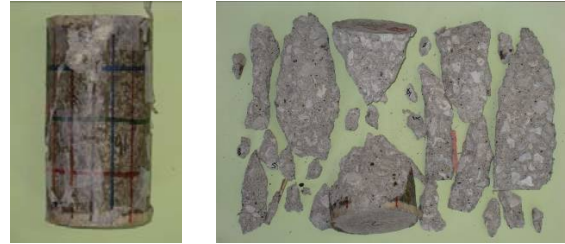


図 - 9 最大荷重 - 浸透時間関係 (引張)



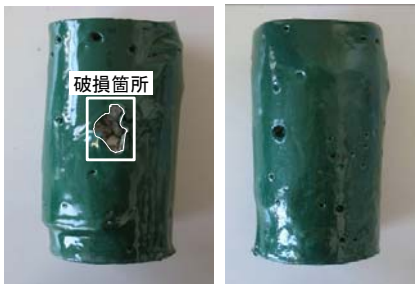
(a) 実験後組上げ (b) 破片

写真 - 4 プレーン供試体



(a) 実験後組上げ (b) 破片

写真 - 5 アクリル樹脂 48 時間含浸供試体



(a) 塗装厚 1mm (b) 塗装厚 2mm

写真 - 6 ポリウレア樹脂塗膜供試体

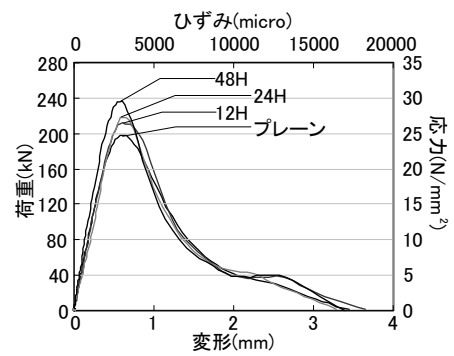


図 - 10 荷重 - 変形関係 (急速アクリル)

ア塗膜の実験後の供試体形状を示す。まず、アクリル樹脂含浸による飛散片の形状や割れ方についてプレーンコンクリートと比較すると、アクリル樹脂を含浸させたものは、一つ一つの破片の大きさが大きくなっている。ただし、破壊を減殺させるほどの効果は見られなかった。一方、ポリウレア塗膜では、1mmでも2mmでも飛散片が生ずることなく、破片を閉じ込めている。ただし、1mm塗膜では、一部破れているところもある。

3.4 急速破壊における荷重 - 変形関係

図 - 10 にアクリル樹脂含浸供試体の荷重 - 変形関係を示す。含浸時間の大小にかかわらず、概ね同じ荷重 - 変形関係となっているが、最大荷重については、含浸時間が大きくなると最大荷重が増加している。図 - 11 に全供試体の最大荷重 - 浸透時間関係を示す。これより、ほぼ明瞭に平均最大荷重値はアクリル樹脂の浸透時間の増加にともなって増加している。さらに、強度のばらつきについてみると、プレーンのものが一番ばらついているのに対して、48 時間含浸の場合には 6 回の実験結果が明瞭にまとまっている。これは、図 - 9 に示したよう

に、アクリル樹脂が破断面形成のきっかけを与えるコンクリートの最外縁にある細かい傷を補修する効果が表れているものと考えられる。

図 - 12 にポリウレア塗膜供試体の荷重 - 変形関係を示す。ポリウレア塗膜による最大荷重への影響は見受けられない。ただし、静的実験の時と同様に軟化領域において、3.5mm 以降も抵抗力が継続している。この抵抗は写真 - 6 に見られるポリウレア塗膜の拘束がもたらすものである。

3.5 飛散片の発生頻度分布

図 - 13, 14 にそれぞれ破片の質量および破片の飛散速度の頻度分布を示す。各グラフには最頻値の比較を容易にするため、対数正規分布の近似曲線も示している。

図 - 13 をみると、いずれの浸透時間のグラフも似たような傾向を示している。しかしながら、浸透時間 12 時間ではあまり変わらないが、24 時間以降のものをみると、浸透時間の長い実験ケースほど、分布曲線のピークに対応する質量が若干大きくなり、飛散する破片の大き

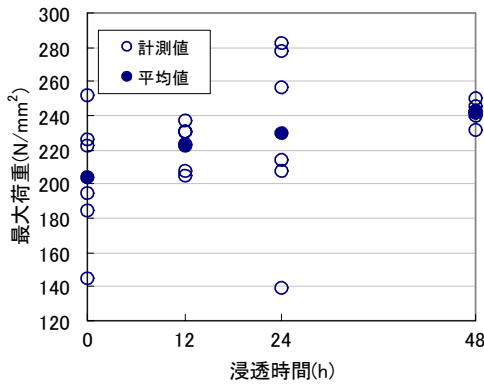


図 - 1 1 最大荷重 - 浸透時間関係 (急速)

