

異種金属圧延クラッド材の新しい接合強度評価法に関する研究

宮城工業高等専門学校 材料工学科
教授 池田 千里

(平成 12 年度研究開発助成 AF-2000019)

キーワード：金属クラッド、接合強度、材料試験法

1. 研究の目的と背景

1.1 接合と接合性評価

塑性加工を利用した接合の研究は多く、古くは刃物等の鍛接、最近では、セラミックスを含む超伝導材料の線材化¹⁾ 研究などもあって、実用化されているものも少なくない。また、自動車をはじめとする、複合体のリサイクル化²⁾ など、これからの複合材のほとんどは、「解体」も視野に入れた複合化プロセスが求められる。

しかし、これまでは、それぞれの産業製品としての使用強度を満足すればよいことから、応用への発展性・計画性に乏しく、国際的にも標準化できる、新しい「接合性」評価法を確立することが望まれる。

これまでの接合の分類と評価についての国内外の関連した研究状況は以下のとおりである。

1. 系統化については、現在まで、塑性加工学会の「接合・複合分科会」WG では、町田、三木、森ら³⁾ の努力がなされてきている。今年度、永年にわたる研究や企業での実例を総括したものが「塑性加工要覧『接合・複合』」にまとめられた。しかし、強度を含む「接合性の評価基準」を定めるにあたっては、今後とも広範かつ多岐にわたり加工プロセスや材料界面などの研究例を重ね、データの蓄積と『共通基準の測定法の確立』を図る必要がある。
2. これまで、Wright⁴⁾、志村⁵⁾、外本⁶⁾ らは塑性力学から、また、材料学からも、金属以外の材料についても、複合材料の接合機構に関する多くの基本的報告がなされている⁷⁾。
3. これらの他に、押出し、爆発圧接、鍛造などの塑性変形を利用した接合に関する報告もみられるが、工業レベルや金属系複合材料分野での「接合性の定量的基準や雛型」となりうるモデルは未だに数少ない。

4. 接合強度試験法としての、材料試験法のスタンダードは少なく、製品からサンプルを切り出すにしても、モデルの標準試料を作るにしても、「測定試験片の作製」は一般的に困難な場合が多い。

1.2 接合強度試験法における問題点⁷⁾

これまでの複合材料の接合強度を評価試験にあたって注意すべきは、いずれも異種材料が接合している界面状況から、採取する試験片は非常に精密かつ慎重な加工が必要となる点である。試料片は純負荷応力によって界面ではなく離・破壊することが要求され、他の変形に使われるエネルギーロスをゼロ極限まで少なくするか、明らかに定量的分別評価ができること⁸⁾、が必須である。

1) 引張試験：一般に短冊形の引張試験片は、つかみ部が重要な要素で、CFRP では試験材料より弾性定数の低いGFRP のタブを接着する方法が広く用いられている (ASTM D3039、JIS K7073)。しかし、これでも応力集中は避けられず、タブの部分も含めたゲージ部で縦割れを伴う破壊が生じ、純粋な引張破壊であるかの判定が難しい。

2) 圧縮試験：圧縮試験での破壊機構は主として繊維の局部せん断破壊または座屈である。しかし、複合材料中の繊維あるいは全体の微視的、巨視的の座屈の判定は非常にむずかしく、根本的問題が多く含まれ、確立していない試験法と言える。

3) せん断試験：この方法も、均一な純粋せん断変形領域をつくるのが難しく、決定版のない方法である。積層板で考えると最大せん断応力が働く面が、積層面に垂直な「面内せん断」と、積層面に平行な「層間せん断」の二方向のせん断荷重の状態があるが、微視的な繊維配置を除けば、ほぼ同様のモードである。クラ

ットの接合強度について最近の試験法は、瀬川光男⁹⁾の方法がある。金沢¹⁰⁾は、図1のように、一部の層を除去して押し込むことで引張成分を作り、接合強度を求めている。

