

接着・リベット併用継手の引張ならびに疲労強度に 及ぼす被着体鋼板強度の影響*

今中 誠^{*1}, 原賀康介^{*2}, 西川哲也^{*3}

Effect of Adherend Steel Strength on Static and Fatigue Strength of Adhesive/Rivet Combined joint

Makoto IMANAKA, Kosuke HARAGA and Tetsuya NISHIKAWA

Adhesive/rivet combined bonding has attracted special interest recently as a joining technique of high-strength steel because of its high joint efficiency. In this study, the effects of steel strength on the tensile and fatigue strength of adhesive/rivet combined and adhesive joints were investigated. In addition, the stress distributions of these joints were analyzed by finite-element methods, taking into consideration the plastic deformation of adherend steels. With the increase of steel strength, the tensile strength of combined and adhesive joints increased and tensile strength was improved by the combination with the rivet. However, irrespective of the steel strength, the fatigue strength of combined and adhesive joints was constant and the fatigue strength of the combined joint was similar to that of the adhesive joint. These findings could be explained from the difference of stress distribution between static and fatigue load conditions.

Key Words: Adhesive Joint, Tensile Properties, Fatigue, Finite-Element Method, Adhesive/Rivet Combined Joint

1. 緒 言

機械装置の軽量化を図るため、薄肉の高張力鋼板が自動車、電機産業等を中心に使用され、さらに高い強度の鋼板の使用が求められる傾向にある。しかし、これら薄肉鋼板の接合に際して、溶接やリベット締結を用いると継手強度の低下が著しい。

そのため、薄肉の高張力鋼板の高強度接合技術の開発が切望されている。最近、これらの薄肉鋼板の接合に熱影響を受けないことや接合部の応力集中が少ない等の特徴を持つことから、接着接合法が注目を集めている。しかし、現状では、信頼性さらには施工上の観点から接着単独よりも溶接やリベットと接着を併用して接合する場合が多く、これら併用継手の強度特性を明確化が切望されている。

現在、このような接着併用継手の強度特性についての研究が行われ始めているが^{(1)~(6)}、接着継手に比べるとその研究報告は少なく、継手設計に際して要求される継手の応力分布と強度の関係や、強度推定法等に関

する研究はごくわずかである。さらに、併用条件によっては接着継手よりも強度低下をもたらすことが確認されている⁽⁷⁾。

本研究では、接着ならびに接着とリベットとの併用継手(以下、併用継手と称する)について、装置の軽量化を推進する上で重要な課題である被着体の鋼板強度の継手強度に及ぼす影響を明らかにするため、鋼板強度の異なる高張力鋼板を被着体とする接着ならびに併用継手の静的引張りならびに疲労試験を行った。さらに有限要素法により接着部の応力分布を求め、継手強度と接着部の応力分布の関係について検討した。

2. 実験方法

被着体試験片としては、板厚1.2 mmの110 kg/mm²級ならびに板厚1.0 mmの60および40 kg/mm²級の高張力鋼板[NKK(株)製]を使用した。以後これらの鋼板をHT 110, HT 60ならびにHT 40と称する。また、接着剤には変性アクリル系接着剤ハードロックC-355[電気化学工業(株)製]を使用した。さらに、リベットとしては最近、種々の薄肉鋼板の接合に使用されているブラインドリベットの一つである鋼製のポップナット(ポップリベットファスナー社製、内ねじ径M 3~10)を使用した。併用継手試験片は次の方法で作

* 原稿受付 平成3年6月10日。

*¹ 正員, 大阪教育大学 (〒543 大阪市天王寺区南河堀町4-88)。

*² 三菱電機(株)材料研究所 (〒661 尼崎市塚口本町8-1-1)。

*³ 正員, 三菱電機(株)材料研究所。

製した。まず、アセトンで被着体表面を脱脂しその後、被着体の接着部付近に接着剤の2液を同量滴下し、十分に混合した後、もう一方の被着体を貼り合わせ、接着剤が硬化する前にリベットを打った。なお、接着層の厚さを一定にするために接着剤中にあらかじめ直径100 μm の樹脂ビーズを少量添加している。リベットの締結にはエアリベッタ EN 1000 A (ポップリベットファスナー社製) を用いた。このようにして作製した試験片を室温に7日間以上放置して完全硬化させた後、強度試験に供した。接着継手は上記の併用継手作製法のリベット締結過程を除いた方法で、リベット継手は同様に接着過程を除いた方法でそれぞれ作製した。

