

討22 鋼材の腐食疲労強度向上に関する問題点

新日本製鐵(株)製品技術研究所 石黒隆義 ○轟 理市
関口 進

1. 緒言

エネルギー源確保のための海底油田掘削は今後ますます未開拓の大水深部へ移行し、それに伴って海洋構造物は大型化してフレキシブルな構造をとるようになるので、安全性と経済性のバランスした設計がより一層要求される。海水腐食環境下であって波浪や強風にさらされている海洋構造物には防食対策とともに腐食疲労防止対策が必要なことはいうまでもないが、大気中での疲労強度向上法を腐食疲労の場合にも適用するためには環境脆化の問題を考慮しなければならない。したがって、防食対策としての鋼材の耐食性向上や塗装電気防食が腐食疲労に与える影響、および溶接継手の形状改善や過大荷重付加の効果を海水環境下で検討する必要がある。

2. 鋼材の材質について

大気中では鋼材の疲労強度は引張強さに比例して増大するが、腐食環境下では低くり返し速度で高サイクル領域になるほど鋼種の差がみられなくなる。本研究では表1に示す40~130 kg/mm²の強度の鋼種について図1に示す形状の試験片に加工し、図2に示す試験装置を用いてS-N_f曲線を測定した。応力は片振引張で10cpmのくり返し速度で付加し、試験片を装着した腐食セルに30°Cに保持したASTM規定人工海水を0.5 L/minの流速で循環させて試験した。

各鋼種について得られたS-N_f曲線からN_f=5×10⁵での疲労強度をとり、各鋼のσ_Bとの関係を大気中の場合とも比較して図3に示した。平滑材の場合、大気中では疲労強度はσ_Bに大きく依存しているが、海水中ではほとんど関係しなくなる。切欠材では大気中でもσ_Bの影響が小さくなるが増大する傾向はみられ、海水中ではまったく影響がなくなる。

また、耐食性を向上させるためにCrを添加した低合金鋼について平滑材のS-N_f曲線を海水中で測定し、N_f=2×10⁶での疲労強度をとり、Cr含有量との関係をみると図4のようになる。このようにCr量4%以下では腐食量に差があっても孔食発生期間に差がないために腐食疲労強度は同程度

となり、Crが8%程度まで含有されると孔食発生期間が延びて腐食疲労強度が上昇するものと考えられる。

以上のように、海水中での腐食疲労強度向上には、通常の構造用鋼に関しては鋼の引張強さや耐食性の寄与はほとんどみられず、切欠などの応力集中の程度にもつぱら左右されるとみられる。

表1 供試材の化学成分と機械的性質

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Others	Others	Y.P. (kg/mm ²)	T.S. (kg/mm ²)	Hv (10kg)
SM41	0.19	0.04	1.01	0.012	0.011	—	—			29.1	47.3	132
SM50	0.14	0.33	1.30	0.018	0.009	—	—			35.6	54.2	148
HT60	0.14	0.26	1.21	0.018	0.007	0.16	—	V	0.04	70.2	72.4	236
HT70	0.30	0.25	1.80	0.025	0.020	—	—			53.7	73.5	247
HT80	0.12	0.26	0.82	0.015	0.007	0.47	0.95	Cu	Mo	83.0	88.0	270
								0.25	0.44			
HT100	0.21	0.26	1.56	0.021	0.015	0.99	0.75		Mo	101.0	107.8	336
									0.45			
HT130	0.12	0.17	0.19	0.006	0.002	1.92	9.72	Co	Mo	130.8	138.1	440
								8.40	0.85			