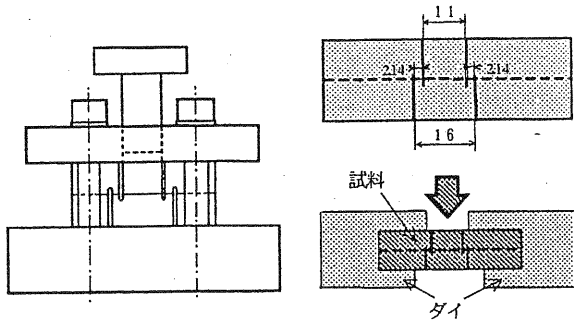


図1 クラッドの引張はく離試験の模式図¹⁰⁾

これは広く用いられている「三点曲げ試験」でスパンを試験片厚さに対して比較的短くしてせん断で破壊させる「ショートビームシア法」に類似していて、荷重点の直下で応力集中を生じており、見かけの定性的な値を評価している。これらはいずれも純粋せん断応力場にはならず、厳密には引張、圧縮応力などをともなうために、試験方法によって値に差が出てしまう。

4) 曲げ試験法：曲げ試験は基本的には、引張、圧縮、せん断などの均一応力下で強度を求める手法ではなく、比較的低荷重で簡単な治具を用いて簡便的に接合強度の参考値を求めるのが目的である。3点曲げ、4点曲げ試験法がJIS, ASTMで規定されている。この手法は簡便ではあるが、荷重点での応力集中による圧縮側からの破壊、スパン/厚さ比の不足により、せん断破壊が発生する場合は真の値ではない。強度に体積依存性がある場合、応力勾配との関係が問題となる。圧縮強度が引張強度と同程度またはより低い場合、応力集中も問題となる。

1.3 研究の目的

上記の背景から、本研究では、

1. 異種金属材料の冷間圧延を中心に、塑性流動を利用した製造プロセスによるクラッド材の接合強度を求め、「定量的かつ簡便な試験法」を確立することを目的とする。

2. 試験片の大きさなどの寸法効果や材料界面などの境界層の扱い、作業上の問題から来る数値の信頼性など種々の因子について、接合強度の評価として統一した基準を検討する。
3. 支配因子の測定には、試験片の形状、せん断はく離荷重の負荷方法に焦点を当て、負荷工具と治具、負荷速度を変えて、新しい接合強度の評価基準を試みる。

2. 実験方法

2.1 試験片および装置

1. 材料試験としての試験片の寸法と形状を決定するため、接合クラッド材の圧延、熱処理のほか、種々の製造方式を試みる。純アルミニウムから高強度アルミニウム合金までと、鉄鋼、アルミニウム、ステンレス、チタンなど、変形抵抗を種々変えて、各材料も基本強度試験を繰り返し行う。
2. これまでのクラッドはく離強度試験となるものの長所、欠点を整理し、変形・はく離・破断のプロセスと評価表示の数値の意味するところを検討する。
3. はく離試験のモデルをデザインし、クラッドから試験片への製作と試験装置や治具の形状を立案する。
4. 試験治具を試作し、予備実験の後、本試験を行う装置を製作する。
5. はく離に必要な接合界面の持つ抵抗を計算し、実際の測定強度との差異を比較する。
6. 金属以外の材料、セラミックスやプラスチックおよび接着剤などの第3材料や繊維強化CFRPなどによる接合クラッド材の評価にも適用できる『基本的な接合強度試験法』を確立する。

2.2 試験法の特徴

1. 接合強度は各研究、各製品に特有で、国際的にも評価法が個々に異なり、統一した試験法のコンセンサスがないままにされている。本研究は塑性加工による変形流動を利用したクラッド材（主に圧延、押出し、鍛接）を主な対象とし、はじめに基本的な不均一変形流動の解析、接合界面のマイクロ組織と、素材の厚さ比や強度比、接合面の純面積をも評価し、いくつかの視点から接合性を検討する。

