

東北大学大学院工学研究科	○ 学生員	山崎 誠幸
東北学院大学工学部土木工学科	正 員	中沢 正利
東北大学大学院工学研究科	正 員	岩熊 哲夫

繰り返し荷重を受ける材料の破壊挙動について、一般的には通常状態での高サイクル繰り返し荷重に起因する疲労破壊が考えられるが、先の兵庫県南部地震の被害では、わずか数回程度の非常に大きな塑性変形によるひび割れ・破断が観測され、構造物の耐震設計におけるこうした破壊様式の重要性が新たに認識された。

今後、構造物の設計においてこのような破壊も考慮していく必要があると考え、数値解析の方面でもこの現象を追跡できるようにすることが望ましい。そこで本研究では、塑性変形を伴うごく低サイクルの繰り返し荷重によって材料中に重度の損傷が蓄積され破壊に至るという現象を取り上げ、ボイド（材料中に無数に存在すると考えられる微視的空隙）による損傷理論を導入した構成則を用いて数値解析を行い、上記の現象を解析する上でのこの手法の有効性を検討する。

Gurson¹⁾は、ボイドを含んだ固体の挙動は、膨張性があり、圧力に敏感な連続体の塑性流動に従うとし、多孔質延性材料に対してボイド体積分率 f を導入した $\Phi(\sigma_{ij}, \sigma_M, f)=0$ の形式からなる降伏条件を提案した。ここで、 σ_{ij} は Cauchy 応力テンソル、 σ_M は母材の相当引張り応力（但し、初期降伏以前は初期降伏応力 σ_Y と同等）である。その後、Tvergaard²⁾は、ボイドを含む延性材料の引張り試験結果と Gurson の降伏関数を組み込んだ数値解析結果とを比較し、新たに実験値に基づく定数パラメータ q_1, q_2, q_3 を導入した次式を提案した。

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

材料中のポイド体積分率は、初期状態から存在するポイドの成長と、負荷による材料の変形に伴って新たに形成されるポイドの和で表される。さらに、ポイド体積分率がある程度の割合に達すると、隣り合うポイドが結合して材料が破壊に向かうという現象に発展する。これら全てを考慮すると、 f は次のような増分形式で表される。

$$\dot{f} = (\dot{f})_{\text{growth}} + (\dot{f})_{\text{nucleation}} + (\dot{f})_{\text{failure}} \quad (2)$$

このうち、式中の右辺第三項は f の値が臨界値 f_c に達するまでは 0 であり、その後値を持つようになる。この臨界値については、既往の研究により一般的に妥当とされている $f_c=0.15$ の値を用いた。

解析対象構造物の例としては、横方向の繰返し荷重を受けた際に主として抵抗する橋脚断面の板部材が挙げられる。これを具体的にモデル化したものを図-1に示す。このような構造物部材は、施工時に受けた損傷や、長期にわたる死荷重および活荷重の影響で材料内部に様々な損傷を蓄積しており、これが地震等により大きな塑性変形を伴う繰返し載荷を受けると材料内部の損傷が一気に増大し、ごく低サイクルの繰返し変形で破壊に至ると考えられる。

先に述べた材料中にもともと存在する損傷を‘初期損傷 f_1 ’と定義し、この f_1 と横方向の振れ幅、それに縦横比を変化させて平面応力条件下で数値解析を行い、その結果を比較検討する。この際、モデルには図-1の x 軸方向に正負交番変位を繰り返し与えた。

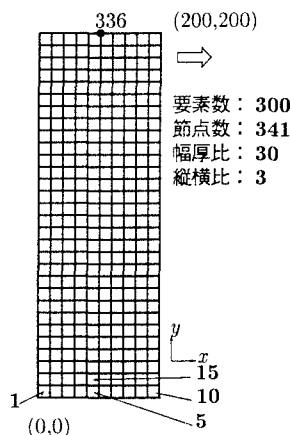


図-1 要素モデル (縦横比 3)

