摩擦圧接によるポーラスアルミニウム / 薄肉パイプ複合部材の創製*

齋藤 雅樹^{*1}, 半谷 禎彦^{*2}, 藤井 英俊^{*3}, 孫 玉峰^{*3}, 森貞 好昭^{*3}
北原 総一郎^{*4}, 桑水流 理^{*5}, 吉川 暢宏^{*6}

Fabrication of Porous Aluminum / Thin-Walled Pipe Composite Materials by Applying Friction Welding

Masaki SAITO^{*1}, Yoshihiko HANGAI, Hidetoshi FUJII, Yufeng SUN, Yoshiaki MORISADA,
Soichiro KITAHARA, Osamu KUWAZURU and Nobuhiro YOSHIKAWA

^{*1} Graduate School of Engineering, Gunma University
Tenjin-cho 1-5-1, Kiryu, Gunma, 376-8515 Japan

In this study, porous aluminum core filled in hollow steel pipe composite materials (porous Al core pipe) was fabricated by applying friction welding. Al plates and blowing agent powder were put into the hollow steel pipe, and the rotating tool was pressed into the Al plates. Friction heat was generated and precursor of porous Al was fabricated by mixing Al plates and blowing agent powder by means of plastic flow. Porous core pipe with metal bonding was successfully fabricated by heating the precursor. The compression properties and deformation behavior of porous Al core pipe was obtained by the compression test. As a result, energy absorption per unit of volume of porous Al core pipe increased 1.5 times compare with the hollow pipe. But, the energy absorption per unit mass was slightly decreased.

Key Words : Porous Material, Composite Material, Friction Joint, Aluminum Alloy, Foam

1. 緒 言

ポーラスアルミニウムは内部に多数の気孔を有するため、軽量で衝撃吸収特性に優れ、さらに吸音性や断熱性も有するなど多機能材料である。特にポーラスアルミニウムを自動車用構造部材として利用することで、軽量化による燃費向上や衝突安全性能の向上が可能であると考えられる⁽¹⁾。しかし、単体のポーラスアルミニウムは引張強度や曲げ強度が低いため、現状では自動車への適用に制限がある。引張強度や曲げ強度を向上させるには、ポーラスアルミニウムを緻密な部材と複合化することが有効であると考えられる⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。例えば、ポーラスアルミニウムと中空パイプを接着剤により複合化させることで衝撃吸収特性の向上が示されている⁽⁴⁾。

著者らは摩擦圧接⁽⁵⁾を利用してポーラスアルミニウムとスチールパイプを簡便に複合化し、ポーラスアルミニウム / パイプ複合部材 (以下、ポーラスコアパイプ) を作製する方法を提案した⁽⁶⁾。本手法は、摩擦圧接を用いてパイプの内側に発泡前駆体であるブリカーサを作製するとともにパイプとブリカーサの接合を行い、複合化したブリカーサを加熱・発泡させて金属接合によるポーラスコアパイプを作製するものである。

本研究ではポーラスコアパイプの軽量化を目指し、薄肉スチールパイプを用いたポーラスコアパイプの作製を試みる。さらに、作製したポーラスコアパイプの圧縮特性を調査し、本手法によるポーラスアルミニウムとパイプの複合化の有効性について検討する。

* 原稿受付 2013 年 1 月 17 日

^{*1} 群馬大学大学院工学研究科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

^{*2} 正員, 群馬大学大学院工学研究科

^{*3} 大阪大学接合科学研究所 (〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 11-1)

^{*4} ホクダイ (株) (〒059-1434 北海道勇払郡安平町早来富岡 257)

^{*5} 正員, 福井大学大学院工学研究科 (〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1)

^{*6} 正員, フェロー, 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

E-mail : t12801224@gunma-u.ac.jp

2. 実験方法

図1にポーラスコアパイプの作製方法概略図を示す。まず、図1(a)に示すように外径16 mm、内径6 mm、高さ20 mmのA1050中空円板をジグで固定した外径20 mm、肉厚0.5 mm、長さ35 mmのパイプ(SUS304)の中に入れた。その際、中空円板の中に発泡剤として水素化チタン粉末(TiH_2 , $< 45 \mu\text{m}$)、および気孔形態安定剤としてアルミナ粉末($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, 約 $1 \mu\text{m}$)を入れた。なお、中空円板の質量に対して水素化チタン粉末を1 mass%、アルミナ粉末を5 mass%添加した。次に、図1(b)に示すように先端が平滑なツール(SUS304, $\phi 15 \text{ mm}$)を回転速度1000 rpm、押し込み速度3 mm/minで、ツールとA1050中空円板の接触位置から18 mm押し込んだ。この際、ツールとアルミニウムが接触して発生する摩擦熱によって軟化したアルミニウムが塑性流動することでアルミニウム中に発泡剤を混合させたプリカーサをツールとパイプの隙間に作製した。さらに、この塑性流動によりプリカーサとパイプの接合もなされる。その後、図1(c)に示すようにジグを取り外し、機械加工によりプリカーサを高さ25 mmに成形した。次に、成形後のプリカーサを型に入れ、あらかじめ1003 Kに保った電気炉内で7分間保持して発泡させた後、水冷して図1(d)に示すようなポーラスコアパイプを作製した。

