

ケミカルタンカー用 SUS316L 母材 および溶接継手の疲労強度

環境・エネルギー研究領域 * 松岡 一祥、岩田 知明、小林 佑規

1. はじめに

ケミカルタンカーは、20 ～ 30 の貨物タンクを有し、コルゲート隔壁により区画されている。これらのタンクは、材質がステンレス製であり、SUS304 からより高品質で高価な SUS316L へと変わりつつある。しかしながら、これら隔壁の溶接継手部には、しばしばクラックが発生している。クラックは、積荷、溶接施工、タンク清浄などの環境因子の他、疲労損傷によるものであり、コルゲート隔壁の合理的な設計・工作手法の整備が望まれている。

本研究は、SUS316L を供試材とし、母材、突合せ継手および十字継手の大気中における疲労強度について報告する。突合せ継手は、異なる板厚の継手に対し 3 種類の溶接施工を行った。十字継手は、溶接方法および仕上げ方法の異なる試験片を製作した。疲労試験結果から、最適溶接継手の選定、母材と溶接継手の強度比較、IIW の設計基準との比較等について検討した。

2. 供試材および試験片

2. 1 供試材

供試材は、板厚が 17mm (A) および 20mm (B) の SUS316L である。化学成分および機械的性質を、ミルシートから表 1 および表 2 に示す。

表 1 供試材の化学成分 (mass%, balance: Fe)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N
A	0.14	0.47	0.85	0.019	0.001	11.06	17.53	2.82	0.144
B	0.17	0.43	0.76	0.022	-	11.06	17.79	2.93	0.156

表 2 供試材の機械的性質

	Plate thickness mm	0.2% proof stress S _{0.2} / MPa	Ultimate tensile stress S _u / MPa	Elongation %
A	17	330	628	57
B	20	341	642	50

2. 2 疲労試験片

疲労試験片は、表 3 に示すように、母材、突合せ溶接継手材および十字横継手溶接材から成る。いずれの試験片も、荷重伝達方向を圧延方向に一致させ、鋸盤により採取した。試験片の仕上げでは、表面は供試材のままであるが、機械加工部はエメリー紙 800 # 以上の手仕上げとした。なお、溶接は、ケミカルタンカー建造の溶接とほぼ同等に造船所において行われた。すなわち、1.2mm の CO₂ フラックス入りワイヤーを用いた MAG 溶接である。

表 3 疲労試験片の種類

疲労試験片の種類	仕 様
母材	平板 t=17
	平板 t=20
突合せ継手	K形中央継手 20tと17tの継手
	K形偏芯継手 20tと17tの継手
	レ形偏芯継手 20tと17tの継手
十字横継手	完全溶け込み、開先あり、溶接のまま
	完全溶け込み、開先あり、グラインダー仕上げ
	不完全溶け込み、開先なし(メタルタッチ)

(1) 母材疲労試験片

母材疲労試験片の寸法を図 1 に示す。板厚は 17mm と 20mm である。

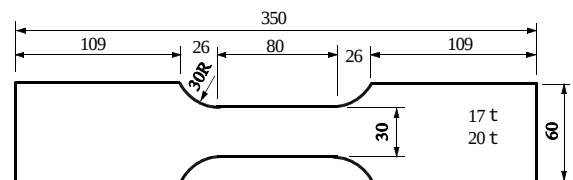


図 1 母材疲労試験片

(2) 突合せ溶接継手試験片

突合せ継手は、20mm と 17mm の異なる板厚を接合し、K 形中央継手、K 形偏芯継手、レ形偏芯継手の 3 種類の試験片を製作した。開先は K 形とレ形の 2 種類である。

試験片の形状を図 2 に、開先および継手の形状を図 3 に、継手のマクロ写真を図 4 に示す。K 形中央継手は、板厚の厚さ中心線を一致させて溶接した。K 形およびレ形偏芯継手は、板厚の片面が平面となるよう溶接した。したがって、一平面の継手には 3mm の段差が生じている。開先寸法は、ケミカルタンカーに使用されている通常の寸法である。

