

(46) 樹脂補強によるコンクリートの飛散片抑止効果に関する実験的検討

Experimental study on resin reinforcing effect on scattering reduction of concrete fragment

足立 国明*, 原木 大輔**, 香月 智***

Kuniaki Adachi, Daisuke Haraki, Satoshi Katsuki

* 防衛大学校研究科前期課程, 建設環境工学科 (〒239-0811 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

** 修(工), 防衛大学校研究科後期課程, 建設環境工学科 (〒239-0811 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

*** 工博, 防衛大学校教授, 建設環境工学科 (〒239-0811 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

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

Key Words: (acryl resin, high speed loading experiment, scattering energy, concrete scattering fragment)

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⁾²⁾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、さらには飛散片に対する安全対策に関する研究³⁾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の補修(断面修復、ひび割れ処理)・補強(表面保護、防水・止水)に多種多様な樹脂が使用されており、アクリル樹脂⁴⁾もその一つである。一般的にアクリル樹脂は低温硬化性に優れ、粘度も代表的な補修材であるエポキシ樹脂の半分程度でひび割れへの注入性能も高いという長所がある反面、

硬化収縮が大きいことや、揮発性が高く特有の臭気が強いのという短所もあり、エポキシ樹脂に比して使用実績およびそれらに関する研究⁵⁾⁶⁾も少ない。そこで、強度はやや劣るが施工性を改良した特殊アクリル樹脂が開発された。特殊アクリル樹脂は、一般的なアクリル樹脂よりも臭気が1/6程度に抑えられ、また粘度は一般的なアクリル樹脂が500~1000MPa・sであるのに対し、特殊アクリル樹脂は100MPa・sと非常に小さい。よって、特殊アクリル樹脂は水のように低粘度でコンクリートなどへの浸透性が高いことから、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。しかし、特殊アクリル樹脂のコンクリートに対する力学的な補修および補強効果について不明瞭な点が多い。

そこで本研究は、特殊アクリル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、表-1に示す実験により、損傷したコンクリートに対する特殊アクリル樹脂の補修効果を検証したうえで、健全なコンクリート標準供試体に特殊アクリル樹脂を浸透させたものに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。

表-1 実験種類

実験名	実験目的
樹脂引張実験	特殊アクリル樹脂の配合後の養生期間が強度および剛性に与える影響について確認する。
斜め切断補修実験	斜めに切断した円柱供試体を特殊アクリル樹脂で接着し、その補修効果を静的圧縮実験により比較する。
急速載荷飛散確認実験	特殊アクリル樹脂を健全な円柱供試体に含浸させたものを構造物が衝撃荷重を受けるときに想定されるひずみ速度 $10^0 \sim 10^2(1/s)$ で急速載荷し、発生する飛散片の速度および運動エネルギーを樹脂の浸透時間ごとに比較する。

表-2 樹脂引張実験供試体

供試体名	配合 (重量比)			期待ゲル化時間 (h)	養生期間 (週)	供試体数
	主剤	硬化剤	硬化促進剤			
4%-2W	100	4	2	0.5	2	3
4%-4W					4	3
4%-8W					8	3
4%-16W					16	3
0.05%-2W	100	0.05	0.025	50	2	3
0.05%-4W					4	3
0.05%-8W					8	3
0.05%-16W					16	3