次に、放電加工により外径20 mm、高さ20 mmの圧縮試験片を作製した。試験片ポーラス部の気孔率は試験片の質量からパイプ単体の質量を引いたポーラス部の質量と体積から算出した。さらに、内部気孔形態を観察するため試験片に対してX線CT撮像を行い、得られた画像からポーラス部の平均気孔径を算出した。圧縮試験は株式会社島津製作所精密万能試験機オートグラフAG-100kNGを用いて、クロスヘッド速度4 mm/minで行った。その際、圧縮挙動を明確にするため、試験片に5 mm間隔で圧縮方向に垂直な線を引き、ビデオ撮像による圧縮挙動の観察も行った。また、比較のためポーラスAlコアの無い中空パイプ単体についても同様に圧縮試験を行った。

3. 実験結果

図2に作製した圧縮試験片の外観写真を、図3に圧縮方向に対して垂直な断面のX線CT画像を示す。図2の試験片外観写真から肉厚0.5 mmでも摩擦圧接時の塑性流動や発泡過程でパイプが変形せずに形状を維持できることが分かった。また、図3の断層画像からパイプ内部においてもポーラスアルミニウムが形成され、満たされていることが分かった。なお、この試験片のポーラス部の質量と体積から算出した気孔率 p は83.8 %であり、X線CT画像から得られたポーラス部の平均気孔径 d は2.8 mmであった。

次に、パイプとポーラスアルミニウムの接合界面では、摩擦熱および塑性流動によってFe-Al金属間化合物層が生成されていると考えられる。SUS304鋼板と緻密A1050板接合体の接合界面において生成される金属間化合物層は数 μm でも界面強度を低下させることが報告されており⁽⁷⁾、本研究でも同様の問題が考えられる。しかし、A1050ポーラスアルミニウム/SPCC鋼板サンドイッチパネルにおいては、数十 μm の金属間化合物層が生成されている場合でもポーラス部/鋼板の界面強度よりも、ポーラス部の方が低強度であることが知られており⁽⁸⁾⁽⁹⁾、本研究で作製したポーラスコアパイプにおいても接合界面に生成される金属間化合物層の影響は少ないと考えられる。ただし、本手法で作製したポーラスコアパイプの接合界面において、どの程度の厚さの金属間化合物層が

Fig. 1 Schematic illustration of the fabrication process of the porous Al core pipe by friction welding.

生成され、どの程度界面強度に影響を与えるのか今後検討していく予定である。

図4にひずみが $\varepsilon = 0 \sim 0.8$ のときの圧縮試験の様子を示す。図4(a)の気孔率83.8%のポラスコアパイプおよび図4(b)の中空パイプの圧縮試験画像から、どちらも3段階で座屈変形するような挙動を示すことが分かった。図5に圧縮試験から得られた応力-ひずみ曲線を示す。図5には今回の結果の他に、摩擦攪拌法によりA1050板材に発泡剤を1 mass%添加して作製した気孔率87.3%のポラスアルミニウム単体の結果も示す⁽¹⁰⁾。図5から、ポラスコアパイプは中空パイプと比較して全体的に高い応力値を示すことが分かった。しかし、応力-ひずみ曲線はいずれも3箇所で応力が低下していた。これは、図4の変形挙動からパイプの座屈変形により生じたものであると考えられる。また、気孔率87.3%のポラスアルミニウムのようにポラスアルミニウム特有の応力が一定となるプラトー領域は見られなかった。すなわち、今回作製したポラスコアパイプの変形および圧縮特性はパイプが支配的であったと考えられる。

Fig. 2 Compressive specimen of porous Al core pipe.

Fig. 3 Cross-sectional X-ray CT image of porous Al core pipe.

Fig. 4 Sequential deformation images of (a) porous Al core pipe ($p = 83.8\%$) and (b) hollow pipe.

Fig. 5 Compressive stress-compressive strain curves.