2. 一方、逆に、複雑な界面、拡散層の扱いなども重要であるが、「簡単な材料試験法」としての明快な『接合強度評価の基準化』も最重要課題であって、「試験片の形状」と「負荷方式と数値化」および「装置の設計」に本研究の最終的目標がある。

2.3 試験治具設計と試料製作

クラッドの接合強度試験として、試料に供するための金属クラッド板の製作を行った。表1に示すように、組み合わせは極低炭素鋼（以後鉄 Fe）、アルミニウム（以後 Al）、無酸素銅（以後 Cu）および工業用純チタン（以後 Ti）とし、2段冷間圧延機を用いて、常温で圧延圧接を行った。

表1 圧延クラッドの組み合わせ ○: 接合良好

	Al	Fe	Cu	Ti	6063Al
Al					
Fe	○				
Cu	○	×			
Ti	○	○	○		
6063Al	○	○	○	○	

前処理としては、すべてひずみを除去し、アセトン脱脂後、ワイヤクラッチして即圧延を施した。圧延は常温1パスのみで、圧下率は50%以上とし、平均55%であった。いずれも成功したものについて、試料表面粗さ測定後、試片形状寸法を種々変化させ、はく離試験を行い、強度、界面観察および分析を行った。一部 (Fe/Al, Ti/6063) については、400℃で1~96hの拡散処理を施した。

クラッドは最終厚さを3mm以上とし、薄い試料にはバックアップとして金属・プラスチックエポキシ系接着剤で5mm程度の鉄あるいは銅片を貼り付けた。界面は幅0.2mm深さ3~6mmのノッチを放電ワイヤカッターで施した。治具の試作ははじめに図2の模式図のとおり、せん断はく離を行う方式とした。

次に、クラッド試料からの接合強度評価を純粋の引張はく離を与えるように、垂直に半角45°の楔が下降する方式を新しく考案し、図3のように、試作した。

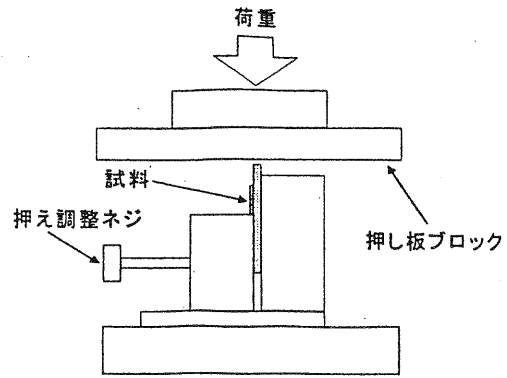


図2 クラッドのせん断はく離試験の模式図

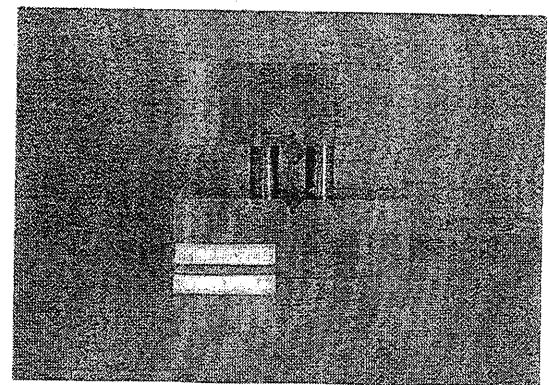
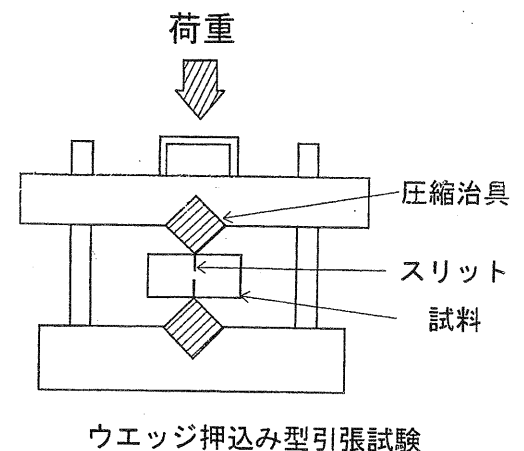


