

衝撃荷重を受けるコンクリートブロックの破壊に関する研究

STUDY OF THE FRACTURE OF CONCRETE BLOCK SUBJECTED TO IMPACT LOAD

坂本 達弥* · 足立 一郎** · 吉田 秀典***

Tatsuya SAKAMOTO, Ichiro ADACHI and Hidenori YOSHIDA

*正会員 修士(工学) 東光コンサルタント(株) 技術第2部(〒541 大阪市中央区北久宝寺町二丁目5-9)

**正会員 工博 千葉工業大学教授 土木工学科(〒275 千葉県習志野市津田沼二丁目17-1)

***正会員 博士(工学) 千葉工業大学講師 土木工学科(〒275 千葉県習志野市津田沼二丁目17-1)

If a projectile has a collision with an important structure such as a nuclear power station, not only the structure but also its circumference are seriously damaged. The current design code to impact load is, however, based on experimental facts. Thus, it is necessary to develop the design code based on mechanics in order to work out a rational and economical design for the important structure. The objectives of this study are to explain an impact behavior by the collision of projectile from a mechanical point of view and to clarify the mechanism of an impact fracture. A fundamental experiment for impact fracture is carried on. Conservative laws of momentum and kinetic energy are applied to explain the real impact behavior. The mechanics-based approach can clarify the mechanism of an impact fracture and is considered to lead the rational and economical design code.

Key Words : Impact load, Conservative laws of momentum and kinetic energy, FEM analysis

1. はじめに

近年、原子力発電所に代表される重要構造物に関する耐衝撃性が議論されている。こうした重要構造物に対しては、耐震設計だけでなく、航空機落下による構造物への衝突、原子炉内部での事故による飛翔体の衝突など、発生確率は非常に小さいものの一度起こると周辺に対し甚大な被害を及ぼすことが予想される事故などに対しても十分な安全性を検討する必要がある。

飛翔体の衝突に対するコンクリート構造物に関する研究としては、当初、弾丸やミサイルなどの衝突に耐えるコンクリート構造物の設計法を確立するという軍事的な研究が中心に行われていた。しかし、冷戦終結に伴い衝撃研究の軍事的性格は薄らぎ、代わって地震・竜巻などの自然災害による衝突事故、航空機・自動車などの衝突といった人為的衝突に対する構造物の耐衝撃設計の研究が盛んに行われるようになった。例えば、台風時の津波を原因とする漂流木材の海岸構造物に対する衝撃挙動の研究として、流木の衝突実験で最大衝撃加速度、反発係数、弾性波周期などを明らかにした研究¹⁾、任意開度を有して衝突した流木の見かけの質量係数、衝撃力継続時間などを用いて最大衝撃力の評価方法を開発した研究²⁾などがある。コンクリートに関しては、コンクリートブロックに対する飛翔体の衝撃力を実験的に求めた研究³⁾⁴⁾⁵⁾、原子力発電所内の事故による衝突を想定した鉄筋コンクリートの耐衝撃設計の研究⁶⁾⁷⁾がある。しかしながら、耐衝撃性を評価する式などは、実験に基づいた経験式の域を出

ていない。また、その被害を予想するために実規模での衝突実験を行うことは不可能であり、このような施設の耐衝撃設計を合理的・経済的に行うには、現象を捉え、力学理論などを用いた設計法の確立が必要であると思われる。

そこで本研究は、飛翔体の衝突による破壊挙動を力学的視点に立って解明することを目的とし、その基礎的実験として、種々の先端形状を有する飛翔体をコンクリートブロックに衝突させるという衝撃実験を行い、その実験結果から衝突現象の把握と破壊のメカニズムの検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験装置

実験は、飛翔体を試験体であるコンクリートブロックに垂直に衝突させるために、図-1に示すような装置を用いて飛翔体をガイドレールに沿って飛ばした。発射の際には、まず飛翔体の1/2をガイドレールに差し込み、外側に出た部分の端部を十分に張力を与えた高張力ゴムにかけ、その張力を開放することで飛翔体を飛ばした。速度測定には、ガイドレールに1m間隔で取り付けられた光電式速度センサーによってセンサー間の通過時間を測定し、距離1mをその通過時間で除した値をガイドレール内での平均速度とした。飛翔体に設置した加速度計が、トリガを検知してから飛翔体が試験体に衝突するまで外的作用力をほとんど検出して

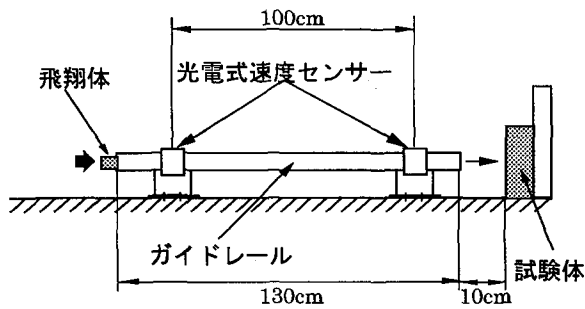


図-1 実験装置

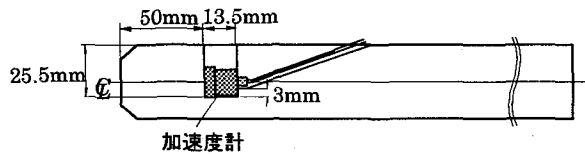


図-2 飛翔体側面図

ないことから、センサー間における初速と終速にそれほど差はないものと考え、ガイドレール内の平均飛行速度を飛翔体の速度とした。

また、衝撃時の衝撃加速度応答波形を得るため、図-2に示すように飛翔体の先端に衝撃加速度計を埋め込んだ。試験体は、衝突面でのずれを防ぐためガイドレールに極力近づけ、そして衝突による試験体の移動を防ぐため後壁にしっかり固定した。また、飛翔体先端が試験体の中央に衝突するように設置した。

2.2 飛翔体及び試験体

(1) 飛翔体

飛翔体には、先端に加工を加えることから、杉の角材(断面 34 mm × 34 mm, 長さ 360 mm, 重量 200 g)を選定した。その先端形状は図-3 および図-4 に示すように平面型(φ32, 28, 22 mm)および球面型に加工を施し、先端から 50 mm の部分に上部から垂直に穴を開けて衝撃加速度計を設置し(図-2参照), その位置が飛翔体衝突面の中心になるようにした。また、衝突時の加速度計の前後の移動とケーブルの破損については特に考慮し、前者については加速度計側面周辺に保護と固定を兼ねて厚さ 1 mm 以下の薄いゴムを巻き接着剤で固定した。後者についてはケーブルを飛翔体に沿って固定し、測定機器であるチャージアンプまでの部分を宙づりにすることによって衝突時にケーブルが切断するのを防いだ。さらに飛翔体に永久変形(塑性変形)が残らぬよう、強度の大きい正目方向が試験体に対して垂直になるようにした。

