

I-A 97 立体骨組の複合非線形問題を対象とした動的解析システムの構成

東京工業大学大学院 学生員 有井一晃
 東京工業大学工学部 正 員 吉田 裕
 日本道路公団 児玉知之

1. はじめに

立体骨組が動的荷重を受ける際にどのような挙動を示すかを追跡しようとする場合、特にその非線形領域での評価法が問題となる。塑性域は部材内で連続的に進展するために、部材内に設けた積分点だけで弾塑性状態を判断する方法では現象の評価において不十分である。本研究では、部材要素を細分割して応力評価のための小領域を設定し、部材内部の局所的な弾塑性状態の判定を密にして、応力に直接的に関わる幾何剛性マトリックス及び内部節点力の評価精度を高め、解析の安定性、得られる解の信頼性を向上させる手立てを具体化している。大きな変形を考慮するための動的解析過程は、Bathe によって提案された解析方法¹⁾を基礎に、収束解を安定に求めるために α 法の考え方^{2) 3)}を導入し、立体骨組の複合非線形解析の信頼性向上を図っている。

2. 解析過程

解析過程は、部材の剛体回転変位の評価過程を導入して大変形問題の解析の高信頼度化を企み、曲げ及びねじれに伴う部材内部のせん断応力の影響を考慮するなどして高度化した静的解析過程⁴⁾を動的解析過程に拡張したものであるが、その概要を以下に示す。接線剛性マトリックスと不釣り合い力とで構成される非線形解析過程に、慣性項及び減衰項で表される力を考慮し、 α 法の考え方を導入することによって次式を得る。

$$(1 + \alpha[K_T]_{<I>})\{\Delta u_{(I)}\} = \{f_{ext}\}_{<I+\Delta t>} - \{f_{int}\}_{<I>} - [M]\{\ddot{u}\}_{<I+\Delta t>} - [C]\{\dot{u}\}_{<I+\Delta t>} + \alpha[K_T]_{<I>}\{\Delta u_{(I-1)}\} \quad (1)$$

式(1)に Newmark 法の直接時間積分公式

$$\ddot{u}_{<I+\Delta t>} = \ddot{u}_{<I>} + \Delta t \cdot [(1-\gamma) \cdot \ddot{u}_{<I>} + \gamma \cdot \ddot{u}_{<I+\Delta t>}] \quad (2)$$

$$u_{<I+\Delta t>} = u_{<I>} + \Delta t \cdot \dot{u}_{<I>} + \Delta t^2 \cdot \left[\left(\frac{1}{2} - \beta \right) \cdot \ddot{u}_{<I>} + \beta \cdot \ddot{u}_{<I+\Delta t>} \right] \quad (3)$$

を考慮することによって、以下のような動的問題を対象とする増分、収束計算の基礎式を構成することができる。

$$\left[(1 + \alpha[K_T]_{(I-1)}) + \frac{1}{\beta \Delta t^2} [M_{(I-1)}] + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} [C_{(I-1)}] \right] \{\Delta u^{(I)}\} = \{f_{ext}\}_{<I+\Delta t>} - \{f_{int}\}_{(I-1)} \\ - [M_{(I-1)}] \left\{ \frac{1}{\beta \Delta t^2} \{\Delta u_{(I-1)}\} - \frac{1}{\beta \Delta t} \{\dot{u}\}_{<I>} - \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \{\ddot{u}\}_{<I>} \right\} - [C_{(I-1)}] \left\{ \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \{\Delta u_{(I-1)}\} + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta} \right) \{\dot{u}\}_{<I>} - \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \Delta t \{\ddot{u}\}_{<I>} \right\} \quad (4)$$

ここでは、この式(4)を基礎としている。

3. 部材の剛体回転変位の評価と座標変換について

本研究では、部材座標系の1つの軸を常に部材の両端に設定される節点を結ぶ方向にとり、全体座標系における節点変位増分 $\{\Delta u\}$ と部材座標系における節点変位増分 $\{\Delta u^*\}$ との変換関係の評価に際しては、変形後の部材座標系と初期状態の部材座標系から剛体回転を評価し、それを分離して扱う方法をとっている。

4. 部材内に設けた応力評価小領域と幾何剛性マトリックスの評価過程

部材内の応力の分布状態をより詳細に追跡するために、図-1に示すように、各部材を軸方向、高さ方向、幅方向に細分割した小領域を設定し、小領域ごとに応力および弾塑性状態を評価する方法をとっている。それに伴い、被積分項に応力項を含む各部材要素の幾何剛性マトリックスは各小領域で体積積分を行う。小領域ごとの幾何剛性マトリックスは、ひずみ-変位

