

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

DYNAMIC RESPONSE OF PLAIN CONCRETE PLATE SUBJECTED TO IMPACT LOADINGS

藤本一男*

Kazuo FUJIMOTO

*工博 金沢工業大学 環境系 教授 (〒920-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1)

キーワード：無筋コンクリート版，衝突実験，衝突応答解析
(Plain concrete plate, Impact test, Impact response analysis)

1. はじめに

鉄筋コンクリートはりや版に対する衝撃に関する研究はすでに多く発表されているが^{1),2)}，本研究は，無筋コンクリート版に対する鋼球による直接衝突実験を行い，コンクリート版の基本的衝撃応答特性を把握することを目的としている。

本研究はコンクリート版の耐衝撃性能を把握するため，厚さ3種類，強度2種類の無筋コンクリート版に4種類の質量の鋼球を自由落下衝突させ，コンクリート版の破壊に至るまでの現象を実験的に観察した。

まず，コンクリートの弾性範囲の実験を行い，同一エネルギーを与えて衝突速度による応答特性を求めたが，衝突速度の変化による顕著な相違は認められなかった。

また，弾性範囲の実験によって，振動特性を把握し，数値解析のための境界条件および減衰特性を求めた。ついで，エネルギーを大きくし，破壊実験を行い，クラックの発生とエネルギーの大きさの関係を求めた。その結果，破壊状況は，まず，円周方向および放射方向のクラックが発生し，さらにエネルギーを大きくすると，円周方向のクラックが裏面に発生し，いわゆる裏面剥離現象が観察された。これらの破壊までの挙動を数値解析し，解析方法およびコンクリートの構成式について検討した結果，実験結果を比較的良好にシミュレートできることが判明した。

2. 衝撃実験

2.1 実験装置

図-1は実験装置を示している。

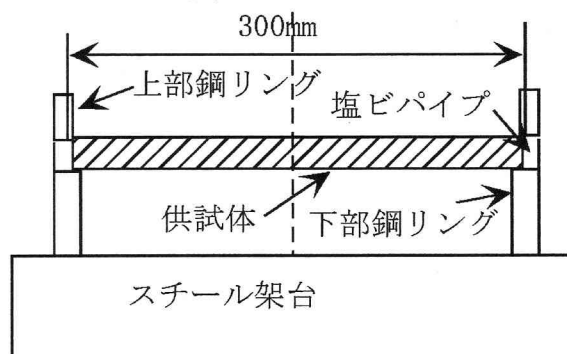


図1 実験装置

供試体は，厚さ2cm, 3cm, 4cm, の3種類，コンクリート強度は24.5N/mm², 49N/mm²の2種類で半径15cmであり，周辺は塩化ビニールパイプで囲っている。

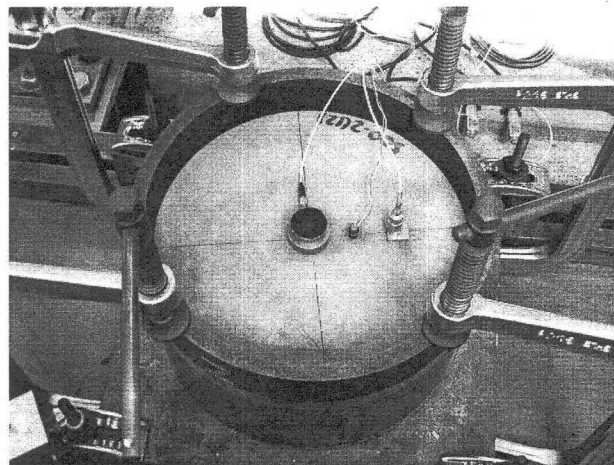


写真1 供試体の設置

これらの供試体は上下の鋼製リングで挟み，上部リングとスチール架台の間をリバウンドしないように

クランプで固定した。写真1は供試体の設置状況である。

载荷は4種類の鋼球を所要の高さに設置したマグネットホルダーに吸着させ、電源を切ることによって自由落下させて行った。また弾性範囲の実験では、それぞれの鋼球の高さを変化させ、エネルギーが同一になるようにして落下させた。一方、計測項目は、円周方向のひずみおよび放射方向のひずみを供試体裏面で測定し、また、衝撃荷重および鉛直方向の加速度を測定するため、ロードセルおよび加速度計を供試体表面の所定の位置に設置した。計測用のセンサーの配置を図2に示す。なお、ロードセルの表面にゴム(厚さ2mm)を添付した実験と、直接鋼球を

