

## ボイド損傷理論による材料劣化の 二次元変形解析

東北大学工学部

○学生員 内海 和仁

東北大学大学院工学研究科

正 員 中沢 正利

東北大学大学院工学研究科

正 員 岩熊 哲夫

### 1. まえがき

一般的な構造解析手法を用いる限り、構造部材のくり返し強度（例えば地震時）を弾塑性状態まで追跡しても、内部に蓄積された損傷や材料強度の劣化要因を考慮することは難しい。しかし、構造部材が過去に受けた損傷によって材料内部の空隙（ボイド）が拡大・合体することにより、結果として強度劣化が生じることを定性的に表現できるボイド損傷理論がある。この理論を応用することにより、地震荷重を受ける構造部材のくり返し強度や微細ひび割れ等の進展、溶接部分での材料強度の劣化を検討したり、長期間使用されてきた構造部材の寿命評価などへの発展性が期待される。しかし、ボイド損傷理論における材料定数の定量的評価法などはいまだ課題である。

本報告では、この損傷理論を適用した簡単な二次元変形解析を行ない、ボイド損傷理論で用いる材料定数の違いと剛性劣化の関係を示す。

### 2. ボイド損傷理論の概略

ボイドは、主に粒子界面の剥離あるいは粒子の破断によって発生し、周囲の母材の塑性ひずみの影響を受けて成長する。Gurson<sup>1)</sup>によって導かれた多孔質延性材料モデルは、ボイドが球体、あるいは円柱体であるという仮定のもとに成り立つ。これらのボイドの成長の割合は静水圧のレベルに強く依存しているので、ボイドの合体による母材の破断は、高いレベルの軸応力によって増進することがわかっている。ボイドを含む固体の挙動は、膨張性のある、圧力に敏感な連続体の塑性流れであるとし、ボイドの体積分率  $f$  を含む延性材料に対して、Cauchy 応力  $\sigma_{ij}$  と母材の相当引張流れ応力  $\bar{\sigma}_M$  を用いて、

$$\Phi(\sigma_{ij}, \bar{\sigma}_M, f) = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

という近似的な降伏条件を提案した。本研究では Gurson によって導かれ、さらに Tvergaard<sup>2)</sup>が改良した次の降伏関数を用いる。

$$\Phi = \frac{\bar{\sigma}^2}{\bar{\sigma}_M^2} + 2q_1 f \cosh \left\{ \frac{q_2}{2} \frac{\sigma_{kk}}{\bar{\sigma}_M} \right\} - (1 + q_3 f^2) = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中のパラメータは、 $q_1 = 1.5$ ,  $q_2 = 1$ ,  $q_3 = q_1^2$  にとると実験値との相関がよいと報告されている。また、 $f = 0$  の場合に von Mises の降伏条件と一致する。右辺第 2 項は降伏条件の静水圧依存性を表しており、ボイド体積分率  $f$  が大きいほど、あるいは静水圧が大きいほど、耐荷力が減少することがわかる。相当応力  $\bar{\sigma}$  と静水圧  $\frac{\sigma_{kk}}{3}$  の関係を図-1に示す。

ボイド体積分率  $f$  は、初めから存在していたボイドの成長と新しいボイドの発生によって変化する。さらに、ボイド体積分率が大きくなるとボイド同士の合体が考えられる。これらを全て含んだ形で、ボイド体積分率の増分  $\dot{f}$  は塑性ひずみ速度  $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$  を用いて以下のように表せる。

$$\dot{f} = (\dot{f})_{\text{growth}} + (\dot{f})_{\text{nucleation}} + (\dot{f})_{\text{failure}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$(\dot{f})_{\text{growth}} = (1 - f) G_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$(\dot{f})_{\text{nucleation}} = A \dot{\sigma}_M + B \frac{\dot{\sigma}_{kk}}{3} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$(\dot{f})_{\text{failure}} = \left( \frac{1}{E_t} - \frac{1}{E} \right) \frac{f_u - f_c}{\Delta \varepsilon} \dot{\sigma}_M \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $A$ ,  $B$ ,  $\Delta \varepsilon$  はそれぞれ材料定数、 $G_{ij}$  は計量テンソル、 $E$ ,  $E_t$  はそれぞれヤング率と接線弾性係数、 $f_u$ ,  $f_c$  はそれぞれ限界ボイド率とボイドの合体が始まる臨界ボイド率である。