溶接は、K 形中央と K 形偏芯継手が上下とも 4 層ずつ行い、入熱量の総計は前者が 118.4kJ/cm、後者が 93.4kJ/cm であった。レ形偏芯継手は、9 層と 1 層の溶接で、入熱量の総計が 123.3kJ/cm であった。

図 4 の K 形中央継手および K 形偏芯継手には、板厚中央部に溶け込み不完全部が見られる。

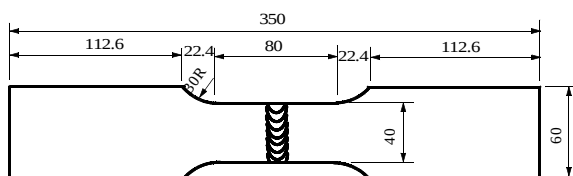
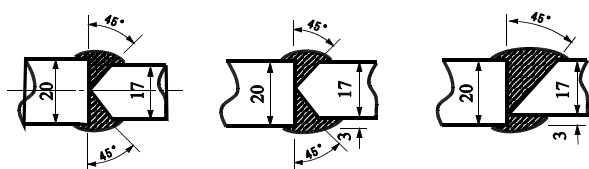
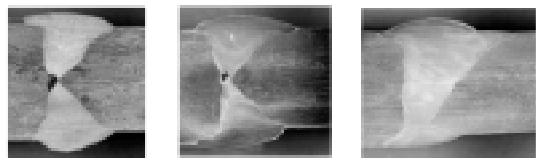


図 2 突合せ溶接継手試験片の形状



(a)K 形中央継手(b)K 形偏芯継手(c)レ形偏芯継手

図 3 継手形状および開先寸法



(a)K 形中央継手(b)K 形偏芯継手(c)レ形偏芯継手

図 4 継手部のマクロ写真

(3) 十字横継手溶接試験片

十字横継手溶接試験片は、軸方向の荷重伝達板および付加物とも同板厚 20mm の供試材を用いた。試験片の溶接継手には次の 3 種類がある。

(a)開先付で溶接したままのもの(以下「溶接のまま」という)(b)開先付で溶接した後、グラインダー仕上げしたもの(以下「G 仕上げ」という)(c)開先なしで溶接したままのもの(以下「メタルタッチ」という)

これら試験片の形状を図 5 に、開先形状を図 6 に示す。図 7 は、残留応力を計測する際に切り出した溶接継手部のマクロ写真であり、横方向が荷重伝達方向、縦方向が付加物である。

溶接のままと G 仕上げの溶接は、それぞれの隅肉に対して 4 層行い、入熱量の総計は両者とも 82.4kJ/cm であった。メタルタッチは、3 層の溶接で、入熱量の総計は 61.6kJ/cm であった。

付加物に沿った脚長は、全試験片の平均値として、溶接のまま、G 仕上げ、メタルタッチが、それぞれ 10.4、8.9、9.3mm であった。

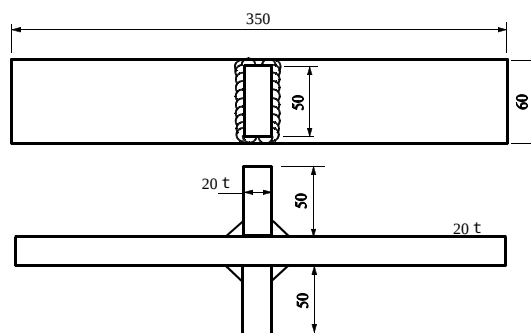
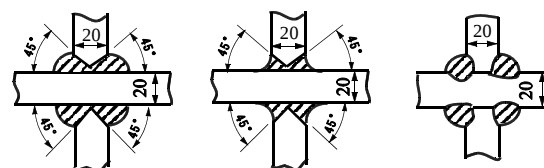
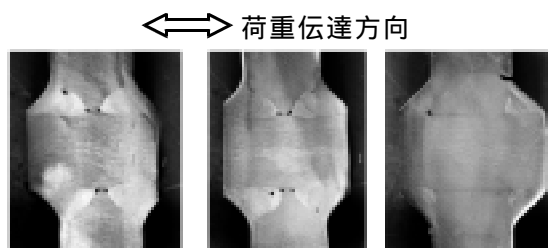


