

【工学】
研究論文

ケミカルタンカー用 二相ステンレスクラッド鋼板十字溶接継手の疲労強度について

荒金 卓也*¹, 鍬 尚憲*¹, 緒方 洋典*²,
松岡 和彦*³, 岡田 公一*⁴, 矢島 浩*⁵

A Study on Fatigue Strength of Cruciform Welded Joints of Duplex Stainless-Clad Steel Plates for Chemical Tankers

ARAKANE Takuya*¹, KUWA Takanori*¹, OGATA Hironori*²,
MATSUOKA Kazuhiko*³, OKADA Koichi*⁴ and YAJIMA Hiroshi*⁵

Summary

On the utilization of duplex stainless-clad steel plate and the solid steel plate in the cargo tank structure of chemical tanker, most important items to know in the design of the construction is fatigue strength of the cruciform welded joint between the transverse bulkhead and double bottom.

In this study, we conducted the fatigue tests using the specimens of the cruciform welded joints composed of duplex stainless SUS329J3L-clad steel plate, SUS329J3L solid steel plate and mild steel plate.

As a result, it is shown that duplex stainless SUS329J3L-clad steel plate and SUS329J3L solid steel plate can be sufficiently utilized into the cargo tank structure of chemical tanker.

Keywords : chemical tanker, duplex stainless-clad steel plate, fatigue strength of cruciform welded joint, stress concentration factor, fatigue strength at 2×10^6 cycles

キーワード：ケミカルタンカー、二相ステンレスクラッド鋼板、十字溶接継手部の疲労強度、応力集中係数、 2×10^6 回疲労強度

1. はじめに

ケミカルタンカーの外観と中央部付近の横断面を Fig.1 に示す。Fig.1 に示した通り、カーゴタンク同士の隔壁にはステンレスソリッド鋼板が使用され、二重底やカーゴタンクとバラスタタンクとの隔壁には、ステンレスクラッド鋼板が使用されている。

カーゴタンク構造で応力条件が厳しく、しかも最重要箇所であるトランスバルクヘッド（ステンレスソリッド

鋼板）と二重底（ステンレスクラッド鋼板）との完全溶け込み十字溶接継手部に、疲労亀裂が発生すると、深刻な事故に発展する可能性が大きい。当該溶接継手部の強度・信頼性確保は、ケミカルタンカー船体構造上最も重要な課題である。

なお、ケミカルタンカーには、従来からオーステナイト系ステンレス鋼板が使用されてきたが、数年前から二相ステンレス鋼板が使用されるようになってきた。

*¹ 大学院 工学研究科 博士課程・株式会社 白杵造船所

*² 株式会社 白杵造船所 博士(工学)

*³ 大学院 工学研究科 教授

2023年9月26日受付

2023年12月12日受理

*⁴ 大学院 工学研究科 准教授

*⁵ 長崎総合科学大学 名誉教授

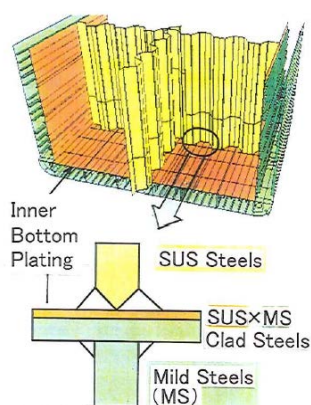


Fig.1 General view and cargo tank internal structure of chemical tanker

二相ステンレス鋼板は、フェライト（ α 相）とオーステナイト（ γ 相）との二相混合組織であり、オーステナイト系ステンレス鋼板が有する良好な延性・靱性と、フェライト系ステンレス鋼板が有する優れた耐応力腐食割れ（耐 SCC）性とを兼ね備えたステンレス鋼板であると言える。

一方、ケミカルタンカー建造に多用されて来たオーステナイト系ステンレス（SUS316LN）鋼板（Ni 含有量 10～12%）¹⁾と、二相ステンレス（SUS329J3L）鋼板とを比較すると、SUS329J3L 鋼板の Ni 含有量は SUS316LN 鋼板の 1/2 程度である。SUS329J3L 鋼板をケミカルタンカー建造に適用できれば、希少資源節約効果が大きい。

本報では、二相ステンレスクラッド（SUS329J3L-clad）鋼板と二相ステンレス（SUS329J3L）ソリッド鋼板との組み合わせ、およびオーステナイト系ステンレスクラッド（SUS316L-clad）鋼板と二相ステンレス（SUS329J3L）ソリッド鋼板との組み合わせによる、荷重伝達型・荷重非伝達型完全溶け込み十字溶接接手の疲労強度について述べる^{2)~4)}。