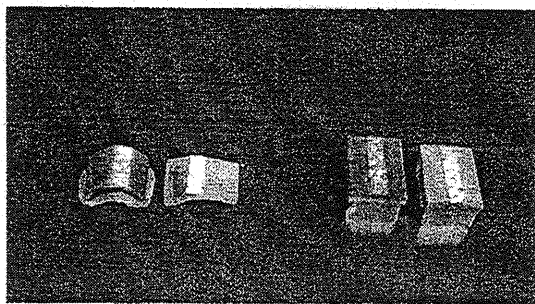
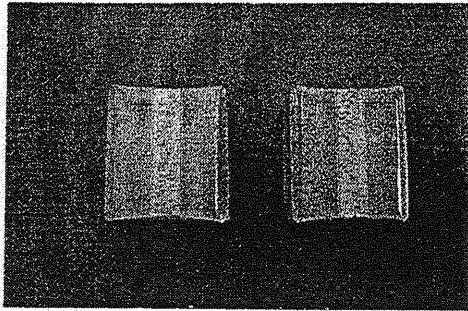
図3 圧縮-引張はく離試験の模式図と概観

3 実験結果

クラッドからの接合強度試験試料は最終厚さを3mmとした。これより薄い試料では「曲げ変形」が支配的に作用して、健全な引張成分が得られないことによる。しかし、実験室規模では10mm以上の圧延クラッド板を圧下率50%以上で作成するのは難しい。

工業的には実用的クラッドは数ミリ以下の板厚が多く、

薄いクラッド板の接合強度評価ができる試験法を確立したい。そこで、市販の接着剤を用いて、背後の両面に軟鋼片や銅片で補強したところ、図4のように、接着面のみがはく離して曲げ変形する場合もあったが、健全な引張ではなく離が得られることがわかった。左は厚さの不足による不健全な試験片であり、右ははく離面に十分な引張成分が作用して破断に至っているのが分る。



a) 薄いクラッド試片 b) 補強したクラッド試片

図4 クラッドのせん断はく離試験後の様相

4. 考察

4.1 応力伝達の方法

接合クラッドの接合強度を定量的に試験し、表示することは容易ではない。その理由は、

1. 単一物体の場合と異なり、延性が大きく異なることが多く、強度は当然弱い方の最大値以上には至らない。
2. 接合界面は多くの場合、完全接合はありえないので、応力負荷の幾何学的条件が接合強度データを大きく左右し、したがって試料の作製とその寸法効果もまた精密さと再現性が要求される。
3. 厳密には、つかみ部で応力集中が等方性材料と比べて大きく、かつ塑性変形による応力集中の緩和を期待できない。

4. 弾性定数異方性のためゲージ部で均一な応力分布を得にくい。
5. 強度異方性のため応力伝達部で破壊が起こりやすい。

などの、基本的な問題があり、矩形平板の端部に荷重をかける場合に、従来の材料では、試験法の不十分な点を異方性がなく材料の延性が隠していたのが、複合材料では試験法の欠点が直接結果に反映されてしまう。

4.2. 測定値の物理的意味

金属材料の破壊では、基本的には応力の変換を行なえば、多くの場合マクロ的には単一の破壊機構と破壊基準で記述できる。これに対して、複合材料の場合は、材料の異方性の程度、荷重方向、強化材と応力の主軸との関係などの組み合わせにより、引張、圧縮、せん断などの独立な破壊機構が多数存在するため。設計に必要なデータを得るためには個々の破壊機構に対する「試験」が必要である。このことは、たとえゲージ部で破壊が生じても、評価しようとした破壊機構で破壊が生じたかという「測定値の物理的な意味」を検討しないと、誤った判断を下す可能性を示している。

