

谷村一三村構成式を用いた金属材料の大変形・破壊シミュレーション

○阿部 淳、片山雅英 (伊藤忠テクノソリューションズ)、谷村真治 (愛知工科大学)

Numerical Simulations on Large Deformation and Fracture of Metals by Using Tanimura-Mimura Constitutive Model

ABE Atsushi, KATAYAMA Masahide

ITOCHU Techno-Solutions Corporation, Kasumigaseki Bldg., 3-2-5, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo, 100-6080, JAPAN

TANIMURA Shinji

Aichi University of Technology, 50-2, Manori, Nishihassama-cho, Gamagori-shi, Aichi, 443-0047, JAPAN

Abstract

Tanimura-Mimura constitutive model covers a wide range of strain rates, large deformation, and enables us to use unified or common material constants to describe the dynamic behavior of grouped materials. In this paper, by implementing this model into a hydrocode ANSYS AUTODYN, high speed tensile tests and buckling tests are numerically simulated. Obtained numerical results are in good agreement with the experimental ones and the validity of the model has been demonstrated.

Key Words : Constitutive model, Dynamic Material Testing, Buckling, Strain rate, Numerical code, AUTODYN

1. はじめに

材料構成式に含まれる材料定数は一般に個々の材料に固有である。さらにひずみ速度依存性を反映するためには、対象となるひずみ速度の範囲に対応した動的な材料試験を実施するか、文献調査を行い、動的な材料定数を決定しなければならない。この作業は材料毎に行う必要があり、多くの時間と労力を要する。

谷村一三村構成式では、ひずみ速度依存性に係わる材料定数がアルミ系、鉄鋼系等の材料グループ毎に特定値になることに着目し、材料の動的特性に対する簡便な対処方法を提案している。評価対象となる材料の準静的な応力-ひずみ関係をユーザーが用意するだけで、そのグループに属するひずみ速度依存性の関係を適用することによって、その材料のひずみ速度依存性を模擬することができる。また、本構成式は、広範なひずみ域、高ひずみ速度域及び高温域をカバーしており、応用範囲が広い。特に自動車衝突や各種プレス加工時に発生するひずみ速度 ($\sim 10^3/s$) に対応している⁽¹⁾。

本論文では、谷村一三村構成式を衝撃解析ソフトウェア ANSYS[®] AUTODYN[®] に導入し、高速引張試験及び衝撃座屈試験の数値シミュレーションを行うことにより、鉄鋼系材料に対する本構成式の検証を行った。

2. 谷村一三村構成式

本構成式の定式化法は以下のように示される⁽¹⁾。

$$\sigma = \sigma_s + \left[\alpha \cdot (\varepsilon^p)^{m1} + \beta \right] \cdot \left(1 - \frac{\sigma_s}{\sigma_{CR}} \right) \cdot \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_s^p} \right) + B \left(\frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_u} \right)^{m2} \quad \dots \text{式(1)}$$

ここで、 σ は流動応力、 ε^p は相当塑性ひずみ、 $\dot{\varepsilon}^p$ は相当塑性ひずみ速度である。右辺第一項は準静的ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_s^p$ 時の準静的応力 σ_s を示す。準静的な応力-ひずみ曲線はユーザーが用意する。第二項は流動応力増加分がひずみとひずみ速度の関数であることを示す。 $\sigma_{CR} (= \tau_{CR})$ は単軸負荷における材料の限界強度であり、 $\tau_{CR} = G/30$ と仮定する。 G は剛性率である。 α 、 β 及び $m1$ は材料グループ固有の値である。第三項は高ひず

み速度域における粘性項である。 B は準静的応力 σ_s 及びひずみ ε^p に依存した材料グループ固有の関数、 $m2$ は材料グループ固有の値、 $\dot{\varepsilon}_u$ は単位ひずみ速度 ($=1/s$) を示す。

