

III-475 弾・粘塑性解析における6節点非線形ジョイント要素の時間ステップについて

NKK鉄鋼研究所  
 ウェスタンオンタリオ大学  
 ウェスタンオンタリオ大学  
 ウェスタンオンタリオ大学

正員 関口 宏二  
 R. K. Rowe  
 K. Y. Lo  
 小川 豊和

1 はじめに

粘塑性法は、計算効率が良く、数値安定性の優れた非線形解析手法であることが、広く認識されている。<sup>1), 2)</sup>粘塑性法を用いる場合には、計算が不安定にならないように、時間ステップの大きさを適切に決める必要がある。Euler法を適用する場合には、関連流動則に従う弾・完全塑性体については、時間ステップの大きさに関する理論的な安定基準が導かれている<sup>1)</sup>。しかし、地盤~構造物間の滑り・はく離現象を表現するジョイント要素については、そのような安定基準が確立されていなかった。6節点アイソパラメトリックジョイント要素(この要素は、性質の良い8節点アイソパラメトリック平面要素と適合する)の、時間ステップについて検討したので、ここに報告する<sup>3)</sup>。

2 6節点非線形アイソパラメトリックジョイント要素の定式化

Goodmanら<sup>4)</sup>のジョイント要素を拡張し、6節点アイソパラメトリックジョイント要素を定式化した(図1)。また、図2に示す、非線形な応力~ひずみ(相対変位)関係を表現できるように、Perzyna<sup>5)</sup>の粘塑性理論に基づき、粘塑性ひずみ速度を、式(1)のように定式化した。

$$(\dot{w}^{VP}) = \gamma \langle F_1 / F_{10} \rangle \frac{\partial F_1}{\partial \sigma} + \gamma \langle F_2 / F_{20} \rangle \frac{\partial F_2}{\partial \sigma} \quad F_1 = \tau_s \quad F_2 = \sigma_n \quad (1)$$

ここに、 $\gamma$  = fluidity parameter,  $F$  = 静的降伏関数,  $F_0$  =  $F$ の基準値。

3 時間ステップに関する安定基準

3.1 準理論的方法による安定基準

Stolle & Higgins<sup>6)</sup>が、準理論的に導いた一般的な安定基準を、2で定式化したジョイント要素に適用すると、安定基準は、式(2)のように導かれる。

$$\Delta t \leq \Delta t_{max} = \text{minimum} ( F_0 / (\gamma k_s), F_0 / (\gamma k_n) ) \quad (2)$$

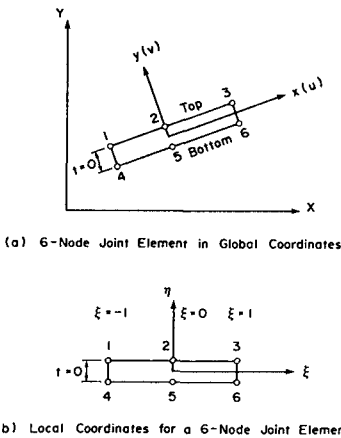


Figure 1 6-Noded Joint Element

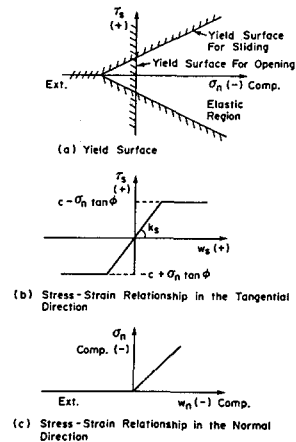


Figure 2 Schematic Representation of Sliding/Opening Joint Element

### 3.2 物理的考察に基づく安定基準

たとえば、図3に示す例題について考えてみる。粘塑性流動の開始時点において、算出される粘塑性ひずみ増分  $\Delta w^{vp}$  が、粘塑性流動において発生する全粘塑性ひずみを超えないための条件より、式(3)が得られる ( $p, q = \text{system stiffness reduction factor}, 0 \leq p \leq 1, 0 \leq q \leq 1$ )。

$$\Delta t \leq \Delta t_{lim} = \text{minimum} \left( F_0 / (\gamma \cdot p \cdot K_s), F_0 / (\gamma \cdot q \cdot K_n) \right) \quad \text{----- (3)}$$