(2) 試験体

試験体には、大量に入手しやすい脆性材料ということから空洞コンクリートブロック(190 mm × 90 mm × 100

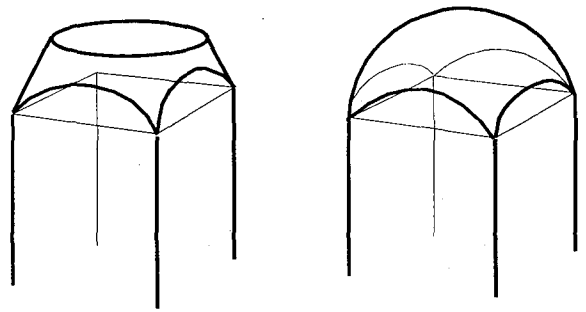


図-3 飛翔体先端形状(鳥瞰図)

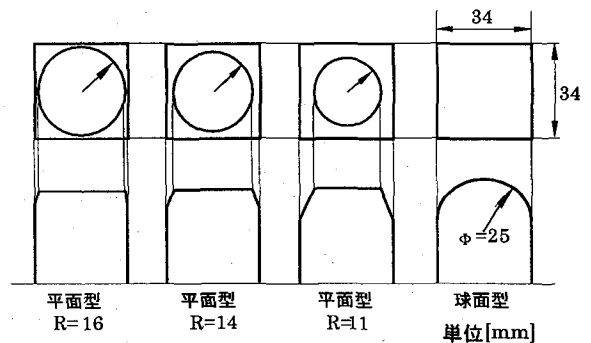


図-4 飛翔体先端形状(平面図, 側面図)

表-1 飛翔体・試験体諸元

杉	気乾比重	圧縮強度 (kgf/cm ²)	曲げヤング係数 (kgf/cm ²)
	0.38	340	80,000
コンクリート ブロック	JIS コード	圧縮強度 ^(注) (kgf/cm ²)	分類
	A5406	80 以上	C 種

注) ただし, 中空部を含めた全断面積(長さ×厚さ)に対するもの。

mm)を使用し、コンクリートブロックの中心の空洞のある部分に衝突面を設定し、実験後に試験体の破壊状況を観察した。飛翔体、および試験体の諸元を表-1に示した。試験体は、平面型三種類と球面型一種類の計四種類についてそれぞれ 35 体ずつ、合計 140 体を用意し、実験を行った。

2.3 実験計測

計測は前述の装置及び材料を用いて、試験体が破壊(剥離現象)を生じるまでの飛翔速度範囲(~20 m/s)で実験を行い、衝撃加速度応答と飛翔速度を測定するとともに試験体の破壊状態を観察した。実験より得たデータはコンピュータにテキストデータとして取り込み、解析に用いた。加速度応答データについては、チャージアンプを介してパーソナルコンピュータで制御された記録器に取り込んだ。尚、記録器は飛翔体発射時の衝撃

表-2 測定器仕様

チャージアンプ	形式	6D07
	製造会社	日本電気三栄(株)
	感度	1~999 pC/G
	校正電圧	100 Hz(正弦波, 10 Vpk)
加速度センサ	形式	2225m5A
	製造会社	Endevco(USA)
	感度	0.0255 pC/G
	最大出力	200,000 G
	通常校正	20 Hz~50 kHz
	低周波校正	1 Hz~50 kHz
記録器	形式	オムニライト 8M37
	製造会社	日本電気三栄(株)
	最小サンプル タイム	4 μ sec

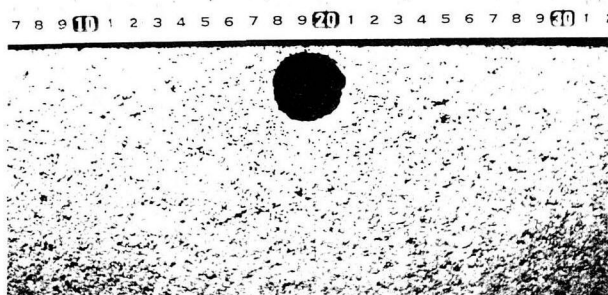


写真-1 破壊性状(平面型, 正面)

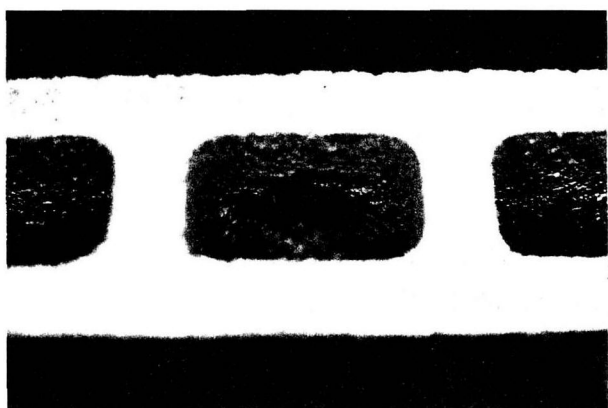


写真-2 破壊性状(平面型, 背面)

加速度でトリガを検知するように設定し, そこから衝突までの加速度応答波形を測定した. また測定可能なデータ数の限界により, 加速度応答波形のサンプリングタイムは 50 μ sec(20,000 data/sec) とした. 測定におけるノイズ対策としては, 共振ノイズなどが出る可能性があることからチャージアンプのローパスフィル

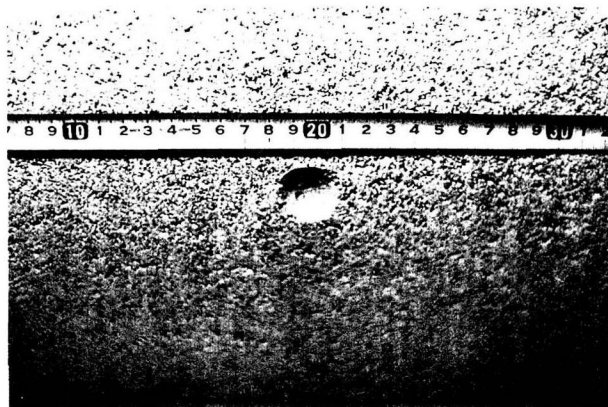


写真-3 破壊性状(球面型, 正面)