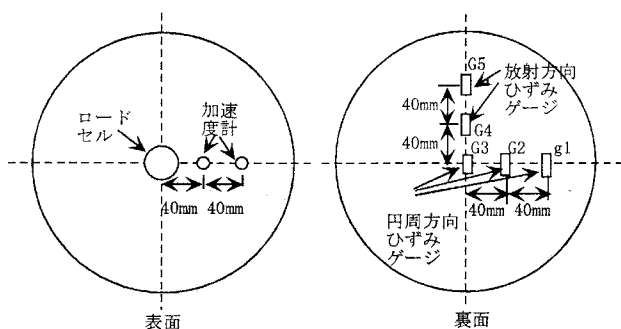


図2 計測センサーの配置

ロードセルに衝突させる実験を行った。

一方、破壊実験は直径76mmの鋼球(質量1806g)を用いて高さ500mm, 1000mm, 1900mmの3種類のエネルギーを変化させて実験した。この際は、ロードセル、加速度計は測定せず、裏面中央の変位を測定した。変位の測定はレーザ式変位計によって非接触で行った。表1は測定した計測器の諸元である。

表1 計測器の諸元

計測項目	計測器名	性能	メーカー
ロードセル	PCB200C20	最大荷重：133kN, 応答周波数：40kHz	PCB
加速度計	PCB353B17	最大加速度：500G 応答周波数：40kHz	PCB
ひずみゲージ	KFG-2-120-CI	ゲージ長2mm	共和電業
ひずみ計：シグナルコンディショナ	CDV-7000A	応答周波数：DC-500kHz	共和電業

計測項目	計測器名	性能	メーカー
記録装置：デジタルレコーダ	DR-M3	サンプリング周波数：50kHz 8ch	TEAC
レーザ変位計	LB-02/ LB-62	測定範囲：20mm 応答周波数：2kHz	KEYENCE

2.2 弾性範囲実験の結果

(1) ゴムの有無によるコンクリート版の応答の相違

鋼球を直接ロードセルに衝突した場合とゴムを介して衝突した場合はその応答が大きく変化することはよく知られている。当然のことながら、鋼球とロードセルが完全剛体であるとし、衝突することによって、速度が瞬時にゼロになったとすると負の無限大の加速度が発生し、荷重は無限大になる。したがって、ゴムを貼り付けることによって、加速度が小さくなり、荷重も小さくなる。図3は直径50mmの鋼球を高さ45mmから厚さ20mm、強度24.5N/mm²のコンクリート版に衝突させた場合のゴムの有無によるロードセルの荷重を、図4はひずみ(G3)時間履歴を示したものである。