2. 供試鋼板および疲労試験片溶接条件

完全溶け込み十字溶接継手の疲労試験片に使用された、二相ステンレスソリッド鋼板[SUS329J3L：16mm]、二相ステンレスクラッド鋼板[板厚 16mm（SUS329J3L：3mm，炭素鋼：13mm）]，およびオーステナイト系ステンレスクラッド鋼板[板厚 16mm・15mm（SUS316L：3mm，炭素鋼：13mm・12mm）]の化学成分を Table 1 に、機械的性質を Table 2 に示す³⁾。

Table 1 Chemical composition of test steel plates (wt %)

Test Steel Plate	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
SUS329J3L (t:16)	0.013	0.55	1.81	0.026	0.000	22.55	5.75	3.10	0.17
SUS329J3L-Clad* (t:3+13)	0.013	0.31	0.97	0.025	0.002	22.55	5.42	3.10	0.17
SUS316L- Clad* (t:3+13)	0.008	0.58	0.78	0.021	0.001	17.14	12.17	2.75	—
SUS316L- Clad* (t:3+12)	0.008	0.54	0.77	0.024	0.001	16.94	12.11	2.84	—

* SUS329J3L, SUS316L Steel Plate (3mm)

Table 2 Mechanical properties of test steel plates

Test Steel Plate	Thick. (mm)	0.2% Proof Stress (N/mm ²)	Tensile Strength (N/mm ²)	Elongation (%)
SUS329J3L	16	594	771	35
SUS329J3L-Clad* (16 (3+13))	16 (3+13)	433	554	23
SUS316L- Clad* (16 (3+13))	16 (3+13)	290	480	27
	15 (3+12)	—	476	35

* Full-Thickness Tensile Test (16mm, 15mm)

Table 1 に示したクラッド鋼板の化学成分は、板厚 3mm の合せ材の化学成分である。

また、Table 2 に示したクラッド鋼板の機械的性質は全厚引張試験結果である。

さらに、供試された疲労試験片の溶接条件を、Table 3 および Table 4 に示す³⁾。全て下向き姿勢で、パス間温度を 150℃以下として溶接した。

Table 3 Welding parameters of full penetration cruciform welded joints (FCAW)

Test Steel Plate	Build-up Sequence	Welding Current (A)	Arc Voltage (V)	Travel Speed (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)	Welding Consumables (JIS)
SUS329J3L-Clad Steel Plate + SUS329J3L Steel Plate		180 ~200	30 ~32	17.0 ~28.2	13.6 ~22.6	TS2209 -FCO
		200	32	15.7 ~28.3	13.6 ~24.5	TS2209 -FCO

Plate Thickness : 16 mm, Gas Flow Rate : 18 ℓ/min, Interpass Temperature ≤150℃

Table 4 Welding parameters of full penetration cruciform welded joint

Test Steel Plate	Welding Method	Gas Flow Rate (ℓ/min)	Welding Current (A)	Arc Voltage (V)	Travel Speed (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)
SUS316L-Clad + SUS329J3L	FCAW	18	170 ~200	29 ~32	20.1 ~45.0	6.7 ~17.8

3. 荷重伝達型完全溶け込み十字溶接継手の疲労強度

3.1 供試試験片形状・寸法

荷重伝達型完全溶け込み十字溶接継手疲労試験片の形状・寸法を Fig.2 に示す³⁾。なお、Fig.2 に示したように、軟鋼板側溶接止端部から疲労亀裂が発生しないように、全ての試験片で、軟鋼板側止端部はグラインダーでドレッシング処理した。

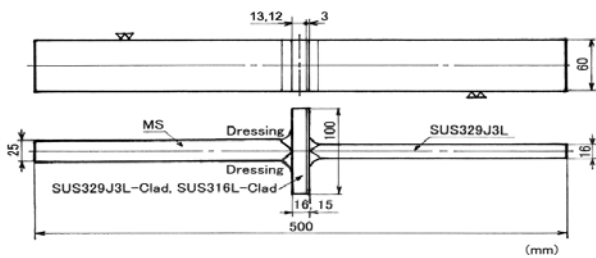


Fig.2 Shape and size of fatigue test specimen (Load-carrying full penetration cruciform welded joint)

