

(論文)

スポット溶接部の静的および高速引張変形に対するシミュレーション技術の高度化

Improved Simulation Techniques for Static and High-speed Tensile Spot-weld Specimen Deformation



田村栄一*(工博)
Dr. Eiichi Tamura

Simulation techniques for spot-weld analysis were investigated to improve the analysis precision for automotive parts. A convenient, fairly precise analytic model was suggested by a comparison between the experimental and analytical results for static tensile testing. With the application of a convenient analytic model to high-speed tensile testing, a model was found that was applicable to impact analysis. Results showed that the time lag before the tensile rate reaches its maximum value should be taken into consideration.

まえがき = 衝突時の乗員および歩行者保護の観点において、部品の衝撃特性は重要な検討課題であり、衝撃変形に対する事前評価技術の高度化が進められている。この解析的評価技術には、解析精度はいうまでもなくパラメータスタディに耐え得る簡便性が求められる。一方、車体構造において多用されているスポット溶接に関する解析手法については、多くの研究事例が見られるが^{(1)~(5)}、そのモデル化について系統的に検討した例は、衝撃変形のみならず静的変形に対してもみられない。

そこで本研究では、まずシミュレーションモデル構築のための基礎データを取得するため、スポット溶接部の静的強度試験および高速引張試験を実施した。続いて、実構造体に適用できるスポット溶接部の解析モデル化手法を静的変形を対象に提案し、さらに提案したモデルを

高速変形解析に拡張適用し、その妥当性を検討した。

1. 試験結果の概要

1.1 静的引張試験

試験片としては、スポット溶接部の強度評価によく用いられる引張せん断試験片(TS試験片)と引張はく離試験片(CT試験片)²⁾に加え、はく離-せん断混合型の引張試験を行うためダブル「コの字」試験片(DK試験片)を新たに取り入れた。各試験片形状を図1に、試験の概要を図2に示す。図2中にはひずみゲージ貼付位置およびひずみ測定方向の概要も印で併せて示す。ひずみゲージは、ナゲット中心から7mm離れた位置を中心に貼付した。試験材料は冷間圧延鋼板SPCCであり、材料の機械的性質は表1のとおりである。板厚は0.8mmと

