

I - A26

三次元固体問題を対象とする複合非線形動的解析システムの構成

東京工業大学大学院 学生員 稲垣宏和

東京工業大学工学部 正 員 吉田 裕

東京都 藤原 新

1. はじめに

動的外力を受け、大きな変形や材料の非線形を伴って崩壊に至る構造物の三次元的な挙動を評価する、複合非線形解析を対象とする。本研究は、大きな回転を伴う変形を評価するために、変形後の要素座標系と初期状態の要素座標系から剛体回転変位を評価し、それを分離して扱い、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⁾を導入し、三次元固体問題の複合非線形解析の安定性、得られる解の信頼性の向上を目指して構成した、解法について報告するものである。

2. 動的解析過程の構成

接線剛性マトリックスと不釣り合い力とで構成される構造大変形解析のアルゴリズムに慣性項と減衰項を考慮して、動的な大変形解析過程を構成し、 α 法の考え方を導入することによって、式(1)のような関係式を得る³⁾。

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

式(1)に Newmark- β の直接時間積分公式を適用することによって、以下のような動的問題を対象とする収束計算のための解式が得られる。

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

この式(2)は、変位増分 $\{\Delta u\}$ を求めるための収束計算過程における、第(j-1)近似解から第(j)近似解を求めるための関係式である。

3. アイソパラメトリック 6 面体要素における幾何剛性マトリックス

三次元アイソパラメトリック 6 面体要素を基礎とする。非線形項に対応する、自然座標系に関するひずみ増分ベクトル $\langle \Delta \epsilon_N^* \rangle$ (式(3)) と変位増分の関係が、式(4)のように得られる。式(4)における補間関数 $[B_N^*]$ と、時刻 t での応力マトリックス $[\sigma_{(t)}^*]$ によって、幾何剛性マトリックスが、式(6)のように導出される。

$$\langle \Delta \epsilon_N^* \rangle = \left\langle \frac{\partial \Delta u_x^*}{\partial x^*}, \frac{\partial \Delta u_y^*}{\partial x^*}, \frac{\partial \Delta u_z^*}{\partial x^*}, \frac{\partial \Delta u_x^*}{\partial y^*}, \frac{\partial \Delta u_y^*}{\partial y^*}, \frac{\partial \Delta u_z^*}{\partial y^*}, \frac{\partial \Delta u_x^*}{\partial z^*}, \frac{\partial \Delta u_y^*}{\partial z^*}, \frac{\partial \Delta u_z^*}{\partial z^*} \right\rangle \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \{\Delta \epsilon_N^*\} &= [B_N^*] \{\Delta u^*\} \\ &= [B_{N1}^*] [B_{N2}^*] \cdots [B_{N8}^*]_{(9 \times 24)} \{\Delta u^*\} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} [K_N^*] &= \int_{V(t)} [B_N^*]^T [C_{(t)}^*]_{(9 \times 9)} [B_N^*]_{(9 \times 24)} dV_{(t)} \\ &= \sum_{i=1}^8 ([B_N^*]^T [\sigma_{(t)}^*] [B_N^*] \det([J]))_{(i, n_h, n_q)} H_i \end{aligned} \quad (6)$$

$$[B_N^*] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_a}{\partial x^*} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_a}{\partial x^*} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_a}{\partial x^*} \\ \frac{\partial N_a}{\partial y^*} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_a}{\partial y^*} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_a}{\partial y^*} \\ \frac{\partial N_a}{\partial z^*} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_a}{\partial z^*} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_a}{\partial z^*} \end{bmatrix} \quad (5)$$

非線形動的解析，三次元固体要素，幾何的非線形，高安定性

〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1 TEL 03-5734-2587

4. 要素の剛体回転の評価と座標変換

大きな回転を評価するために、要素内の3つの節点で定義される1つの面を要素座標系として、全体座標系における節点変位増分 $\{\Delta u\}$ と要素座標系における節点変位増分 $\{\Delta u^*\}$ の変換関係の評価において、変形後の要素座標系と初期状態の要素座標系から剛体回転変位を評価し、それを分離して扱う方法をとった（図-1）。