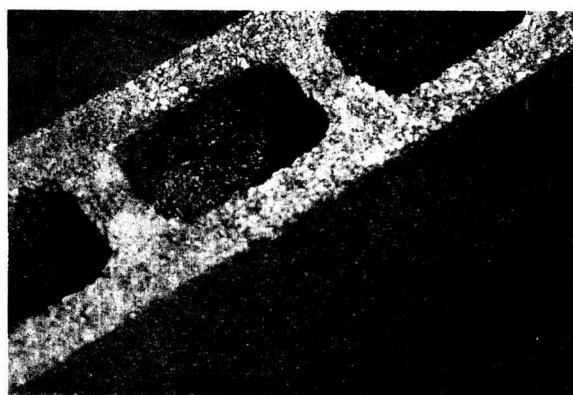


写真-4 破壊性状(球面型, 背面)

タを 2 KHz に, そしてパイロ電気ノイズなどが発生する場合に備え, ハイパスフィルタを 0.2 Hz にそれぞれ設定した. 尚, 実験では加速度計を進行方向に設置しており, 衝突時には試験体から衝撃力を得るため, 衝突時の加速度応答波形は正である. 本実験の特徴としては, 飛翔体と試験体の距離が近く, しかも飛翔体の実験の前後でほとんど変形しないということから, 高速で飛翔する飛翔体本体に加速度計を直接設置できたということが挙げられる. このような実験例は衝撃問題を扱う分野においても非常に稀である. これら実験に使用した測定器の仕様をまとめて表-2に示す.

3. 実験結果・考察

3.1 破壊性状と加速度応答波形

まず, 試験体の破壊性状とその時の加速度応答波形の変化を先端形状別に比較する.

(1) 平面型の場合

先端形状が平面型の場合, 衝突速度が小さい間は飛翔体は試験体に衝突して反射するが, 衝突速度を大きくするにしたがって試験体を破壊して貫入するよう

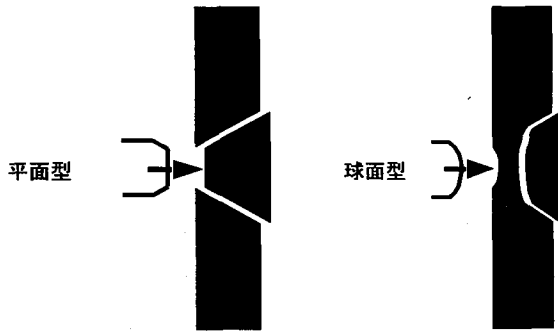


図-5 破壊模式図(平面型) 図-6 破壊模式図(球面型)

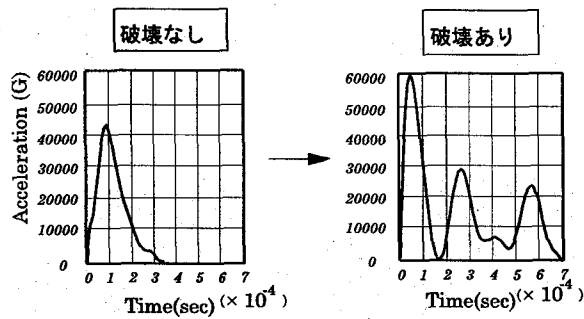


図-7 衝撃応答波形例(平面型)

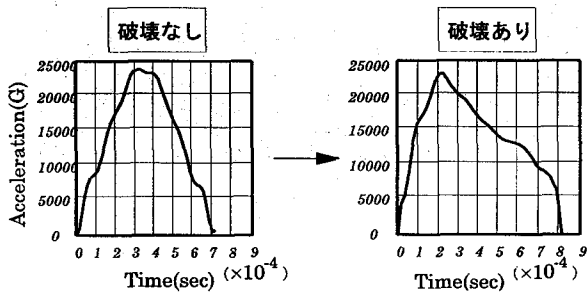


図-8 衝撃応答波形例(球面型)

なる。その際の試験体の破壊性状は写真-1, 写真-2に示すように衝突面の周辺から破壊が生じ、その破壊が裏側に向かって進行し、その部分が抜け落ちている。この時の破壊模式図を図-5に示した。破壊はかなり脆性的で、抜け落ちた方、および元の試験体ともにほとんど永久(塑性)変形はみられなかった。図-7の加速度応答波形を見てみると破壊直前までは一つの波しか現れないが、破壊が生じると複数の波形が確認された。これは破壊が生じることによって一時的に前面(試験体)からの抵抗が無くなり、その後複数回にわたって再度試験体に衝突しているものと思われる。

(2) 球面型の場合

先端形状が球面型の場合、飛翔体はその衝突速度に関わらず、試験体と衝突して反射する。ただし、衝突速度が小さい間は弾性的に反射するが、衝突速度を増すと試験体の衝突面が陥没するようになる。その破壊性状は写真-3, 写真-4に示すように裏側の一部分が

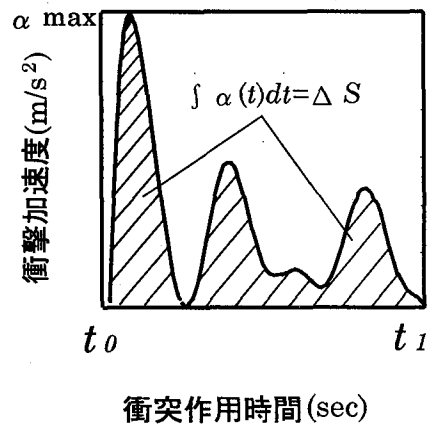


図-9 衝突加速度波形と力積

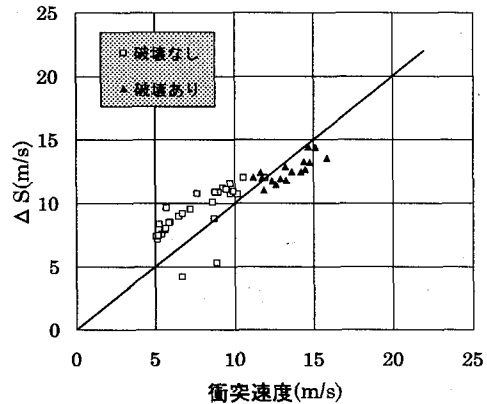


図-10 衝突速度と ΔS の関係(平面型 $\phi=32$)

剥離のみで、衝突面全体が剥離するには至らない。この時の破壊模式図を図-6に示す。したがって、飛翔体は衝突が終了するまで試験体側から常に抵抗力を受け続けることと思われる。その結果として、図-8に示すように球面型では破壊の有無に関わらず、すべての応答波形において波がひとつしか生じなかったものと考えられる。