複合材料のもうひとつの問題点は、現在まだ盛んに開発中の「未成熟な材料」という点である。新材料の開発により、強度の絶対値や異方性が変化するために、かつてその試験法が開発された段階では存在しなかった「新しい問題点」が出現する。当然、素材の組み合わせの可能性は無数に存在する。

複合材料の力学特性試験法は規格として制定されたものも多いが、その多くが上述の問題点をかかえたままとなっている。どちらかというところ、他によりよい方法がないために、やむを得ず採用しているといった現状である。したがって理想的には、力学特性試験法は、ある物理的な特性値を評価するものであるが、実際には「見かけの値」を与えている場合が多い。

歴史の古い ASTM の規格では、試験片形状、弾性係数の定義といった根本的な項目が改訂されることもある。したがって試験法にも寿命がある、と考えた方がよい。厳密には、強度、弾性係数の異方性特性すべての項目について試験法を用意する必要がある。たとえば繊維の直角面

内でのせん断弾性係数のように測定できない項目もある。

わが国ではJIS規格として、CFRPを中心に試験法の開発と標準化に大変な努力が払われてきているが、いまのところJIS規格の複合材料試験法は全てが炭素繊維強化に関するものに限られ、金属に関しては国際規格（ISO）にも見当たらず、各企業の製品独自の他社比較で、製品の安全性を確認しているに過ぎない。このような接合強度評価の方式では確かに個々の製品の使用基準には満足しても、別分野への応用では、そのたびに試験をしなければならず、材料開発をする側では共通データとして、複合材料や金属クラッドの信頼性を世に示せないことになる。このように、本試験法は、簡潔かつ標準的データとして表示でき、「金属クラッドなどの接合体の界面強度評価を正確に与える材料試験法」として期待できる。

7 結論

簡潔で健全な接合強度試験の新しい手法の開発をめざして、種々の負荷条件を検討した。その結果、「くさび押し型圧縮-引張はく離試験法」を試作し、クラッドの簡便かつ正確な「接合強度評価」を得ることができた。試験片は、サイコロ状のものから薄板状のものまで、従来の材料試験法においては困難であった「試験片の作製と的確な変形と破壊」が得られた。今後は変形の正確な把握のために、FEMなどによる数値シミュレーションと多くの異種金属クラッドの試験を重ねて、広汎な複合クラッド材料の基本試験法としての確立を図りたい。

謝辞

本研究の遂行にあたり、宮城高専実習工場の菅野孝志氏には、試験治具の設計から試作まで一方ならぬ協力をいただき、また、実験の遂行には本学学生の鷺見元、清水隆両君の努力によるところ大であり、ここに厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) S.Saito, K.Ikedaほか: Materials Transactions, JIM, 31(1991), 415.
- 2) S.Ikeda, S.Saito and K.Suzuki: J. of Mater. Process. Technology, 45 (1994), 395.
- 3) 町田ほか: 塑性加工技術シリーズ 19, 日本塑性加工学会編, コロナ社, (1990).
- 4) P.K.Wright et. al.: Metals Technology, (1978), 24.
- 5) 志村宗昭、田中英八郎: 日本金属学会報, 14(1975), 707.
- 6) 外本和幸、小野寺龍太ら: 塑性と加工, 29-334(1988), 1159.
- 7) 三木光範ほか: 複合材料, 共立出版, (1997), 103.
- 8) E. Breslauer & T. Troczynski: Materials Science & Engineering A, 302(2001), 168.
- 9) 瀬川光夫ほか: 塑性と加工, 36-418 (1995) 1265.
- 10) 金沢敏昭: 第 51 回日本塑性加工連合講演会, 東北地域フォーラム予稿集, (2000). 27.
- 11) 菊地史長, 池田千里: 宮城工業高等専門学校専攻科論文集, 2,(2001), 8-1.