

G0300-6-3 広ひずみ速度域・大変形域を対象とした谷村・三村の構成モデルの LS-DYNA[®] への組込みとその検証解析

Implementation of the Tanimura-Mimura's Constitutive Model Covering a Wide Range of Strain Rate and Strain into LS-DYNA and It's Verification Analysis

○正 津田 徹 (CTC) 正 阿部 淳 (CTC)
正 谷村 眞治 (愛知工科大学)

Toru Tsuda, ITOCHU Techno-Solutions Corporation, 3-4-30 Miyahara, Yodogawa-ku, Osaka
Atsushi Abe, ITOCHU Techno-Solutions Corporation, 3-2-5 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo
Shinji Tanimura, Aichi University of Technology, 50-2 Umanori, Nishihasama-cho, Gamagori, Aichi

Tanimura-Mimura constitutive model covers a wide range of the strain rates and of a large strain, and enables us to use unified and common material constants to simulate the dynamic behaviors of materials and/or bodies. In this paper, dynamic behaviors of high speed tensile tests and crash test of a full vehicle are simulated by implementing this model in LS-DYNA. Obtained numerical results are in good agreement with the experimental ones and the validity of the model has been demonstrated.

Key Words: Dynamic Strength, Stress-strain curve, Strain rate sensitivity, Constitutive model

1. 緒言

材料の速度依存性を考慮する代表的なモデルに、Cowper-Symonds モデルや Johnson-Cook モデルなどがある。これらのモデルでは、動的な材料試験や文献調査により、対象とする材料の材料パラメータ値を求めなければならないことや、鉄系などの強度のひずみ速度依存性の的確な表現は困難であることなどの問題が指摘されている¹⁾。

一方、谷村らによって導出された谷村・三村構成モデル^{2),3)}の特徴は、均質変形域から破壊を伴う大ひずみ域にわたり、 $10^2 \text{ s}^{-1} \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ の広いひずみ速度域の挙動を高精度に表すことができること、また、谷村らによって求められた、鉄系、アルミニウム系、銅系といった材料グループ毎の材料パラメータと、対象材料の準静的時の応力-ひずみ関係を用意するだけで、材料強度のひずみ速度効果を考慮した解析が簡単に行えることである。

阿部らは、この谷村・三村モデルを衝撃解析ソフトウェア ANSYS[®] AUTODYN[®] に導入し、幾つかの検証解析により谷村・三村モデルの有効性を報告している⁴⁾。著者らは、この谷村・三村構成モデルを衝撃解析コード LS-DYNA[®] にユーザサブルーチンを用いて組込みを行い、鉄鋼系材料について高速引張問題と円筒の座屈問題に谷村・三村モデルを適用し、試験結果との比較検証を行い、同様にその有効性を報告した⁵⁾。今回は、アルミ合金材について高速引張問題による検証を行ったので、その結果について報告する。

2. 谷村・三村の構成モデル

2-1 概要 谷村・三村のひずみ速度依存の構成モデルは次式で示される^{2),3)}。

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

右辺第一項は準静的応力、第二項はひずみ速度に依存する流動応力の増分、第三項は高ひずみ速度域での流動応力の増分（ここでは、粘性項と呼ぶ）を表す。ここで、 σ は流動応力、 ϵ^p は相当塑性ひずみ、 $\dot{\epsilon}^p$ は相当塑性ひずみ速度、 $\dot{\epsilon}_s^p$ は準静的時の相当塑性ひずみ速度であり 10^2 s^{-1} としている。 ϵ^u は

単位ひずみ速度 ($=1 \text{ s}^{-1}$)、 σ_{CR} は単軸負荷における材料の限界強度、 α , β , $m1$, $m2$ は各材料グループ固有の材料パラメータ、 B は流動応力に付加される粘性項の係数であり、各材料グループ固有の関数である。