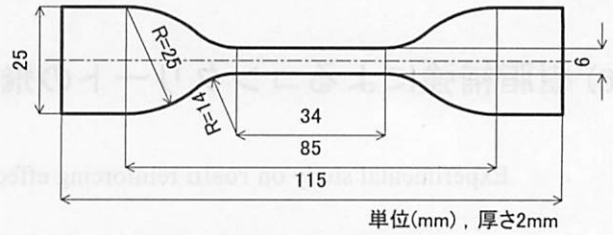


図-1 樹脂引張実験用供試体

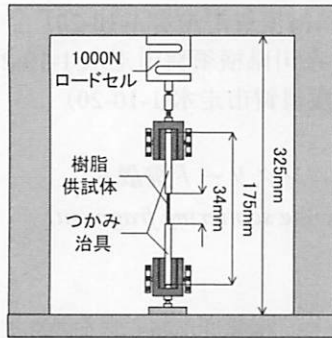
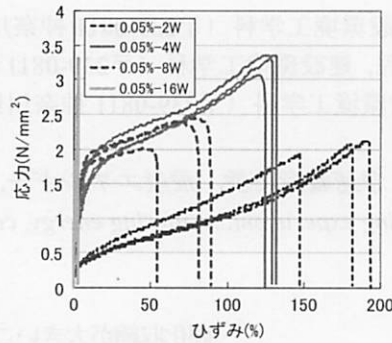
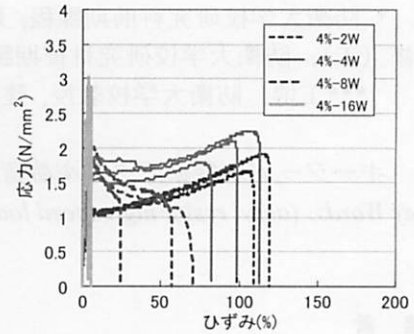


図-2 JIS K 7113 用引張実験装置



(a) 硬化剤 0.05%



(b) 硬化剤 4%

図-3 特殊アクリル樹脂の応力-ひずみ関係

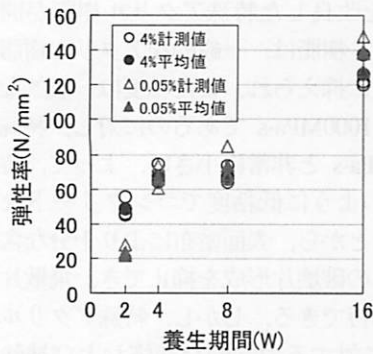


図-4 弾性率-養生期間関係

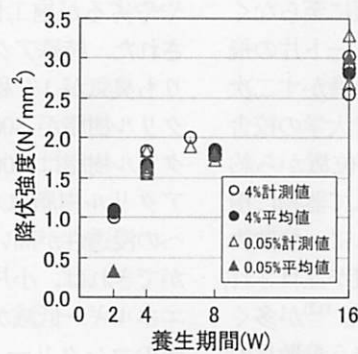


図-5 降伏強度-養生期間関係

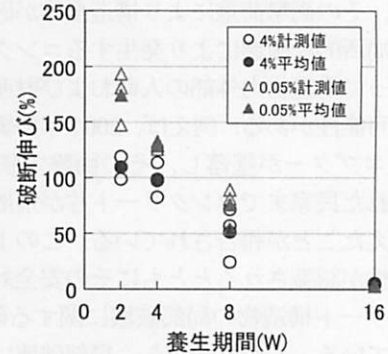


図-6 破断伸び-養生期間関係

2. 特殊アクリル樹脂引張実験

2.1 実験要領

本実験において使用した特殊アクリル樹脂は、反応硬化型の樹脂であり、主剤、硬化剤、硬化促進剤の3成分を混合することで硬化し、この3成分の配合比を変化させることで硬化時間を調整することが可能である。

そこで、硬化剤の配合比と養生期間をパラメータとして表-2の供試体を用いた。表-2の4%配合とは硬化剤を主剤に対して質量比で4%混合させたものであり、ひび割れ等の間隙に毛細管現象により浸透して素早く硬化し、早期に強度の回復を図ることを期待するものである。すなわち、配合後約30分でゲル化し始め、さらに30分程度経過すると完全に硬化する。一方、0.05%配合とは硬化を遅らせることにより、コンクリート表面のモルタルの微細な空隙にまで含浸して、損傷部を強化するものである。そのため、硬化剤と硬化促進剤の配合比を一定

にして、主剤に対する硬化剤と硬化促進剤の割合を小さくすることで、ゲル化開始時間を約50時間と遅らせている。

引張実験はJIS K 7113に準拠して、図-1に示す供試体を作成し、図-2に示す引張試験機を使用して引張実験を行った。载荷速度は2mm/minとし、ロードセル(容量:1000N)により荷重を、既設の変位計(感度:1/100mm)によって変位を計測した。