強度試験に供した接着および併用継手の試験片形状を図1に示す。なお、リベット単独の継手の形状は併用継手のそれと接着部を除いて同一である。また、図2は被着体鋼板 (HT 40, HT 60, HT 110) の応力-ひずみ関係を示したものである。これら鋼板ならびに接着層の機械的性質は表1にまとめて示している。

静的引張試験はインストロン万能材料試験機 (1175形, 容量10 t) を用いて、引張速度5 mm/minの条件で、疲労試験は電気油圧式疲労試験機を用いて応力比 R (最小応力/最大応力) = 0.1, 応力繰返し数30 Hzの条件で行った。

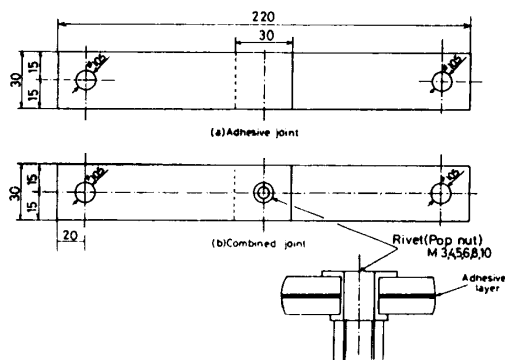


図1 接着ならびに併用継手試験片の形状および寸法

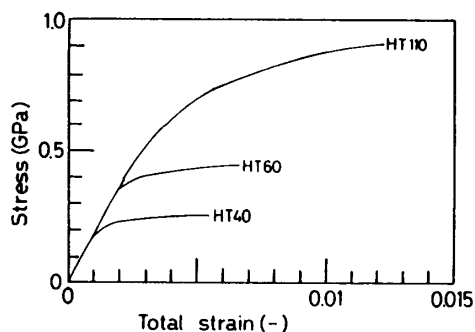


図2 被着体鋼板の応力-ひずみ関係

3. 応力解析

接着および併用継手の強度特性と接着層における応力分布の関係を調べるため、有限要素法により接着ならびに接着継手について8節点アイソパラメトリック立体要素を用いて三次元の応力解析を行った。

併用継手が X 軸について対象であることを利用して全体の1/2のモデルについて図3に示す境界条件ならびに荷重条件で解析を行った。解析に用いたリベット径はM5, リベットの締付け力は6.86 kNとしてリベット部の上部と下部に等分布荷重として負荷した。また、ポップナット断面の接着層厚さを調べた結果、締結力が及ぶ範囲の接着層厚さが薄くなっていることが確認された。そこで本解析では図に示すようにこの範囲の接着層厚さを薄くしている。図に示すように接着層は厚さ方向 (z 方向) には1層に分割し、応力集中箇所であるラップ端部におけるメッシュの寸法は長手方向に1 mmとした。また、接着層は弾性体と仮定し、被着体はMisesの降伏条件を適用して弾塑性体と仮定して解析を行った。本解析に用いた接着層ならび

表1 被着体鋼板ならびに接着層の機械的性質

Materials	0.2% proof stress (GPa)	Tensile strength (GPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio (-)
HT110	0.76	1.09	183	0.33
HT60	0.42	0.64	175	0.33
HT40	0.24	0.39	188	0.33
Adhesive			0.49	0.33

