

〈技術論文〉

(受理:平成10年10月24日)

自動車車体軽量化のためのアルミ/アルミ,
アルミ/鋼の各種接合方法の強度特性原賀 康介*・金坂 敏行**・馬淵 晃***・船崎 敦****
高山 直樹*****・山本 三幸*****・高橋伸一郎*****

要 旨

自動車車体の軽量化においてアルミ化は有力な手段であるが、現在の鋼/鋼のスポット溶接のように生産性が高く強度的にも優れた接合方法を見出すことが重要な課題となっている。今回、アルミ/アルミ、アルミ/鋼の接合方法の候補として、(1) HENROB リベット (打ち込みリベット)、(2) TOX かしめ (メカニカルクリンチング)、(3) 接着と HENROB リベットの併用 (HENROB ボンド)、(4) 接着と TOX かしめの併用 (TOX ボンド) の4種類について静的強度、疲労特性を評価し、現行の鋼/鋼のスポット溶接、ウェルドボンドと比較検討した。その結果、次のことがわかった。

- (1) アルミ/鋼の強度特性はアルミ/アルミの強度特性とほぼ同等である。
- (2) HENROB リベットによる1.6mm アルミ/アルミの接合と、HENROB ボンドによる1.3mm 程度のアルミ/アルミの接合が0.8mm 鋼/鋼のスポット溶接の強度特性に匹敵し、HENROB ボンドによる1.5mm 程度のアルミ/アルミの接合が0.8mm 鋼/鋼のウェルドボンドの強度特性に匹敵する。
- (3) 1.6mm 以下の板厚での TOX かしめ及び TOX ボンドの強度特性は、0.8mm 鋼/鋼のスポット溶接やウェルドボンドの強度特性に及ばない。

1. ま え が き

現在の自動車車体用材料は鋼板が主体であり、その接合組立には主としてスポット溶接が用いられている。近年、燃費改善のために軽量化のニーズが高まっており、軽量化の有力な手段の一つとしてアルミ化が考えられている。しかし、アルミ/アルミまたはアルミ/鋼の接合組立に関しては現行のスポット溶接では困難な面が多く、これらの材料の新しい接合方法の検討が重要な課題となっている。

そこで、我々は、まず、アルミ/アルミ、アルミ/鋼の組合せに適用できる接合方法に関して文献調査(文献

1)~7)他)と市場調査(文献8)~9)他)やアンケートを行い、さらに、連続作業の可否、自動化適性、コスト、接合特性等を考慮して、(1) 打ち込みリベット、(2) メカニカルクリンチング、(3) 接着と打ち込みリベットの併用、(4) 接着とメカニカルクリンチングの併用の4種類を検討候補として選定した。上記調査文献には、個々の接合方法や2,3の接合方法の比較として、各種材質での強度や、接合プロセスが特性に及ぼす影響、適用例、コストなどが示されているが、我々が検討候補として選定した接合方法について強度特性を横並びに比較したデータはほとんど見あたらなかった。

このため、今回選定した4種類の接合方法のアルミ/アルミ、アルミ/鋼に対する強度特性(静的強度、疲労特性)を、現行の鋼板のスポット溶接、ウェルドボンドと比較検討した。

2. 実 験

2.1 実験方法・条件

アルミ/アルミ及びアルミ/鋼の接合方法として、(1) 打ち込みリベットとして HENROB リベット (日本ト

*三菱電機(株)先端技術総合研究所環境・分析評価技術部
尼崎市塚口本町8-1-1 〒661-8661

**いすゞ自動車(株)

***富士重工業(株)

****(財)日本自動車研究所

*****日産車体(株)

*****住友金属工業(株)

*****(株)神戸製鋼所

(原稿受付日:平成10年8月20日)

ライブレット(綱), (2) メカニカルクリンチングとして TOX かしめ(リックス(株)), (3) 接着と HENROB リベットの併用(HENROB ボンド), (4) 接着と TOX かしめの併用(TOX ボンド)の4種類について検討した。また, アルミ/アルミ及びレファレンスとしての鋼/鋼については, (5) スポット溶接, (6) 接着とスポット溶接の併用(ウェルドボンド)も試験を行った。なお, 接着との併用接合における併用効果を調べるために, (7) 接着のみの試験も行った。Fig. 1(文献1)に HENROB リベットの接合プロセスの概略を, Fig. 2(文献6)に TOX かしめの接合プロセスの概略を示した。Fig. 1は, 左から, まず, ポンチとダイの間に2枚の被接合材と打ち込みリベットがセットされ, 次に, 打ち込みリベットが上の板にささり, 上板を貫通して下板に食い込み, ダイにより打ち込みリベット先端が開き接合が完了する。その後ポンチとダイを開いて接合物を取り出す状態を示している。Fig. 2は, 左から, ポンチとダイの間に2枚の被接合材がセットされ, 次に, ポンチ先端が上の板に食い込み, 下の板がダイの凹部に押