2-2 LS-DYNA への組込み 谷村・三村構成モデルの LS-DYNA への組込みは、LS-DYNA のユーザ定義材料モデルの機能を用いて行われた。ここで、各材料グループに共通な谷村・三村モデルのパラメータのセットは、ユーザプログラム内に埋め込まれているので、谷村・三村モデルへの入力には、適用する材料が属するグループの ID 番号、ヤング率、ポアソン比、準静的時の応力-ひずみ関係だけで良い。なお、現在、このモデルは、鉄系とアルミニウム系材料について、ソリッド要素とシェル要素に適用することが出来る。

3. アルミ合金製テストピースの高速引張問題による検証

検力ブロック式高速試験機装置を用いて谷村らによって行われたテストピース（材質 A6061P-T6）の高速引張試験³⁾について検証を行った。図 1 に解析モデルを示す。解析は、実験で使用されたテストピースのゲージレングス部（長さ 5mm、幅 2mm、厚さ 2mm）とし、境界条件として、モデルの端面にそれぞれ固定境界条件とひずみ速度 10^3 s^{-1} に相当する一定の引張速度境界条件 ($V=5 \text{ m/s}$) を与えた。

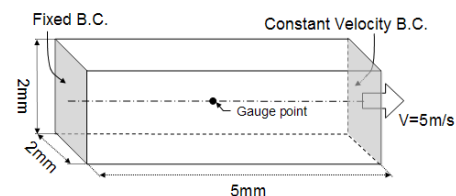


Fig. 1 Analysis model

図 2 と図 3 に、実験および谷村・三村モデル (T-M モデル) を適用した解析による、試験片の破断時（破断ひずみ：60%）のくびれ形状（図の左側）と横断面形状（図の右側）をそれぞれ示す。T-M モデルによる解析と試験による破断時のくびれ形状と破断面形状は非常によく一致している。ここで、実

験と解析における破断時の横断面積は 2.393mm^2 と 2.338mm^2 であり、その誤差は約2.3%である。これより、谷村・三村モデルが、破断ひずみ領域でも高精度に動的変形挙動を近似できることが判る。

