

# 論文 剛飛翔体の高速衝突に対する短繊維補強コンクリート板の破壊性状に関する検討

森田 武<sup>\*1</sup>・別府 万寿博<sup>\*2</sup>・鈴木 誠<sup>\*3</sup>

**要旨**：コンクリートに短繊維を混入することによる局部破壊に対する耐衝撃性能の向上効果の把握を目的として、短繊維による補強効果を実験的に検討するとともに、有限要素法による解析方法の検討ならびにコンクリートの引張軟化特性が耐衝撃性能に及ぼす影響をパラメトリックスタディによって検討した。実験的検討の結果、ポリプロピレン短繊維を 1vol% 混入することにより、耐衝撃性能を大きく改善することができた。また、解析的検討では、ひずみ速度と側圧の影響を考慮することでプレーンコンクリート板の破壊領域を概ね再現することができた。そして本解析方法を用いて、引張軟化特性が耐衝撃性能に及ぼす影響を示した。

**キーワード**：高速衝突、剛飛翔体、局部破壊、コンクリート板、短繊維補強、ポリプロピレン

## 1. はじめに

近年、不測の爆発事故や自然災害によって衝撃的な荷重がコンクリート構造物に作用し、予測できない損傷や破壊が生じるケースが増加している。

衝撃荷重を受けるコンクリート構造物の破壊は、大きく全体破壊と局部的な破壊に分類できる。飛翔体が高速で衝突すると、衝突条件によっては表面破壊（衝突面の破壊）、裏面剥離（衝突面と反対面のコンクリートの剥離）、貫通等の局部破壊が生じる<sup>1)</sup>。コンクリート構造物に局部破壊が生じると、構造部材の剛性や強度を低下させるだけでなく、裏面剥離が生じた場合には衝突面裏側に飛散物が生じて構造物内の人命や機器に損傷を与える。

別府らは、高速衝突を受けるコンクリート板の合理的な設計法を提案するため、無筋コンクリート板に対する高速衝突実験<sup>2)</sup>や数値シミュレーション<sup>3)</sup>を行い、破壊メカニズムに基づいた局部破壊評価法を提案している<sup>4)</sup>。さらに、カーボンやアラミド繊維シートを裏面に貼り付けたコンクリート板に対する高速衝突実験を行い、繊維シート補強はコンクリートの裏面剥離に伴う飛散物を抑制する効果があるが、コンクリートの損傷を低減する効果は小さいことを示している<sup>5)</sup>。

本研究は、コンクリートに短繊維を混入することによる局部破壊に対する耐衝撃性能の向上効果の把握を目的として、短繊維による補強効果を実験的に検討するとともに、有限要素法による解析的な検討を行った。実験的検討では、繊維の補強効果を確認するために、ポリプロピレン短繊維による補強の有無を実験因子として、材料試験およびコンクリート板に対する高速衝突実験を行った。解析的検討では、有限要素法を用いて、高速衝突を受けるプレーンコンクリート板の局部破壊性状の解析条

件を検討して実験結果の再現を試みた。その上で、短繊維補強コンクリートの引張軟化特性が局部破壊性状に及ぼす影響を定性的に把握するために、パラメトリックスタディを行った。

## 2. コンクリート板に対する高速衝突実験

### 2.1 試験体

#### (1) 使用材料と調合

コンクリートの使用材料を表-1 に、調合を表-2 に示す。短繊維補強には、繊維長 20mm、繊維径 0.05mm のポリプロピレン短繊維を用いた。ポリプロピレン短繊維を混入したコンクリート (PP20-1) では、ベースとなるコンクリート (PLAIN) に対して外割りで 1vol% の短繊維を混入した。コンクリートの空気量は空気量調整剤を適宜添加して、約 5% になるように調整した。

#### (2) 試験体の種類と形状・寸法

PLAIN と PP20-1 の 2 種類のコンクリートを用いて、[縦]50cm×[横]50cm×[厚さ]8cm の無筋コンクリート板の試験体を各々 1 体ずつ製作するとともに、同一バッチから材料試験用の供試体も採取した。なお、試験体を無筋にしたのは、鉄筋の影響を排除し、短繊維補強の効果を明確に把握しようと考えたためである。

