

(15) 鉄筋コンクリート版の衝撃破壊過程のビジュアル化

VISUALIZATION OF IMPACT FAILURE PROCESS OF REINFORCED CONCRETE SLABS

宮本文穂*, 松本 剛**

Ayaho MIYAMOTO and Tsuyoshi MATSUMOTO

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

**工学士 山口大学大学院 知能情報システム工学専攻博士前期課程(〒755 宇部市常盤台2557)

キーワード: 鉄筋コンクリート版, 衝撃荷重, 破壊過程, コンピュータグラフィックス

(reinforced concrete slab, impact load, failure process, computer graphics)

1. はじめに

衝撃荷重下でのコンクリート構造物の破壊挙動は、応力波の発生、高次振動成分の卓越等によって静的荷重下のそれとは大きく異なり、実験的にも解析的にも未解明となっているものが多い。特に同一形状、寸法のコンクリート構造物でも、衝撃体の性質、形状、速度によって破壊モード、破壊時変位等が異なるだけでなく時間的にも変化するため、各種衝撃破壊挙動解析法による一般的な数値の比較や種々のグラフで示された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などの全体挙動を正確に捉えるのは容易なことではない。すなわち、時々刻々と変化するコンクリート構造物の衝撃破壊挙動を捉えるには、その変形状態や破壊分布などの時間的変化を視覚的に表示する必要がある。

本研究は、このような観点から、コンピュータグラフィックス(以下CG)を用いることにより衝撃荷重下における鉄筋コンクリート(以下RC)版の破壊モード、内部応力分布の時間的変化を視覚化することを試みたものである。すなわち本研究では、積層化(準3次元)非線形有限要素解析法および3次元弾塑性有限要素解析法の両解析手法を用いたRC版の衝撃破壊挙動解析結果を利用して、すべての要素について時間ステップごとの変位および応力、破壊状態をシミュレーションするとともに、RC版の変形状態を3次元的に視覚化できるような手法を新たに開発する。この手法により生成したCGを時間ステップごとに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。また、RC版の変形挙動と断面内の応力状態および破壊状態の時間的変化を同時に表示するなど、RC版の破壊モードを理解しやすく表現できるように試みた。その結果、種々の衝撃荷重下で発生する曲げ破壊、曲げ→押抜きせん断破壊、押抜きせん断破壊の3種類の破壊モードの時間的変化と、それぞれの断面内要素の破壊過程を視覚化することが可能となった。

2. 衝撃破壊挙動解析手法の概要

2.1 積層化非線形有限要素解析法¹⁾

積層化非線形有限要素法は、コンクリート版を版厚方向に層状に分割して各層に薄板の有限要素法²⁾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。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るものとし、コンクリートの各層は、層間に滑りが生じないものとする。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

筋層は線材として扱う。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を等価な要素節点力に置換する。
 ④衝撃荷重下においては载荷速度が一定とはならないため、各材料特性に及ぼす速度効果の導入は困難である。したがって、これらを一括して慣性項により考慮するものとし、材料特性には静的試験によるものを用いる。

図1に示すように、本解析で対象とするコンクリート版モデルは、130cm×130cm×13cm(スパン120cm)の2辺単純支持の正方形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鉄筋層2層から成る積層構造モデルを用いる。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、主鉄筋または配力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おり、鉄筋層は非常に薄いため、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($u, v, w, \theta_x, \theta_y$)を有している。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を用い³⁾、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る。ただし、図2に示すようにモデルの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、衝撃荷重は図中の斜線部分のコンクリート要素に部分等分布で作用させるものとする。