### 3. 数値例

数値例として、平面ひずみ問題における剛体ポンチの押し込み解析を行った。初期降伏応力  $3200\text{kgf/cm}^2$  の等方硬化材料に対して、 $9000\text{kgf}$  の集中荷重を図-2に示すような半解析モデルの中央2点に作用させた。メッシュ分割は図のとおりで、周辺境界条件は固定とした。

本解析では、ポイド体積分率の増分式 (3) においてポイドの成長のみに着目し、ポイド体積分率  $f$  の初期値が異なる場合の剛性および変形の違いについて解析した。図-3に、集中荷重  $1500\text{kgf}$  を受ける節点での荷重-変位関係を示す。 $f$  値が高い方が勾配はゆるやか、すなわち剛性が低下して変位が大きくなることから、初期の  $f$  値が大きいくほど、塑性域に入ってから剛性低下は進みやすいという特性をうまく表している。

次に具体的分布状況として、初期の  $f$  値が  $f = 0.05$  である場合の変形と相当応力、ポイド体積分率の様子を図-4～図-6に示す。押し込み周辺部の局所変形が顕著に見られ、これに応じて相当応力とポイド体積分率も極端に集中していることが分かる。図-3と照らし合わせて考えると、初期の  $f$  値が高いほど分布密度が押し込み周辺部に偏るものと予想される。

最後に、今回はポイドの成長と初期の  $f$  値の変化による剛性低下を考察したが、このほかにもポイドの発生と合体、あるいはパラメータ  $q_1, q_2, q_3$  を始めとする式 (2) ～ (6) 中の材料定数に対する検討が数多く残されているので、今後のより詳細な実証的研究が必要と考えられる。

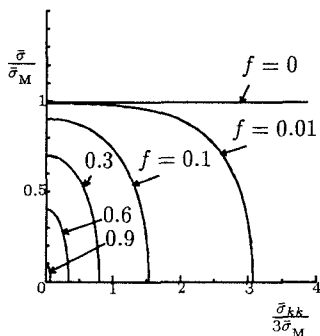


図-1 降伏曲面の静水圧依存性

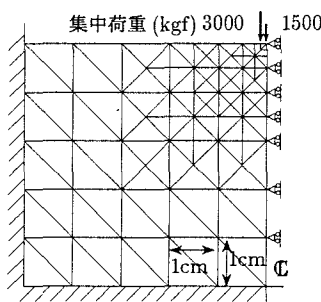


図-2 解析モデル

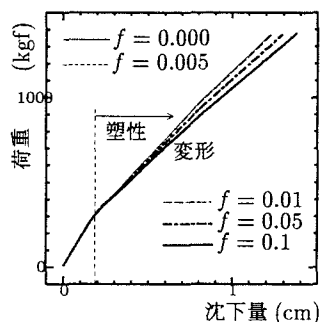


図-3 荷重-変位曲線

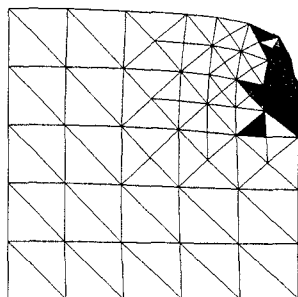


図-4 変形図 ( $f = 0.05$ )  
(影付き部分が塑性変形)

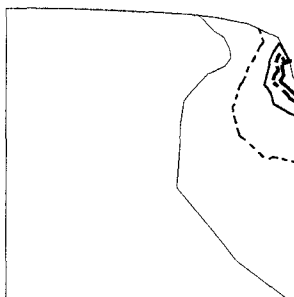


図-5 相当応力分布 ( $f = 0.05$ )  
(等高線は  $1000 \sim 6000\text{kgf/cm}^2$ )

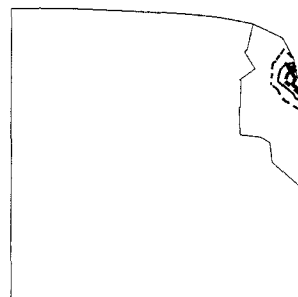


図-6 ポイド体積分率分布 ( $f = 0.05$ )  
(等高線は  $0.05 \sim 0.25$ )

### 参考文献

- 1) Gurson, A.L.: Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth/part I-yield criteria and flow rules for porous ductile media, *J. Eng. Materials Technol.*, Vol.99, pp.2-15, 1977.
- 2) Tvergaard, V.: Influence of void nucleation on ductile shear fracture at a free surface, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.30, pp.399-425, 1982.