図 5 十字横継手溶接試験片の形状



(a)溶接のまま (b)G 仕上げ(c)メタルタッチ

図 6 十字横継手の開先形状



(a)溶接のまま (b)G 仕上げ(c)メタルタッチ

図 7 十字横継手のマクロ写真

3．試験方法

疲労試験は、デジタル制御方式の油圧サーボ疲労試験機を用いた。試験機の最大容量は、1000kN および 300kN である。負荷方式は応力比 $R=0.1$ とする荷重制御であり、室温の大気中試験である。繰返し速度は、2 ～ 20Hz とした。

4．試験結果および考察

4.1 母材および突合せ継手の疲労強度

破断繰返し数を寿命 N ，負荷応力範囲を ΔS とし、母材および突合せ溶接継手の両対数表示の S-N 線図を図 8 に示す。

母材は、板厚が 20mm と 17mm であり、両者の 0.2 % 耐力および引張強度はやや異なるが、疲労試験結果にはそれらの相違がほとんど見られない。疲労き裂の発生は、試験片平行部のコーナー部または切削面の表面傷である。S-N 線図は、 2×10^6 で折れ曲がり、 1×10^7 を疲れ限度 ΔS_f とすれば、 ΔS_f は 260MPa と推定される。

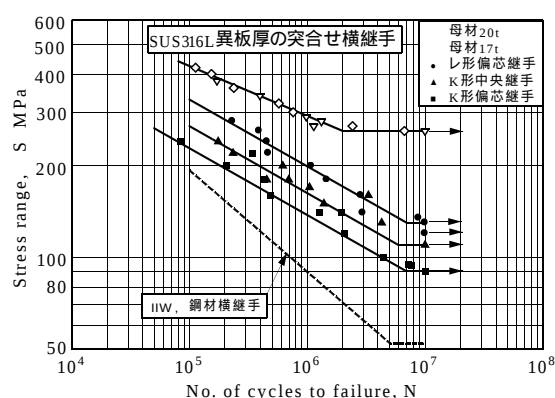


図 8 母材および突合せ継手の S-N 線図

突合せ溶接継手の S-N 線図は、3 種類の継手に対して傾斜をほぼ等しくすることができる。データのばらつきも比較的小さい。疲労強度は、レ形偏芯継手が高くて、次いで K 形中央継手、K 形偏芯継手となっている。疲れ限度もこれらの順に低下している。S-N 線図の折れ曲がり点は 6×10^6 ないし 7×10^6 にある。

き裂の発生点について観察した。K 形偏芯継手の疲労き裂は、図 9 のように、板厚 17mm の段差継手止端から発生する場合が多く、発生し

たき裂は母材を進展する。また、き裂が内部の未溶着箇所から発生した場合（図 10）は、板厚 20mm と溶接金属の界面に沿ってき裂が進展している。

K 形中央継手のき裂は、板厚 17mm の止端から発生することが多く観察されるが、板厚中央の未溶着部からのき裂発生も見られる。

レ形偏芯継手の疲労き裂発生点の例を図 11 に示す。(a)は平面継手側の板厚 20mm 止端に発生したき裂が母材を進展している。(b)は内部の未溶着箇所からき裂が発生し、板厚 20mm の接合界面に沿って進展している。