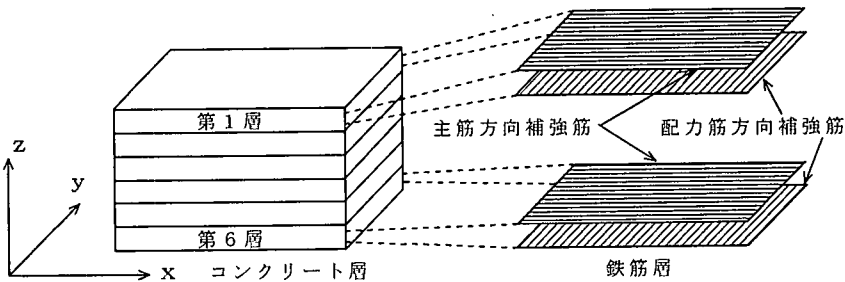


図1 積層化構造

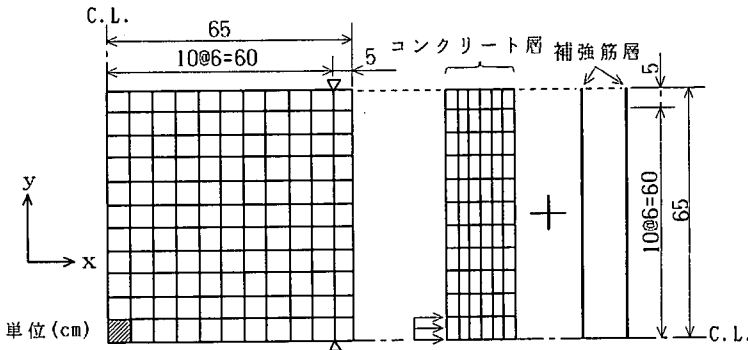


図2 コンクリート版の積層化非線形有限要素モデル(1/4部分)

2.2 3次元弾塑性有限要素解析法^{4), 5)}

静的な荷重下と比較すると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、载荷速度の高速化に伴う慣性力等の支配により局部変形が増大し、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。そのため、载荷速度の速い衝撃荷重下におけるコンクリート版構造の解析では、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 およびせん断応力 τ_{yz}, τ_{zx} が重要となり、これらの版厚方向応力を評価するためには、立体要素を用いた3次元有限要素法等による3次元解析が必要となる。

本研究では、3次元有限要素法を適用するにあたり、コンクリート要素に8節点6面体のアイソパラメトリック要素を用い、補強筋は線材として取り扱うこととした。なお、コンクリート要素の積分点はガウスの積分点(2×2×2)を

用いている。本解析では、RC版モデルの対称性を考慮し、図3に示すようなコンクリート版モデルの1/4部分のみを解析する。衝撃荷重は、図中の斜線部分のコンクリート要素に部分等分布で作用させる。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を用い³⁾、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る。質量マトリックスには整合質量マトリックスを用い、また、1次方程式の解法として、マトリックスのディメンジョンをできるだけ小さくするために、共役勾配法を用いた。

しかし、積層化非線形有限要素解析法と比較すると節点数および自由度が多くなり、計算時間とコストが膨大となるため、これに対処するためには積層化非線形有限要素解析法で十分な解析結果が得られる領域では積層化非線形有限要素解析法を用いる等の工夫が必要である。

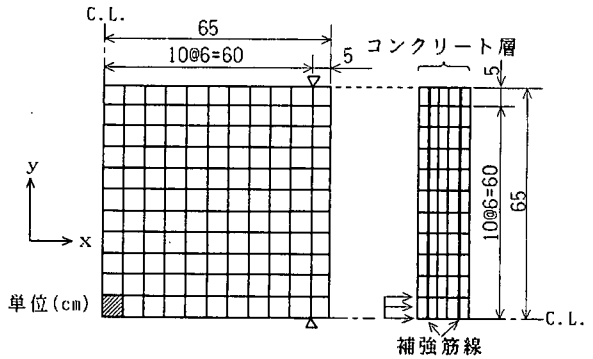


図3 コンクリート版の3次元有限要素モデル(1/4部分)

3. 衝撃破壊挙動の視覚化ソフトの開発

3.1 衝撃破壊挙動の視覚化の概要

衝撃荷重下におけるコンクリート版では、コンクリート版の最下面の破壊挙動が最も重要視される。本研究では、積層化非線形有限要素法および3次元弾塑性有限要素法による両解析法で用いられたコンクリート版モデルの最下層(3次元有限要素法で用いたモデルでは最下層の下面)の衝撃破壊挙動についての視覚化を行い、破壊モードの時間的変化を捉えることを試みる。ただし、版厚方向の変位に比べ、主筋方向、配力筋方向の変位はきわめて小さいため、無視できるものとする。

RC版の最下層の変形状態を、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、任意の視点からみたRC版を含む3次元空間に対して3次元平面L上への写像を行い、平面Lを2次元平面に変換することによりCGを作成する。その概念図を図4に示す。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。