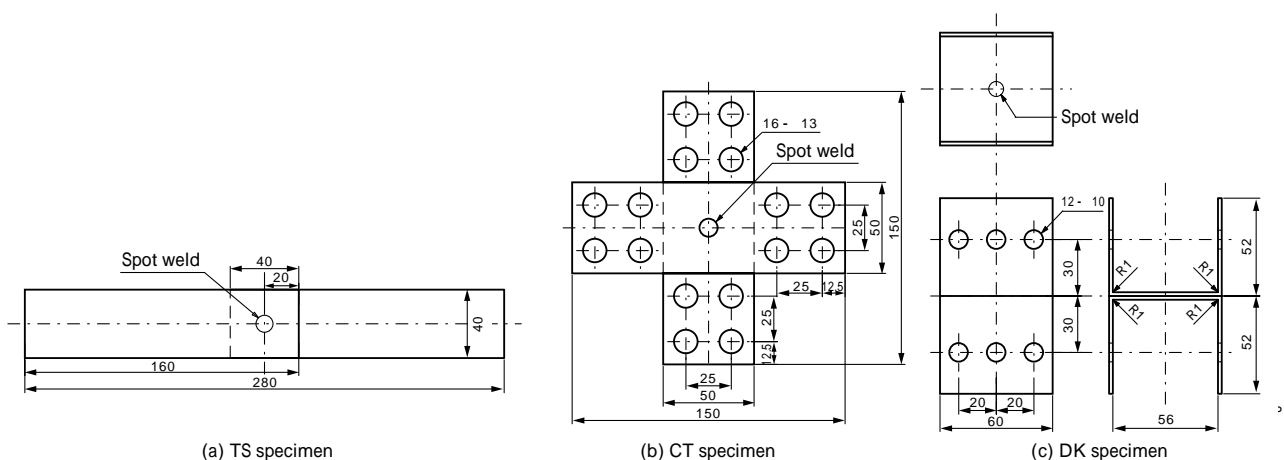


図1 試験片形状

Fig. 1 Shape of tested specimens

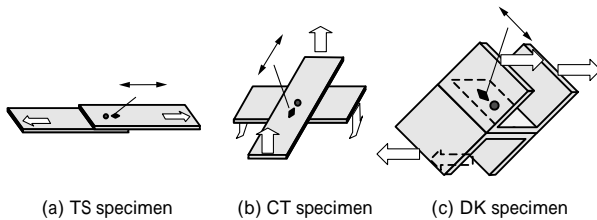


図2 引張試験の概要

Fig. 2 Schematic of tensile test for spot-weld specimens

表1 SPCC 材の機械的性質

Table 1 Mechanical properties of SPCC steel

E (GPa)	Poisson ratio	YS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)
207	0.31	205	314	42



図3 引張試験後の変形

Fig. 3 Deformation of spot-weld specimens tested

した。

試験片の変形状況を図3に示す。TS試験片ではスポット部が大きく回転し2枚の板が反る挙動が見られ、CT試験片およびDK試験片では、ともに面外方向の変形が顕著にみられた。なお、いずれもナゲット端からき裂発生しボタン破断した。

1.2 高速引張試験⁶⁾

ここでは油圧サーボ法により高速引張試験を行った。材料としてはSPCCを用い、試験片としては平滑試験片およびTS試験片を用いた。

本試験手法による試験では、引張速度が高速になると、試験機のロードセルが応答しなくなるため、試験中の荷重変化は試験片つかみ部のひずみゲージ出力を用いて測定した。なお、TS試験片の場合、変形が進むにつれて板が面外に曲げられ、つかみ部のひずみ出力に影響を与えるため、あらかじめロードセル出力とひずみ出力を詳細に比較検討して、荷重検出方法を決定した。試験の結果、特定の引張速度で大きな振動が発生し、荷重測定が困難となり、すべての条件範囲で適用できる方法ではないことが判明したが、大きな振動が発生しない条件では、最大荷重が検出できることもわかった。ここでは、大きな振動の生じなかった条件下の結果を用いて、解析結果との比較などを行った。

平滑試験片の試験結果一例として、応力-ひずみ線図を図4に示す。本試験では、ひずみゲージはナゲット中心から25mm離れた位置を中心に貼付した。なお、引張速度10m/sec条件は、今回用いた平滑試験片形状の場合833/secのひずみ速度条件に相当する。図中には同材料に対する静的引張試験の結果も併せて示す。図より、高速引張条件下の方が、降伏応力および引張強度は高く

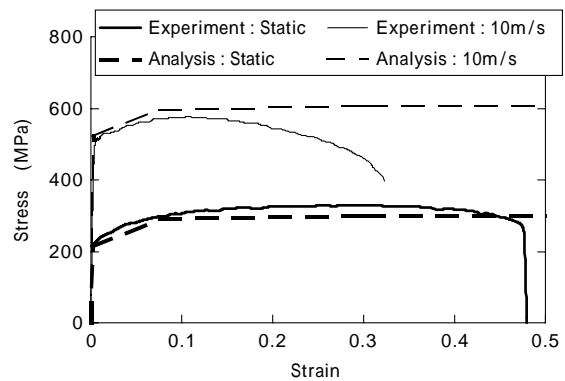


図4 静的・高速引張下の応力-ひずみ線図

Fig. 4 Stress-strain relationship under static and high-speed tensile conditions for SPCC steel

