

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01216

研究課題名（和文）リサイクル高速打釘接合の開発

研究課題名（英文）Development of high speed nail joint method to be recyclable

研究代表者

橋村 真治（Hashimura, Shinji）

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：90290824

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、まず高速打釘における塑性変形の力学的挙動と接合メカニズムを解明し、釘の速度・運動エネルギーやせん断釘の先端形状が、接合強度に及ぼす影響について調査した。その結果、塑性変形の力学的挙動と接合メカニズムについては、FEM解析による検討は十分に行えなかったが、実験的に変形挙動を把握し、最適な釘形状を明らかにするとともに、接合強度を向上する方法を提案することができた。次に、釘を加速させながら釘に高速回転を与えて、高強度・高速打釘法の提案を目的に研究を実施したが、釘を加速させながらの高強度・高速打釘法は提案できなかった。しかし、釘にトルクを与えることで疲労強度を向上できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、マルチマテリアル接合を目的とした高速打釘接合に関する課題であり、接合強度と運動エネルギーの関係や、釘先端形状と接合強度の関係を明らかにした。また高速打釘時の被接合部材の変形が、接合強度にどのように影響をもたらすかも明らかにしており、本研究の成果は今後の高速打釘接合研究の基盤をなす結果であると考えている。また本研究の成果によって、高速打釘接合における接合強度を、以前の我々の研究における接合強度と比較して1.5倍程度まで向上できており、しかも安定した強度を得ることができている。その結果から、工業的価値も高く、今後の研究において社会的な普及も期待できると考えている。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have investigated the mechanical behavior of plastic deformation and the joining mechanism during the high-speed nailing, the effects of the drive speed of nail, kinetic energy and the tip shape of the nail on the joining strength. As a result, although we were unable to fully elucidate the mechanical behavior of plastic deformation and the joining mechanism using FEM analysis, we were able to understand the deformation behavior experimentally, reveal the optimal nail tip shape, and propose a method to improve joining strength. At next, we have conducted the research with the aim of proposing the high speed nailing method which can secure high joining strength by accelerating the nail rotation speed during the high speed nailing. But we were unable to enough achieve the aim. However, we have confirmed that the fatigue strength can be improved by applying torque to the nailing joint.

研究分野：材料力学

キーワード：マルチマテリアル 機械的接合 高速打釘 接合強度 疲労強度

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在、自動車や鉄道をはじめとする輸送機器では、CO₂削減に伴う国家戦略もあって、大幅な軽量化が求められている（NEDO、革新的新構造材料等研究開発「近未来の移動体及びそれに貢献する車体軽量化に用いる構造材料の課題と開発指針の調査」、H29 成果報告書）。それを踏まえて、輸送機器では鉄鋼材料に代わって、アルミニウム合金などの非鉄金属材料と樹脂材料などを組み合わせたマルチマテリアル構造化が求められている。一方、マルチマテリアル構造において最も重要な技術は締結・接合である。なぜなら、たとえ優れた素材を用いたとしても、素材と用途にマッチした接合方法ができれば構造材料としては使い物にならないからである。

一般的な接合としては、接着剤を用いた化学的接合や溶接等の金属学的接合、ボルト締結やかしめ等の機械的接合がある。その中でボルト締結は、ボルトやリベットを接合継ぎ手として使用するので、接合部材同士が化学的、金属学的に接合されておらず、接合部材に熱的損傷を与えない。また分解も可能である。さらにボルト締結では、ボルトとナットで接合部材をクランプする締付け軸力を発生させることができる。その結果、ボルト締結部が大きな外力を受けても、ボルト自体に作用する内力を小さくすることができ、耐疲労特性を向上できる。一方で、ボルト締結では前加工として下孔をあけておく必要がある。

現在、下孔加工なしに接合する機械的接合には、フロードリリングねじ（以下、FDS）や高速打鉋接合がある。FDS は、接合部材に締付け軸力を付与できるが、摩擦熱で下穴をあけるので熱的影響を排除できない。高速打鉋接合は、接合部材に高速で鉋を打込んで接合するので、FDS と同様に下孔加工を必要とせず、片側からのアプローチで接合部材の高速接合が可能である。一方、打鉋時に鉋が貫通する体積の分だけ接合部材を除去しなければならず、接合部材に大きな変形を生じさせてしまう。また、取外しや再接合が難しい上、関連の研究（Ufferman, et.al, 2018）、（Bharadwaj, et.al, 2019）も少なく、接合部材の変形メカニズムや打鉋メカニズムなど、現象の理解や解明には至っていない。