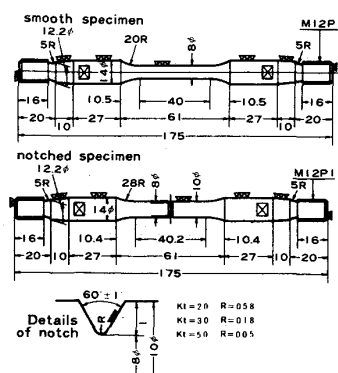


図1 試験片の形状

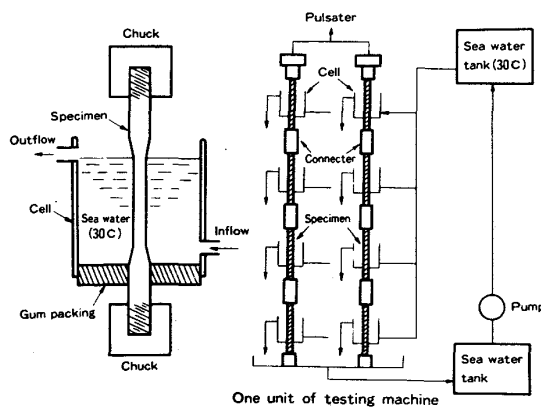


図2 試験装置の模式図

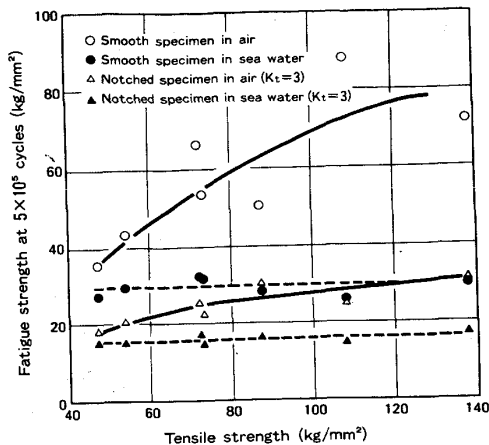


図3 鋼の引張強さと大気中および海水中での疲労強度との関係

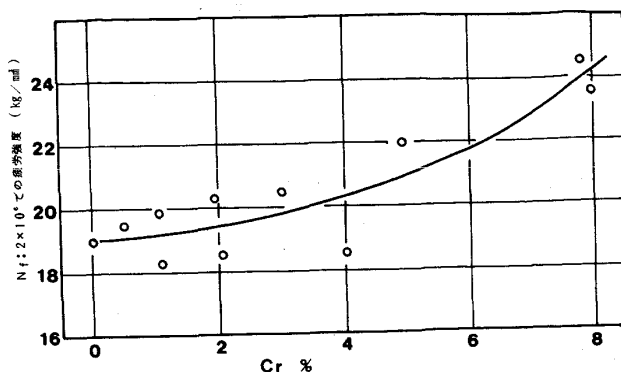


図4 耐食鋼のCr含有量と海水中での腐食疲労強度(N_f = 2 × 10⁶)との関係

3. 溶接継手止端部形状改善について

構造物の疲労強度は溶接継手の止端部形状に大きく影響されるので、グラインダー研削処理のほか、TIG処理、化粧溶接、プラズマ溶接などで止端部の曲率半径と角度を大きくして応力集中を軽減する方が構じられている。大気中での疲労強度向上にはこれらの効果が明らかにされているが、腐食疲労強度については環境脆化の面から懸念されるので、リブ十字隅肉溶接継手試験片を用いて海水中での効果について検討した。供試鋼にはSM41とHT80を用い、図5に示すように14mm板厚のものに隅肉溶接を施し、TIG処理と化粧溶接を同図に示す条件で行った。試験片形状も同図に示したが、試験片側面の研削部からのき裂発生を防ぐために防食塗装を施し図2と同じ機構の大型試験機にとりつけて試験した。人工海水(30℃)は3L/minの流速で循環させ、応力くり返し速度は10cpmとした。

SM41についてのS-N_f曲線を大気中の場合と比較して図6に示した。大気中では溶接のままの疲労強度は当然ながら母材よりも著しく低下するが、止端部形状改善によって母材の強度近くに回復する。この場合、化粧溶接はTIG処理よりも効果が小さく、N_f = 2 × 10⁶での疲労強度で比較すると、TIG処理の27 kg/mm²に対して24 kg/mm²となる。一方、海水中では両処理とも同程度に母材の強度にまで回復している。したがって、これらの処理によって熱影響部の硬さが上昇しているにもかかわらず、母材の腐食疲労強度と同程度になることから、硬さ上昇の悪影響は認められないといえる。

