

## 衝撃荷重を受ける無筋および鉄筋コンクリート版の破壊挙動に関する研究

A study on fracture behavior of plain and reinforced concrete slab subjected to impact loads

藤本一男\* 小川哲史\*\*

Kazuo Fujimoto

\*フェロー会員 工博 金沢工業大学 環境・建築学部 教授 (〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘7-1)

\*\*中部土木株式会社 品質管理部 (〒465-0092 名古屋市名東区社台3-12-5)

キーワード：衝撃破壊挙動、コンクリート版、裏面剥離

### 1. はじめに

鉄筋コンクリートはり等に対する、衝撃荷重による応答挙動に関しては多くの実験や、解析が行われてきた。本研究は無筋および鉄筋コンクリート版に対して、破壊までの衝撃挙動に関する研究である。鉄筋コンクリート版に対する衝撃問題は防衛関連技術として、弾丸等の飛翔体の貫入、貫徹等について研究されているが、これらの飛翔体の衝突速度は200m/s~1000m/sと非常に高速である。一方、落石防止覆いの場合には数m/s~30m/s程度を対象にしているため、破壊は局部的ではなく構造全体の応答となる。本研究も10m/s程度の衝突速度の場合を想定したものである。本研究は土木学会<sup>1),2)</sup>および第6回の本シンポジウム<sup>3)</sup>で発表した内容の継続したものである。実験は、コンクリート版に対して、鋼球を自由落下させて衝撃力を与え、落下高さ、鋼球の質量等によって、コンクリート版がいかなる破壊挙動を示すかを実験的に求めた。また、有限要素法による数値解析で、変形等がどの程度予測できるかについて検討した。

### 2. 供試体および鋼球

実験で使用した無筋コンクリート版供試体は直径300mm、厚さ20, 30, 40mmの円盤での強度は24.5および49N/mm<sup>2</sup>、鉄筋コンクリート版は厚さ40mmで強度は49N/mm<sup>2</sup>である。鉄筋コンクリート版の鉄筋は直径2.6mmの軟鋼線材を間隔10mmの正方形網目で下端より10mmの位置に配筋した。また、各供試体は厚さ10mmの塩化ビニールパイプで囲ってある。鋼球は直径25mm(質量0.06kg), 38mm(質量0.226kg), 50mm(質量0.535kg), 76mm(質量1.81kg), 102mm(質

量4.29kg)および127mm(質量8.38kg)の6種類でそれぞれマグネットホルダーによって所要の高さで保持し、電源を切ることによって落下させた。

### 3. 鉄筋コンクリート版に対する弾性範囲実験

#### 3.1 実験方法

写真1は弾性範囲実験に関する写真である。弾性範囲実験では、最大ひずみがほぼ300 $\mu$ 程度になるよう

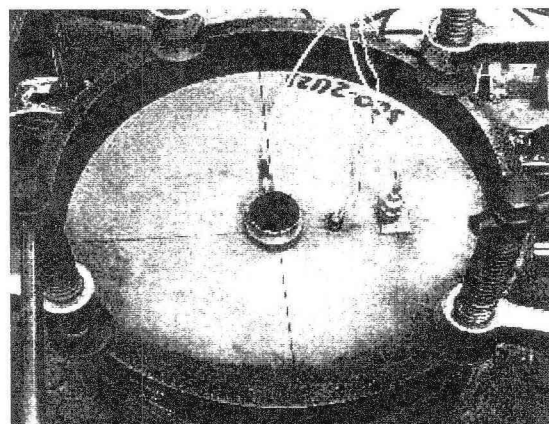


写真1 ゴム設置時の表面状態

に衝突エネルギーを決定した。また、測定項目は、表面にロードセルによる衝撃力、加速度計による加速度、裏面には円周方向および放射線方向のひずみを測定した。詳細は、前回のシンポジウムの論文<sup>1)</sup>に示されているので省略する。また、鋼球を直接ロードセルに衝突させた場合と厚さ2mmのゴム版を貼り付けた場合の実験を行った。そして、いずれの場合も、最大ひずみが300 $\mu$ 以下になるようにしたが、ゴムによって多くのエネルギーが吸収されるため、ゴムのない場合の