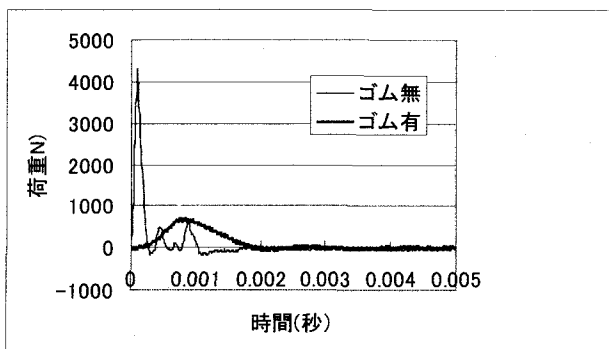


図3 ゴムの有無による衝撃荷重の相違

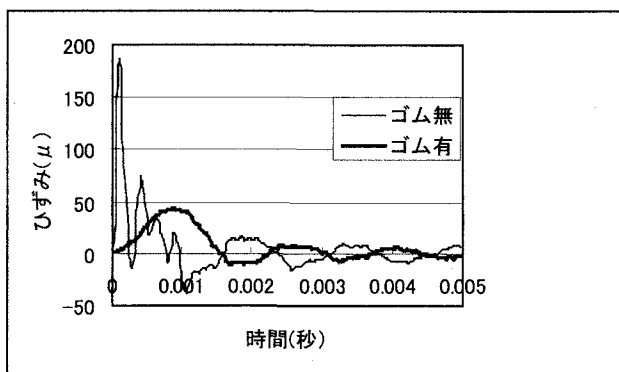


図4 ゴムの有無によるひずみ(G3)の相違

これらの図から、ゴムのない場合の荷重は極めて速い立ち上がりとなり、その大きさはゴムのある場合に比較して数倍にもなり、高周波成分が含まれることが明らかである。ひずみも同様に速い立ち上がりを示し、過渡振動を示した後、定常振動が現れていることが分かる。一方、ゴムを貼り付けると荷重もひずみも緩やかに上昇し、その最大値も数分の一程度になる。

このように、衝撃荷重は緩衝材料を挿入することによって、非常に小さくすることができる。

図5はゴムのない場合のひずみの初期の時間履歴を示したものである。図から分かるようにG1およびG2のひずみは当初マイナスすなわち圧縮ひずみが卓越し、その後引張ひずみに転じている。これは

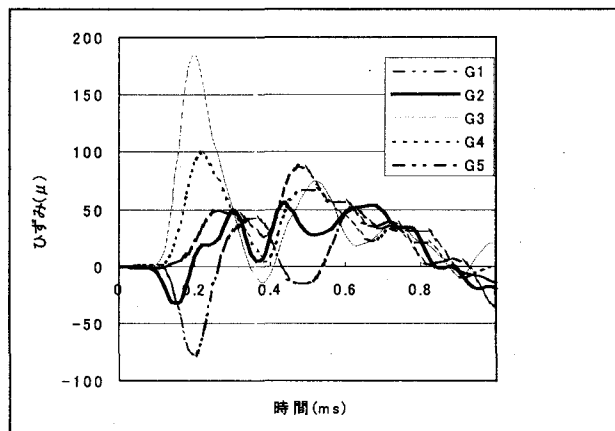


図5 衝突初期のひずみ時間履歴

放射方向のひずみが当初圧縮となり、円周方向ひずみは当初から引張ひずみが生じていることを示している。この傾向は、後述する解析でも現れる。したがって、クラックが生じる場合は円周方向の引っ張りすなわち放射方向に発生することが推定できる。しかし、ゴムを付けた場合は、G1のみが当初から引張ひずみになっている。

(2) 同一エネルギーによる応答特性

図6は衝突速度とひずみの最大値との関係を示したものである。すなわち、質量×高さを一定として速度を与えた実験結果であるが、傾向としてはやや速度が大きくなるとひずみは小さくなるようであるが、ほとんど明確な傾向ではない。若干ひずみ速度効果が現れているともいえるがこの範囲では一定であるといえる。すなわち、エネルギーが一定であればひずみの最大値はほとんど変化がないといえる。