硬さの上昇が著しいHT80について同様に試験した結果を図7に示したが、SM41の場合と同じように大気中ではTIG処理と化粧溶接に差がみられるが、海水中ではどちらも同程度に母材の強度にまで近づいている。したがって、この程度の硬さ上昇は海水中で使用する際疲労強度について問題とならないので、海洋構造物に通常の構造用鋼を用いて溶接継手の止端部形状をこれらの処理によって改善することは腐食疲労強度向上に極めて有効な方法である。

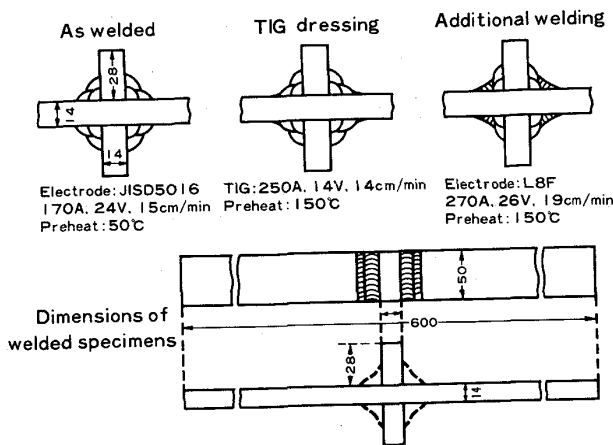


図5 溶接継手止端部処理条件および形状

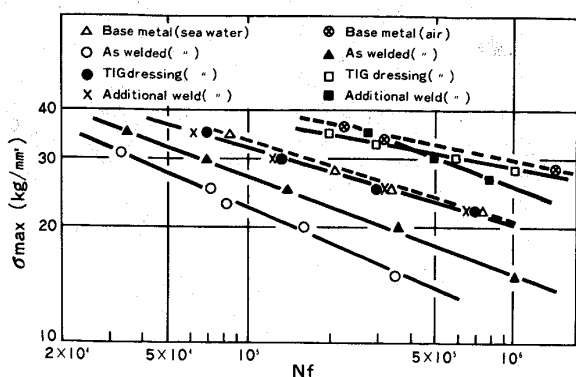


図6 SM41鋼溶接継手のS-N_f曲線

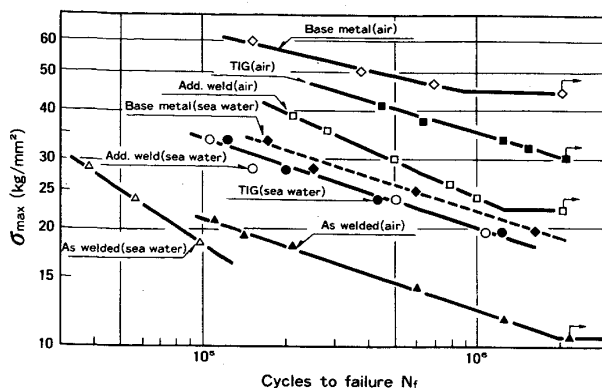


図7 HT80鋼溶接継手のS-N_f曲線

4. 電気防食について

海洋構造物には水中部の防食対策として電気防食を施すのが一般的であり、その結果腐食が抑制されて腐食疲労強度も向上すると考えられるが、一方、カソード反応で水素が鋼中に侵入し易くなり、とくに高張力鋼の場合は脆化が起って疲労強度がかえって低下することがある。本研究では腐食疲労強度向上のための適正条件を把握するために、SM41、SM50およびHT80を供試鋼に用い、図1に示した形状の試験片により白金対極と参照電極(SCE)を装着した腐食セルで定電位に保持して試験した。防食電位はポテンシオスタットにより-0.8~-1.4V(SCE)に保持し、その他の試験条件は先述と同じである。また、溶接熱影響部の硬化に対する電気防食の影響を検討するために、SM50の切欠材(K_t=3)を用い、800℃から500℃までの冷却時間を12秒および18秒としたものについて同様に試験した。