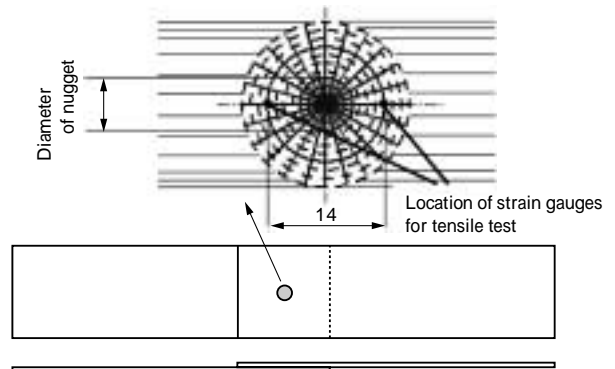


図5 TS試験片に対する解析モデル概略

Fig. 5 Schematic of analysis model for TS specimen

なる傾向が見られる。また、TS試験片に対する試験では、図3(a)と同様にスポット部が回転し2枚の板が反る挙動が見られボタン破断した。

2. 静的引張に対するスポット簡易モデルの検討

2.1 検討方法

ここでは、TS試験片を対象に、要素および分割数を変えて解析を行い、簡易かつ十分な精度を有する解析モデルを提案する。さらに、提案された簡易モデル化手法をCT試験片およびDK試験片にも取り入れて解析を行い、実験結果との比較を通じてモデルの検証を行う。

荷重形態は静的引張荷重とし、解析としては弾塑性有限要素解析(ソルバはABAQUS6.2)を行った。材料はSPCCとし、SS線図は引張試験結果を基に設定した。

2.2 TS試験片を用いたナゲット部のモデル化手法の抽出

2.2.1 解析モデルの概要

解析モデルの概略を図5に示す。図に示すように溶接部近傍はナゲットを中心に放射状にメッシュ分割し、周方向のメッシュ分割数を48分割とした。要素の種類に関する検討として、モデルA、B、Cを作成した。各モデルの概略を図6に示す。モデルAはソリッド要素によりモデル化した。モデルB、Cでは、2枚の板をシェル要素でモデル化し、ナゲット部中心にはり要素(ナゲット径と同断面を有し、2枚の板と同じ剛性を有する)を配して2枚の板をつないだ。このうちモデルBではナゲット部もシェル要素としたが、モデルCではナゲット部を剛はり要素によりモデル化した。なお、ナゲット断面の観

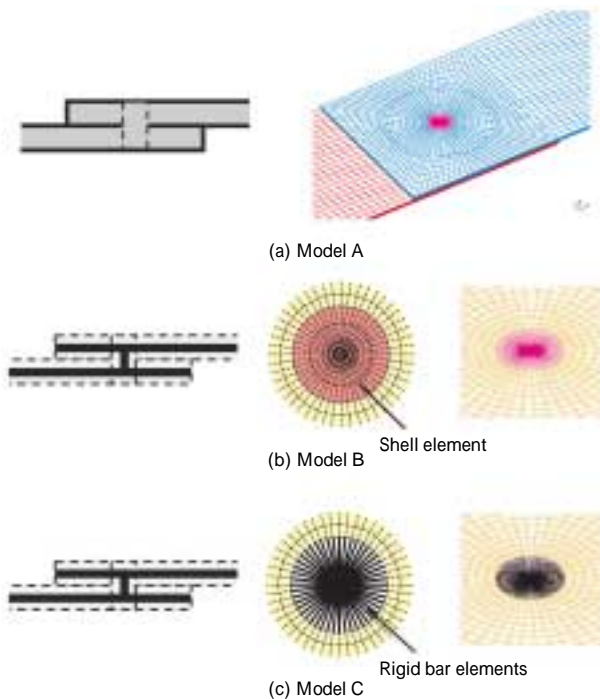


図6 3種モデルの概略
Fig. 6 Schematic of 3 models step

察より今回の解析ではナゲット径を6.4mmとした。

また、拘束位置は実験条件に合わせ、片端完全拘束とし反対側端部に強制変位を与えた。

2.2.2 3モデルに対する解析結果

各モデルの最終ステップ時の変形図を図7に示す。

図7より、モデルBでは、上下を繋ぐはり要素がナゲット内部のシェル要素を局部的に変形させ、実変形(図3(a))を再現できていないが、モデルAおよびモデルCでは実変形をよく再現できている。

モデルA, Cについて、荷重 - 変位線図および荷重 - ひずみ線図をそれぞれ図8および図9に示す。ひずみの検討位置は図2に示すとおりである。各図には、実験結果も併せて示す。