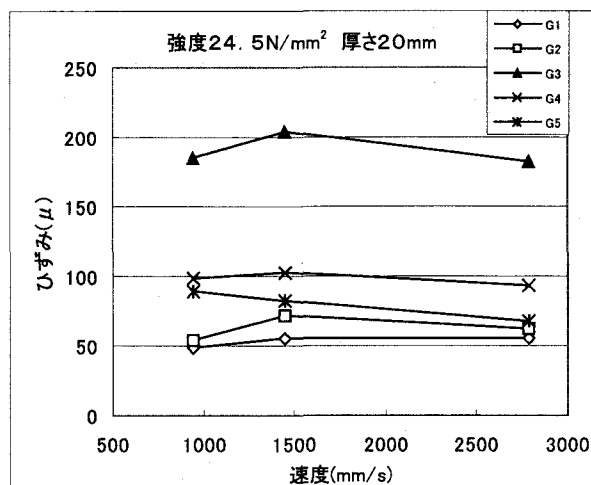


図6 速度による最大ひずみの変化

2.3 破壊実験結果

破壊実験は直径76mmの鋼球を自由落下させて実施したが、ここではコンクリート版の裏面中央の変位を主として計測した。

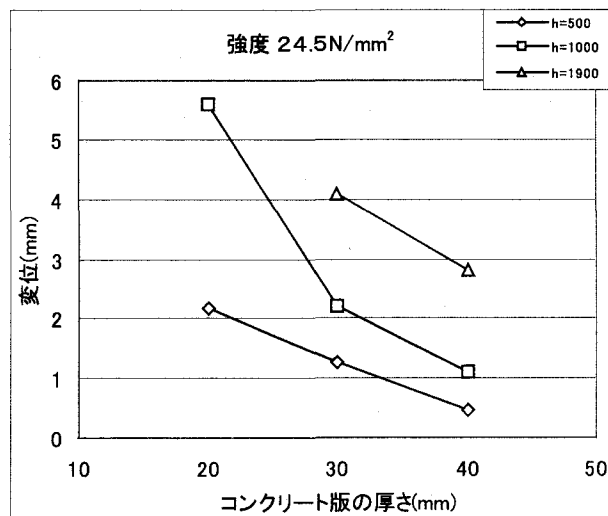


図7 コンクリート厚さと最大変位の関係

図7はコンクリート厚さと最大変位の関係を示す。厚さ20mmの場合は後述するように裏面剥離が発生したため、データは除いている。当然ながら厚くなれば最大変位は小さくなる。また、強度が大きくなれば、最大変位も小さくなるが、強度が倍になっているが、変位の減少量は約30%程度であり、コンクリートに飛翔体が衝突した場合の裏面剥離限界厚や貫通限界厚が強度の平方根に反比例することとよく似た傾向が示されている。

