

(183) ステンレスクラッド鋼の破壊特性
(組合せ材料に関する研究—II)

○藤 津 昭 平

Fracture Characteristics of Stainless
Clad Steels.

(Study of composite materials—I)

Shōhei FUJITSU.

1. 緒 言

普通鋼に特殊鋼あるいは非鉄金属などを接着したクラッド鋼が、近來各種工業分野で重要な役割を果している。化学工業、とくに最近では原子力工業において、ステンレスクラッド鋼が板あるいは管として使用され、原子炉用にはステンレスクラッド極厚鋼板が開発されて登場するにいたっている^{1)~5)}。

金属材料の破断強さ、伸びなどの機械的性質は、その金属単独で破壊し、外部からなんらの拘束を受けない場合の性質である。金属の静的破壊条件が、外的の拘束条件に独立であるかどうかという点は、金属破壊の本質についてきわめて重要な問題である。外部拘束を受けるときは、その金属の破壊条件が外部拘束の影響を受けて変化することは考えられる。

そこで著者は外部拘束の一つのあたえ方として、たがいに破壊特性の異なる異種金属を接着した試験片を用いて引張試験を行ない、拘束条件の下での破壊状況を詳細に検討して静的試験における外的拘束条件の影響を明らかにしようと考えた。このような試験に用うべき材料としては、ステンレスクラッド鋼板が最適である。かくてステンレスクラッド鋼板の呈する特異な破壊について研究することは単に学術的のみならず、最近のごとくこの鋼材が大型圧力容器などにまで用いられている現状では、その破壊性質の十分なる知識が不可欠でもあり、現場技術に対する寄与も大きいといわねばならない。

本研究においては、ステンレスクラッド鋼板の厚板を使つて試験を行なつた結果について述べる。

2. 試 験 材 料

使用したステンレスクラッド鋼板は熱間圧延鋼板であつて、そのクラッド比は

$$\rho = (\text{ステンレス鋼厚さ}) / (\text{全板厚}) = 0.2$$

ただし片面クラッド。その化学成分は Table 1 に示す。

3. 試 験 方 法

3.1 クラッド鋼板および構成金属の引張試験

板厚 10mm のステンレスクラッド鋼板の圧延方向より、ASTM Designation : A265—43T 所載の標準矩形引張試験片を 9 本採取し、その 3 本はステンレス鋼部を削り落して炭素鋼のみを残し、さらに他の 3 本は炭素鋼部を削り落してステンレス鋼のみを残して結局ステン

レス鋼試験片 3 本、炭素鋼試験片 3 本およびステンレスクラッド鋼試験片 3 本の合計 9 本の引張試験片を仕上げ、常温にてアムスラー型 30 t 万能試験機によつて引張試験を実施した。

3.2 クラッド鋼板の引張試験

板厚 7mm のステンレスクラッド鋼板の圧延方向より、ASTM Designation : A265—43T 所載の標準矩形引張試験片を 3 本採取し、アムスラー型 30 t 万能試験機によつて常温の引張試験を実施した。

3.3 クラッド鋼板の金属組織学的研究

ステンレスクラッド鋼板のステンレス鋼と炭素鋼との接着部を研磨し、これを 10% クロム酸電解腐食を行ない、その組織写真をとつた。

4. 試験結果と考察

4.1 クラッド鋼板および構成金属の引張試験

板厚 10mm のステンレスクラッド鋼板およびそのステンレス鋼部と炭素鋼部の 3 種の引張試験を行なつて得た結果は Table 2 に示す。ただし、各鋼種 3 本の試験値の平均値をあらわす。

4.1.1 クラッド鋼の破壊特性

ステンレスクラッド鋼の静的引張試験における荷重—伸び線図は、その構成金属であるステンレス鋼と炭素鋼の単独引張試験の荷重—伸び線図を重ねたものと考えることができる。ここで重畳すべき荷重—伸び線図は各ステンレス鋼、炭素鋼をクラッドされている原厚のままのものを引張試験して得られたものでなければならない。そこで本試験で得たその各線図によれば、炭素鋼が伸びて破壊強さの応力に達しても、その伸びでは延性の大きいステンレス鋼のほうは破壊強さに達する伸びには不足するのでそれ以下の応力にしかならない。すなわちステンレスクラッド鋼では、炭素鋼は破壊点に達してはいるが、ステンレス鋼は破壊伸び、破壊応力にまだ程遠い状態で破壊が生ずる。