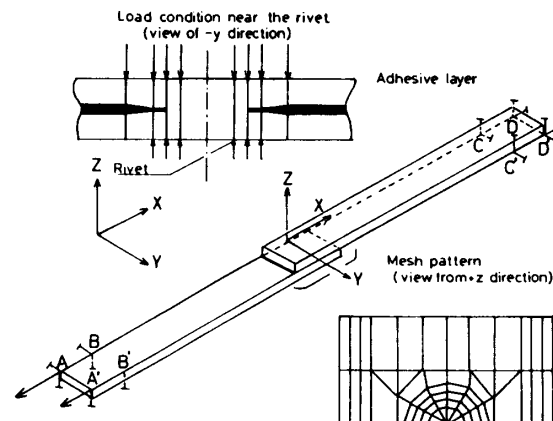


図3 併用継手の境界条件ならびに要素分割の一例

に鋼板の材料常数は表1に示したとおりである。

図4はHT60を被着体とする接着ならびに併用継手に15.3kNの引張荷重を負荷した場合、接着層におけるラップ中央部の長手方向(x軸方向)のz方向の引張応力 σ_{zz} ならびにz面に垂直な面上のx方向のせん断応力 τ_{zx} を示したものである。なお、横軸はラップ長さlで正規化されている。図より、併用継手も接着継手と同様に σ_{zz} ならびに τ_{zx} ともにラップ端において応力集中が生じており、両者のラップ端付近の応力分布はほぼ一致しているが、併用継手の最大応力値は前報⁽⁷⁾の解析結果とは逆に接着継手のそれをわずかに下回ることが認められる。このようにリベットの種類により応力集中の傾向が異なる原因としては、リベット締結力の違いやそれに伴う接着層厚さの減少等リベットによる拘束条件の差異によるものと考えられる。一方、ラップの中央部付近ではリベットによる締付け力のため、併用継手の応力値が接着継手に比べ低下する傾向が認められる。

図5は特に、接着継手の疲労強度と相関関係があるとされている接着層に垂直な引張応力成分 σ_{zz} の最大値⁽⁸⁾と引張荷重の関係を鋼板強度の異なる接着ならびに併用継手について示したものである。図より、接着ならびに併用継手ともに負荷荷重の低い鋼板の弾性

変形領域では鋼板強度によらず最大応力は負荷荷重に比例して増加すると認められる。しかし、負荷荷重の増加に伴い、鋼板強度の低い継手ほどより低荷重側で鋼板の塑性変形のため急激な最大応力の増加が認められる。

次に、リベット併用の最大応力に及ぼす影響を調べるため、図6に鋼板強度の異なる接着ならびに併用継手の負荷荷重と σ_{zz} の最大値の関係を示す。図より、いずれの鋼板強度の継手においても接着継手の最大応力が併用継手のそれを上回る。また、負荷荷重の低い領域では両者の最大応力の差はわずかであるが、負荷荷重の増加に伴い両者の差が増大し、またその傾向は鋼板強度の増加に伴い顕著になることが認められる。

4. 実験結果および考察

4.1 静的引張せん断試験結果 図7に接着、リベットならびに併用継手の荷重-変位線図の一例を示す。なお、横軸は試験機のクロスヘッドの移動量を示している。同図より、併用継手では接着部の破断による最大荷重のピークに続きリベットの破断時のピークが認められ、リベット破断時のピーク荷重はリベット単独の継手より少し低下していることが認められる。また、併用継手の変位-荷重曲線の初期の傾きが接着

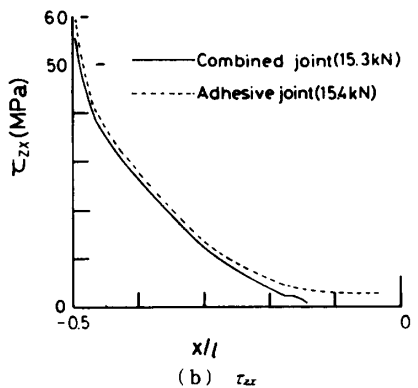
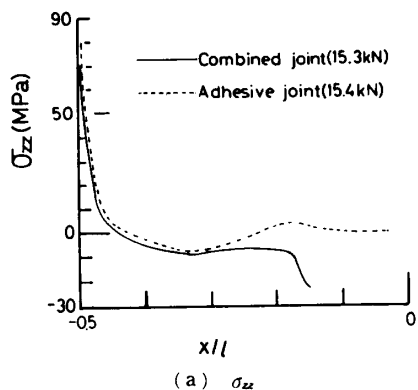