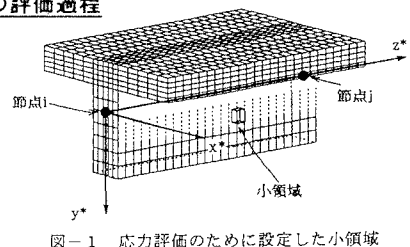


図-1 応力評価のために設定した小領域

の非線形項に対応する補完関数 $[B_N^*]$ と応力マトリックス $[\sigma]_{e,n}$ を用いて評価される。部材要素の幾何剛性マトリックス $[K_N]$ は、部材要素を z 軸方向に区切った横断面に関して、端点から m 番目の断面内における n 番目の小領域での幾何剛性マトリックスを $[K_N]_{[m,n]}$ とすると、

$$[K_N]_{[m,n]} = \int_{V[m,n]} [B_N^*]_{[m,n]}^T [\sigma]_{[m,n]} [B_N^*]_{[m,n]} dV_{[m,n]}, \quad [K_N] = \sum_m \sum_n [K_N]_{[m,n]} \quad (5),(6)$$

のように、断面内および軸方向に総和をとることによって評価している。部材内の局所的な曲げおよびねじれに伴うせん断応力も各小領域で評価し、幾何剛性マトリックスの評価に反映させている。

5. 解析過程の検証

深沢によって行われた鉛直下向きに等分布荷重を載荷した円弧アーチの理論解及び実測結果⁵⁾に対応する解析を行い、数値解析結果と比較した。モデルアーチの諸元は図-2に示す通りである。解析によって得られたアーチ頂点の面外方向変位と荷重との関係を深沢による実測結果とともに図-3に示す。また数値解析によって得られた固定端近傍の弾塑性分布を図-4に示す。

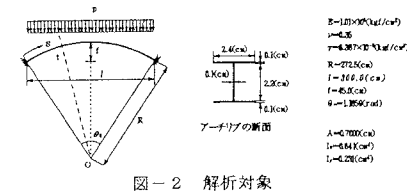


図-2 解析対象

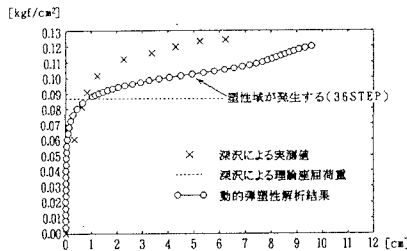


図-3 アーチ頂点の荷重-変位関係

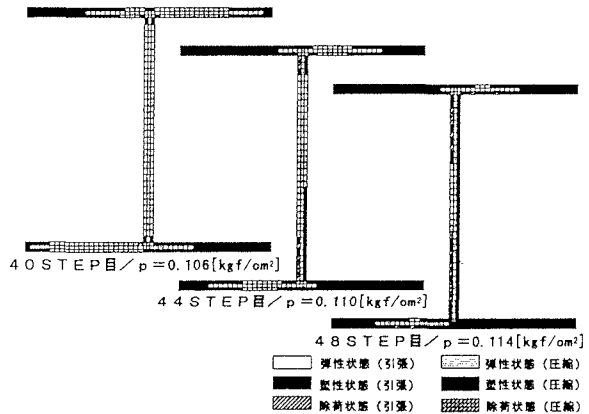


図-4 固定端近傍の塑性域の進展の様子

6. おわりに

以上に、立体骨組構造を対象として構成した動的複合非線形解析過程について説明をした。部材内の応力評価精度を高めるために、部材要素を細分割して応力評価小領域を設定するなど、解析の信頼性向上を企つたために、解析過程は相当複雑になり、解析の効率は犠牲になるが、信頼性の高い安定な解析法を構成することができた。

参考文献

- 1) Bathe, K.J. and Cimento, A.P. : Some Practical Procedures for the Solution of Nonlinear Finite Element Equations, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., pp.59-85, 1980.
- 2) H.M. Hilber, T.J.R. Hughes and R.L. Taylor : Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics, Earthquake Engrg. Struct. Dyn. 5, pp.99-118, 1978.
- 3) 吉田 裕、魚地征一郎 : 「非線形動的解析における直接時間積分の安定性向上に関する検討」 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集、日本鋼構造協会、第17巻 pp.525-530(1993.7)
- 4) 吉田 裕、松島亘志、中野 修 : 「立体骨組の複合非線形問題を対象とする汎用解析過程の高度化」 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集、日本鋼構造協会、第18巻 pp.301-306(1994)
- 5) 深沢泰晴 : 軸圧縮を受ける円弧アーチの曲げねじれ座屈に関する研究、土木学会論文集、第96号、pp.29-74, 1963.