表-1 使用材料

材料	種類・物性など
セメント	普通ポルトランドセメント
粗骨材	硬質砂岩 (砕石 2005, 青梅産), 表乾密度 2.65 g/cm <sup>3</sup>
細骨材	山砂 (君津法木産), 表乾密度 2.62g/cm <sup>3</sup>
混和剤	AE 減水剤, AE 剤, 空気量調整剤
短繊維	ポリプロピレン, 長さ 20mm, 径 0.05mm

\*1 清水建設 (株) 技術研究所 博士 (工学) (正会員)

\*2 防衛大学校 建設環境工学科 博士 (工学) (正会員)

\*3 清水建設 (株) 技術研究所 工博

表-2 調査

調査名	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤	短繊維 PP
			水	セメント	細骨材	粗骨材		
PLAIN	55	46	175	318	817	973	AE 減水剤 1.0%	—
PP20-1	55	46	175	318	817	973	AE 減水剤 1.0% 空気量調整剤:2T	1.0vol%

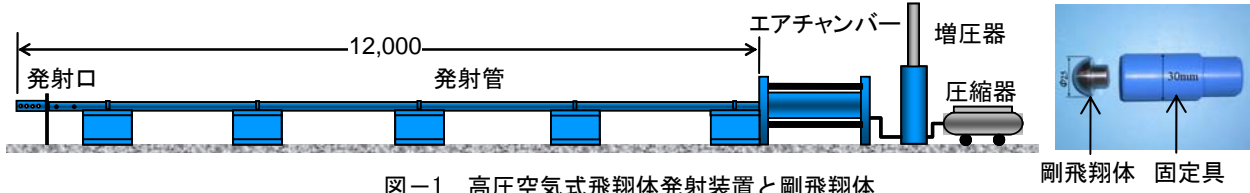


図-1 高圧空気式飛翔体発射装置と剛飛翔体

## 2.2 実験方法

### (1) 材料試験

短繊維補強コンクリートの力学特性を把握するための材料試験として、圧縮強度試験に加えて、圧縮タフネス試験<sup>6)</sup>および曲げタフネス試験<sup>7)</sup>を実施した。

### (2) 高速衝突実験

高速衝突実験には、図-1に示す高圧空気式飛翔体発射装置を用いた。本装置は、圧縮器・増圧器・エアチャンバー・発射管（長さ12m、内径35mm）で構成されており、圧縮空気で飛翔体を発射・加速する。本実験では、直径25mm、質量50g、先端形状が半球型の鋼製（SS400）の剛飛翔体をこの装置から発射して、上下端を5cm幅で固定支持したコンクリート板に衝突させた。衝突速度は、既往の実験結果<sup>2),5)</sup>を参考にして、PLAINで裏面剥離を生じる速度である315m/sとした。衝突速度は、図-1の発射口に設置したレーザー式速度検出センサで測定した。

## 2.3 材料試験結果

実験時圧縮強度はPLAINが41.0N/mm<sup>2</sup>、PP20-1が34.3N/mm<sup>2</sup>であり、繊維を1.0vol%混入したことによってPP20-1の圧縮強度はPLAINよりも16%程度低くなった。

圧縮タフネス試験の結果を図-2に、曲げタフネス試験の結果を図-3に示す。圧縮タフネス試験と曲げタフネス試験のいずれにおいても、PLAINは最大荷重到達直後に破壊したが、PP20-1では最大荷重以降に軟化挙動を示した。PP20-1の圧縮じん性係数はPLAINの約3倍、曲げじん性係数は約39倍となり、圧縮・曲げの双方でPP20-1の方がPLAINより非常に高いタフネスを示した。

## 2.4 高速衝突実験結果および考察

実験後の試験体の表面・裏面および厚さ方向に切断した断面の状況（主なひび割れのトレースを点線で表示）を図-4に示す。実験の結果、PLAINでは裏面剥離を生じた。これは、試験体の断面に生じた押抜きせん断ひび割れのような斜め方向のひび割れ（以下、斜めひび割れと言う）が裏面に達したためだと考えられる。一方、PP20-1では微細な斜めひび割れが生じている程度で、裏面剥離は生じなかった。これは、ひび割れにおける短繊維

