

# 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

別府 万寿博<sup>1</sup>・三輪 幸治<sup>2</sup>・大野 友則<sup>3</sup>・塩見 昌紀<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 防衛大学校講師 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

E-mail:beppu@nda.ac.jp

<sup>2</sup>学生会員 防衛大学校理工学研究科学生 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

<sup>3</sup>正会員 防衛大学校教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

<sup>4</sup>正会員 日本ゼネスパイプ(株) (〒101-0032 東京都千代田区岩本町1-10-5)

本研究は、鋼製の剛飛翔体がコンクリート板に高速度で衝突した際に生じる局部破壊について検討を行ったものである。まず、高速衝突実験を行うために、質量50g～1000gの飛翔体が衝突速度約100～500m/sとなる性能を有する高圧空気式発射装置を開発した。次に、この装置を用いて普通および高強度コンクリート板に対する高速衝突実験を行い、飛翔体の衝突速度やコンクリート板の板厚・強度の相違が破壊に及ぼす影響を調べた。実験の結果、衝突速度および板厚の大小によってコンクリートの破壊モードが変化することが明らかとなった。また、表面破壊、裏面剥離の破壊プロセスを高速度ビデオカメラで可視化し、破壊の様子を観察するとともに、破壊が進展する際の条件について考察した。

**Key Words :** high-velocity impact, concrete, local failure, hard projectile

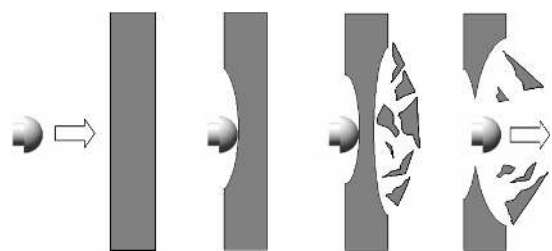
## 1. はじめに

近年、わが国では花火工場等における不測の爆発事故あるいは世界各地で爆破テロが発生するなど、爆発災害が増加傾向にある。コンクリート構造物に爆発荷重が作用すると、爆風圧による直接的な被害が生じるだけでなく、破壊されたコンクリート塊や金属破片および周囲の設置物等の破壊片(以下、飛翔体という)が数 100～数 1000m/s の高速度で飛散し、人命や構造物に対して二次的被害をもたらすことが報告されている<sup>1)3)</sup>。したがって、爆発被害を受ける可能性が高い施設や社会的に重要な施設は、飛翔体の高速衝突によって過度の局部損傷・破壊が生じないように設計される必要がある。しかし、わが国においては、高速飛翔体の衝突に対するコンクリート構造物の防護設計に関する系統的な研究は少ない。このため、局部破壊を精度よく評価できる実験や解析法の確立は急務であるといえる。

飛翔体の高速衝突を受けるコンクリートの局部破壊は、図-1 に示すように表面破壊、裏面剥離および貫通に区分される<sup>4)</sup>。表面破壊とは、衝突側のコンクリートのみが破壊する現象である。裏面剥離は、衝突位置裏側のコンクリートが破片となって飛散する現象である。貫

通は、飛翔体が部材を完全に突き抜ける現象であり、防護上は許容できない破壊である。したがって、構造物内にいる人体への被害を抑止するためには設計上は少なくとも裏面剥離を防止することが求められる。

飛翔体の硬さや剛性によって区別される剛および柔飛翔体の高速衝突を受けるコンクリートの局部破壊については、これまで世界各国において主に軍事的な目的で実験研究が行われてきた。とくに、第二次世界大戦前後には多数の実験が行われ、米国では修正 NDRC 式や ACE 式などが提案されている<sup>4)6)</sup>。1970～1980 年代には、日本においても飛来物に対する原子力発電関連施設の安全性に関して検討が行われている。電力中央研究所では、質量が数 kg～数 100kg の剛飛翔体を鉄筋コンクリート版に衝突させ、表面破壊深さおよび裏面剥離・貫通限界厚



(a)表面破壊 (b)裏面剥離 (c)貫通  
図-1 局部破壊の種類

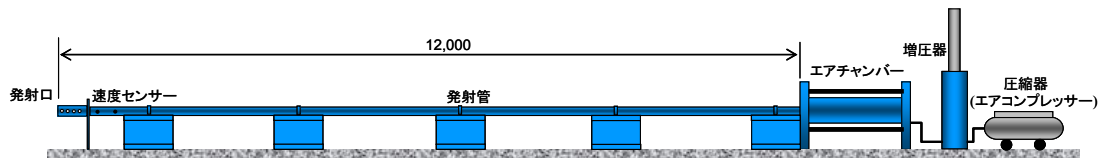
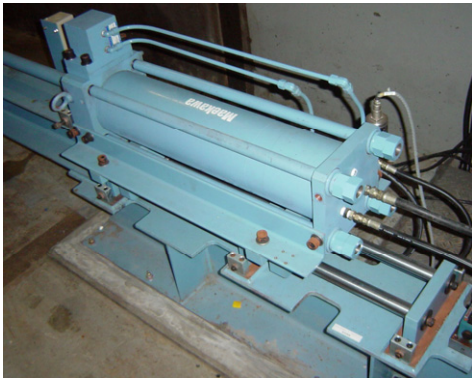


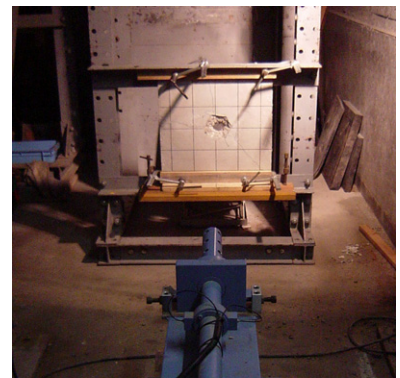
図-2 高圧空気式飛翔体発射装置の概要



(a) エアチャンバー



(b) 発射管



(c) 発射口

写真-1 実験装置各部

の予測式を CRIEPI(電研)式として提案している<sup>9)</sup>。また、内田らは変形を伴う柔飛翔体の衝突を受けるコンクリート板の局部破壊問題において、飛翔体の変形が貫入深さに及ぼす影響について検討している<sup>10), 11)</sup>。

しかしながら、これまでに提案された種々の局部破壊評価式は、用いる式によって算定値に大きなばらつきがあり<sup>4)</sup>、次のような問題点が指摘されている。すなわち、既往の評価式は、次元解析や理論あるいは実験データの統計的処理に基づいて変数や係数の決定が行われている<sup>4), 12), 13)</sup>が、これらのパラメータが局部破壊に影響を及ぼす割合が十分には解明されているとはいえない<sup>14)</sup>。また、過去の実験の中には数十年以上も前に行われたものもあり、詳細な実験条件が不明瞭であることから実験データには大きなばらつきがある。さらに、今後の課題としては、既往の実験データが少ない衝突速度が 300m/s を超える場合の破壊挙動や圧縮強度が 100N/mm<sup>2</sup> を超えるような高強度コンクリートの耐衝撃性についての検討が必要であることが指摘されている<sup>14)</sup>。このように、高速衝突を受けるコンクリートの局部破壊の評価に関する問題点を解決し、防護設計法の提案を行うためには、衝突の条件(飛翔体の剛性、速度、先端形状およびコンクリート強度など)と破壊モードの関係を調べるとともにコンクリートの破壊挙動やメカニズムについても解明する必要があると考えられる。ちなみに、近年の数値シミュレーション技術の発達は著しく、本分野においても衝撃専用の解析ツールである LS-DYNA や AUTODYN などを用いた複雑な解析の試みも行われているが<sup>15), 16)</sup>、破壊挙動の可視化やひずみ応答などを計測した実験例がほとんどないため、解析の精度や結果の妥

当性を検証できないのが現状である。

本研究は、このような背景から、剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリートの局部破壊について基礎的な実験を行ったものである。まず、飛翔体の質量が 50g~1000g の範囲で、約 100~500m/s の衝突速度が得られる高圧空気式飛翔体発射装置の開発を行った。次に、先端が半球の形状を有する鋼製飛翔体を用いて普通および高強度コンクリートの板供試体に対する衝突実験を行い、衝突速度に対する板厚と破壊モードの関係を調べた。この際、高速度ビデオカメラによりコンクリートの破壊挙動を可視化するとともに内部の破壊状況を確認し、破壊モードが進展する条件について現象論的な考察を行った。

## 2. 高圧空気式飛翔体発射装置の開発

飛翔体発射装置の開発にあたっては、安全上の観点から飛翔体の発射駆動力として圧縮空気を用い、その圧力調節によって飛翔体の速度を任意に制御する構造にした。図-2および写真-1に高圧空気式飛翔体発射装置の概要を示す。装置は、圧縮器(エアコンプレッサー)、増圧器、エアチャンバーおよび発射管(長さ; 12m, 内径; 35mm)で構成されている。飛翔体の発射操作は、以下の手順で行われる。

- (1) 飛翔体を発射管始端のエアチャンバー内に挿入して油圧により拘束固定する。
- (2) エアコンプレッサーで圧縮された空気を増圧器に送り、これをさらに圧縮する。
- (3) 増圧された空気がエアチャンバーに送られる。

