

RC版の衝撃破壊挙動解析へのCGの適用に関する研究

Application of Computer Graphics to Impact Failure Simulation of Reinforced Concrete Slabs

中村秀明* 宮本文穂** 松本 剛***

Hideaki NAKAMURA, Ayaho MIYAMOTO and Tsuyoshi MATSUMOTO

*博士(工学) 山口大学助教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2557)

**工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2557)

***修士(工学) 日本電信電話株式会社 (〒730-8502 広島市中区基町 6-77)

In this paper, a 3-D nonlinear dynamic FEM analysis was applied to evaluate the ultimate behaviors and failure modes of reinforced concrete slabs under soft impact loads. And also, in order to propose a practical impact resistance evaluation method for RC slab structures, the computer graphics(CG) was used as a visualization technique to simulate the impact failure behaviors on RC slabs until post failure range based on the analytical results during impact loading. The results give that it shows complicated failure modes effectively.

Key Words: soft impact load, reinforced concrete slab, 3-D nonlinear dynamic FEM, failure mode, visualization, computer graphics(CG)

1. まえがき

衝撃問題が想定されるコンクリート構造物の設計には、外力に衝撃荷重を考慮する必要があるが、従来衝撃荷重は活荷重の1つと考えられ、静的荷重に置換した荷重を設計衝撃荷重とすることが多かった。しかしながら、実際の衝撃では、衝撃荷重初期の高次振動の卓越や破壊モードの変化、あるいは裏面剥離など衝撃現象特有の破壊現象があらわれ、静的荷重に置換する設計法では適切に対処できないと考えられる。これら衝撃問題に関する研究は、従来から多くの研究機関で行われてきたが、実験的検討が主流であり、耐衝撃性の明確な定義とその評価法が確立されていないため、力学的挙動特性を把握することが困難であった。また、近年のコンピュータの発達により、有限要素法や個別要素法による衝撃問題の数値解析が盛んに行われるようになったが、これらの解析法による数値やグラフ等で示される解析結果からのみでは、コンクリート構造物の破壊モードの時間的変化等の衝撃挙動を正確に捉えることは非常に困難であると思われる。

本研究ではこのような現状をふまえ、有限要素法によるRC版の衝撃挙動解析を行い、その解析結果にコンピュータグラフィックス(以下CG)を適用することにより、衝撃挙動の時間的変化の把握を試みた。解析法としては、積層化非線形有限要素解析および8節点アイソパラメトリック6面体要素を用いた3次元有限要素解析法を用いる。衝撃挙動の視覚化の手法としては、両解析手法による解析結果を用いてRC版の変形状態および破壊状態を3次元的に視覚化できるような手法を開発した。さらに、その手法を用いて時間ステップごとに作成されたCG

を連続的に表示することにより、RC版の変形状態および断面内応力分布の時間的変化の視覚化を試みた。

2. 衝撃破壊挙動解析

2.1 RC版の概要

本解析で対象とするRC版は、図-1に示されるような縦横132cm、厚さ13cm、スパン長120cmの2辺単純支持の複鉄筋コンクリート版である。解析に用いるコンクリート版は、コンクリートに普通コンクリート(圧縮強度 32.4N/mm^2 、引張強度 2.38N/mm^2)を用い、補強筋として普通鉄筋を組み合わせている。普通鉄筋はSD345(ヤング係数 $2.06 \times 10^5 \text{N/mm}^2$)を用いている。補強筋はD13を用い、コンクリート版の上部と下部に主筋方向と配力筋方向に配置している。主筋方向の補強筋は、コンクリート版上面の上縁から補強筋重心までの距離が2.05cmのところと24.6cm間隔で6本、10.95cmのところと11.2cm間隔で12本配置されており、また、配力筋方向の補強筋は、コンクリート版上面の上縁から補強筋重心までの距離が3.32cmのところと30.8cm間隔で5本、9.68cmのところと15.4cm間隔で9本配置されている。また、衝撃荷重は図-1のパッチで示したコンクリート版の中央に等分布荷重として作用させた。

2.2 積層化非線形有限要素解析法^{1),2)}

積層化非線形有限要素解析法は、コンクリート版を版厚方向に分割した各層に薄板の有限要素法³⁾を適用し、積層化手法を用いることにより弾塑性解析を可能にした手法である。積層化非線形有限要素法における仮定を以下に示す。

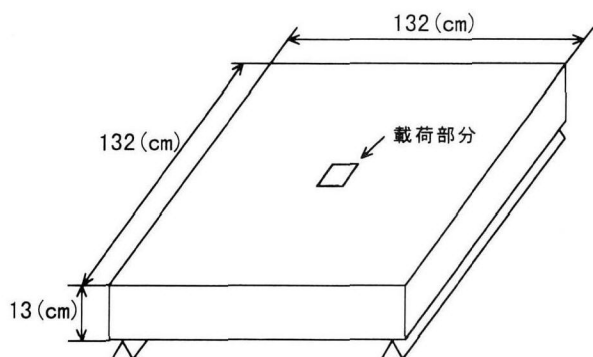


図-1 解析の対象としたRC版の概略図

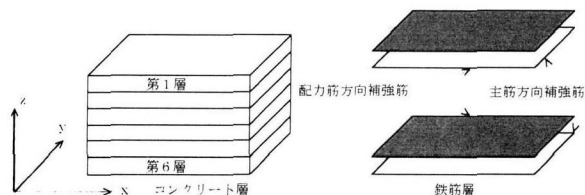


図-2 積層化構造

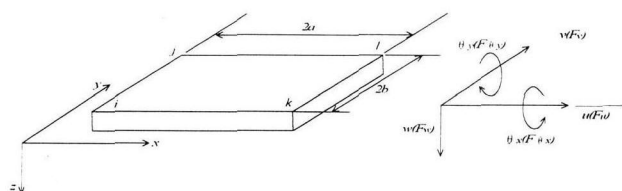


図-3 薄板の曲げ要素

①弾塑性域において平面保持の仮定が成立し、微小変形理論が適用でき、コンクリートの各薄層間に滑りは生じない。

②RC版は仮想のコンクリート層と仮想の鉄筋層により構成される。ただし、鉄筋は線材として扱う。

③破断または破壊に応じて、各要素がもつ弾性エネルギーは等価な要素節点力に置換する。

④衝撃荷重下においては載荷速度が一定ではなく、各材料特性に及ぼす速度効果の導入は困難であり、また、本研究で対象としているソフトな衝撃では材料特性の速度効果の影響は比較的少ないと考え、材料特性の速度効果は考慮していない。したがって、材料特性は静的試験によるものを用いる。