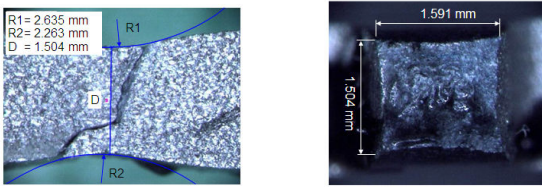


Fig. 2 Test piece shape of experiment

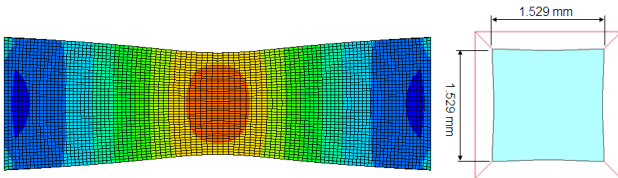


Fig. 3 Test piece shape of simulation

図4に試験と解析によって得られた真応力-真ひずみ関係を示す。また、図5は解析におけるネッキング部中央の要素の相当塑性ひずみ速度と相当塑性ひずみの関係である。

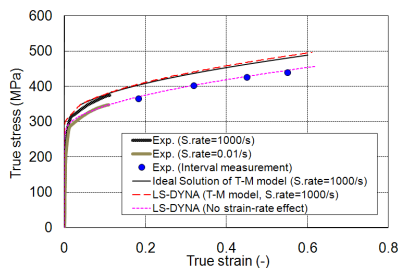


Fig. 4 Stress-strain curves

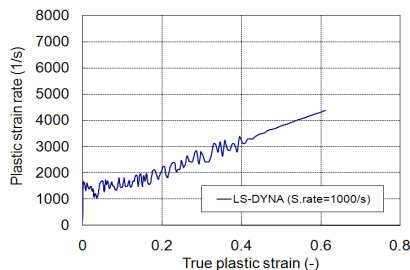


Fig. 5 Plastic strain rate curve

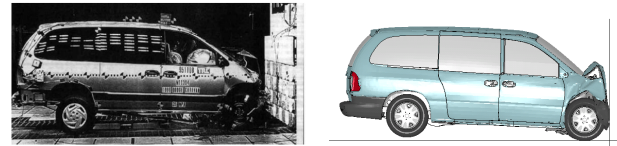
ここで、図4の太灰色線と太薄灰色線は、ひずみ速度が 10^3 s^{-1} 時および準静的時における、ネッキング発生前の均一変形域での測定結果である。●印は、準静的変形時において、ネッキング開始後から各変形時点で、ネッキング部の断面寸法を計測して求められたものである。破線は、T-Mモデルを適用した解析結果であり、ネッキング部中央の要素の出力値である。点線は、ひずみ速度の効果を無視した解析結果である。実線は、式(1)に、直接、A6061P-T6の準静的時の応力-ひずみ関係と、アルミ合金用の材料パラメータ値を代入し、一定のひずみ速度 10^3 s^{-1} を仮定したときの曲線である。ここで、実測結果(太灰色線)、再現曲線(実線)および解析結果(破線)はかなり良く一致しており、谷村・三村モデルが、均質変形域から破断域までの広いひずみ域において、ひずみ速度の影響を高精度に近似できていることが判る。なお、ひずみ速度が 10^3 s^{-1} の結果において、解析結果が再現曲線より僅かに高いのは、図5に示すように、ひずみが集中するネッキン

グ部では見かけのひずみ速度 10^3 s^{-1} 以上のひずみ速度が発生しているためである。

4 自動車の衝突問題への適用

アメリカのFHWA/NHTSAで実施されたDodge Grand Caravan 1997の前面衝突試験⁶⁾に谷村・三村モデルを適用し、試験結果およびCowper-Symondsモデル(C-Sモデル)による解析結果と比較した。ここで、バリアへの衝突速度は56.2 km/hである。解析ではバリアは剛体とした。

図6に衝突時の変形形状を示す。(a)が試験結果、(b)がT-Mモデルを適用した解析結果である。両者の変形モードは良く一致している。



(a) Test

(b) LS-DYNA

Fig. 6 Full-lap front impact of Caravan

図7はバリアが受ける反力の時間履歴曲線である。実線が試験結果、点線がC-Sモデルを適用した解析結果、薄太線がT-Mモデルを適用した解析結果である。C-SモデルとT-Mモデルの結果は、実験よりピーク値が約15~20%程度低くなっているが、C-SモデルとT-Mモデルの結果は良く一致している。ここで、C-Sモデルでは必要となる材料パラメータ値が、T-Mモデルでは必要ないこと等を考えると、谷村・三村モデルは高精度であるだけでなく、利便性も高いことが判る。

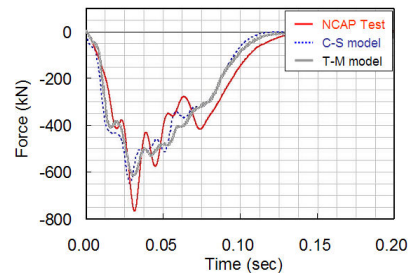


Fig. 7 Wall force

5. 結言

谷村・三村構成モデルをLS-DYNAに組み込み、アルミ合金のテストピースの高速引張問題により検証を行った。また、自動車のフルラップ衝突問題に適用した。その結果、谷村・三村モデルが、対象となる材料の準静的時の応力-ひずみ関係を用意するだけで、大ひずみ域にわたり、容易かつ高精度にひずみ速度依存性を表現できることを実証した。

参考文献

- 1) 林寛幸, 野中登, 黄新民, 山本照美, 自技会論文集, Vol.37, No.5, pp.155-160, (2006).
- 2) 谷村眞治, 三村耕司, 榎田務, 材料, Vol.50, N0.3, pp.210-216, (2001).
- 3) S.Tanimura, H.Hayashi, T.Yamamoto and K. Mimura, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.3, No.12, pp.1263-1273, (2009).
- 4) 阿部淳, 片山雅英, 谷村眞治, 平成20年度衝撃波シンポジウム講演論文集, pp.171-172, (2007-3).
- 5) 津田徹, 阿部淳, 片山雅英, 榎原辰雄, 谷村眞治, 日本材料学会第59期学術講演会講演論文集, pp.449-450, (2010-5).
- 6) http://crash.ncac.gwu.edu/pradeep/NCAP/caravan_ncap.pdf.