3.2 力学的アプローチと破壊現象

(1) 全波形と力積

実験で得られた結果に運動量保存の法則を適用して、実験結果の整理を行う。飛翔体の質量を m 、衝突前の速度を v_0 、衝突後の速度を v_1 、衝突中の衝撃力を $F(t)$ 、衝突開始時刻を t_0 、衝突終了時刻を t_1 とし、運動量保存則を当てはめると、

$$mv_1 - mv_0 = \int_{t_0}^{t_1} F(t)dt = \int_{t_0}^{t_1} m\alpha(t)dt,$$

$$v_1 - v_0 = \int_{t_0}^{t_1} \alpha(t)dt \equiv \Delta S, \quad (1)$$

となる。ここで $\alpha(t)$ は衝撃加速度であり、前述の通り、これが正になるよう、つまり衝突前の速度 v_0 が負とな

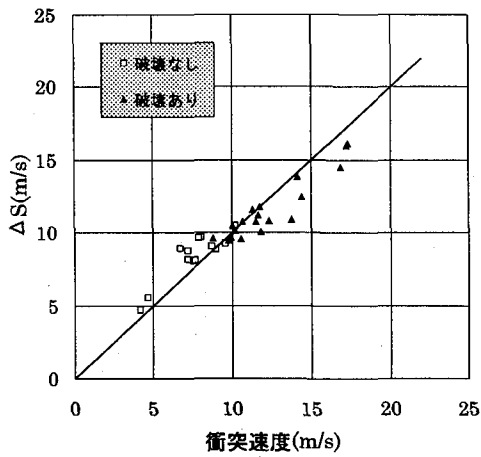


図-11 衝突速度と ΔS の関係 (平面型 $\phi=28$)

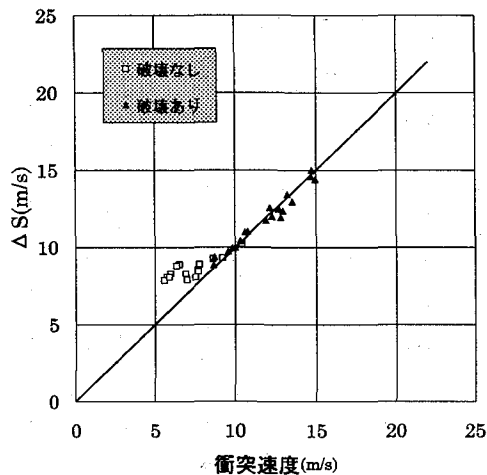


図-12 衝突速度と ΔS の関係 (平面型 $\phi=22$)

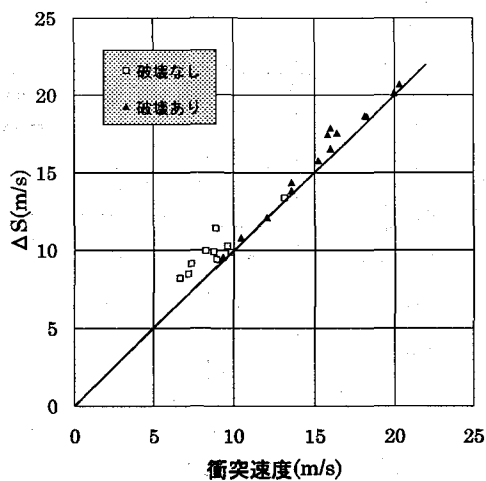


図-13 衝突速度と ΔS の関係 (球面型)

るように正負の方向をとる。これを全ての応答波形について時間積分を行い(図-9参照), ΔS を計算した。衝突前の速度 v_0 に対し ΔS の方が大きい場合は, 衝突後に飛翔体が反射することを意味し, 逆に ΔS が小さい場

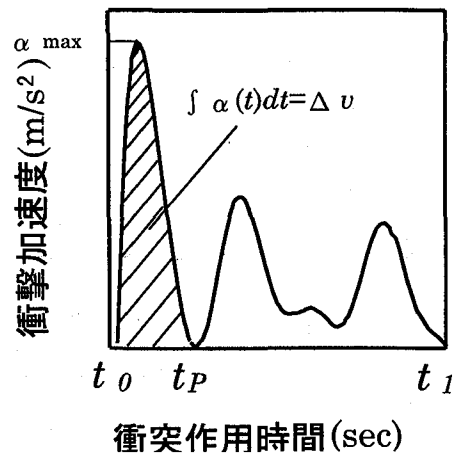


図-14 最大加速度波形と力積

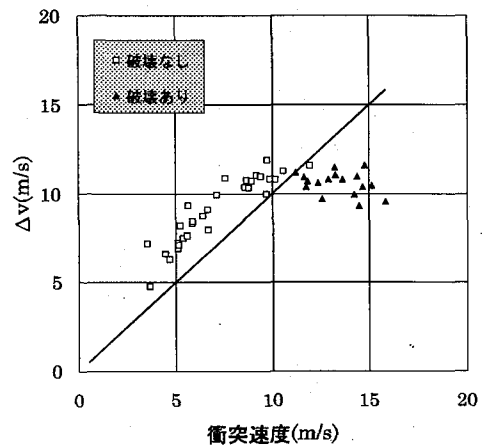


図-15 衝突速度と Δv の関係 (平面型 $\phi=32$)

合は衝突後も進行方向に残留速度を持っている, つまり貫入することになる。

図-10~図-13は, 飛翔体衝突前の速度 v_0 と力積 ΔS の関係を, 先端形状別に示したものである。これらより先端形状が平面の場合, 破壊が生じるまでは ΔS が衝突速度 v_0 より大きく, 反射現象を示している。一方, 破壊が生じた後は ΔS が v_0 より小さく, 貫入現象を示しており, この傾向は三種類全ての平面型において見られた。また, 衝突面積が小さくなるに従って, その分布が $\Delta S = v_0$ の直線に漸近している。先端が球面の場合は, ΔS が衝突速度 v_0 よりやや大きく, 破壊の有無に関わらず反射していることがわかる。これらは前節述べた実験事実と合致している。また, ΔS が反射から貫入に移り変わる点は実験から求まる点と一致していた。

