

令和元年6月11日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14504

研究課題名(和文)超高速変形中の応力及び温度の実時間測定によるテイラー式衝撃試験法の一般化

研究課題名(英文)Generalization of Taylor impact test during ultra-high speed deformation by real time measurement of stress and temperature

研究代表者

岩本 剛 (Iwamoto, Takeshi)

広島大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40274112

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：検力装置は、ホプキンソン棒法が最良であり、またサボについて、破碎防止は困難なことから、サボと試験片の分離が可能なよう、装置を製作した。続いて、テイラー試験中の温度上昇の測定を試み、赤外線検出素子の破損を防ぐための設置位置が問題であることがわかった。さらに、有限要素シミュレーションを実施し、ある時刻において、超高速域における応力-ひずみ曲線が適切に測定可能であることを示した。以上の結果から、実際の試験装置により測定を実施したが、応力-ひずみ曲線を測定可能な時間がシミュレーションとは異なっており、加工硬化が表現できる曲線は取得可能であったが、応力を過大に測定するという問題がわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

表面の多い微小試験片ではなく、バルクの状態の試験片を超高速で飛翔させることにより、超高速レベルのひずみ速度における材料の応力-ひずみ曲線の採取が可能となる。これにより、学術的には材料の超高速域における変形挙動や強度の評価が可能となる。社会的には、非常に大きな速度を持つゴミから、宇宙構造物をいかに保護するべきかの方策が、材料の選択により検討可能となる。宇宙構造物の創造に変化をもたらすことが期待され、我が国がイニシアチブを取って宇宙開発を推進する一策となりうる。

研究成果の概要(英文)：The Hopkinson bar technique is the best for detecting the impact force and the apparatus to separate the sabot and specimen is manufactured because of the difficulty of prevention of its fracture. Consequently, the real time measurement of temperature is done during Taylor impact test. However, the position of the infrared detector to prevent its failure is the problem. Furthermore, the finite element simulation is performed. As a result, the appropriate measurement of stress-strain curve at ultra-high speed of deformation can be realized at a certain time. According to the obtained results above, the actual test was conducted. It was successful to obtain the curve with strain hardening, however, the stress level is so overestimated.

研究分野：衝撃固体力学

キーワード：構造・材料 超高速材料試験

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙開発の促進の観点から、 $10^5/s$ 以上のひずみ速度を対象とした超高速領域における、構造材料の強度特性の非線形性解明のため、テイラー式衝撃試験法が世界的に注目されている。本手法では、円柱状試験片を火薬や高圧ガス等により直接射出し、剛体壁に衝突させるだけの非常に簡単な方法であり、試験片の不均一変形にも関わらず、適切な応力算出式の適用により、 $10^3/s$ までのひずみ速度域にて信頼性の高い分割式ホプキンソン棒法試験に匹敵する高精度な応力 - ひずみ関係が得られる (Julien et al., 2015)。テイラー式衝撃試験法では、衝突速度、試験後の試験片の寸法を計測量とし、高ひずみ域におけるただ一組のひずみ、ひずみ速度が求められる。さらに、運動量保存則等により応力が理論的に算出可能である。しかし、応力算出には様々な理論式が提案されており、適切な式の採用法は一意ではなく、式間の精度等の検討はない。また、応力 - ひずみ曲線を得るため、膨大な試験回数と速度調整による低ひずみ域における試行錯誤的なデータの採取が必要である。さらに、本試験法の有効性を検討するためにも、非線形性の鍵を握る温度の同時測定等について議論、検討が必要であると考え。テイラー式衝撃試験法の国内における研究例は皆無に近く、発祥の地英国 (Walley et al., 2015) を始め、仏 (Julien et al., 2015)、韓 (Huh et al., 2015)、米 (Lopatnikov et al., 2003)、豪 (Ruan et al., 2015) が精力的に研究を実施している。特に、Lopatnikov ら及び Ruan らの研究では理論式を使用せず、分割式ホプキンソン棒法や市販の水晶式外力計によって外力測定を試みているが、問題点も多い。海外では注目度が非常に高い試験法であり、宇宙開発の国際的な競争の観点からも、我が国の先導により試験法の確立を推進することが必要、かつ急務である。申請者は、これまで SHPB 法を基礎として、 $10^3/s$ のひずみ速度における材料の衝撃試験法と材料特性について研究を実施している (Iwamoto and Yokoyama, 2012)。その中で、超高速域における材料特性の非線形性の解明のため、テイラー式衝撃試験法の重要性の認識に至った。