2.2 実験結果と考察

図-3に実験で得られた応力-ひずみ関係を示す。4%-8W供試体を除いて、すべての供試体では、1~5%ひずみまで弾性的に応力が増加して、いずれの配合においても、その後ひずみ10%付近で剛性が大きく低下して、その後は硬化型のパイリニア型の弾塑性挙動を示している。ただし、硬化剤を4%配合して8週間養生させたものは、降伏点を迎えた後、緩やかに応力が低下してい

表-3 コンクリートの配合

実験種類	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(1m ³ 単位)						28日 圧縮強度 (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)	
切断補修	20.0	16.2	9.9	60.1	45.7	163.76	272.48	851.40	992.73	1415.23	43.59	22.9
急速載荷	20.0	15.4	9.1	57.1	45.1	163.76	288.80	835.30	994.00	1239.13	92.42	18.3

表-4 斜め切断補修実験ケース

供試体名	切断角	養生期間(週)	供試体数
45-2W	45°	2	3
45-4W		4	3
45-8W		8	3
45-16W		16	3
60-2W	60°	2	3
60-4W		4	3
60-8W		8	3
60-16W		16	3

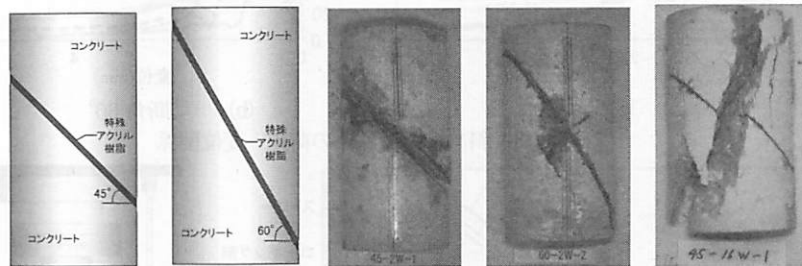


図-7 斜め切断補修実験供試体 写真-1 斜め切断補修供試体の破壊景況

る。また、16週間養生した供試体では、顕著に剛性が大きく、脆性的となっている。

ひずみ 1%までの初期の立ち上がりの剛性を弾性率として整理したものを、図-4 に養生期間との関係として示す。2週間養生では硬化剤 4%配合の方が 0.05%配合のものよりも弾性率が大きい、16週間養生では逆転している。また、すべての供試体において、養生期間の増加とともに弾性率が増加することがわかる。ただし、コンクリートの弾性率が $1.5 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 程度であることを鑑みると、約 1/100 と小さい。図-5 に降伏強度-養生期間関係を示す。養生期間の増加に伴い降伏強度が大きくなり、8週目では硬化剤の配合比にかかわらず約 2N/mm^2 となっている。すなわち、コンクリートの引張強度が概ね $1.5 \sim 4\text{N/mm}^2$ であるのと、ほぼ同等程度となっている。図-6 には、破断時の伸び-養生期間関係を示す。養生期間が増すと破断伸びが小さくなり、脆性的になっている。なお、硬化剤 0.05%配合の破断伸びの方が、同一養生期間の 4%配合のものより大きい。

3. 斜め切断補修実験

3.1 実験要領

実験には直径 100mm、高さ 200mm のコンクリート円柱供試体を使用し、その配合は表-3 に示すものである。供試体は打設 1 日後に脱型し、28 日間水中養生を行った。なお、4 章の供試体も同様の要領で作成した。

補修した特殊アクリル樹脂の接着面には、せん断応力が作用することも考えられる。純粋にせん断応力を接着面に作用させる実験方法は難しいので、図-7 に示すようにコンクリート円柱供試体をコンクリートカッターにより 45°、60° に切断した供試体を特殊アクリル樹脂で接着した後に圧縮破壊実験を行った。まず、切断面は十分に乾燥させた後ヤスリ (#80) で研磨した。接着は切断による間隙を 1mm になるように固定した後、切

