

I-39 衝突衝撃荷重に対するRC矩形板の衝撃応答解析

室蘭工業大学 正 員 岸 徳光

室蘭工業大学 正 員 松岡 健一

日本大学 正 員 能町 純雄

開発土木研究所 正 員 本名 一夫

1. はじめに

各種衝突衝撃荷重載荷による構造物の応答解析は圧壊も含めた塑性状態を伴うために、通常有限差分あるいは有限要素法に基づいた汎用の解析コードを用いて行なわれている。しかしながら、これらの解析コードは取り扱いにかなりの経験を必要とするため精密な解析が要求される場合や、極端なパーフォレーションやペネトレーション、スキッピングを生ずるような載荷状態以外には不向きであり、応力波の伝播特性を含めた概略的な構造物の動的応答性状を把握することを目的とする場合は弾性衝撃応答問題として処理する方がより合理的であるものと考えられる。

著者等は先に有限プリズム要素法を用いたRC部材の位相速度分散曲線に関する検討を行ない¹⁾、解析波長に対して一要素の最大大きさに限界があるものの有限プリズム要素法を用いて波動伝播現象が解析可能であり、また鉄筋部はその面積が等しい簡略な要素にモデル化しても位相速度分散特性には影響を与えないこと等を明らかにすることができた。

本論文では、これらの結果を基礎にして異種部材から成る構造部材や梁の奥行方向の挙動の解析、覆工屋根構造のようなクッション材としての載砂材等も構造要素として組み込むことが可能な有限プリズム要素法を用いた衝撃応答解析式の定式化を行ない、数値解析として解析プログラムの妥当性の検討もかね電力中央研究所で行なわれた落下衝撃実験²⁾と同一の矩形板について行ない実験結果および他の解析手法としての有限帯板法³⁾による解析結果との比較検討を行なった。

2. 解析理論

ここでは、断面方向にアイソパラメトリック四辺形要素を用いて定式化している。全体座標系をx-y-zとし任意のi節点の節点力を (f_{xi}, f_{yi}, f_{zi}) 、節点変位を (d_{xi}, d_{yi}, d_{zi}) ($i=1, 2, 3, 4$)とし、要素内の変位は全体座標系に対応して u, v, w とする。プリズム断面内の座標、各変位は断面図心軸を原点とする要素局所座標として $\xi-\eta$ 座標を仮定し、式(3)のようなアイソパラメーターを用いると次のように示すことができる。

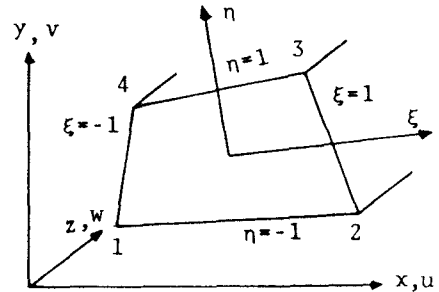


図-1. 任意四辺形プリズム要素番号

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \{N\}^T \\ \{N\}^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{x_i\} \\ \{y_i\} \end{Bmatrix} \quad \dots (1)$$

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \{N\}^T \\ \{N\}^T \\ \{N\}^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{d_{xi}\} \\ \{d_{yi}\} \\ \{d_{zi}\} \end{Bmatrix} \quad \dots (2)$$

$$\text{但し、} \quad \{N\} = \begin{bmatrix} (1-\xi)(1-\eta) & (1+\xi)(1-\eta) & (1+\xi)(1+\eta) & (1-\xi)(1+\eta) \end{bmatrix}^T \quad \dots (3)$$

ここで、変位 u, v に関してはsine, w に関してはcosineの有限Fourier変換を施すと、歪、応力に関しても同様の像関数を求めることができる。三次元弾性論に従って整理すると歪と変位、応力と歪の像関数に関する関係式は $[B], [D]$ マトリックスを用いると

$$\{\bar{S}m[\varepsilon]\} = [B] \{\bar{S}m[d]\}, \quad \{\bar{S}m[\sigma]\} = [D][B] \{\bar{S}m[d]\} \quad \dots (4, 5)$$

但し、

$$\{\bar{S}m[\varepsilon]\} = [S m[\varepsilon x] \ S m[\varepsilon y] \ C m[\varepsilon z] \ S m[\tau xy] \ S m[\tau yz] \ C m[\tau zx]]^T \quad \dots (6)$$

$$\{\bar{S}m[\sigma]\} = [S m[\sigma x] \ S m[\sigma y] \ C m[\sigma z] \ S m[\tau xy] \ S m[\tau yz] \ C m[\tau zx]]^T \quad \dots (7)$$

$$\{\bar{S}m[d]\} = [S m[ui] \ S m[vi] \ C m[wi]]^T \quad \dots (8)$$

である。

要素のつりあい式は慣性力を考慮し、仮想仕事の原理より求めることができる。いま $\{\bar{S}m[f]\}$ を節点力ベクトルの像関数とすると、次のような一要素に関する剛性方程式が得られる。

$$[M] \{\ddot{\bar{S}m[d]}\} + [K] \{\bar{S}m[d]\} = \{\bar{S}m[f]\} \quad \dots (9)$$

