

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560077

研究課題名(和文) ボルト被締結体の衝撃破断評価基準の構築

研究課題名(英文) Construction of the standard on impact fracture of jointed plates by a bolt

研究代表者

臺丸谷 政志 (Daimaruya, Masashi)

室蘭工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40002018

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円、(間接経費) 1,140,000円

研究成果の概要(和文)：自動車の衝突安全強度設計と軽量化に資するため、サスペンション部位のボルト締結体の衝撃荷重下における被締結部材の変形強度に関する実験および数値シミュレーションを行い、ボルト被締結鋼板の破損・破断のメカニズムの解明を行って被締結鋼板の破断基準の構築を試みた。研究成果は、ボルト締結された被締結鋼板の衝撃破断に関して、応力表示によるエネルギー形式の破断基準構築の可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：The present study is concerned with the development of a fracture criterion for the impact fracture of jointed steel plates of bolted joints used in a car body, which contributes to crash simulations by CAE. The object is the parts of lap bolted joints connecting between the suspension frame and the bracket of suspension frame rear mounting in a car. The obtained results suggest that a stress-based fracture criterion may be developed for the impact fracture of jointed steel plates of a lap bolted joint.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械材料・材料力学

キーワード：ボルト締結体 被締結鋼板 高張力鋼板 衝撃破断 衝撃破断評価基準

1. 研究開始当初の背景

(1) 地球環境への負荷低減の観点から、自動車開発において温暖化の原因となる CO₂ を削減するために車体を軽量化し燃費を向上させる技術開発が進められている。一方、衝突安全性の向上を図るため車体重量が増加する傾向にある。これらの相反する要求を満足させるため、すなわち軽量化を図りながら強度信頼性の向上も図る技術として高張力鋼を使用したテーラード・ブランク技術が用いられている。これまでこの技術の要であるテーラード・ブランク溶接部材に関して衝撃引張変形強度および衝撃疲労強度の測定法の検討とそれらの評価を行ってきた。

(2) 自動車製造においては開発コストの低減や開発期間の短縮のみならず、自動車の衝突安全性と信頼性確保のための性能予測に幅広く CAE 技術が活用されており、CAE における実現象の再現性向上が重要となっている。

(3) テーラード・ブランク溶接、スポット溶接やボルト締結の接合部の破断は車両の耐衝突性能に大きく影響する。CAE 技術による衝突シミュレーションや性能予測を精度よく行うためには、テーラード・ブランク溶接部やスポット溶接部の衝撃変形強度のほか、ボルト締結部の衝撃破損・破断の正確な評価が必要である。しかし、ボルト締結部に関しては、ボルト自体の強度・破断やゆるみ・トルク管理などに関する研究は膨大になされているが、ボルト締結された被締結鋼板の衝撃破断に関する報告はほとんど見当たらず、衝突シミュレーションにおいて必要とされるボルト締結部、特に被締結鋼板の衝撃破断基準の構築が望まれている。

2. 研究の目的

CAE 技術による衝突シミュレーションや性能予測を精度よく行うために、ボルト締結体の衝撃荷重下における被締結部材の変形強度および破損・破断に関して実験および数値シミュレーションより検討を行い、ボルト被締結鋼板の破損・破断のメカニズムの解明を行って、衝撃破損・破断の評価基準の構築を目的とする。

3. 研究の方法

自動車のサスペンションフレームのボルト締結部位の被締結鋼板の衝撃破損・破断は、ボルト軸に対して垂直に配される被締結鋼板の面内方向に作用する衝撃荷重によって生ずるが、重ねボルト締結機構上および鋼板

の変形等の理由によって単純な剪断変形破断ではなく、面外方向への引抜き破断との中間的な複合的破断となっている。

(1) 剪断実験：ボルト被締結部材の面内方向に作用する静的荷重および衝撃荷重下における剪断的破断について自動車用普通鋼材 270MPa 鋼板、440MPa および 590MPa 級高張力鋼を供試鋼板として実験および数値解析を行った。静的剪断試験には万能材料試験機 (INSTRON5586) を使用し、また衝撃剪断試験にはスプリット・ホプキンソン棒方式の衝撃引張変形強度試験装置を試作改良して行った。

(2) 引抜き実験：ボルト被締結部材の垂直方向に作用する静的荷重および衝撃荷重下における引抜き破断実験を、剪断実験で用いた 3 種類の鋼板に関して行った。衝撃引抜き試験の実施にはスプリット・ホプキンソン棒方式の衝撃試験装置を用いることは難しくスプリット・ホプキンソン棒方式から落錘型ワンバー方式の衝撃試験装置に改良変更して行った。

