

クラッド鋼の接合界面強度試験法の評価

瀬川 明夫*・細谷 哲明*
青木 理**・川並 高雄***

Evaluation of Testing Methods for Strength of Bonding Interface in Clad Steel

(Received on September 27, 1994)

Akio SEGAWA, Takaaki HOSOTANI,
Osamu AOKI and Takao KAWANAMI

The strength of the bonding interface is a major consideration when using clad material, and therefore both the shear strength test and ram tensile strength test are standardized in J I S as the means of evaluating the strength of the bonding interface of a clad material. However, the correlation between the two strengths measured by those tests has not been clarified. In the present paper, we first describe studies on the metallurgical structure of the bonding interface using titanium clad steel manufactured by the hot rolled method, explosively welded method, or explosively welded and rolled method, together with stainless clad steel manufactured by the hot rolled method, and then evaluate several factors affecting the strength of the bonding interface by performing two kinds of experimental strength tests. The correlation between the shear strength and the ram tensile strength was further studied and problems occurring during the strength tests of the bonding interface for the clad material are also discussed on it. It was confirmed from these test results that there is different correlation between the two measured values of shear strength and ram tensile strength in either case of the said clad manufacturing methods, and the ram tensile strength was higher than the shear strength in case of the clad material having a strong bonding interface (explosively welded titanium clad steel, hot rolled stainless clad steel), but the shear strength was higher in the other materials.

Key words: material testing, clad material, titanium clad steel, stainless clad steel, shear strength test, ram tensile strength test, strength of bonding interface

1. 緒 言

クラッド鋼は母材に炭素鋼あるいは低合金鋼、合せ材に使用目的により選定される異種金属を積層・接合させた高機能材料である。現在は、合せ材に耐食性に優れたステンレス鋼を使用したステンレスクラッド鋼の利用が多いが、より過酷な腐食環境下での使用に耐え得る合せ材にチタンを使用したチタンクラッド鋼の需要が増加している。クラッド鋼の使用に際して、最も問題となるのは、母材と合せ材の接合面（接合界面）の接合強度である。J I Sでは、せん断試験による接合界面強度評価法とその下限値が規格化されており、一般に広く用いられている。また、同解説には、はく離試験による評価法が記載されており、特に合せ材厚さ方向の特性が重要な場

合には、有効な試験法であるが、試験片寸法の影響を受けやすく¹⁾、データの蓄積が不可欠となっている。

本研究では、クラッド鋼の代表的な製造法である圧延法、爆着法、爆着圧延法で製造されたチタンクラッド鋼（一部、ステンレスクラッド鋼）を用いて、せん断試験法、はく離試験法による接合界面の強度評価を行い、両者の関係を明らかにし、強度に及ぼす諸因子の解明を目的としている。なお、圧延法によるチタンクラッド鋼の強度は実際の製品より低い値を示している。近年接合界面への金属間化合物の析出・生成を抑制し、圧延条件の改善で高強度を持つ製品が出現しているが、ここでは、試験法の対比が主目的であるので、そのままとした。今後改めて評価したいと考えている。

2. 実 験 方 法

2・1 供試材

(1) 圧延チタンクラッド鋼

品名：SB480+TP270H-R2S

母材厚さ18mm、合せ材厚さ3.7mm、中間材として、極

* 金沢工業大学大学院工学研究科 〒921 石川県金沢南局区
内野々市町扇が丘7-1

** 金沢工業大学大学院工学研究科 現在：三菱電機メテックス
(株) 〒942 新潟県上越市福田町1

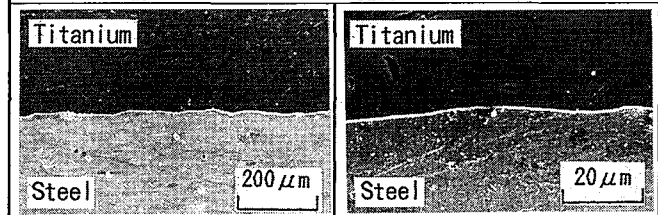
*** 金沢工業大学工学部機械工学科 〒921 石川県金沢南局区
内野々市町扇が丘7-1

低炭素鋼を0.5～0.7mm挿入してある、圧延クラッド鋼2種・等級S種である。化学成分および接合界面近傍の様子をTable 1に示す。

Table 1 Chemical compositions and microstructure of hot rolled titanium clad steel.