式(9)を構造体を構成している各要素に適用して、全体の剛性方程式を求める。ここではモード法を用いて解析を行なっているために、まず、荷重項を零として固有値、固有ベクトルを求める。基準関数 $\{\bar{S}m[\phi]\}$ を導入し、モードの直交関係を考慮してFourier級数の項数 m としたときの第 r 次の固有値を ω_{mr} とすると次のような一次元の運動方程式が求まる。すなわち

$$\bar{S}m[\ddot{\phi}_{mr}] + 2h_{mr}\omega_{mr}\bar{S}m[\dot{\phi}_{mr}] + \omega_{mr}^2 \bar{S}m[\phi_{mr}] = \{\bar{S}m[X_{mr}]\}^T \{\bar{S}m[Fst]\} / \bar{S}m[M_{mr}] \quad \dots (10)$$

ここで、 $\{X_{mr}\}$ はFourier級数第 m 項目の第 r 次固有振動モードであり、 $\{S m[Fst]\}$ は構造全体の荷重項ベクトルである。また、

$$\bar{S}m[M_{mr}] = \{\bar{S}m[X_{mr}]\}^T [Mst] \{\bar{S}m[X_{mr}]\} \quad \dots (11)$$

式(10)をDuhamel積分することにより $\bar{S}m[\phi_{mr}]$ が求まる。この操作を考慮している全固有値について行ない第 m 次のFourier項に関する変位あるいは加速度の像関数を求める。応力の像関数に関しては要素剛性マトリックスに代入することにより容易に求めることができる。真の変位、加速度、応力はFourier級数の m 次までの各像関数について逆変換することによって求めることができる。

なお、本論文では荷重項を時間方向に折れ線近似し、直接Duhamel積分を閉じた式に整理している。

3. 数値解析

数値解析は解析プログラムの妥当性を確認することを目的に、電力中央研究所で行なわれたRC矩形板の重錘落下衝撃実験のデータを参考に行なった。参考とした実験データは、重錘が直径10cm、約70Kg重で落下高さ1mの場合であり、幅115.0cm、板厚10cm、鉄筋比が約1%の複鉄筋四辺単純支持の正方形矩形板である。

図-2にRC矩形板のメッシュ図を示している。電子計算機の容量により本解析では総節点数117、総要素数96としている。実験では載荷面が円形となっているため解析においては等面積の正方形分布と仮定している。図-3には実験結果をもとにして作成された入力波形の時間方向分布図である。

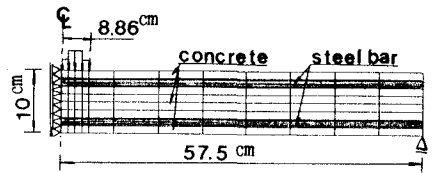


図-2 解析用メッシュ図

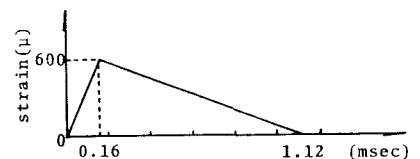


図-3 入力波形分布図

3.1 精度の検討 —固有値の数—

本解析では精度的な検討としてFourier変換の項数と、考慮する固有値の数に関するものがある。ここでは、Fourier級数の項数を31項に限定し、主に固有値の数による応答値の精度について検討を行なった。図-4(a)には載荷点直下のコンクリート上面節点番号1 におけ上下方向変位 dy についての収斂状況を示している。衝撃初期には多少収斂の状況が悪いようであるが、 $t=1.2\text{msec}$ と時間の経過とともに固有値の数が5個程度でも十分