3.2 疲労試験結果および考察

SUS329J3L-clad 鋼板と SUS329J3L ソリッド鋼板との荷重伝達型完全溶け込み十字溶接継手の疲労試験結果を、Fig.3 に示す。なお、応力集中係数 (K_t) は、Eq. (1) で求めた値である^{5)~9)}。

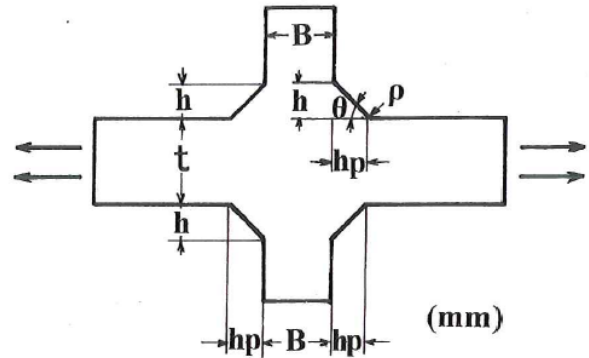
$$K_t = 1 + CQ^{0.467} \cdot f(\theta) \quad \dots \quad (1)$$

$$C = 1.348 + 0.397 \cdot \ln \left(\frac{B + 2hp}{t} \right)$$

$$Q = 1 / \left(2.8 \cdot \frac{t + 2h}{t} - 2 \right) \times \left(\frac{h}{\rho} \right)$$

$$f(\theta) = \frac{1 - \exp \left(-0.9 \cdot \sqrt{\frac{t + 2h}{2h}} \cdot \pi \cdot \frac{\theta}{180} \right)}{1 - \exp \left(-0.9 \cdot \sqrt{\frac{t + 2h}{2h}} \cdot \frac{\pi}{2} \right)}$$

K_t : 止端半径 ρ (mm)部の応力集中係数



Attached Diagram Symbols for Eq. (1)

Fig.3 には、応力範囲 (σ_R) と破断繰返し回数 (N_f) との関係 (σ_R - N_f 線図) と、 K_t 値を考慮して補正した、 $K_t \cdot \sigma_R$ - N_f 線図も示した。

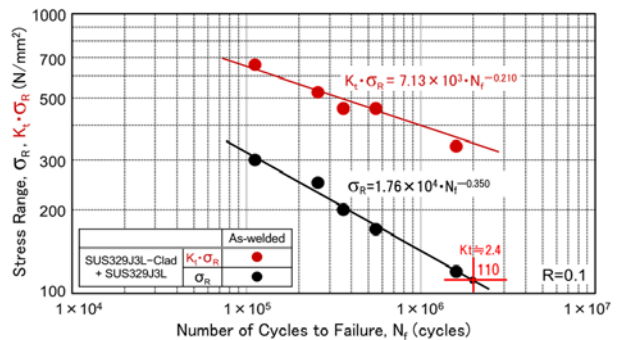


Fig.3 Results of fatigue test for load-carrying full penetration cruciform welded joint (σ_R - N_f , $K_t \cdot \sigma_R$ - N_f curve)

Fig.3 から明らかなように、SUS329J3L-clad 鋼板と SUS329J3L ソリッド鋼板との荷重伝達型完全溶け込み十字溶接継手の $K_t \cdot \sigma_R$ - N_f 線図は、Eq. (2) のようになった。

$$K_t \cdot \sigma_R = 7.13 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210} \quad \dots \quad (2)$$

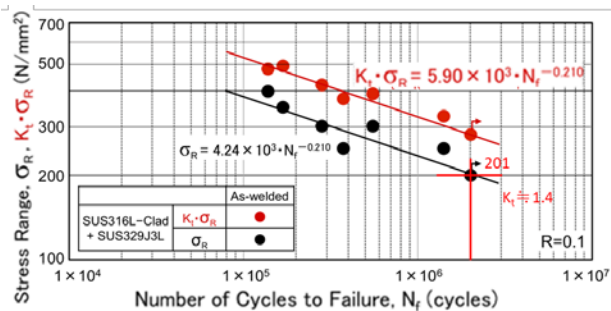
なお、溶接のままの継手の K_t 値の平均値は 2.4 であった。また、 2×10^6 回疲労強度 (応力範囲 σ_R) は約 110 N/mm² であった。