Material	Chemical compositions (wt.%)				
Cladding metal TP270H *)	H	O	N	Fe	Ti
	≤0.015	≤0.15	≤0.05	≤0.20	Bal.
Base metal SB480 **)	C	Mn	Si	P	
	≤0.31	≤0.90	0.15~0.30	≤0.035	
	S	Mo	Fe		
	≤0.040	—	Bal.		

*) JIS H 4600 **) JIS G 3103



(2) 圧延ステンレスクラッド鋼

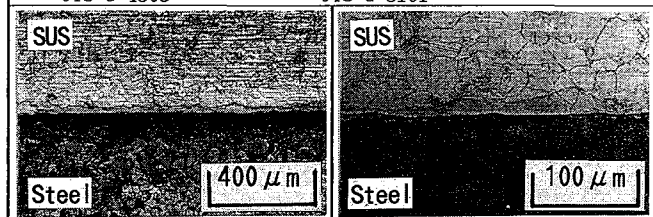
品名：SS400+SUS304-R2S

母材厚さ20mm、合せ材厚さ2.0mmの圧延クラッド鋼2種・等級S種である。化学成分および接合界面近傍の様子をTable 2に示す。

Table 2 Chemical compositions and microstructure of hot rolled stainless clad steel.

Material	Chemical compositions (wt.%)				
Cladding metal SUS304 *)	C	S	Mn	P	S
	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030
	Ni		Cr		Fe
	8.00~10.00		18.00~20.00		Bal.
Base metal SS400 **)	P	S	C	Mn	Fe
	≤0.050	≤0.050	—	—	Bal.

*) JIS G 4303 **) JIS G 3101



圧延法は事前に組立てた積層材を熱間圧延して接合させる。圧延法により製造されたクラッド鋼は、接合界面が直線的であり、拡散層が観察された。また圧延チタンクラッド鋼の接合界面にボイドらしきものが観察されたが、同定には至らなかった。Fig. 1に圧延チタンクラッド鋼、圧延ステンレスクラッド鋼のEPMA線分析結果を示す。圧延チタンクラッド鋼の拡散層は、約1μm程度であるが、測定器のビーム径が1μmであるため、正確な拡散幅は測定できなかった。チタンクラッド鋼の接合界面近傍には、すでにTiC、FeTi、Fe₂Tiなどの脆弱な金属間化合物の生成が確認されており²⁾、接合界面強度

の低下の原因の一つとなっている。Fig. 2に破断後の破面のX線回折による分析結果の例を示すが、前述の金属間化合物の存在が認められる。

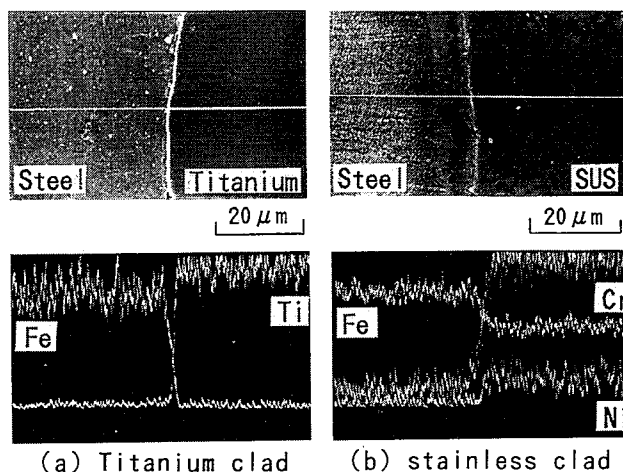


Fig.1 Results of EPMA line scanning.