3. 高速引張試験の数値シミュレーション

試験装置に取り付けられた試験片のゲージレングス部 (長さ 5mm、断面 2mm×1mm) を 3次元 Lagrange ソルバーでモデル化した。メッシュサイズは 25 μ m とした。モデル端面にそれぞれ固定境界条件、ひずみ速度 1000/s に相当する速度 5m/s の一定速度境界条件を適用した。試験片材料は SPCC (冷間圧延鋼板) であり、準静的応力-ひずみ曲線は、ひずみ速度 0.01/s に相当する引張試験を実施して得られた。材料モデルとしては、ミーグルナイゼン型線形衝撃ユゴニオ状態方程式、谷村一三村構成式、試験で得られた塑性ひずみ 180%で破断する破壊則を適用した。

図 1 に SPCC 試験片の応力-ひずみ関係を示す。試験では約 20%ひずみまでの連続均一変形域と 180%ひずみまでの真破断領域での計測を行った。図中の四角は破断計測点、○印はくびれ開始後の間欠的計測点を示す。黒破線、灰色点線及び黒実線はそれぞれ準静的な応力-ひずみ曲線、式(1)によるひずみ速度 1000/s の理論曲線及び AUTODYN での解析結果を示す。理論曲線と解析結果は良く一致していることがわかる。解析結果の曲線が理論曲線より若干高いのは、くびれ部において部分的に 1000/s 以上のひずみ速度が発生しているためである。

図 2 に破断した試験片形状を示す。試験結果の図中の黒線は初期に全体長さが 5mm であった領域を示しており、全体長さが約 7.2mm の時点で中央左寄りにて破断した。解析結果の上図は材料状態図であり、濃灰色は破壊領域、それ以外は弾性領域を示す。なお、破断後の応力緩和によって塑性域が弾性に戻ったため、図中に塑性域は存在しない。下図は相当塑性ひずみコンター図である。試験結果と比較すると、破断位置が異なるものの破断時のくびれ形状はよく一致している。また、解析結果の破壊領域を除いた全体伸びは約

7.5mmであり、約4%の誤差で一致している。なお、メッシュサイズを粗くした場合、全体の伸びが8mmを超えても破断に至らない。試験結果と同様にひずみ180%で破断するためには、試験片に対して十分細かいメッシュサイズを設定しなければならない。

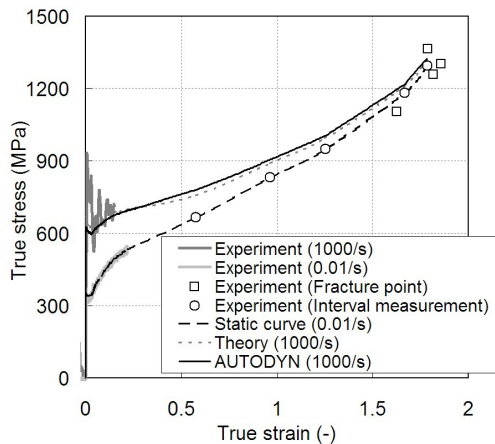
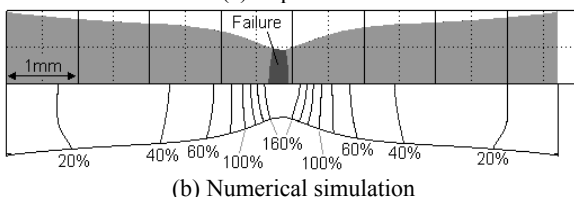
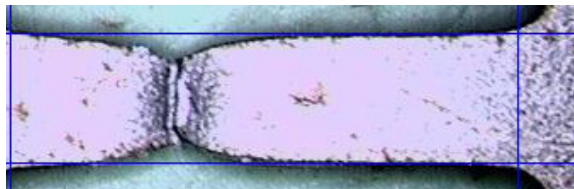


Fig. 1 True stress-true strain curve of SPCC specimen



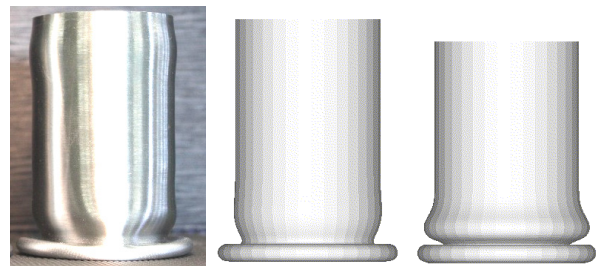
(Upper: Material status, Lower: Effective plastic strain)
Fig. 2 Fractured shape of SPCC specimen

