

ステンスクラッド鋼の疲労亀裂進展速度

森 猛¹・公門和樹²

¹ 正会員 工博 法政大学教授 工学部土木工学科 (〒184-0002 東京都小金井市梶野町3-7-2)

² 学生会員 法政大学大学院建設工学専攻修士課程 (現, 株式会社BMC)

鋼構造の弱点とされている耐腐食性を向上させる一つの方策としてその使用が考えられているステンスクラッド鋼の疲労亀裂進展速度を明らかにする目的で、鋼、ステンレス鋼、そしてステンスクラッド鋼を母材とするCCT試験片を用いて疲労亀裂進展試験を行っている。その結果に基づき、鋼とステンレス鋼の弾性係数の違いを考慮した疲労亀裂進展速度表示式を提案している。

Key Words: stainless clad steel, fatigue crack propagation rate, Young's modulus, tensile residual stress

1. はじめに

鋼構造はコンクリート構造に比べ高強度で軽量化が図れるなど種々の利点を有するが、耐疲労性や耐腐食性においては劣るとされている。鋼構造の耐腐食性を向上させる方法の一つとして、ステンスクラッド鋼の使用が考えられる。ステンスクラッド鋼は、鋼とステンレス鋼という引張強度やヤング率などの機械的性質が異なる金属をはり合わせた複合材料である。したがって、従来知られている鋼単体あるいはステンレス鋼単体での強度特性をステンスクラッド鋼にそのまま適用することには問題がある。

本研究では、ステンスクラッド鋼を構造材料として利用するにあたって解明すべき強度特性の内、疲労亀裂進展速度に注目し、鋼、ステンレス鋼、ステンスクラッド鋼の疲労亀裂進展試験を行った。ここでは、それらの進展速度を比較するとともに、ステンスクラッド鋼の疲労照査に用いるべき疲労亀裂進展速度表示式について検討する。

2. 試験方法

(1) 試験片

供試鋼材は板厚9mmの一般構造用鋼材 JIS SS400 と板厚9mmのステンレス鋼 JIS SUS316L, そして板厚10.5mmのステンスクラッド鋼 (SUS316L : 2mm + SS400 : 8.5mm) の3種類である。各鋼材の化学成分と機械的性質を表-1に示す。なお、ステンレス

表-1 供試鋼材の化学成分と機械的性質

鋼種	化学成分 (%)							
	C	Si	Mn	P	Cu	Ni	Cr	Mo
SS400	0.12	0.20	0.65	0.01	0.01	0.02	0.04	0.00
SUS316L	0.02	0.57	1.01	0.03	-	12.2	17.5	2.09
クラッド鋼	SS400	0.14	0.18	0.76	0.01	-	-	-
	SUS316L	0.02	0.57	1.01	0.03	-	12.2	17.5

鋼種	降伏応力 (MPa)	引張強度 (MPa)	ポアソン比	伸び (%)	ヤング率 (GPa)	線膨張率 (×10 ⁻⁶ /°C)
SS400	292	417	0.271	16.5	206	1.1
SUS316L	253	551	0.293	29.4	186	1.6
クラッド鋼	297	515	0.248	21.7	202	-

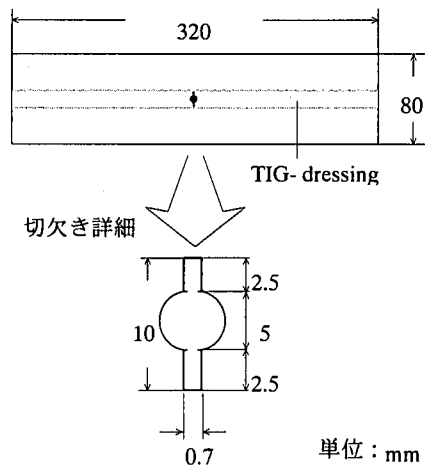


図-1 試験片の形状と寸法

ラッド鋼のヤング率は延び計により測定した平均的なものである。

表-2 TIG-Dressingの条件

	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	入熱量 (KJ/cm)	
SS400 (裏表とも)	220	17.0	20.0	11.2	
SUS316L (裏表とも)	180	16.5	18.5	9.6	
クラッド鋼	SS400	180	16.5	18.5	9.6
	SUS316L	220	17.0	20.0	11.2