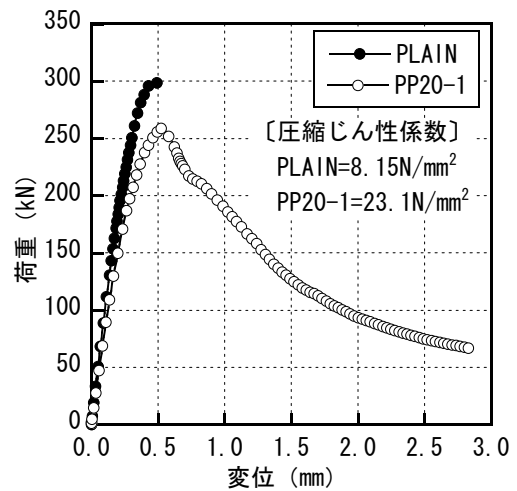


図-2 圧縮タフネス試験結果

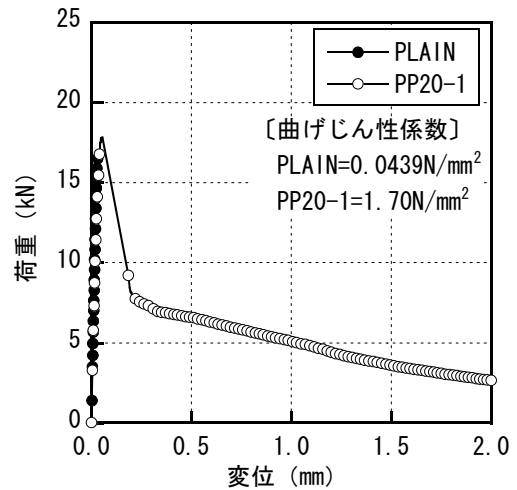

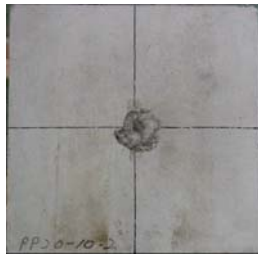
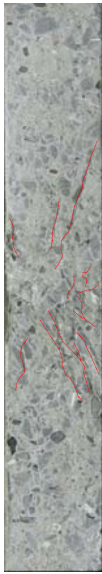
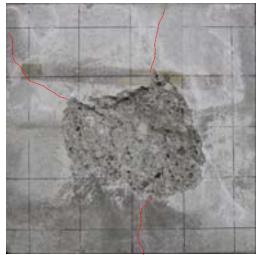



図-3 曲げタフネス試験結果

の架橋効果によって斜めひび割れの拡大・進展が抑制されたためだと考えられる。表面破壊の貫入深さは、PLAINが26mm、PP20-1が25mmで同程度であったが、破壊面積はPLAINの方が直径で50mm程度大きくなった。

## 3. コンクリート板の破壊性状に関する解析検討

本研究では、非線形有限要素法プログラム「ADINA」を用いて、コンクリート板の局部破壊の再現を試みた。飛

PLAIN		PP20-1	
	→ 衝突 方向		
			
表面		表面	
裏面	断面	裏面	断面
表面破壊: 深さ=26mm, 直径(平均値) <sup>*</sup> =130mm 裏面剥離: 深さ=38mm, 直径(平均値) <sup>*</sup> =244mm		表面破壊: 深さ=25mm, 直径(平均値)=82mm 裏面剥離: なし	

※破壊面の最大長さ, 最小長さおよび中間程度の長さを測定して平均した値を直径とした。

図-4 高速衝突実験後の試験体の状況

翔体がコンクリート板に高速で衝突すると, コンクリート内部への飛翔体の貫入, 衝突面や裏面におけるコンクリート片の剥離・飛散が生じる。しかし, 有限要素法では, コンクリート片の剥離・飛散のモデル化が困難である。また, 貫入による要素の大変形が原因で解析が中断される。そこで, 三輪らが提案した手法<sup>4),5)</sup>を用いて, 高速衝突で発生する衝突荷重-時間関係を算定し, これを外力条件としてコンクリート板に作用させることにした。

### 3.1 解析手法

#### (1) 解析手法

高速衝突を受けるコンクリート板を図-5に示すように2次元軸対称系でモデル化した。なお, 図-5では, 実験時に垂直に設置したコンクリート板を90度回転して示している。また, メッシュ分割も模式的に表現しており, 実際のメッシュサイズは3mmとした。

コンクリート板には剛飛翔体の衝突によって表面破壊が生じるため, 剛飛翔体の直径と貫入深さ分の要素を, 解析モデルからあらかじめ削除した。貫入深さおよび衝突荷重-時間関係は, 三輪らが提案した改良理論モデル<sup>4),5)</sup>を用いて算定した。このモデルは, 飛翔体の貫入量を飛翔体の運動エネルギーと仕事の釣り合いから求めものである。その算定過程において, 飛翔体表面に作用する抵抗力と慣性力の和である衝突荷重および飛翔体の速度に関する経時変化が得られる。2.2(2)で述べたPLAINの高速衝突実験の条件を用いて理論計算によって得られた衝突荷重-時間関係を図-6に示す。0.176msで荷重が急激に低下するのは, 飛翔体の運動エネルギーが仕事で完