平滑材の場合は-1.4Vまでのどの防食電位でも疲労寿命が著しく延びるが、切欠がつくと高荷重となるほど電位が卑となるほど疲労寿命が低下する。K_t=3の切欠材について3鋼種の腐食疲労寿命と防食電位の関係を図8に示したが、適正な防食電位は-0.8~-1.0Vであることがわかる。溶接熱影響部を再現したSM50の切欠材について防食電位の影響をみたS-N_f曲線を図9に示したが、-1.2Vの過防食の場合でも無防食のものより長寿命側にあり、水素脆化の悪影響はみられなかった。

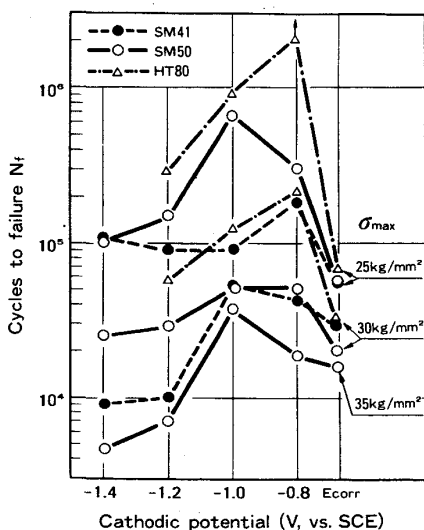


図8 3鋼種の腐食疲労寿命と防食電位の関係(K_t=3)

腐食疲労破断面の観察例としてHT80の $\sigma_{max} = 30\text{kg/mm}^2$ で無防食-0.8V保持および-1.2V保持したものについて写真1と2に示した。無防食の場合は粒界部分が比較的多いが、電気防食を施すと粒内破面が多くなり、-0.8Vではストライエーションも明確となって大気中の

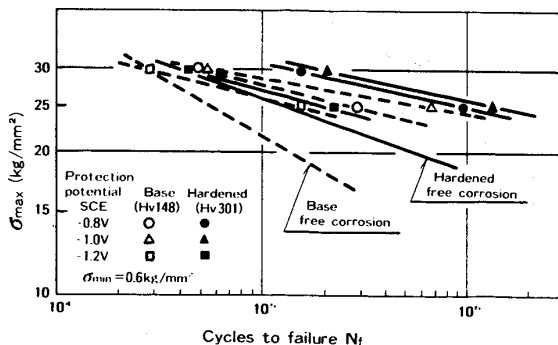


図9 SM50鋼硬化材のS-N_f曲線
におよぼす防食電位の影響

の疲労破面に似た様子を示す。しかし、-1.2Vではストライエーションも一部認められるが脆性を呈し、水素脆化の影響が大きくなっている。

海水の場合カソード析出物の被覆が水素侵入を妨げることもあり、結局、海洋

構造物については電気防食は腐食疲労強度向上に有効な手段であるといえる。

5. 過大荷重について

海洋構造物は暴風や地震などによる異常過大荷重を受けることがあるが、大気中では一時的な過大荷重が加工硬化や圧縮残留応力付与で疲労強度をかえって向上させることが知られている。海水中でもこのような効果が得られるかどうかを検討するために、

SM41切欠付 ($K_t=3$) 試験片を用いて過大荷重 40kg/mm^2 を1~20回付加したのち $\sigma_{\text{max}} = 20, 25, 30\text{kg/mm}^2$ で片振引張試験をした。また -1.2V の過防食状態でも同様の試験をして過大荷重付加回数と腐食疲労寿命の関係を図10に示した。

σ_{max} が20と25 kg/mm^2 の場合は過大荷重9回付加で N_f が極大となり、腐食疲労強度は向上する傾向にあるが、過度に付加されると損傷作用と相殺されるようである。過防食状態でもとくに悪影響はみられない。

平滑材には軸力で過大荷重を付加しても残留応力は生じにくく、加工硬化が生じるが、SM50について過大荷重 50kg/mm^2 を付加しても図11に示すように切欠材のような効果がみられない。したがって、過大荷重の効果は圧縮残留応力付与とみられ、その結果腐食疲労寿命が延びると考えられる。