2. 研究の目的

1. 検力ブロック法 (Chuman et al., 1997) やホプキンソン棒を適用し、テイラー式衝撃試験法に基づく試験における変形中の外力波形を測定し、それを応力に変換して、高速度カメラの使用も併せて1回の試験のみで応力 - ひずみ曲線を得る。
2. 衝撃試験に不可欠な温度測定を赤外線温度計にて、超高速域における温度上昇の測定を試みる。
3. 有限要素法による解析やデジタル画像相関法による実験を併せて、外力検知手法、温度測定法の妥当性を検討する。

3. 研究の方法

検力装置の製作と外力検定

衝撃外力を計測することが可能な検力装置を製作する。小突起部にひずみゲージを貼付し、当研究室保有の材料試験機にて静的外力について校正を実施する。さらに、衝撃外力について分割式ホプキンソン棒法を援用し、入力棒を小突起部に接触させた状態で、検定を実施する。この際、左端から打撃棒を衝突させた後、生じた応力波を検力装置まで透過させて、応力棒ならびに検力装置上の各ゲージからの出力信号から外力の時刻歴を計測する。この時、両者で計測した値が一致することを確認する。その上で、設計した検力装置が、衝撃外力の衝撃外力の測定可能最大値や測持續時間等の仕様を満足することを確認する。

既開発のテイラー式衝撃試験装置への設置と外力ならびに応力の時刻歴計測

開発済みの装置に検定を実施した検力装置を、剛体壁とみなした炭化タングステン板と固定用鋼板の間に置き、ボルトを用いて固定する。この時、振動抑制のため、硬質ゴムを介して剛体壁を固定する。設置後、純アルミを対象に実際に試験を実施し、外力の時刻歴を計測する。得られた外力波形から応力を算出するため、試験片の初期面積から公称応力を、体積一定の仮定から真応力を算出する。

妥当性の検証実験の実施

同程度のひずみ速度において2つの試験法、分割式ホプキンソン棒法ならびにテイラー式衝撃試験法に基づいた試験を実施し、結果を比較する。さらに、改良前のテイラー式衝撃試験法に基づいた応力 - ひずみ関係の測定も同様に行い、本研究の結果と比較することによって妥当性を評価する。この際、妥当性を評価可能であるのは、分割式ホプキンソン棒法の速度域であることに注意する。

変形中の温度測定の試み

今回申請の赤外線温度測定用素子をまず分割式ホプキンソン棒法試験において試験片の側に設置し、測定を試みる。温度波形取得が可能かどうか確認した上で、テイラー式衝撃試験法試験に適用する。その際、試験片の衝突による破壊から防止するため、ポリプロピレン等の透明

で高強度の材料によりカバーする．その後，試験片が剛体壁に衝突する直前の位置に設置し，試験を実施し，温度の時刻歴の測定を試みる．

破砕しないサボおよびランチャーの設計・製作

サボとは試験片が剛体壁に対して垂直に衝突するように設ける付属部品であり，試験片に変形拘束の影響がないよう衝突と同時に破砕することが要求される．一旦破砕が発生すると，破砕片によって変形の時刻歴が高速カメラにて追跡が困難であるので，テイラー式衝撃試験法試験において重要な役割を担うサボを，破砕しない材質に置き換え可能なようランチャー部とともに設計する．

高速度カメラによるひずみ速度・ひずみ計測と応力 - ひずみ曲線の取得

高速度カメラを使用し，試験片が剛体壁に衝突する動画を撮影する．動画から各コマを切り出し，時々刻々の画像に映し出される試験片の形状から，ひずみ及びひずみ速度を計測し，ひずみ・ひずみ速度 - 時間関係を得る．その後，および項で計測した外力ならびに温度波形と併せて，応力 - ひずみ曲線，ひずみ速度，温度 - 時間関係を一度の試験で得ることを試みる．同時に純アルミならびにアルミ合金に関して，ひずみ速度依存性の非線形性について検討し，過去に小型分割式ホプキンソン棒法で得られた結果とともに議論する．

有限要素法やデジタル画像相関法による測定値の妥当性検討

シミュレーションにおいて必要となる試験に用いた純アルミの材料特性を取得するため，準静的から分割式ホプキンソン棒法による衝撃圧縮試験を実施し，また，温度 - 応力関係も，当研究室保有の恒温槽による温度管理が可能な試験装置にて採取する．摩擦の影響を除去した後，適切な応力 - ひずみ，ひずみ速度関係を記述できるモデルを仮定した上で，フィッティングによりモデル中の各パラメータを決定する．その上で，商用コードを用い，有限要素モデルを作成し，適切な境界条件の上で，全ての実験を計算機中で表現する．一方で，デジタル画像相関法によるひずみ場の測定も実施し，測定値の妥当性を検証する．