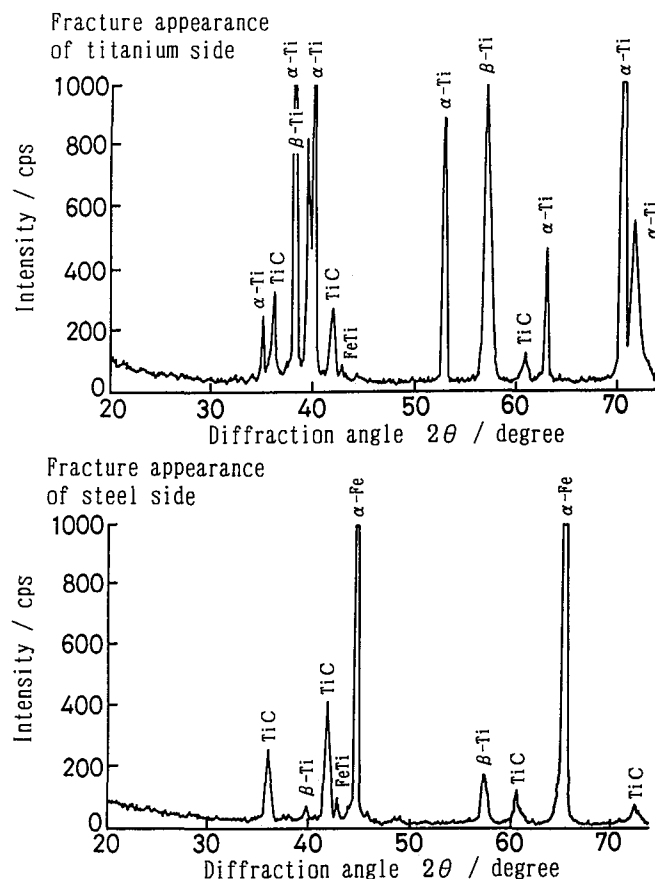


Fig.2 X-ray diffraction patterns at bonding interface of hot rolled titanium clad steel.

一方、圧延ステンレスクラッド鋼の拡散層は約10μmと圧延チタンクラッド鋼に比べ非常に大きい。これは、Cr、Niの拡散によって生じた層で、ステンレスクラッド鋼の接合部には特定の析出層は見当たらない。

(3) 爆着チタンクラッド鋼

品名：SB410+TP270C-B1F

母材厚さ20mm，合せ材厚さ3.0mm の爆着クラッド鋼 2 種・等級 F 種である。化学成分および接合界面近傍の様子をTable 3に示す。

Table 3 Chemical compositions and microstructure of explosively welded titanium clad steel.

Material	Chemical compositions (wt.%)				
Cladding metal TP270C *)	H	O	N	Fe	Ti
	≤0.015	≤0.15	≤0.05	≤0.20	Bal.
Base metal	C	Mn	Si	P	
SB410 **)	≤0.24	≤0.90	0.15~0.30	≤0.035	
	S	Mo	Fe		
	≤0.040	—	Bal.		

*) JIS H 4600 **) JIS G 3103

爆着チタンクラッド鋼は，火薬の瞬間的な爆発力を利用して製造され，接合界面が波形になることが特徴であるが，本研究では，波形が従来形状のもの（爆着チタンクラッド鋼（A））と，緻密に制御したもの（爆着チタンクラッド鋼（B））の2種類を用いている。爆着チタンクラッド鋼（A）は接合界面に爆着時に見られる渦模様が明瞭に観察できるが，爆着チタンクラッド鋼（B）では渦が潰されていることがわかる。両者の波形の大きさは，波長方向で約5倍，波高方向で約8倍爆着チタンクラッド鋼（A）が大きい。

(4) 爆着圧延チタンクラッド鋼

品名：SS400+TP270H-BR2S

母材厚さ18mm，合せ材厚さ2.0mm の爆着圧延クラッド鋼 2 種・等級 S 種である。化学成分および接合界面近傍の様子をTable 4に示す。

爆着圧延チタンクラッド鋼は，爆着法により接合された製品を熱間圧延で仕上げたものであり，圧延チタンクラッド鋼と爆着チタンクラッド鋼（B）の間に位置するクラッド鋼と考えられ，接合界面の波形が熱間圧延により平坦化されている。

2・2 セン断試験法

せん断試験片の寸法をFig. 3に，試験装置の概略図をFig. 4に示す。JISによれば，せん断試験片と治具の

Table 4 Chemical compositions and microstructure of explosively welded and rolled titanium clad steel.