図4 併用ならびに接着継手試験片の接着層における応力分布の一例

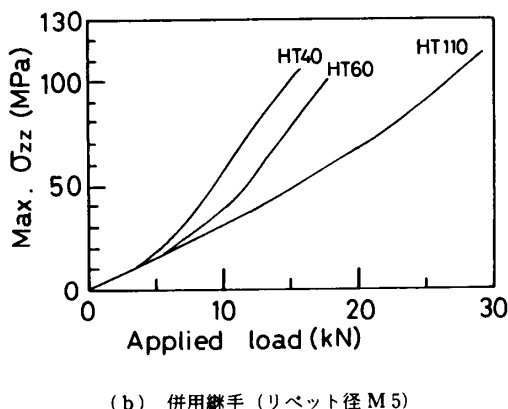
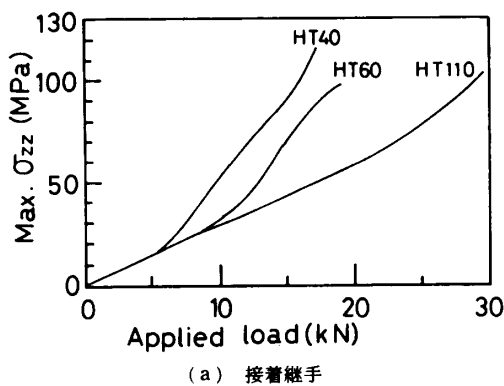


図5 引張荷重と接着層の最大引張応力(σ_{zz})の関係

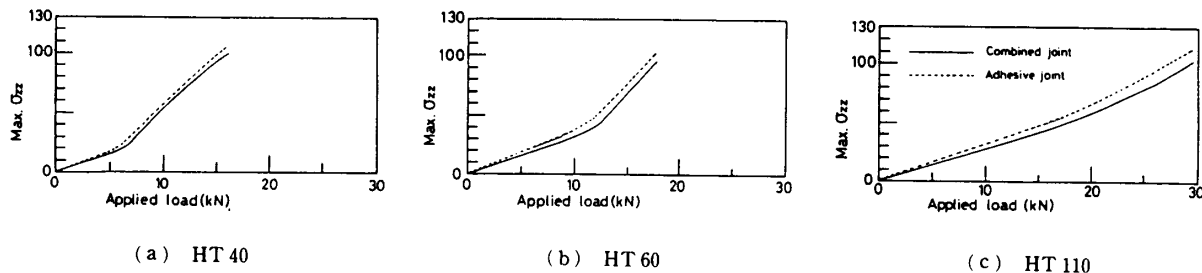


図 6 被着体鋼板強度の最大引張応力 (σ_{xx}) に及ぼす影響 (併用継手のリベット径 M5)

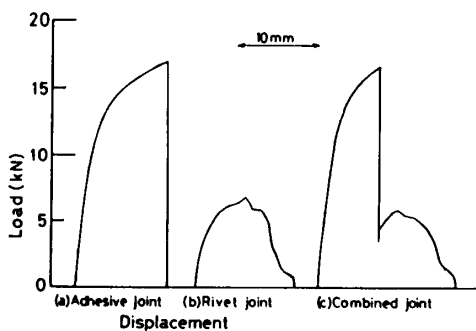
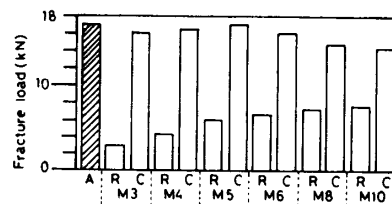


図 7 荷重-変位曲線の一例 (被着体 HT 60, リベット径 M5)

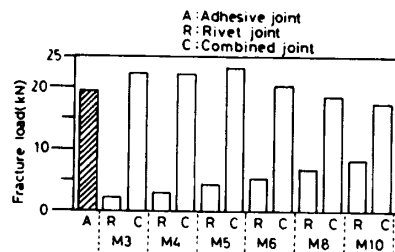
継手のそれを上回っているのはリベット締結により変位が拘束されているためと考えられる。