(2) 最大衝撃加速度を含む波形と力積

最大衝撃加速度 α_{max} を含む一つの波形を破壊に寄与した波形と考え, その波形についてのみ式(1)を用い

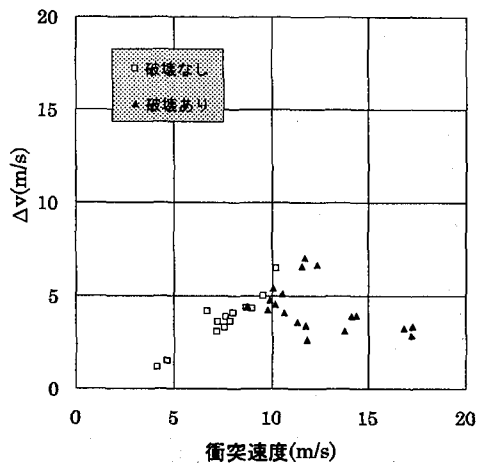


図-16 衝突速度と Δv の関係 (平面型 $\phi=28$)

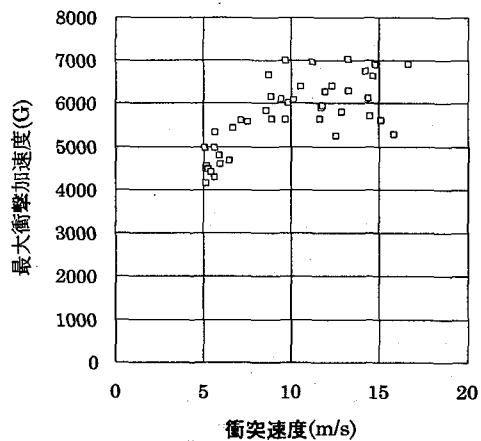


図-19 衝突速度と最大衝撃加速度 (平面型 $\phi=32$)

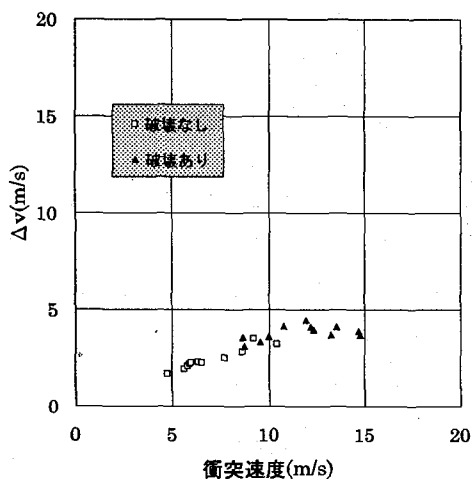


図-17 衝突速度と Δv の関係 (平面型 $\phi=22$)

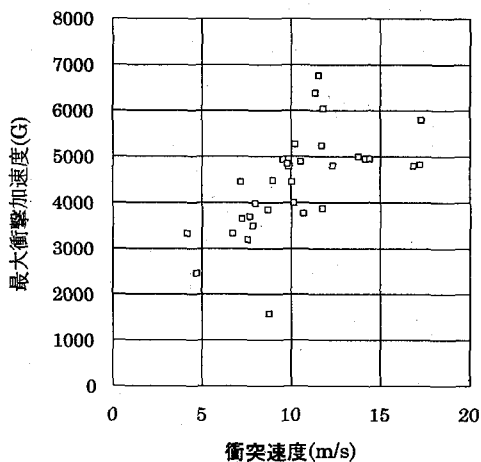


図-20 衝突速度と最大衝撃加速度 (平面型 $\phi=28$)

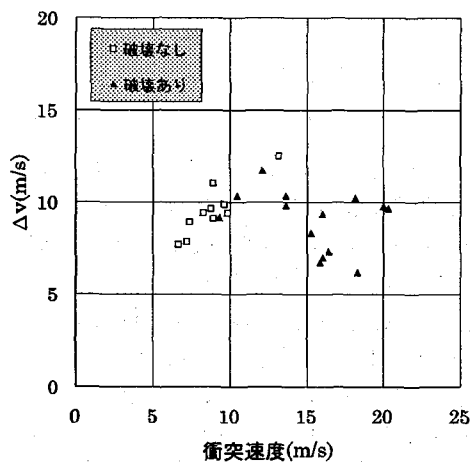


図-18 衝突速度と Δv の関係 (球面型)

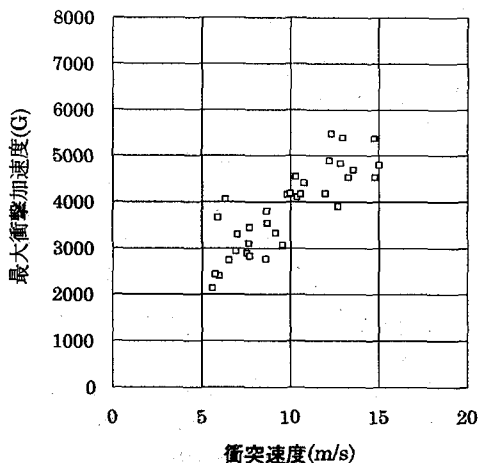


図-21 衝突速度と最大衝撃加速度 (平面型 $\phi=22$)

て以下のように時間積分を行った (図-14参照).

$$v_p - v_0 = \int_{t_0}^{t_p} a(t) dt \equiv \Delta v. \quad (2)$$

ここで、 v_p は最大衝撃加速度波形の終了時刻 t_p にお

ける終了速度である。衝突速度 v_0 と式 (2) のより求まる Δv との関係、先端形状別に図-15~図-18 に示す。図より、全ての先端形状において、破壊が生じるまでは衝突速度が増大すると、それに比例して Δv も増大す

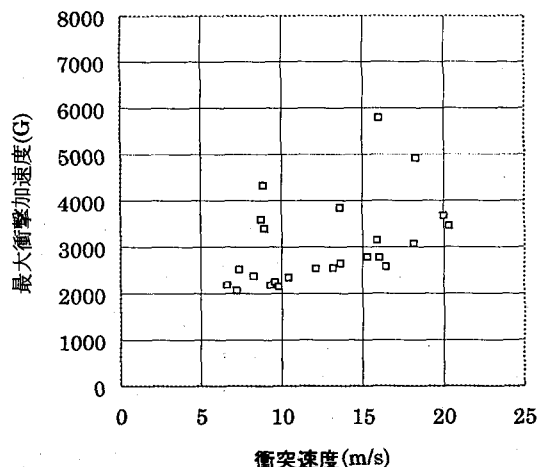


図-22 衝突速度と最大衝撃加速度 (球面型)