6. 結言

鋼材の腐食疲労強度向上には引張強さの増大や耐食性向上ではあまり期待できず、構造物としての疲労強度は溶接継手止端部の形状に大きく依存している。したがって、その形状改善のためにTIG処理や化粧溶接がなされるが、その結果熱影響部の硬さが上昇し、腐食環境では脆化が懸念される、しかし、通常の構造用鋼については硬さの上昇は腐食疲労強度に悪影響を与えず、止端部処理は腐食疲労強度向上に有効であるといえる。また、電気防食も $-0.8 \sim -1.0\text{V}$ (SCE) の適正範囲では硬化部に対しても有効であり、過大荷重の一時的付加は圧縮残留応力付与となり腐食疲労寿命も延びることがわかった。

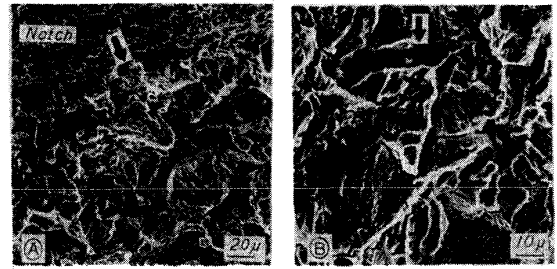


写真1 HT80鋼の腐食疲労破面(無防食, 矢印はき裂進展方向)
(適正防食: -0.8V) (過防食: -1.2V)

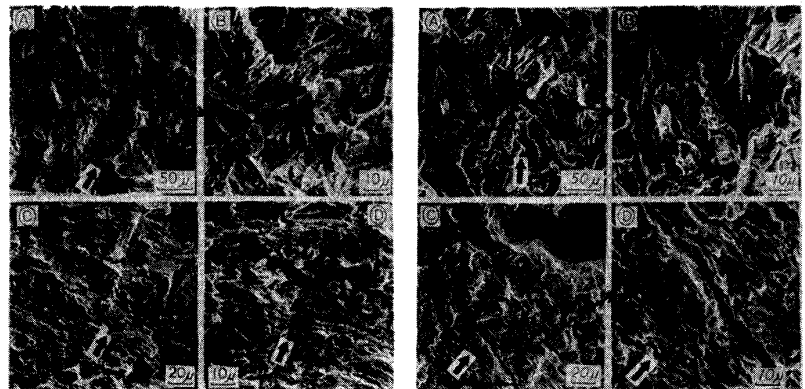


写真2 電気防食したHT80鋼の腐食疲労破面(A, B: き裂発生点近傍, C, D: き裂進展部, 矢印はき裂進展方向)

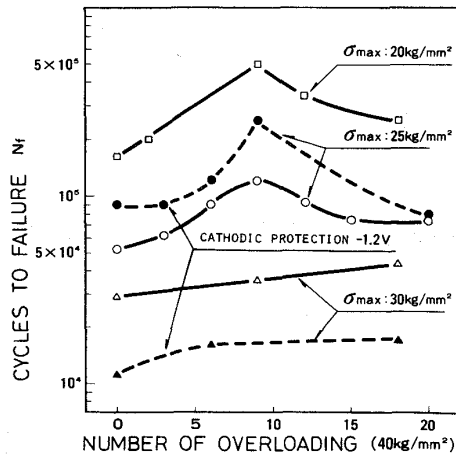


図10 SM41鋼切欠材の過大荷重付加回数と腐食疲労寿命の関係

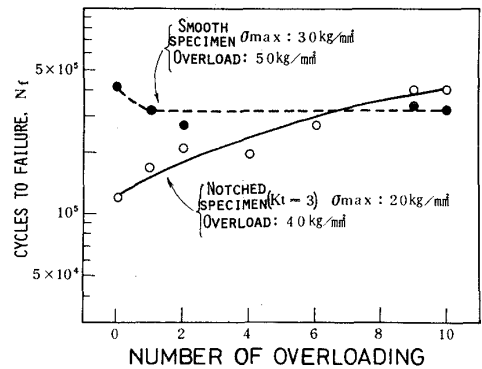


図11 SM50鋼平滑材と切欠材の過大荷重付加回数と腐食疲労寿命の関係