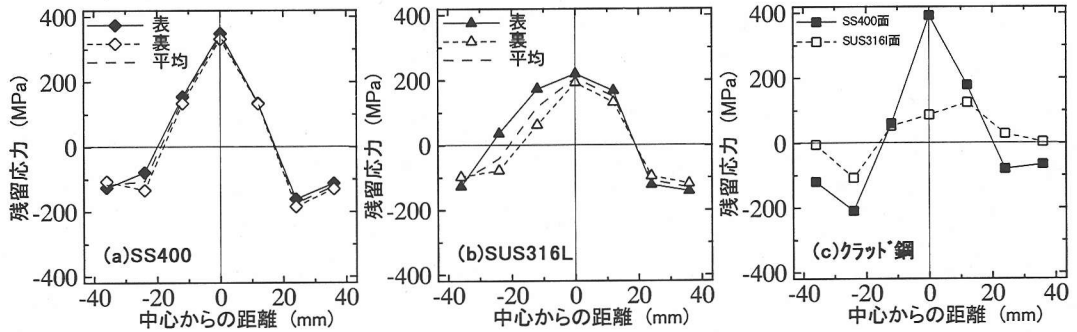


図-2 残留応力の測定結果

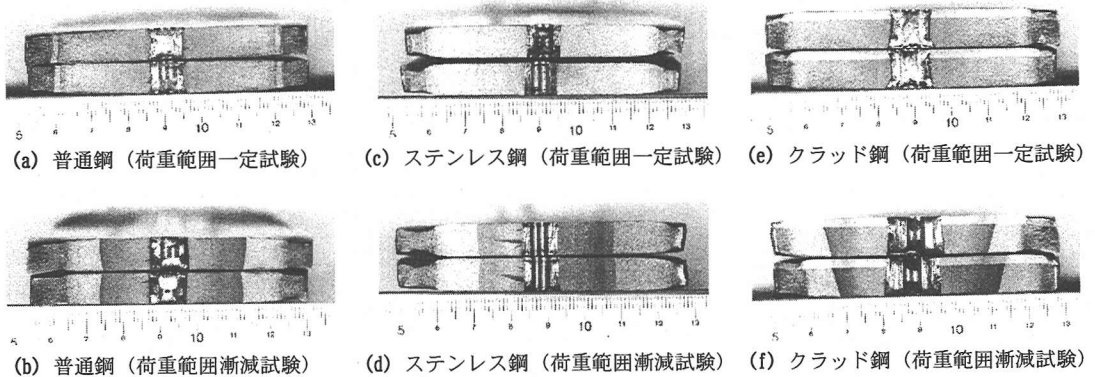


写真-1 疲労破面

試験片の形状と寸法を図-1に示す。試験片の表裏面には、引張残留応力を導入する目的で、試験片中央長手方向にTIG-dressingを行っている。TIG-dressingは、自動溶接用台車を用いて溶接速度を制御して行った。その条件は表-2に示す通りである。TIG-dressingを行った後、試験片中央に直径5mmの円孔を加工し、さらにその先に糸ノコで、幅約0.7mm、長さ2.5mmの切欠きを入れた。試験片の表面は疲労亀裂の観察を容易とするために、エメリー紙と金属研磨剤を用いて鏡面に仕上げた。

(2) 残留応力の測定

残留応力の測定は、円孔を加工する前の試験片を

対象とし、その中央線に沿ってゲージ長1mmのひずみゲージを試験片幅方向に等間隔に貼り付け、その周りを切断する方法により行った。なお、ひずみゲージは試験片の表裏面とも貼付している。

残留応力の測定結果を図-2(a)~(c)に示す。残留応力の値は試験片切断前後のひずみの読み値の差に各鋼材のヤング率を乗ずることにより求めている。各鋼材ともTIG-dressingにより大きな引張残留応力が導入されている。SS400とSUS316L試験片の中央には、それぞれ350MPa、200MPa程度の引張残留応力が生じている。ステンレスクラッド鋼では、SS400面に400MPa程度の残留応力が生じているのに対し、SUS316L面では100MPa程度と、SUS316Lを単体で測定