また、疲労試験後の破断面と破断位置の代表例を Fig.4 に示す。

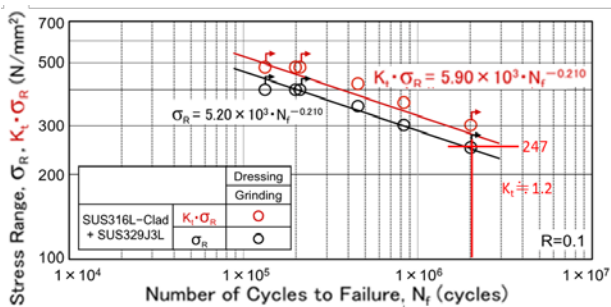


Fig.4 Fracture surface and pass after fatigue test
 (SUS329J3L-clad : Load-carrying, As-welded)
 (SCCA-4 : 170N/mm², 5.53×10⁵ cycles)

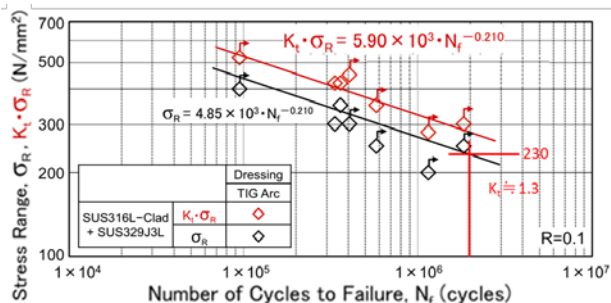
さらに, SUS316L-clad 鋼板と SUS329J3L ソリッド鋼板との荷重伝達型完全溶け込み十字溶接継手の疲労試験結果として, σ_R - N_f 線図と $K_t \cdot \sigma_R$ - N_f 線図を Fig.5 に示す。なお, K_t 値は, 上述の Eq.(1) で求めた値である。



(a) As-welded



(b) Dressing by grinding



(c) Dressing by TIG arc

Fig.5 Results of fatigue test for load-carrying full penetration cruciform welded joint (σ_R - N_f curve, $K_t \cdot \sigma_R$ - N_f curve)

Fig.5 から明らかなように, SUS316L-clad 鋼板と SUS329J3L ソリッド鋼板との荷重伝達型完全溶け込み十字溶接継手の $K_t \cdot \sigma_R$ - N_f 線図は, 溶接のままの継手も, 止端部グラインダーによるドレッシング処理継手も, 止端部 TIG アークによるドレッシング処理継手も, 全て同じ線図 [Eq.(3)] になった。

$$K_t \cdot \sigma_R = 5.90 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210} \dots \dots \dots (3)$$

また, 溶接のままの継手の K_t 値の平均値は 1.4 であり, 2×10^6 回疲労強度 (応力範囲 σ_R) は約 200N/mm² となった。また, 止端部グラインダーによるドレッシング処理継手, および止端部 TIG アークによるドレッシング処理継手の K_t 値の平均値は, それぞれ 1.2 および 1.3 であり, 2×10^6 回疲労強度 (σ_R) は約 250N/mm² および 230N/mm² となった。

なお, 疲労試験後の破断面と破断位置の代表例を, Fig.6~Fig.8 に示す。



Fig.6 Fracture surface and pass after fatigue test
 (SUS316L-clad : Load-carrying, As-welded)
 (FPLO2-3 : 398N/mm², 1.38×10⁵ cycles)



Fig.7 Fracture surface and pass after fatigue test
 (SUS316L-clad : Load-carrying, Grinding)
 (FPLO1-4 : 350N/mm², 4.54×10⁵ cycles)

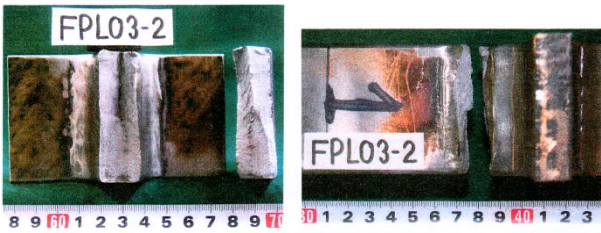


Fig.8 Fracture surface and pass after fatigue test
 (SUS316L-clad : Load-carrying, TIG arc)
 (FPL03-2 : 350N/mm², 3.60×10⁵ cycles)

4. 荷重非伝達型完全溶け込み十字溶接継手の疲労強度

4.1 供試試験片形状・寸法

荷重非伝達型完全溶け込み十字溶接継手疲労試験片の形状・寸法を、Fig.9 および Fig.10 に示す。なお、Fig.9 および Fig.10 に示したように軟鋼板側溶接止端部から疲労亀裂が発生しないように、全ての試験片で軟鋼板側止端部はグラインダーでドレッシング処理した。