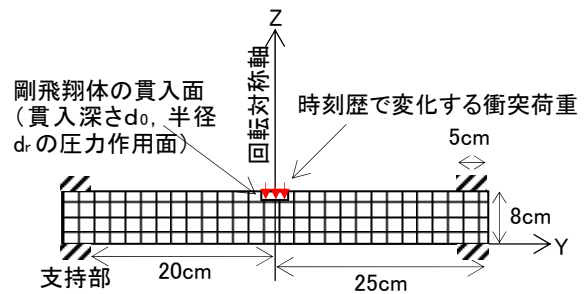


図-5 コンクリート板解析モデル (90° 回転)

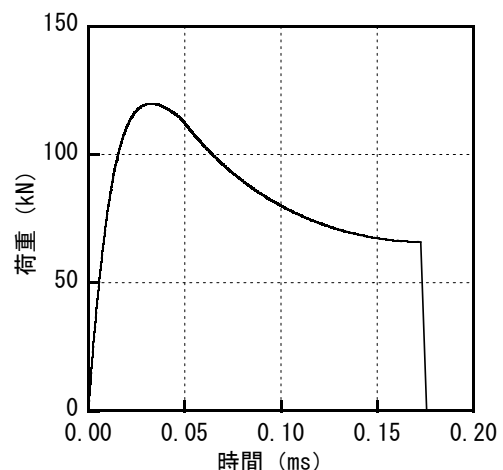


図-6 衝突荷重-時間関係

全に消費されて速度がゼロになる時点でも, 速度に依存しない抵抗力成分が荷重に含まれているためである。図-6の衝突荷重-時間関係を圧力に変換して, 図-5に示す貫入深さ $d_0$ の位置にある半径 $d_r$ (飛翔体の半球型先端

部の半径)の円形の貫入面に作用させた。計算方法は、中央差分法を用いた動的時刻歴応答計算とした。

## (2) コンクリートモデル

解析に用いるコンクリートモデル(等価一軸応力-ひずみ関係)を図-7に、本検討における設定条件を表-3に示す。なお、本解析におけるコンクリートの静的圧縮強度は、実験時のプレーンコンクリートの圧縮強度を丸めて  $40\text{N/mm}^2$  とし、静的引張強度は圧縮強度の  $1/10$  を仮定して  $4\text{N/mm}^2$  とした。実験時の短繊維補強コンクリートの圧縮強度は  $34.3\text{N/mm}^2$  であったが、パラメトリックスタディでは、引張軟化域の影響を定性的に把握することを第一に考えて、 $40\text{N/mm}^2$  をそのまま適用した。

コンクリートの圧縮強度と引張強度は、ひずみ速度が大きくなると増大する。また、衝突部分には非常に高い圧力が生じる。しかし、本研究で用いた構成モデルは、多軸状態のコンクリートを直接モデル化できないため、以下の要領で側圧を考慮した圧縮強度  $\sigma_c$  を求めた。

別府らの数値シミュレーションによると、2.2 (2)と同条件で飛行体を衝突させた場合、衝突部には  $80\text{N/mm}^2$  (表面から  $2.5\text{cm}$  位置)  $\sim 1000\text{N/mm}^2$  (衝突位置) の非常に高い圧力が生じる<sup>3)</sup>。また、藤掛らが行ったコンクリートの高速3軸圧縮試験<sup>8),9)</sup>(ひずみ速度  $10^0 \sim 10^4$  (1/s))によると、側圧  $94\text{N/mm}^2$  に対する動的圧縮強度は静的1軸圧縮強度の約5倍、最大圧縮応力時ひずみは約20倍になる。そこで、圧縮強度  $\sigma_c$  は静的圧縮強度を5倍した  $200\text{N/mm}^2$ 、最大圧縮応力時ひずみ  $\epsilon_c$  は一般的な値の  $0.002$  を20倍した  $0.04$  とした。また、コンクリートは高圧時に圧縮軟化挙動を示さないため、最大応力以降は一定の応力となるよう  $\epsilon_{cu}$  を  $0.08$  (文献8),9)によれば側圧  $94\text{N/mm}^2$  における静的載荷で  $0.1$ 、動的載荷で  $0.06$ )として応力-ひずみ曲線をモデル化した。