断面の間隙を養生テープで覆い、一部の空隙から樹脂を流し込んだ。樹脂を注入して 1 日後に養生テープをはがした後、表-4 の実験ケースに示すように 2 週間から 16 週間気中養生した。なお、本研究で使用した特殊アクリル樹脂は、水分の有無によって硬化反応に影響が出るため、水中養生後は屋外で十分乾燥させ、供試体中の水分を取り除いた状態で実験を実施した。

圧縮実験は、荷重制御により載荷速度 $5\text{N/mm}^2/\text{min}$ で載荷した。ロードセル (容量: 500kN) により荷重、渦電流式変位計 (感度: 1/1000mm) により供試体の全高の変形量を計測した。

3.2 実験結果と考察

写真-1 に供試体の破壊景況の一例を示す。(a)、(b) は養生期間 8 週間以内のものを、(c) には 16 週間養生したものを示している。養生 8 週間以内のものは切断面に沿って起こっており、樹脂がせん断破壊しているのがわかる。一方、16 週間養生したのものは、切断面に対して垂直補方向に破壊面が形成され、樹脂とコンクリートが一体となって破壊している。図-8 に荷重-変位関係を示す。この変位は破壊の景況からみて、切断面補修樹脂部の変形が支配的であると考えられる。どちらの切断角においても、補修した供試体は健全な供試体に比して初期剛性が小さい、これは、図-4 で考察したように特殊アクリル樹脂の弾性率が、非常に小さいことによるものである。図-9 に圧縮強度と樹脂養生期間との関係を示す。養生期間が長くなるにしたがって圧縮強度も大きくなっており、養生期間 16 週目における圧縮強度は、切断角 45° において健全供試体の約 90%、60° において約 75%となっている。