エネルギーはゴムを設置した場合の6.5倍になった。また、いずれの実験も鋼球の質量を変化させ高さを変えたが、衝突エネルギーは同一（ゴム無し：0.036J, ゴム有り：2.31J）にした。表1は弾性範囲の実験ケースである。

表1 弾性範囲実験ケース

鋼球の種類 (質量 kg)	落下高さ	衝突速度
0.06kg	ゴム無し	60mm
	ゴム有り	396mm
0.226kg	ゴム無し	16mm
	ゴム有り	107mm
0.535kg	ゴム無し	7m
	ゴム有り	45m
1.806kg	ゴム有り	13m

### 3.2 実験結果

ゴムない場合、鉄筋コンクリート版の応答は図1に示すように、初期のひずみは高周波成分を含んだ応答となる。これは衝撃力や加速度も同様の傾向であり、特に加速度に関しては極めて多くの高周波成分を含む

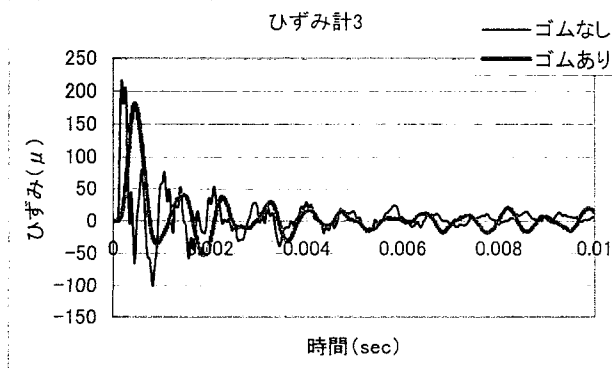


図1 ゴムの有無によるひずみ応答の相違

応答となる。このことは前回報告<sup>3)</sup>した無筋コンクリート版の場合と同様である。

次に、同一エネルギーで質量の異なる鋼球で高さを変化させたときの応答特性について述べる。図2はゴムのある場合とない場合の裏面中央のひずみの最大値と衝突速度の関係を示したものであるが、衝突速度が大きくなると若干最大ひずみは小さくなる傾向はあるがエネルギーが同じであればほぼ同じ大きさのひずみが生じる。この傾向はロードセルによって測定した衝撃荷重も同様であった。一方、図3に示すように加速度については衝突速度が大きくなると加速度も大きくなる傾向が明瞭である。これは、衝突速度が速く

なるほど、高周波の波動が生じるためと思われる。

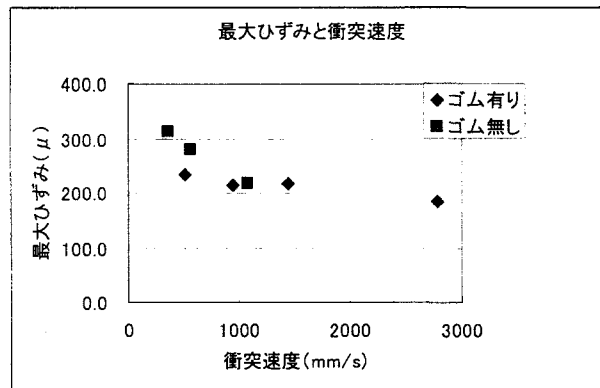


図2 最大ひずみと衝突速度

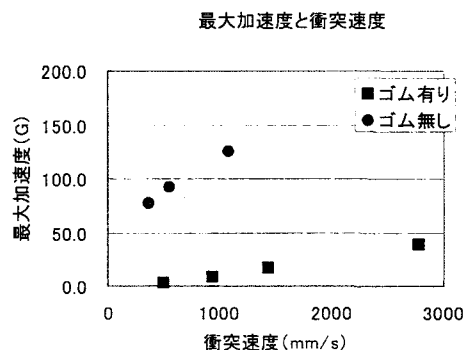


図3 最大加速度と衝突速度

## 4. 無筋コンクリート版に対する衝撃破壊実験

### 4.1 実験方法

無筋コンクリート版に対して鋼球の種類、コンクリート版の板厚、コンクリートの強度および鋼球の落下高さを変えながら、裏面剥離限界や貫通限界を求めるための実験を行った。使用した鋼球は質量 1.81kg (直径 76mm)、4.29kg (直径 102mm) および 8.38kg (直径 127mm) である。計測は裏面のひずみおよび中央の変位である。図4は実験装置を示している。