図-2に示すように、本解析で対象とするRC版モデルは、前述のコンクリート版を版厚方向に6分割したコンクリート層と、上部および下部のコンクリート層間に挿入された2層の鉄筋層から成る積層構造モデルを用いた。ただし、各層は平面応力状態にあるものとする。各鉄筋層は、主鉄筋または配筋方向の補強筋を考慮した2層を合成することにより生成されている。また鉄筋層は非常に薄い(厚さが無いものとして取り扱う)ため、コンクリート層と重なることによる影響はないものと考えられ、補強筋の位置を自由に設定することが可能である。

コンクリート要素モデルは図-3に示されるような長方形平板要素モデルであり、各節点は5自由度($u, v, w, \theta_x, \theta_y$)を有し

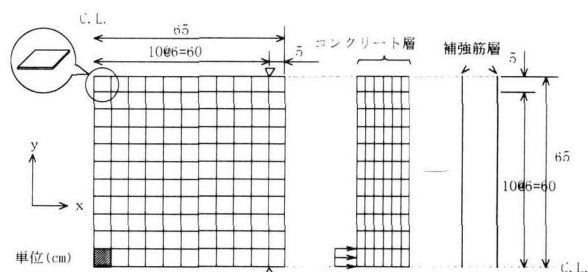


図-4 積層化非線形有限要素解析の要素分割

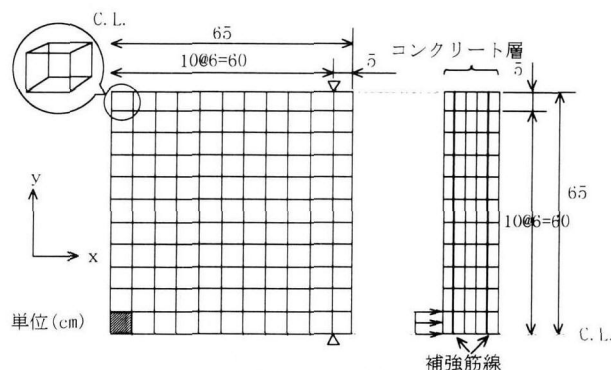


図-5 6面体要素3次元有限要素解析法の要素分割

ている。Ottosenにより提案された4パラメータ破壊曲面モデル⁴⁾をコンクリートの破壊条件として用い、動的平衡方程式の解法にはNewmark- β 法で $\beta=1/4$ とした一定加速度法を用いた。また、コンクリートと鉄筋間の付着については付着バネモデルを用いて考慮している⁵⁾。解析では、図-4に示されるように、対称性を考慮してコンクリート版の1/4部分のみを解析し、衝撃荷重は図中の塗りつぶした部分のコンクリート要素に等分布荷重として作用させた。

2.3 6面体要素を用いた3次元有限要素解析法⁶⁾

衝撃荷重下におけるコンクリート版構造の破壊モードは、静的な荷重下の破壊モードと比較すると、曲げ破壊モードから押し抜きせん断破壊モードへと移りやすくなる。これは、載荷速度または衝撃荷重の作用速度が高速になると応力波の影響が大きくなるため局部損傷が生じ、局部的な変形が増大するためである。衝撃荷重下におけるコンクリート版構造の解析では、載荷速度が速い場合、各要素の弾塑性および破壊状態の解析を行うために、版厚方向の応力 σ_z およびせん断力 τ_{xz}, τ_{yz} が重要となる。そのため版厚方向の応力やせん断力を正確に評価するためには、立体要素を用いた3次元有限要素法等による3次元解析が必要である。

本解析では、コンクリート要素に8節点アイソパラメトリック6面体要素を用い、補強筋は線材として取り扱い、3次元有限要素法⁷⁾を適用した。また、要素の積分にはガウス積分(積分点 $2 \times 2 \times 2$)を用いた。本解析では、図-5に示すようなRC版モデルについてモデルの対称性を考慮し、1/4部分のみを解析した。衝撃荷重は図中の塗りつぶした部分のコンクリート

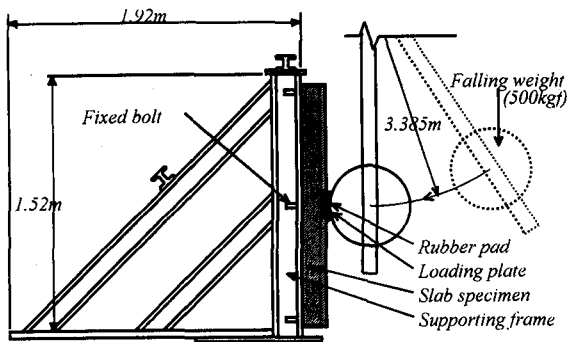


図-6 振り子式衝撃実験装置

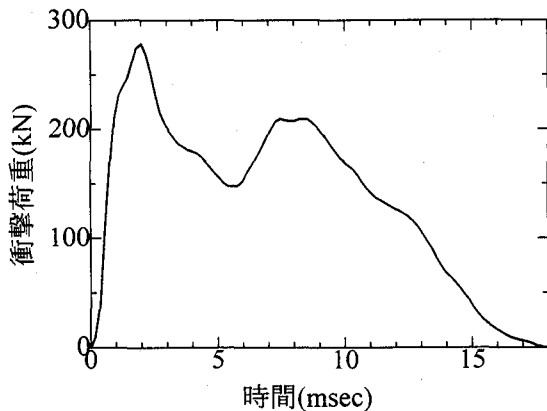


図-7 衝撃荷重～時間関係

要素に等分布荷重として作用させた。コンクリートの破壊条件は Ottosen により提案された 4 パラメータ破壊曲面モデル⁴⁾を用い、動的平衡方程式の解法には Newmark- β 法で $\beta=1/4$ とした一定加速度法を用いている。また、付着バネモデルを用いてコンクリートと鉄筋間の付着を考慮している⁵⁾。質量マトリクスには整合質量マトリクスを用いており、マトリクスのディメンジョンをできるだけ小さくするために、連立 1 次方程式の解法として共役勾配法を用いた。