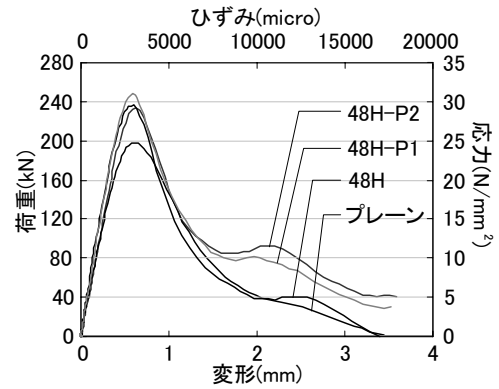


図 - 1 2 荷重 - 変形関係 (急速ポリウレア)

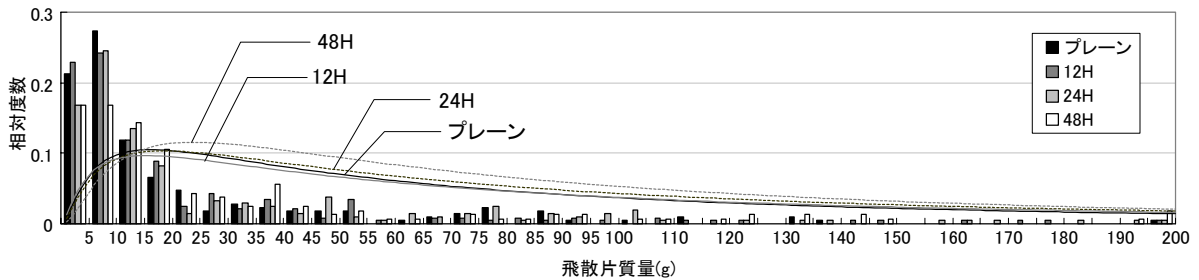


図 - 1 3 破片の質量頻度分布

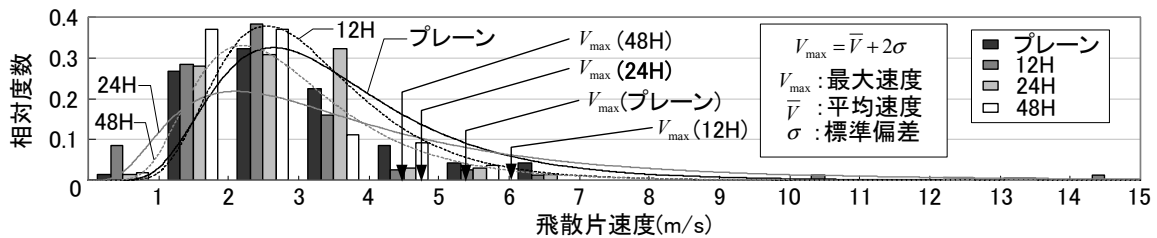


図 - 1 4 破片の速度頻度分布

さが大きくなるのがわかる。

図 - 1 4 の飛散片の速度の最頻値は 2.1~2.6m/s の範囲であり、載荷速度である 1.4m/s の 1.5 倍程度の値となっている。速度の最大値を 4.6%非超過確率値で代表させるものとして図 - 1 5 に浸透時間ごとの飛散片速度の最頻値・最大速度を示す。浸透時間が増加するに従って最大速度が遅くなる傾向があり、アクリル樹脂を含浸させることによる飛散片の速度を抑制する若干の効果が確認できる。その効果をプレーンと 48 時間含浸供試体の飛散片の最大速度で比較すると、飛散片の速度の減少率は 18%程度となり、減少している。このため、実験後のコンクリート片が飛散する範囲も抑えられ、距離において速度と同等の 18%程度、飛散面積にして 32%程度の抑制効果が得られる。

図 - 1 6 に飛散片速度と質量の関係を示す。一般に重い破片に大きな速度を与えるのは難しいので、速度が小さくなるのが考えられる。そこで、グラフには参考のため、0.01J, 0.1J, 1.0J の等エネルギー線を入れている。図によると、浸透時間 12 時間のものが約 1.0J の飛散エネルギーを有する破片が 4 コほど発生し、顕著に大きな

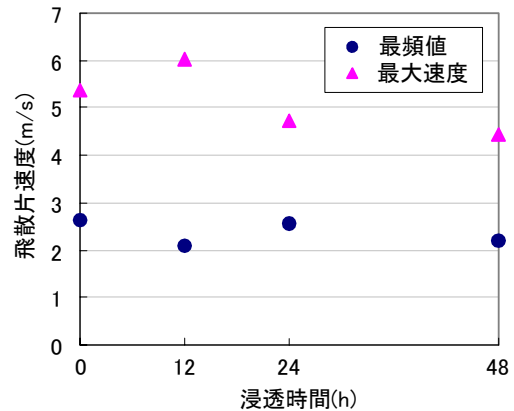


図 - 1 5 飛散片速度 - 浸透時間関係

運動エネルギーを有する破片を生じたことがわかる。また、プレーンコンクリートでは質量 10g 未満の小さな破片の中で他のものより大きな速度を有するものが見立っていることもわかる。

図 - 1 7 には、これらの各飛散エネルギーを積分して得られた各実験の全飛散運動エネルギーを示している。これより、アクリル樹脂を 24 時間浸透させた場合、全飛散運動エネルギーはむしろ増加傾向にあることがわ