しつけられるように塑性変形して接合が完了する状態を示している。

強度特性は静的強度(引張りせん断試験(JIS K 6850, JIS Z 3136に準拠), 十字引張り試験(JIS Z 3137に準拠))と疲労特性(引張りせん断, ISO 9964, JIS Z 3138に準拠)について検討した。

被接合材料は, 1.6mmと0.8mm厚さのアルミ板(A5182-O酸洗)と軟鋼板(SPCC)を用いた。引張りせん断試験片, 十字引張り試験片ともラップ部の寸法は25mm×25mmとし, HENROB リベット, TOX かしめ, スポット溶接はラップ部の中央に1ヶ所行い, 接着はラップ部全面とした。併用接合の場合は接着剤を塗布後硬化前に HENROB リベット, TOX かしめ, スポット溶接をラップ部の中央に1ヶ所行った。

各接合条件はメーカ推奨の最適条件とし, HENROB リベットはリベット径φ5の鉄製を用い, TOX かしめはダイ径φ8(1.6t用), φ6(0.8t用)のダイを用いた。アルミ/鋼の HENROB リベットはアルミ側から, TOX

かしめは鋼板側から打ち込んだ。接着剤はアルミ用の1液加熱硬化エポキシ「サンスター技研製 E-6208」を用い, アセトン脱脂したラップ部の全面に塗布して170°C, 20分間保持の条件で硬化した。なお, 膜厚調整用のガラスビーズ等は使用していない。

引張りせん断試験, 十字引張り試験は室温で引張り速度5mm/minで行い, 疲労試験は室温で, 繰り返し応力の波形は正弦波, 周波数20Hz, 最小最大荷重比0.1で行った。

2.2 荷重-歪み線図とデータの取り方

Fig. 3に, 接着剤と他の接合の併用接合における引張りせん断試験及び十字引張り試験の荷重-歪み線図を示した。両者とも, 最初に接着部のラップ端部で破壊が始まりピーク P1 が現れる。次に, ラップ中心部のリベットやかしめなどが破壊してピーク P2 が現れる。引張りせん断試験においては, すべて P1 の強度が P2 の強度より高くなっており, 併用接合の強度は P1 の値で示した。十字引張り試験の場合は引張りせん断試験とは逆に, すべて P2 の強度が P1 の強度より高くなっており, 併用接合の強度は P2 の値で示した。

なお, 単独接合の場合は, 接着だけでは P1 のみ, 接着以外の方法では P2 のみが見られ, それぞれの強度をデータとして用いた。

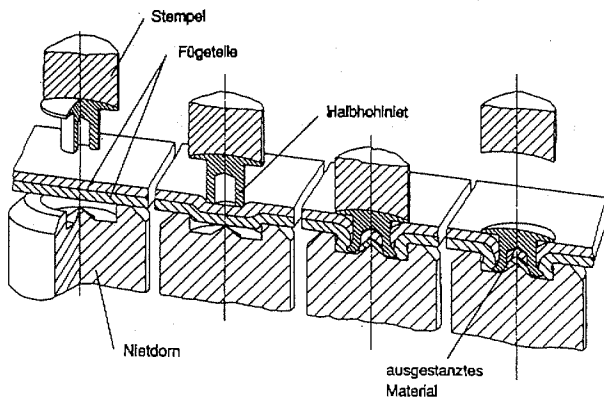


Fig. 1 Schematic illustration of the operational sequence of joining processes used for self-piercing rivetting (Henrob rivet).