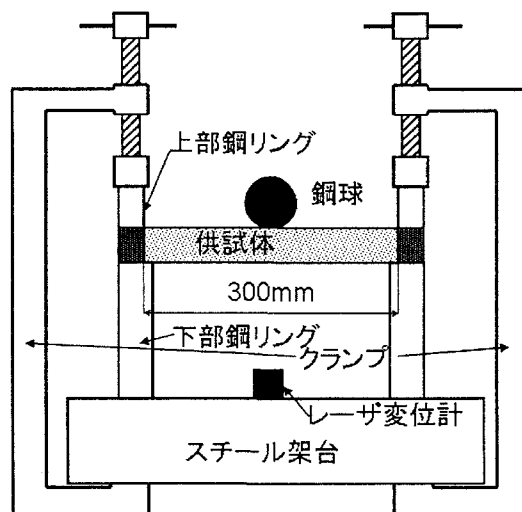


図4 実験装置

衝撃破壊実験の衝突エネルギーは 8.9J(0.9kgm)～183.6J(18.8kgm)である。

## 4.2 実験結果

### 4.2.1 衝突エネルギーとクラック面積

衝突エネルギーが小さい場合の鋼球は、ほとんど跳ねることはなく、衝突時に鋼球は供試体上に止まるが、大きなエネルギーを与えるにしたがって鋼球のリバウンドが大きくなる。すなわち、衝突エネルギーが小さい場合は、ほとんどのエネルギーがコンクリート版の破壊に使用される、エネルギーが大きくなるほど、リバウンドが生じ、エネルギーがコンクリート版の破壊に寄与する割合が減少する。

衝突エネルギーがコンクリート版の破壊にどのように寄与しているかを検討するために、実験後の破壊状況を観察する目的でクラック面積を算定した。これは、表面のクラック長さで裏面（裏面のクラック長さが長い）のクラック長さの平均にコンクリート版の面積を乗じ、さらに、裏面剥離が発生した場合は、裏面剥離部分の面積を加えて求めた。図5は衝突エネルギーとクラック面積の関係を示したものである。図の凡例で最初の数字は鋼球の直径、次はコンクリートの強度、最後はコンクリート版の厚さを示している。強度が大きければクラック面積は小さくなると予想できるが、クラック面積の算定が極めてラフであるためか明確ではない。また、鋼球の大きさおよびコンクリート版の厚さについてもクラック面積と衝突エネルギーの関係に影響を与えるパラメータとはならないことが分かる。しかし、両者の間には、衝突エネルギーが大きくなればクラック面積も大きくなり、クラック面積の増加率が徐々に小さくなる傾向がある。したがって、衝突エネルギーによってクラック面積が概略予測できると考えられる。