2.4 解析精度の検討

a) 確認実験の概要

積層化非線形有限要素解析および 6 面体要素を用いた 3 次元有限要素法に対する数値解析精度を検討するために、解析モデルと同一の RC 版に対して衝撃実験を行った。実験は図-6に示す振り子式衝撃実験装置を用いて行い、500kg の円盤状の衝撃体を所定の高さまで引き上げ、振り子に取り付けた重錘により RC 版に衝撃力を作用させた。衝撃荷重の計測は、振り子に取り付けた加速度計により行い、RC 版の変位は非接触型の変位計で計測した。RC 版は 2 辺支持の両端をそれぞれボルトによって固定した。また、本研究ではソフトな衝撃作用を対象としているため、RC 版中央部に鉄板を固定しその上にゴム板を接着しており、衝撃荷重はこれらを介して RC 版に伝えられる。

実験結果との比較のために行った解析では、入力する衝撃荷重データは振り子の振り上げ高さ $h=65\text{cm}$ の実験によって得られた荷重～時間関係(図-7)を用いた。

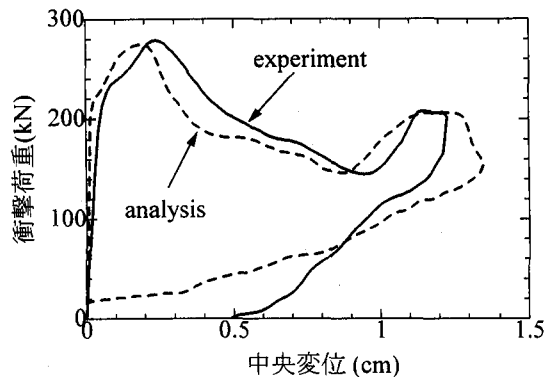


図-8 衝撃荷重～版中央変位曲線 (積層化)

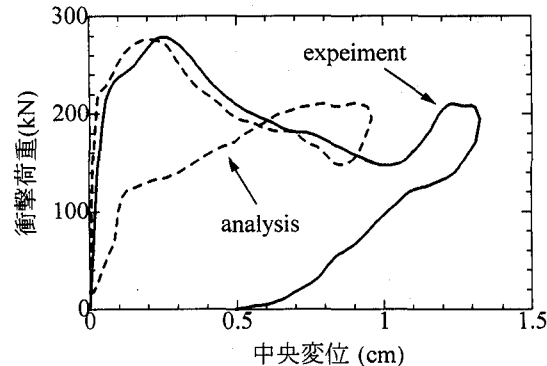


図-9 衝撃荷重～版中央変位曲線 (3次元)

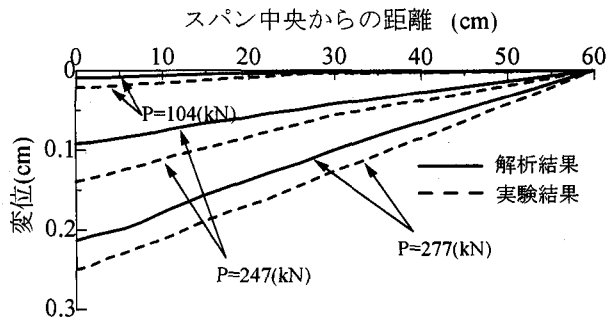


図-10 各荷重段階の変形図 (3次元)

b) 積層化非線形有限要素解析

図-8に RC 版の衝撃荷重～版中央変位曲線の解析結果と実験結果の比較を示す。なお、解析における衝撃荷重は図-7に示す衝撃荷重を用いた。この図から、積層化非線形有限要素解析の本実験に対する精度は比較的良好と考えられる。しかしながら、解析での衝撃荷重の第 1 ピークに対応する変位は実験値に比べて小さくなっている。これは、解析では重錘を固定している振り子の質量が考慮されておらず、動的解析における入力データである質量が実際の実験と異なっていたためと思われる。また、実験の際に RC 版の支点が微小ではあるが、衝撃作用によって動いたことも考えられる。衝撃荷重の第 2 ピーク後にあらわれる最大変位は実験結果と比較して解析結果の方が大きくなっており、実験結果に比べて剛性が多少低下していると考えられるが、全体的に良い精度が得られていると考えられる。

c) 6 面体要素を用いた 3 次元有限要素解析

図-9に解析および実験における RC 版の衝撃荷重～版中央変

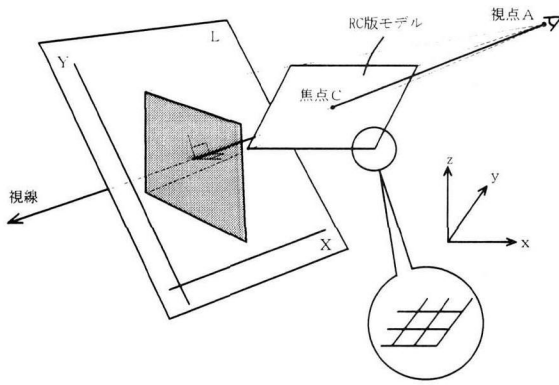


図-11 CG作成の概念図

位曲線の比較を示す。また、図-10にRC版の衝撃荷重の第1ピーク時までの変形状態を示す。これらの図から解析結果は実験結果と比較して衝撃荷重の第1ピーク時から除荷段階までは良く一致しているものの、その後の挙動はあまり一致していない。この原因としては、本解析が荷重増分法を用いており、各ステップごとに収束計算を行い剛性を計算しているが、その際に生じる収束誤差によるものと考えられる。また、本解析での供試体の要素分割は計算上の都合もあり多少粗く版状になっている。このため、解析上での応力およびひずみの要素間相互の伝達が不完全となり、図に示されるような違いとなつてあらわれたのではないと思われる。しかしながら、コンクリート版の衝撃作用による破壊現象を対象とした場合には、RC版の弾塑性変形と考えられる除荷から第2ピーク時の挙動よりも、衝撃荷重の第1ピーク前後までが特に重要であると考えられる。したがって、コンクリート版の破壊挙動を評価する場合には本解析方法でも十分な精度が得られるものと考えられる。