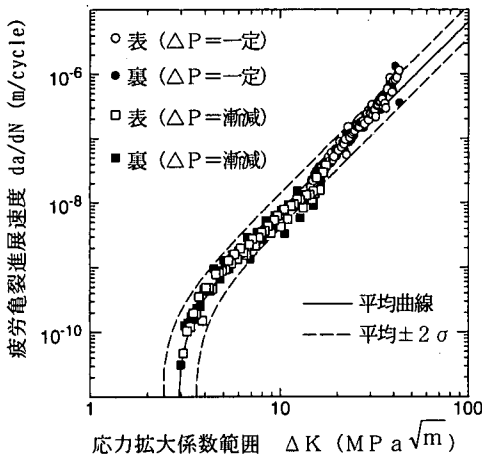


図-3 疲労亀裂進展試験結果(SS400)

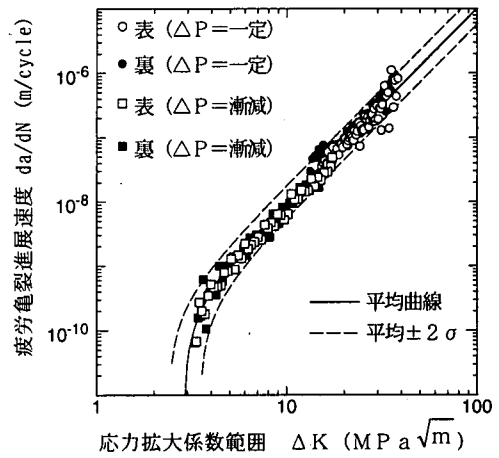


図-4 疲労亀裂進展試験結果(SUS316L)

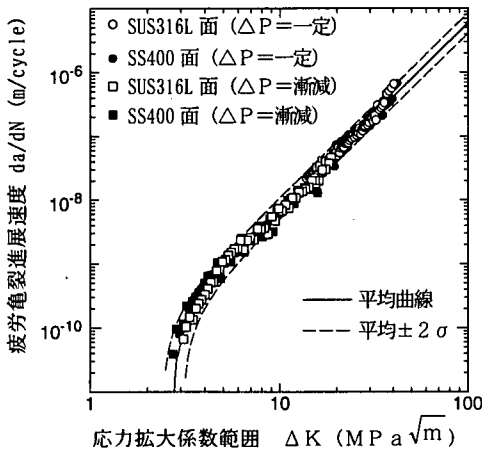


図-5 疲労亀裂進展試験結果(クラッド鋼)

した残留応力のおよそ半分になっている。これは、SUS316LとSS400で線膨張係数が異なること ($1.6 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ と $1.1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$)、またヤング率が異なることに原因があるものと考えられる。

(3) 疲労亀裂進展試験方法

疲労亀裂進展試験は動的能力 $\pm 100\text{kN}$ の電気油圧サーボ式材料試験機を用いて行った。荷重波形は正弦波であり、繰り返し速度は $4 \sim 20\text{Hz}$ である。亀裂長さの測定には測定精度 0.01mm の読み取り顕微鏡 ($\times 50$)を用いた。この測定は試験片表裏面の亀裂両端について行った。

疲労亀裂進展試験は、各鋼材とも荷重範囲一定と荷重範囲漸減条件下で行った。したがって、試験片の数は各鋼材で2体ずつの計6体である。荷重範囲

一定試験では上限荷重 80kN 、下限荷重 10kN の一定振幅荷重下で疲労亀裂進展速度を測定した。この条件で試験を行うことより、応力拡大係数範囲 ΔK が $15 \sim 60\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ での進展速度が計測できる。荷重範囲漸減試験は、疲労亀裂進展の限界値である下限界応力拡大係数範囲近傍の $da/dN - \Delta K$ 関係を調べるために行った。この試験では、下限荷重を 10kN で一定とし、上限荷重を 80kN より亀裂が約 0.25mm 伸びるごとに 5% づつ階段状に減少させた。