また、養生期間 8 週間以内の供試体において、破壊が完全に切断面において生起していると仮定すると、破壊時に切断面に発生する応力は以下のように求められる。

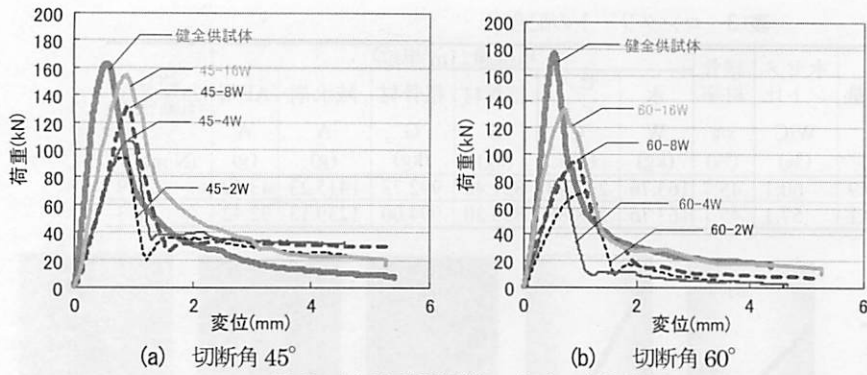


図-8 斜め切断供試体の荷重-変位関係

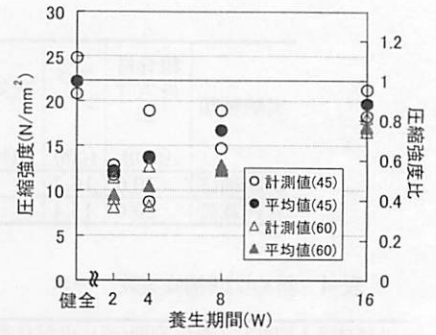


図-9 斜め切断供試体の圧縮強度-養生期間関係

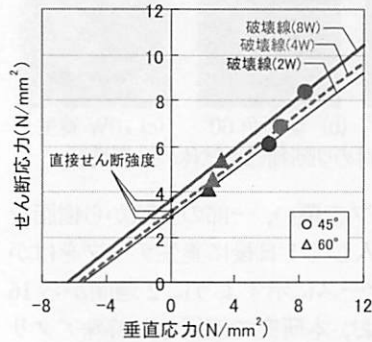


図-10 破壊線と直接せん断強度

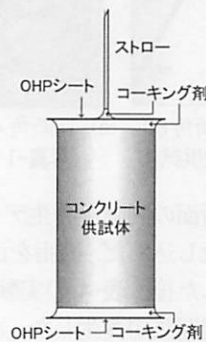


図-11 含浸前の処置

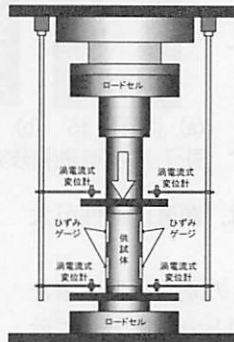


図-12 急速荷重実験装置

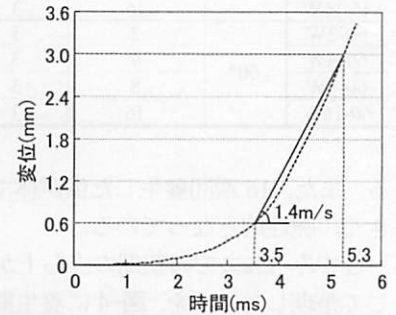


図-13 変位-時間関係

表-5 急速荷重実験ケース

供試体名	状態	浸透時間(h)	養生期間(W)	供試体数
ブレーション	無補強			6
12H	含浸補強	12	8	6
24H	含浸補強	24	8	6
48H	含浸補強	48	8	6
96H	含浸補強	96	8	6

$$\sigma_{\theta} = \frac{P \cdot \cos^2 \theta}{A} \quad (1)$$

$$\tau_{\theta} = \frac{P \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{A} \quad (2)$$

ここで、 θ ：切断角、 P ：最大計測荷重、 A ：供試体の断面積、 σ_{θ} ：切断角 θ における切断面に作用する垂直応力、 τ_{θ} ：切断角 θ における切断面に作用するせん断応力。

次に、それぞれの実験ケースの平均値から求めた σ_{θ} と τ_{θ} をプロットすると図-10のようになり、8週間養生では次式のようなになる。

$$\tau_c = 3.6 + \sigma \cdot \tan 30^{\circ} \quad (3)$$

ただし、 τ_c ：特殊アクリル樹脂のせん断強度。

ところで、この式の縦軸と交わる点が直接せん断強度を与える。直接せん断強度は、養生期間の増加ともない大きくなり、8週間養生で約 3.6 N/mm^2 である。コンクリートの直接せん断強度が圧縮強度の $1/6 \sim 1/4$ といわれているので、このコンクリートでは $3.8 \sim 5.7 \text{ N/mm}^2$ となり、特殊アクリル樹脂の直接せん断強度はコンクリートと同等もしくは8割程度であることがわかる。

4. 急速荷重飛散確認実験

4.1 実験要領

コンクリート供試体に特殊アクリル樹脂を含浸させる際、供試体側面からのみ含浸する状態にするために図-11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、塩化ビニル製の円筒型ケースに約50～100時間後に硬化し始めるように配合した液状の特殊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表-5に示す浸透時間ごと含浸させた。含浸後、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になくなるまで約2週間日光に当て養生し、6週間の気中養生を行った。

急速荷重実験には、図-12に示す急速荷重実験装置を使用し、ロードセル（容量：1000kN）により荷重、渦電流式変位計（感度：1/1000mm）により供試体の全高の変形量を計測した。この実験装置は油圧と空気圧によって荷重速度を制御するものであり、その変位-時間関係は図-13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、その平均的荷重速度は1.4m/sとなる。

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）、質量、大きさを図-14の要領で記録した。そのうえで、写真-2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