3. 衝撃破壊挙動の視覚化ソフトの開発

3.1 RC版の変形挙動の視覚化

衝撃荷重下におけるRC版では、RC版最下面の破壊挙動が最も重要視される。そこで本研究では、積層化非線形有限要素解析法および6面体要素を用いた3次元有限要素解析法により得られる解析結果にCGを適用して、RC版最下層の衝撃破壊挙動の視覚化を行った。ただし、版厚方向の変位に比べると主筋方向および配筋筋方向の変位はきわめて小さいものと考えられ、ここでは無視できるものとした。

RC版最下層を、コンクリート要素を示す四角形の集合により生成される擬似的な3次元曲面として捉えることにより、簡易的にRC版最下層の変形状態の視覚化を行った。その手法を以下に示す。(図-11 参照)

まず任意の視点からみたRC版の各コンクリート要素の節点に対し、視線方向に垂直な3次元平面L上への写像を行う。

視点を点A(x_0, y_0, z_0)、焦点を点C(x_c, y_c, z_c)とすると、視線の方向ベクトルは次式のようにになる。

$$\overrightarrow{AC} = (x_c - x_0, y_c - y_0, z_c - z_0) \quad (1)$$

この方向ベクトルに垂直であり視線上のいずれかの点を通るような平面Lを、視覚領域空間の平面化のための写像の値域とする。ここでは簡単にするため平面Lを点Cを通るものとする。平面Lは、式(2)で表され、視覚領域空間内の各点はこの平面L上にプロットされる。

$$(x_c - x_0)(x - x_0) + (y_c - y_0)(y - y_0) + (z_c - z_0)(z - z_0) = 0 \quad (2)$$

ここで視覚領域空間内の各点を $B_i(x_i, y_i, z_i)$ ($i=1, 2, \dots, n$)とすると、視点からの各点の相対的な関係を保つために、視点からの方向を変えないように各点をそれぞれ平面L上に写す必要がある。その条件を満たすために、点 B_i を点Aと点 B_i を通る直線と平面Lとの交点 P_i に写していく。この直線 AB_i の方向ベクトルは次式のようにになる。

$$\overrightarrow{AB_i} = (x_i - x_0, y_i - y_0, z_i - z_0) \quad (3)$$

この直線は点Aを通ることから、 t を任意の実数とすると、次式で表される。

$$\begin{cases} x = x_0 + (x_i - x_0)t \\ y = y_0 + (y_i - y_0)t \\ z = z_0 + (z_i - z_0)t \end{cases} \quad (4)$$

したがって、求める点 P_i の座標は、次式のようにになる。

$$P_i(x_0 + (x_i - x_0)t_i, y_0 + (y_i - y_0)t_i, z_0 + (z_i - z_0)t_i) \quad (5)$$

ここで t_i は直線 AB_i と平面Lとの交点を定めるための定数であり、式(2)より、

$$t_i = \frac{(x_c - x_0)^2 + (y_c - y_0)^2 + (z_c - z_0)^2}{(x_c - x_0)(x_i - x_0) + (y_c - y_0)(y_i - y_0) + (z_c - z_0)(z_i - z_0)} \quad (6)$$

と求められる。

次に、写像の値域である平面Lを2次元平面に変換する。2次元平面を実現するために、x軸、y軸、z軸とは別に、平面L上に新たにX軸とY軸を生成し、各点に対するX座標およびY座標を決定する。

点A、点Cを通り、z軸に平行な平面は、直線ACの方向ベクトル、及び点Aを通ることから、次式で示される。

$$\frac{x - x_0}{x_c - x_0} = \frac{y - y_0}{y_c - y_0} \quad (7)$$

ただし、 $x_c \neq x_0, y_c \neq y_0$

図-12に示すように、式(7)で示された平面と平面Lとの交線と平行で、しかも点 $Q(x_q, y_q, z_q)$ を通る直線を2次元平面の

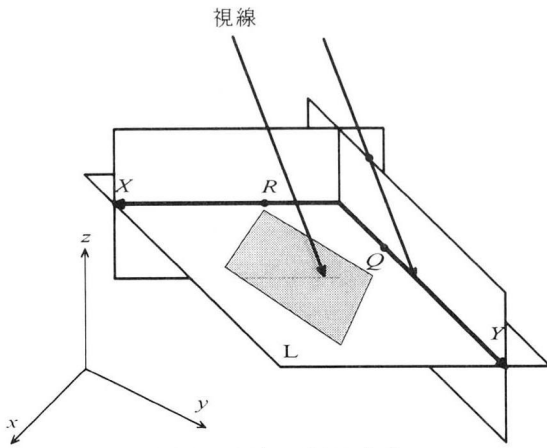


図-12 2次元平面の生成

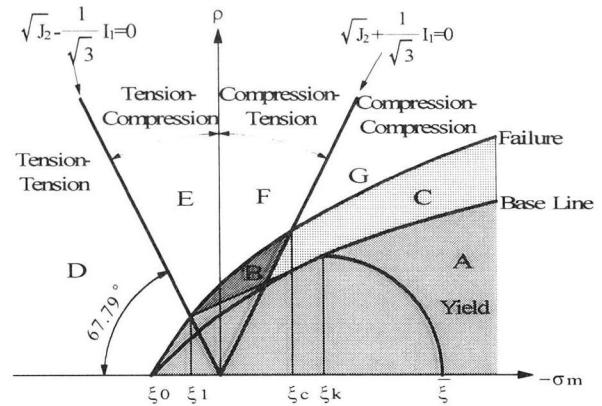


図-13 応力状態の分類

表-1 コンクリートの破壊判定値および破壊状態

	応力状態	ひび割れ状態	領域
Stage 0	Compression-Compression	生じていない (弾性状態)	A
Stage 1	Tension-Compression or Compression-Tension	生じていない (塑性変形)	B
Stage 2	Compression-Compression	生じていない (塑性変形)	C
Stage 3	Tension-Tension	少し生じている	D
Stage 4	Tension-Compression or Compression-Tension	少し生じている	E or F
Stage 5	Compression-Compression 以外	ある程度生じている	
Stage 6	Compression-Compression 以外	かなり進んでおり、圧壊が始まる前	
Stage 7	Compression-Compression	圧壊	G