るが、破壊が生じると衝突速度に関係なく Δv の値は一定値をとる傾向にある。これより、破壊に寄与している波形は最大衝撃加速度を含む波のみであるものと思われる。

(3) 衝突速度と最大衝撃加速度

衝突速度 v_0 と最大衝撃加速度 α_{max} との関係を先端形状別に図-19～図-22に示す。衝突速度が増加すると、それにほぼ比例して最大衝撃加速度も増加しているが、破壊の前後でその勾配が変化していることが分かる。図より、先端形状が平面型の場合、勾配が変化している点における最大衝撃加速度は $\phi=32$ mmで約6,000 G、 $\phi=28$ mmで約5,000 G、 $\phi=22$ mmで約3,000 Gである。面積の比が $(32)^2:(28)^2:(22)^2 \cong 6:5:3$ であることから、衝撃による発生応力がある応力に達した時に、材料固有の破壊基準を満たして破壊が生じたものと思われる。式(2)の Δv が破壊後に一定値をとるのは、最大衝撃加速度 α_{max} を含む波形より求まる衝撃作用時間は、衝突速度 v_0 が増加すると減少する傾向にあるのに対して、最大衝撃加速度 α_{max} は傾きを小さくしながらも増加する傾向にあり、 Δv はこれらの積として表現されるためであると思われる。

(4) 衝突エネルギー

本節の(1)、(2)項では飛翔体の運動に運動量保存則を適用したが、本項ではエネルギー保存則の適用を行なう。

まず、運動の基本となる運動方程式は、

$$m \frac{dv(t)}{dt} = -F(t), \quad (3)$$

である。ここで $v(t)$ は飛翔体の速度、 $F(t)$ は試験体から飛翔体への作用力で、符号は飛翔体の運動とは逆向きなのでマイナスを付けておく。これらの両辺に $v(t) =$

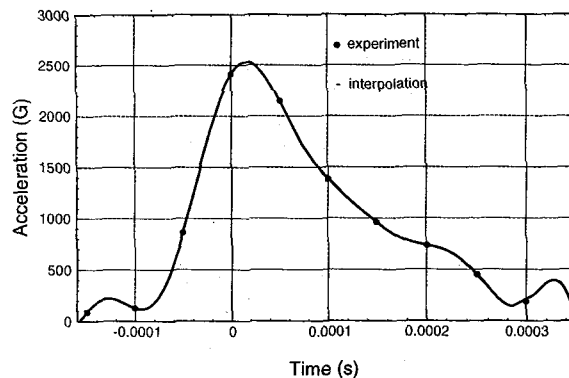


図-23 実測波形(点)と補間波形(実線)

$\frac{dv(t)}{dt}$ を乗じて、両辺を時間 t_A から t_B まで積分すると、

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2}mv_B^2 + W_{res} \\ &= \frac{1}{2}mv_A^2 - \int_{t_A}^{t_B} F(t)dt \\ &= \frac{1}{2}mv_A^2 - \int_{t_A}^{t_B} m \frac{d^2u(t)}{dt^2} \frac{du(t)}{dt} dt, \quad (4) \end{aligned}$$

となる。ここで $u(t)$ は飛翔体の変位、 v_A および v_B はそれぞれ時刻 t_A および t_B における飛行速度、そして W_{res} は温度・音響・塑性変形などに費された残留エネルギーである。右辺の第2項を、

$$\int_{t_A}^{t_B} m \frac{d^2u(t)}{dt^2} \frac{du(t)}{dt} dt = W_{imp}, \quad (5)$$

とおくと、式(4)は以下ようになる。

$$\frac{1}{2}mv_B^2 + W_{res} = \frac{1}{2}mv_A^2 - W_{imp}. \quad (6)$$

ここで、 W_{imp} は時刻 t_A から t_B の間に試験体であるコンクリートブロックが飛翔体に対してなした仕事と等価である。

実験より得た加速度応答波形に時間に関する高次の関数を内挿し、時間 t の関数、

$$\frac{d^2u(t)}{dt^2} = a_0t^n + a_1t^{n-1} \dots + a_{n-1}t + a_n, \quad (7)$$

とする。これを時間 t で積分することにより、速度及び変位の関数 $v(t)$ 、 $u(t)$ が以下のように得られる。

$$\begin{aligned} v(t) &= \frac{du(t)}{dt} = \int \frac{d^2u(t)}{dt^2} dt \\ &= \frac{a_0}{n+1}t^{n+1} + \frac{a_1}{n}t^n \dots + \frac{a_{n-1}}{2}t^2 + a_n t + C_1, \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u(t) &= \int \frac{du(t)}{dt} dt \\ &= \frac{a_0}{(n+1)(n+2)}t^{n+2} + \frac{a_1}{n(n+1)}t^{n+1} \dots \\ &\quad + \frac{a_{n-1}}{6}t^3 + \frac{a_n}{2}t + C_1 t + C_2. \quad (9) \end{aligned}$$

ここで、飛翔体が試験体に衝突する寸前の時刻 t_0 の時の速度を $v(t_0) = v_0$ 、変位を $u(t_0) = 0$ とすることにより、積分定数 C_1 、 C_2 を決定することが出来る。一例として、

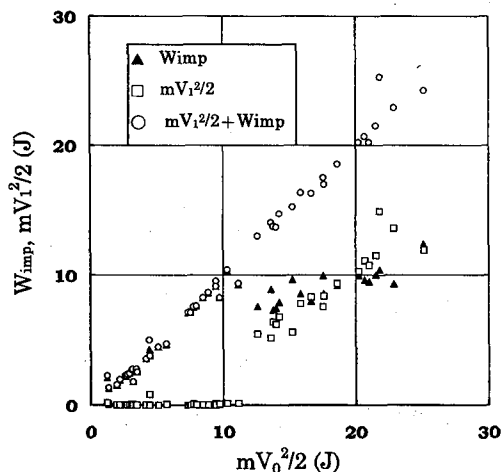


図-24 $\frac{1}{2}mv_0^2$ と $\frac{1}{2}mv_1^2$, W_{imp} (平面型 $\phi=32$)

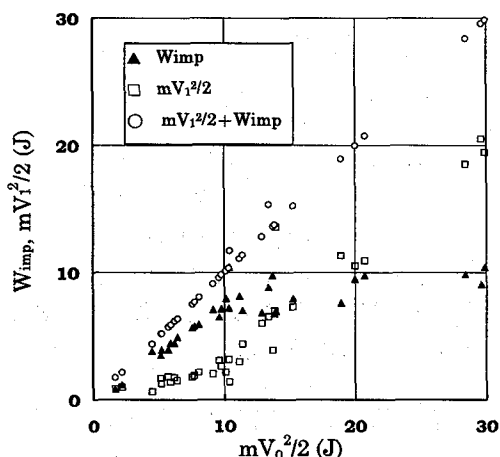


図-25 $\frac{1}{2}mv_0^2$ と $\frac{1}{2}mv_1^2$, W_{imp} (平面型 $\phi=28$)