図 8 は HT 60 ならびに HT 110 を被着体とする、接着、リベットおよび併用継手の引張せん断試験結果を示す。なお、図 8 に示された破断荷重は 10 個の試料の平均値であり、接着、リベットおよび併用継手の変動係数はそれぞれ 2~3%、3~7%ならびに 2~4%であった。図よりリベット継手の破断荷重の鋼板強度によらず、リベット径の増加に伴い増大するが、最も強度の高い M 10 の場合においても接着継手の 40%程度である。一方、併用継手では鋼板強度によらず M 5 のリベット併用継手の破断荷重が最大でさらにリベット径を増加させることにより破断荷重の低下が認められる。これはリベット径の増加による接着面積の低下のためと考えられる。特に、本リベット継手の強度は接着継手の 1/2 以下であることから接着継手の低下が併用継手強度に及ぼす影響は大きい。また、鋼板強度の増加により接着ならびに併用継手ともに破断荷重の増加が認められる。さらに同図より、HT 60 を被着体とする場合、最も高い強度を示す M 5 の併用継手と接着継手の破断荷重はほぼ同程度であるが、HT 110 の場合、M 3~8 の併用継手は、接着継手の破断荷重を上回ることが認められ、鋼板強度によりリベット併用の破断荷重に及ぼす影響が異なることが確認された。

鋼板強度がリベット併用に及ぼす影響をさらに調べるため、最も高い破断荷重を示す M 5 の併用継手と接



(a) HT 60



(b) HT 110

図 8 接着、リベットならびに併用継手の破断荷重

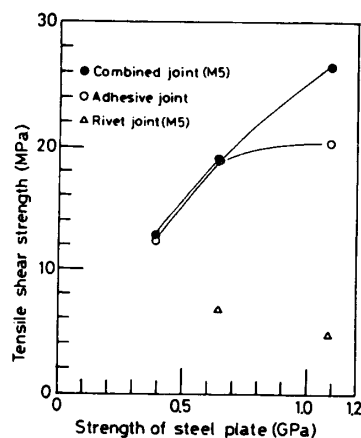


図 9 鋼板強度の引張せん断強度に及ぼす影響

着継手について鋼板強度の破断荷重を接着面積で除した引張せん断強度に及ぼす影響を図 9 に示す。図より、鋼板強度の増加に伴い接着ならびにリベット併用継手の引張せん断強度が増加することが認められる。これは、図 5 に示したように鋼板強度の増加に伴い荷重-最大応力の比例関係がより高荷重域まで維持されるためと考えられる。さらに同図より、鋼板強度を 1.09 GPa まで増加させると併用継手の引張せん断強度が

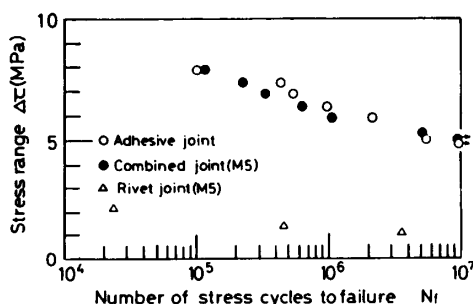


図 10 接着、リベットならびに併用継手の S-N 関係 (HT 110, リベット径 M5)

接着継手のそれを 30%以上も上回ることが認められ、HT 110 の鋼板を被着体として用いた場合においてのみリベット併用が接着継手に対して引張せん断強度向上に効果があることが確認された。これは、図 6 に示したように鋼板強度の増加に伴い、同一負荷荷重における併用ならびに接着継手の最大応力の差が拡大するためと考えられる。なお、図中には鋼板強度 0.64 と 1.09 GPa のリベット継手の引張せん断強度も示しているが、双方とも接着継手の引張せん断強度の 1/2 以下である。

4.2 疲労試験結果 前報で、著者らは接着継手において鋼板強度の増加に伴い静的引張強度は増加するが、耐久限度付近の疲労強度は鋼板強度に依存しないことを確認し、その原因として耐久限度付近の負荷荷重では鋼板の種類によらず接着層内の最大応力は一定であることを示した⁽⁹⁾。