Material	Chemical compositions (wt.%)				
Cladding metal TP270H *)	H	O	N	Fe	Ti
	≤0.015	≤0.15	≤0.05	≤0.20	Bal.
Base metal SS400 **)	P	S	C	Mn	Fe
	≤0.050	≤0.050	—	—	Bal.

*) JIS H 4600 **) JIS G 3101

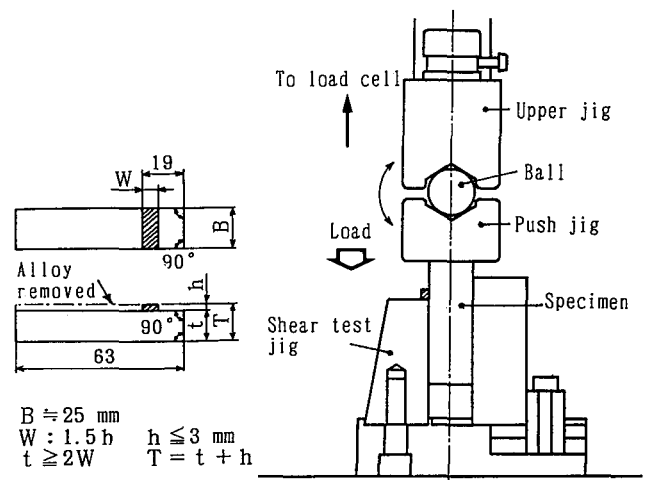


Fig. 3 Shear strength specimen.

Fig. 4 Test apparatus of shear strength.

クリアランスは0.10~0.15mmに保つように規定されているので，本研究では，0.13mmとしている。また，偏心荷重を防止するため，上方治具と押し治具の間にベアリング球を挿入している。せん断強度は，次式で表される。

$$\sigma_s = P_s \cdot S_s^{-1} \quad (1)$$

σ_s : せん断強度， P_s : せん断荷重

S_s : 見かけのせん断面積 (= $W \cdot B$)

JISに規定されているチタン及びステンレスクラッド鋼のせん断強度は，圧延，爆着，爆着圧延共に，チタンクラッド鋼では，137 N・mm⁻²以上，ステンレスクラッド鋼では，196 N・mm⁻²以上である。

2・3 はく離試験法

はく離試験片の寸法をFig. 5に，試験装置の概略図をFig. 6に示す。Fig. 4と同様に上方治具と押し治具の間にベアリング球を挿入している。はく離強度は，次式で表される。

$$\sigma_R = P_R \cdot S_R^{-1} \quad (2)$$

σ_R : はく離強度, P_R : はく離荷重

S_R : 見かけの接合面積

$$(\pi (d_0^2 - d_1^2) / 4)$$

d_0 : 合せ材の外径, d_1 : 合せ材の内径

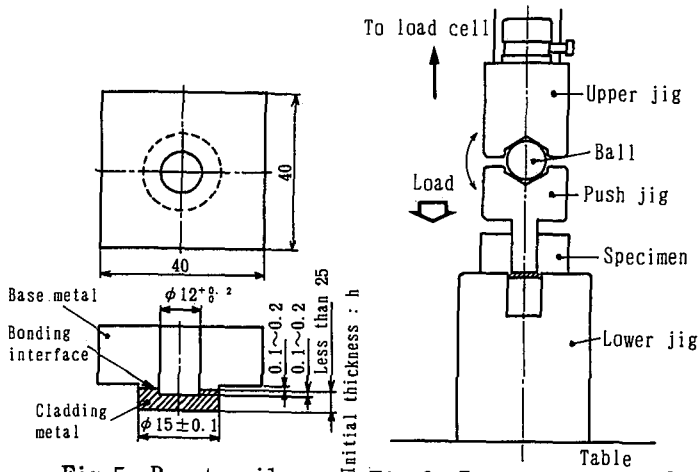


Fig. 5 Ram tensile strength specimen.

Fig. 6 Test apparatus of ram tensile strength.