図9より、荷重 - ひずみ線図に関しては、各解析結果は実験結果をよく再現できており、ナゲット近傍の変形挙動は再現できている。一方、図8より、荷重 - 変位関係においては各解析結果の初期剛性が実験結果より大きいことがわかる。これに対しては、治具のガタなどにより、ナゲット近傍以外の箇所で大変位が生じている

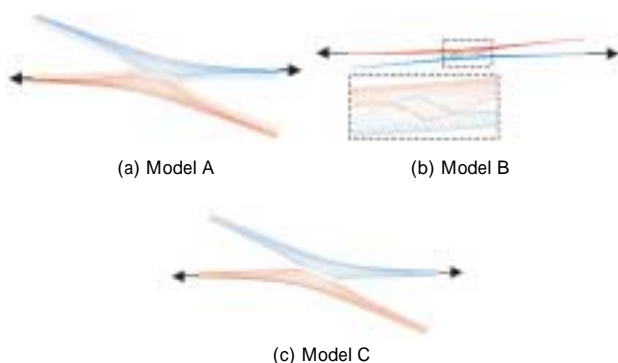


図7 最終ステップ時の解析結果変形図
Fig. 7 Deformation at the final analysis

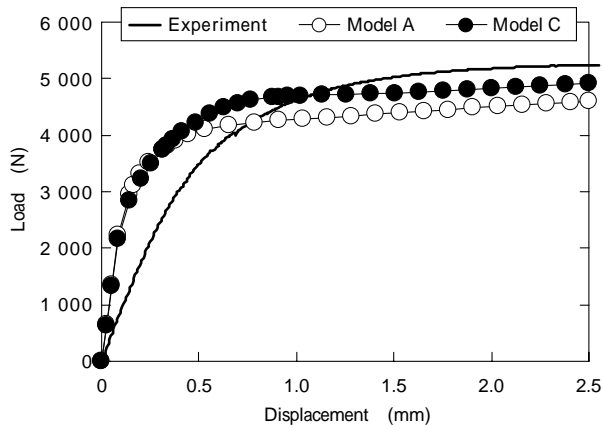


図8 荷重 - 変位線図
Fig. 8 Load-displacement relationship

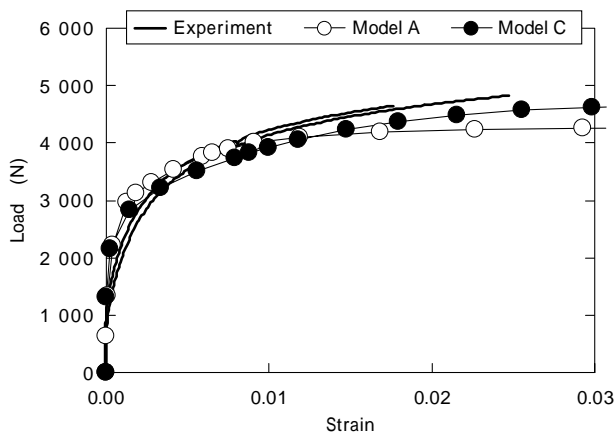


図9 荷重 - ひずみ線図
Fig. 9 Load-strain relationship

ためと考えられる。

以上より、モデルAおよびモデルCにより、実験における変形挙動をよく再現できていることがわかる。ただし、モデルAはモデルCに比べ、メッシュ数が多くなる傾向がある上に、寸法修正などに多くの時間を要することから、モデルCの方が簡便性は高いと考えられる。

2.2.3 メッシュ分割数の影響に関する検討

(1) モデル化の概要

前項の検討では、ナゲット部を中心にメッシュを周方向48分割としてモデル化したが、簡便性を考えるとメッシュ数をより少なくすることが好ましい。一方で、メッシュ数の低減は解析精度の悪化を招くことから、適切なメッシュ数低減を把握する必要がある。

そこで、ここではモデルCを基に周方向および半径方向のメッシュ分割数について検討を行い、簡便かつ十分な解析精度を持つメッシュ分割について調べる。

(2) メッシュ分割数を変えた場合の影響

ナゲット近傍要素の周方向分割数を低減したモデルを作成し、分割数低減の影響を調べた。ここでは周方向分割数を32, 24, 16, 8, 4分割とした解析モデルをそれぞれ作成し、前項までと同様の条件の下で解析を行い、モデルCの結果との比較を行った。