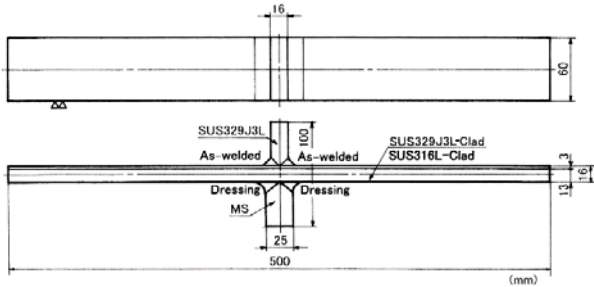


Fig.9 Shape and size of fatigue test specimen
 (Non-load-carrying full penetration cruciform welded joint), (As-welded)

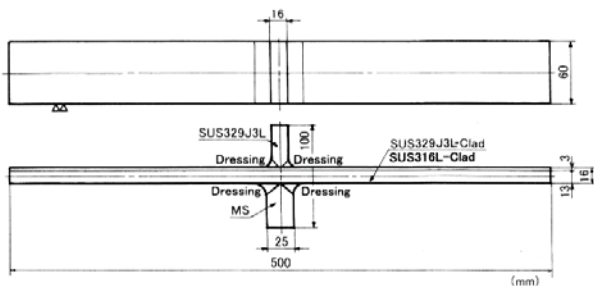


Fig.10 Shape and size of fatigue test specimen
 (Non-load-carrying full penetration cruciform welded joint)
 (Dressing by grinding, Dressing by TIG arc)

4.2 疲労試験結果および考察

SUS329J3L-clad 鋼板と SUS329J3L ソリッド鋼板との荷重非伝達型完全溶け込み十字溶接継手の疲労試

験結果として、 σ_R - N_f 線図と $K_t \cdot \sigma_R$ - N_f 線図を Fig.11 に示す。

なお、 K_t 値は、先に述べた Eq.(1)で求めた値である。

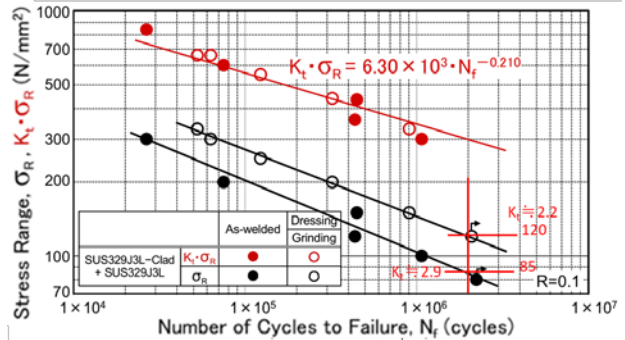


Fig.11 Results of fatigue test for non-load-carrying full penetration cruciform welded joint (σ_R - N_f curve, $K_t \cdot \sigma_R$ - N_f curve)

Fig.11 から明らかなように、SUS329J3L-clad 鋼板と SUS329J3L ソリッド鋼板との荷重非伝達型完全溶け込み十字溶接継手の $K_t \cdot \sigma_R$ - N_f 線図は、溶接のままの継手も、止端部グラインダーによるドレッシング処理継手も同じ線図 [Eq.(4)] になった。

$$K_t \cdot \sigma_R = 6.30 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210} \dots \dots \dots (4)$$

また、溶接のままの継手の K_t 値の平均値は 2.9 であり、 2×10^6 回疲労強度(σ_R)は約 85N/mm²となった。また、止端部グラインダーによるドレッシング処理継手の K_t 値の平均値は 2.2 であり、 2×10^6 回疲労強度(σ_R)は約 120N/mm²となった。

なお、疲労試験後の破断面と破断位置の代表例を、Fig.12 および Fig.13 に示す。



Fig.12 Fracture surface and pass after fatigue test
 (SUS329J3L-clad : Non load-carrying, As-welded)
 (SNCA-3 : 120N/mm², 4.37×10⁵ cycles)