このような現状において、高速打鉋接合のように下穴なしに接合ができ、接合時に熱を発生させず、ボルト締結のように締付け軸力を発生させて、取外しや再接合を可能にした接合法があれば、高効率・高強度でリサイクルを可能にした接合が可能になる。申請者は、これまで高速打鉋接合に関する基礎的な研究を行い、鉋にらせん溝を設けることで、接合強度を向上した方法を提案した（Journal of Manufacturing Processes, 59, 2020, 500-508）。この方法は、接合部材に鉋が貫通する際に、鉋に設けたらせん溝によって鉋が回転しながら被接合部材に食い込むことで、鉋が接合部材にフッキングされて高い接合強度を得ることができる。一方で、打鉋時に接合部材を大きく塑性変形させてしまう。また、十分な締付け軸力を発生できているとは言い難い。したがって、このような高速打鉋において、らせん鉋が貫通する際に、接合部材の塑性変形を抑制させるとともに、締付け軸力を発生させ、接合強度を向上した方法の提案が望まれる。

2. 研究の目的

本研究では、高速打鉋時に接合部材に生じる塑性変形の力学的挙動を解明し、まず鉋の最適な形状を明らかにする。次に、らせん鉋を高速で射出する際に、鉋に同時に高速回転を与えることで、打鉋時に締付け軸力を生じさせ、高能率・高強度での異種材料接合を可能にした方法を提案する。さらに、この方法では、これまで困難であった鉋の取外しや再接合、リサイクルまでを可能にすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、研究期間において高速打鉋の接合メカニズムを解明し、上記の研究目的を達成するために、主として次の2つ項目について研究を実施した。

1. 鉋の速度・運動エネルギー、らせん鉋の先端形状が、接合部材の塑性変形過程に及ぼす影響を明らかにする。
2. ブラシレスモータの原理により、鉋を加速させながら高速回転を与える技術を確立し、新たな高速打鉋法を提案する。

上記項目1を実現するにあたって、各種らせん鉋の先端形状を提案し、実験的に以下の具体的項目について研究を実施した。

1-1 らせん鉋先端の最適形状の明確化

1-2 鉋の速度・運動エネルギーと接合強度の関係の明確化とその制御

次に、上記項目2を実現するにあたって、らせん鉋への回転付与の効果を実験により確認し、具体的に以下の項目について研究を実施した。

2-1 鉋の静的回転打鉋試験による鉋に付与する最適トルクの検討

2-2 ブラシレスモータの原理による鉋の高速回転装置の製作

2-3 鉋へのトルク付与による接合疲労強度の検討

上記の取り組みの結果について報告する。

4. 研究成果

本研究で使用した高速打釘接合装置について説明する．図1に，高速打釘接合装置を示す．本研究では，以前から使用していた圧縮空気を用いた高速打釘装置において，射出管内径の内径公差を10 μm 以下とし，真直度を上げるために，ガンドリルにより加工した射出管を用いた．らせん釘の射出原理としては，図1に示すように，らせん釘をサポート弾に取り付け，圧縮空気を用いてエアバルブを開放することで打釘する単純な構造である．射出速度は射出管側面に設けた2か所の横穴からレーザーセンサーを用いて速度を計測した．被接合部材は，射出管直下に設置し，XYテーブルにより，接合位置を詳細に調整できるようにした．なお，接合時の衝撃荷重はXYテーブルの下に設置した水晶式ロードセルで測定した．