引張強度  $\sigma_t$  については、別府らの解析結果<sup>3)</sup>を参考にして、ひずみ速度  $10^1$  (1/s) を仮定し、静的引張強度を4倍した  $16\text{N/mm}^2$  を用いた。また、引張軟化域については、引張強度  $\sigma_t$  到達後に瞬時に  $0.25\sigma_t$  まで強度が低下して軟化するモデルとした。なお、終局引張ひずみ  $\epsilon_{tu}$  は、プレーンコンクリートの引張破壊エネルギーを  $100\text{N/m}$  と仮定し<sup>10)</sup>、解析のメッシュ寸法長  $3\text{mm}$  を考慮して算定した塑性ひずみと弾性ひずみの和 ( $17,000\mu$ )とした。

なお、本解析では基礎的な段階として、全ての要素に対して同じひずみ速度・圧力状態を仮定した。

### 3.2 プレーンコンクリートの解析

プレーンコンクリート板に生じるひび割れの経時変化に関する解析結果(対称性を考慮して半断面を表示)を図-8に示す。飛行体が衝突してから  $0.0024\text{ms}$  後には飛行体の貫入先端部から斜め方向にひび割れが進展するとともに、衝突による応力波(圧縮波)が裏面に到達して、

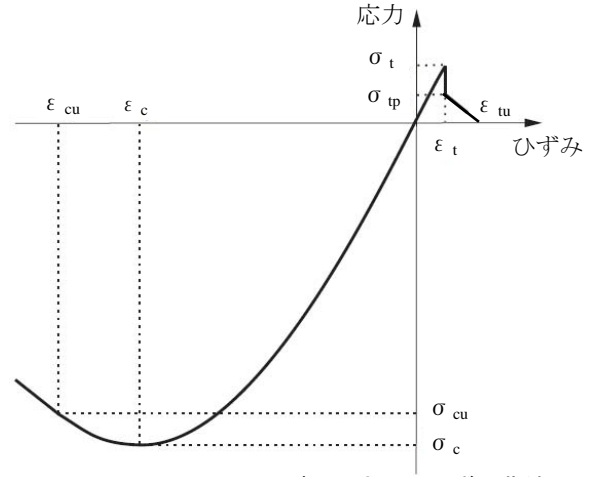


図-7 コンクリートモデル(応力-ひずみ曲線)

表-3 コンクリートモデルにおける設定条件

圧縮強度	$\sigma_c$	$200\text{N/mm}^2$
終局時圧縮強度	$\sigma_{cu}$	$195\text{N/mm}^2$
最大圧縮応力時ひずみ	$\epsilon_c$	$0.04$
終局圧縮ひずみ	$\epsilon_{cu}$	$0.08$
引張強度	$\sigma_t$	$16\text{N/mm}^2$
軟化開始点応力度	$\sigma_{tp}$	$4\text{N/mm}^2$
最大引張応力時ひずみ	$\epsilon_t$	$\sigma_t/E_c$
終局引張ひずみ	$\epsilon_{tu}$	$17,000 \times 10^{-6}$
ヤング係数	$E_c$	$25,000\text{N/mm}^2$
ポアソン比	$\nu$	$0.15$

その反射波(引張波)の影響でひび割れが生じた。その後、斜めひび割れが下方へ進展するとともに、円錐状のひび割れ領域が衝突位置直下の裏面から上方へ拡大し、最大応力時の  $0.0326\text{ms}$  以降もひび割れが進展・拡大した。

有限要素法ではコンクリート片の剥離・飛散は解析できないため、裏面剥離を再現できない。そこで、本解析で得られたひび割れ性状から裏面剥離との対応を考える。図-8に示すように、 $0.1760\text{ms}$ の最終状態では、下方へと進展した斜めひび割れの領域が、上方へと発達した円錐状のひび割れ領域と重なった。その位置は概ね円錐状のひび割れ領域の境界に一致している。このひび割れの重なりによって裏面剥離が生じたと仮定し、高速衝突実験に供したプレーンコンクリート板の裏面剥離性状と解析結果における円錐状のひび割れ領域の境界とを比較すると、実験における裏面剥離の深さが  $38\text{mm}$ 、直径が約  $120\text{mm}$  であったのに対して、解析における円錐状のひび割れ領域の深さは約  $40\text{mm}$ 、直径は約  $90\text{mm}$  であった。解析で得られた裏面剥離の直径は、実験値に比べてやや小さくなったが、深さは概ね一致した。