また解析コード ANSYS および LS-DYNA を用いて剪断および引抜き破断実験結果の数値シミュレーションを行った。

4. 研究成果

(1) 剪断的変形破断：重ねボルト締結体の被締結鋼板の衝撃破断を調べるため、剪断的変形破断について静的および衝撃剪断破断実験を実施した。また重ねボルト締結体の被締結鋼板の破断メカニズムを調べるため、FEM コード LS-DYNA を用いて数値解析を実施した。解析結果は試験結果と良い一致を示した。

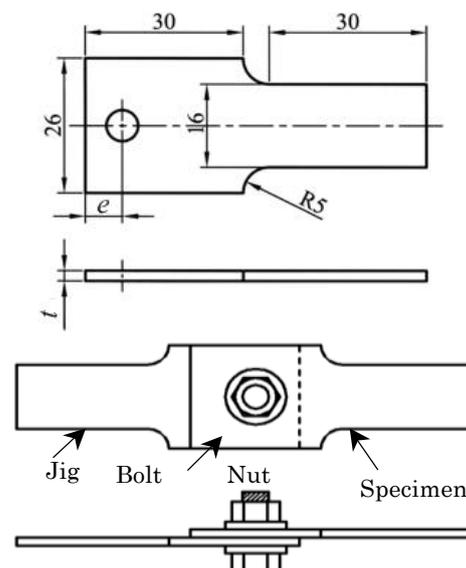


図1 剪断試験用の試験片とボルト締結体

図1に剪断破断実験に用いた鋼板試験片と重ねボルト締結試験体を示す。板厚 $t=1.2, 2.0\text{mm}$ の2種類で、図中の e は板端から円孔中心位置までの縁端距離で、 $e = 6.0, 7.5, 9.0\text{mm}$ の3種類を用いた。

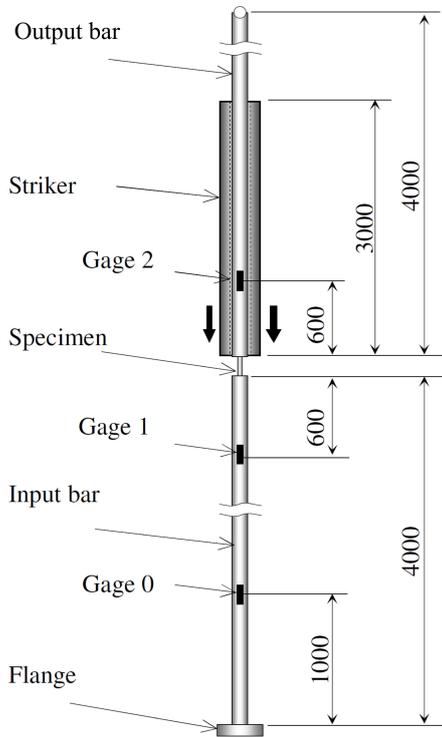


図2 スプリット・ホプキンソン棒試験装置

衝撃剪断試験に用いた落錘式スプリット・ホプキンソン棒試験装置を図2に示す。入出力棒には直径25mm、長さ4000mmのステンレス棒 (SUS304) を使用した。入出力棒には試験片端面から600mmの位置にひずみゲージ (KYOWA, KSP-2-102 -E4) を2枚軸対称に貼付しており、入力棒側をGage 1、出力棒側をGage 2として、入出力棒を伝播する応力波を測定した。これらの測定結果に基づきホプキンソン棒法の測定理論より変位、変位速度および荷重を算定した。

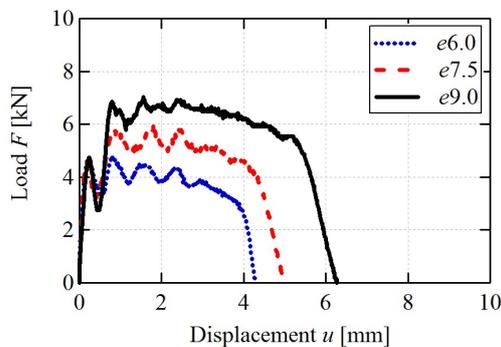


図3 衝撃荷重-変位曲線 (CR440)