荷重 - ひずみ線図を図10に示す。図より、モデルCと32 ~ 16分割モデルのひずみ = 0.1における荷重値の差異は5%以下であるのに対し、モデルCと8分割モデル

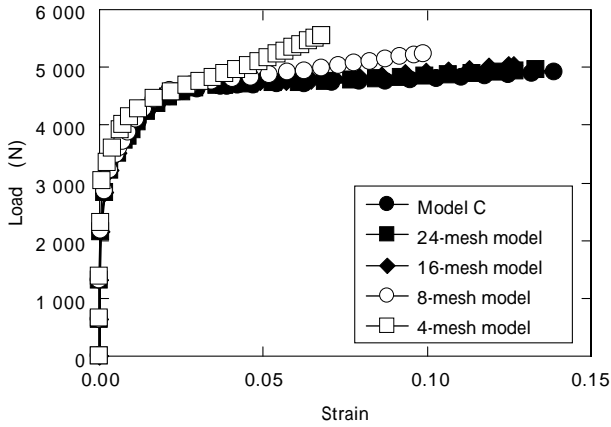


図10 各分割モデルに対する荷重 - ひずみ線図
Fig.10 Load-strain relationship for mesh-decreasing models

の比較では差異は5%以上となることがわかる。これより、モデルCの周方向分割数を16分割まで低減しても、解析結果に大きな変化は見られず、モデルCと同精度に実験結果を再現できることがわかる。

また、ナゲット近傍のシェル要素の半径方向分割については、応力集中が大きいため、なるべく正方形にすることが望ましい。本検討のナゲット径を有する解析モデルにおいて、ナゲット周りの周方向分割数を16分割とした場合、半径方向のメッシュ間隔を約1mmとすれば、ほぼ正方形のメッシュ形状を得ることができる。モデルCでは半径方向メッシュ間隔を約1mmと設定しており、適正なメッシュ形状が実現されているといえる。

以上より、モデルCをもとに周方向分割数を16分割としたモデルが、簡易かつ十分な精度をもつ簡易モデルとして提案できる。

2.3 種々のスポット継手試験体による検証

前節で提案した簡易モデルを検証するため、CT試験片およびDK試験片の解析に対し簡易モデルを適用し、その妥当性を調べた。解析では実験と同様の变形状況を再現できるように、拘束条件を設定した。以下で検討するひずみ位置は図2に示すひずみゲージ位置に対応する。

解析結果として荷重 - ひずみ線図を図11に示す。各図(a)および(b)は、それぞれCT試験片およびDK試験片の結果を示す。図には実験結果も併せて示す。同図より、若干の差異はあるものの解析結果は実験結果を再現できていることが確認できる。

3. 高速引張に対する簡易モデルの適用

3.1 解析モデルおよび解析結果

前章までに提案した簡易モデルを高速引張試験に適用し、その妥当性を調べた。材料物性は、母材の静的引張試験と高速引張試験結果を用いて設定した。本解析では図4に示す試験結果を基にCowper-Symonds則⁷⁾を適用し、ひずみ速度と応力 - ひずみ曲線の関係を求めた。求められた静的引張条件下および10m/sec条件下の応力 - ひずみ線図を図4中に破線で示す。なお、解析ソルバとしてはLS-Dynaを用い、モデルの片端に強制変位を加えた。