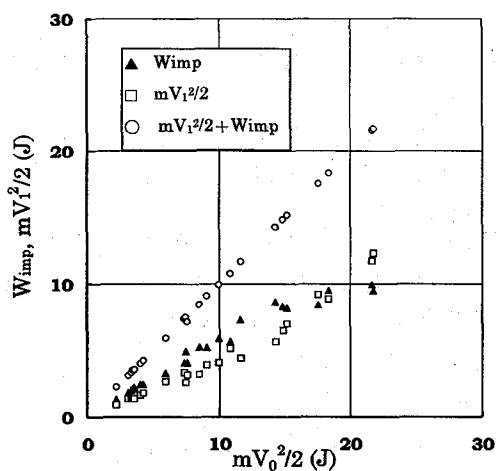


図-26 $\frac{1}{2}mv_0^2$ と $\frac{1}{2}mv_1^2$, W_{imp} (平面型 $\phi=22$)

実際に得られた加速度応答(点)と時間に関する高次の関数で補間した波形曲線(実線, $Acceleration=2411 + 1.51933 \times 10^7 t - 4.84385 \times 10^{11} t^2 - 8.50401 \times 10^{14} t^3 + 5.64844 \times 10^{19} t^4 - 5.37321 \times 10^{22} t^5 - 3.3665 \times 10^{27} t^6 -$

$7.59419 \times 10^{30} t^7 + 1.0806 \times 10^{35} t^8 - 3.26368 \times 10^{38} t^9 - 1.92785 \times 10^{42} t^{10} + 7.04454 \times 10^{45} t^{11} + 1.87527 \times 10^{49} t^{12} - 8.44679 \times 10^{52} t^{13} - 8.60797 \times 10^{55} t^{14} + 5.66947 \times 10^{59} t^{15} + 3.91066 \times 10^{61} t^{16} - 1.98307 \times 10^{66} t^{17} + 1.04496 \times 10^{69} t^{18} + 2.80237 \times 10^{72} t^{19} - 2.5834 \times 10^{75} t^{20}$)を併せて図-23に示す。

これらの式を基に W_{imp} を求め、試験体の破壊が脆性的だった飛翔体の先端形状が平面型のものについて、衝突前の運動エネルギー $\frac{1}{2}mv_0^2$ と W_{imp} 、衝突後の運動エネルギー $\frac{1}{2}mv_1^2$ 、および W_{imp} と $\frac{1}{2}mv_1^2$ の和の関係を図-24~図-26に示した。いずれの先端形状の場合も、衝突前の運動エネルギー $\frac{1}{2}mv_0^2$ と W_{imp} 、および衝突後の運動エネルギー $\frac{1}{2}mv_1^2$ の関係は両者ともほぼ線形であるが、試験体の破壊を前後にその傾きが変化している。この変化点も実験から求まる試験体の裏面剝離発生点と一致した。 W_{imp} の勾配はこの変化点を境に小さくなって横ばい状態に変化しているのに対し、 $\frac{1}{2}mv_1^2$ の勾配は大きくなっている。また、先端形状が平面型の場合、衝突面積が減少するにしたがって、 W_{imp} の勾配は小さくなり、 $\frac{1}{2}mv_1^2$ の勾配は大きくなる傾向にある。さらに、いずれの先端形状および衝突速度においても W_{imp} と $\frac{1}{2}mv_1^2$ の和が衝突前の運動エネルギー $\frac{1}{2}mv_0^2$ とほぼ一致していることから、塑性変形などによる残留エネルギー W_{res} はほとんど無く、試験体が脆性破壊を起こしたことがわかる。これは前述の実験事実と合致している。

この他に、式(9)を用いて求まる変位量と、裏面剝離をせずに試験体の表面が陥没した場合の陥没量とを比較したが、両者はほぼ一致していた。

4. 三次元有限要素法解析

前章で検討した通り、試験体であるコンクリートブロックはほぼ脆性的に破壊していたので、弾性理論の範囲内で三次元有限要素法解析を行い、飛翔体が試験体に衝突して試験体が破壊に至る領域の予測がどこまで可能か検討を行った。

解析領域は、試験体であるコンクリートブロックの前面のみ(190 mm×90 mm×25 mm)とし、背面全域が変位固定条件であることから、実際の試験体の前面と背面との4カ所の接合部分に相当する箇所(図-27参照)に、垂直方向のみ変位固定の境界条件を設けた。用いた有限要素メッシュの要素数、節点数はそれぞれ500要素、726節点である。試験体の破壊に寄与したと思われる波形の最大衝撃加速度(3.2(3)参照, $\phi=32$ で6000 G)に飛翔体の質量(200 g)を乗じたものを荷重とし、それを実際に飛翔体が衝突すると思われる箇所(図-27の中心16要素, 40 mm×40 mm)に作用させた。解析ではこの矩形領域に節点力を作用させているが、実際の試験体の衝突部分は円形に近く、解析と

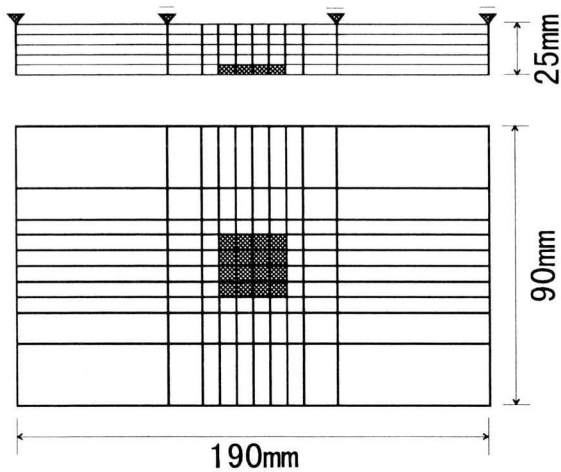


図-27 解析メッシュ

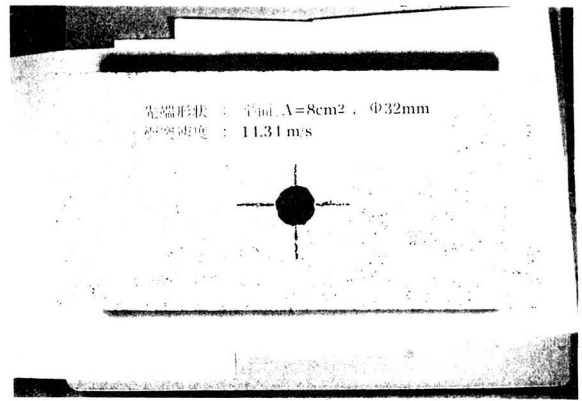


写真-5 破壊性状 (衝突面)