そこで、接着継手に対してリベット併用による引張強度の増加率の最も大きい HT 110 を被着体とするリベット径 M5 の併用継手ならびに同一鋼板を被着体とする接着継手の S-N 関係を図 10 に示し、リベット併用の効果を調べた。図より、すべての荷重繰返し数範囲において、接着継手と併用継手の疲労強度はほぼ一致することが認められる。この原因としては以下のことが推察される。すなわち、図 6 に示したように破断時の最大負荷荷重の高い引張試験の場合、HT 110 を被着体とする接着と併用継手の最大応力に差が生じるが、疲労試験の場合、最大荷重範囲が 10 kN 以下と負荷荷重が低く、両者の最大応力の差はわずかであり、このことが、接着ならびに併用継手の疲労強度がほぼ一致する原因となっているものと推察される。なお、リベット継手の疲労強度は引張強度と同様に接着ならびに併用継手の 1/2 以下である。

5. 結 論

鋼板強度が接着・リベット併用継手強度に及ぼす影

響を明らかにするため、鋼板強度のことなる高張力鋼板を被着体とする接着・リベット併用継手ならびに接着継手の静的ならびに疲労強度を求めるとともに有限要素法により接着部の応力分布を求め、継手強度と応力分布の関係について検討を行った。主な結果は以下のとおりである。

(1) 有限要素法による応力解析の結果、接着ならびに併用継手ともに負荷荷重の低い鋼板の弾性変形領域では鋼板強度によらず接着層における σ_{zz} の最大応力は負荷荷重に比例して増加した。しかし、負荷荷重の増加に伴い、鋼板強度の低い継手ほど鋼板の塑性変形のためより低荷重側で急激な最大応力の増加が確認された。さらに、同一引張荷重時の接着ならびにリベット併用継手の最大応力を比較したところ、負荷荷重ならび鋼板強度の増加に伴い両者の差が増大した。

(2) 鋼板強度の増加により接着ならびに併用継手ともに破断荷重が増加した。さらに、HT 40, 60 を被着体とする場合、最も破断荷重の高い併用継手と接着継手強度はほぼ同程度であるが、HT 110 の場合、M 3~8 の併用継手の破断荷重は、接着継手のそれを上回った。なお、M 9 以上の併用継手では接着面積の減少により併用継手強度が接着継手のそれを下回っている。前者の原因としては鋼板強度の増加に伴い荷重と接着層の最大応力との比例関係がより高荷重域まで維持されるためと考えられ、後者の原因としては、鋼板強度の増加に伴い、併用継手と接着継手の最大応力の差が拡大するためと推察される。

(3) HT 110 を被着体とする接着ならびに併用継手の S-N 関係を比較したところ、併用継手と接着継手の疲労強度はほぼ一致した。これは、疲労試験のように負荷荷重が低い場合には、接着ならびに併用継手の接着層の最大応力の差がわずかであるためと推察される。

文 献

- (1) Wentz, K. R. and Wolfe, H. F., *Trans. ASME, J. Eng. Mater. Technol.*, **100**(1978), 70.
- (2) Jones, T. B. and Williams, N. T., *SAE Int. Cong. Detroit*, (1962-2), Tech. Paper 860583.
- (3) Scarich, G. V. and Chanani, G. R., *J. Aircraft*, **19**(1982), 773.
- (4) 原賀・児玉, 日本接着協会誌, **21**(1985), 4.
- (5) Dorn, L. and Moniatis, G., *Welding and Cutting*, **39**(1975), E 11.
- (6) 原賀・西川, 日本接着協会誌, **25**(1989), 299.
- (7) 今中・ほか 4 名, 材料, **38**(1989), 1373.
- (8) 今中・ほか 3 名, 材料, **39**(1990), 412.
- (9) Imanaka, M. Haraga, K. and Nishikawa, T. (Hui, D. and Kozik, T. J. 編), *Comp. Mat. Tech.*, (1990), 89.