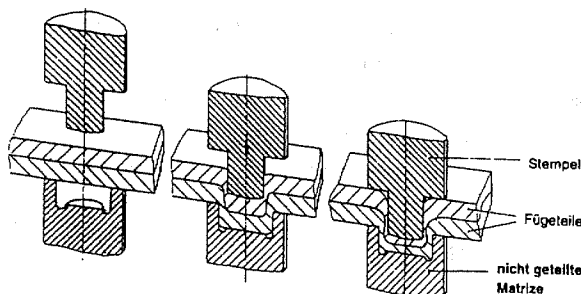


Fig. 2 Schematic illustration of the operational sequence of joining processes used for mechanical clinching (Tox clinching).

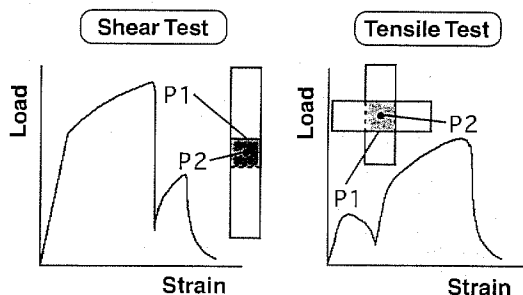


Fig. 3 Load-strain diagrams of tensile shear tests and cross lap tensile tests of hybrid joints (Tox-bonding, Henrob-bonding and weld-bonding).

3. 実験結果

3.1 静的強度

(1) 単独接合の強度

Fig. 4 に、1.6mm のアルミ/アルミの単独接合 (HENROB リベット, TOX かしめ, スポット溶接, 接着) の引張りせん断強度と十字引張り強度を示した。この結果より, 引張りせん断では, 接着>スポット溶接 \geq HENROB リベット> TOX かしめの順に強度が高く, 十字引張りでは, HENROB リベット>スポット溶接> TOX かしめ=接着の順に強度が高く, 引張りせん断と十字引張りでは, 接着, スポット溶接, HENROB リベットの強度の順位が逆になっており, TOX かしめはいずれも最も強度が低いことがわかる。十字引張りで接着の強度が低いのは, はく離力が動くためと考えられる。

(2) 併用接合の強度

Fig. 5 に、1.6mm のアルミ/アルミの併用接合 (HENROB ボンド, TOX ボンド, ウェルドボンド) の引張りせん断強度, 十字引張り強度を単独接合と比較して示した。この結果より, 引張りせん断においては, 接着剤との併用接合は単独接合に比べていずれも高い強度を示しており, いずれも接着単独とほぼ同じ強度を示していることから, 併用接合の強度は単独接合で最も強度が高い接着の強度に支配されていることがわかる。参考として, 併用接合におけるスポット溶接, HENROB リベット, TOX かしめ部の破壊強度を棒グラフ中に◇印で示した。十字引張りにおいては, 併用接合の強度はそれぞれの単独接合の強度と同等であることがわかるが, これは接着が単独接合の中で最も強

度が低いためと思われる。なお, 併用接合における接着部の破壊強度を棒グラフ中に○印で示した。

(3) 被接合材料の材質の影響

Fig. 6 は, 各接合のアルミ/アルミの強度に対するアルミ/鋼の強度比を示したものである。この結果より, 引張りせん断ではアルミ/アルミとアルミ/鋼とは強度にほとんど差は見られず, 十字引張りの場合はアルミ/鋼の方がアルミ/アルミより幾分強度が高いようであるが顕著な差は見られず, おしなべて接合強度は材料強度の低いアルミによって支配されていると考えるのが妥当と思われる。

(4) 被接合材料の板厚の影響

Fig. 7, Fig. 8 に, アルミ/アルミの引張りせん断強

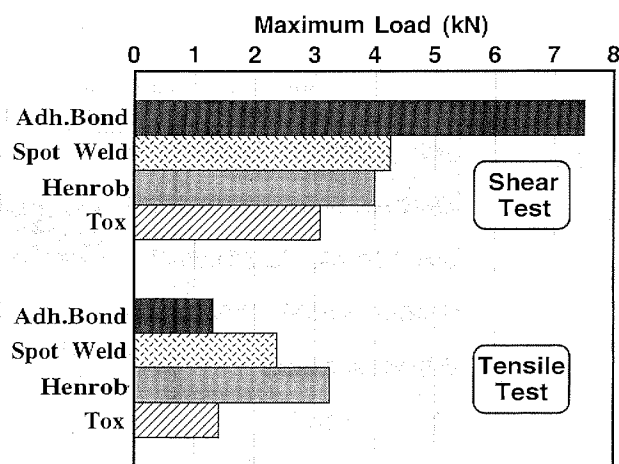


Fig. 4 Strengths of conventional joints (Tox clinching, Henrob rivetting, spot welding and adhesive bonding). [1.6mm Al/Al]

