

(株)大林組 正員 ○井元 勝慶  
防衛大学校 正員 大野 友則

### 1. まえがき

衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート (RC) 部材の挙動の把握と応答解析法の改善を目的として、まず、筆者らはRCはり部材の重錘落下衝撃実験の実施と応答解析法に関する検討を行った<sup>1)</sup>。その結果、低速衝撃問題の場合には、提案した応答解析法はかなり有効であることが認められた。本研究は、文献1) で提案した材料構成則モデルを有限要素法による解析コード J-DYNA に導入して、柔飛来物の高速衝突を受けるRC板<sup>2)</sup>の衝撃応答解析を実施し、高速衝撃問題に対する本解析法の適用性を検討した結果について述べる。

### 2. 解析法の概要

RC構造物の衝撃問題に有効と思われる既存解析コードにおいて、鋼とコンクリートの材料構成則モデルに歪速度依存性を考慮したものは非常に少ない。本解析法は解析コード J-DYNA に材料構成則モデルを導入したもので、この構成則モデルの特徴は、3軸応力下のコンクリートに対して、応力と歪の関係、破壊曲面の設定、1軸圧縮強度および1軸引張強度の歪速度依存性、ひび割れと圧縮破壊後の挙動等のモデル化を行っている。また鋼材に対しては、歪速度依存性を考慮した等方弾塑性モデル、応力-歪関係はバイリニア型としたものである。

### 3. 解析モデルと条件

解析条件は実験<sup>2)</sup>と同一とし、コンクリート板厚が10cm、大きさが縦60×横60cmの1枚の吊り下げたRC板(図-1)にステンレス製の柔飛来物(図-2)を速度 $V_0 = 170\text{m/s}$ で直接衝突させる。

解析モデルは、図-3に示すように、飛来物の頭部、胴体部、尾部に3次元ソリッド要素、コンクリート部にソリッド要素、鉄筋位置に直交異方性のシェル要素を用いて試験体と飛来物の1/4部分をモデル化した。また、RC板と飛来物の頭部、胴体部および尾部間にそれぞれスライドインターフェイス要素を挿入している。

コンクリートと鋼材の静的材料特性を表-1に示す。なお、これらすべての材料には歪速度依存性を考慮した構成則を用いている。

### 3. 解析結果の考察

図-4に、時刻 $T = 0.59\text{msec}$ における試験体と飛来物の変形および速度分布図(コンター図)を示す。この図では、衝突部近傍のコンクリートの変形と、飛来物胴体部の変形状がよく理解できる。特に胴体部先端は頭部から外れてコンクリート

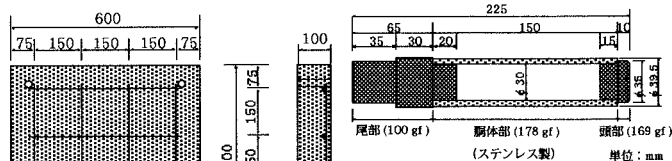


図-2 飛来物の形状

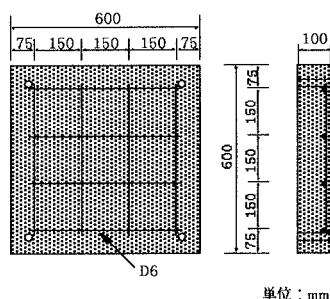


図-1 RC試験体の寸法・配筋

表-1 解析に用いた材料の静的諸定数

|      | 材料              | 定数     |                              |
|------|-----------------|--------|------------------------------|
|      |                 | 弾性係数   | $E_c$                        |
| 被衝突体 | コンクリート          | 1軸圧縮強度 | $f_c$ 240                    |
|      |                 | 1軸引張強度 | $f_t$ 22.3                   |
|      |                 | ポアソン比  | $\nu$ 0.167                  |
|      |                 | 弾性係数   | $E_c$ $2.67 \times 10^5$     |
| 飛来物  | 頭部<br>(SS41相当)  | 降伏強度   | $\sigma_y$ $2.4 \times 10^3$ |
|      |                 | ポアソン比  | $\nu$ 0.3                    |
|      | 胴体部<br>(ステンレス鋼) | 弾性係数   | $E_s$ $1.97 \times 10^6$     |
|      |                 | 降伏強度   | $\sigma_y$ $5.1 \times 10^3$ |
|      |                 | ポアソン比  | $\nu$ 0.3                    |

単位: mm

(kgf/cm<sup>2</sup>)

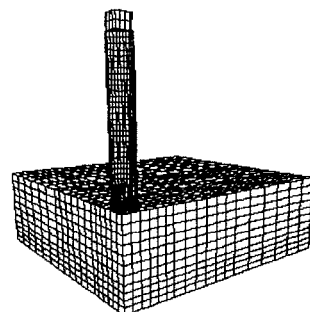


図-3 解析用要素分割

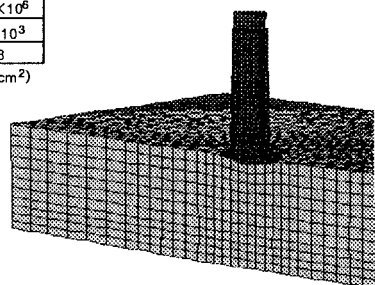


図-4 変形状と速度分布 ( $T = 0.59 \text{ msec}$ )