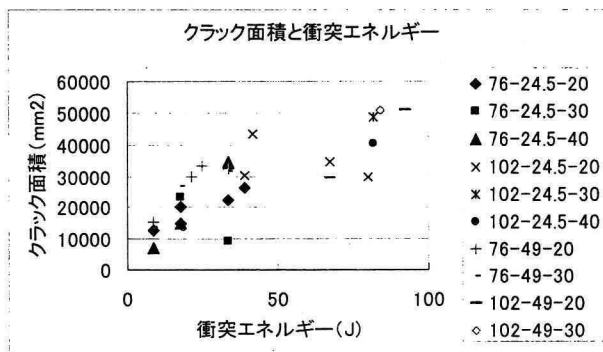


図5 クラック面積と衝突エネルギー

### 4.2.2 同一エネルギーによる破壊形式の検討

同一エネルギーで鋼球の質量の相違または衝突速度が異なる場合の破壊状況について検討した。コンクリートの厚さは 20mm、強度は 24.5N/mm<sup>2</sup> の無筋コンクリート版に衝突エネルギー38J(4.0kgm)になるように直径 76mm、102mm および 127mm の鋼球を衝突させた。落下高さは 2200mm、926mm および 474mm である。その結果、直径の最も小さい鋼球で衝突高さ 2200mm の場合、裏面剥離が生じた。一方、最も大きい鋼球の場合、クラックが生じたのみであった。中間の大きさの鋼球の場合、裏面剥離が発生する直前であった。その状況を写真 2, 3, 4 に示す。

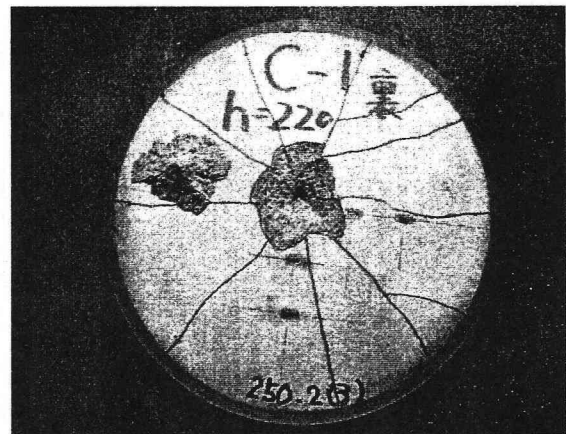


写真2 裏面剥離したコンクリート版

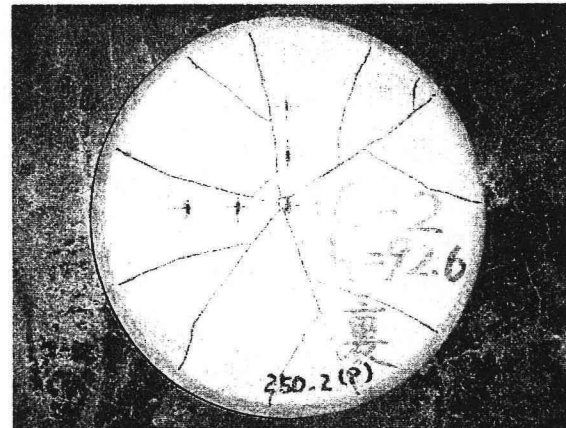


写真3 裏面剥離直前のコンクリート版

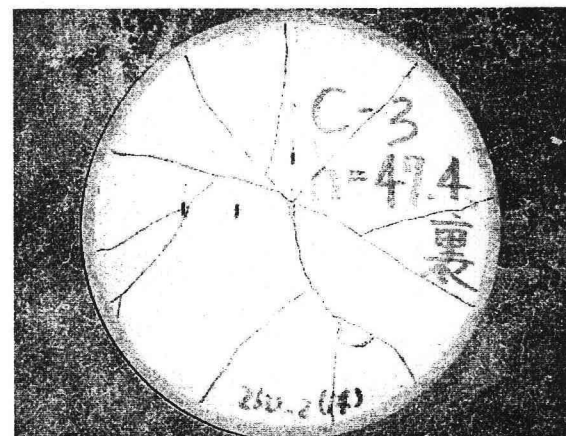


写真4 クラックのみ発生したコンクリート版

このことは、衝突速度が速く、接触面積が少ないほど局部的な破壊になることを示している。また、速度が遅く、接触面積が大きくなれば、破壊は版全体の破壊になることを示している。

#### 4.2.3 裏面剥離体積と衝突エネルギー

衝突エネルギーが大きくなると、破壊形式がクラックのみから裏面剥離の発生を伴う破壊になる。そこで、裏面剥離した部分の体積を求めて、衝突エネルギーとの関係を求めてみた。