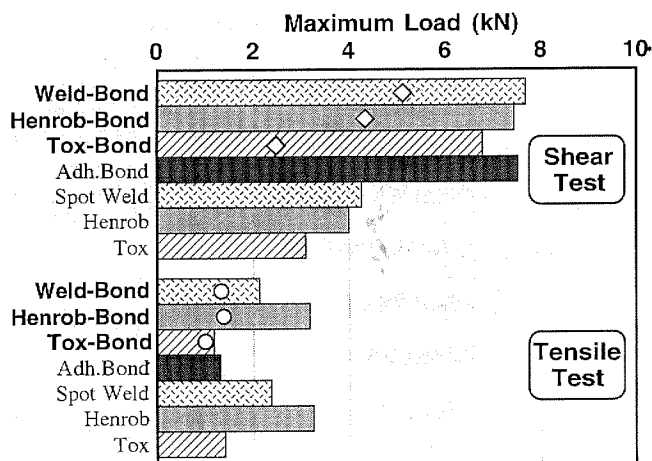


Fig. 5 Strengths of hybrid joints. [1.6mm Al/Al]

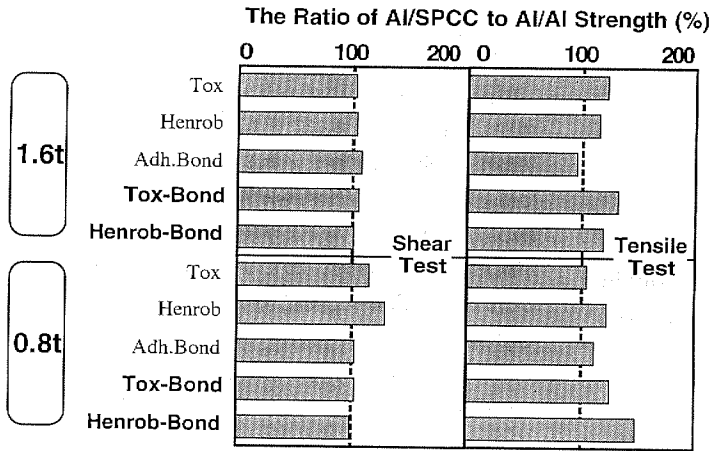


Fig. 6 The ratio of Al/steel strengths to Al/Al strengths.

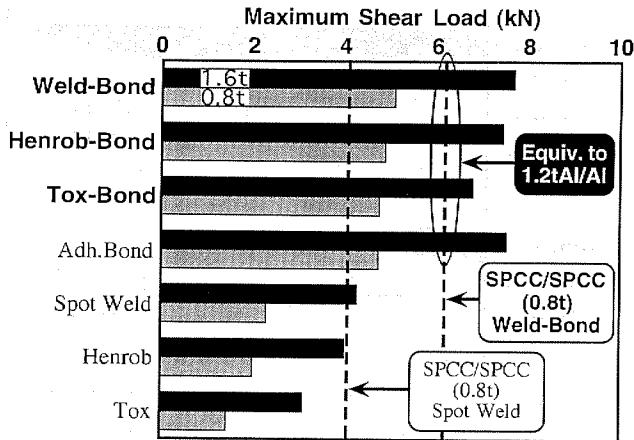


Fig. 7 Effects of adherend's thickness on shear strengths. [Al/Al]

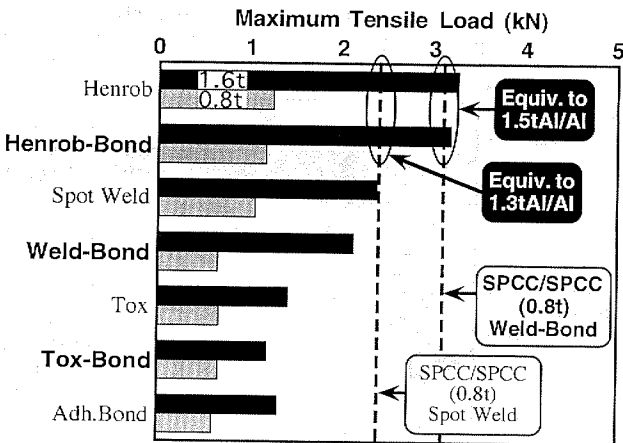


Fig. 8 Effects of adherend's thickness on tensile strengths. [Al/Al]

