

714

谷村・三村構成式の LS-DYNA®への組み込みとその検証解析

伊藤忠テクノソリューションズ ○津田徹, 阿部淳, 片山雅英, 榊原辰雄
愛知工科大学 谷村眞治

Implementation of the Tanimura-Mimura's Constitutive Model into LS-DYNA and its Verification Analysis

Toru TSUDA, Atsushi ABE, Masahide KATAYAMA, Tatsuo SAKAKIBARA, Shinji TANIMURA

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⁾。

谷村・三村構成モデル^{2), 3)}の大きな特徴は、ひずみ範囲として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。

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み込みを行った。そして、高速引張問題および円筒の衝撃座屈問題、更に、自動車のフルラップ衝突問題に適用し、その有効性と実用性の検証を行った。

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)}。

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

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。 $\dot{\epsilon}_u$ 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、 $\alpha, \beta, m1, m2$ 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 への組み込み 谷村・三村構成モデルの LS-DYNA への組み込みは、LS-DYNA のユーザ定義材料モデルの機能を用いて行われた。谷村・三村モデルの使用は、*MAT_USER_DEFINED_MATERIAL_MODELS を用い、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-ひずみ関係をを入力する。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 検証解析

3.1 テストピースの高速引張問題 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 SPCC）の高速引張試験³⁾について検証を行った。解析モデルは、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 1mm）

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 と Fig. 2 に、実験と谷村・三村モデル (T-M モデル) を適用した解析で得られた、試験片の破断時（破断ひずみ：180%）におけるくびれ形状（図の左側）と横断面形状（図の右側）をそれぞれ示す。T-M モデルによる解析結果は、破断位置が実験と異なるものの、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ゲージ長はそれぞれ 7.188mm と 7.06mm であり、誤差は約 1.8%、破断時の横断面積は 0.351 mm^2 と 0.331 mm^2 であり、誤差は約 5.7% 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。

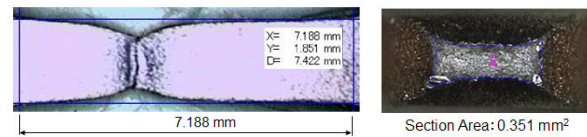


Fig. 1 Test piece shape of experiment

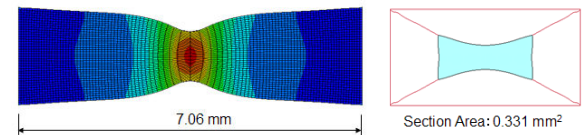


Fig. 2 Test piece shape of simulation

Fig. 3 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。図中の太灰色線と薄灰色線は、ひずみ速度が 10^3 s^{-1} 時および準静的時における、ネッキングが発生する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、ネッキング部中央付近の要素で出力した値である。点線は、ひずみ速度の効果を無視した解析結果であり、準静的時の応力-ひずみ曲線と一致する。実線は、式(1)に、直接、準静的時の応力-ひずみ関係を用い、鉄系用の材料パラメータ値の組合せを用いて、一定のひずみ速度 10^3 s^{-1} に対応するときの応力-ひずみを再現した曲線である。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若干高いのは、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。また、破線、実線および点線がひずみの増大とともに収束しているのは、鉄系材の場合、ひずみの増大とともにひずみ速度依存性が急速に低くなるためである。

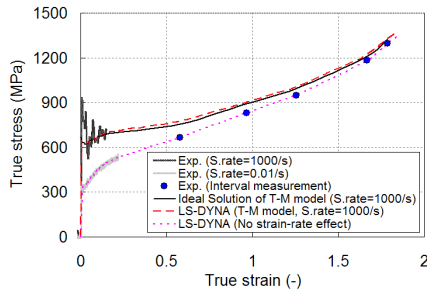


Fig. 3 Stress-strain curves

3.2 円筒の衝撃座屈問題 谷村らによって行われた検力ブロック式衝撃座屈試験装置による円筒(材質 SS400)の衝撃座屈試験について検証を行った。実験および解析は、円筒試験片(外径 45mm, 厚さ 2mm, 長さ 100mm)に、質量 90kg の重錘を高さ 2.72m から円筒の上部に自由落下させた。解析では重錘と床は剛体とした。