Y軸とし、また、この直線に垂直で、しかも点 $R(x_r, y_r, z_r)$ を通る平面と平面 L との交線をX軸とする。ここで、点 Q と点 R はすべての点 P_i がXY平面の第1象限上にあるように決定されているため、各軸から点 P_i までの距離をそれぞれ点 P_i のX座標、Y座標の値とすることにより、各点同士の相対関係を維持したまま、平面 L を2次元平面に変換することができる。

ここで、点 P_i からY軸、X軸までの距離 l_y 、 l_x は次式で求めることができる。

$$l_y = \frac{|(y_c - y_0)(x_i - x_r) - (x_c - x_0)(y_i - y_r)|}{\sqrt{(x_c - x_0)^2 + (y_c - y_0)^2}} \quad (8)$$

$$l_x = \frac{|a(x_i - x_r) + b(y_i - y_r) + c(z_i - z_r)|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (9)$$

$$\text{ただし、 } a = 1, b = \frac{y_c - y_0}{x_c - x_0}, c = -\frac{(x_c - x_0)^2 + (y_c - y_0)^2}{(z_c - z_0)(x_c - x_0)} \text{ で}$$

ある。

この手法を時間ステップごとにRC版に適用し、作成されたCGを連続的に表示することにより、衝撃荷重下におけるRC版の変形挙動の時間的変化をアニメーション的に視覚化する。

3.2 RC版の破壊状態の視覚化

本研究では前述したように、両解析手法ともコンクリートの破壊基準としてOttosenにより提案された4パラメータモデル⁴⁾

を用いており、このモデルを基に、各要素の応力状態からコンクリート要素の破壊状態の判定を行った。応力不変量を I_1, J_2 とすると破壊局面の応力状態は次式のように分類される^{4), 6)}。

$$\text{tension-tension: } \sqrt{J_2} - \frac{1}{\sqrt{3}} I_1 > 0$$

$$\text{tension-compression: } \sqrt{J_2} - \frac{1}{\sqrt{3}} I_1 \leq 0 \text{ and } I_1 \geq 0 \quad (10)$$

$$\text{compression-tension: } \sqrt{J_2} + \frac{1}{\sqrt{3}} I_1 \geq 0 \text{ and } I_1 < 0$$

$$\text{compression-compression: } \sqrt{J_2} + \frac{1}{\sqrt{3}} I_1 < 0$$

本研究では、コンクリートの破壊状態として8つの状態(破壊のレベル)を考慮しており、その状態は図-13に示されるような応力状態に対応する領域により決定される。図中の縦軸は静水圧軸からの偏差応力成分を表し、横軸は8面体平均垂直応力を表す。表-1にコンクリートの破壊判定値および破壊状態を示す。

各コンクリート要素について破壊状態の判定結果を基にCG上の各要素を示す四角形モデルを着色することにより、RC版全体の破壊状態を明確にする。この破壊状態に対応する配色は使用する計算機のディスプレイやプリンタに応じて決定する必要がある。RC版の支配的な破壊モードを予測するために、同様な方法によりRC版の断面内の各要素の破壊状態を表現する。このRC版の主筋方向および配筋方向の断面内の応力分布図を同一画面上に表示する。画面構成の例を図-14に示す。

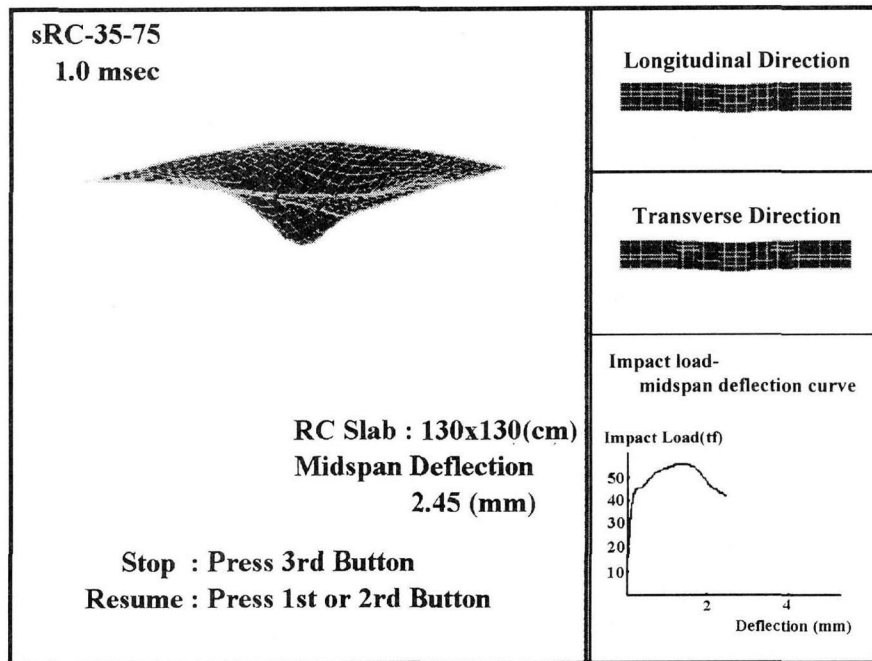


図-14 画面構成の例

表-2 解析より求められた時間ステップと衝撃荷重の倍率

	載荷速度 (kN/msec)		
	49.0	490.0	980.0
Dt (msec)	0.098	0.017	0.015
荷重倍率	0.812	1.448	4.658