度, 十字引張り強度に及ぼす板厚の影響 (0.8mm と 1.6mm の比較) を示した。なお, 図中には比較のため 0.8mm 鋼/鋼のスポット溶接及びウェルドボンドの強度も示した。これらの結果より, 引張りせん断強度, 十字引張り強度とも板厚の影響は非常に大きいことがわかる。また, Fig. 7 より, 接着を併用すれば 0.8mm のアルミ/アルミでも 0.8mm の鋼/鋼のスポット溶接を上回るせん断強度が得られることがわかり, 1.2mm 厚程度のアルミ/アルミを使用して接着を併用すれば 0.8mm の鋼/鋼のウェルドボンドに相当するせん断強度が得られると考えられる。なお, スポット溶接単独および HENROB リベット単独でも 1.6mm のアルミ/アルミを使用すれば 0.8mm の鋼/鋼のスポット溶接と同等のせん断強度が得られることがわかる。Fig. 8 より, 0.8mm の鋼/鋼のスポット溶接相当の引張り強度を得るには, 1.3mm 厚程度のアルミ/アルミを使用して HENROB リベットを使用すればよく, 0.8mm の鋼/鋼のウェルドボンド相当の引張り強度を得るには, 1.5mm 厚程度のアルミ/アルミを使用して HENROB リベットを使用すればよいと考えられる。

3.2 疲労特性

(1) 単独接合の疲労特性

Fig. 9 に, 1.6mm アルミ/アルミの単独接合 (HENROB リベット, TOX かしめ, スポット溶接, 接着) の疲労特性を示した。なお, 比較のために, 図中に 1.6mm, 0.8mm の鋼/鋼のスポット溶接の疲労特性も示した。この結果より, 1.6mm アルミ/アルミの単独接合の疲労特性は, 接着 > HENROB リベット = TOX かしめ > スポット溶接の順に優れることがわかる。また, 1.6mm アルミ/アルミの接着の疲労特性は 1.6mm の鋼/鋼のスポット溶接の疲労特性とほぼ同等であり, 1.6mm アルミ/アルミの HENROB リベット, TOX かしめの疲労特性は 0.8mm の鋼/鋼のスポット溶接の疲労特性とほぼ同等であることがわかる。なお, 1.6mm アルミ/アルミのスポット溶接は, 0.8mm 鋼/鋼のスポット溶接にも及ばないこともわかる。

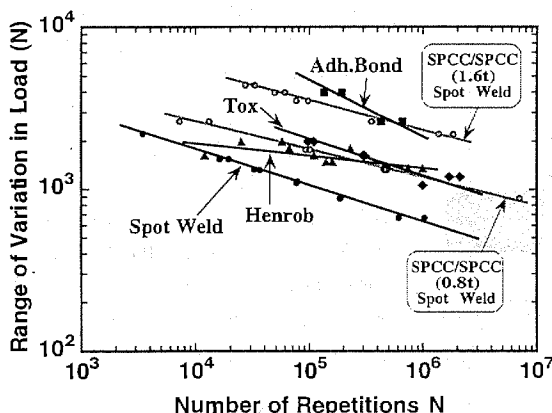


Fig. 9 Fatigue strengths of conventional joints (1.6mm Al/Al) compared with those of spot welded steel/steel joints.

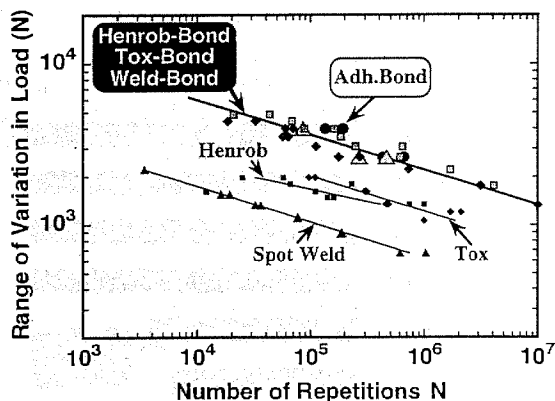


Fig. 10 Fatigue strengths of hybrid joints compared with those of conventional joints. [1.6mm Al/Al]