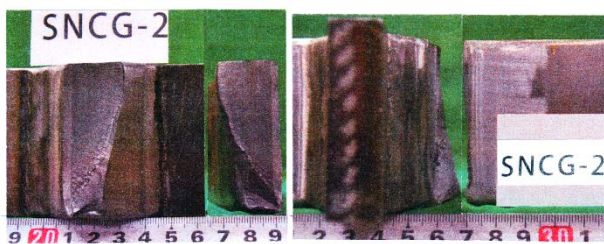
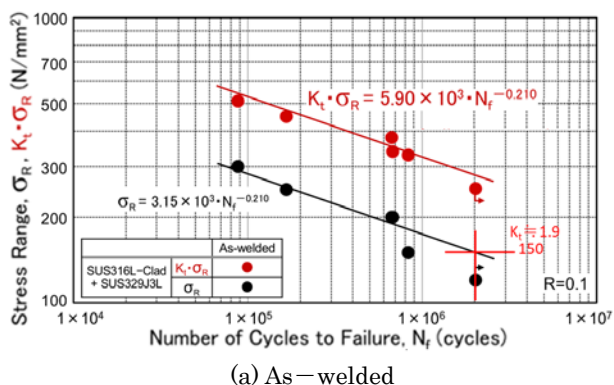
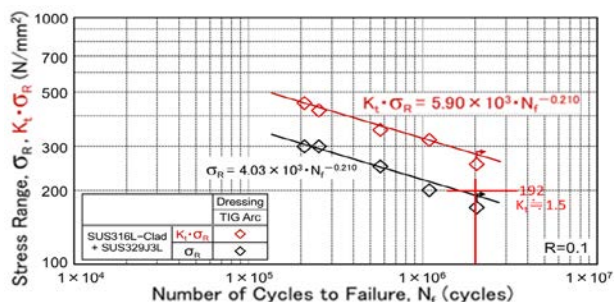


Fig.13 Fracture surface and pass after fatigue test
 (SUS329J3L-clad : Non load-carrying, Grinding)
 (SNCG-2 : 150N/mm², 9.05×10⁵ cycles)

さらに, SUS316L-clad 鋼板と SUS329J3L ソリッド鋼板との荷重非伝達型完全溶け込み十字溶接継手の疲労試験結果として, σ_R - N_f 線図と $K_t \cdot \sigma_R$ - N_f 線図を Fig.14 に示す。



(a) As-welded



(b) Dressing by TIG arc

Fig.14 Results of fatigue test for non-load-carrying full penetration cruciform welded joint (σ_R - N_f curve, $K_t \cdot \sigma_R$ - N_f curve)

Fig.14 から明らかなように, SUS316L-clad 鋼板と SUS329J3L ソリッド鋼板との荷重非伝達型完全溶け込み十字溶接継手の $K_t \cdot \sigma_R$ - N_f 線図は, 溶接のままの継手も, 止端部 TIG アークによるドレッシング処理継手も同じ線図 [Eq.(5)] となった。

$$K_t \cdot \sigma_R = 5.90 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210} \dots \dots \dots (5)$$

なお, Eq.(5)は, 先に述べた Eq.(3)と同一式になった。

また, 溶接のままの継手の K_t 値の平均値は 1.9 であり, 2×10^6 回疲労強度(σ_R)は約 150N/mm²となった。また, 止端部 TIG アークによるドレッシング処理継手の K_t 値の平均値は 1.5 であり, 2×10^6 回疲労強度(σ_R)は約 190N/mm²となった。

なお, 疲労試験後の破断面と破断位置の代表例を, Fig.15 および Fig.16 に示す。

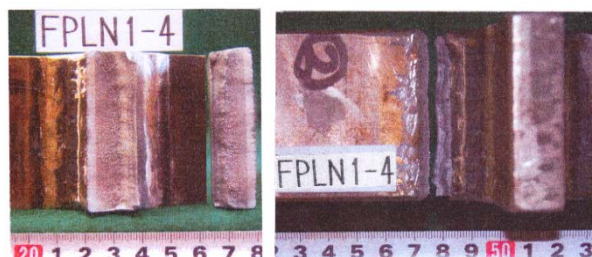


Fig.15 Fracture surface and pass after fatigue test
 (SUS316L-clad : Non load-carrying, As-welded)
 (FPLN1-4 : 250N/mm², 1.66×10⁵ cycles)



Fig.16 Fracture surface and pass after fatigue test
 (SUS316L-clad : Non load-carrying, TIG arc)
 (FPLN3-2 : 200N/mm², 1.09×10⁶ cycles)

5. 完全溶け込み十字溶接継手の応力集中係数を考慮した疲労強度

荷重伝達型・荷重非伝達型完全溶け込み十字溶接継手の疲労試験結果の, K_t 値を考慮して応力範囲(σ_R)を補正した, $K_t \cdot \sigma_R$ - N_f 線図をまとめると, 以下ようになる。