JISにははく離強度についての明確な規定はされていないが、接合界面に垂直な荷重により破断することから、引張試験による破断と類似であると想定できる。

なお、素板からの試験片採取にあたって採取位置による試験結果のばらつきを少なくするため、せん断試験片とはく離試験片を交互に採取した。また、両試験共インストロン型材料試験機で、実験を行っている。

3. 実験結果及び考察

3・1 圧延チタンクラッド鋼及び圧延ステンレスクラッド鋼

(1) 試験片寸法の影響

圧延ステンレスクラッド鋼を使用し、Fig. 3に示した規定に準じた2種類の試験片でせん断試験を行った結果をFig. 7に示す。これより、強度に明確な差異は見られない。圧延チタンクラッド鋼についても同様の結果を得ており、JISの規定に準じた寸法では、せん断試験結果に及ぼす影響は少ないと考えられる。

圧延ステンレスクラッド鋼を使用して、合せ材厚さを1.5mm, 2.0mmの2水準に変化させてはく離試験を行った結果をFig. 8に示す。

せん断試験結果と比較して明らかな差異が見られる。値のばらつきは同程度であるが、破断形態を比較すると合せ材厚さ2.0mmの材料では接合界面付近、あるいは母材から破断しているのに対して、合せ材厚さ1.5mmの材料は合せ材の荷重負荷部でせん断破断を起こしている。

また、合せ材厚さ2.0mmの材料は1.5mmの材料に比べ約1.2倍の強度を示す。はく離試験においては、合せ材

厚さを厚めにして押し治具の突き抜けを防止し、接合界面から破断するように考えるべきである。

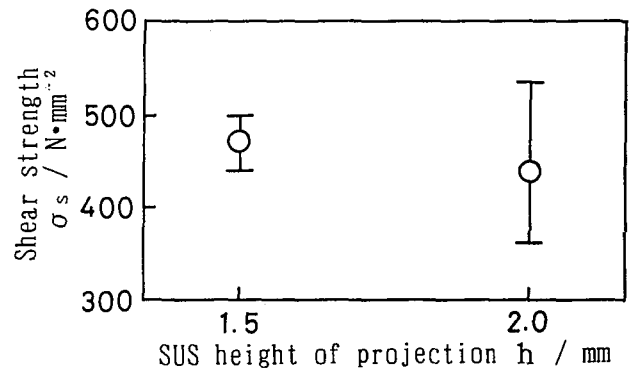


Fig. 7 Effect of projection size on shear strength.

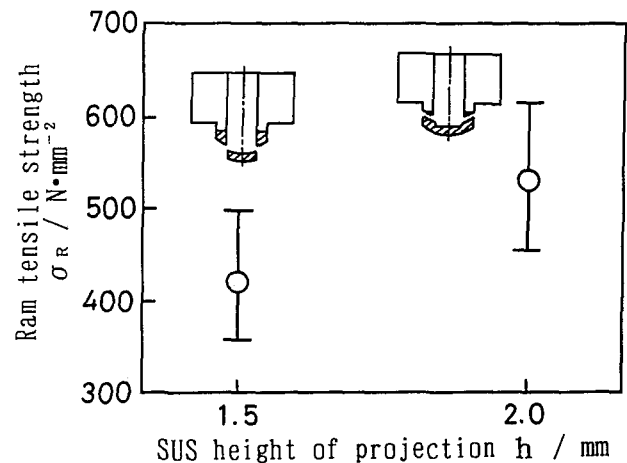


Fig. 8 Effect of projection size on ram tensile strength.