これをステンレス鋼から見れば、静的試験では本来ステンレス鋼固有の破壊伸び、破壊応力に達した場合のみに破壊するという静的破壊の法則が、ステンレスクラッド鋼板の静的引張試験におけるステンレス鋼部の破壊においては成立していないことを示している。

試験結果から計算して見るとステンレス鋼部のみでの静的試験の場合に対し、破壊伸びではおおむね 60%、破壊応力ではおおむね 73% 程度でステンレスクラッド鋼板のステンレス鋼部は破壊している。金属材料の常温の静的破壊については、その破壊条件は金属固有のものでも独立のものでもなく、外部拘束により容易に変化するものであることがここに判明した。

ステンレスクラッド鋼板の破壊においては、まず破壊条件に達した炭素鋼に亀裂が入り、それがステンレス鋼

Table 1. Chemical composition of stainless clad steels tested. (in wt.%)

Thickness (mm)	Steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
7	Back metal (SS41)	0.12	0.24	0.68	0.030	0.013	—	—
	Stainless (SUS 7)	0.06	—	—	—	—	8.80	19.09
10	Back metal (SS41)	0.08	0.15	0.59	0.018	0.007	—	—
	Stainless (SUS 7)	0.06	—	—	—	—	9.02	19.48

Table 2. Mechanical properties of the stainless clad steel, backed mild steel and faced stainless steel.

Mechanical properties	Stainless clad steel	Backed mild steel	Faced stainless steel
Upper yielding point (kg/mm ²)	29.3±0.3	30.4±0.5	—
Lower yielding point (kg/mm ²)	29.2±0.3	30.0±0.3	—
Tensile strength (kg/mm ²)	48.2±0.1	45.9±0.1	68.9±0.2
Breaking strength (kg/mm ²)	39.0±0.1	36.9±0.4	65.5±1.8
Elongation (%)	32.5±0.4	27.1±0.5	54.6±0.4

部に伝播してついに破壊にいたるものと考えられる。したがってステンレスクラッド鋼板のステンレス鋼部の破壊の特色は亀裂伝播破壊であるといえる。その破壊状況は、静的引張試験にもかかわらず、非常に大音響を発生して破断する。

それゆえにステンレスクラッド鋼板によつて製作された圧力容器などの場合は、破壊のさいその鋼材の破壊特性から爆裂的に破壊し、他の鋼材を使用した場合よりステンレスクラッド鋼のほうがはるかに破壊力が大きく、被害を甚大ならしめる結果となるから、その設計にさいしては過大に過ぎるほど安全率を見込む必要があり、その取扱いは深甚な注意を要する。

4.1.2 クラッド鋼の引張強さの修正公式

一般にクラッド鋼の引張強さ σ は構成金属の引張強さ σ_m , σ_s とクラッド比 ρ から $\sigma_m + \rho(\sigma_s - \sigma_m)$ にて概数を知り得るが、クラッド鋼ではその構成金属が同時に各自の引張強さの応力に達しないのでこれでは誤差が生ずる。そこで著者は修正係数 κ を導入し、クラッド鋼の引張強さの修正公式を次のごとくあらわした。

$$\sigma = \kappa(\rho) \{ \sigma_m + \rho(\sigma_s - \sigma_m) \}$$

ここで修正係数はクラッド比に依存し、 $\kappa_{\rho=0} = \kappa_{\rho=1} = 1$ 。通常用いられるクラッド鋼はそのクラッド比が 20% 程度以下なので、こうしたクラッド比の比較的小さい範囲では修正係数に比例部分の近似法をとりうるから、

$$\sigma = \{ 1 - 5\rho(1 - \kappa_{\rho=0.2}) \} \{ \sigma_m + \rho(\sigma_s - \sigma_m) \}$$