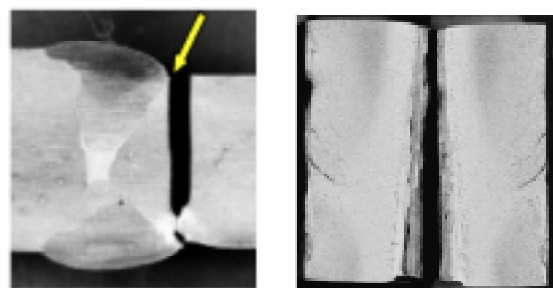
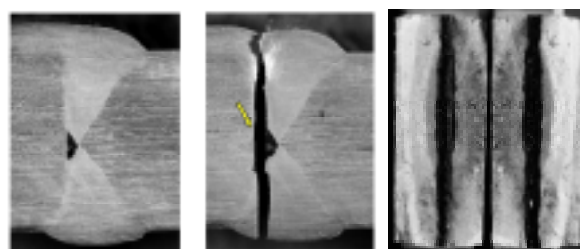
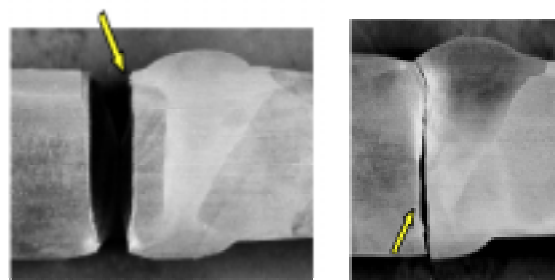


図 9 K 形偏芯継手の段差継手止端から発生した疲労き裂と破面



(a)試験前 (b)接合部を進展 (c)破面

図 10 K 形偏芯継手の内部未溶着部から発生した疲労き裂



(a)止端 (b)未溶着部

図 11 レ形偏芯継手の疲労き裂発生点

以上、突合せ溶接継手のき裂発生は、次のようにまとめられる。すなわち、疲労き裂は表面のビード止端と内部の未溶着金属のどちらからも発生する。き裂が、溶接止端から発生する場合は比較的負荷応力が高いときであり、溶接内部の欠陥から発生する場合は比較的負荷応力が低いときである。また、き裂は、母材を容易に進展するが、溶接金属を進展することはまれである。内部欠陥から発生するき裂は、母材と溶接金属の接合界面を進展することが多い。

疲労強度は、前述のように、レ形偏芯継手、K形中央継手、K形偏芯継手の順に優れている。これら継手の止端の形状に大きな違いはないとすれば、強度の違いは偏芯負荷と溶接条件に起因する。溶接条件からは、疲労強度は入熱量の大きさと一致する。しかし、K形中央継手とK形偏芯継手には、板厚中心部に大きな空洞が見られることから、溶け込みの不十分なことが、疲労強度の低下をもたらしているものと考えられる。また、K形中央継手がK形偏芯継手より疲労強度が高いの、荷重の偏芯負荷が一因である。レ形偏芯継手の疲労強度がK形中央継手のそれより高いのは、荷重の負荷に対する偏芯の影響より未溶接部の存在が大きく疲労強度に影響したものと考えられる。

S-N 線図について、図 8 に IIW の鋼材横継手の疲労設計線図を破線で示した。本供試材の SUS316L の突合せ継手は、IIW の線図を下回る実験点は一つもなかった。なお、IIW の線図は、異なる板厚の突合せ継手の場合、傾斜を 3 とし、 $N=2 \times 10^6$ において $\Delta S=71\text{MPa}$ としている。さらに、S-N 線図は $N=5 \times 10^6$ で水平としているので、 5×10^6 の応力範囲は $\Delta S=52.3\text{MPa}$ となる。

4. 2 十字横継手の疲労強度

十字横継手の S-N 線図を図 12 に示す。S-N 線図の傾斜部は、次のように決めた。メタルタッチ隅肉溶接（開先なし、溶接のまま）の疲労強度は最も低い、傾斜部のばらつきは少ない。溶接のままだ、大きなばらつきが見られるので S-N 線図の傾斜をやや安全側に見積もり、メタルタッチ溶接と同様であるとした。グラインダ

ー仕上げ（G 仕上げ）の寿命は、溶接のままより伸びている実験点もあるが、溶接のままとほとんど変わらないと見られる。止端の G 仕上げがスムーズであれば、データのばらつきは少なくなり、疲労強度がさらに向上すると考えられる。