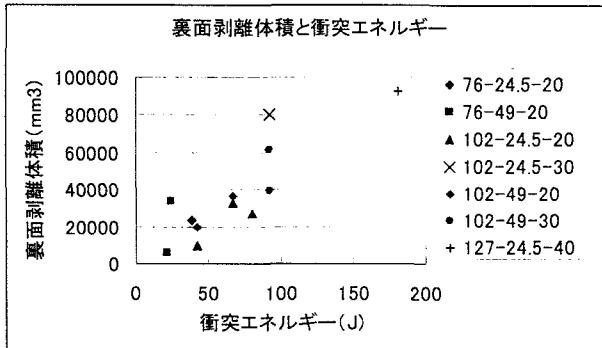


図6 裏面剥離体積と衝突エネルギー

図から強度、鋼球の大きさおよびコンクリート版の厚さのいずれも両者の間に相関は認められないが、体積は衝突エネルギーにほぼ比例して増加する傾向が見られる。

#### 4.2.4 衝突エネルギーと破壊形式

コンクリート版に対する裏面剥離や貫通に関する提案式は多くある。特に弾丸の侵徹や貫徹に関する問題は古くから防衛問題で研究<sup>5)</sup>されている。ここでは、無筋コンクリート版の裏面剥離限界および貫通限界について検討した。今まで述べたクラック面積や、裏面剥離体積は、衝突エネルギーによってある程度整理されることが判明した。ここでも同様に衝突エネルギーによって整理する。鉄筋コンクリート版に対する貫通限界や裏面剥離限界の評価式たとえば Chang 式や、電力中央研究所の評価式<sup>1)</sup>は、いずれもコンクリート版の吸収エネルギーと衝突エネルギーの釣合いかから求められたものである。したがって、ここでも、衝突エネルギーとコンクリート版の厚さで整理することにする。

図7および図8はコンクリート強度 24.5N/mm<sup>2</sup>および 49N/mm<sup>2</sup>の場合について破壊形態と衝突エネルギーについてプロットしたものである。図中の曲線は電力中央研究所の評価式を衝突エネルギーと裏面剥離あるいは貫通限界厚さの関係に直したもので、鋼球の直径や速度が異なっても、衝突エネルギーと裏面剥離限界

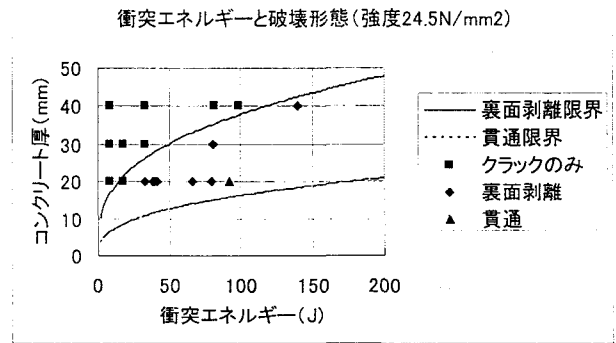


図7 衝突エネルギーと破壊形態 (強度 24.5N/mm<sup>2</sup>)

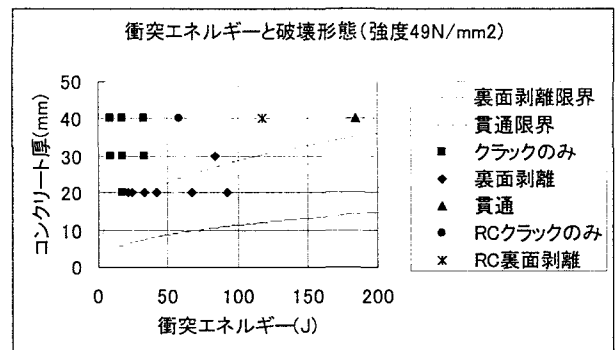


図8 衝突エネルギーと破壊形態 (強度 49N/mm<sup>2</sup>)