### 3.3 引張軟化特性を変化させた局部破壊解析

短繊維補強コンクリートは、短繊維の種類、混入率およびコンクリートマトリックスの特性によって、引張強度後の応力低下や終局ひずみが増加する。そこで、パラメトリックスタディを行い、これらの変化が解析結果に



与える影響について考察する。

本パラメトリックスタディでは、引張軟化曲線の軟化開始点応力度  $\sigma_{tp}$  と引張応力がゼロになる終局引張ひずみ  $\varepsilon_{tu}$  を変数とした。 $\sigma_{tp}$  はプレーンコンクリートで適用した  $0.25\sigma_t$  を基準に  $0.50\sigma_t$ ,  $0.75\sigma_t$ ,  $1.00\sigma_t$  の4水準とした。 $\varepsilon_{tu}$  は、 $\varepsilon_{tu}$  と  $\varepsilon_t$  の差を  $\Delta\varepsilon_{ts}$  と定義し、プレーンコンクリートに関する  $\Delta\varepsilon_{ts}$  ( $\Delta\varepsilon_{tsp}$  とする) に対する倍率を  $0.25\sim 4.00$  として与えた。なお、 $\sigma_{tp}$  を頂点とし、 $\Delta\varepsilon_{ts}$  を底辺とする三角形の面積は、破壊エネルギーに相当するひずみエネルギー（以下、 $g_f$  とする）を表す。ここでは、3.2 に示したプレーンコンクリートの解析結果における  $g_f$  を  $g_{fp}$  とする。

一例として、プレーンコンクリートに対し  $\sigma_{tp}$  と  $\Delta\varepsilon_{ts}$  を2倍にした解析結果を図-9 に示す。図-8 のプレーンコンクリート板の結果と比較すると、下方へ進展した斜めひび割れと、上方へ発達した円錐状のひび割れ領域の重なりが小さい。したがって、これらの領域の重なり具合が、解析によって裏面剥離の有無を判断する上での指標になる可能性がある。なお、図-8 と図-9 において貫入面（衝突荷重作用面）直下にひび割れがほとんど生じていないのは、周辺のコンクリートによる拘束が大きいことと、裏面から反射した引張の応力波が衝突面からの後続の圧縮の応力波と干渉したためだと考えられる。

### (1) 引張強度後の応力低下の影響

プレーンコンクリート板の  $0.1760ms$  におけるひび割れ領域（図-8）の面積に対する各パラメータ解析における  $0.1760ms$  のひび割れ領域の面積の比（以下、損傷面積比と言う）を算定し、引張強度後の応力低下の影響を検討した。なお、ひび割れ領域の面積は、ひび割れが生じた要素数をカウントし、その個数と要素面積（メッシュサイズ）の積により求めた。

図-10 に  $\sigma_{tp}$  と損傷面積比の関係を  $\Delta\varepsilon_{ts}$  別に示す。 $\Delta\varepsilon_{ts}$  が同じ場合は、 $\sigma_{tp}$  が大きいほど損傷面積比は小さくなった。しかし、 $\sigma_{tp}$ -損傷面積比曲線の勾配は  $\sigma_{tp}$  が大きくなるとゼロに近づく傾向が見られ、 $\sigma_{tp}=1.00$  の損傷面積比は  $\Delta\varepsilon_{ts}$  にかかわらず約  $0.45$  であった。

$\sigma_{tp}$  を  $0.25\sigma_t\sim 1.00\sigma_t$  に変化させた場合の損傷面積比は、 $\Delta\varepsilon_{ts}=\Delta\varepsilon_{tsp}$  で  $1.00$  から  $0.45$ 、 $\Delta\varepsilon_{ts}\geq 3\Delta\varepsilon_{tsp}$  で  $0.75$  から  $0.45$  に低下し、 $\sigma_{tp}$  をプレーンコンクリートの4倍にすることで損傷が  $40\sim 55\%$  程度低減された。

### (2) 終局ひずみ（破壊エネルギー）の影響

図-11 に  $\Delta\varepsilon_{ts}$  と損傷面積比の関係を  $\sigma_{tp}$  別に示す。図中の点線は、 $g_f$  が等しいプロットを結んだものである。