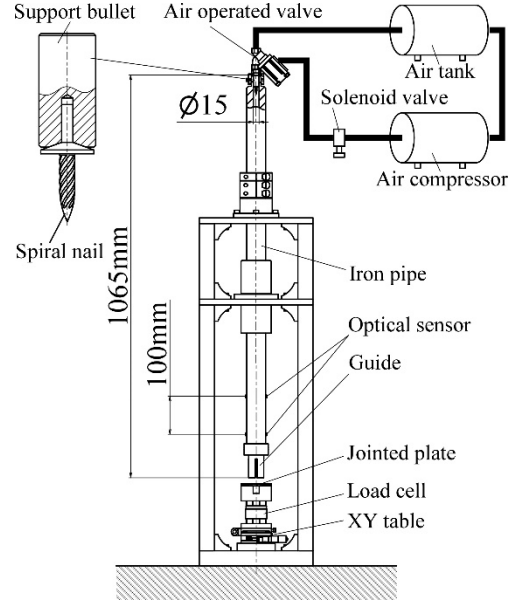


図1 実験装置と釘形状

1-1 らせん釘先端の最適形状の明確化

らせん釘先端の最適形状は，高速打釘時の被接合部材の変形に影響し，また接合強度にも影響する．そこで，まず図2(a)に示す穴あけポンチのような形状で，打釘時に釘先端で下穴をあけて接合を行うタイプなどの複数形状の釘を準備した．また，従来のらせん釘形状の先端角 α を，図2(b)のように30°~90°まで6つの先端角 α を持つ釘を準備し，らせん釘先端角の影響などを調査した．なお接合強度は，図2(c)に示すように，十字にして接合した接合部材を軸方向に引張ることで，最大の引張り荷重を接合強度 P_{max} とした．

図3に，高速打釘装置とらせん釘先端形状の概略図を示す．図3において，横軸は図2(a)と(b)に示す釘先端形状と先端角 α を示し，縦軸に接合強度 P_{max} を示す．図3を見ると，図2(a)の釘は，最大の接合強度 P_{max} は最も高いが，最小の接合強度は500 N以下で最も低く，極めてばらつきが大きい結果となった．この原因としては，釘先端の形状が加工精度上安定せ

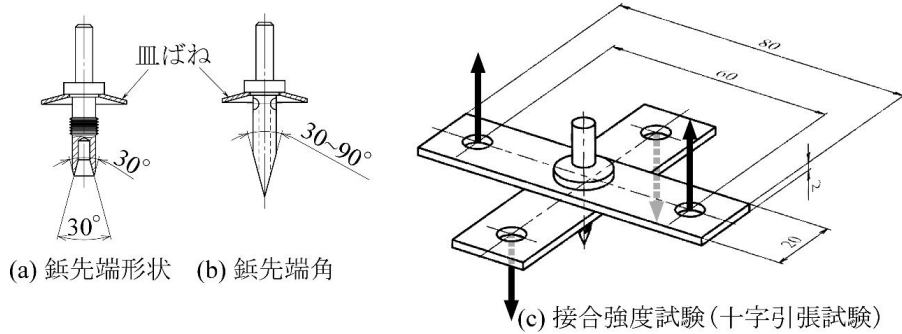


図2 釘の先端形状，先端角の概要図と接合強度試験の概要図

ずに，下穴を上手く穴あけできた場合や穴あけがうまくいかずに下穴を変形させた場合があったからである．このことから，この釘は，接合強度を向上させるポテンシャルは持つが，釘先端形状の精度管理が重要であると考えられる．次に，図3に示す従来のらせん釘の先端角 α を調べた結果を見ると，ばらつきはあるものの， $\alpha=30^\circ$ から60°まで最大および最小の接合強度 P_{max} は上昇し，その後飽和していることが分かる．この結果から， $\alpha=60^\circ$ 以上で安定した接合強度を得ることができることが分かった．なお $\alpha=30^\circ$ では，釘先端が座屈して被接合部材を変形させてしまう場合があり，接合強度 P_{max} が小さくなったと考えられる．また $\alpha=60^\circ$ 以上では， α が大きくなることで，接合に要する工