および貫通限界の関係はほとんど変わらないことがわかった。したがって、貫通限界や裏面剥離限界は衝突体の質量、直径および速度に依存しないとして、衝突エネルギーのみで概略評価できるのではないと思われる。本実験ではデータ数が少なく、バラツキが多く明確なことはいえないが衝突エネルギーで予測できると思われる。本実験では、クラック面積や裏面剥離体積では強度による影響はあまり認められなかった。裏面剥離限界と貫徹限界についても同様である。これは衝突速度が小さいことによると思われる。さらに、強度の小さい方の裏面剥離限界は、電力中央研究所の評価式を変形したものとほぼ一致するが、貫通限界は評価式より、はるかに小さいエネルギーで貫通することが示された。この原因は、裏面剥離については鉄筋の有無はほとんど関係ないが、貫通限界については、鉄筋の存在がかなり影響するためと思われる。

### 5. 鉄筋コンクリート版に対する破壊実験

#### 5.1 実験方法と実験結果

実験装置は無筋コンクリートと同じ装置を用いている。使用した鋼球は直径 102mm および 127mm で質量が 2 倍である。衝突エネルギーの大きさによる破壊形状の相違を検討するため、落下高さをほぼ同じ(衝突速度が同じ)にして衝突エネルギーを 2 倍にして実験を行った。衝

突エネルギーはそれぞれ 59J(6kgm)および 118J(12kgm)である。写真 5, 写真 6 および写真 7 は破壊したコンクリート版の裏面を示す。

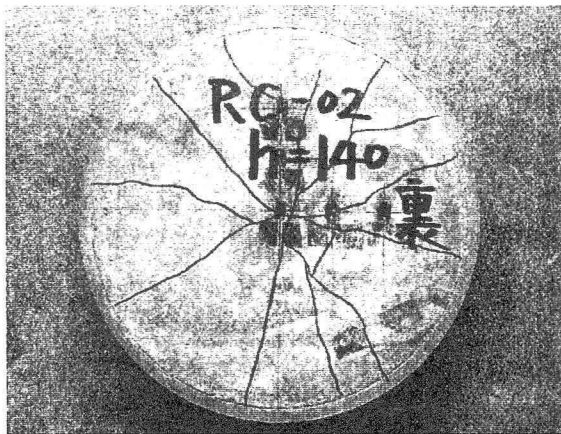


写真 5 クラックのみの鉄筋コンクリート版の裏面

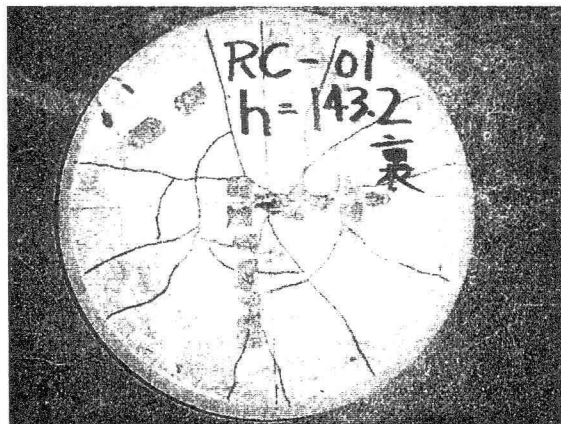


写真 6 裏面剥離した鉄筋コンクリート版の裏面



写真 7 鉄筋コンクリート版の裏面剥離状態

鉄筋コンクリート版の場合も衝突エネルギーが小さいと破壊は放射線方向のクラックのみであるが、大きくなると円周方向のクラックが生じ、裏面剥離を起こす。この場合は、写真 7 で示すように鉄筋の位置から裏面剥離を発生させる。また、鉄筋コンクリート版の場合、無筋コンクリート版とは異なり裏面のクラックに比較して表面のクラックの発生は非常に少なくなる。これは、鉄筋の存在が、表面への

クラックの伝播を防止しているからである。

図 8 に無筋コンクリート版と同じグラフに鉄筋コンクリート版のクラックおよび裏面剥離のデータをプロットしてある。これらのデータから、破壊状況でクラックのみから裏面剥離状況に移行する衝突エネルギーは鉄筋の有無はあまり影響しないと思われる。