写真1は裏面剥離したコンクリート版の裏面の状態である。厚さ20mmのコンクリート版で高さ1900mmから1.8kgの鋼球を落下させた場合は裏面剥離が生

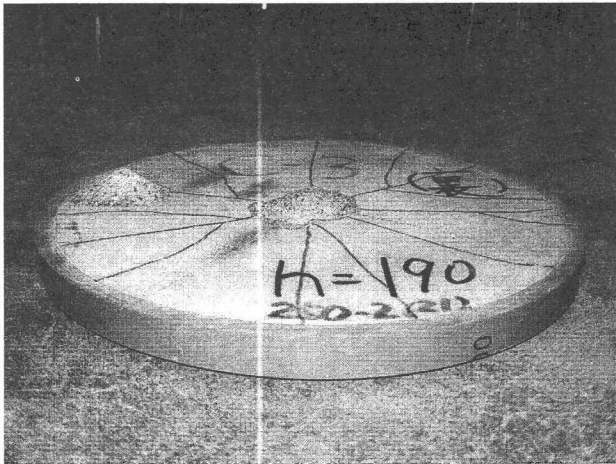


写真1 裏面剥離したコンクリート版

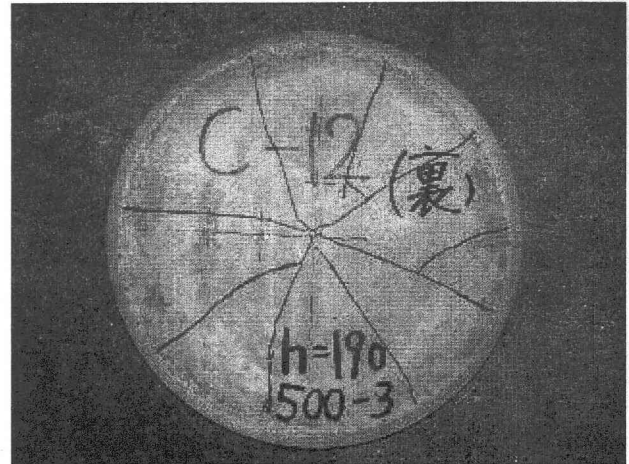


写真2 裏面クラックの発生状況の例

じた。電力中央研究所の裏面剥離評価式³⁾を用いて裏面剥離限界厚差を求めると強度 24.5 N/mm^2 では 3.35 cm 、強度 49 N/mm^2 では 2.54 cm となり、いずれも裏面剥離限界厚より薄いので裏面剥離が生じた。

裏面剥離が生じた場合の裏面のひずみはG1のひずみは圧縮ひずみであるが、G2すなわち裏面剥離が生じる近傍では、初期に圧縮ひずみが極短時間生じて急激に引張ひずみになり、ゲージが切れてしまう減少が観測された。

また、その他の破壊実験では、弾性範囲の実験でも示されたようにクラックはいずれも円周方向の引張ひずみによって生じるために放射線方向のクラック発生している。さらに、クラックの発生状況は、表面よりも裏面に多く生じ、強度が弱いほど、厚さが薄いほど、またエネルギーが多くなるほど多くのクラックが発生することが分かった。すなわち、エネルギーはコンクリートのクラックを発生させることによって吸収していると考えられる。

3. 数値解析

3.1 弾性実験との比較

数値解析を行うにあたり、境界条件を設定する必要がある。そのため、円盤の固有周期の理論値と実験結果とを比較して決定した。この結果、周辺固定と、単純支持の理論値の1次振動では、単純支持に近い値が得られたのでこれを用いることにした。また、弾性範囲の解析では、コンクリートの圧縮試験結果を用いて弾性係数およびポアソン比を用いている。

解析ソフトは、陽解析を用いているLD-DYNAを使用した。モデル化は弾性解析ではロードセル、ゴム版、鋼球、コンクリートのすべてをソリッド要素

とし、1/4モデルをモデル化した。

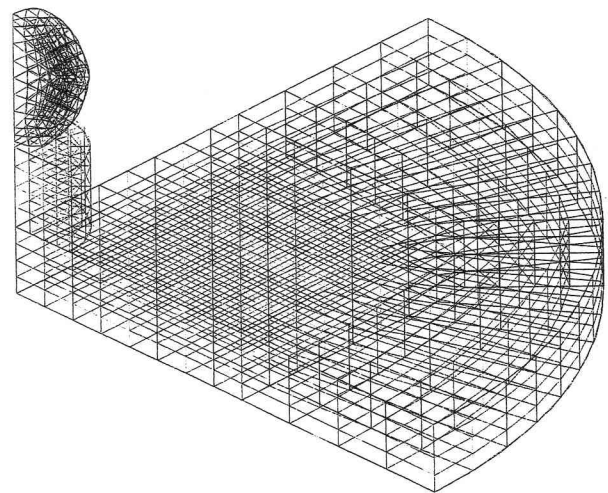


図7 1/4モデルのメッシュ分割図

外力は鋼球に初速度を与えて計算を実施した。

弾性計算の場合のコンクリートのヤング係数は $2.4 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比は 0.17 として計算した。

図8は裏面中央のひずみの時間履歴を計算ならびに実験結果を比較したものである。ゴムを付けることによってひずみの最大値は小さくなり、ゴムのないときに比較して高周波成分が少なくなる傾向は実験と計算とではよく一致していることが分かる。

これらの比較において、加速度については最大値および全体的な傾向は一致しているが、実験値の加速度記録はきわめて高い周波数成分が記録されている。これは今まで行われて実験でも同様のことが生じており、ローパスフィルターで処理した結果を用いた方が適切かもしれない。本実験ではそのまま記