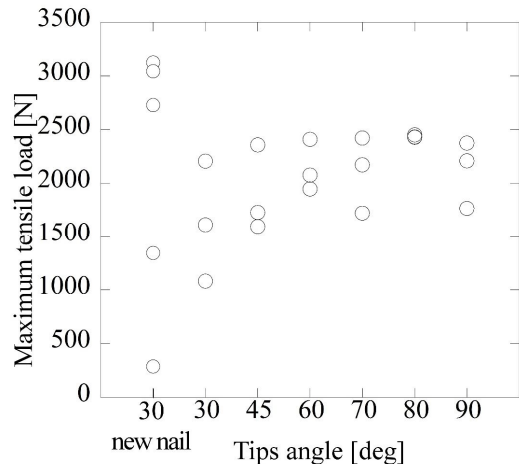


図3 先端形状・釘先端角と接合強度の関係

エネルギーが大きくなり、また被接合部材の変形が大きくなる傾向がみられた。そのため、最適な先端角としては $\alpha=60^\circ$ であった。

1-2 鋸の速度・運動エネルギーと接合強度の関係の明確化とその制御

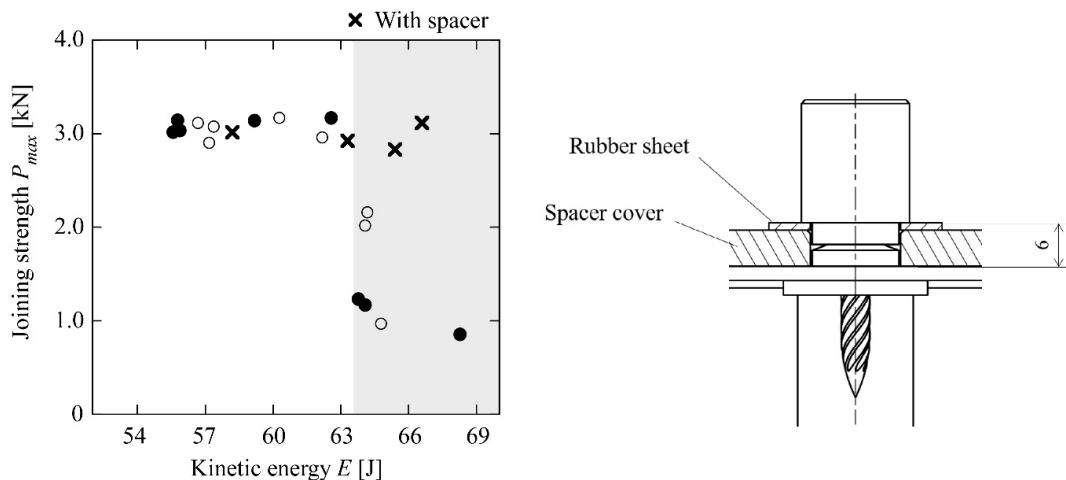
高速打鋸接合における打鋸時の被接合部材の変形は、片側アクセスの場合、鋸が貫通する箇所の被接合部材の体積を何らかの方法で除去しない限り、必ず背面方向に発生する。被接合部材の変形を抑制したい場合には、SPR等と同じように、打鋸時の接合部材背面を押えることが最も効果的である。一方、接合部材背面を押さえることは、高速打鋸の利点を失うことになる。したがって、被接合部材の変形を如何にして抑制し、接合強度の向上に結び付けるかが、高速打鋸における課題である。ここでは、鋸の速度・運動エネルギーと接合強度の関係とその制御について検討した結果について説明する。

図4(a)に、打鋸時の鋸と鋸を取付けているサポート弾に与える運動エネルギーと接合強度との関係を示す。図4(a)において、横軸はサポート弾に取付けた鋸に与える運動エネルギー E であり、縦軸は接合強度 P_{max} である。図4(a)において、○印はアルミニウム製のサポート弾を用いて接合した場合の結果であり、サポート弾とらせん鋸を含めた質量は14.0gであった。●印は、ポリカーボネート製のサポート弾を用いて接合した場合の結果であり、サポート弾とらせん鋸を含めた質量は5.7gであった。これを見ると、○印と●印共に、サポート弾に取付けた鋸に与える運動エネルギー E が63.5Jを超えると、接合強度 P_{max} が著しく低下していることが分かる。接合強度低下の原因は、接合部材背面の変形方であり、過度な運動エネルギー E は、明らかに接合強度を低下させることが分かる。一方、サポート弾に取付けた鋸に与える運動エネルギー E を小さくすると、鋸が接合部材に十分に貫通しなくなり、そもそも接合に問題をきたした。そこで、安定して十分な接合強度を確保するために、図4(b)に示すように、接合部材の上部に、十分な剛性を有したスペーサーカバーを設置し、サポート弾の運動エネルギーをスペーサーカバーで吸収させることで、運動エネルギー過多の問題を防止することを試みた。その結果が、図4(a)における×印である。これを見ると、運動エネルギー E が63.5Jを超えても、接合強度は低下していないことが分かる。なお、スペーサーカバーを用いることで、接合部材背面の変形を抑制できていた。この結果から、サポート弾に取付けた鋸に与える運動エネルギー E の過多を、スペーサーカバーで抑制することで、安定した接合強度を確保できることが分かった。