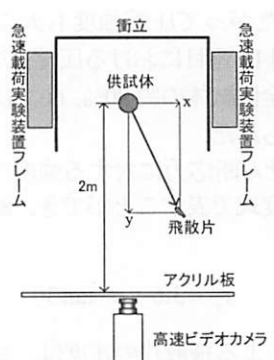


図-14 飛散方向の算定

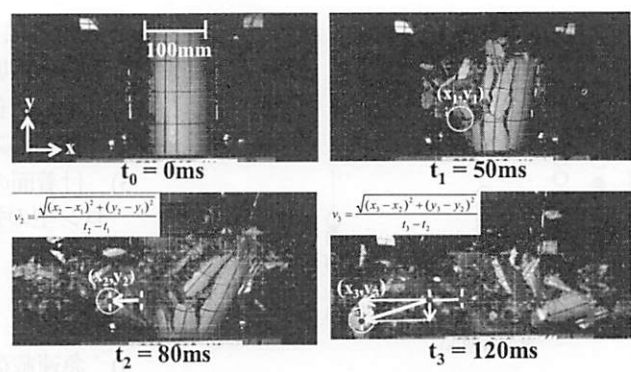


写真-2 飛散速度の算定

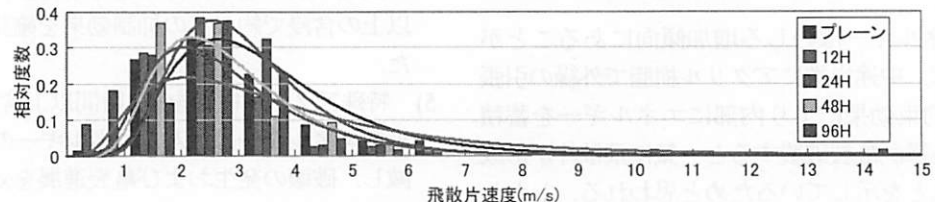


図-15 破片の飛散速度頻度分布

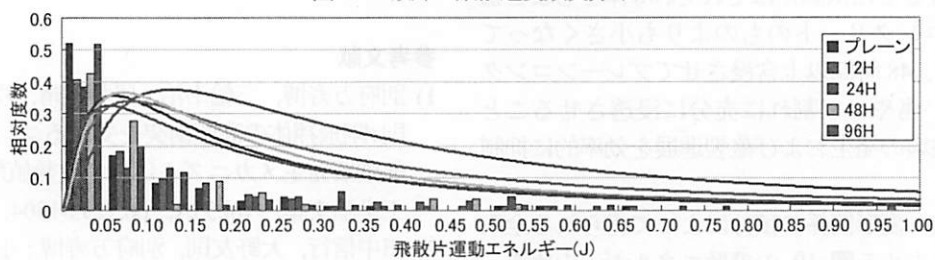


図-16 破片の運動エネルギー頻度分布

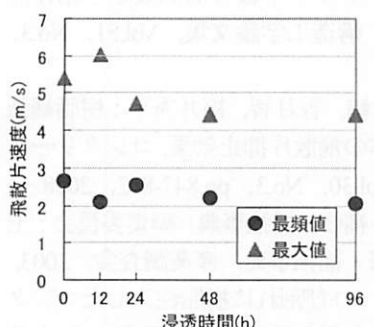


図-17 飛散片速度-浸透時間関係

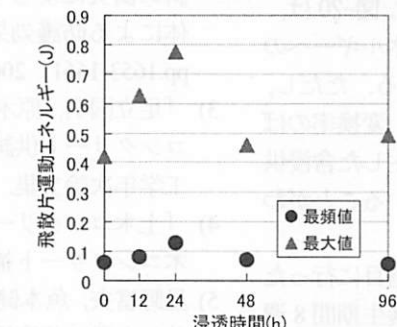


図-18 飛散片運動エネルギー-浸透時間関係

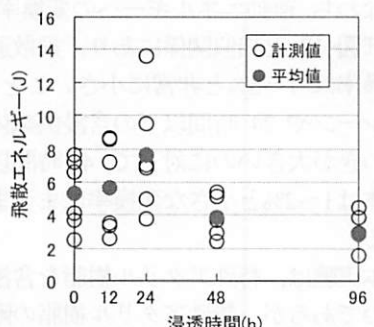


図-19 飛散エネルギー-浸透時間関係

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。

4.2 実験結果と考察

図-15, 16 にそれぞれ破片の飛散速度および運動エネルギーの頻度分布を示す。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-15の飛散片の速度の最頻値は2.1~2.6m/sの範囲であり、载荷速度である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-17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96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、速度の減少に伴い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。