(2) 併用接合の疲労特性

Fig. 10 に、1.6mm アルミ/アルミの併用接合 (HENROB ボンド, TOX ボンド, ウェルドボンド) の疲労特性を単独接合 (HENROB リベット, TOX かしめ, スポット溶接, 接着) と比較して示した。この結果より、併用接合の疲労特性は、単独接合に比べて大きく向上することがわかる。また、3種類の併用接合方法とも疲労特性は一致しており、さらに接着単独とも一致していることから、併用接合の疲労特性は、接着によって支配されているといえる。

Fig. 11 は、1.6mm アルミ/アルミの3種の併用接合と接着の疲労特性を、1.6mm, 0.8mm の鋼/鋼のスポット溶接の疲労特性と比較したものである。この結果より、1.6mm アルミ/アルミの併用接合と接着の疲労特性は、1.6mm 鋼/鋼のスポット溶接の疲労特性と同等であることがわかる。

(3) 被接合材料の板厚・材質の影響

Fig. 12 は、HENROB リベット (黒く表示) 及び HENROB ボンド (グレーで表示) の1.6mm アルミ/アルミ, 0.8mm アルミ/アルミ, 1.6mm アルミ/鋼の疲労特性を比較したものである。

この結果より、HENROB リベットにおいては、1.6mm, 0.8mm のアルミ/アルミ接合に見られるように、板厚の影響が非常に大きいことがわかる。また、1.6mm の同一板厚のアルミ/アルミとアルミ/鋼に見られるように、アルミ/鋼の方がアルミ/アルミよりいくぶん優れるが顕著な差はないことがわかる。これらの点より、単独接合における疲労特性は材料強度が低いアルミの強度によって支配されていると考えられる。

一方、HENROB ボンドでは、1.6mm アルミ/アルミ, 0.8mm アルミ/アルミ, 1.6mm アルミ/鋼のい

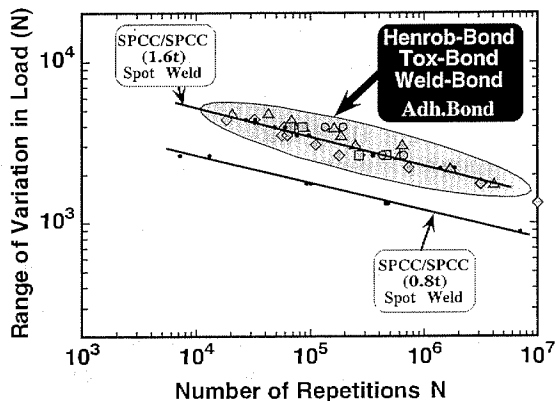


Fig. 11 Comparison of fatigue strengths of hybrid joints and adhesive bonded joints (1.6mm Al/Al) with the strengths of spot welded steel/steel joints.

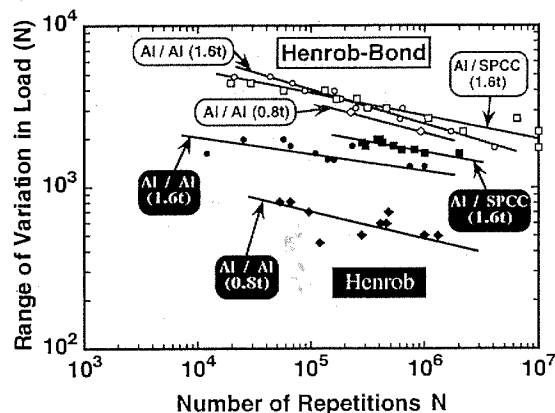


Fig. 12 Effects of the adherend's thickness and different kinds of metals on fatigue strengths.

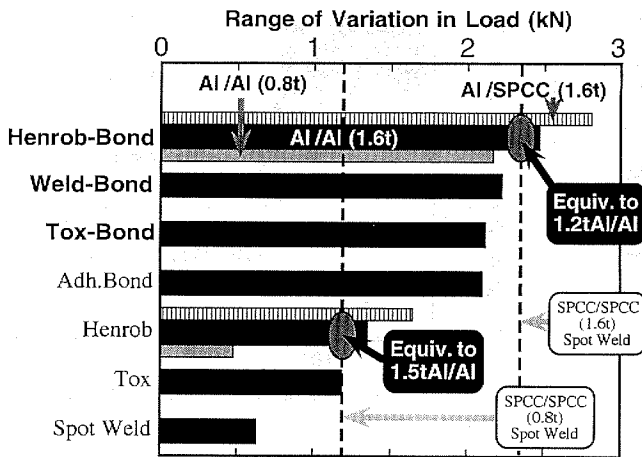


Fig. 13 Fatigue strengths at 10^6 cycles.