各  $\sigma_{tp}$  において、 $\Delta\varepsilon_{ts}$  が大きいほど損傷面積比は小さくなった。しかし、 $g_f$  が  $3g_{fp}\sim 4g_{fp}$  以上では  $\Delta\varepsilon_{ts}$  が変化しても損傷面積比に大きな変化はなかった。これと同じことが、図-10 において、 $2\Delta\varepsilon_{tsp}\sim 4\Delta\varepsilon_{tsp}$  の  $\sigma_{tp}$ -損

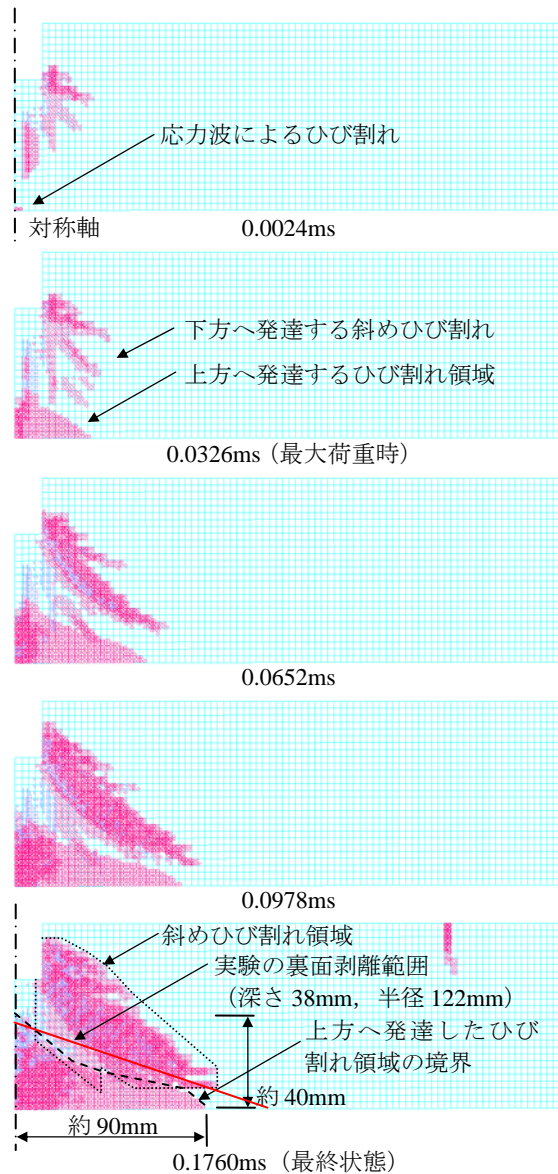


図-8 プレーンコンクリート板内におけるひび割れの経時変化

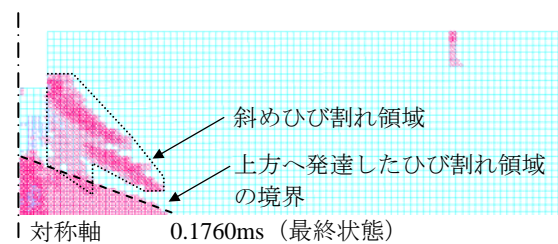


図-9 パラメトリックスタディの解析結果例 ( $\sigma_{tp}=0.5\sigma_t$ ,  $\Delta\varepsilon_{ts}=2\times\Delta\varepsilon_{tsp}$ )

傷面積比曲線がほぼ重なっていることでも示されている。

$\Delta\varepsilon_{ts}$  を  $\Delta\varepsilon_{tsp}\sim 4\Delta\varepsilon_{tsp}$  に変化させた場合の損傷面積比は、 $\sigma_{tp}=0.25\sigma_t$  では  $1.00$  から  $0.75$  に低下した。しかし、 $\sigma_{tp}=\sigma_t$  では約  $0.45$  で一定となり、 $\Delta\varepsilon_{ts}$  をプレーンコンクリートの4倍にしても、損傷が  $25\%$  低下する程度に止まっている。これは、(1)で考察した、 $\sigma_{tp}$  を4倍した場合の低減効果である  $40\sim 55\%$  よりも低い結果である。

#### 4. まとめ

短繊維をコンクリートに混入することによる局部破壊に対する耐衝撃性能の向上効果の把握を目的として、補強効果を実験的に検討するとともに、有限要素法による解析方法の検討を行った上で、短繊維の混入により変化するコンクリートの引張軟化特性が耐衝撃性能に及ぼす影響をパラメトリックスタディにより検討した。これらの検討の結果、以下の知見が得られた。