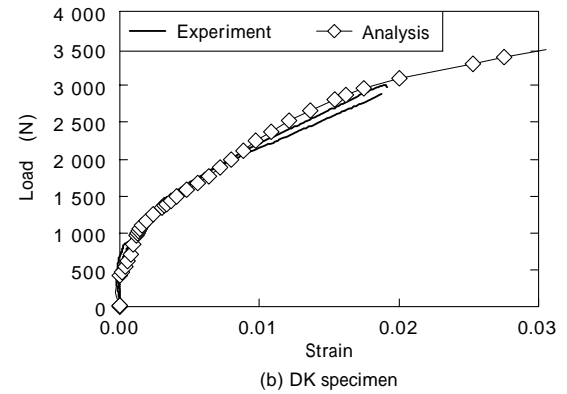
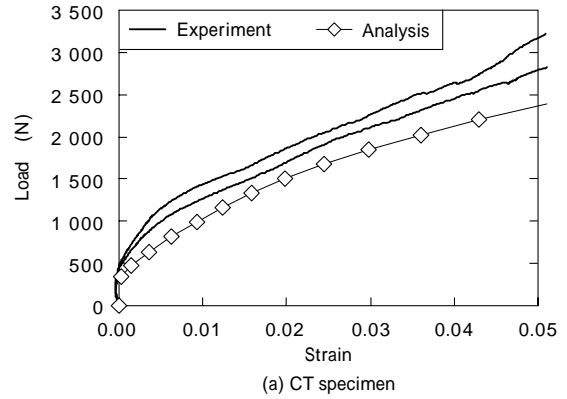


図11 各種試験片に対する荷重 - ひずみ線図
Fig.11 Load-strain relationship for CT and DK specimens

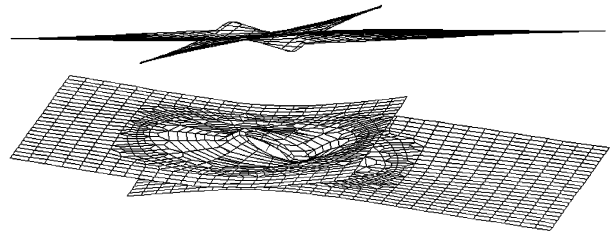


図12 引張速度10m/sec条件下の変形図
Fig.12 Deformation of TS specimen under 10m/sec of tensile rate

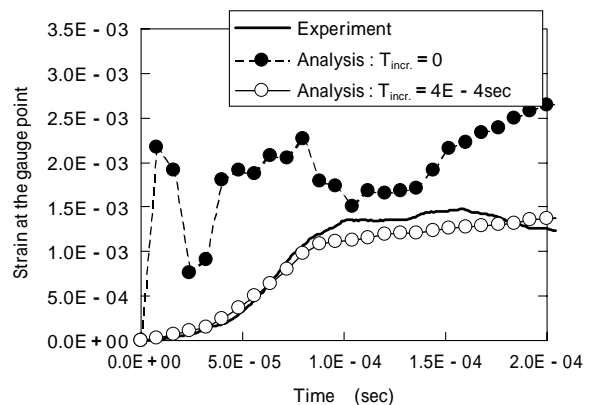


図13 引張速度10m/sec条件下のひずみ挙動
Fig.13 Strain behavior under 10m/sec of tensile rate

引張速度10m/sec条件下における解析結果として、変形図およびひずみ挙動をそれぞれ図12および図13(印)に示す。図12より、解析結果ではナゲットごく近傍に変形が集中し、ナゲット端部が大きく折曲がり、実験結果とは大きく異なる挙動となる。また図13より、解析結果では負荷直後からひずみ値が振動すること