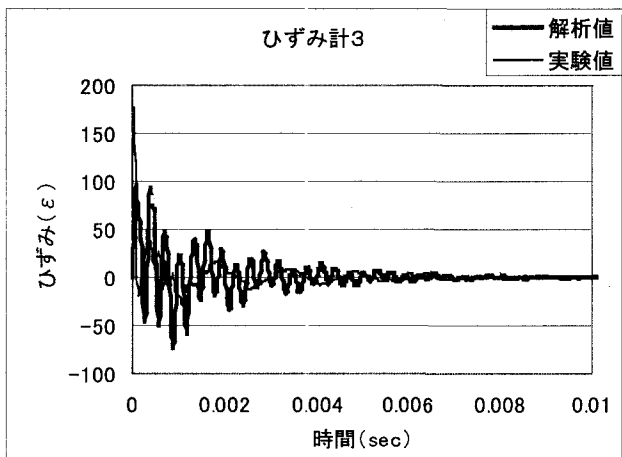
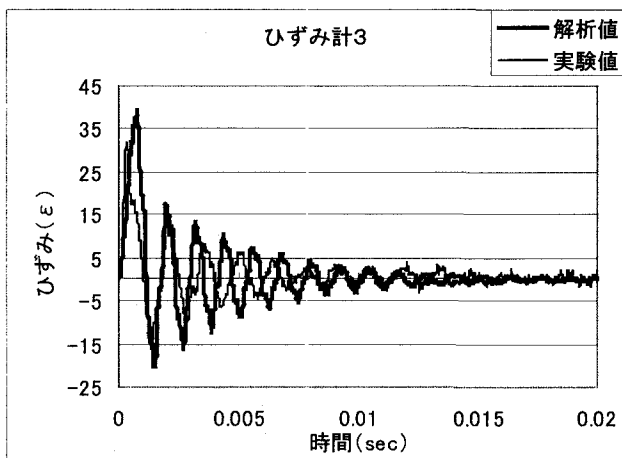


図8 裏面中央のひずみ時間履歴 上:ゴム付,下:
ゴム無, 強度 24.5N/mm², 厚さ 20mm, 鋼球径: 25mm

録されたデータを比較した。

また、ロードセルに記録された衝撃荷重を計算結果の値よりかなり大きな値となっており、ここでは適切な接触問題の処理が必要と思われるが、今後の課題である。

3.2 破壊実験との比較

破壊実験を解析するには、コンクリートの非線形材料モデルを適切に選定する必要がある。

本実験に用いたコンクリートは山口と著者が以前実験に用いたものと同じコンクリートである⁴⁾。そこで、LS-DYNA に準備されている、材料モデルを使用する(SOIL_AND_FOAM)ために、降伏モデルを次のような手順で決定した。このモデルは降伏関数はDrucker-Prager の降伏条件を用いている。そこで、著者らの行ったコンクリートの3軸実験結果を用いて破壊基準を求めると次式で表せることが分かっている。

$$\tau_{oct} / F_c = \frac{f_1}{\exp(f_2 \sigma_{oct} / F_c)} + f_3 \quad \text{---(1)}$$

これは、上に凸の曲線であるが直線近似して Drucker-Prager の降伏条件(式(2))にフィットさせて求めた。

$$\sqrt{J_2} + \alpha I_1 - k = 0 \quad \text{---(2)}$$

$\alpha = 0.258, k = 0.404 F_c$, F_c :コンクリートの降伏応力

また、引張に伴うテンションカットオフ値は圧縮強度の1/10とした。なお、コンクリートの降伏応力は圧縮強度の1/3として計算した。また、静水圧成分と体積ひずみの関係も著者らの実験結果を用いており、こうしてコンクリートの構成則を求めた。