次に、疲れ限度 ΔS_f について述べる。 1×10^7 の繰返しでも破断しない応力範囲を疲れ限度とする。3 種類の試験片に対して明らかに疲れ限度は異なる。メタルタッチには、 1×10^7 の実験点はないので、S-N 線図を延長した点とする。疲れ限度は、G 仕上げが最も大きく、次いで溶接のままのもの、メタルタッチの順となる。これらの ΔS_f は、それぞれ 120MPa、100MPa、70MPa である。

また、図 12 には IIW の鋼材の S-N 線図を破線で示した。S-N 線図は、傾斜を 3 とし、 $N=2 \times 10^6$ において G 仕上げが 100MPa、溶接のままだが 80MPa である。折れ曲がり点の 5×10^6 では、73.7MPa および 58.9MPa となる。SUS316L の傾斜部は、ほぼ IIW の鋼材の G 仕上げに近い値であり、溶接のままの S-N 線図を下回ってはいない。さらに疲れ限度では、SUS316L が鋼材より優れている。

十字隅肉横継手について、疲労亀裂の発生点と破面を図 13 に示す。いずれの試験片も応力範囲が 120MPa である。き裂は、溶接止端に発生し、荷重負荷方向と垂直に母材を進展している。

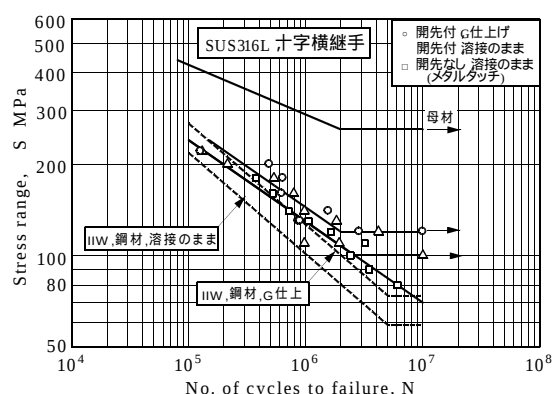
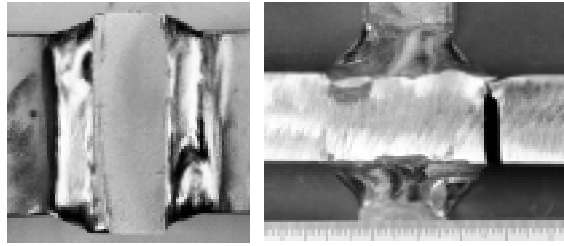
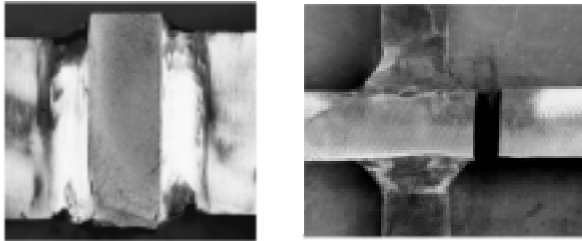