注1) "Dt"は解析における時間ステップ

注2) 荷重倍率は実験により得られた衝撃荷重波形の荷重に対して解析に用いた衝撃荷重波形の倍率

4. CGを用いた衝撃破壊シミュレーション

4.1 入力データ

本研究では、確認実験により得られた衝撃荷重波形（図-7および図-15参照）を基に両解析プログラムに対する入力データを作成した。入力データには、目的の載荷速度になるように、得られた衝撃荷重波形データの衝撃荷重および時間ステップをそれぞれ定数倍したものを用いた。また、衝撃荷重の倍率は、積層化非線形有限要素解析法において、衝撃荷重波形の第1ピーク時あるいはそれを過ぎたあたりで、いずれかのコンクリート要素の破壊あるいは補強筋要素の破断が生じるような最大衝撃荷重を何回かの試行で求め、その最大衝撃荷重を実験により得られた最大衝撃荷重で除して決定した。解析に用いた入力衝撃荷重データを図-15に示し、時間ステップと衝撃荷重の倍率を表-2に示す。この作成された入力データを6面体要素を用いた3次元有限要素解析法の入力データとしても用いた。このように積層化非線形有限要素解析法の解析結果により衝撃荷重の倍率を決定する理由には、計算時間が短くてすむために比較的早く入力データを作成できること、また、現段階においては6

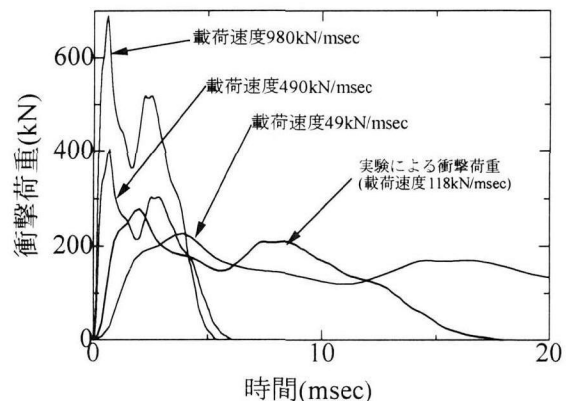


図-15 入力衝撃荷重波形

面体要素を用いた3次元有限要素解析法と比較すると積層化非線形有限要素解析法は解析結果の検証が十分にされており、信頼性が高いことの2点が挙げられる。本研究では、衝撃破壊モードの時間的変化を視覚化可能にすることを目的としており、簡易的に本手法により入力データを決定しても、本研究の目的には直接的な影響はないものと考えられる。

4.2 破壊モードの定義³⁾

本研究で対象とする破壊モードは、ソフトな衝撃荷重下のRC版に生じる曲げ破壊モード、曲げ→押し抜きせん断破壊モード、押し抜きせん断破壊モードであり、それぞれを次のように定義している。曲げ破壊モードは、初期段階、中期段階、終局段階ともに曲げの変形を示し破壊する。曲げ→押し抜きせん断破壊モードは、初期段階では曲げによる変形がみられるが、中

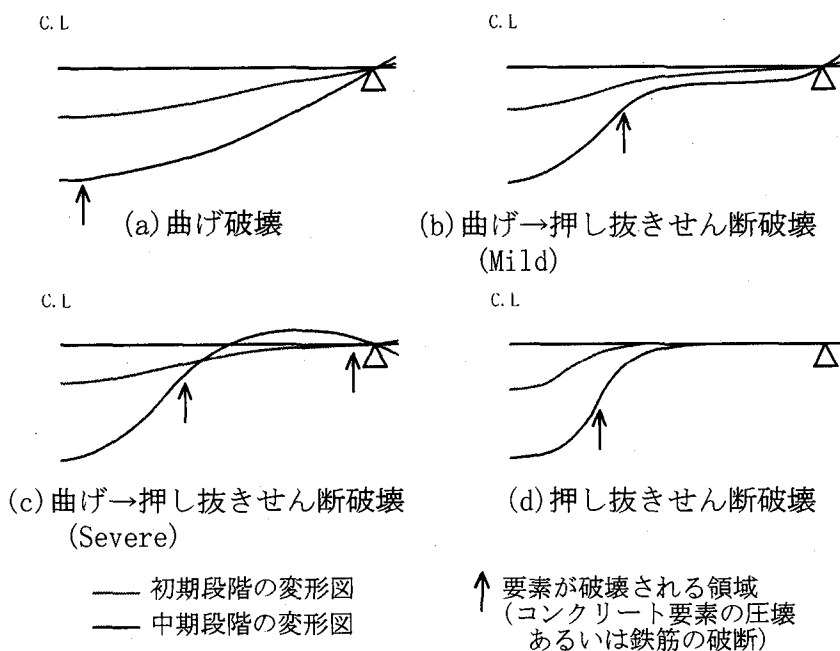


図-16 ソフトな衝撃荷重下におけるRC版の破壊モードの概要

期段階では押し抜きせん断あるいは曲げと押し抜きせん断の両変形を示し、終局段階では押し抜きせん断による変形を示す破壊である。また、押し抜きせん断破壊モードは、初期段階、中期段階、終局段階ともに押し抜きせん断による局所的な変形挙動を示す破壊である。図-16に、ソフトな衝撃荷重下におけるRC版に生じる各破壊モードの例を示す。破壊モードは荷重速度の大きさや衝撃体の特性等によって異なり、図-7に示すような衝撃波形により衝突後の被衝撃体の形状および破壊箇所は異なる。ただし本解析では、コンクリート要素の圧壊あるいは補強筋要素の破断をRC版の構造的破壊としている。これは、コンクリート要素の圧壊あるいは補強筋要素の破断に至ることが、RC版の剛性を著しく低下させると考えるためである。

4.3 視覚化した破壊モードの評価

a) 変形状態

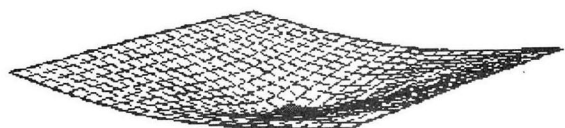
図-17～図-19に、それぞれ荷重速度が49kN/msec、490kN/msec、980kN/msecの衝撃荷重下のRC版について、初期段階および衝撃荷重が第1ピーク時に達した時(RC版の破壊時)のRC版の解析による破壊モードを示す。ただし、積層化非線形有限要素解析法の解析結果による変形状態と3次元有限要素解析法の解析結果による変形状態は非常に近い形状を示したため、ここでは積層化非線形有限要素解析法による解析結果のみを示している。図-17によると初期段階および第1ピーク時ともに全体的に曲げにより支配されており、曲げ破壊モードであることが分かる。また図-18では、初期段階ではわかりにくい、第1ピーク時のRC版の形状が全体的に曲げによる変形がみられ、また版中央部分にはせん断による変形がみられることから、曲げ→押し抜きせん断破壊モードであることがわかる。図-19に示すRC版は、初期段階および第1ピーク時の形状ともに、RC版の