### 4 安定基準の有効性の検証

3で導いた安定基準の有効性について、厳密解の得られる幾つかの簡単な問題によって検討した。

Model-Aは、図3に示すように、2つの弾性ジョイント要素と1つの非線形ジョイント要素より構成されている。また、Modelの上部が一体となって動くように、非常に剛性の高い梁要素が配されている。粘塑性解析に使用した時間ステップと、得られたジョイント要素のせん断応力・せん断変位の誤差の関係を図4に示した。同図より、 $\Delta t_{lim}$ が、最大許容時間ステップであり、 $\Delta t_{max}$ も良い結果を与えることが分る。なお、他の6種類の簡単な例題についても、同様な結論が得られた。<sup>3)</sup>

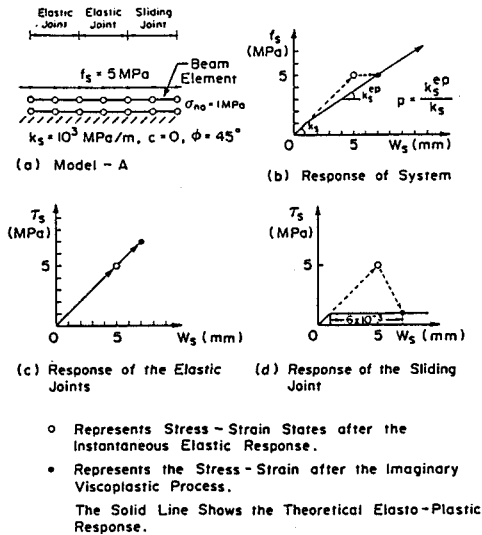


Figure 3 Test Model for the Sliding Mode (Model-A)

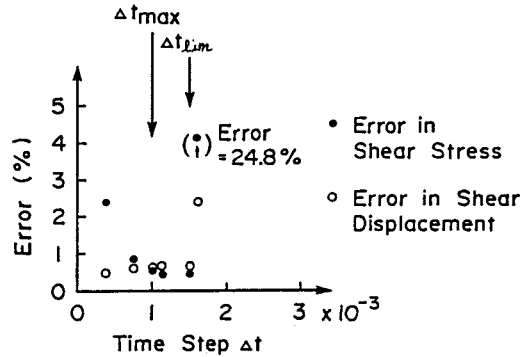


Figure 4 Variation in Error in the Sliding Joint with Time Step Size (Model-A,  $k_s = 10^3$  MPa/m)

### 5 おわりに

ここで紹介した安定基準は、種々の地盤～構造物系の解析においても良好な結果を与えている。なお、本研究は第一著者が、カナダ・ウェスタンオンタリオ大学に客員研究員として滞在中に行なった研究の一部であり、数値計算には、同大学の Cyber-930 および ETA10-P を使用したことを付記する。

### 参考文献

- 1) Zienkiewicz, O.C. & Corneau, I. (1974), Int. J. Num. Meth. Emgng., 8, pp.821-845.
- 2) 小林正樹 (1984), 湾技術研究所報告、第23巻、第1号、pp.82-101.
- 3) Sekiguchi, K. et al. (1990), Computers and Geotechnics, 10, pp.33-58.
- 4) Goodman, R.E. et al. (1968), ASCE, 94(SM3), pp.637-659.
- 5) Perzyna, P. (1966), Advan. Appl. Mech., 9, pp.243-337.
- 6) Stolle, D.F.E. and Higgins, J.E. (1989), NUMOG 3, pp.431-438.