Fig. 4 に重錘が落下した後の円筒の変形形状を示す。(a)が実験結果, (b)が T-M モデルを適用した解析結果, (c)は速度効果を考慮しなかった解析結果である。いずれも円筒の底部で大きく局部座屈しているが, 実験と(b)の解析結果では座屈が 1 段と半段であるが, (c)の解析結果では座屈が 2 段になっており, 実験と比べ変形が進み過ぎていることが判る。ここで, (a)の実験と(b)の解析において, 座屈後の円筒の高さはそれぞれ 74.55mm と 74.63mm であり, 誤差は 0.1%, 座屈後の円筒の外径はそれぞれ 57.55mm と 57.94mm であり, 誤差は 0.7%で一致しており, 谷村・三村モデルの有効性が確認できる。

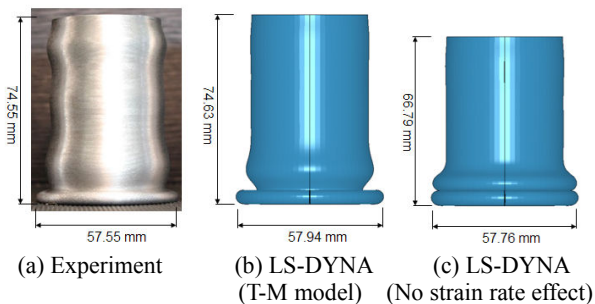


Fig. 4 Tube shape after impact

Fig. 5 に重錘の荷重-変位関係を示す。実線は実験結果, 破線は T-M モデルを適用した解析結果, 点線はひずみ速度効果を考慮しない解析結果である。

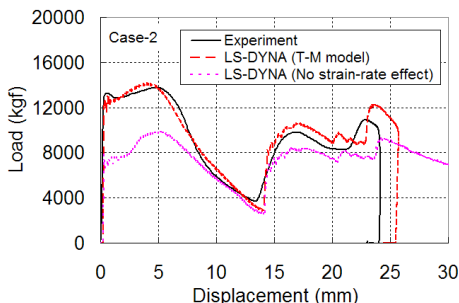


Fig. 5 Load-displacement curves

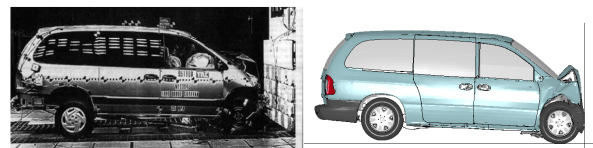
いずれの曲線も大きな山が 2 つある形状となっている。初めの山は円筒の底部の 1 段目の座屈現象を表している。実験結果と T-M モデルを適用した解析結果において, 変位が約 25mm 付近で荷重がゼロになっているのは, 重錘が円筒に衝突後に跳ね返っているためである。また, ひ

ずみ速度効果を考慮していない解析結果では, 重錘の反力が全体的に小さい。T-M モデルを適用した解析結果は, グラフの形状だけでなく, その反力の大きさも実験結果と非常に良く一致している。これらより, 谷村・三村モデルが座屈問題のような複雑な挙動を示すような問題でも高精度で適用できることが判る。

4 応用例

アメリカの FHWA/NHTSA で実施された Dodge Grand Caravan 1997 の前面衝突試験⁴⁾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) を適用した解析結果と比較した。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。

Fig. 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

Fig. 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。

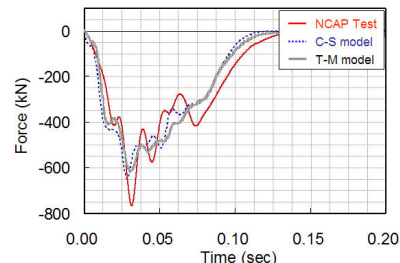


Fig. 7 Wall force

5 結 言

谷村・三村構成モデルを LS-DYNA に組み込み, テストピースの高速引張問題, 円筒の衝撃座屈問題および自動車のフルラップ衝突問題に適用した。そして, 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, 容易かつ高精度でひずみ速度依存性を表現できることを実証した。今後は銅系材料や樹脂系材料に対しても検証を行っていく予定である。

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 and T.Yamamoto, J. Phys. IV France, Vol.134, pp.55-61 (2006).
- 4) http://crash.ncac.gwu.edu/pradeep/NCAP/caravan_ncap.pdf.