3. 試験結果

(1) 疲労亀裂の進展性状

荷重範囲一定試験および荷重範囲漸減試験を行った各試験片の破面を写真-1(a)~(f)に示す。荷重範囲漸減試験では下限界応力拡大係数範囲を測定した後、荷重範囲大きくし破断させた。荷重範囲漸減試験を行った試験片の破面には暗い色から明るい色へ変化している部分があるが、この境界で荷重範囲を大きくしている。写真(b)と(d)に示す鋼材とステンレス鋼では、亀裂長さが板厚方向ではほぼ一様となっている。写真(f)に示すステンレスクラッド鋼では、上側で白く見えるステンレス部分で亀裂が鋼に比べて全体的に長くなっているが、その境界で疲労亀裂が不連続とはなっていない。

(2) 各鋼材の $da/dN - \Delta K$ 関係

疲労亀裂進展試験より求めた各鋼材の疲労亀裂進展速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK の関係を図-3~図-5に示す。なお、 ΔK は次式より求めた。

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{A} \sqrt{\pi a \cdot \sec\left(\frac{\pi a}{w}\right)} \quad (1)$$

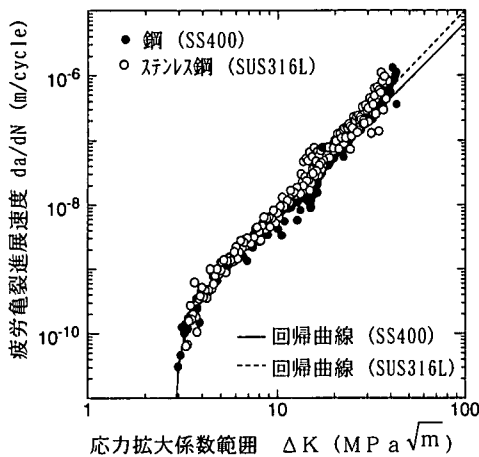


図-6 ステンレス鋼と鋼の $da/dN - \Delta K$ 関係の比較

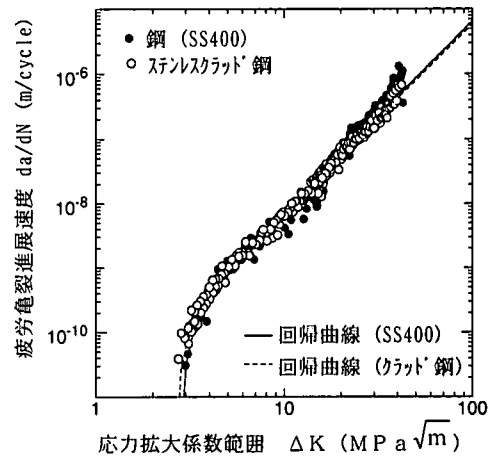


図-7 クラッド鋼と鋼の $da/dN - \Delta K$ 関係の比較

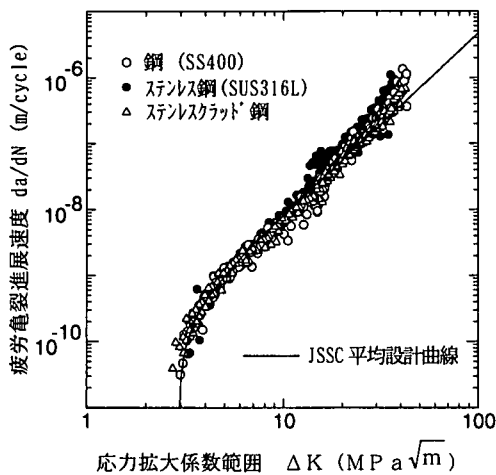


図-8 各鋼材の $da/dN - \Delta K$ 関係と JSSC 指針平均疲労設計曲線の比較

ΔP : 荷重範囲
 w, t : 試験片の板幅と板厚
 A : 試験片の断面積 (= $w \times t$)

図中の実線と破線は da/dN を独立変数として非線形最小二乗法¹⁾により求めた平均の $da/dN - \Delta K$ 関係と平均から $2 \times$ 標準偏差だけ離れた $da/dN - \Delta K$ 関係である。これらの図では荷重範囲一定試験と荷重範囲漸減試験で得られたデータを、マークを変えて示しているが、これらはいずれの鋼材においても互いに重なり合っており、ここで用いた荷重範囲漸減試験の試験条件は妥当であったと言える。