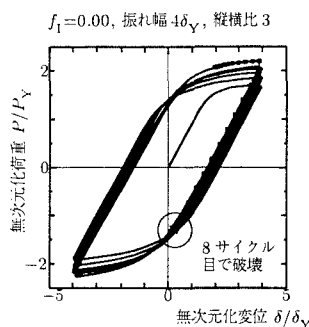


図-2 荷重-変位曲線

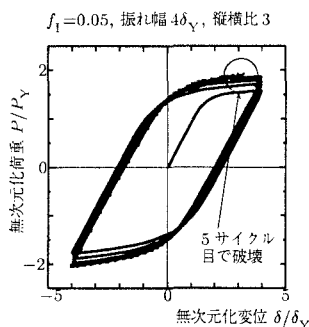


図-4 荷重-変位曲線

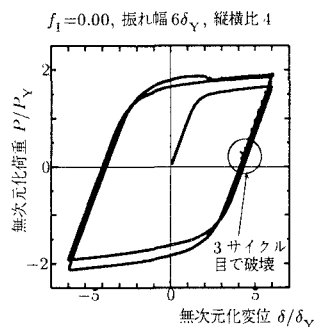


図-6 荷重-変位曲線

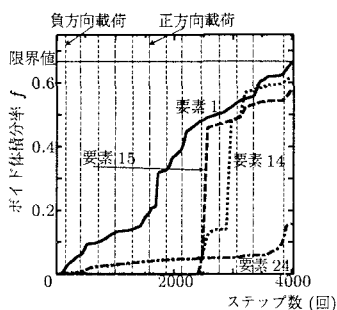


図-3 要素ごとのボイド増加の比較

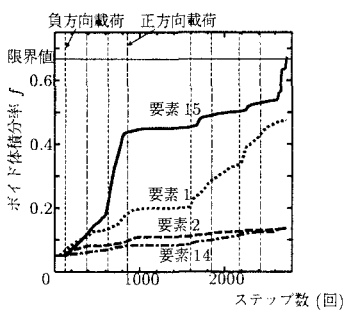


図-5 要素ごとのボイド増加の比較

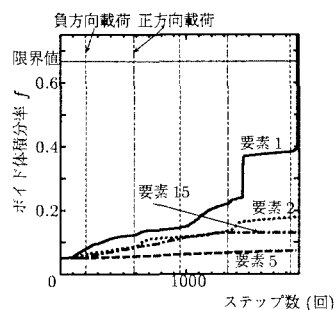


図-7 要素ごとのボイド増加の比較

4. 数値解析結果

結果を図-2 から図-7 に示す。図は全て上下一組であり、上段が荷重-変位のループ曲線、下段が各要素ごとのボイド増加の様子を示している。解析時の諸条件はそれぞれ図の最上部に示してあり、下段の図中の実線が最初に破壊（図中の限界値、式 (1) から理論的に求まる $f=2/3$ に至った時点点を破壊と定義する）に至った要素を表す。

まず、図-2 と図-4 を比較することで、初期損傷 f_1 が大きければより少ない繰返し载荷回数で材料が破壊に至る現象が確認できる。ボイドは f が臨界値 ($f_c=0.15$) に達して以降急速に増加する傾向にあり、 f_1 が大きければその分破壊が早まるのは妥当である。紙面には示していないが、これらと等しい f_1 で振幅を大きくした場合でも、それに伴って破壊に至るまでのサイクル数は減少した。 f_1 および振幅を大きくすればそれだけ少ないサイクル数で壊れることが分かり、この点で定性的な評価ができていられると考えられる。また、図-4 と図-6 では破壊に至る直前で材料の軟化傾向を見ることができた。等方硬化条件で解析したにも関わらずこうした現象を数値的に追跡できたことは、本研究の重要な特徴といえる。

次に、材料中の f の分布状況より、特に f の値が大きかった要素について示した図-3、図-5、図-7（要素番号については図-1 を参照）より分かるように、最初に引っ張り荷重を受ける要素 1 と、主としてせん断による負荷を受ける中央下部の要素で f の値が卓越する傾向が見られた。また、図-7 からは、縦横比を増すと左下端にかかる曲げモーメントの割合も増すため、縦横比が小さい場合に比べて要素 1 および 2 の f が主に増加することが分かった。なお、これらの図より、材料が軟化傾向を示すのは、材料中で主に荷重を受けている要素の f の値が 40% 程度に達して以降からだといえる。

5. 総括

前節で述べた結果から、今後さらに移動硬化則の導入やプログラムの 3 次元化によってより精度の高い解析を行う必要があるものの、材料中の損傷の蓄積から、耐荷力の喪失という意味での破壊に至るまでを一つの構成則で解析可能であるという利点から、ごく低サイクルでの疲労現象を解析する上での有効な手段の一つと考えられる。

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. Material Technol.*, Vol. 99, pp.2-15, 1977.
- 2) Tvergaard, V. : Material fracture by void growth and coalescence, *Adv. Appl. Mech.*, Vol. 27, pp.83-151, 1990.