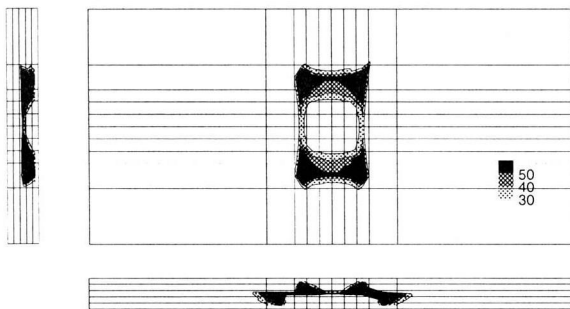


図-28 内部摩擦角分布

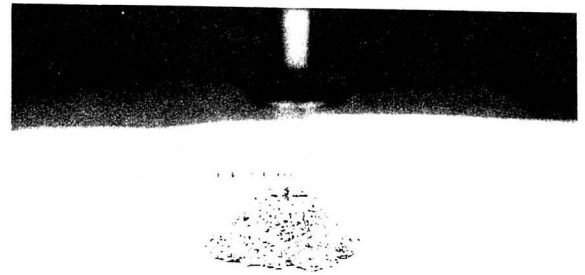


写真-6 破壊性状 (剥離部分)

実験の衝突領域は完全に一致しているわけではない。

破壊領域を予測するため、文献⁸⁾を参照して、コンクリートの圧縮破壊の破壊基準に Mohr-Coulomb 型 ($\tau = c + \sigma_n \tan \phi$) の破壊基準を用いた。ただし、粘着力である c はデータが無かったので、岩石の粘着力を基に推定し、 $c=20 \text{ kgf/cm}^2$ と仮定して用いた。解析では、各要素において最大せん断応力 τ_{\max} と、それに直交する直応力 σ_n を計算し、これより内部摩擦角 $\phi = \frac{\tau_{\max}}{\sigma_n}$ を求め、その分布図を図-28 に示した。また、実験における試験体の破壊性状を写真-5と写真-6 に示した。図-28より、衝突面での内部摩擦角は非常に小さく、逆にその周辺で破壊角が $40^\circ \sim 50^\circ$ と高く分布していることから、衝突面そのもの(中心の矩形領域、 $40\text{mm} \times 40\text{mm}$)よりもその周辺から破壊が生じることがわかる。実際の破壊領域も、衝突面のやや外側であった。また側面図や上面図より、内部摩擦角の大きい領域は衝突面から裏側に向かって広がるように分布しており、この辺りで破壊が生ずるものと考えられる。こうして求まる破壊領域(図-28)と、実験での破壊領域(写真-5, 写真-6)とを比較すると、両者とも衝突面では衝突部分のやや外側で、それが深度方向に広がっていることがわかる。

5. まとめ

本研究では、衝撃荷重をうけるコンクリートブロックの破壊挙動を、経験式などを用いることなく簡単な力学理論のみを用いて説明することを試みた。それより以下の知見を得た。

1. 先端形状によって試験体の破壊形態が異なることがわかった。特に面で衝突を開始する平面型と点で衝突を開始する球面型では、破壊形態だけでなく衝撃応答も大きく異なる。
2. 運動量保存の法則に基づき、全ての波形について力積を計算したところ、飛翔体の反射および貫入などを判定できることが判明した。また反射から貫入に変化する点は実験において得られたそれと合致していた。
3. 同様に運動量保存の法則に基づき、最大衝撃加速度を含む波形についてのみ力積を計算したところ、力積がある一定値に達すると試験体であるコンクリートブロックが破壊することが判明した。これより、加速度応答波形の中で破壊に寄与する部分は最大衝撃加速度を含む波形のみであるものと考えられる。したがって、衝撃荷重を受ける物体の

破壊を考える場合、破壊荷重だけでなく衝撃作用時間を連成して考えるべきと思われる。

4. 今回の実験では、衝突前の運動エネルギーは衝突後の運動エネルギーと衝突エネルギーの和にほぼ等しかった。これは、試験体は塑性変形などを起こすことなく脆性的に破壊したことを意味し、実験事実と合致している。
5. 試験体が脆性破壊することを前提に行った三次元有限要素解析により、破壊領域を類推することができた。

これより、材料（飛翔体および衝撃荷重をうける物体）の材料・破壊特性（破壊時の力積，粘着力，破壊摩擦角など）を得られれば、衝撃荷重を受ける実在構造物などの破壊挙動を解析から予測できるものと思われる。

力学的視点に立って衝撃荷重を受ける材料の破壊挙動を説明することは、単に現象を把握する、そして破壊のメカニズムを明らかにするだけでなく、合理的で経済的な設計法の確立につながるものと思われる。

謝辞： 本研究を行うにあたって、実験および実験結果の整理を手伝って頂いた、当時千葉工業大学土木工学科四年生の大川晃司君（現 東亜建設工業）、高橋和子君（現 川口市役所）に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 曾我部隆久，布施谷寛，福家敬泰，四宮征一，麻植政行：海岸構造物への木材衝撃力について，第28回海岸工学講演会論文集，pp.584-588，1981。
- 2) 松富英夫：碎波段波に伴う流木の最大衝撃力に関する実験的研究，土木学会論文集，No.467/II-23，pp.19-28，1993。
- 3) 椎名卓也：柔飛来物による衝撃荷重に関する基礎的研究，第49回年次学術講演会講演概要集，pp.1608-1609，1994。
- 4) 坂本達弥，足立一郎：飛来物の衝突による衝撃挙動に関する研究，第23回関東支部技術講演発表会講演概要集，pp.80-81，1996。
- 5) 坂本達弥，足立一郎：飛来物によるコンクリートブロックの破壊について，第50回年次学術講演会講演概要集，pp.1080-1081，1995。
- 6) 岡本貢一，大野友則，上林厚志，上田真稔，石川信隆：小型飛翔体の高速衝突に対する2層構造RC板の衝撃挙動と局部損傷の推定，構造工学論文集，Vol.40A，pp.1567-1579，1994。
- 7) 小暮幹太，大野友則，河西良幸，坪田張二，内田考：鋼板で補強されたRC板の耐衝撃性と補強鋼板の等価コンクリート厚の推定，構造工学論文集，Vol.39A，pp.1599-1608，1993。
- 8) 吉本彰：コンクリートの変形と破壊，学献社，1990。

(1996年9月6日受付)