また、このモデルに必要な、体積弾性係数およびせん断弾性係数は以下のとおりとした。

$$K = 1.050 \times 10^4 \text{ N/mm}^2, G = 0.990 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$$

解析モデルは弾性解析とは異なり、ロードセルおよびゴム板を取り除き、鋼球を直接コンクリート版に衝突させたので、図に示すようにすべてソリッド要素として、鋼球には初速度を与えた。図9は解析モデルを示す。

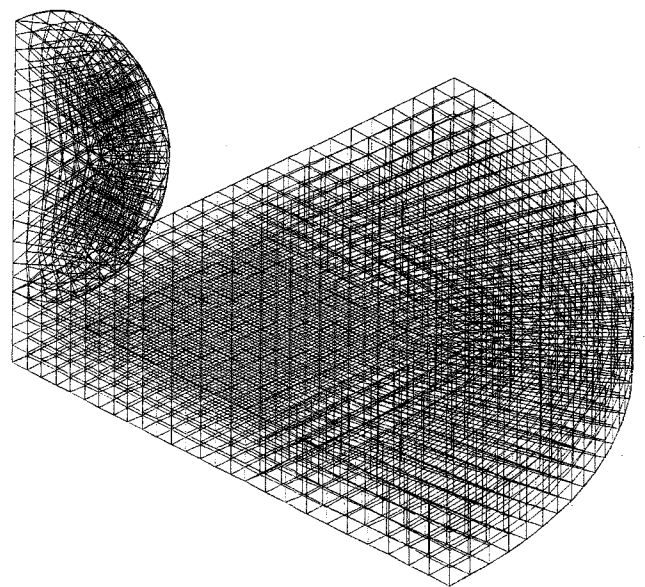


図9 破壊実験解析モデル

破壊解析においては、できるだけ精密にモデル化することが必要と考え弾性解析よりメッシュ分割を細かくしたが、ここではメッシュ分割の分割数と解析精度については検討していない。解析は、高さコンクリート版の厚さの異なるものについてそれぞれ実施した。

図10は、強度 24N/mm^2 、厚さ 2cm のコンクリート版に対して上から、高さ 50cm 、および 100cm 、一番下は厚さ 4cm のコンクリート版に高さ 190cm から直径 76mm (重さ 1.806kg) の鋼球を衝突した場合の裏面中央の変位を実験結果と解析結果とを比較したものである。図の中央は変位が比較的大きいものであるが、この場合は、解析結果が実験結果より小さくなっている。一方、上と下の図では逆になっていることが分かる。また、下の図で実験結果において変位が下がりかけて、また大きくなる場所があるが、これは実験上のノイズと思われる。しかしながら、いずれも時間経過の傾向はよく一致しているといえる。LS-DYNA による計算の場合、衝突点の接触問題の取り扱いや、ソリッドモデルの積分点の用い方、解析用材料モデルの選定等多くの経験を必要とするが、計算中のエネルギーのチェックが可能であり、異常なエネルギーが生じなければ、正常に計算できていることが判断される。したがって、エネルギーチェックをしながら計算する必要がある。

4. おわりに

本研究の結論をまとめると以下のとおりである。

- (1) 弾性範囲の実験においてゴムを挟んで間接的に鋼球を衝突させた場合と直接鋼球を衝突させた場合では大きく応答に差が生じ、直接衝突させると、高周波成分が含まれ、立ち上がりも鋭く、ひずみ等の大きさも極めて大きくなる。
- (2) 鋼球の高さと重さを変化させた弾性実験から、同一エネルギーであれば、応答ひずみはほとんど変わらない。
- (3) 破壊実験において、厚さ 2cm のコンクリート版に高さ 190cm 、質量 1.806kg の鋼球を衝突させると裏面剥離が発生したが、これは電中研の裏面剥離評価式による値とほぼ一致した。
- (4) 弾性範囲における LS-DYNA による数値解析では、ゴム付ゴム無のいずれの場合も応答ひずみはよく一致した。
- (5) 破壊実験と数値解析結果との比較においては若干計算と実験では大きさに差が生じたが、時間の傾向等は比較的一致しているといえる。