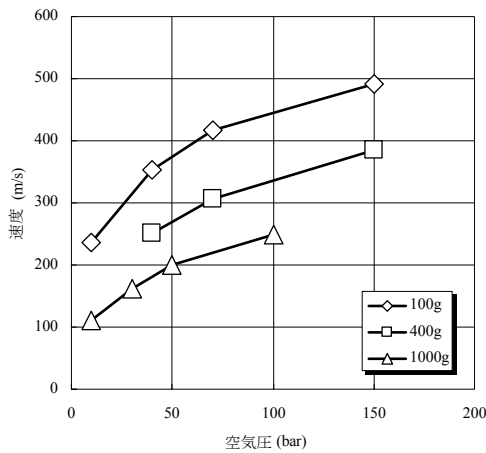


図-3 飛翔体の速度～空気圧関係

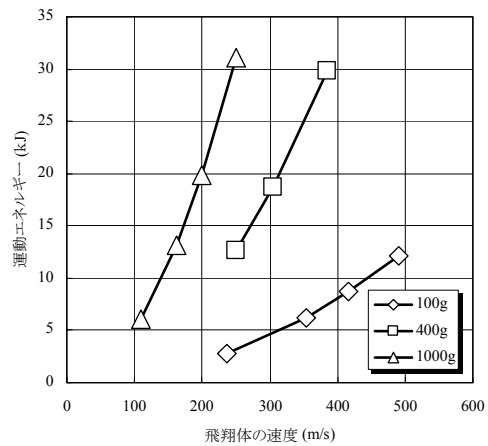


図-4 飛翔体の運動エネルギー～速度関係

(4) 衝突速度に対応する所定の圧力になったら飛翔体の拘束を解除し、飛翔体を発射する。

発射された飛翔体の速度は、発射管の出口に設置したレーザー式速度検出センサーで衝突直前の速度を計測することができる。このレーザー式速度センサーは、50cmの間隔で2箇所に設置されており、レーザー光を飛翔体が横切る時間差から速度を求める仕組みになっている。ちなみに、計測精度は1cm/s単位である。飛翔体の大きさ、直径、長さのうち、直径寸法は発射管の内径(35mm)の大きさ以内という制約を受けるが、最大質量1000g以内で材料や形状・長さ寸法は任意に調節することができる。

本実験装置の性能を確認するために、飛翔体の質量を3種類(100g, 400gおよび1000g)に変化させて、空気圧と発射速度の関係を調べた。なお、試験の実施に際しては、エアチャンバーの耐圧性能上の制約から、最大空気圧を150barとした。図-3に、性能試験から得られた飛翔体の速度～空気圧関係を示す。質量100gの飛翔体に対しては、10barの空気圧で約230m/sの発射速度、150barの空気圧で約500m/sの発射速度である。質量1000gの場合では、10barの空気圧で約100m/s、100barの空気圧で約250m/sの発射速度が得られた。図-4は、飛翔体の質量と発射速度から求めた運動エネルギーを示している。これより、質量100gの飛翔体もつ運動エネルギーの範囲は約3～12kJ、質量1000gの飛翔体の場合は約5～30kJの範囲であることがわかる。

### 3. 実験の概要

#### (1) 飛翔体および供試体

鋼製飛翔体を写真-2に示す。飛翔体はナイロン製の固定具に組み込まれてエアチャンバーに挿入され、その後、

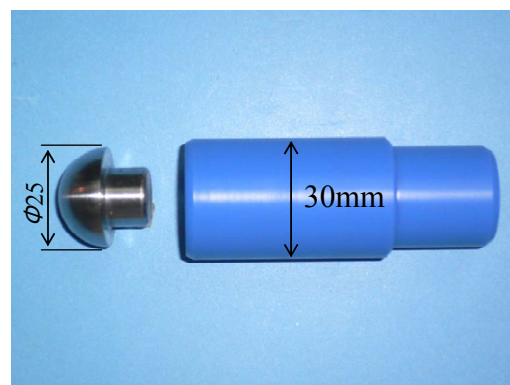


写真-2 飛翔体および固定具

固定具とともに発射される。用いた飛翔体の諸元は、材質：鋼材(SS400)、先端形状：半球型、直径：25mm、質量：50gである。

供試体は、普通強度(圧縮強度 25N/mm<sup>2</sup>)および高強度(圧縮強度 100N/mm<sup>2</sup>)コンクリートを用いて無筋コンクリート板供試体を作製した。コンクリートの配合を、表-1および表-2に示す。コンクリート板の寸法は縦 50cm×横 50cmとし、数種類の板厚を作製した。なお、普通および高強度コンクリート板には、供試体搬送中の損傷を防ぐため補強用鉄筋(D9)を周囲に配置した。コンクリート板は、発射管出口から1mの位置に設置した鋼製支持具に、上下2辺をクランプで垂直に固定した。

#### (2) 実験ケースおよび計測項目

実験パラメータは、飛翔体の衝突速度とコンクリート板の板厚および強度である。板厚は、普通強度コンクリートの供試体では3～13cmの範囲で8種類、高強度コンクリートの供試体では2～10cmの範囲で6種類を作製した。これらの板厚に対して飛翔体の衝突速度を増加させ、破壊モードの推移を検討した。実験後は、破壊モードを区分するとともに、表面破壊、裏面剥離の直径と深さを計測した。また、コンクリート板表面および裏面のひず

表-1 普通強度コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量(kg/m <sup>3</sup> )				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
20	18	57	5	48.8	172	302	874	947	3.02

表-2 高強度コンクリートの配合

空気量 (%)	フロー (mm)	W/P (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量(kg/m <sup>3</sup> )							
				水 W	セメント C	スラグ	膨張材 CSA	混和材*	細骨材 S	粗骨材 G	高性能 減水剤
2	600	22.1	40.0	150	450	150	30	50	631	964	7.48

\*エトリンガイト系高強度コンクリート用混和材

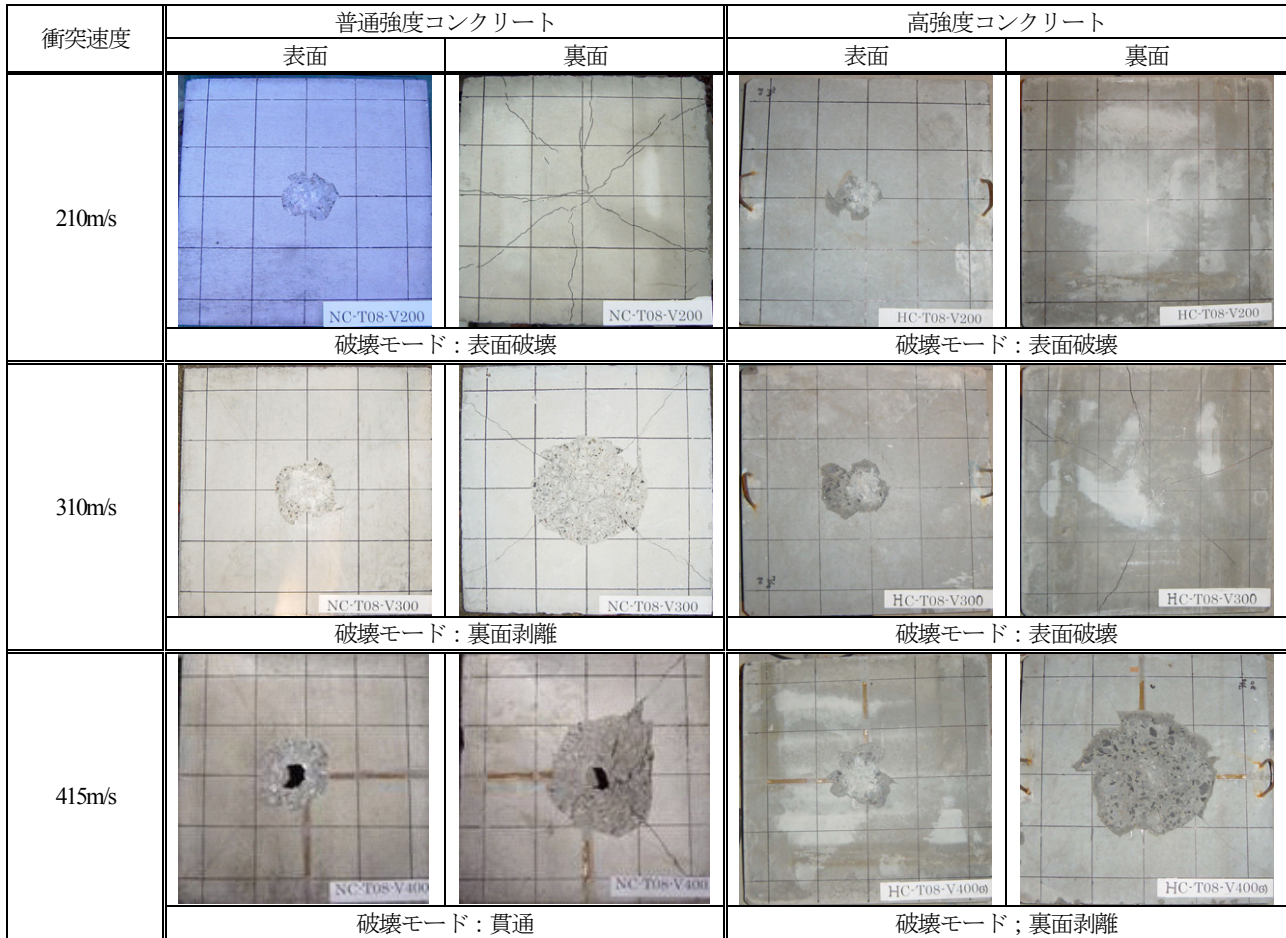


図-5 局部破壊の状況(板厚 8cm)