4. 衝撃座屈試験の数値シミュレーション

中空鋼管に対する衝撃座屈試験では、質量・体積が十分大きな実験装置の円柱形基部上に、材質 SS400、直径約 45mm、厚さ約 2mm、長さ 100mm の中空鋼管を設置、質量 90kg の重錘を高さ 2.66m から自由落下させて、円管に垂直に衝突させた。このとき、上部ブロックの検出部によって衝撃力及び変位を計測した。数値シミュレーションでは、2次元軸対称体系を用いてモデル化を行った。中空鋼管に対しては、厚さ方向 4 分割、長さ方向 200 分割の Lagrange ソルバーを適用した。重錘は自由運動する剛体とし、高さ 2.66m を自由落下した場合の速度 7.22m/s を初期速度として与えた。基部は剛体境界条件を適用した。

中空鋼管の構成モデルとしては、静的引張試験から得られた準静的な応力-ひずみ曲線をそのまま用いた準静的構成モデル (Static) と、その静的曲線に対してひずみ速度依存性を考慮した谷村-三村構成式 (T-M) の 2 種類を適用し、比較を行った。状態方程式としては、ミーグルナイゼン型線形衝撃ユゴニオ状態方程式を共通に適用した。破壊則については試験結果から破壊部分が認められなかったため、適用外とした。

図 3 に試験後の中空鋼管の外観を示す。数値解析結果は 2次元結果を 3次元的に表示したものである。(a) が試験結果、(b)及び(c)が谷村-三村構成式及び準静的モデルによる数値解析結果である。どの結果も底部で大きく圧潰しており、定性的な一致が見られる。試験後の円管長さを比較すると、準静的モデルでは試験結果よりも約 9%短く評価したが、谷村-三村構成式では 1%以内の誤差で試験結果と一致した。図 4 に重錘の荷重-変位関係を示す。初めの立ち上がりで試験結果が傾きを持つのは重錘が若干傾いて試験片に衝突したためと考えられる。解析結果は理想的な軸対称解析であるため、この傾きは表現されていない。試験結果と解析結果を比較すると、準静的モデルは材料を比較的柔らかく評価しているのに対して、谷村-三村構成式は試験結果と良く一致している。谷村-三村構成式ではひずみ速度依存性によって生じる材料硬化を良く模擬していることが示された。



(a)Experiment (b)AUTODYN(T-M) (c)AUTODYN(Static)
Fig. 3 Final shape of SS400 specimen after impact

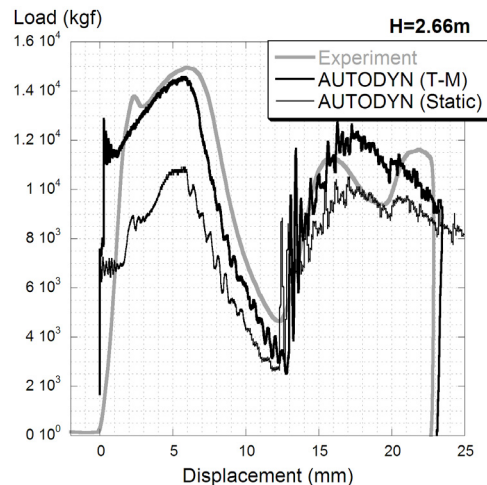


Fig. 4 Load-displacement curves of the hummer

5. まとめ

衝撃解析ソフトウェアに導入した谷村-三村構成式を用いて、高速引張試験および鋼管座屈試験を数値模擬した。対象となる材料の準静的応力-ひずみ曲線を用意するだけで、その材料のひずみ速度依存性を容易に表現できることを実証した。解析結果は実験結果と良く一致し、本構成式の妥当性を示すことができた。今後の予定としては、アルミニウム等の他の材料グループに対する検証解析を行う。また、この構成式を他の衝撃解析コードへの導入も行っていく。

参考文献：(1) 谷村真治、三村耕司、楳田務、広ひずみ速度域を対象とした各種材料グループに適用し得る実用構成式、材料、Vol. 50、No. 3、pp. 210-216、2001