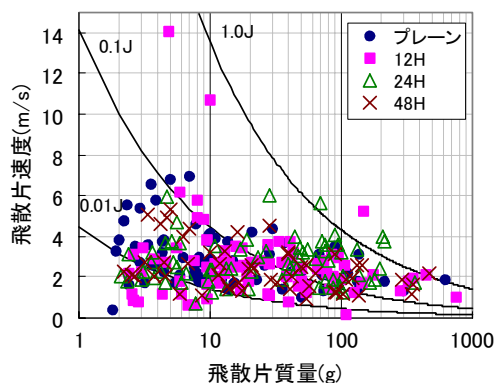


図 - 1 6 飛散片速度 - 質量関係

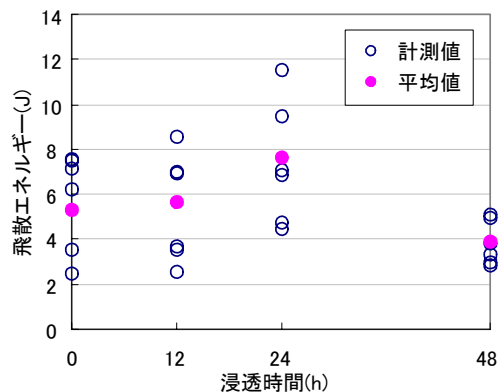


図 - 1 7 飛散エネルギー - 浸透時間関係

かる。これは、中途半端にアクリル樹脂で外縁の引張強度を増すと拘束効果により内部にエネルギーを蓄積させた後に、外縁が亀裂破壊すると一気に飛散片が形成され飛び出すことを示しているためと思われる。しかし、48時間含浸供試体は6体ともまとまってプレーンコンクリートのものよりも小さくなっている。すなわち、含浸時間を長期にしてプレーンコンクリートの細かい傷やひび割れに十分に浸透させることができれば、破壊の発生および亀裂進展を効率的に抑制できる可能性があることが伺える。

図 - 1 8 に図 - 1 0 で示した荷重 - 変形関係の積分によって得られる全入力エネルギーに占める図 - 1 7 の飛散エネルギーの比率、すなわち、運動エネルギーへの変換率を示す。図 - 1 8 は、ほぼ図 - 1 7 と相似関係にあり、飛散運動エネルギーへの変換率は1~5%と非常に小さいことがわかる。ただし、プレーンや24H以下のアクリル含浸では、変換率のばらつきが大きいのに対して、48Hは1~2%と小さな変換率にまとまっていることがわかる。

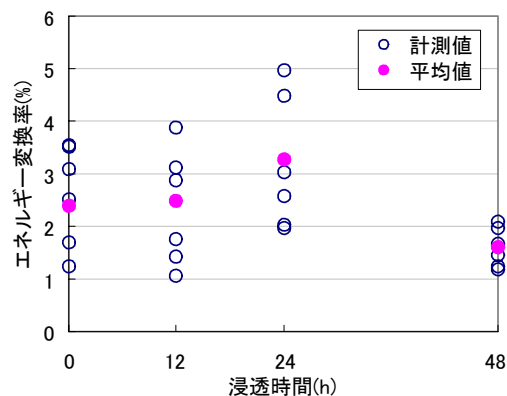


図 - 1 8 エネルギー変換率 - 浸透時間関係

4. 結 言

本研究は、アクリル樹脂およびポリウレタ樹脂により補強したコンクリート標準供試体に対して急速荷重実験を行い、樹脂の飛散片抑止効果を確認したものである。本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) アクリル樹脂をコンクリート供試体に含浸させた場合、静的引張および急速荷重において、アクリル樹脂の浸透時間の増加にともない最大荷重が大きくなる傾向にあり、48時間の含浸では引張強度において約50%、急速荷重圧縮強度において約18%の増加が見られ、樹脂による供試体外縁損傷部の補強効果を確認することができた。
- (2) 急速荷重による飛散片の速度は、アクリル樹脂の浸透時間の増加に伴い遅くなる傾向にあり、48時間の含浸で約18%の抑制効果を確認することができた。

- (3) ポリウレタ樹脂の拘束効果により、静的圧縮、急速荷重ともに軟化勾配が緩やかになり、変形量2mmと比較すると約2倍の耐力増加が表れる。この結果、飛散片を生ずることなく破片を閉じ込めることができる。

参考文献

- 1) 別府万寿博，三輪幸治，伊藤雅晴，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
- 2) 田中信行，大野友則，別府万寿博：小径高速飛翔体の斜め衝突によるコンクリート板の局部破壊と粘弾性体による防護効果，構造工学論文集，Vol.51，No.3，pp.1653-1661，2005
- 3) 「土木コンクリート補修・補強事典」編集委員会：土木コンクリート補修・補強事典，産業調査会，2003
- 4) 大濱嘉彦 他：よくわかる「ポリマーセメントコンクリート/ポリマーコンクリート」の基本と応用，建築技術，2007
- 5) 松尾豊史，金津 努：直接引張試験によるコンクリートの引張軟化特性に関する検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.3，pp.127-132，1998