みをひずみゲージにより計測するとともに、高速度ビデオカメラで撮影した画像から、破壊の時刻歴挙動を観察した。

#### 4. 破壊モード

図-5は、板厚8cmの供試体に生じた局部破壊を衝突速度の大きさに対して示したものである。なお、本実験結果において貫通孔が生じる場合には、(1)衝突後、図-1の

ように飛翔体が供試体を完全に突き抜ける場合と、(2)衝突後、飛翔体自体は供試体を突き抜けることなく跳ね返るが、衝突により生じた表面破壊と裏面剥離が連絡して貫通孔が形成される、ときの2通りがあることがわかった。しかしながら実験後の供試体の様子から(1)、(2)のどちらの現象により貫通孔が形成されたかの判別は難しく、本実験結果においては(2)の場合も破壊モードは貫通として判定した。図-5に示す普通強度コンクリートの供試体の場合、衝突速度が約210m/sでは直径10cm程度の表面破壊が生じた。また、速度の増加にともなって

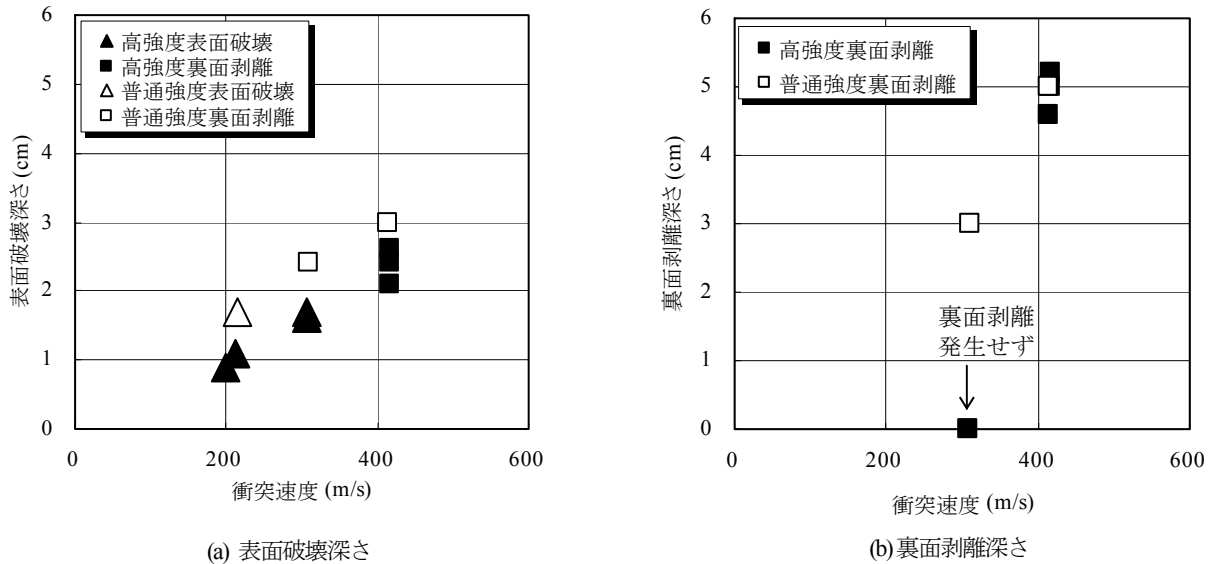


図-6 普通および高強度コンクリートの表面および裏面における破壊深さの比較 (板厚 8cm)

310m/sで裏面剥離, 415m/sでは貫通へと破壊が大きく生じていることがわかる. 一方, 高強度コンクリートでは, 普通強度コンクリートで裏面剥離が生じた衝突速度310m/sの場合でも表面破壊しか発生していない. また, 衝突速度415m/sの場合は, 裏面剥離が生じた. すなわち, コンクリート強度の増加は, 局部破壊の大きさの軽減に対して有効であることがわかる.

図-6は, 図-5のケースで生じた普通および高強度コンクリートの表面および裏面の破壊深さを比較して示している. 図-6(a)より, 普通強度および高強度コンクリートとも衝突速度の増加にともなって, 表面破壊深さも増加する傾向を示している. また, 高強度コンクリートの表面破壊深さの方が普通強度コンクリートに比べて25%程度小さい. すなわち, 高強度コンクリートの方が, 表面破壊に対する抵抗力が大きいことがわかる. 一方, 図-6(b)の裏面剥離深さより, 衝突速度310m/sでは, 普通強度コンクリートは裏面剥離が生じたが, 高強度コンクリートでは裏面剥離は生じなかった. 衝突速度415m/sでは, いずれも裏面剥離が生じたが, その深さに大きな差は認められない. すなわち, 裏面剥離に対しても高強度コンクリートの方が発生しにくいと考えられる. なお, 表面破壊および裏面剥離については, 次章で詳細に考察する.

各実験ケースで得られた破壊モードを, 図-7に示す. 図から, 普通および高強度コンクリートともに飛翔体の衝突速度が大きく, また, 板厚が小さくなるにしたがって, 破壊モードが表面破壊, 裏面剥離, 貫通の順に進展していることがわかる. また, 参考のため, 既往の局部破壊評価式の中で, 代表的な修正NDRC式による限界厚を, 実線(裏面剥離限界厚)と破線(貫通限界厚)で示している. 両式は式(1a), (1b), 式(2a), (2b)で表される.

【修正NDRC式】

1) 裏面剥離限界厚さ

$$s = 7.91x - (5.06x^2 / D) \quad ; x \leq 0.65D \quad (1a)$$

$$s = 2.12D + 1.36x \quad ; x \geq 0.65D \quad (1b)$$

2) 貫通限界厚さ

$$e = 3.19x - (0.718x^2 / D); x \leq 1.35D \quad (2a)$$

$$e = 1.32D + 1.24x \quad ; x \geq 1.35D \quad (2b)$$

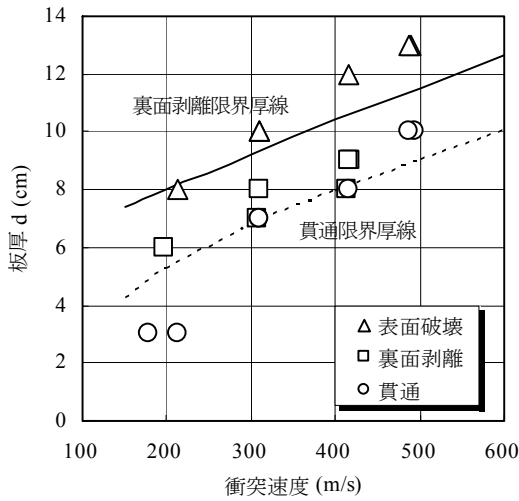
ここに,  $x$  は表面破壊深さ(cm)で, 式(3a), (3b)で求められる.

$$x = 3.899 \cdot 10^{-3} \sqrt{NWD (V_0 / D)^{1.8} / \sqrt{f'_c}} \quad ; x \leq 2D \quad (3a)$$

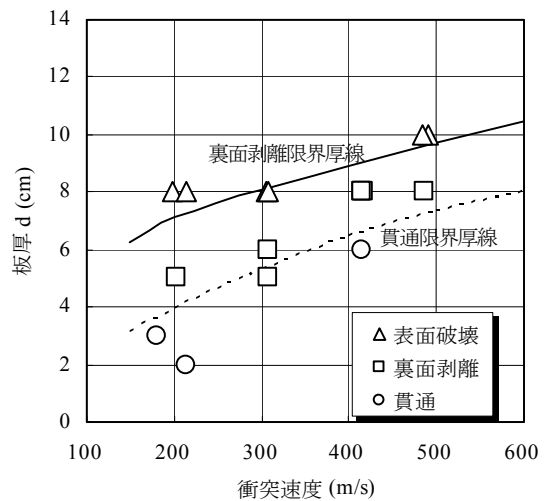
$$x = \left\{ 3.787 \cdot 10^{-6} NW (V_0 / D)^{1.8} / \sqrt{f'_c} \right\} + D \quad ; x \geq 2D \quad (3b)$$

$N$  は飛翔体の先端形状に関する係数,  $D$  は飛翔体の直径(cm),  $V_0$  は飛翔体の衝突速度(cm/s),  $W$  は飛翔体の質量(kg),  $f'_c$  はコンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>),  $s$  は裏面剥離限界厚さ(cm),  $e$  は貫通限界厚さ(cm)を示す.