(2) せん断強度とはく離強度の関係

Fig. 9, Fig. 10にせん断試験とはく離試験の強度の関

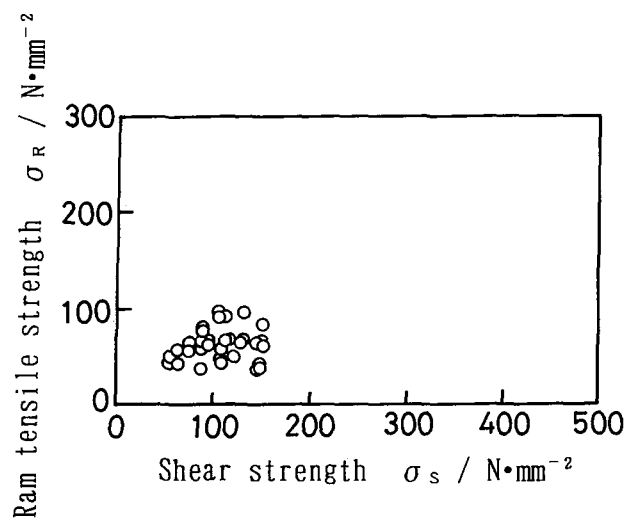


Fig. 9 Relation between shear strength and ram tensile strength. (Hot rolled titanium clad steel)

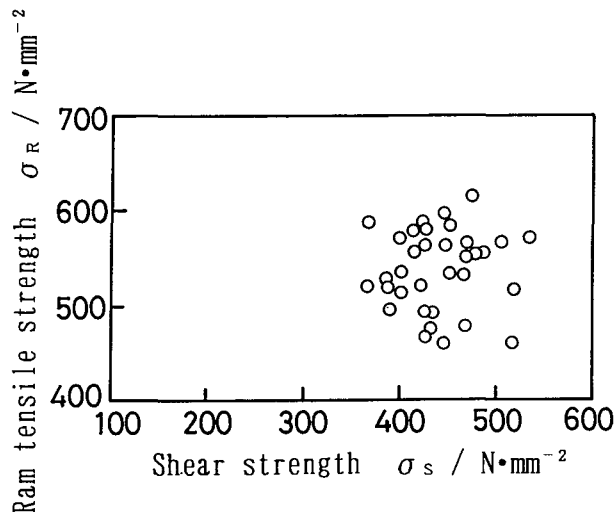


Fig. 10 Relation between shear strength and ram tensile strength. (Hot rolled stainless clad steel)

係を示す。どちらの場合も合せ材厚さは2.0mmで行っている。

接合界面に脆弱層が生成しやすい圧延チタンクラッド鋼はせん断試験では、亀裂が界面に沿って伝播して破断し、はく離試験では接合界面に垂直荷重が作用することによる引張りで単純に剥がれる場合が多い。脆弱層の構成や分布にもよるが、はく離試験の方が負荷の影響を受けやすいと思われるが今後の検討が必要である。単純にせん断強度とはく離強度の関係をそれぞれの平均値を用いて表せば、圧延チタンクラッド鋼では、 $\sigma_R = 0.68 \sigma_s$ 、圧延ステンレスクラッド鋼では、 $\sigma_R = 1.20 \sigma_s$ となる。なお、脆弱層のない強固な接合がなされている圧延ステンレスクラッド鋼は圧延チタンクラッド鋼に比べ、せん断強度で約5倍、はく離強度で約8倍の値を示した。

3・2 爆着チタンクラッド鋼³⁾

(1) 試験片寸法の影響

Fig. 11に合せ材厚さを1.5mmと2.5mmの2水準ではく離試験を行った結果を示す。

破断形態は3・1項で述べた2種類に加えて接合界面が半割される場合があり、3種類となった。爆着チタンクラッド鋼は接合界面が波形であり、接合面積が大きく、接合状態は供試材の中でも最も強固と考えられ、接合界面から急速破断を起こすモードIの破断は希であった。圧延チタンクラッド鋼及び圧延ステンレスクラッド鋼の場合と同様に合せ材厚さが厚い方が、高い強度を示している。

(2) せん断強度とはく離強度の関係

合せ材厚さを2.5mmとして、せん断強度とはく離強度の関係を求めた。Fig. 12, Fig. 13にそれぞれ爆着チタンクラッド鋼 (A)、爆着チタンクラッド鋼 (B)の結果を示