① SUS329J3L-clad 鋼板と SUS329J3L ソリッド鋼板との組み合わせによる荷重伝達型完全溶け込み十字溶接継手 [Eq.(2)で示した]

$$K_t \cdot \sigma_R = 7.13 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210}$$

- ② SUS329J3L-clad 鋼板と SUS329J3L ソリッド鋼板との組み合わせによる荷重非伝達型完全溶け込み十字溶接継手 [Eq.(4)で示した]

$$K_t \cdot \sigma_R = 6.30 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210}$$

- ③ SUS316L-clad 鋼板と SUS329J3 ソリッド鋼板との組み合わせによる荷重伝達型・荷重非伝達型完全溶け込み十字溶接継手 [Eq.(3), (5)で示した]

$$K_t \cdot \sigma_R = 5.90 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210}$$

以上を図に表示したものが、Fig.17 である。Fig.17 では、上述の 3 種類の $K_t \cdot \sigma_R - N_f$ 線図で、 2×10^6 回疲労強度 ($K_t \cdot \sigma_R$) は、約 340、約 300、約 280 N/mm^2 となっている。

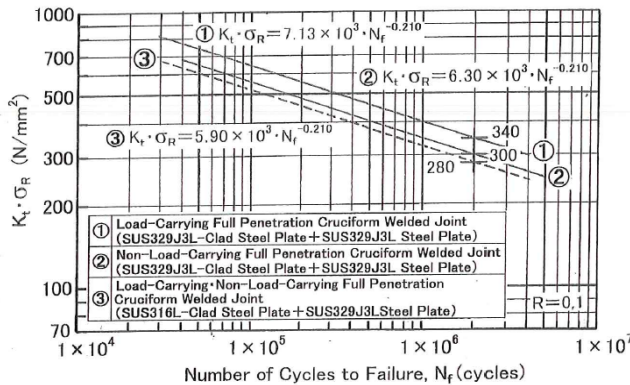


Fig.17 Fatigue strength of full penetration cruciform welded joints

6. 応力集中係数と 2×10^6 回疲労強度との関係

SUS329J3L-clad 鋼板と SUS329J3L ソリッド鋼板との組み合わせ、および SUS316L-clad 鋼板と SUS329J3L ソリッド鋼板との組み合わせによる、荷重伝達型・荷重非伝達型完全溶け込み十字溶接継手疲労強度の、 K_t 値と 2×10^6 回疲労強度 (σ_R) との関係を示す。

Table 5 Relation between stress concentration factor and fatigue strength at 2×10^6 cycles

Specimen Type		K_t	Fatigue Strength at 2×10^6 cycles (N/mm^2)	
Load-Carrying Full Penetration Cruciform Welded Joint	SUS329J3L-Clad + SUS329J3L As-Welded	2.4	110	
	SUS316L-Clad + SUS329J3L	As-Welded	1.4	200
		Dressing by Grinding	1.2	250
		Dressing by TIG Arc	1.3	230
Non-Load-Carrying Full Penetration Cruciform Welded Joint	SUS329J3L-Clad + SUS329J3L As-Welded	2.9	85	
	SUS316L-Clad + SUS329J3L	Dressing by Grinding	2.2	120
		As-Welded	1.9	150
		Dressing by TIG Arc	1.5	190