2-1 鋸の静的回転打鋸試験による鋸に付与する最適トルクの検討

次に、前述の「3. 研究の方法」の項目2で示した「高速打鋸時の鋸の回転を付与し、その回転によって締付け軸力を生じさせる」ことについて、以下に報告する。

ここでは、まず鋸に付与する最適トルクを把握するために、静的回転打鋸試験を実施した。試験は、鋸に回転を付与できる装置を設計・製作し、その装置を油圧サーボ疲労試験機に取付けて、準静的に鋸を回転させながら被接合部材に押し込んで、その時の接合状態を確認する試験を行った。この試験では、鋸が被接合部材に貫通していく際、鋸のらせん溝のリード角と鋸の回転と貫通速度の比を同期させた場合、リード角よりも鋸の回転速度を速めた場合と遅らせた場合の3つの条件で実験を行った。その結果、リード角よりも早く鋸を回転させると、鋸はねじりにより破断することが分かった。また鋸をリード角よりも遅く回転させると、うまく貫通できなかった。それに対して、リード角と鋸の回転速度を同期させた場合には、滑らかに鋸が接合部材に貫通することが分かった。この結果から、打鋸時に必要以上に回転させることは、接合にとっては逆効果になる可能性があることが分かった。なお、リード角と鋸の回転速度を同期させた場合には、逆回転させると鋸は抜け、取り外しが可能であることが分かった。再接合については、同じ個所に同じ鋸で高速打鋸により再接合することは難しいが、手動により同じ個所に同じ鋸で再接合することは可能であった。しかし、本研究では再接合した場合の接合強度までは確認していない。今後、再使用性について



(a) 鋸に与える運動エネルギー E と接合強度 P_{max} との関係 (b) 接合強度 P_{max} を安定させるスペーサー

図4 打鋸時の運動エネルギーと接合強度

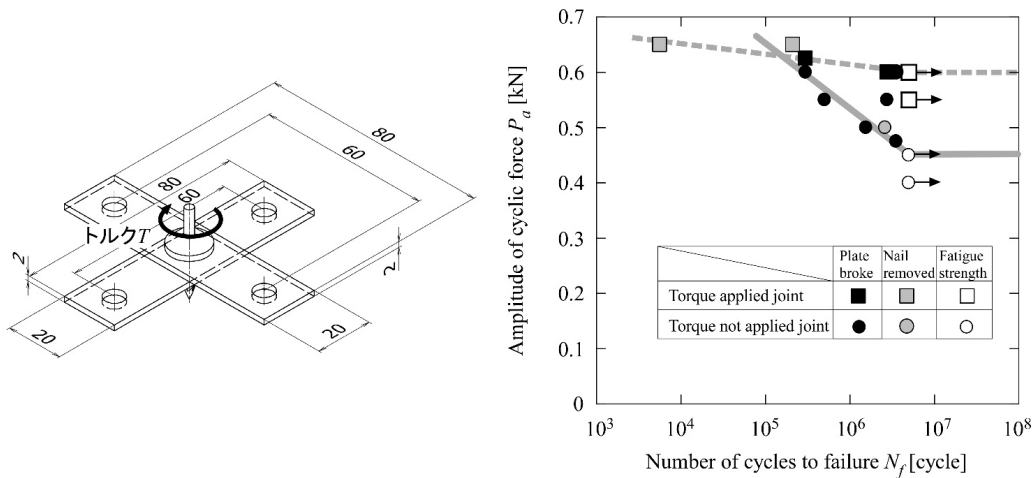


図5 トルク負荷による疲労強度の向上

は、検討しておく必要がある。

2-2 ブラシレスモータの原理による鋸の高速回転装置の製作

次に、ブラシレスモータの原理による鋸の高速回転装置の製作については、ブラシレスモータキットのステーターとその電子部品を応用して、打鋸装置に取付けるための装置の製作を行った。ブラシレスモータのロータは、鋸を取付けるサポート弾にNとSの磁石を設置して用いた。試作後に、鋸に回転を付与することはできたが、サポート弾に取付けられせん鋸が打鋸する際に外れたり、サポート弾に設置した磁石は外れたりして、実際に打鋸することはできなかった。この方法については、様々な面から検討を行ったが、本研究では回転しながら打鋸する方法を一旦断念し、打鋸後の鋸に締付けトルクを負荷して、疲労強度等への影響について検討することとした。次に、その結果について説明する。