部へ接触し、大きく座屈している様子が観察できる。また、同図の黒い部分は時刻  $T = 0.59\text{msec}$  で、速度が図面上方に向かっていることを示している。すなわち、コンクリート隅角部の一部と胴体部と尾部は反発し上部へ速度となっていることから、この時刻では衝撃現象は終了し、この後はコンクリート内部の慣性による挙動が卓越することが推定できる。

図-5に、時刻  $T = 0.42\text{msec}$  の平均応力度 ( $\sigma_m$ ) 分布を示す。この図は、 $\sigma_m$  が下面で反射した直後の状態を示したもので、濃い部分の密度が大きいことを示している。この図では、いわゆる応力波の伝播・反射・重複の特徴が現われており、図-6に示したコンクリートの表面破壊および裏面剥離の現象を説明することができる。

コンクリート部材の裏面に対称軸上にある測定位置 (G1、G2、G3、G4) の加速度応答結果を図-7に示す。解析による加速度応答は、周波数領域  $10\text{kHz}$  のローパスフィルターで処理したもので、同図のマイナス方向が飛来物の衝突方向を示している。また同図に最大加速度応答の実験値と解析値の比較を併せて示す。この図の解析結果によれば、飛来物が衝突した直後の応答には、時刻が  $0.2\text{msec}$  までの第1波が最大応答となり、それ以後急速に減衰する傾向が認められる。また最大加速度応答値は、部材中央点から離れるにつれて急速に小さくなっている。これらの現象は、実験値の性状と同じ傾向であることが認められる<sup>2)</sup>。従って、実験でも推定されたように、高速飛来物の衝突を受けるRC部材では局部応答性状が卓越すると考えてよい。

頭部と尾部およびコンクリート板中央部における速度応答波形を比較して、図-8に示す。頭部は衝突後急激に速度が減少する。一方、尾部は胴体部が塑性変形や座屈等を生じながら変形するため、減速は比較的緩やかであり、 $T = 0.52\text{msec}$  で速度がゼロになっている。またコンクリート中央部の速度は、 $T = 0.06\text{msec}$  時に最大値 ( $V_c \approx 24.4\text{m/s}$ ) となるが、それ以後はほぼ一定の低い値 ( $V_c \approx 1.0\text{m/s}$ ) を示している。

## 5. まとめ

高速衝突を受けるRC板の解析から、柔飛来物およびコンクリート各部の応力波伝播、加速度応答、速度応答、変形応答などの詳細な挙動が得られた。特に、最大加速度応答に関しては実験値との相関はかなり良好であった。従って、ここで取り扱った高速衝撃現象に対しても衝撃解析コード J-DYNA に材料の歪速度依存性を考慮した構成則を導入することによりRC板の挙動を解析することが可能である。

## 参考文献

- 1) 井元、大野、佐々木、小暮、“重錘落下衝突を受けるRCはり部材の衝撃挙動を衝撃応答解析における材料の非線形特性”、構造工学論文集、Vol.41A、pp.1201-1212、1995年4月
- 2) 北川、大野、内田、井元、“高速飛来物を受ける2重RC板の局部損傷と耐衝撃性”、構造工学論文集、Vol.39A、pp.1609-1619、1993年3月

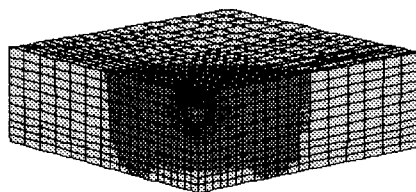
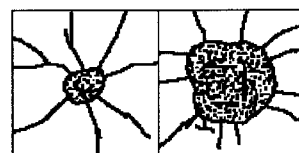


図-5 平均応力度分布 ( $T = 0.42\text{ msec}$ )



前面 裏面

図-6 試験体の局部破壊(実験)

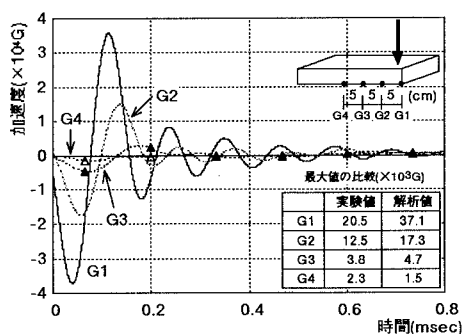


図-7 裏面各点の加速度応答の比較

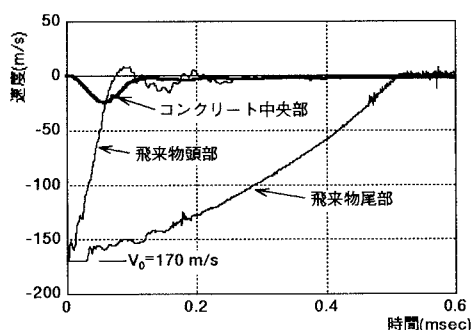


図-8 飛来物とコンクリート中央部の速度応答の比較