5. 解析過程の検証のための解析例

一定軸力下で繰り返し水平力を受けるH型鋼柱材に関する、松井らの実験結果⁴⁾に対応する解析を行い、比較した。松井らの実験の諸元を図-2に示す。

解析によって得られた荷重-変位関係を、松井らの実験結果と比較したものが図-3(a)である。図中に○印で示した荷重位置に対応する、固定端近傍の塑性域の分布を図(b)に示した。

6. おわりに

以上に、三次元固体問題を対象として構成した複合非線形動的解析過程について説明し、その検証のための解析例を示した。繰り返し载荷の場合には、解析の評価精度に、やや不満が残る。解析でとった、材料の等方硬化弾塑性モデルなどに、改善の余地が残されている。

参考文献

- 1) K.J.Bathe, A.P.Cimento: Some Practical Procedures For The Solution of Nonlinear Finite Element Equations, Computing Meth.Appl.Mech.& Engng.22, 59-85, 1980.
- 2) H.M.Hilber, T.J.R.Hughes, R.L.Taylor: Improved Numerical Dissipation For Time Integration Algorithms in Structural Dynamics, Earthq. Engng Struct. Dyn.5,283-292,1977.
- 3) 吉田, 魚地: 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.17, 301-306,1994.
- 4) 松井, 森野, 津田: 軸力と任意方向水平力を受けるH形鋼柱材の弾塑性性状に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第361号, pp.113~122, 1986.

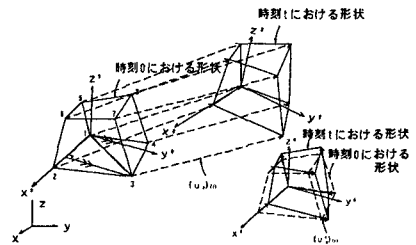


図-1 要素座標系に関する節点変位

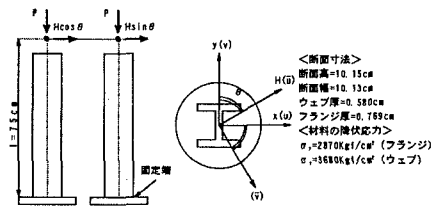


図-2 松井らによる実験の概要⁴⁾

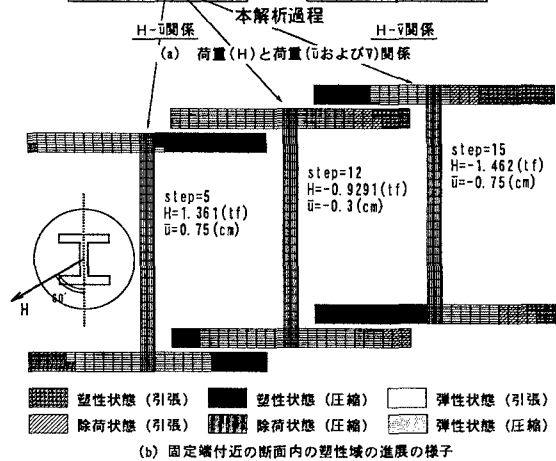
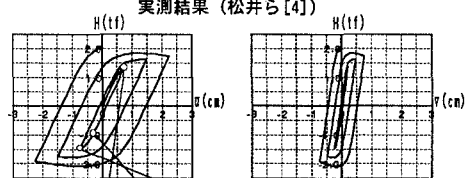
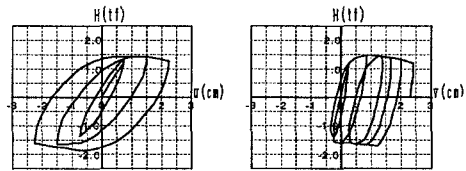


図-3 軸力と繰り返し水平力を受けるH型鋼柱材の複合非線形解析