次に、50 %圧縮時のエネルギー吸収量を算出して比較した。エネルギー吸収量は単位体積当たり E_v MJ/m³、および単位質量あたり E_m kJ/kg の 2 種類を算出した。単位体積当たりのエネルギー吸収量は中空パイプでは 11.7 MJ/m³、ポーラスコアパイプでは 17.8 MJ/m³ となり、ポーラスコアパイプとすることで約 1.5 倍向上した。これは、ポーラスアルミニウムがパイプと接合されることで互いに複合強化されたためであると考えられる。しかし、単位質量当たりのエネルギー吸収量は中空パイプでは 15.5 kJ/kg、ポーラスコアパイプでは 15.2 kJ/kg となり、わずかに減少した。これは、SUS304 の利用が肉厚 0.5 mm でもポーラスコアパイプの全重量に対するパイプの占める割合が 66% と大きいことやパイプの座屈変形を抑制するのに A1050 ポーラスアルミニウムでは強度不足であることが原因であると考えられる。したがって、単位質量当たりのエネルギー吸収量を向上させるためにはパイプをさらに薄くしてパイプの影響を小さくするか、ポーラス部をより高強度のアルミニウム合金で作製するなどしてポーラス部の影響を大きくすることが有効であると考えられる。

以上から、摩擦圧接を利用して作製した A1050 ポーラスアルミニウム / SUS304 パイプ複合部材は高いエネルギー吸収特性を有することが示唆され、自動車などの構造用部材としての利用が期待できる。また本手法による複合化は、摩擦圧接により外部熱源不要でプリカーサの作製およびプリカーサとパイプの接合が同時に行えるため省エネルギー性かつ生産性に優れていると考えられる。

4. 結 言

本研究では、摩擦圧接を利用して A1050 ポーラスアルミニウム / SUS304 薄肉パイプの複合部材を作製し、その複合化の有効性について検討した。その結果、肉厚 0.5 mm の薄肉パイプでも、作製時にパイプが変形すること無くポーラスコアパイプを作製することができた。作製した複合部材は単位体積当たりのエネルギー吸収量が中空パイプと比較して 1.5 倍向上するなど、エネルギー吸収特性の向上が示唆された。しかし、単位質量当たりのエネルギー吸収量はわずかに減少した。これは、パイプ肉厚が 0.5 mm でも厚く、パイプの座屈変形による影響や試験片の質量に対するパイプの占める割合が 66% と大きかったことが原因であると考えられる。したがって、パイプの影響を小さくするためにパイプ肉厚をさらに薄肉化するなど今後検討していく必要がある。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、芝浦工業大学先端工学研究機構宇都宮登雄教授、群馬大学大学院工学研究科齋藤勝男教授および元群馬大学大学院工学研究科久米原宏之教授から有益なご助言を頂きました。本研究の一部は、大阪大学接合科学研究所「接合科学共同利用・共同研究拠点」共同研究員制度の一環として行われました。また本研究の一部は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）平成 21 年度産業技術研究助成事業の助成のもと行われました。ここに厚く感謝いたします。

文 献

- (1) Banhart, J., "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams", *Progress in Materials Science*, Vol. 46, No. 6 (2001), pp. 559-632.
- (2) Banhart, J., "Aluminium foams for lighter vehicles", *International Journal Vehicle Design*, Vol. 37, No. 2 (2005), pp. 114-125.
- (3) Hanssen, A. G., Hopperstad, O. S., and Langseth, M., "Bending of square aluminium extrusions with aluminium foam filler", *Acta Mechanica*, Vol. 142 (2000), pp. 13-31.
- (4) 三好鉄二, 濱田猛, 金橋秀豪, "衝突安全性に優れたポーラスアルミニウム複合部材", R&D 神戸製鋼技報, Vol. 57, No. 2 (2007), pp. 95-100.
- (5) 摩擦圧接協会編, "摩擦接合技術", 日刊工業新聞社, (2006).
- (6) 齋藤雅樹, 半谷禎彦, 桑水流理, 吉川暢宏, "摩擦熱を利用したポーラスアルミニウムコア中空パイプの作製とその圧縮特性", 平成 24 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2012), pp. 369-370.
- (7) 及川初彦, 斎藤亨, 長瀬隆夫, 切山忠夫, "鋼板/アルミニウム板接合体の界面における金属間化合物の生成と成長", 鉄と鋼, Vol. 83, No. 10 (1997), pp. 37-42.

- (8) Hangai, Y., Koyama, S., Hasegawa, M., and Utsunomiya, T., “Fabrication of aluminum foam / dense steel composite by friction stir welding”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 41, No. 9 (2010), pp. 2184-2186.
 - (9) Hangai, Y., Ishii, N., Koyama, S., Utsunomiya, T., Kuwazuru, O., and Yoshikawa, N., “Fabrication and tensile tests of aluminum foam sandwich with dense steel face sheets by friction stir processing route”, *Materials Transactions*, Vol. 53, No. 4 (2012), pp. 584-587.
 - (10) Hangai, Y., Saito, K., Utsunomiya, T., Kitahara, S., Kuwazuru, O., and Yoshikawa, N., “Compression properties of Al/Al-Si-Cu alloy functionally graded aluminum foam fabricated by friction stir processing route”, *Materials Transactions*, Vol. 54, No. 3 (2013), pp. 405-408.
-