図-7(a)の普通強度コンクリートの結果をみると, 飛翔体の衝突速度が大きく, また, 板厚が小さくなるにしたがって破壊モードが進展する傾向については, 実験と修



(a) 普通強度コンクリート



(b) 高強度コンクリート

図-7 飛翔体の衝突速度・供試体の板厚と破壊モードとの関係

正 NDRC 式は一致している。しかし、修正 NDRC 式は、実験結果を低速度の領域ではやや安全側に、高速度の領域ではやや危険側に評価している。図-7(b)の高強度コンクリートの結果では、修正 NDRC 式による貫通限界厚は実験とほぼ一致しているが、裏面剥離限界厚は実験よりもやや大きめの板厚となっている。すなわち、破壊の進展に関しては、修正 NDRC 式は実験結果と同じ傾向を示すが、普通強度コンクリートに対しては進展の程度に差異を生じ、また、高強度コンクリート材料への適用性があまり良くないことから、今後詳細に検討する必要があると言える。

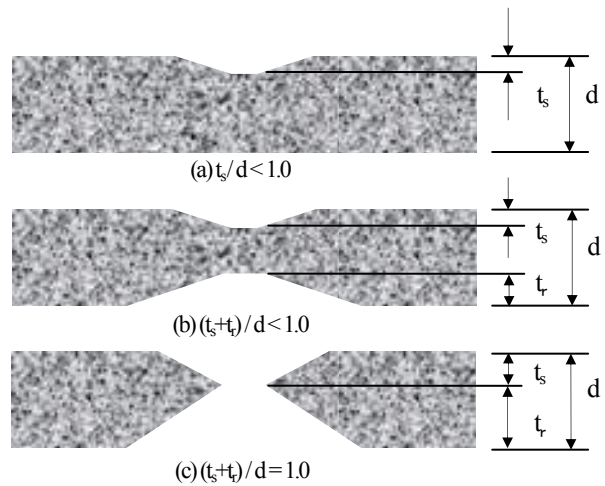


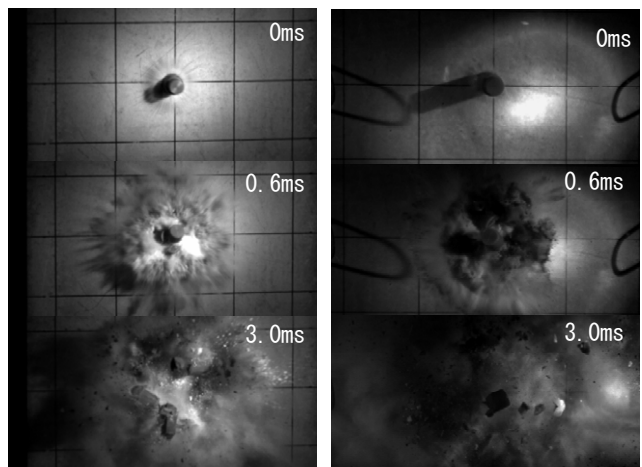
図-8 板厚に対する破壊深さの割合

### 5. 表面破壊および裏面剥離の特徴

本章では、表面破壊および裏面剥離の特徴や破壊モードが進行する条件について考察する。なお、破壊の程度を表現する際に、図-8 に示す「板厚に対する破壊深さの割合」を用いている。図-8(a)は表面破壊を、図-8(b)は裏面剥離を示している。図中の  $t_s$  は表面破壊深さ、 $t_r$  は裏面剥離深さ、 $d$  は板厚を示している。図-8(c)に示すように、 $t_s+t_r=d$  のときは、表面破壊と裏面剥離がつながって貫通孔が生じていることを示している。

#### (1) 表面破壊の特徴

写真-3は、飛翔体がコンクリート面に衝突して表面破壊が生じる瞬間を高速ビデオカメラ(10000コマ/秒)で撮影したものである。画像の間隔は0.1msである。これより、飛翔体が高速で衝突すると、衝突部近傍には粉体となったコンクリートが飛散している様子が確認できる。その後、飛翔体の先端はコンクリート中に貫入し、周囲のコンクリートが細かく破壊されていることがわかる。

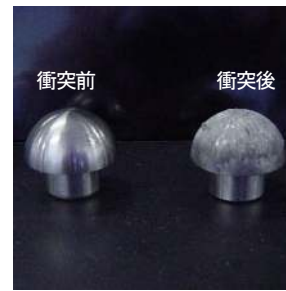


(a) 普通強度コンクリート (板厚 7cm, 衝突速度 308m/s) (b) 高強度コンクリート (板厚 8cm, 衝突速度 305m/s)

写真-3 表面破壊が生じる瞬間

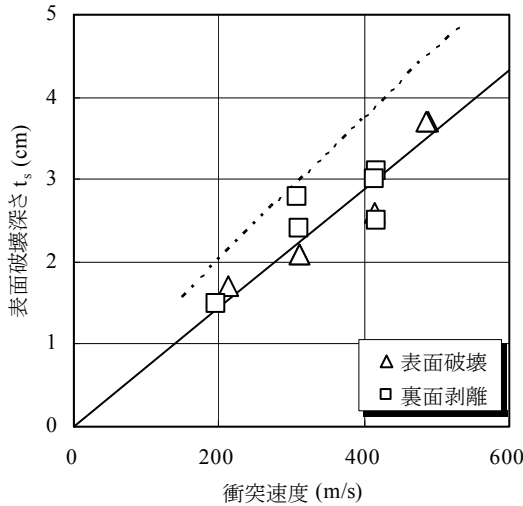


(a) 衝突部の貫入痕

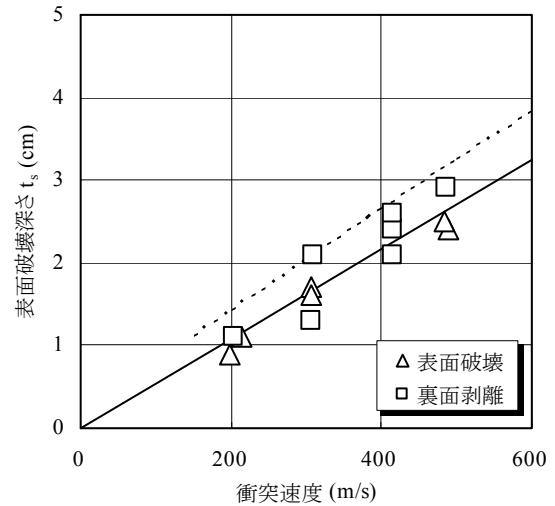


(b) 衝突前後の飛翔体

写真-4 飛翔体の高速衝突による表面破壊の貫入痕および飛翔体の損傷状況



(a) 普通強度コンクリート



(b) 高強度コンクリート

図-9 表面破壊深さ  $t_s$  ~ 衝突速度関係

写真-4は、板厚9cmの普通強度コンクリート供試体に対して速度417m/sで衝突させたケースにおいて、衝突部に生じた飛翔体の貫入痕と飛翔体の損傷状況である。実験後に衝突部のコンクリートを確認すると、写真-4(a)に示すように衝突部は飛翔体が貫入した痕跡と考えられる先端の凹部形状が残っていた。すなわち、飛翔体はコンクリートを押し込むように進行するものと考えられる。一方、飛翔体の表面には、写真-4(b)に示すような擦過痕が生じているが、変形は認められなかった。

図-9に、表面破壊および裏面剥離が生じた結果に対して得られた表面破壊深さ  $t_s$  と衝突速度の関係を示す。図中の実線は、最小自乗法により求めた回帰式で式(4a)、(4b)で表される。なお、参考のため修正NDRC式による表面破壊深さを点線で示している。

普通強度コンクリート；

$$t_s = 0.0072V \quad (4a)$$

高強度コンクリート；

$$t_s = 0.0054V \quad (4b)$$

ここに、 $t_s$  は表面破壊深さ(cm)、 $V$  は飛翔体の衝突速度(m/s)を示す。

図より、表面破壊深さは、強度や破壊モードによらず、衝突速度にほぼ比例して大きくなるのがわかる。修正NDRC式と比較すると、修正NDRC式は普通および高強度コンクリートのいずれに対しても、多少安全側に評価していることがわかる。裏面剥離にもなって生じた表面破壊深さは、表面破壊だけが生じる場合に比べて多少大きいですが、その差異は無視できる程度である。すなわち、本実験の範囲(飛翔体質量50g、先端形状：半球、先端径：25mm、衝突速度：200m/s～500m/s)では、表面破壊深さは、裏面剥離にもなって生じる場合であっても、衝突速度によって決まるといえる。また、コンクリート強度の影響については、高強度コンクリートの表面破壊深さの方が普通強度に比べて25%ほど小さく、高強度化するほど表面破壊の程度を軽減させる効果がある。