支持部分に近い部分はほとんど変形していないものの、版中央部分が変形していることからせん断により支配されていると考えられ、押し抜きせん断破壊モードであることが分かる。したがって、それぞれ曲げ破壊、曲げ→押し抜きせん断破壊、押し抜きせん断破壊の3つの破壊モードを示しており、各破壊モードとも十分に視覚化できていると思われる。しかし図-20に示すように、曲げ破壊モードに近い曲げ→押し抜きせん断破壊モード(荷重速度は196kN/msec)を視覚化した場合には、変形状態のみからでは曲げ破壊と誤って判定する可能性が高く、破壊モードの判定は容易ではない。そのため、RC版の変形状態と断面内応力分布図を同時に検討する必要がある。ここでは断面内応力分布図からせん断により支配されていることが明確にわかり、曲げ→押し抜きせん断破壊モードであると判定することが容易に行える。そこで、各コンクリート要素の破壊状態および内部応力分布図を同時に検討することにより、破壊モードの判定を行う必要があると考えられる。なお、図中の色の違いは、表-1に示す破壊状態の違いに対応しており、色が濃くなるほど破壊状態が進んでいる。

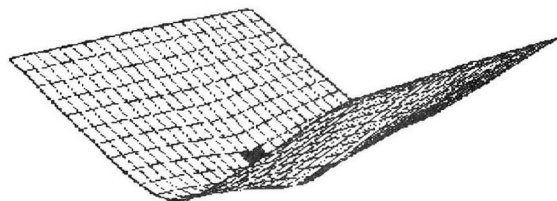
b) 断面内応力分布

前述したように、衝撃破壊モードを正確に捉えるには、RC版全体の変形状態のみならず内部応力分布の時間的変化を視覚化し、RC版内部の破壊状態を知る必要があると考えられる。そこで、両解析手法により解析した断面内応力分布について評価する。

両解析手法により解析された各破壊モードにおける断面内応力分布を図-21に示す。図-21に示すように、曲げ破壊モードの場合には両解析手法ともに曲げ破壊モードの特徴を明確に示している。特に積層化非線形有限要素解析法による結果では荷重速度が速くなるとともに押し抜きせん断破壊の特徴をもつ



(1) 初期段階



(2) 中期段階

(a) 全体図



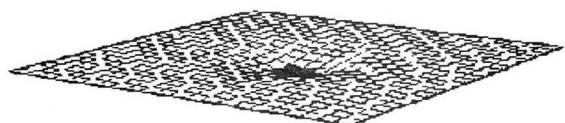
(1) 初期段階



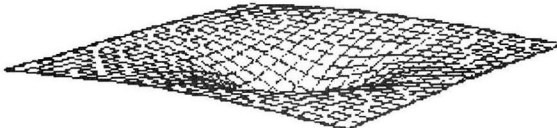
(2) 中期段階

(b) 主筋方向変形図

図-17 解析により得られた曲げ破壊モード (積層化)



(1) 初期段階



(2) 中期段階

(a) 全体図



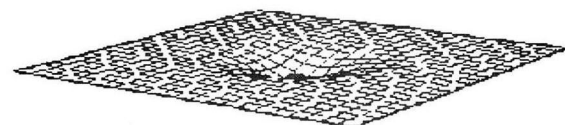
(1) 初期段階



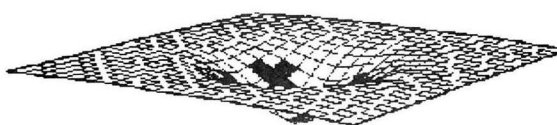
(2) 中期段階

(b) 主筋方向変形図

図-18 解析により得られた曲げ→押し抜きせん断モード (積層化)



(1) 初期段階



(2) 中期段階

(a) 全体図



(1) 初期段階



(2) 中期段階

(b) 主筋方向変形図

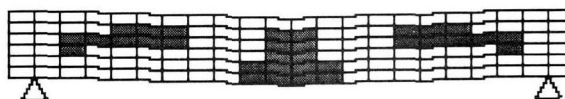
図-19 解析から得られた押し抜きせん断破壊モード (積層化)



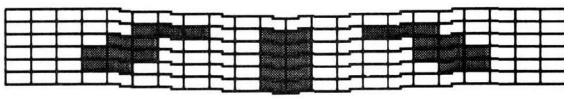
(a) 全体図



(b) 主筋方向変形図



(c) 主筋方向断面図



(d) 配力筋方向断面図

図-20 解析から得られた中期段階における曲げ破壊に近い曲げ→押し抜きせん断破壊モード (積層化)