4. 疲労照査に用いるステンレスクラッド鋼の疲労亀裂進展速度表示式

(1) 各鋼材の $da/dN - \Delta K$ 関係の比較

図-6 は SS400 と SUS316L の $da/dN - \Delta K$ 関係を比較したものである。 $\Delta K \geq 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の領域で、SUS316L は SS400 に比べて疲労亀裂進展速度が若干速くなっているもの、低 ΔK 領域においてはほぼ一致している。図-7 にステンレスクラッド鋼と SS400 の $da/dN - \Delta K$ 関係を示す。両者の $da/dN - \Delta K$ 関係は全領域にわたってよく一致している。

(2) 各鋼材の $da/dN - \Delta K$ 関係と JSSC 指針平均設計疲労曲線との比較

図-8 は、日本鋼構造協会の「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」²⁾ (以後 JSSC 指針と呼ぶ) に示されている $da/dN - \Delta K$ 関係の平均設計曲線と 3 種類の鋼材の $da/dN - \Delta K$ 関係を比較したものである。この平均設計曲線は炭素鋼および低合金鋼を対象とした数多くの疲労亀裂試験結果を収集し整理することにより定められたものである³⁾。SS400 だけではなくステンレスクラッド鋼の $da/dN - \Delta K$ 関係も、平均設計曲線にほぼ一致している。それらに比べて、ステンレス鋼の進展速度は若干速くなっている。なお、平均設計曲線は次式で与えられている。

$$da/dN = 1.5 \times 10^{-11} (\Delta K^{2.75} - \Delta K_{th}^{2.75}) \quad (2)$$

$$da/dN: \text{m/cycle}, \Delta K: \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$$

ΔK_{th} : 下限界応力拡大係数範囲 (= $2.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

このように、応力拡大係数範囲 ΔK で整理した場合、ステンレス鋼で進展速度が速くなる原因は、 ΔK が

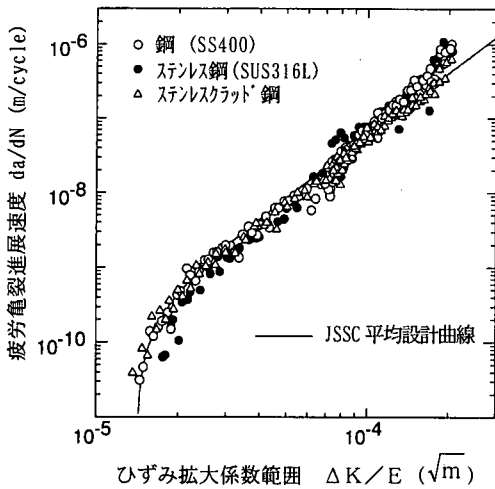


図-9 各鋼材の $da/dN - \Delta K/E$ 関係と JSSC 指針平均疲労設計曲線の比較

同じであればヤング率 E の小さいものほど亀裂先端でのひずみ範囲が大きくなるためとも考えられる。疲労亀裂進展速度は亀裂先端での応力場ではなく、ひずみ場に依存するという考え方もあり、 ΔK の代わりに $\Delta K/E$ を用いて $da/dN - \Delta K$ が整理されることもある⁴⁾。 $\Delta K/E$ はひずみ拡大係数範囲と呼ばれている。このひずみ拡大係数範囲を用いれば、さまざまな金属材料の進展速度を同一の式で表現できるとも考えられている。例えばアルミニウム合金、ステンレス鋼、炭素鋼といったヤング率の異なる金属材料の疲労亀裂進展速度を ΔK で整理した場合に見られる大きなばらつきが、 $\Delta K/E$ で整理することによりかなり小さくなるという結果が示されている⁵⁾。したがって、 $\Delta K/E$ を用いて疲労亀裂進展速度を整理することは工学的に有効な手段と考えられる。ひずみ拡大係数範囲 $\Delta K/E$ で鋼、ステンレス鋼、ステンレスクラッド鋼の進展速度を整理した結果を図-9 に示す。ステンレスクラッド鋼の平均的なヤング率 E は次式より求めた。