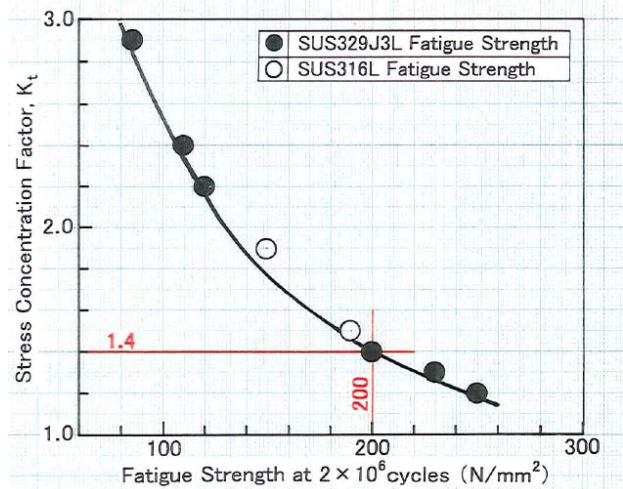


Fig.18 Relation between K_t and fatigue strength at 2×10^6 cycles

Fig.18 から明らかなように、SUS329J3L 鋼板溶接止端部の疲労強度と、SUS316L 鋼板溶接止端部の疲労強度とに有意差はない。

また、 2×10^6 回疲労強度 (σ_R) が $200 N/mm^2$ を満足する溶接止端部 K_t 値の限界値は、約 1.4 であることが明らかである。

7. まとめ

SUS329J3L-clad 鋼板と SUS329J3L ソリッド鋼板との組み合わせ、および SUS316L-clad 鋼板と SUS329J3L ソリッド鋼板との組み合わせによる、荷重伝達型・荷重非伝達型完全溶け込み十字溶接継手の疲労強度を、 $\sigma_R - N_f$ 線図と $K_t \cdot \sigma_R - N_f$ 線図で示した。また、継手止端部の K_t 値と 2×10^6 回疲労強度 (σ_R) との関係把握した。

SUS329J3L-clad 鋼板と SUS329J3L ソリッド鋼板との組み合わせによる完全溶け込み十字溶接継手の $K_t \cdot \sigma_R - N_f$ 線図は、

荷重伝達型 [Eq.(2)]

$$K_t \cdot \sigma_R = 7.13 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210}$$

荷重非伝達型 [Eq.(4)]

$$K_t \cdot \sigma_R = 6.30 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210}$$

となった。さらに、SUS316L-clad 鋼板と SUS329J3L ソリッド鋼板との組み合わせによる完全溶け込み十字溶接継手の $K_t \cdot \sigma_R - N_f$ 線図は、

荷重伝達型・荷重非伝達型 [Eq.(3),(5)]

$$K_t \cdot \sigma_R = 5.90 \times 10^3 \cdot N_f^{-0.210}$$

となった。

また、継手止端部の K_t 値と 2×10^6 回疲労強度(σ_R)との関係(Fig.18)からも明らかであるが、SUS329J3L 鋼板溶接継手止端部の疲労強度と、SUS316L 鋼板溶接継手止端部の疲労強度とに有意差は無いと言える。

二相ステンレス鋼板溶接継手止端部の疲労強度が、長年、ケミカルタンカーに使用されてきたオーステナイト系ステンレス鋼板溶接継手止端部の疲労強度と有意差が無いということは、二相ステンレス鋼板をケミカルタンカーに使用して、疲労強度上何ら問題無いと言える。

参考文献

- 1) 矢島浩, 座間正人, 平田隆明, 斉藤正洋, 末岡英利, 森俊哲, 梶田剛: “船舶に使用されるステンレス鋼・ステンレスクラッド鋼の疲労強度に関する考察”, 西部造船会会報, 第75号, pp.224-230 (1988).
- 2) 緒方洋典, 堺田和昌, 篠崎賢二, 山本元道, 谷野忠和, 福井努, 矢島浩: “二相ステンレス鋼板・オーステナイト系ステンレスクラッド鋼板溶接継手部の疲労強度に関する一考察”, 圧力技術, 第55巻, 第3号, pp.112-120 (2017).
- 3) 緒方洋典: “二相ステンレスクラッド鋼板・ソリッド鋼板を用いたケミカルタンカー建造に関する基礎研究”, 広島大学 博士学位論文, (2018).
- 4) Ogata, H., Sakaida, K., Haruyama, Y., Fukai, H., Kuronuma, Y., Katsuta, J., Okada, K., Yajima, H., Ando, T. and Fukui, T.: “Fundamental Study on the Construction of Chemical Tankers Utilizing Duplex Stainless Clad Steel Plates”, ClassNK Technical Review, No.322, pp.151-170 (2018).
- 5) Iida, K., Kho, Y., Fukakura, J., Nihei, M., Iwadate, T. and Nagai, H.: “Bending Fatigue Strength of Butt Welded Plate with Uranami Bead”, IIW Doc. No. X III-1202-86 (1986).
- 6) 西田正孝: “応力集中”, 森北出版 株式会社 (増補版 第1刷), pp.47-54, pp.648-653 (1973).
- 7) 本田尚, 佐々木哲也, 山口篤志, 吉久悦二: “赤外線法による溶接継手止端部の応力集中係数評価”, 日本機械学会論文集 (A編), 73巻, 732号, pp.837-843 (2007).
- 8) 辻 勇: “非荷重伝達型すみ肉溶接継手の止端部の応力集中係数の推定式”, 西部造船会会報, 第80号, pp.241-251 (1990).
- 9) Kumagai, K. and Shimada, H.: “The Stress Concentration Factor Produced by a Projection Under Tensile Load”, Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.11, No.47, pp.739-745 (1968).