よつて 20% クラッドの修正係数 $\kappa_{\rho=0.2}$ のみを実測すれば、その鋼材については 20% 程度までのクラッド比を持つクラッド鋼の引張強さはこの修正公式で求められる。20%クラッドの Table 2 のステンレスクラッド鋼板では、

$$\kappa_{\rho=0.2} = 0.955 < 1$$

$$\sigma = (1 - 0.225\rho) \{ \sigma_m + \rho(\sigma_s - \sigma_m) \}$$

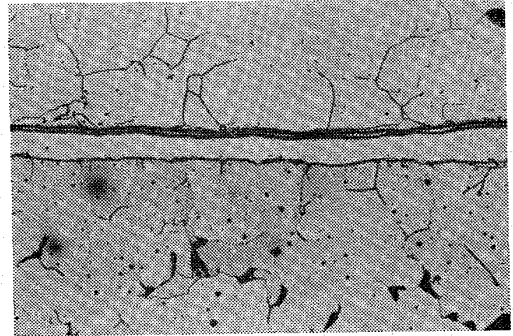
4.1.3 クラッド鋼の引張破壊の伸び特性

板厚 10mm ステンレスクラッド鋼板とその部材の引張試験の結果得られた伸び特性のバルバの常数を Table 3 に示す。

ステンレスクラッド鋼の引張試験では、その炭素鋼部が局部伸びを開始しようとしても、まだその時期に達していないステンレス鋼部がそれを妨害する傾向があり、結局全体としては局部伸び開始時期が少しおくれるため炭素鋼単独の場合より α は大きく、また十分局部収縮が

Table 3. Barba's constants of the stainless clad steel.

Steel	Barba's constant	
	α	β
Stainless clad steel	0.236±0.006	0.907±0.055
Backed mild steel	0.195±0.009	0.953±0.057
Faced stainless steel	0.508±0.005	1.042±0.004



×200 (4/5)

Photo. 1. Micro-structure of the stainless clad steel plate.

できないため β は小になるという伸び特性が本表で認められた。

4.2 等質等方でないクラッド鋼の伸びの相似則

クラッド比 20% の板厚 7mm ステンレスクラッド鋼板の引張試験の結果よりバルバの常数を求めると、

$$\alpha = 0.238 \pm 0.016, \quad \beta = 0.909 \pm 0.064$$

これは Table 3 に示す板厚 10mm の同鋼板の

$$\alpha = 0.236 \pm 0.006, \quad \beta = 0.907 \pm 0.055$$

と比較すると、試験誤差の範囲内で一致している。よつてバルバの法則はステンレスクラッド鋼板のごとき等質等方でない鋼材でも成立つ。

4.3 ステンレスクラッド鋼板の接着面の組織

Photo. 1 から接着面には成分の拡散により薄い合金層が生じている。

5. 結 言

1) 単一鋼材に関する静的破壊法則は、その鋼材がクラッド鋼の部材となれば、そのときの静的試験におけるその部材の破壊には成立しない。

2) クラッド鋼の引張強さは次の修正公式が適当である。 $\sigma = \kappa(\rho) \{ \sigma_m + \rho(\sigma_s - \sigma_m) \}$

ただし、修正係数 $\kappa_{\rho=0} = \kappa_{\rho=1} = 1$

クラッド比 20% 程度以下の通常の場合では、

$$\sigma = \{ 1 - 5\rho(1 - \kappa_{\rho=0.2}) \} \{ \sigma_m + \rho(\sigma_s - \sigma_m) \}$$

ステンレスクラッド鋼板では、 $\kappa_{\rho=0.2} = 0.955 < 1$

3) 引張試験におけるバルバの法則は等質等方でないステンレスクラッド鋼に対しても成立する。

4) ステンレスクラッド鋼のバルバの常数 α , β はその炭素鋼単独の場合の α_m , β_m に対し $\alpha > \alpha_m$, $\beta < \beta_m$

文 献

- 1) Metals Handbook (1948), p. 545
- 2) Welding Handbook (1950), p. 802
- 3) H. THIELSCH: J. Welding (1952), p. 142
- 4) T. S. FITCH: Industrial & Engineering

- Chemistry, 33 (1941) 4, p. 502
- 5) ASTM (1955) Part 1, p. 536
- 6) 藤津: 鉄と鋼, 50 (1964) p. 2104

(184) ステンレス鋼の孔食におよぼす熱処理の影響

(ステンレス鋼の孔食に関する研究—Ⅱ)

防衛庁技術研究本部 ○安達 豊

Effect of Heat Treatment on Stainless Steel.

(Study of pitting corrosion for stainless steel—Ⅱ)

Yutaka ADACHI.