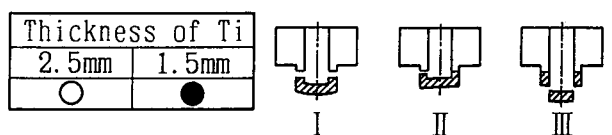
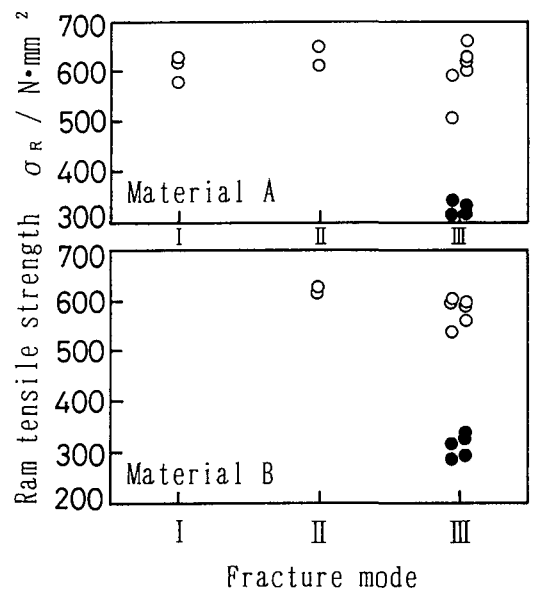


Fig. 11 Relation between fracture mode and ram tensile strength.

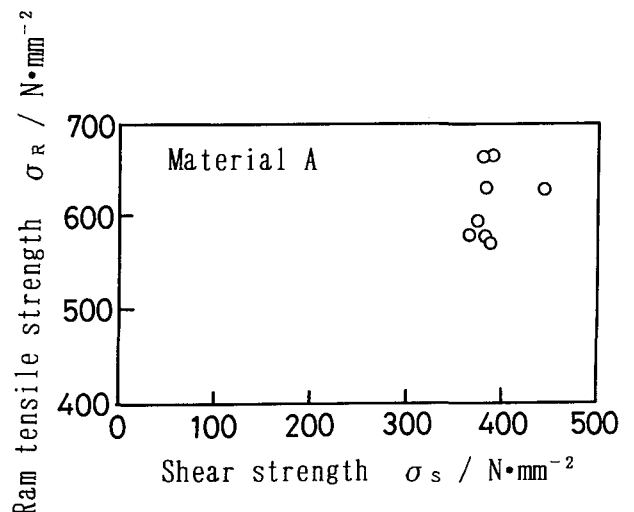


Fig. 12 Relation between shear and ram tensile strength. (Explosively welded titanium clad steel (A))

す。前節と同様に両強度の関係を平均値を用いて表せば (A)材では、 $\sigma_R = 1.57 \sigma_s$ 、(B)材では、 $\sigma_R = 1.51 \sigma_s$ となった。爆着チタンクラッド鋼では、母材と合せ材の強固な接合により、はく離強度がせん断強度よりも大きな値を示す。

前述の通り、爆着チタンクラッド鋼では、接合界面が強固であり、せん断、はく離の両強度試験共に急速破断を起こした場合は希であったため、本来の接合強度を評価しているとは言い難い。

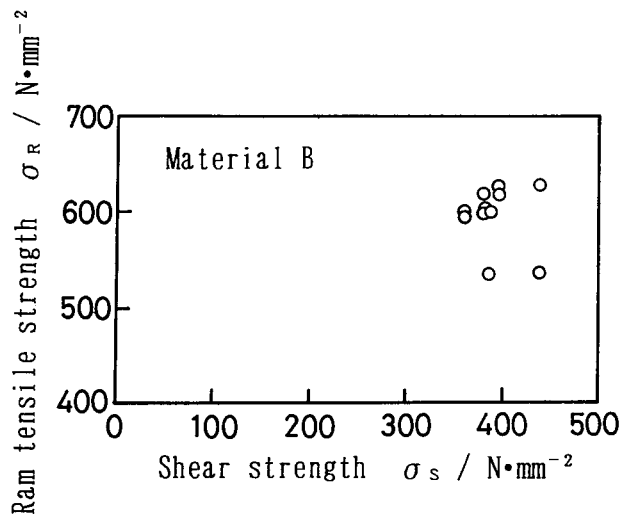


Fig. 13 Relation between shear and ram tensile strength. (Explosively welded titanium clad steel (B))