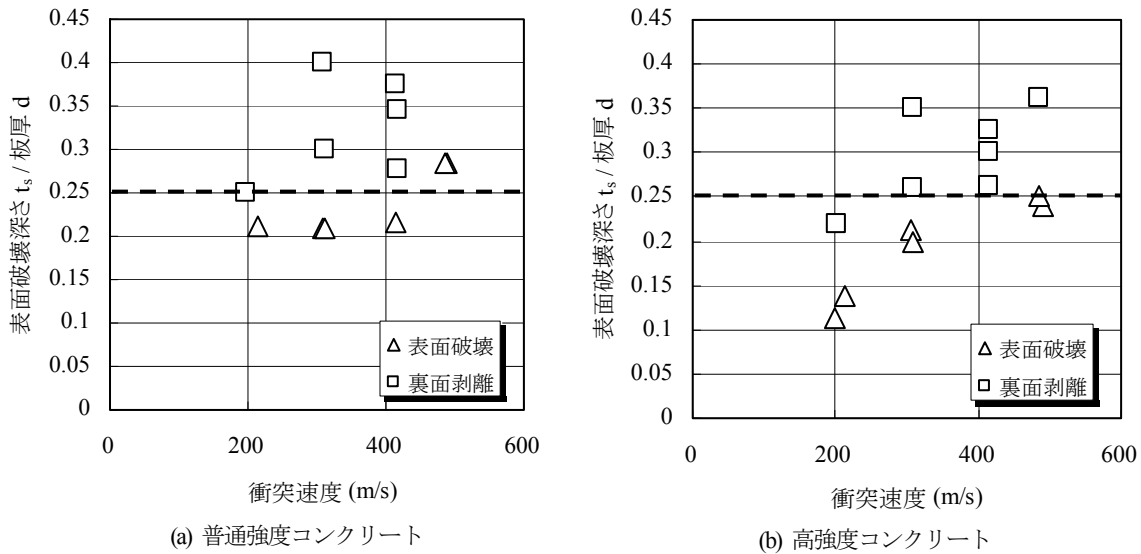


図-10 表面破壊深さ  $t_s$ /板厚  $d$ ～衝突速度関係

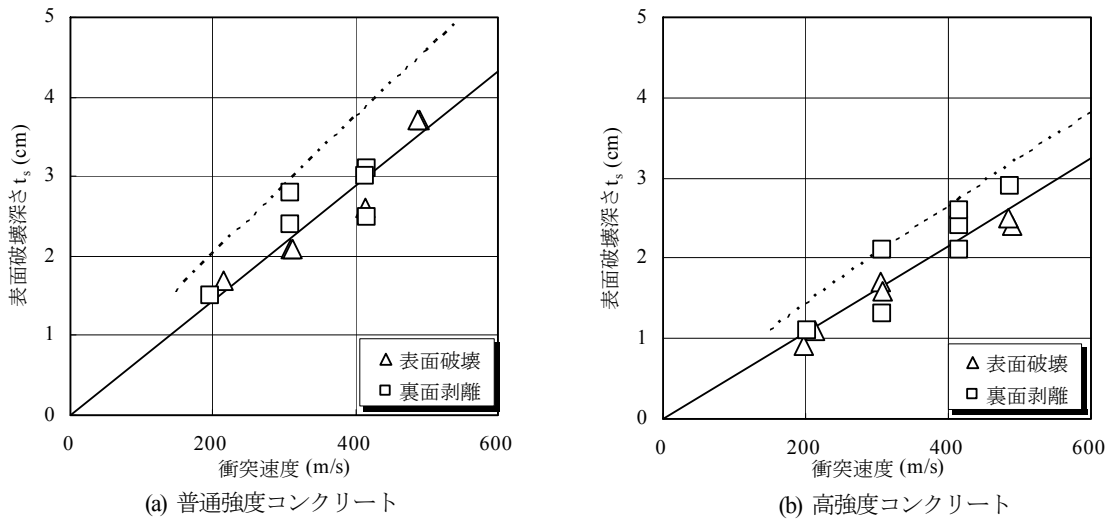


図-11 表面破壊直径～表面破壊深さ  $t_s$ 関係

次に、図-10に、表面破壊深さを板厚で除した相対表面破壊深さと衝突速度の関係を示す。これより、普通強度および高強度コンクリートのいずれも、衝突速度に関係なく、表面破壊深さが板厚の約24～27%を超えると破壊モードが表面破壊から裏面剥離へ移行することがわかる。このように、表面破壊深さの大きさは裏面剥離の発生に影響していると考えられる。

表面破壊の直径と深さの関係を、図-11に示す。図中の実線は、最小自乗法により求めた回帰式で式(5a)、(5b)で表される。

普通強度コンクリート；

$$C_d = 5.11t_s \quad (5a)$$

高強度コンクリート；

$$C_d = 6.41t_s \quad (5b)$$

ここに、 $C_d$  は表面破壊直径(cm)を示す。

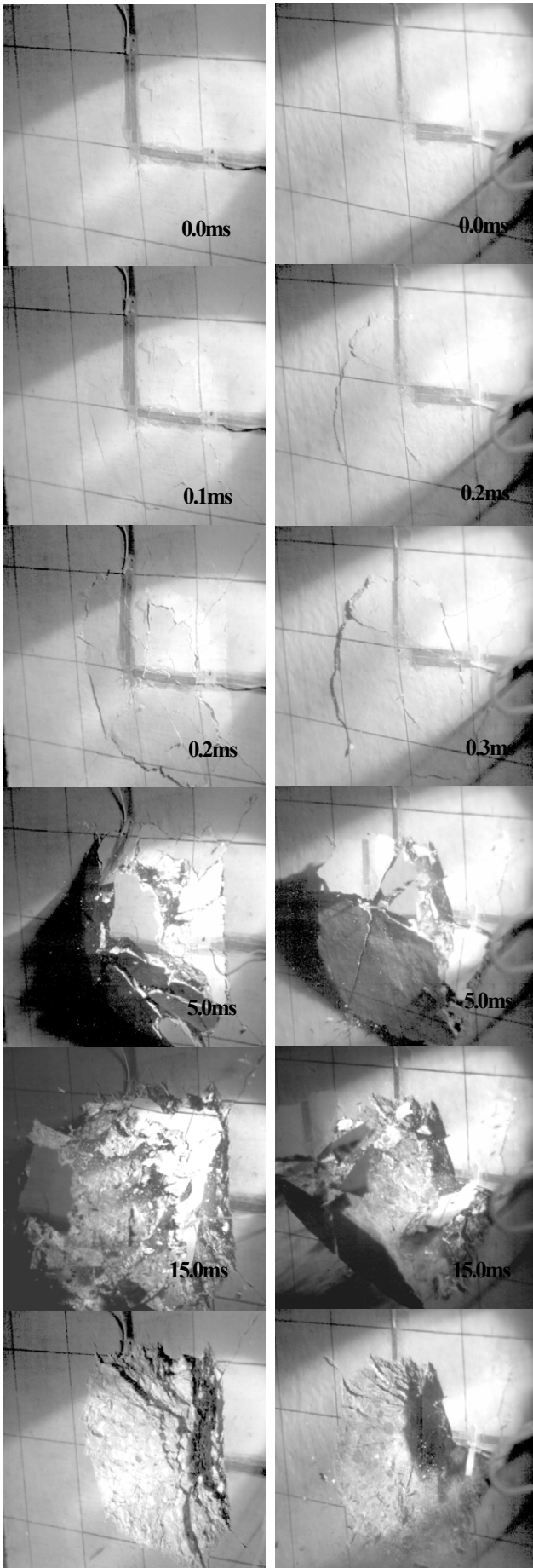
これより、表面破壊の直径は、表面破壊深さにほぼ比例して大きくなることがわかる。また、表面破壊深さが等しい場合は、高強度コンクリートに生じる破壊直径が大きくなるがわかる。

## (2) 裏面剥離の特徴

写真-5に、高速度ビデオカメラで撮影した裏面剥離時の破壊挙動を示す。普通強度および高強度コンクリート供試体の板厚はそれぞれ9cmと8cmで、衝突速度はいずれも約420m/sである。

写真-5から、普通強度コンクリートの場合は衝突( $t=0.0ms$ )後 $t=0.1ms$ 、高強度コンクリートでは $t=0.2ms$ 以内にひび割れが裏面に発生していることがわかる。破壊の

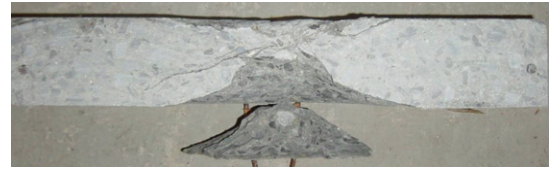




(a) 普通強度コンクリート (b) 高強度コンクリート  
写真-5 裏面剥離の挙動



(a) 普通強度コンクリート



(b) 高強度コンクリート

写真-6 裏面剥離した断面の状況

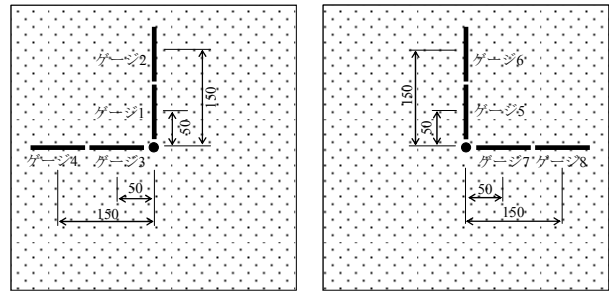


表 裏

図-12 表面および裏面に設置したひずみゲージの位置

状況をみると、普通強度コンクリートの場合には、裏面に多くのひび割れが発生した後、破片化して飛散している様子がわかる。一方、写真-5(b)の高強度コンクリートの場合には、破壊が脆性的に発生しており、破壊片は比較的大きな塊として後方に押し抜かれる特徴がある。写真-6は、供試体の衝突部断面を実験後に切断したものである。これより、普通強度、高強度コンクリートとともに、供試体内部には大きく発達したひび割れが確認できる。