1. 緒言

筆者はさきにステンレス鋼の表面状態と孔食発生感受性について報告したが¹⁾, 本報告はステンレス鋼を1000°C~1200°Cで溶体化処理した場合, 650°Cで500hrまで鋭敏化処理を行なった場合およびTi, Cbで安定化したステンレス鋼について安定化処理を行なった場合のそれぞれの熱処理とステンレス鋼の耐孔食性について検討を行なった。

2. 試料

実験に用いた試料の化学成分をTable 1に示す。

Table 1. Chemical composition of specimens (%).

Steel	Code	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Other
SUS 27 Stainless steel	S	0.07	0.64	1.08	0.030	0.010	18.63	9.34	0.17	0.13	
SUS 33 Stainless steel	SM	0.019	0.65	1.34	0.028	0.010	17.12	14.98	2.32		
AISI 321 Stainless steel	T	0.06	0.60	1.65	0.025	0.012	18.69	10.48			Ti 0.32
AISI 347 Stainless steel	N	0.06	0.24	1.48	0.018	0.010	18.31	11.05			Cb 0.87
5% Mo Stainless steel	M	0.05	0.63	1.50	0.015	0.016	17.43	16.50	4.30	0.17	

Table 2. Heat treatment of specimens.

Heat treatment	Code of heat treated specimens
a) Solution treatment 1200°C × 1hr W.Q.	20S, 20SM, 20M, 20T, 20N
1150°C × 1hr W.Q.	15S, 15SM, 15M, 15T, 15N
1100°C × 1hr W.Q.	10S, 10SM, 10M, 10T, 10N
b) Sensitizing treatment 650°C × 3hr A.C 650°C × 100hr A.C 650°C × 500hr A.C	S 3, SM 3, M 3, T 3, N 3 S10, SM10, M10, T10, N10 S50, SM50, M50, T50, N50
c) Stabilizing treatment 970°C × 4hr A.C 871°C × 4hr A.C	T9 N8

3. 実験方法

試験片は30cm角, 厚さ3mmに旋削したものをTable 2に示す熱処理を行なったのち, 表面をエメリー紙600番まで研磨し脱脂清浄し一端面にリード線を半田づけし試験面を残してビニール塗料で被覆する。

前回と同様にストライヘル試験装置で試験した。試験条件は250°Cの3% NaCl水溶液中で電流密度5mA/cm²一定で20min間行なった。試験終了後, 発生した孔食数を万能投影器で10倍に拡大して算えた。また孔食の径と深さを顕微鏡により測定し, 最大孔食についての断面顕微鏡組織を観察した。

4. 実験結果および考察

4.1 電圧の変化

各熱処理を行なった試験片をストライヘル試験装置により試験したときの電圧の変化をFig. 1~Fig. 4に示した。Fig. 1に示すようにSUS33は溶体化処理を行なったものは約2.70Vより電圧は徐々に低下し, 孔食発生開始とともに急激に低下して約1.5~1.6Vで一定になる。孔食発生開始時間は溶体化処理温度1150°Cまでは増加する。650°Cで鋭敏化処理したものは試験開始と同時に孔食を発生し, 電圧も約1.6~1.7Vの低い電圧を示し, 時間とともにあまり低下しない。SUS27においてはFig. 2に示すように溶体化処理したものは, 約2.8~2.9Vの電圧を示し, まもなく急激に低下して1.6V近辺で一定になる傾向はSUS33と同様であるが, 電

圧低下の時間が速い。5% Moを含むステンレス鋼はFig. 3に示すような溶体化処理を行なったものは2.8Vより徐々に電圧は低下するが急激な低下は認められず試験終了後も孔食の発生を認めなかつた。しかし鋭敏化処理を行なったものは1.7Vの電圧を示し試験開始とともに孔食を発生した。Tiを含むステンレス鋼についての結果をFig. 4に示す。この種のものでは溶体化処理, 鋭敏化処理, 安定化処理のいずれの処理を行なっても大差は認められず, 全面に細かい孔食を発生する。Cbを含むものにおいてもほぼ同様な傾向を示した。以上の実験結果よりMoを含むステンレスはすぐれた耐孔食性を示すが, 650°Cで長時間加熱すると耐孔食性は急激に低下する。溶体化処理温度を高めることはある程度耐孔食性を改善する。鋭敏化処理や安定化処理を行なつて, クロムカーバイトやCbC, TiCを析出させたものはあまり優れた耐孔食性を示さない。安定化ステンレス鋼の耐孔食性は劣る。