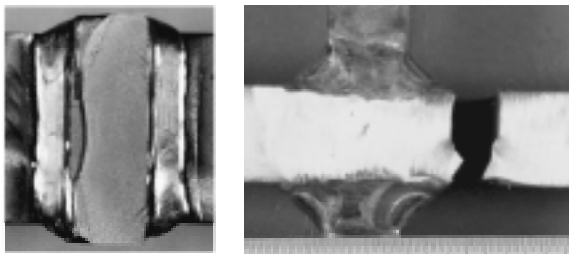
図 12 十字横隅肉溶接継手の S-N 線図



(a)溶接のまま



(b)G 仕上げ



(c)メタルタッチ

図 13 十字横継手の破面とき裂進展

4.3 隅肉溶接部の残留応力

疲労き裂の発生寿命には、残留応力が大きな影響を及ぼす。以下、残留応力の測定結果から疲労寿命との関係を検討する。

残留応力は、応力集中歪ゲージおよび短軸歪ゲージを試験片の表裏に接着（図 14）し、止端部を切断する分割法により試験片の長手方向と止端幅方向を測定した。

試験片長手方向の残留応力分布について、一例として溶接のままと図 15 に示す。溶接残留応力は、歪の測定値にヤング率 193GPa を乗じて計算したものを白抜きでプロットし、近似曲線を実線で示す。長手方向の残留応力は、止端から 30mm でほとんどゼロとなる。黒丸●は、試験片中央の止端から距離 3mm の位置において平面応力状態として計算した残留応力であり、長手方向 S_{rx} および幅（ビード）方向 S_{ry} の値を表 4 に示す。

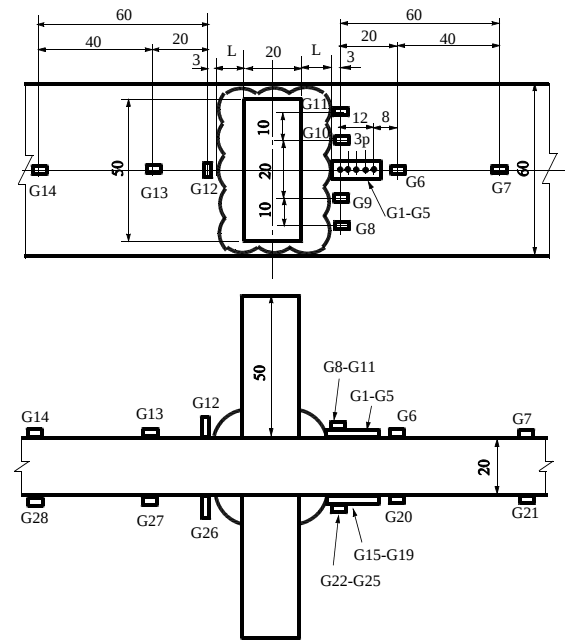
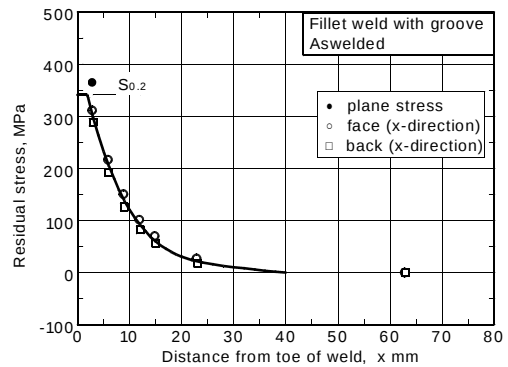
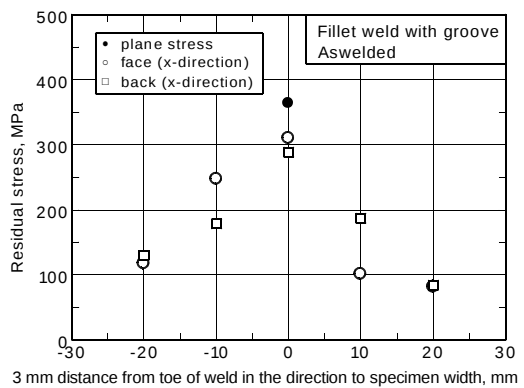


図 14 残留応力測定歪ゲージの配置



(a)試験片長手方向の残留応力



(b)溶接止端幅（ビード）方向の残留応力

図 15 十字隅肉溶接（溶接のまま）の残留応力

表 4 試験片中央止端から 3mm の残留応力

	平面応力状態	
	試験片長手方向 S _{rx}	試験片幅方向 S _{ry}
	MPa	
溶接のまま	363.2	213.3
G 仕上げ	294.4	129.7
メタルタッチ	266.5	39.1