また、図-12に示すように、供試体表面および裏面において、板中央から直交する二方向に長さ8cmのひずみゲージを各2枚貼付した。図-13に、供試体表面に貼付したひずみゲージの応答を示す。図-13(a)に示す普通強度コンクリート板の表面のひずみ応答から、衝突中央部に近いひずみゲージ1, 3は、飛翔体の衝突直後に破断していることがわかる。中央部から100mm離れた位置に貼付したひずみゲージ2, 4では、衝突後時刻0.1msで約220 $\mu$ の最大圧縮ひずみが生じている。一方、図-13(b)に示す高強度コンクリートの場合には、衝突中央部に近いひずみゲージ1では時刻0.03msで約1100 $\mu$ 、ひずみゲージ3では時刻0.02msで約300 $\mu$ の最大圧縮ひずみが生じた後に破断していることがわかる。中央部から100mm離れたひずみゲージ2, 4では、時刻0.09msでそれぞれ約100 $\mu$ および250 $\mu$ の第1ピークの圧縮ひずみを示した後に減少・増加して、ひずみゲージ2は時刻0.2msで最大圧縮ひずみ500 $\mu$ を示している。その後は、圧縮ひずみが減少して引張

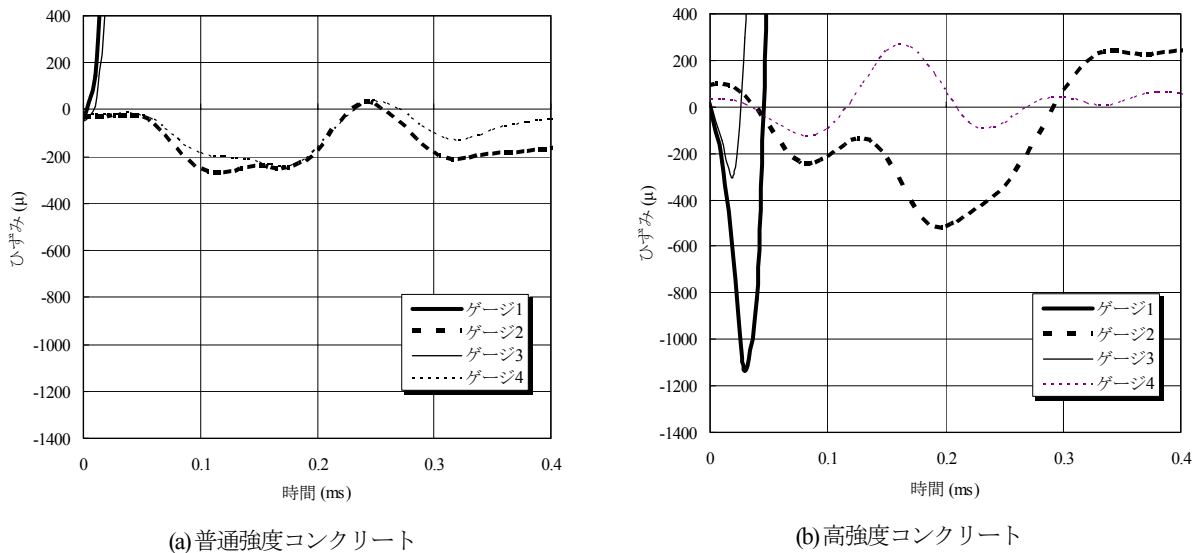


図-13 表面のひずみ～時間関係

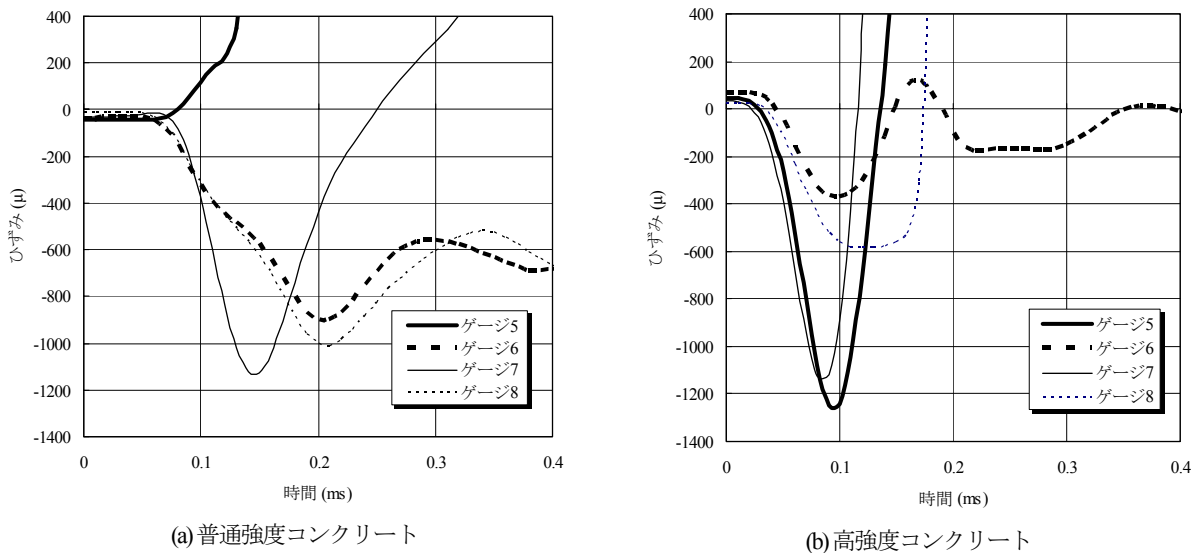


図-14 裏面のひずみ～時間関係

ひずみに転じている。

次に、図-14に裏面におけるひずみ応答を示す。図-14(a)の普通強度コンクリート供試体の場合は、中央部に近いひずみゲージ5, 7は衝突後、約0.05～0.06ms後にひずみ応答が検出され始めている。また、ひずみゲージ7では時刻0.14msで約1200 $\mu$ の最大圧縮ひずみを生じた後、引張側に転じて引張破断した。ひずみゲージ5は計測不良であった。なお、中央から150mm離れた位置にあるひずみゲージ6, 8はほぼ等しい挙動を示し、時刻0.2msで最大圧縮ひずみは約900～1000 $\mu$ である。一方、図-14(b)に示す高強度コンクリート供試体では、飛翔体の衝突後約0.03ms後に裏面にひずみが生じている。中央部のひずみゲージ5, 7は時刻0.09～0.1msで約1100～1200 $\mu$ 、中央から150mm離れたひずみゲージ6は同時刻で約400 $\mu$ 、ひずみゲージ8は約600 $\mu$ の最大圧縮ひずみが生じ、その後約0.1ms後にひずみゲージ5, 7は引張破断した。

波動論によれば、コンクリート中の弾性波速度は、一次元の場合に $c = \sqrt{E/\rho}$ で与えられる。ここで、普通強度コンクリートの縦弾性係数は $E = 25\text{ kN/mm}^2$ 、密度は $\rho = 2.5\text{ g/cm}^3$ なので、弾性波伝播速度は $c \approx 3000\text{ m/s}$ となる。したがって、板厚 $t = 9\text{ cm}$ では、応力波が表面から裏面へ伝わる時間は理論上 $t/c = 9(\text{cm})/3000(\text{m/s}) = 3 \times 10^{-5}\text{ s} = 0.03\text{ ms}$ である。計測したひずみの方向が理論で仮定した波動伝播の方向と直交していること、およびひずみの値は区間8cmの平均値であるため、理論による応力波の到達時間とは多少のずれがあるが、この時間は、普通強度コンクリート板の裏面にひずみが明瞭に生じ始めた時刻0.05msに近い値である。すなわち、飛翔体の衝突によって表面に生じた圧縮応力波は、裏面に到達し、裏面の自由端で反射して引張応力に転じたものと考えられる。しかし、図-14から、ひび割れ発生ひずみを100 $\mu$ とすると、裏面にひび割れが生じる時間は衝突後約0.12～