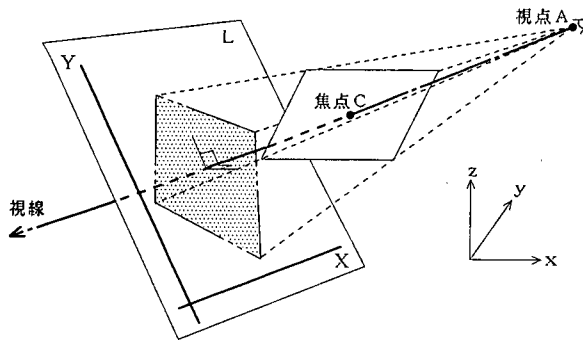


図4 CGを用いた視覚化の概念図

3.2 衝撃破壊挙動の特徴の視覚化

本研究ではコンクリートの破壊基準としてOttosenにより提案された4パラメータモデルを用いている³⁾。ここでは、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う。両解析手法では、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5に示すような応力状態に対応する

領域により決定される。以下に、コンクリートの破壊判定値とそのときの破壊状態を示す。

0：弾性状態にあり，ひび割れは生じていない。（領域A）

1：応力状態はTension-CompressionあるいはCompression-Tensionである。ひび割れは生じていないが，塑性変形が起こっている状態である。（領域B）

2：Compression-Compressionの応力状態で，塑性変形が起こり，ひび割れは生じていない。（領域C）

3：応力状態はTension-Tensionの領域にあり，ひび割れが少し生じている状態である。（領域D）

4：応力状態はTension-CompressionあるいはCompression-Tensionで，少しひび割れが生じている程度である。（領域Eあるいは領域F）

5：応力状態はCompression-Compression以外で，ひび割れはある程度生じている。

6：応力状態はCompression-Compression以外で，ひび割れがかなり進んでいる状態にあり，圧壊が始まる前の状態である。

7：圧壊。応力状態はCompression-Compressionの領域にある。（領域G）

この判定結果を基にCG上において四角形のモデルで表された各コンクリート要素を着色し，その要素の破壊状態を明確にする。また，同様にして，RC断面内部の破壊状態を明確にし，RC版の支配的な破壊モードを予測するために，RC版の主筋方向および配筋筋方向の断面内の応力分布図も同一画面上に表示する。

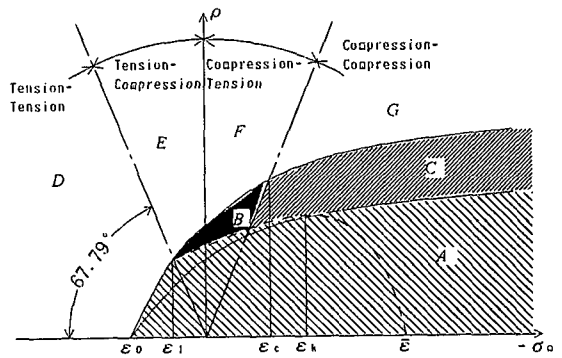


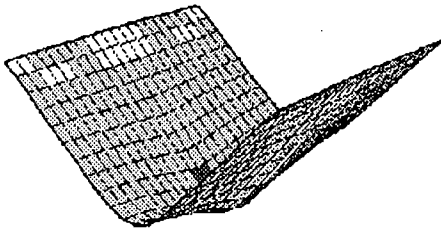
図5 応力状態と破壊レベルの対応分類

4. 衝撃破壊挙動へのCGの適用

4.1 破壊モードの視覚化

ここでは，開発した衝撃破壊挙動の視覚化ソフトを利用することにより，ソフトな衝撃荷重下でのRC版に発生する各破壊モードを視覚的に捉えることを試みた。図6，図7および図8にそれぞれ曲げ破壊，曲げ→押し抜きせん断破壊，押し抜きせん断破壊の3つの破壊モードを視覚化した結果の一例を示す。また，曲げ破壊に近い曲げ→押し抜きせん断破壊の例を図9に示す。ただし，図6～図9は，それぞれ載荷速度が5.0(tf/msec)，12.0(tf/msec)，100.0(tf/msec)，20.0(tf/msec)の際のRC-35版について，積層化非線形有限要素解析法により解析した結果を用いて表示している。図6～図8に示すように，各破壊モードとも十分にその特徴を視覚化できていると考えられる。しかし，図9に示すように，曲げ破壊に近い曲げ→押し抜きせん断破壊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は明確にせん断破壊により支配されていることが予測され，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。