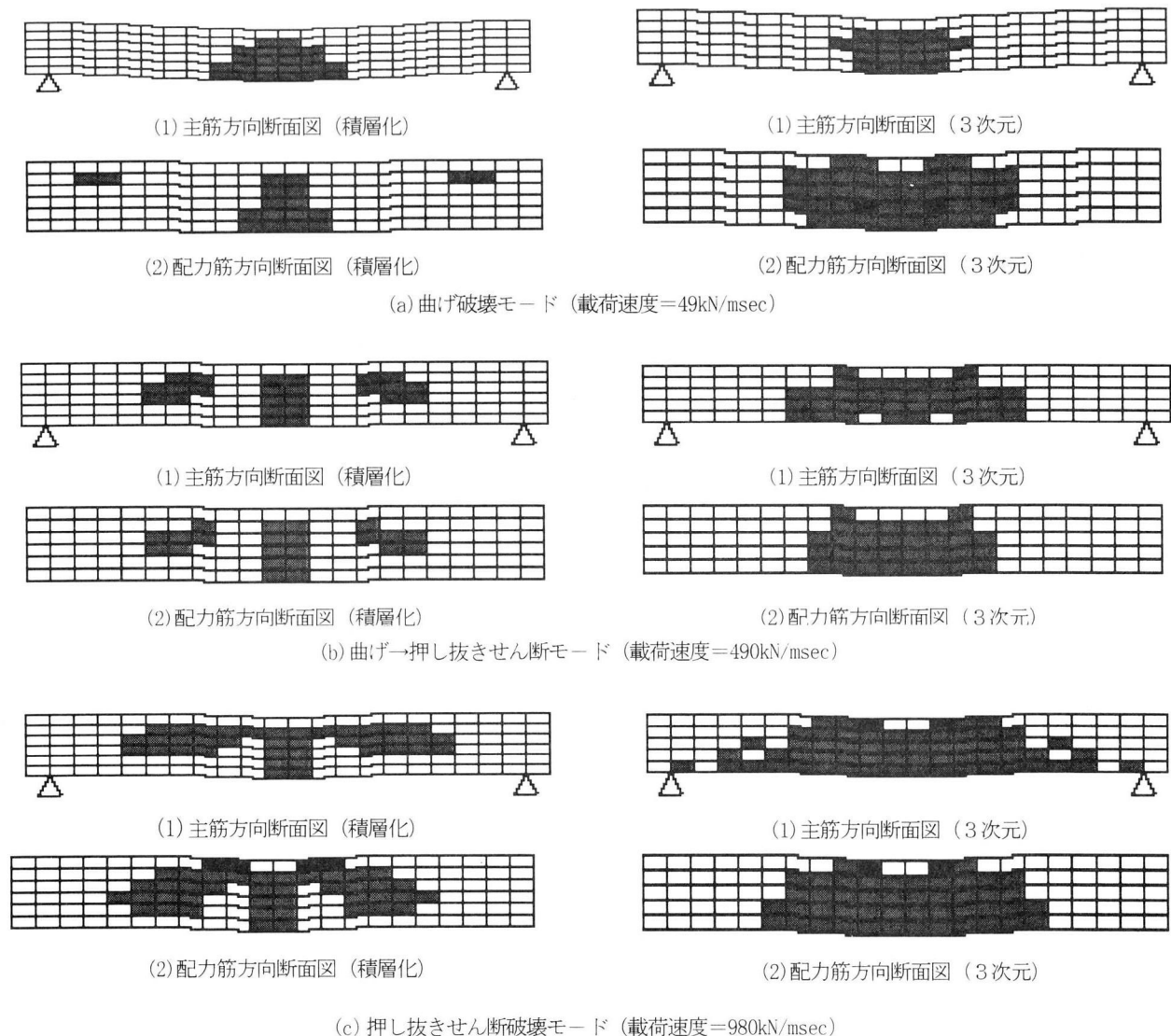


図-21 両解析から得られた各破壊モードにおける内部応力分布図

た断面内応力分布を示し、押し抜きせん断コーンの形状を十分に予測できる。このことから、内部応力分布により各種コンクリート版で支配的となる破壊モードを予測することができ、特に押し抜きせん断破壊モードにおいては押し抜きコーンの角度等を評価するための重要な指標となることがわかる。しかしながら、3次元弾塑性有限要素解析法による断面内応力分布図では、載荷速度が速い場合にはその分布の時間的変化は押し抜きせん断破壊に近い挙動を示すものの、曲げ破壊モードの特徴とも受け取れるような分布を示しており、3次元有限要素解析法による断面内応力分布図のみからでは、破壊モードの特徴が得られにくく、今後、解析プログラムの改良を含めたさらなる検討が必要であると考えられる。

5. 結論

本研究はRC版の衝撃破壊挙動をより正確に把握するため、有限要素法による衝撃解析結果にCGを適用して、衝撃破壊挙動の視覚化ソフトを開発した。さらに、視覚化ソフトを用いて、

ソフトな衝撃を受けるRC版の代表的な破壊モードの時間的変化等を視覚化し、その有用性を検討した。本研究により得られた主な結果を以下に示す。

- ①本研究で開発した衝撃破壊挙動視覚化ソフトにより、RC版の変形状態、破壊分布および断面内応力分布をアニメーション的に表示することができ、ソフトな衝撃荷重下でのRC版に発生する各破壊モードの時間的変化を視覚的に捉えることができる。
- ②RC版の衝撃破壊挙動は複雑となり、両解析手法による解析結果を利用したRC版の変形状態の表示からのみでは破壊モードの判定が困難な場合があり、各破壊モードの特徴を明確にする断面内応力分布図も組み合わせて判定を行う必要がある。
- ③断面内応力分布の視覚化により、破壊モードの判定が容易になるだけでなく、押し抜きせん断破壊モードにおいては押し抜きせん断コーンの形状を予測でき、RC版の衝撃耐荷性を評価するための重要な指標となることがわかる。

参考文献

- 1) A.Miyamoto, Michael W.King, M.Fujii: Nonlinear Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Slabs under Impulsive Loads, *ACI Structural Journal*, V.88, No4, pp.411-419, 1991.
- 2) A.Miyamoto, Michael W.King, M.Fujii: Analysis of Failure Modes for Reinforced Concrete Slabs under Impulsive Loads, *ACI Structural Journal*, V.88, No5, pp.538-545, 1991.
- 3) Zienkiewicz O.C.著,吉識雅夫 監訳:マトリックス有限要素法, 培風館, 1984.
- 4) W.F.Chen, D.J.Han: *Plasticity for Structural Engineers*, Springer-Verlag, New York, 1988.
- 5) 宮本文穂・三戸雅文・北山 篤: 積層コンクリート版の衝撃特性と耐衝撃性の評価, 構造工学論文集, Vol.41A, pp.1277-1288, 1995.3.
- 6) 宮本文穂・北山 篤・五嶋真澄: 3次元有限要素解析によるRC版の衝撃破壊挙動解析と精度の検証, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.1325-1336, 1996.3.
- 7) Gouri Dhatt, Gilbert Touzot共著, 福田収一監訳: 最新有限要素法全解, (株)パーソナルメディア, 1990.
- 8) 今野久志・本名一夫・城ヶ端政次: 衝撃力を受けるRC版の挙動-落石覆道動的設計のために-, 落石覆道の衝撃問題に関する研究論文集, 北海道開発局開発土木研究所構造研究室, 構造研究室資料第3号, pp.78-83, 1990.
- 9) Michael W.King: *Nonlinear Dynamic Analysis and Design Concepts for Concrete Structures Subjected to Soft Impact Loads*, 神戸大学大学院工学研究科博士論文, 1993.

(1998. 9. 18 受付)