ずれも疲労特性はほぼ一致しており、被接合材料の板厚・材質の影響は見られない。これは、接着により面接合となるため、接合部の応力が分散されたためと考えられる。Fig. 12 及び Fig. 11 の結果より、0.8mm アルミ/アルミの併用接合と接着の疲労特性は、1.6mm 鋼/鋼のスポット溶接の疲労特性と同等であるといえる。

(4) 10^6 サイクルにおける時間強度の比較

Fig. 13 に、各種接合法の 10^6 サイクルにおける時間強度を示した。なお、図中には比較のため 0.8mm 及び 1.6mm の鋼/鋼のスポット溶接の時間強度も示した。この結果より、1.6mm の鋼/鋼のスポット溶接相当の時間強度を得るには、1.2mm 厚程度のアルミ/アルミを使用して HENROB + 接着の併用接合をすればよく、0.8mm の鋼/鋼のスポット溶接相当の時間強度を得るには、1.5mm 厚程度のアルミ/アルミを使用して HENROB リベットを用いればよいことがわかる。

3.3 アルミ接合への適用可能性

今回選定した 4 種類の接合方法で現行の 0.8mm 鋼/鋼 Table 1 Thickness of aluminum sheet equivalent to 0.8mm steel sheet.

Joining method of 0.8mm Steel/Steel	Joining method of aluminum/aluminum	Equivalent thickness of aluminum		
		Shear strength	Tensile strength	Fatigue strength
Spot-weld	Henrob-bond	<0.8mm	1.3mm	<0.8mm
	Tox-bond	<0.8mm	>1.6mm	<1.6mm
	Henrob	1.6mm	1.3mm	1.5mm
	Tox	>1.6mm	>1.6mm	1.6mm
Weld-bond	Henrob-bond	1.2mm	1.5mm	1.2mm
	Tox-bond	1.2mm	>1.6mm	>1.6mm
	Henrob	>1.6mm	1.5mm	>1.6mm
	Tox	>1.6mm	>1.6mm	>1.6mm

鋼のスポット溶接及びウェルドボンドに匹敵する強度を得るために必要なアルミの板厚を Table 1 に示した。この結果より、HENROB リベットによる 1.6mm アルミの接合と、HENROB リベットと接着の併用 (HENROB ボンド) による 1.3mm 程度のアルミの接合が 0.8mm 鋼/鋼のスポット溶接の強度に匹敵し、HENROB ボンドによる 1.5mm 程度のアルミの接合が 0.8mm 鋼/鋼のウェルドボンドの強度に匹敵することがわかる。

4. まとめ

自動車車体の軽量化においてアルミ化は有力な手段であるが、現在の鋼/鋼のスポット溶接のように生産性が高く強度

的にも優れた接合方法を見いだすことが重要な課題となっている。今回、アルミ/アルミ、アルミ/鋼の接合法の候補として、(1) HENROB リベット (打ち込みリベット)、(2) TOX かしめ (メカニカルクリンチング)、(3) 接着と HENROB リベットの併用、(4) 接着と TOX かしめの併用について静的強度、疲労特性を評価検討した。その結果、次のことがわかった。

(1) 単独接合の場合、引張りせん断強度は、接着 > スポット溶接 \geq HENROB リベット > TOX かしめの順に高く、十字引張り強度は、HENROB リベット > スポット溶接 > TOX かしめ \approx 接着の順に高く、引張りせん断と十字引張りでは、接着、スポット溶接、HENROB リベットの強度の順位が逆になっている。

(2) 接着剤との併用接合の場合、せん断強度は単独接合に比べて上昇し、接着単独とほぼ同じ強度を示す。十字引張り強度は単独接合の強度と同等で、接着併用の効果は見られない。

