

3次元有限要素解析によるRC版の衝撃破壊挙動解析

山口大学工学部 正 員 ○宮本文穂

山口大学大学院 学生員 松本 剛

1. まえがき

本研究は、土木構造物に車両、航空機等が衝突する場合を想定したソフトな衝撃問題を取り上げ、3次元動的有限要素解析を用いて鉄筋コンクリート(RC)版の衝撃破壊挙動解析を行うものである。その際、ひび割れ発生後のコンクリートの引張軟化特性と、コンクリートと鉄筋間の付着特性を考慮し、衝撃破壊挙動を解析的に検討するとともに、解析モデルと同一のRC版に対する重錘落下衝撃破壊実験を実施することによって解析精度の検証を行った。

2. RC版の衝撃破壊挙動解析への3次元有限要素法の適用

(1) 解析概要：衝撃荷重下におけるRC版の破壊モードは静的荷重下におけるそれに比べ、載荷速度が速くなるにつれて曲げ破壊から押し抜きせん断破壊に至る傾向が著しくなる。従って、衝撃力が作用する方向の応力(σ_z)およびせん断応力(τ_{yz}, τ_{zx})が、コンクリート要素の弾塑性および破壊の評価において重要になってくる。そこで、それらを評価するために4面体や6面体の立体要素を用いた3次元FEM解析が必要となる。本解析で用いるコンクリート要素は、8節点6面体のアイソパラメトリック要素で、要素の積分点はガウスの積分点($2 \times 2 \times 2$)を用いている。また、補強筋は線材として扱っている。図1に本解析で用いるRC版の1/4部分のモデルを示す。衝撃荷重は①部分に部分等分布で作用させる。本解析で用いた一次方程式の解法は、できる限りディメンジョンを小さくするために共役勾配法を用いている。また、動的平衡方程式の解法には、Newmark- β 法を用い、質量マトリックスには整合質量マトリックスを用いている。なお、コンクリート要素の破壊条件はOttosenにより提案された4パラメータモデルを用いる¹⁾。

ひび割れ発生後のコンクリートの引張軟化特性は、Bazant, Z. P. らが提案しているコンクリートの破壊エネルギーに基づく引張軟化特性²⁾を用い、一方、コンクリートと鉄筋の付着については、共役勾配法を用いる場合に解の収束を保証できる付着ばねモデル³⁾を用いた。

(2) 引張軟化特性および付着特性の影響：図2に

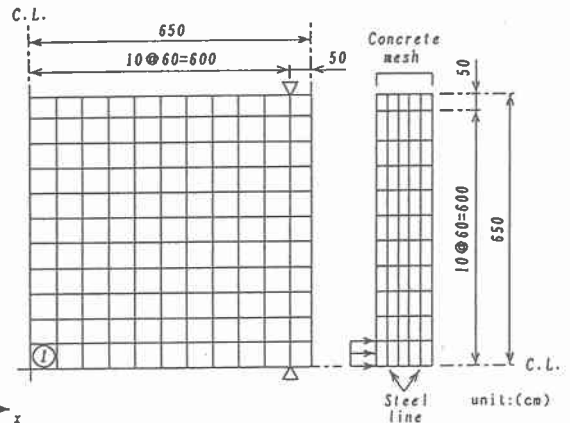


図1 RC版の1/4有限要素モデル

引張軟化特性の考慮無しのもとで、コンクリートと鉄筋間の付着特性を考慮したモデルおよび完全付着としたモデルによる衝撃荷重～コンクリート版中央変位関係の比較を示す。この図よりひび割れ発生後あたりから両者の挙動が少し異なってくることがわかる。また、図3に付着特性を考慮した上で引張軟化特性の有無による衝撃荷重～版中央変位曲線の比較を示す。この図より、引張軟化特性を考慮した場合、考慮しない場合と比べてひび割れ発生後の挙動に大きな変異が生じていることがわかる。なお、以上の解析における入力衝撃荷重には、後述する検証実験時に得られた衝撃荷重～時間関係を基本として利用した。