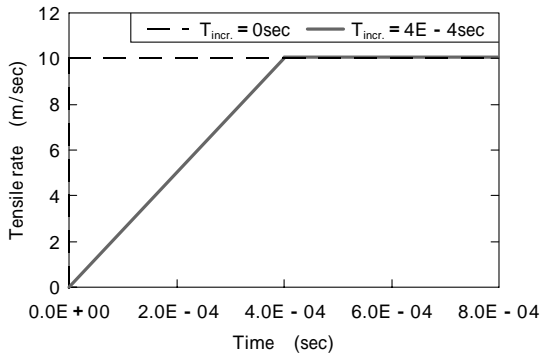


図14 解析での引張速度の設定概要
Fig.14 Condition of tensile rate for analysis

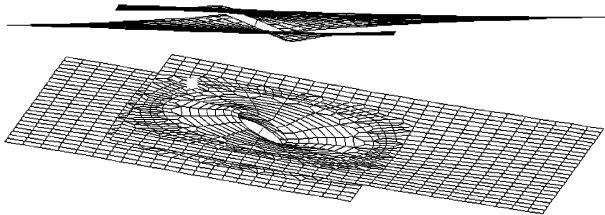


図15 修正モデルによる変形図
Fig.15 Deformation with the modified model

がわかる。

3.2 考察

本解析で得られた振動挙動に対しては、試験片端からの応力波の反射が繰返されたことが要因と考えられる。実験に比べ応力波の反射の影響が大きくなる要因としては、負荷条件の設定が考えられる。解析では、図14の破線で示すように負荷直後に最大引張速度に達する。このとき、負荷後に発生する応力波の速度が大きくなるため、負荷初期において反射波の影響が大きくなったと考えられる。一方、実験でこれと同じ引張速度条件を実現するのは困難であり、引張速度は図14の実線で示すように緩やかに上昇すると考えられる。この相違が、ひずみ挙動の差異に影響を与えていると考え、最大引張速度に達するまでの時間 T_{incr} を0以上に設定し、その影響を調べた。

$T_{incr} = 4 \times 10^{-4}$ sec に設定した場合の変形図を図15に、ひずみ挙動を図13(印)に示す。図15より、ナゲット端部の折曲がり挙動は軽減され、実験結果と同様に2枚の板が反る挙動が見られる。さらに、図13(印)よりひずみの振動挙動はなくなり、実験結果とほぼ同等の挙動が得られることがわかる。

以上より、荷重の立上がり時間には注意が必要なものの、簡易モデルを用いた解析により、スポット接合部の高速引張変形挙動を再現できることが確認できた。なお、 $T_{incr} = 4 \times 10^{-4}$ sec の条件が実際の実験条件と一致しているか否かについては、より詳細な実験による検証が必要と考えられる。

4. 今後の展望

本研究により提案した簡易モデルにより、スポット溶接を有する構造体の変形挙動を十分な精度で再現できると考えられる。本モデルの実構造体モデルへの適用性を検証するとともに、スポット溶接部の破断クライテリアを開発し簡易モデルに取り入れることにより、構造体の事前強度評価が確立されると期待できる。

むすび=本研究では、代表的なスポット溶接試験片について実験的検討および解析的検討を行い、両結果の比較から簡易かつ十分な精度を持つ簡易モデルについて検討を行った。さらに、高速引張に対する解析モデルとして簡易モデルを適用し、その妥当性を調べた。以下に結果を述べる。

- (1) TS継手試験片を対象とした静的引張試験に関する検討により、シェル要素、剛はり要素およびはり要素を用い、周方向分割数を16分割とする簡易モデル化手法を提案した。
- (2) TS継手試験片以外の試験片により、上記簡易モデル化手法の妥当性が実証された。
- (3) 高速引張に対する解析モデルにおいては、引張速度が最大に達するまでの時間設定が解析結果に大きな影響を与えることがわかった。
- (4) 負荷設定を適正化すれば、静的引張を元に作成された簡易モデルにより、実変形挙動を十分な精度で再現できることがわかった。

なお、本研究は、経済産業省より新エネルギー・産業技術総合開発機構が平成14年度エネルギー使用合理化革新的温暖化対策技術開発(自動車軽量化のためのアルミニウム合金高度加工・形成技術の開発事業)として委託を受けたものである。

参考文献

- 1) 小川道雄ほか: 日野技報, No.49 (1996) p.10.
- 2) 水井正也ほか: 自動車技術会編「自動車車体スポット溶接構造の疲労強度と寿命推定」(1986) p.24.
- 3) D. Radaj et al.: Materialprüfung, 37 (1995) p.10.
- 4) O. Hahn et al.: International Institute of Welding Annual Assembly, Sept.03-Sept.10, IIW-Document III-1544-94 (1994).
- 5) 松田真理子ほか: 日本機械学会, 2003年度年次大会講演論文集, Vol. (2003) p.341.
- 6) 杵淵雅男ほか: 日本機械学会, M&M2004 材料力学カンファレンス(2004)講演予定.
- 7) G. R. Cowper and P. S. Symonds: Strain hardening and strain rate effect in the impact loading of cantilever beams, Brown University, Division of Applied Mathematics report (1957) p.28.