(3) 接合強度に及ぼす板厚の影響は大きい。

(4) HENROB リベットによる 1.6mm アルミの接合と、HENROB リベットと接着の併用 (HENROB ボンド) による 1.3mm 程度のアルミの接合が 0.8mm 鋼/鋼のスポット溶接の強度に匹敵し、HENROB ボンドによる 1.5mm 程度のアルミの接合が 0.8mm 鋼/鋼のウェルドボンドの強度に匹敵する。

なお、今回の評価はあくまでも HENROB リベット、TOX かしめの打点数が 1 点の場合であり、打点数を増やせば強度が上昇することを考慮すれば、今回選定した接合法はいずれもアルミ/アルミ、アルミ/鋼の接合に適用可能と考えられる。

例えば、TOX かしめは 1 点での強度は特に高くない

が、プレス型内への組込が容易で同時多点締結が容易にできるなど生産性に優れた特徴を有している。

強度、生産性、コストを総合的に判断して適材適所の適用検討が必要である。

本論文は、(株)自動車技術会・構造形成プロセス専門委員会(委員長:(株)豊田中央研究所 藤本正男氏)において、1994年5月から3年間、自動車車体軽量化のための最適接合法の検討を目的に行った共同研究の結果をまとめたものであり、1997年3月25日に開催された(株)自動車技術会シンポジウム「新しい車体構造形成技術—設計、接合の最適化と情報ネットワーク—」で発表した内容に加筆したものである。

参考文献

- 1) L. Budde, W. Lappe and M. Boldt : VDI Ber., No. 883, 333 (1991).
- 2) L. Budde and W. Lappe : Bänder Bleche Rohre, Vol. 32, No. 5, 94 (1991).
- 3) L. Budde, W. Lappe, F. Liebrecht and D. Suse : Blech Rohre Profile, Vol. 39, No. 4, 310 (1992).
- 4) K. Gugisch : Alum. Ind., Vol. 12, No. 6, 23 (1993).
- 5) H. P. Liebig and J. Mutschler : Bänder Bleche Rohre, Vol. 34, No. 4, 46 (1993).
- 6) T. Kohstall and L. Budde : Blech Rohre Profile, Vol. 41, No. 2, 107 (1994).
- 7) 原賀他 : 自動車技術会シンポジウム予稿集, No. 9408, 52 (1994).
- 8) RIX (株) : TOX 技術資料.
- 9) 日本ドライブイット (株) : ヘンロブリベット技術資料.

<Technical Report>

Strength Properties of Aluminum/Aluminum and Aluminum/Steel Joints for Light Weighting of Automotive Body.

Kosuke HARAGA*, Toshiyuki KANESAKA**, Akira MABUCHI***, Atsushi FUNASAKI****, Naoki TAKAYAMA*****, Miyuki YAMAMOTO***** and Shinichirou TAKAHASHI*****

* Mitsubishi Electric Corp.

** Isuzu Motors Ltd.

*** Fuji Heavy Industries

**** Japan Automobile Research Institute, Inc.

***** Nissan Shatai Co., Ltd.

***** Sumitomo Metal Industries Ltd.

***** Kobe Steel, Ltd.

(Accepted for publication : October 24, 1998)

Abstract

For the purpose of lightening automotive body, we examined strength properties of four kinds of joining methods for aluminum to aluminum or aluminum to steel. These joining methods examined are selfpiercing rivetting (HENROB rivetting), mechanical clinching (TOX clinching), hybrid of HENROB rivetting and adhesive bonding (HENROB-bonding) and hybrid of TOX clinching and adhesive bonding (TOX-bonding). The strength properties tested are shear strengths, tensile strengths and fatigue strengths. The strength properties of aluminum/aluminum joints and aluminum/steel joints were compared with those of 0.8t steel/steel spot-welded and weld-bonded joints.

The results obtained are as follows:

- (1) Strength properties of aluminum/steel joints are about equal to those of aluminum/aluminum joints.
- (2) The strength properties of 1.6mm aluminum/aluminum joints by HENROB rivetting and 1.3mm aluminum/aluminum joints by HENROB-bonding are equivalent to those of 0.8mm steel/steel joints by spot welding, and those of 1.5mm aluminum/aluminum joints by HENROB-bonding are equivalent to those of 0.8mm steel joints by weld-bonding.
- (3) In the case of TOX clinching and TOX-bonding, the strength properties of less than 1.6mm aluminum/aluminum joints are less strong than those of 0.8mm steel/steel joints by spot welding.

(Received : August 20, 1998)