##### 4.1 繊維による補強効果に関する実験的検討

- ・コンクリートにポリプロピレン短繊維を 1vol% 混入することで、圧縮タフネスと曲げタフネスがプレーンコンクリートに比べて大きく向上した。
- ・高速衝突実験において、プレーンコンクリートは裏面剥離を生じたが、短繊維補強コンクリートでは生じなかった。これにより、短繊維補強は耐衝撃性能の向上に有効であることが確認された。

##### 4.2 破壊性状に関する解析的検討

- ・コンクリートの等価一軸応力-ひずみ関係においてひずみ速度および側圧の効果を仮定し、非線形有限要素法プログラムを用いてプレーンコンクリート板の解析を行った。その結果、破壊領域（裏面剥離）に関して実験と解析で概ね一致する結果が得られた。
- ・引張強度後の引張軟化特性における軟化開始点応力度と終局引張ひずみをパラメータとして解析を行った。その結果、両パラメータの値を大きくすることによって損傷領域が低減された。特に軟化開始点応力度を高くすることによる低減効果が高かった。
- ・本解析ではすべての要素に対して同じひずみ速度・圧力状態を仮定した。今後は、ひずみ速度や圧力の分布を考慮した解析方法の検討を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) Kennedy, R.P.: A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects, Nuclear Engineering and Design, 37, pp.183-203, 1976.
- 2) 別府万寿博, 三輪幸治, 大野友則, 塩見昌紀: 鋼製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に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.63, No.1, pp.178-191, 2007.3.
- 3) 別府万寿博, 三輪幸治, 伊東雅晴, 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, 2007.3.
- 4) 三輪幸治, 別府万寿博, 大野友則, 伊東雅晴, 片山雅英: 改良理論モデルによるコンクリート板の局部破壊評価法, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.4,

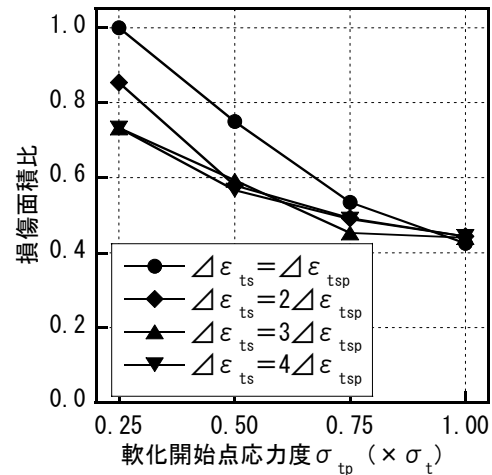


図-10 軟化開始点応力度  $\sigma_{tp}$  と損傷面積比の関係

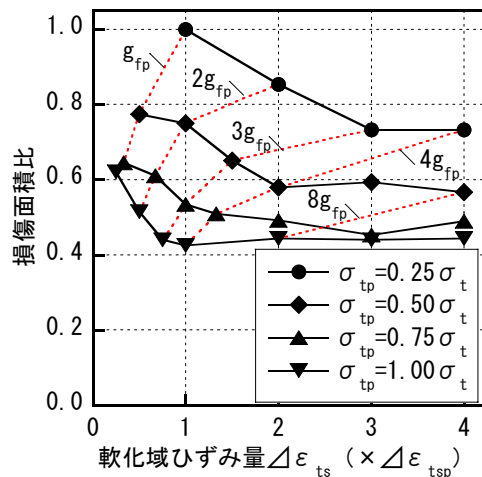


図-11 軟化域ひずみ量  $\Delta\varepsilon_{ts}$  と損傷面積比の関係

pp.844-858, 2009.10.

- 5) 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, 防衛大学校博士論文, 2010.3.
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書 [規準編] 「鋼繊維補強コンクリートの圧縮強度および圧縮タフネス試験方法 (案) (JSCE-G 551-2010)」, 2010.
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書 [規準編] 「鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法 (案) (JSCE-G 552-2010)」, 2010.
- 8) 藤掛一典: 高ひずみ速度下におけるコンクリートの引張・圧縮特性に関する研究, 筑波大学博士論文, 1999.7.
- 9) 藤掛一典, 上野勝敏, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤: ひずみ速度を考慮した三軸応力下におけるコンクリートの直交異方性構成モデルの定式化, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.109-123, 2001.
- 10) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書 (設計編), 丸善, 2007.