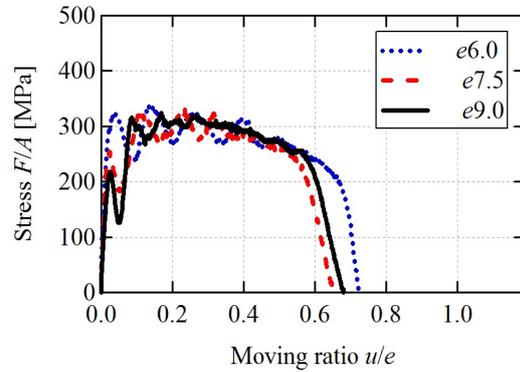
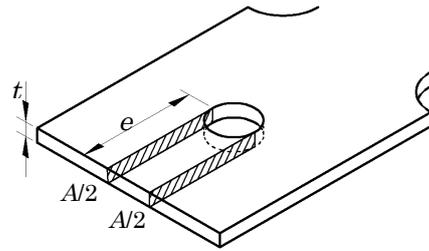


図4 衝撃剪断応力 (F/A) と移動比 (u/e)

衝撃試験結果の一例として、図3に高張力鋼CR440試験片の衝撃荷重-変位曲線を示す。静的剪断試験と同様に縁端距離 e が大きくなるにつれて最大荷重が増加している。

次に、これらの衝撃荷重の応力化を試みた。図4の上段図は剪断破断面の模式図であり、この剪断面積 A で剪断荷重 F を除した (F/A) を剪断応力、またボルトの移動変位と縁端距離の比 (u/e) を移動比と呼ぶことにする。図4下段図は、図3の荷重-変位を剪断応力 (F/A)-移動比 (u/e) 曲線に変換したものである。衝撃荷重は縁端距離 e の増加と共に増加するが剪断応力は e によらずほぼ同じになることがわかる。他の2種類の鋼板についても同様な結果が得られている。

図5に剪断強度と縁端距離の関係を鋼材ごとに示す。縁端距離 e に拘らず、ある程度のバラツキの範囲で鋼材ごとにほぼ同じ剪断強度 τ_B になることがわかる。

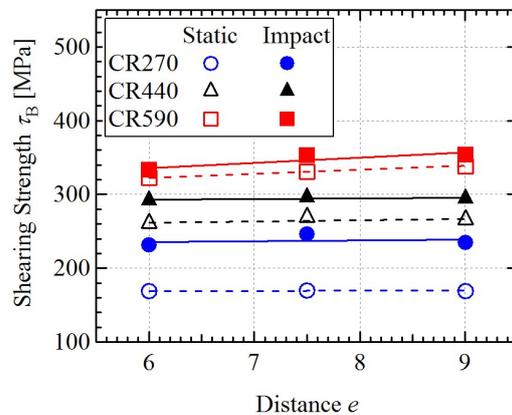


図5 剪断強度と縁端距離の関係

この結果は、後述の引抜き破断強度と組み合わせることによって、実用的には簡便な応力表示によるエネルギー形式の破断基準の構築が可能であることを示している。

(2) 引抜き破断：ボルト締結部材の垂直方向に作用する静的荷重および衝撃荷重下における引抜き破断実験をCR270とCR440の2種類の鋼板に関して行った。衝撃引抜き試験はスプリット・ホプキンソン棒方式から落錘型ワンバー方式の衝撃試験装置に改良変更して行った。静的および衝撃引抜き試験における試験材料として、270MPa級自動車用普通鋼（板厚 $t=2.0\text{mm}$ ）と440MPa級自動車用高張力鋼板（板厚 $t=1.2\text{mm}$ ）を用いた。

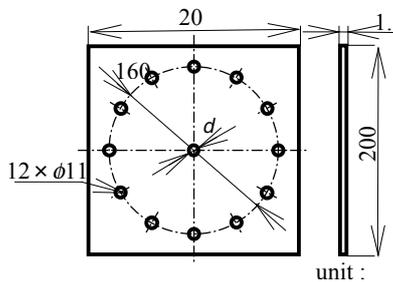


図6 試験鋼板の寸法

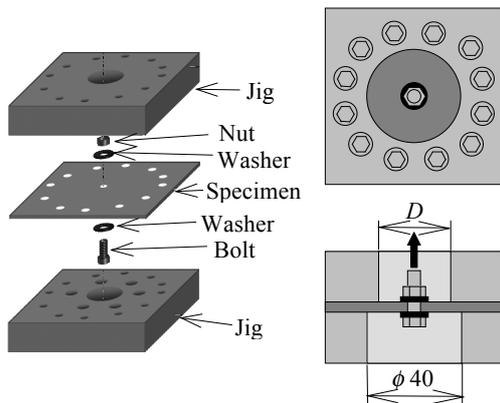


図7 ボルト締結試験体

図6に試験鋼板の寸法と形状を示す。試験片中心部にはボルト穴が空けられている。直径の異なる3種類のボルトを用い、それぞれボルト穴直径 d は6, 8, 10mmの3種類とした。試験片は上部治具および下部治具に固定し引抜き試験を行った。