謝辞：本研究において実験については本学大学院の金子智彦君および小川哲史君から多くの協力を得ていることに感謝します。

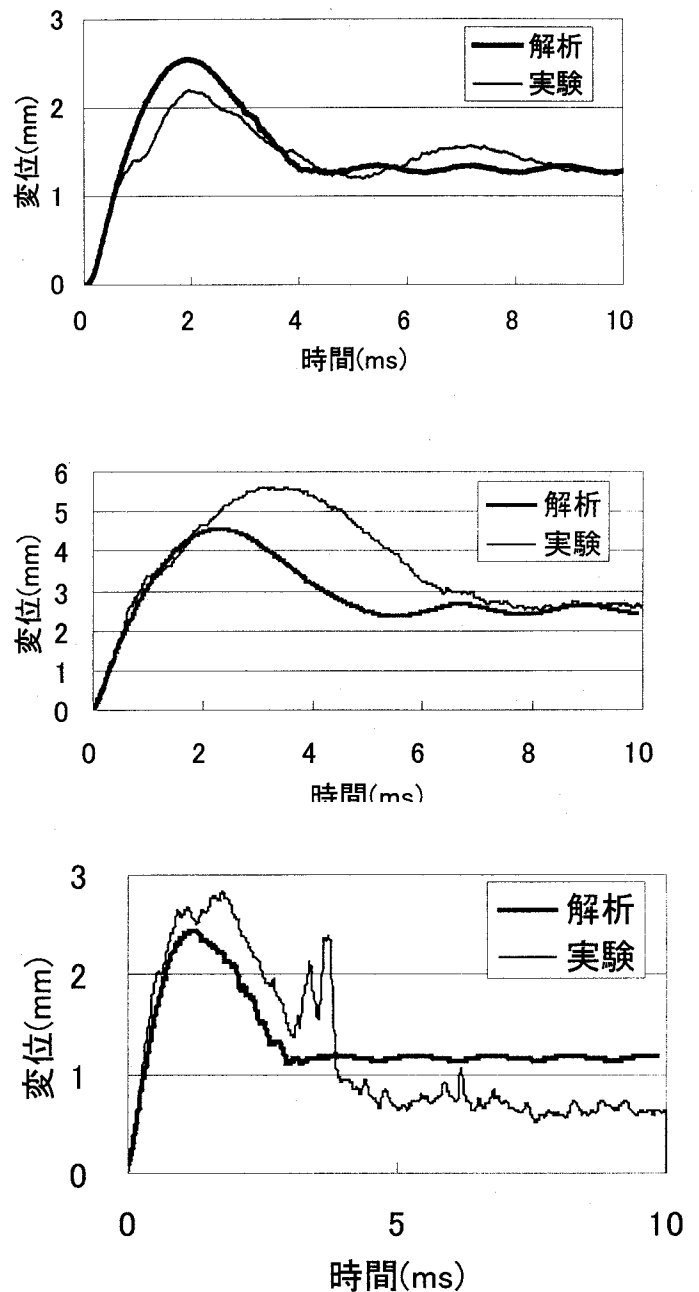


図10 裏面中央変位の実験と解析結果の比較

参考文献

- 1) 山口弘, 藤本一男: 鉄筋コンクリート版の衝撃応答に及ぼすひずみ速度効果, 建築学会論文集, 第406号, pp. 25-35, 89年12月
- 2) 安藤智啓: 曲げ破壊型 RC 梁の耐衝撃設計手法の開発に関する研究, 室工大学位論文, 01年3月
- 3) 土木学会: 構造物の衝撃挙動と設計法, pp. 279
- 4) 山口弘, 藤本一男, 野村設郎: 高圧3軸圧縮応力下におけるコンクリートの応力ひずみ関係, 建築学会論文集, 第389号, pp. 99-108, 88年7月