4．研究成果

検力装置の製作と外力検定

検力装置については種々検討した結果，振動抑制の観点からホプキンソン棒法に基づく装置が最良との認識に至った．

既開発のテイラー式衝撃試験装置への設置と外力ならびに応力の時刻歴計測

の結果を受けて，開発済みの装置に検定を実施したSUJ2製のホプキンソン棒を導入した．設置後，純アルミを対象に実際に試験を実施し，外力の時刻歴を計測し，試験片の初期面積から公称応力を，体積一定の仮定から真応力の波形を算出可能となった．

妥当性の検証実験の実施

同程度のひずみ速度において2つの試験法，小型分割式ホプキンソン棒法ならびにテイラー式衝撃試験法に基づいた試験を実施し，結果を比較し，同程度であることを確認した．

変形中の温度測定の試み

テイラー式衝撃試験の下限速度と同等な速度を実現可能な小型分割式ホプキンソン棒法に基づく装置を新たに製作し，温度上昇の測定を実施した．その結果，温度が十分な応答性にて超高速度域で測定可能であることがわかった．この結果を受けて，テイラー式衝撃試験中の温度上昇の測定を試みたが，試験片の飛翔に伴う，赤外線検出素子の破損を防ぐための設置位置が問題であることがわかった．

破砕しないサボおよびランチャーの設計・製作

サボについても検討を実施したが，破砕を防止することは困難であったことから，破砕発生前にサボと試験片の分離を実施可能なよう，装置を製作した．

高速度カメラによるひずみ速度・ひずみ計測と応力 - ひずみ曲線の取得

実際の試験装置により測定を実施したが，応力 - ひずみ曲線を測定可能な時間がシミュレーションとは異なっており，加工硬化が表現できる曲線は取得可能であったが，応力を過大に測定するという問題点が存在することがわかった．また，高速度カメラの動画から，ある瞬間付近の2枚の画像を使用して，その平均時間におけるひずみ速度分布を測定した．その結果，最高ひずみ速度では毎秒100000を実現することが可能であることがわかった．

有限要素法やデジタル画像相関法による測定値の妥当性検討

市販の解析コードを用いて有限要素シミュレーションを実施し，テイラー式衝撃試験法にホプキンソン棒に基づく検力装置，サボの分離，ならびに高速度カメラによる試験片の外径測定

を組み込み，ある時刻において，超高速域における応力 - ひずみ曲線が適切に測定可能であることを示し，論文として海外のオープンアクセスに対応した学術雑誌（5項 参照）に出版した。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Chong Gao, Takeshi Iwamoto, Finite element analysis on a newly-modified method for the Taylor impact test to measure the stress-strain curve by the only single test using pure Aluminum, Metals, 2018, 8, 642, 査読有.

〔学会発表〕(計 5 件)

高崇, 岩崎史哲, 岩本剛, Taylor 衝撃試験法の拡張の試みならびに妥当性評価, 日本材料学会第 66 期学術講演会・学術講演会論文集, No. 404, 2017, CD-ROM.

高崇, 岩本剛, 小型分割式 Hopkinson 棒法衝撃圧縮試験中の純アルミニウムの温度測定の試み, 日本機械学会中国四国支部第 56 期総会・講演会講演論文集, No. 205, 2018, CD-ROM.

Chong Gao, Takeshi Iwamoto, A study on change in temperature of pure aluminum during compressive test at higher strain rate based on miniature split Hopkinson pressure bar method, 2nd International Conference on Impact Loading of Structures and Materials (ICILSM 2018), May 5-9, 2018, Xi'an, China, CD-ROM.

高崇, 岩本剛, 有限要素解析による純アルミニウムの小型分割式 Hopkinson 棒法衝撃圧縮試験における温度変化評価, 日本材料学会第 67 期学術講演会・学術講演会論文集, No. 512, 2018, CD-ROM.

Chong Gao, Takeshi Iwamoto, A study on change in temperature of pure aluminum during impact compressive test based on Taylor impact test, the 14nd Asia-Pacific Conference on Engineering Plasticity and Its Applications (AEPA), December 2-8, 2018, Jeju, Korea.