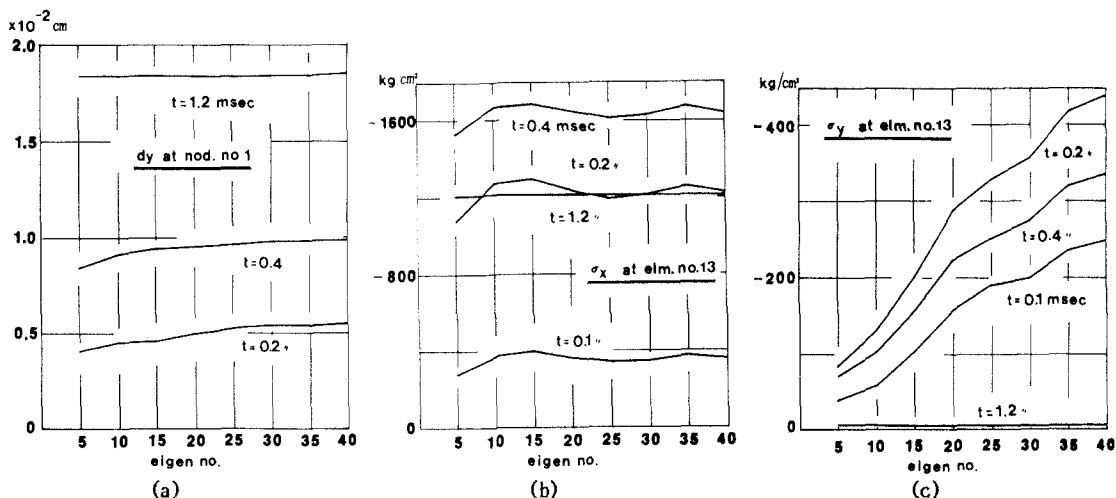


図-4. 載荷点直下の節点あるいは要素における応答値の収斂状況

収斂しているようである。また、図-4(b), (c)には載荷点直下圧縮鉄筋(要素番号13)の σ_x , σ_y についての収斂状況を示している。 σ_x に関しては考慮する固有値の数によって減衰周期関数的な分布を示しているようである。一方 σ_y に関しては、載荷終了後においては低次の固有値のみでも十分収斂しているようであるが、載荷状態時には固有値の数が40の状態でも依然増加傾向のようである。

以上より、衝撃初期の載荷点直下における σ_y の応答値を除いて、ここで検討している固有値の範囲内では収斂しているものと考えられる。ここでは固有値の数を35個まで考慮して以後の解析を行なっている。

3.2 精度の検討 —実験結果との比較—

電力中央研究所で行なわれた実験結果および有限帯板要素法(F.S.M.)による解析結果との比較をスパン中央部の2点について行なった。図-5が比較図である。実験結果は要素番号80の σ_x については衝撃初期において2倍程度大きい値を示し、その後ドリフトしているような波形分布を示しており、また要素番号73の σ_z に関しては、1.5 msec~4.5 msecにおいて逆位相を示しているものの本解析結果とはほぼ類似の分布性状を示しているようである。有限帯板要素法との比較に関しても位相差が生じているものの同様の分布性状を示しているようである。以上より、分割数の数あるいは考慮する固有値の数、Fourier級数の項数に多少問題があるものの解析式や解析のアルゴリズムは妥当であるものと考えられる。