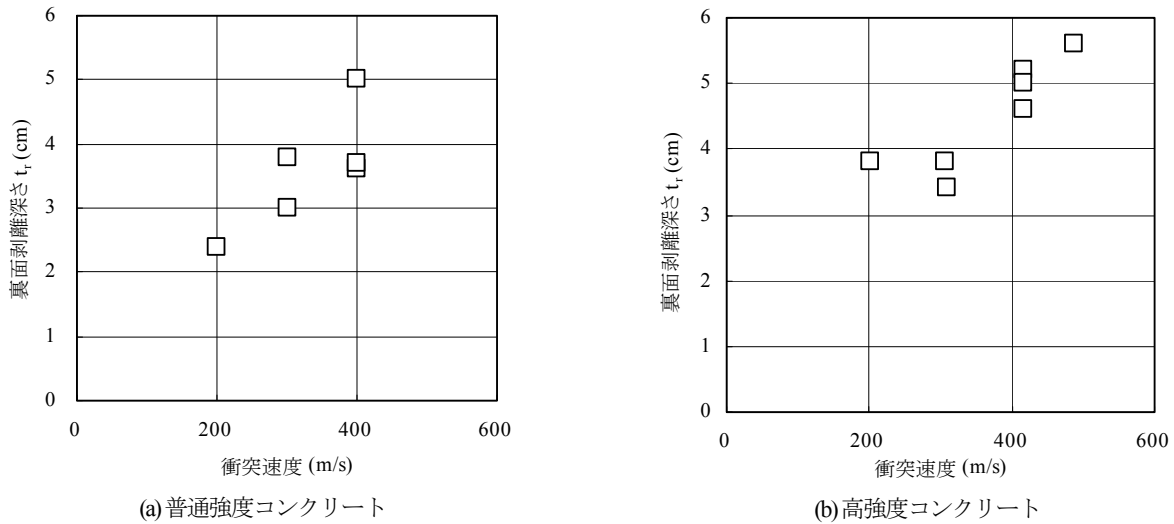


図-15 裏面剥離深さ  $t_r$  ~ 衝突速度関係

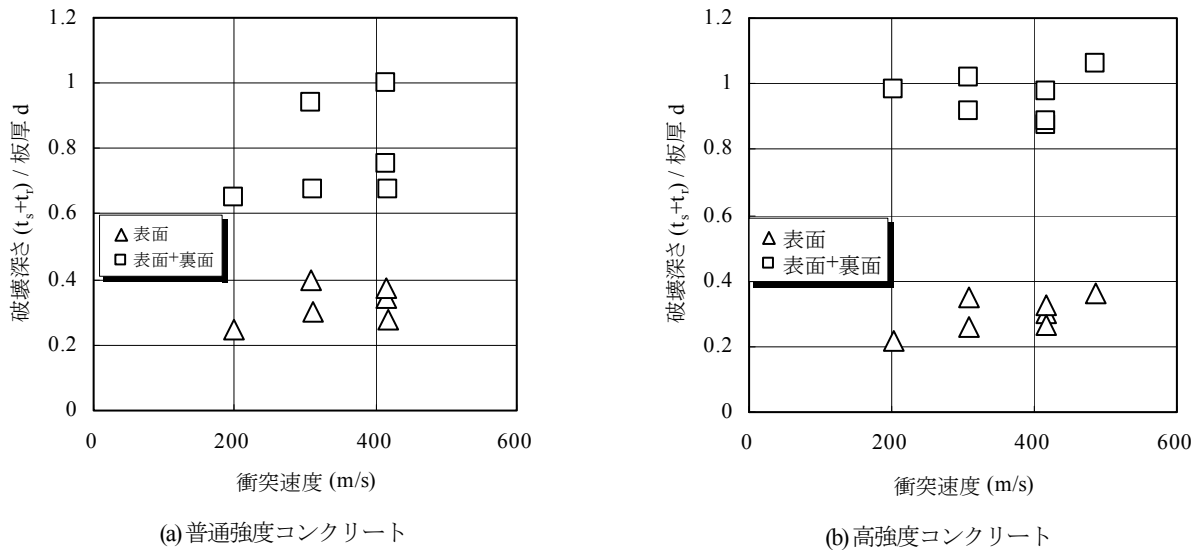


図-16 破壊深さ  $(t_s + t_r)$  / 板厚  $d$  ~ 衝突速度関係

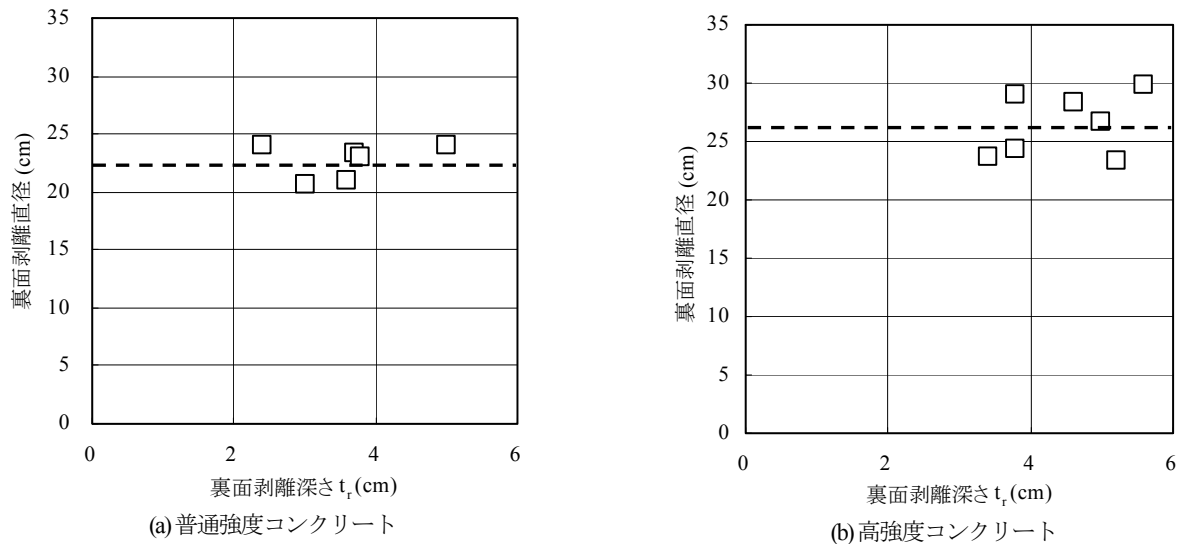
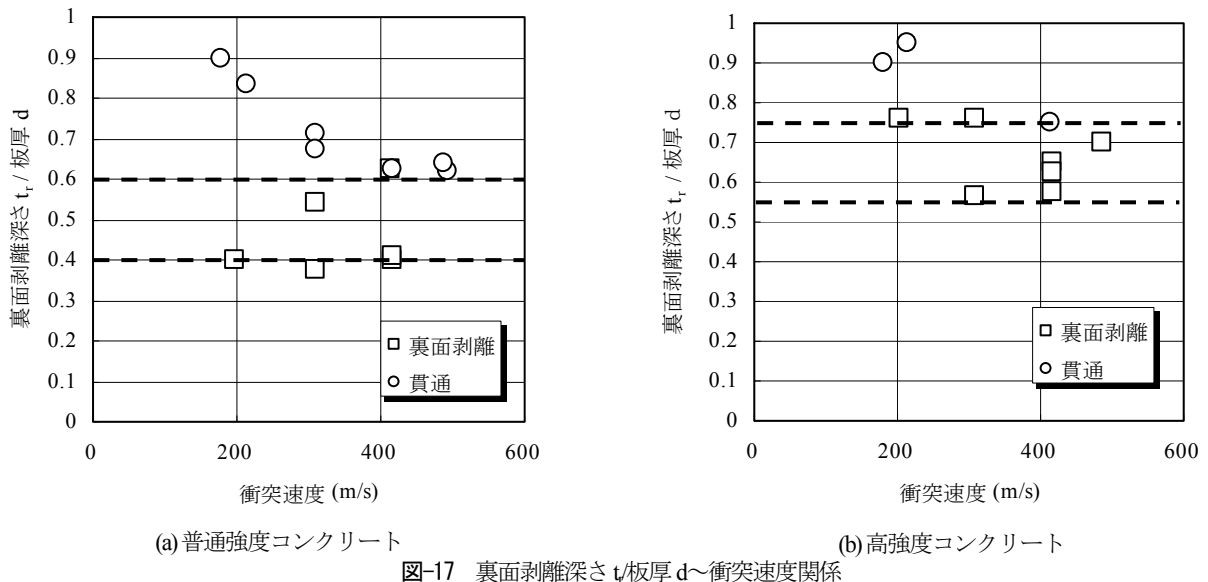
0.26msである。すなわち、裏面に発生した大きな剥離破壊は、応力波が伝播した直後に生じたのではなく、波動が板厚を2~4往復する程度の時間を経過して破壊したことを示している。ちなみに、図-14(b)に示したひずみ  $\epsilon$  ~ 時間  $t$  関係から最大圧縮ひずみに到達するまでのひずみ速度  $(\dot{\epsilon} = d\epsilon / dt)$  を求めると、 $10^1 \sim 10^2 (1/s)$  であることがわかる。

図-15は、裏面剥離深さと衝突速度の関係を示している。図より、普通および高強度コンクリート供試体のいずれにおいても、衝突速度の増加ともなって裏面剥離深さが増大することがわかる。