図7にボルト締結試験体の組立て概略図を示す。試験平板をM6, M8, M10のボルト、ナットおよび呼び径6, 8, 10の平座金（それぞれ外径 $w=13.5, 17.5, 21.0\text{mm}$ ）で締結し、ボルト締結試験体とした。以降、各条件を $w13.5, w17.5, w21.0$ と記述する。引抜き試験は万能材料試験機(INSTRON5586)を使用し、ボルト締結試験体を試験機に固定し、試験片

に締結したボルトを引き抜く方法で行った。

図8に試験後の破断試験片を示す。すべての試験片が座金外周部下で円形状に抜け破断しており、破断した内側部分は座金に挟み込まれた状態になっている。



図8 引抜き試験の破断状態

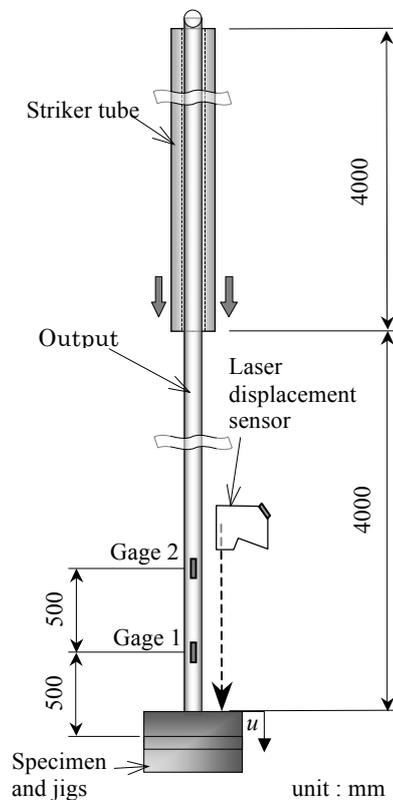


図9 衝撃引抜き試験装置

ボルト締結体の衝撃引抜き試験は落錘式試験装置を用いてワンバー法によって行った。図9に試験装置の概略図を示す。打撃円管（炭素鋼鋼管、外径42.7mm、内径35.5mm、長さ4000mm）を自由落下させ、出力棒下端にねじ締結したボルト試験体フランジに衝突させることによって衝撃荷重を加えた。出力棒には直径25mm、長さ8000mmのステンレス棒（SUS304）を使用し、試験片側端面から500mm（Gage 1）と1000mm（Gage 2）の位置に半導体ひずみゲージ（KYOWA, KSP-2-102-E4）

を貼付して、出力棒を伝播する応力波を測定した。また、CCD レーザー変位計(キーエンス, LK-G155) を用いてボルト試験体フランジの移動量を測定し変位-時間関係を求めた。出力棒を伝播する応力波の測定結果とレーザー変位計による変位-時間関係の測定結果から、ワンバー法の測定理論に基づいて衝撃引抜き荷重と移動変位の関係を算定した。

図 10 に高張力鋼板 CR440 に関する衝撃引抜き荷重 F と移動変位 u の関係を例示する。静的試験の場合と同様に、座金外径 w が大きくなるにつれて最大荷重が大きくなる。また衝撃引抜き破断した試験片は静的試験結果と同様にすべて座金外周部下で破断している。

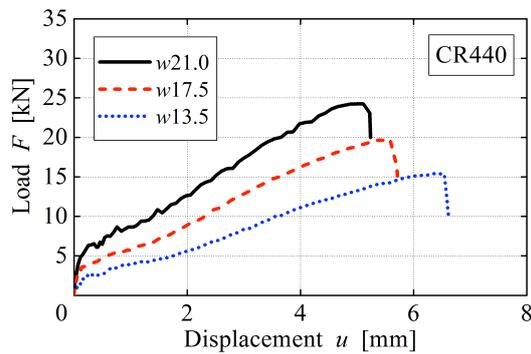


図 10 衝撃引抜き荷重-変位関係

ここでは引抜き荷重を破断面積で除したものを引抜き応力として整理した。すなわち、図 11 に示す座金外周部の元の断面積(座金外周長さ×板厚)で引抜き荷重を除いたものをここでは引抜き応力と呼ぶことにする。