3・3 爆着圧延チタンクラッド鋼

Fig. 14にせん断強度とはく離強度の関係を調査した結果を示す。爆着圧延チタンクラッド鋼は、爆着チタンクラッド鋼 (B) に近い界面形状を持っているが、強度レベルはかなり低下し、圧延チタンクラッド鋼と比べ、せん断強度がやや大きい程度である。これは、爆着圧延チタンクラッド鋼は素材は爆着で製造されるが、加熱炉、熱間圧延の工程は圧延チタンクラッド鋼と同一の条件であるため、接合界面に脆弱層が生成されやすく、加えて圧延によって波形が潰された形状となるため、爆着チタンクラッド鋼に比較して接合面積が小さいことが原因と考えられる。

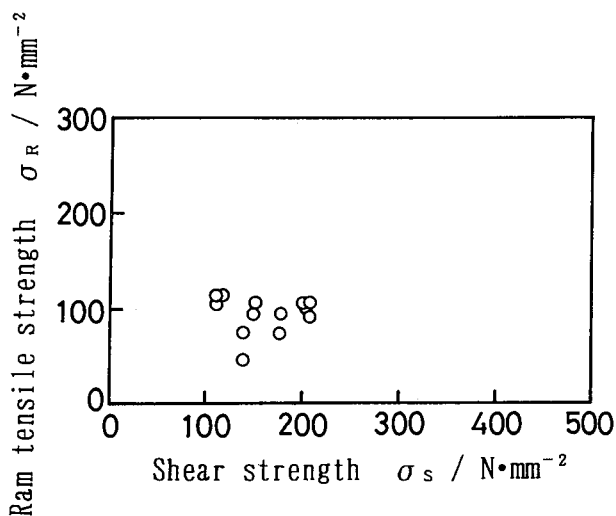


Fig. 14 Relation between shear and ram tensile strength. (Explosively welded and rolled titanium clad steel)

先述の圧延チタンクラッド鋼、圧延ステンレスクラッド鋼、及び爆着チタンクラッド鋼の実験結果も含めると接合界面が強い製品 (圧延ステンレスクラッド鋼、爆着チタンクラッド鋼) については、はく離強度がせん断強度を上回るが、接合界面強度が低い製品 (圧延チタンクラッド鋼、爆着圧延チタンクラッド鋼) については、せん断強度がはく離強度を上回る。

4. 結 言

クラッド鋼の代表的製造法である圧延法、爆着法、爆着圧延法で製造されたチタンクラッド鋼、ステンレスクラッド鋼を用いて、接合界面強度の評価を行った。JISに規定されているせん断試験による方法と、同解説に記載されているはく離試験による方法で測定を行った結果、次の結論を得た。

1) せん断試験法についてはJISの寸法規定に準じて良い。

2) はく離試験法では合せ材厚さを厚めにして押し治具の突き抜けを防止し、極力接合界面から破断するように考えるべきである。

3) JISに従った試験法では、せん断強度及びはく離強度の測定値のばらつきが大きい。圧延ステンレスクラッド鋼及び爆着チタンクラッド鋼では、高い接合強度が得られ、はく離強度がせん断強度を上回った。これに対して圧延チタンクラッド鋼及び爆着圧延チタンクラッド鋼では、接合界面に脆弱層が存在しており、はく離試験を行った際、容易に垂直荷重によって破断するため、せん断強度がはく離強度を上回る結果となった。

4) 爆着法によるクラッド鋼は接合が強く、せん断試験、はく離試験共に界面からの急速破断を起こすことは希であり、本来の接合強度の評価は困難である。

クラッド鋼の使用に際しては、界面の接合強度が重要な指標となるが、それを明確に評価するための試験法は現状では不十分である。せん断強度試験あるいは、はく離強度試験のどちらか一方で接合界面強度を論ずることには無理があり、用途に応じた総合的な判断が必要である。

参 考 文 献

- 1) 吉原征四郎・川並高雄・鈴木堅市：鉄と鋼，72-6(1986)，671。
- 2) Kawanami, T., Shirasuna, S., Shirogane, S., & Segawa, A.: Titanium '92 Science and Technology, TMS, vol. II, (1992), 1609。
- 3) 川並高雄・白銀重徳・青木 理・瀬川明夫：平5 春塑加講論，(1993)，161。