つぎに，断面内応力分布図について両解析手法による解析結果を評価する。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10に示す。図10に示すように曲げ破壊モードの場合には，両解析手法とも曲げ破壊モードの特徴を示していると考えられるが，載荷速度が速くなるとともに積層化非線形有限要素解析法による結果では押し抜きせん断破壊の特徴をもっ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にも関わらず，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，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ことがわかる。

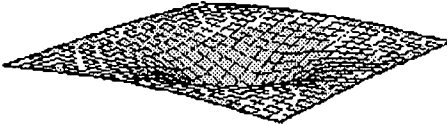


(a)全体図



(b)主筋方向変形図

図6 解析により得られた曲げ破壊モードの例 (積層化)



(a)全体図



(b)主筋方向変形図

図7 解析により得られた曲げ→押し抜きせん断破壊モードの例 (積層化)

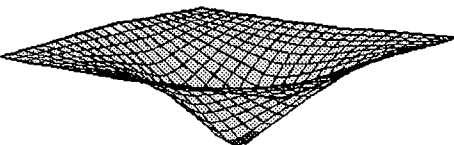


(a)全体図

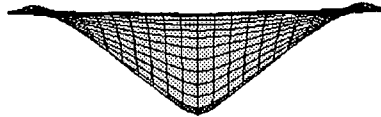


(b)主筋方向変形図

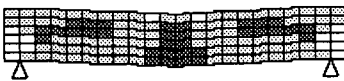
図8 解析から得られた押し抜きせん断破壊モードの例 (積層化)



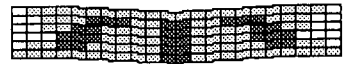
(a)全体図



(b)主筋方向変形図



(c)主筋方向断面図



(d)配筋方向断面図

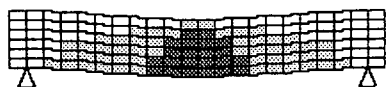
図9 解析から得られた曲げ破壊に近い曲げ→押し抜きせん断破壊モードと断面内破壊要素の例 (積層化)

5. 結論

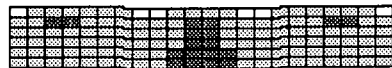
本研究はRC版の衝撃破壊挙動視覚化ソフトを開発し、ソフトな衝撃を受けるRC版の代表的な破壊モードの時間的変化等を視覚化し、その有用性を検討したものである。本研究により得られた主な結果を以下に示す。

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のみからでは



(1) 主筋方向断面図 (積層化)



(2) 配力筋方向断面図 (積層化)

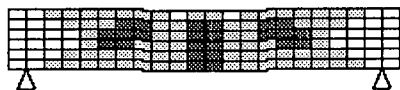


(1) 主筋方向断面図 (3次元)



(2) 配力筋方向断面図 (3次元)

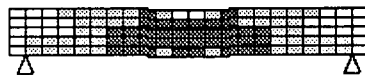
(a) 曲げ破壊モード



(1) 主筋方向断面図 (積層化)



(2) 配力筋方向断面図 (積層化)

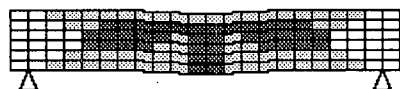


(1) 主筋方向断面図 (3次元)

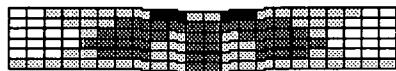


(2) 配力筋方向断面図 (3次元)

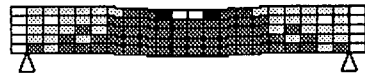
(b) 曲げ→押し抜きせん断破壊モード



(1) 主筋方向断面図 (積層化)



(2) 配力筋方向断面図 (積層化)



(1) 主筋方向断面図 (3次元)



(2) 配力筋方向断面図 (3次元)

(c) 押し抜きせん断破壊モード

図 10 両解析から得られた各破壊モードにおける断面内応力分布図の比較例

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 3次元有限要素解析法で解析されたコンクリート要素のひび割れ分布は、静止画面からでは破壊モードの特徴は捉えにくい傾向があり、断面内応力分布の時間的変化を追うことにより破壊モードの判定を行う必要がある。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) W. F. Chen: Plasticity in Reinforced Concrete, McGraw-Hill, 1982.
- 4) 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.
- 5) 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, 1996. 3.