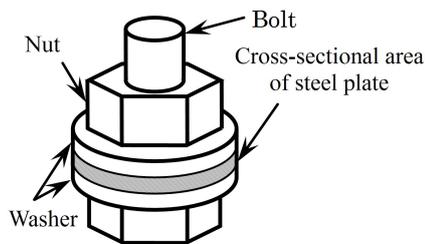


図 11 引抜き破断面

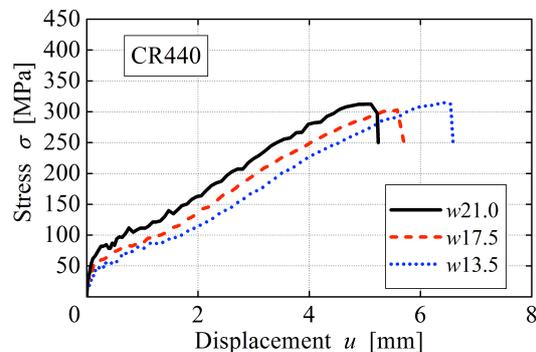


図 12 引抜き応力-変位関係

図 12 に、図 10 の各曲線から算定した衝撃引抜き応力(σ_i) - 変位(u) 曲線を示す。引抜き強度は座金外径によらずほぼ一致することがわかる。他の 2 種類の鋼板に関しても同様な結果が得られている。

図 13 に引抜き強度と座金外径の関係を鋼材ごとに示す。座金外径 w に拘らず、鋼材ごとにほぼ同じ引抜き強度 σ_B になることがわかる。この結果は、前述の剪断強度 τ_B と組み合わせることによって、実用的に簡便な、応力表示によるエネルギー形式の破断基準の構築が可能であることを示している。

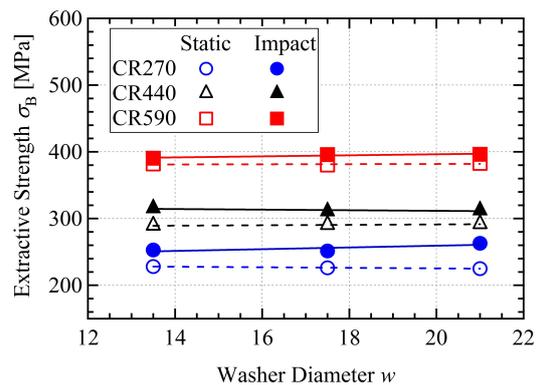


図 13 引抜き強度と座金外径の関係

(3) まとめ: 本研究は自動車のサスペンションフレームのボルト締結部位の被締結鋼板の衝撃破損・破断に関して、その破断基準の構築を目的としたものである。剪断的変形破断および引抜き破断に関する静的および衝撃試験また数値解析より、応力表示によるエネルギー形式の破断基準構築の可能性を提示した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

① M. Daimaruya, H. Fujiki, H. Ambarita, H. Kobayashi and H-S Shin, Shear Fracture of Jointed Steel Plates of Bolted Joints under Impact Load, Journal of Physics: Conference Series 451 (2013) 012007, 査読有, 2013, pp. 1-6. DOI: 10.1088/1742-6596/451/1/ 012007

② 臺丸谷政志, 藤木裕行, 申 亨燮, 小林秀敏, 永井克己, Himsar Ambarita, 衝撃荷重を受けるボルト被締結鋼板の剪断的破断, 日本材料強度学会誌, 査読有, Vol. 46, No. 4, 2013, pp. 69-77.

URL: <http://www.zairyou-kyoudo.jp>

- ③ 上村義彰, 相原康宏, 臺丸谷政志, 藤木裕行, 小林秀敏, 永井克己, ボルト被締結鋼板の衝撃引抜き破断について, 材料, 査読有, Vol. 60, No. 7, 2011, pp. 662-667, URL: <http://www.jsms.jp>

[学会発表] (計 3件)

- ① H.Ambarita, M. Daimaruya, H. Fujiki,
Impact Fracture of Jointed Steel Plates of Bolted Joint of Cars, The 8th International Symposium on Impact Engineering (ISIE2013), September 2-6, Osaka University, Toyonaka, Japan, CD-ROM.
- ② M. Daimaruya, Hiroyuki Fujiki, H. Ambarita,
Impact Extractive Fracture of Jointed Steel Plates of a Bolted, 10th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading (DYMAT2012), September 2-7, 2012, Fraunhofer EMI Freiburg, Germany, 01013-pp. 2-6.
DOI: 10.1051/epjconf/20122601013
- ③ 臺丸谷政志, 藤木裕行, H. Ambarita,
ボルト締結鋼板の衝撃破断, 第10回衝撃問題シンポジウム, 2011年12月22-23日, 法政大学理工学部(東京都小金井市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

臺丸谷 政志 (DAIMARUYA, Masashi)
室蘭工業大学・工学研究科・教授
研究者番号: 40002018

(2) 研究分担者

藤木 裕行 (FUJIKI, Hiroyuki)
室蘭工業大学・工学研究科・教授
研究者番号: 80238550