## 6. 数値解析

### 6.1 モデル化

前回のシンポジウムと同様に、LS-DYNA を用いた数値解析を行った。ここでは無筋および鉄筋コンクリート版の解析を行った。コンクリートは Drucker-Prager の構成則を用いたが、モデルは前回と同じであるので省略する。鉄筋はバイリニア型の変力ひずみ曲線を用い、降伏後の硬化係数はヤング係数 1/10 を用いて計算した。

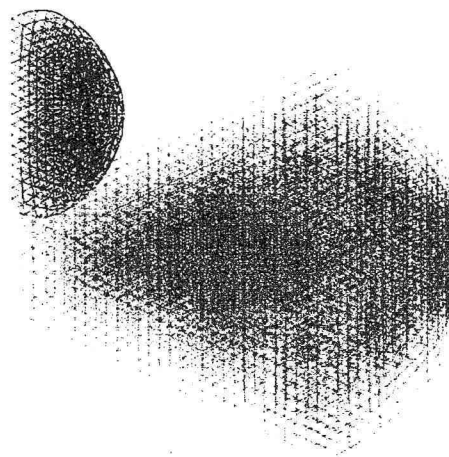


図 9 無筋コンクリート版の解析モデル

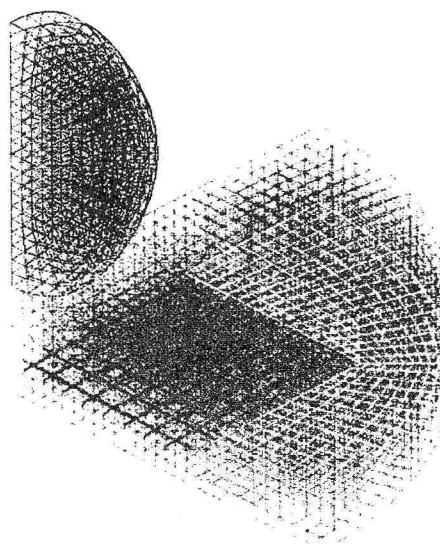


図 10 鉄筋コンクリート版の解析モデル

図 9 および図 10 は解析に用いた 1/4 分割の要素分割である。鋼球およびコンクリート部分はソリッド要素、鉄筋

は中央から 8cm まではトラス要素とし、それより先は単位体積辺りの鉄筋量が同じシェル要素として計算した。周囲の境界条件は単純支持と仮定して計算した。

## 6.2 解析結果

図 11, 12 および 13 は厚さ 20mm, 30mm および 40mm 無筋コンクリート版に対して同一の衝突エネルギー (17.7J) 与えた実験結果と解析結果とを比較したものである。