2-3 鋸へのトルク付与による接合疲労強度の検討

打鋸後の鋸に、締付けトルクを負荷して、打鋸接合体の疲労強度を調べた結果について説明する。この実験では、らせん鋸を回転させて打鋸した接合体や、打鋸直後に締付けトルクを負荷した接合体を想定し、高速打鋸後にトルク負荷した接合体の疲労強度を調査した。高速打鋸後に負荷したトルクは、 $T=1.3\text{ Nm}$ とした。ここで、 $T=1.3\text{ Nm}$ とした理由は、予備試験において 1.3 Nm 以上では鋸が破断したためである。被接合部材には、アルミニウム合金A5052製薄板を用いた。接合体の疲労強度は、繰返し周波数 10 Hz で繰返し数 5×10^6 回までの時間強度で評価した。疲労試験の結果を図5に示す。図5において、四角印の結果は、打鋸後にトルク T を負荷した結果であり、丸印の結果はトルクを負荷していない結果を示す。またそれぞれの結果において、黒色は薄板で破壊した結果、灰色はらせん鋸が抜けて破壊した結果、白色は破壊等をせずに 5×10^6 回まで保持した結果である。図5を見ると、トルクを負荷した方が、疲労強度が25%程高くなった。この結果、らせん鋸を回転させながら接合する手法の開発は現時点で未達であるが、その手法の開発を達成できた場合や、打鋸直後にトルクを負荷した場合には、打鋸接合体の疲労強度を大きく向上できることが分かった。

最後に、本研究で行ったLS-DYNAを用いて行ったFEM解析結果について述べる。図6に、本研究で行ったらせん鋸を用いた高速打鋸接合の打鋸途中の画像を示す。FEM解析では、鋸の材質を剛体とし、被接合部材には、アルミニウム合金A5052製薄板を想定して行った。アルミニウム合金A5052製薄板のヤング率は $E=70\text{ GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.33$ 、0.2%耐力 $\sigma_{0.2}=195\text{ MPa}$ とした。また塑性変形の条件は、解析ソフト中のA5052-H32の材料特性を用いた。なお、被接合部材の破壊は、各要素の接点に生じる相当塑性ひずみが0.5%以上になった時に要素の接点を分裂させることで再現した。解析は、鋸を 75 m/s で薄板に衝突させて、高速打鋸接合をモデル化した。

FEM解析の結果、鋸は被締結部材を貫通し、被接合部材の変形や鋸の回転をある程度再現できた。しかし、実際の被接合部材の変形や鋸の回転は、実際よりも小さく、十分に再現できたとは言えなかった。したがって、FEM解析を用いた鋸先端の最適形状の検討や接合部材の変形メカニズム解明は行うことができなかった。これらについては、今後の課題として継続的に研究に取り組んでいくこととする。

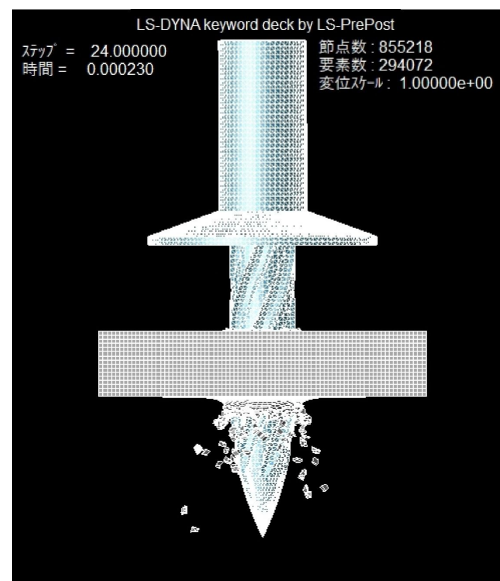


図6 高速打鋸接合のFEM解析

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山下 海飛, 高原 慎二, 田村 将吾, 橋村 真治
2. 発表標題 らせん溝を有する高速打釘接合体の疲労強度に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shinji Hashimura, Kaito Yamashita, Shinji Takahara, Hiroto Morodomi
2. 発表標題 High-speed Joining Method Using Spiral Nail
3. 学会等名 20th International Conference on Experimental Mechanics Applications in Materials Science, Engineering and Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高原 慎二, 田村 将吾, 橋村 真治
2. 発表標題 らせん溝を有する高速打釘接合における疲労強度に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会2023年度年次大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------