飛散片速度と同様にして図-16から浸透時間ごとの個々の飛散片の運動エネルギーの最大値と最頻値を求めたものを図-18に示す。最大値・最頻値ともに浸透時間24時間までは増加傾向にあり、24時間で最大となっているが、48時間以降のものみると、プレーンとほぼ同等の値で安定している。

図-19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、特殊アクリル樹脂を24時間浸透させた場合、

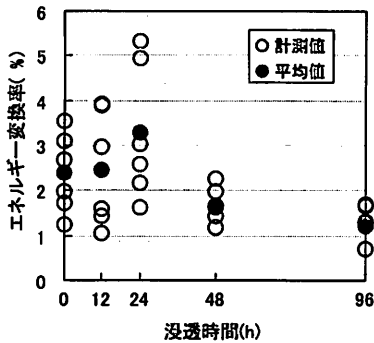


図-20 エネルギー変換率-浸透時間関係

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時間以上含浸させた供試体はそれぞれ6体ともまとめ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、48時間以上含浸させ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。

図-20 に荷重-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-19 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-20 は、ほぼ図-19 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 24 時間以下の含浸供試体では、変換率のばらつきが大きいのに対して、48 時間以上養生した含浸供試体は 1~2%と小さな変換率にまとまっていることがわかる。

本実験は、特殊アクリル樹脂を含浸後 8 週目に行ったものであるが、特殊アクリル樹脂の剛性は養生期間 8 週目以降も増大することから、さらに養生期間を延長させた状態で実験を実施すれば、より大きな飛散抑制効果が得られる可能性がある。

5. 結言

本研究は、特殊アクリル樹脂の力学的特性を明らかにし、コンクリートへの補修効果を確認したうえで、特殊アクリル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載荷実験を行い、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) 本研究で使用した特殊アクリル樹脂の弾性率はコンクリート母材に比して 1/100 と極めて小さく、剛性的には力学的な補修効果はない。また、引張強度はコンクリートの引張強度と同等もしくはやや小さい。ただし、引張破壊ひずみは数千倍の粘りがある。
- 2) 斜め切断補修実験において、補修後の養生期間が増

大するにしたがって圧縮強度も大きくなる傾向にあり、養生期間 16 週目における圧縮強度は、切断角 45° において健全供試体の約 90%、60° において約 75%まで回復がみられた。

- 3) 付着面のせん断応力に対する強度は、モール・クーロン型の強度式で表すことができ、8 週間養生で次式となる。

$$\tau_c = 3.6 + \sigma \cdot \tan 30^\circ$$

- 4) 急速載荷による飛散片の速度は、特殊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 時間以上の含浸で約 18%の抑制効果を確認することができた。
- 5) 特殊アクリル樹脂を 48 時間以上含浸させることで、飛散エネルギーは、入力エネルギーの 1~2%程度に軽減し、破壊の発生および亀裂進展を効率的に抑制できる。

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) 「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抑止効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.847-852, 2008.
- 4) 「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.
- 5) 星野富夫, 魚本健人: ひび割れに樹脂注入したコンクリート梁の強度性状と耐久性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.451-456, 2001.
- 6) 加藤佳孝, 伊代田岳史, 西村次男, 魚本健人: ひび割れを有するコンクリートに適用した表面被覆材の力学性能と耐久性能評価, 土木学会論文集, No.781/V-66, pp.89-99, 2005.2
- 7) 国枝稔, 川瀬貴行, 鎌田敏郎, 六郷恵哲: ひび割れ注入材の曲げ付着特性の評価に関する破壊力学的検討, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.203-213, 2001.2
- 8) 国枝稔, 若槻晃右, 鎌田敏郎, 六郷恵哲: 破壊制御設計に基づいたひび割れ注入補修に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.697/V-54, pp.169-177, 2002.2
- 9) 三好学, 飯坂武男, 福島浩一, 梅原秀哲: コンクリート補修材料としてのアクリル樹脂の特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集報告集, Vol.20, No.1, pp.401-406, 1998.