3.3 RC矩形板の動的応答性状

図-6にはスパン中央部における鉄筋要素の σ_x , σ_z の時間方向分布について示している。板中央部(要素番号

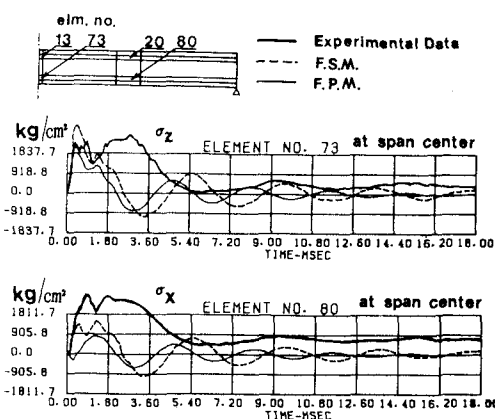


図-5. 実験およびF.S.M.による結果との比較図

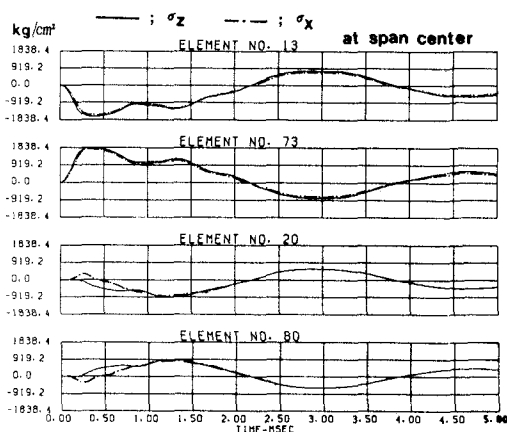


図-6. スパン中央部 σ_x , σ_z の応答波形分布

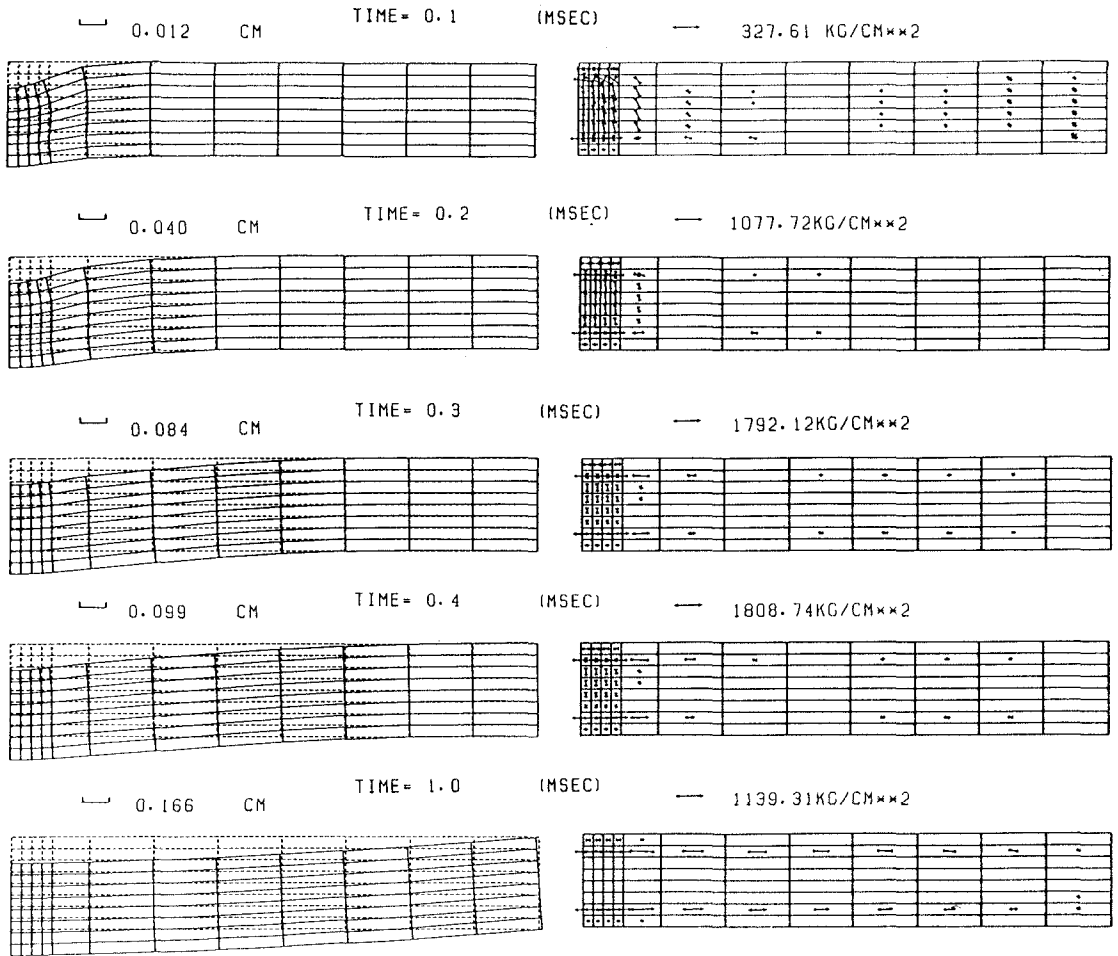


図-7. 各経過時間後におけるスパン中央部の応答変位, 主応力分布図

13,73) では約 20kg/cm^2 程度の差があるものの両者はほぼ同一の応答性状を示している。また、1/4点(要素番号20,80)においては σ_x が σ_z の立上がりよりも多少早くまた波形分布にも差が生じているが、1msec経過の後には両者まったく同一の分布性状を示しているようである。図-7には各時間経過後のスパン中央部断面の変形状態および主応力分布について示している。変形あるいは主応力の大きさは時間ごとに異なるように示されているが、 $t=0.1\text{msec}$ 時の載荷点近傍の局所的な変形状態から徐々に主波動が支持点方向に広がっていく様子を確認することができる。 $t=1.0\text{msec}$ の状態は板の最低次の振動状態を示しているとも考えられる。また主応力状態をみると、 $t=0.1\text{msec} \sim 0.4\text{msec}$ までの局所変形を起こしている部分から支持点方向に離れた点では局所変形部分の応力状態と板厚方向に逆の応力状態になっているようである。この状態は局所変形部分がその近傍で固定支持されているような状態になっていることを示しているものと考えられる。

4. おわりに

RC構造のような異種材料からなる構造部材や梁の奥行方向の挙動あるいは覆工屋根構造等のような敷砂材も考慮した構造全体の衝撃応答解析を可能にするために、有限プリズム要素法を用いた解析プログラムを作成した。RC矩形板についての解析を行ない実験結果や他理論との比較検討を行なった。検討結果、本解析手法は構造物の概略的な衝撃応答性状を把握することが可能であり、工学的に十分応用可能であるものと考えられる。

5. 参考文献 1) 天沼宇雄他 土北支論 Vol.44, 2) 大沼博志 学位論文, 3) 岸徳光他 構工論 Vol.33A