3. 解析精度の検証

3次元有限要素法による数値解析精度を検証するために、解析モデルと同一のRC版に対して重錘落下衝撃破壊実験を行った。実験で用いたコンクリートは圧縮強度=331kgf/cm²、引張強度=24.3kgf/cm²であり、鉄筋に

はSD35(ヤング係数 $2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$)を用いた。検証実験は振子式衝撃実験装置を用いて行い、500kgfの重錘を所定の落下高さまで引き上げて自由落下させることによってRC版に衝撃荷重を作用させた。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。なお、解析結果との比較にあたって、入力する衝撃荷重データは重錘落下高さ $h=65\text{cm}$ の実験によって得られた衝撃荷重～時間関係を用いた。

図4に解析および実験におけるRC-35版(上述の普通コンクリートおよび普通鉄筋を組合せた版)の衝撃荷重～中央変位曲線の比較を示す。また、図5にRC-35版の衝撃荷重の第1ピーク時(図4の衝撃荷重～中央変位曲線における最初のピーク点)までの変位分布の解析値と実験結果との比較を示す。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ピーク時からその後の除荷段階までは良く一致しており、RC版の衝撃破壊挙動のシミュレーションに利用できる。しかし、除荷段階後半および第2ピーク時の挙動は一致しているとはいえず、今後の検討が必要である。

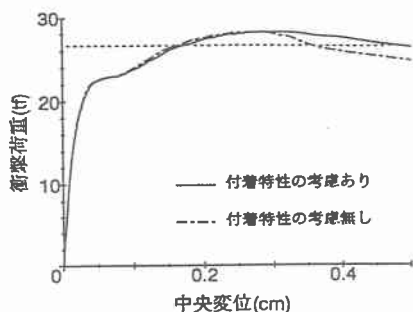


図2 衝撃荷重～版中央変位曲線の比較

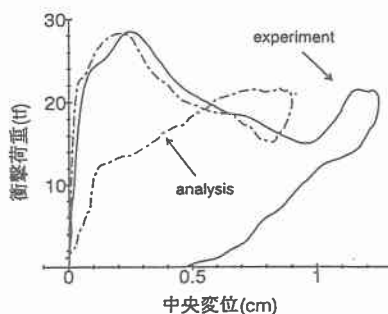


図4 衝撃荷重～版中央変位曲線の比較(RC-35版)

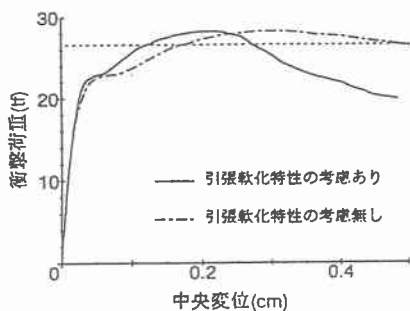


図3 衝撃荷重～版中央変位曲線の比較

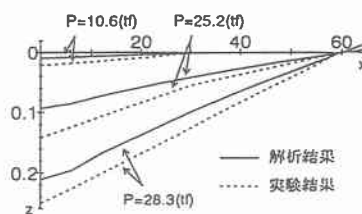


図5 変位分布の比較(RC-35版)

4. 結論

本研究で得られた主な結果とまとめると以下のようになる。

① 3次元FEM解析にひび割れ発生後のコンクリートの引張軟化特性およびコンクリートと鉄筋間の付着特性を考慮し、その効果を明らかにするとともに、これらの考慮が解析結果の改善に大きく貢献することを確認した。

② 3次元FEM解析結果は、実験結果と比較して衝撃荷重の載荷時から第1ピークと除荷付近まではよく一致しているが、その後の挙動には差が見られ、今後の検討が必要である。

【参考文献】 1) W.F.Chen, D.J.Han: Plasticity for Structural Engineers, Springer-Verlag, New York, 1988. 2) Bazant Z. P., Oh B. H.: Crack Band Theory for Fracture of Concrete, *Materiaux et Constructions*, Vol. 16, No. 93, pp. 155-177, 1983. 3) 宮本, 三戸, 北山: 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.