上記の残留応力の分布から、疲労き裂は試験片中央の溶接止端に発生したと推定され、その様相が図 13 の破面から観察できる。き裂の発生には残留応力が影響するが、本試験結果では、溶接溶け込みが大きく影響していると見られる。溶接した段階では、止端の応力集中係数はほぼ同じと見られるので、G 仕上げの寿命の伸びは止端の応力集中の緩和にある。溶接のままの状態では、開先付の寿命がメタルタッチの寿命より延びたところにばらついており、これはメタルタッチの溶接が十分でないためと考えられる。

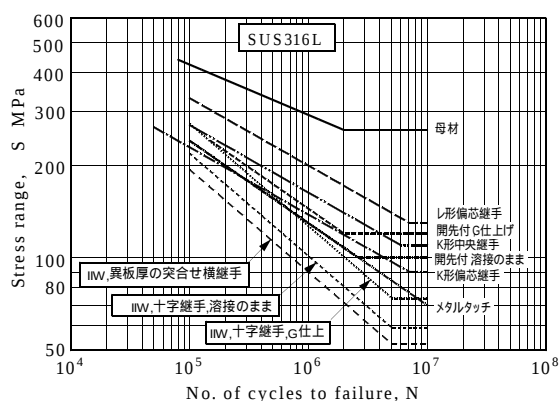


図 16 S-N 線図のまとめ

5. まとめ

SUS316L の母材および溶接継手の疲労試験を行い、き裂の発生点などの破面観察、十字横継手試験片の残留応力から以下をまとめとする。

(1) S-N 線図

試験結果および IIW の鋼材の設計線図を合わせた S-N 線図を図 16 に示す。

S-N 線図の傾斜は、母材、突合せ溶接継手、十字隅肉横継手の順に大きく、IIW の設計線図は SUS316L 材よりさらに大きい。突合せ継手は、傾斜が等しい。その疲労強度は、レ形偏芯継手が最も大きく、次いで K 形中央継手、K 形偏芯

継手である。十字横継手の傾斜は、突合せ継手よりやや大きい程度である。

疲れ限度 (1×10^7) は、母材が 206MPa であった。突合せ継手の疲れ限度は、傾斜部の強度と同様に、レ形偏芯継手 (130MPa) が最も優れており、次いで K 形中央継手 (110MPa)、K 形偏芯継手 (90MPa) の順である。十字横継手の疲れ限度は、開先付溶接のグラインダー仕上げが最も大きく、次いで溶接のまま、メタルタッチである。なお、メタルタッチの疲労強度が低いのは、隅肉溶接層数が開先付溶接より 1 層少なく、溶け込み不足と見られる不完全溶接が一因でる。また、SUS316L の突合せおよび十字隅肉溶接横継手の疲れ限度は、IIW の鋼材設計値より大きい。

(2) 疲労き裂の発生

母材の疲労き裂は、試験片平行部のコーナーまたは平行部の表面加工傷から発生した。突合せ継手の疲労き裂は、溶接止端および内部未溶接部の欠陥から発生した。偏芯継手の表面止端には、異なる板厚を接合しているので平面継手止端と段差継手止端が存在するが、疲労き裂の発生はこれらどちらかに限定されることはない。一旦発生した疲労き裂は、母材を進展して破断に至る。内部からき裂が発生した場合は、き裂が板厚 20mm の溶接界面を進展する場合が多い。十字横継手の疲労き裂は、試験片中央 (板幅方向中央) の残留応力が最も大きいため、試験片中央の止端に発生し、母材を進展する。

(3) 溶接残留応力

十字横継手試験片において、板中央の止端から試験片長手方向の残留応力分布は、四次曲線で近似できる。平面応力状態とした試験片中央の止端から 3mm の残留応力は、0.2 % 耐力を超えているか、または 0.2 % 耐力に近い値である。溶接残留応力は、板の中央が最も大きい。

謝 辞

本研究は、(株)エイゼットからの受託研究「SUS316L 溶接継手の疲労強度の検討」として行われたものである。突合せ継手および十字継手試験片の溶接は、受託先の造船所にて実施して頂いた。ここに記して謝意を表します。