$$E = \frac{t_c \cdot E_c + t_b \cdot E_b}{t_c + t_b} \quad (3)$$

t_c, E_c : ステンレス鋼の板厚とヤング率
 t_b, E_b : 鋼の板厚とヤング率

なお、式(3)から求めたステンレスクラッド鋼のヤング率は 202GPa であり、実測により求めたヤング率とよく一致している。

$\Delta K/E$ で整理することにより、ステンレス鋼の進展速度も疲労設計指針の平均設計曲線とよく一致し

ている。なお、ひずみ拡大係数範囲を用いた平均設計曲線は、次式で表される。

$$da/dN = 6.15 \times 10^3 \left[(\Delta K/E)^{2.75} - (\Delta K/E)_{th}^{2.75} \right] \quad (4)$$

$$(\Delta K/E)_{th} = 1.41 \times 10^{-5} \sqrt{m}$$

5. まとめ

- (1) 応力拡大係数範囲で整理した場合、ステンレス鋼の疲労亀裂進展速度は鋼材よりも高い。これは同じ応力拡大係数範囲であれば、ヤング率の低いステンレス鋼の方が亀裂先端でのひずみの変動幅が大きくなるためと考えられる。
- (2) ステンレスクラッド鋼において SS400 と SUS316L の境界で、亀裂長さが急変することはなかった。
- (3) ステンレスクラッド鋼の $da/dN - \Delta K$ 関係は鋼とほぼ一致する。これはここで用いたステンレスクラッド鋼の大半が鋼で占められるため、鋼の特性が卓越したためと考えられる。
- (4) ステンレスクラッド鋼の疲労亀裂進展速度をより厳密に表現するためには、ひずみ拡大係数範囲で整理した方がよい。ここでは日本鋼構造協会・疲労設計指針の平均設計曲線に基づき次式で $da/dN - \Delta K/E$ 関係を表すことを提案する。

$$da/dN = 6.15 \times 10^3 \left[(\Delta K/E)^{2.75} - (\Delta K/E)_{th}^{2.75} \right] \quad (4)$$

$$(\Delta K/E)_{th} = 1.41 \times 10^{-5} \sqrt{m}$$

ただし、ステンレスクラッド鋼のヤング率 E は

$$E = \frac{t_c \cdot E_c + t_b \cdot E_b}{t_c + t_b}$$

t_c, E_c : ステンレス鋼の板厚とヤング率
 t_b, E_b : 鋼の板厚とヤング率

謝辞：本研究は土木学会鋼構造委員会鋼構造新技術小委員会耐久性 WG の活動の一部として行ったものであり、三木千寿主査（東京工業大学）をはじめ、WG の各位には貴重なご意見を賜った。また、実験およびデータの整理には法政大学の学生であった牧原雅和氏に協力を頂いた。ここに記して、関係各位に感謝する。

参考文献

- 1) 土木学会土木情報システム委員会教育問題小委員会：土木情報処理の基礎、土木学会、pp. 171-178, 1988.
- 2) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、

- 技報堂出版, pp. 54-57, 1993.
- 3) 征矢勇夫：各種溶接構造用鋼の疲労亀裂伝播特性（日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，資料編 4.2.1項），技報堂出版, pp. 245-249, 1993.
- 4) 西谷弘信編：疲労強度学，オーム社, pp. 179-180, 1985.
- 5) 太田昭彦，廻俊夫，鈴木直之：基本疲労き裂伝ば特性に及ぼすヤング率の影響，溶接学会全国大会講演概要集第47集, pp. 362-363, 1990. (1997. 5. 20受付)

FATIGUE CRACK PROPAGATION RATES OF STAINLESS CLAD STEEL

Takeshi MORI and Kazuki KOMON

In order to examine the fatigue crack propagation rates of stainless clad steel which is considered to be useful for increasing the resistance of steel structures against corrosion, fatigue crack propagation tests have been carried out by using CCT type of specimens made of mild steel, stainless steel and stainless clad steel. On the basis of the experimental results, an expression for fatigue crack propagation rates of stainless clad steel is proposed in consideration of a difference in a Young's modulus of steel from stainless steel.