図-16は、裏面剥離が生じたケースにおいて生じた「表面破壊深さ  $t_s$ 」と「表面破壊深さ  $t_s$  + 裏面剥離深さ  $t_r$ 」を、板厚に対する相対的深さとして示したものである。図-16から、普通強度コンクリートでは、表面破壊深さの割合は衝突速度によらず0.24~0.39の間でほぼ一定値

を示し、衝突速度の増加とともに裏面剥離深さだけが徐々に増加していることがわかる。一方、高強度コンクリートの場合には表面破壊の割合は普通強度と同様に、衝突速度によらず0.21~0.37の間で一定値を示すが、(表面破壊深さ  $t_s$  + 裏面剥離深さ  $t_r$ ) / 板厚  $d$  はどのケースも1.0に極めて近接している。すなわち、裏面剥離が生じる場合、裏面における破壊の割合は普通強度に比べて大きく、一挙に貫通寸前まで至ることがわかる。なお、(表面破壊深さ  $t_s$  + 裏面剥離深さ  $t_r$ ) / 板厚  $d$  が1.0を超えたケースもあるが、これは測定上の誤差である。

図-17は、裏面剥離あるいは貫通孔が生じた場合において、裏面剥離深さを板厚で除した相対裏面剥離深さと衝突速度の関係を示している。図中の点線は、相対裏面剥離深さの下限と上限を示している。この関係から、裏面剥離だけが生じた場合の最小相対裏面剥離深さは、普通強度コンクリートでは板厚の約40%、高強度コンクリ



一の場合では約55%である。すなわち、裏面剥離が生じる場合は、少なくとも板厚の1/2程度の裏面剥離深さになることを示している。また、普通強度コンクリートでは、相対裏面剥離深さが板厚の約60%を超えると、表面破壊と裏面剥離が連なって貫通孔が生じることがわかる。一方、高強度コンクリートの場合は、相対裏面剥離深さが板厚の約75%を超えると貫通孔が生じる。

図-18は、裏面剥離の直径と深さの関係を示している。図中の点線は、裏面剥離直径の平均値を示している。図から、裏面剥離が生じる場合は、コンクリートの強度によって異なるが、裏面剥離の直径はほぼ一定となり、普通強度で約22.5cm、高強度では約26cmであった。すなわち、高強度コンクリートの方が普通強度コンクリートより引張強度が大きいので裏面剥離は生じにくい、破壊が生じた場合には表面破壊と同様に、高強度コンクリートの方が破壊の直径も大きくなることわかる。

以上より、破壊の程度の相違の条件をまとめると次のようになる。(1)飛翔体が衝突して表面破壊が板厚の約25%を超えると裏面剥離が発生するが、このときの裏面剥離深さは板厚の約40~55%である。つまり、この時点で板厚に対して約65~80%の破壊深さが生じることになる。さらに(2)衝突速度が大きくなって裏面剥離深さが増大すると、最終的に貫通破壊が発生するものと考えられる。また、(3)コンクリート強度による局部破壊の違いについては、高強度コンクリートは表面破壊に対する抵抗力は大きく、裏面剥離も普通強度コンクリートに比べて発生しにくい、裏面剥離が発生する場合は貫通寸前であることがわかった。この理由は、(1)高強度コンクリートは普通強度コンクリートに比べて脆性的であること、また(2)表面破壊には主として圧縮で、裏面剥離には引張で抵抗すると考えられるが、高強度コンクリートは、普通強度コンクリートに対する圧縮強度の増加

率に比べて引張強度の増加率が小さいことに起因すると考えられる。また、貫通が生じる(生じやすい)のは、裏面剥離によって板の有効厚さが減少することと関係している。

したがって、裏面剥離の発生を防止又は抑止することにより、板の貫通抵抗性を向上させることができる。この方法としては、コンクリート板の高強度化により表面破壊を低減させることや、コンクリート板の厚さを増加する、あるいは裏面にライナー等を貼付する方法により、裏面剥離を抑制することなどが考えられる。

## 6. 結言

本研究は、鋼製剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリートの局部破壊について実験的検討を行い、衝突速度および板厚と破壊モードの関係を調べ、破壊の特徴について検討を行ったものである。本研究の成果を要約すると、以下ようになる。

- (1) 鋼製の飛翔体(質量50g~1000g)を100~500m/sの速度で発射できる高圧空気式飛翔体発射装置を開発し、普通強度および高強度コンクリートの板供試体に対する衝突実験を行った。その結果、飛翔体の衝突速度が大きく、また、板厚が小さくなるにしたがって、破壊が表面破壊、裏面剥離、貫通の順に大きくなる。
- (2) 表面破壊深さは、破壊モードにかかわらず飛翔体の衝突速度に比例して大きくなる。また、コンクリート強度および衝突速度に関係なく、表面破壊深さが板厚の約25%を超えると裏面剥離が生じる。
- (3) 裏面剥離深さは、表面破壊深さや板厚の影響を受けるが、少なくとも板厚の半分程度の深さが生じる。
- (4) コンクリート強度の高強度化は、局部破壊の防止に効果がある。すなわち、圧縮強度の増加とともに表面破壊に対する抵抗力は増大するとともに、引張強度も大きくなるので裏面剥離も発生しにくい。ただし、高強度コンクリートの場合、破壊が生じる際は普通強度コンクリートよりも脆性的なため、裏面に生じる破壊(直径、深さ)は、普通強度コンクリートに比べて大きくなる。
- (5) 局部破壊の抑止方法については、(1)表面破壊に対してはコンクリート強度を増加させること、(2)裏面剥離に対してはコンクリートの強度および板厚を増加させる、あるいは板の裏面にライナー等を貼付してコンクリートの引張強度を改善すること、(3)貫通には裏面剥離を防止すること、等が考えら

れる。

今後は、表面破壊や裏面剥離の発生メカニズムや飛翔体の質量、先端形状、剛性が破壊に与える影響について調べていくとともに数値シミュレーション法の検討を行う必要があると考えている。

## 参考文献

- 1) 上原陽一監修：防火・防爆対策技術ハンドブック，株式会社テクノシステム，2004.
- 2) 北川徹三：爆発災害の解析，日刊工業新聞社，1980.
- 3) (社)火薬学会 発破専門部会：発破工学ハンドブック，共立出版，2001.
- 4) 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.
- 5) Sliter, G.E. : Assessment of empirical concrete impact formulas, ASCE, Vol.106, No.ST5, pp.1023-1045, 1980.
- 6) 土木学会衝撃問題研究小委員会：構造物の衝撃挙動と設計法，土木学会構造工学シリーズ6，pp.275~292，1994.
- 7) 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手法，電力中央研究所報告，1991.
- 8) 電力中央研究所：高速飛来物に対する鉄筋コンクリート構造物の設計評価式，電力中央研究所報告，1988.
- 9) 伊藤千浩，白井孝治，大沼博志：剛飛来物の衝突に対する鉄筋コンクリート構造物の設計評価式，土木学会論文集，No.507/I-30，pp.201~208，1995.
- 10) 内田孝，大野友則：柔飛翔体の高速衝突による鉄筋コンクリート版の局部損傷の予測，防衛大学校理工学研究報告，Vol.29，No.2，pp.209~217，1992.
- 11) 内田孝，大野友則：航空機ジェットエンジンの高速衝突を受ける鉄筋コンクリート版の衝撃応答とその予測に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.471，pp.81~89，1995.
- 12) Gareth, H. : Hard missile impact on reinforced concrete, Nuclear Engineering and design, 77, pp.23-35, 1984.
- 13) Chang, W.S.: Impact of solid missiles on concrete barriers, ASCE, Vol.107, No. ST2, pp.257-271, 1981.
- 14) 大野友則：飛翔体の衝突に対するRC版の挙動に関する研究の現状，コンクリート工学，pp.20~28，Vol.41，No.4，2003.
- 15) Itoh, M., Katayama, M. and Rainsberger, R. : Computer simulation of an F-4 phantom crashing into a reinforced concrete wall, Computational Ballistics II, pp.207-217, 2005.
- 16) Goldsmith, W.: Non-ideal projectile impact on targets, International Journal of Impact Engineering, 22, pp.95-395, 1999.

(2006. 9. 19 受付)

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE LOCAL DAMAGE OF CONCRETE  
PLATE DUE TO HIGH VELOCITY IMPACT OF STEEL PROJECTILE

Masuhiko BEPPU, Koji MIWA, Tomonori OHNO and Masanori SHIOMI

The local damage due to high velocity impact of steel projectile on concrete plate was experimentally studied. To execute the impact tests, the air-pressurized launching apparatus is newly developed. This apparatus was designed to launch a projectile with the velocity of 100-500 m/s corresponding to the mass of 50-1,000g. Targets are square plate (500x500mm in size) and are the standard and high-strength concrete (the compressive strength of 25N/mm<sup>2</sup> and 100N/mm<sup>2</sup>, respectively). During all tests, the appearance of local damage in the impacted point was taken by an ultra-high speed video camera. From test results, the effect of impact velocity of projectile on the local damage was examined with the relation of plate thickness of specimen and the strength of concrete. And, the damage process was discussed through the size of local damage in depth and diameter.