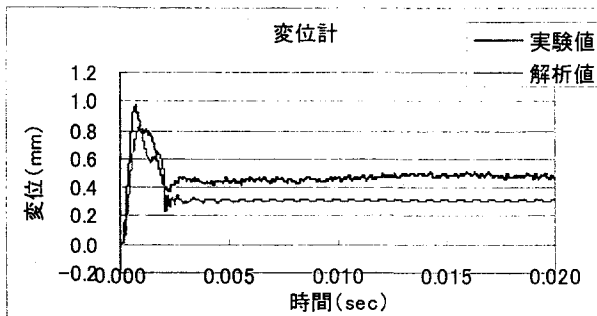


図 11 厚さ 20mm 無筋コンクリート版の実験と解析結果

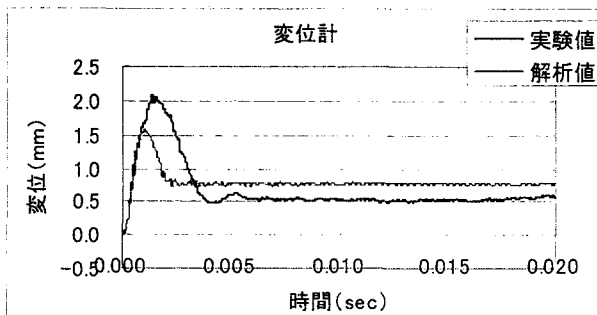


図 12 厚さ 30mm 無筋コンクリート版の実験と解析結果

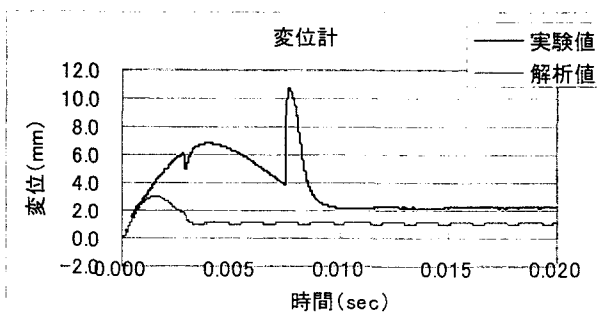


図 13 厚さ 40mm 無筋コンクリート版の実験と解析結果

図 13 は解析結果と実験結果に大きな相違があるが、これは裏面が若干剥離し破片が飛んだためである。無筋コンクリートの場合解析結果が多少小さくなっているがほぼ推定できることが確認された。図 14 および図 15 は鉄筋コンクリート版の実験結果と解析結果を示した。

鉄筋コンクリートの場合実験値より解析値の方が若干大きくなっている。残留変位も大きくなっているが、時間

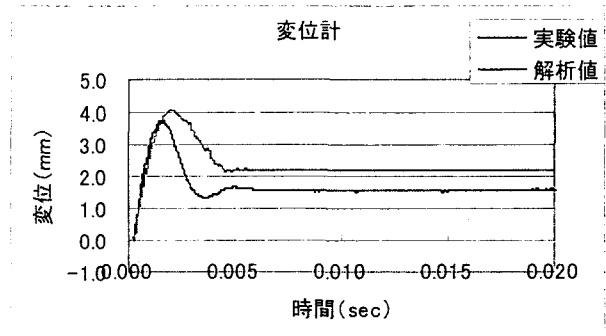


図 14 鉄筋コンクリート版の実験結果と解析結果

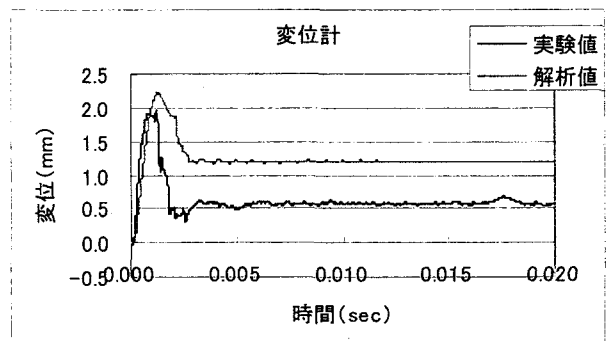


図 15 鉄筋コンクリート版の実験結果と解析結果

経過の傾向もほぼ合っているといえる。

## 7. おわりに

本研究でえられた要点は以下のようになる。

- 1) 無筋コンクリート版の衝撃破壊は衝突エネルギーが大きく寄与し、クラック面積および裏面剥離体積と相関がある。
- 2) 本実験の低速速度範囲では無筋および鉄筋コンクリート版の裏面剥離限界や貫通限界は、鋼球の直径、衝突速度には影響されず、衝突エネルギーと大きな相関がある。
- 3) LS-DYNA による数値解析によって、無筋および鉄筋コンクリート版の応答変位はほぼ予測できる。

### 参考文献

- 1) 藤本一男, 金子智彦, 小川哲史”衝撃加重による無筋コンクリート版の動的応答実験”, 土木学会第 57 回年次講演会概要集, I pp185-186, 2002 年 9 月
- 2) 藤本一男, 小川哲史”衝撃加重による無筋コンクリート版の動的応答解析”, 土木学会第 58 回年次講演会概要集, I pp1577-1578, 2003 年 9 月
- 3) 藤本一男”衝撃荷重を受ける無筋コンクリート版の動的応答に関する研究”第 6 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp99-104, 2002 年 7 月
- 4) 土木学会”構造物の衝撃挙動と設計法” pp275-295, 1996 年 1 月
- 5) 同上, pp125-129