

軟鋼溶接部の腐食について

日立造船KK技術研究所* 中 村 勇

1. ま え が き

軟鋼溶接部の腐食に関して全溶接船構造が増加し、あらゆる構造物の分野で鉄接構造にかわつて溶接が使用されるにしたがい大きな問題となつてきた。しかし車輻建築鉄塔など大気中で使用され、また塗装メッキなどの防食処理ならびに補修作業が容易な場合は比較的軽視されている。そして造船、水圧鉄管、各種化学、高圧容器などの分野において大きな問題とされているが、腐食そのものが複雑なものと考えられ、時には材料の寿命または消耗材とさえ考えられるものがある。しかし一般に軟鋼溶接部において溶着部またはそれに隣接する母材部の腐食が大であり、そして学説的には母材と溶着部間の開位差に原因する電気化学的な腐食が認められるが、実際にはそれはごく局部的なものでいわゆる溶接部の腐食といわれるものは溶着部のピンホール不純物或は組織の不均一残留応力などに原因している。そして適当な焼鈍により組織応力を改造すれば腐食を少くすることが出来るといわれている。また鉄接部より腐食量そのものは多くても漏洩または機械的強度において溶接部分の方が秀いでおり、特にミルスケールの存在は電気化学的な作用により鉄頭の腐食損傷を生ずることが多くサンドブラストその他の脱スケール処理により防止されている状態である。

なお腐食に関係して塗料メッキ電気防食法などの進歩も著しいものがあり、生産技術として溶接部の腐食を考えるときにはそれら防食法を同時に検討すべきと思われるが、ここでは直接に溶接部の腐食に関する主な資料を紹介し参考供したいと思う。

1) 溶接部の腐食試験

F. R. Hensel : Metal & Alloy, 5 (1934), 11

当時好評を得た腐食試験機の説明を主とし、それを使用し、塩酸と食塩水を用い、裸棒と被覆棒で溶接部の腐食の差を出している。裸棒の方が腐食量が約2倍多く又腐食減量の差は溶着部の化学成分に非常に関係している。抗張力も腐食時間が大いになるにつれ減少している。

顕微鏡試験の結果によると、溶接熱のため grain の大きさに不連続な変化を生じた部分の母材に pits (孔食) が生ずる。また高温にさらされた所に接近した母材は非常に腐食されている。さらに溶接熱により refine された小さい grain の溶着部は粗い組織のものより腐食される程度が少ない。

故にこの点は被覆棒が裸棒より秀いでいる。

2) 溶接部の腐食について

佐々木新太郎：溶接協会誌, 6, (1936), 9.

大正9年3月三菱長島造船所で進水した全溶接渡海船諏訪丸を使用11年後溶接部を切断して腐食状況を検査した。外板の溶接線で2本の内1本は水線下であつたが外観腐食の進捗は認められない。船底外板溶接切断部でも特に腐食したとは考えられない。石炭庫の外板溶接部は船内から防食塗料を塗つてあつたが石炭で塗膜が剥脱され防食効果がなく、石炭に含まれている水分のため腐食を呈していた。これは溶接部だけでなく鋼板全体に腐食を来しているが、溶着部に隣接する母材部が他のところより腐食が大であるように見える点に注意される。

さらにこれら腐食の原因に対しつぎのように考察している。石炭庫の例のごとく溶着部に隣接する母材が腐食されているが、一般に説明されている所では溶着部と母材部との間に電位差を生じて母材が電気化学的に腐食するというのである。しかし溶接線より外の部分の方が腐食が甚しい例が多いことは上のごとき電気化学的腐食が起つているとは考えられない。簡単な例として溶着部は平滑でなく凹凸が多くありその部分に腐食液が停滞する場合は明らかに腐食はその部分に起る。このような環境を判然としておかないで腐食問題を考えるのは机上の空論である。

次に考えられるのは溶接船に沿える熱的作用と機械的作用による材質の変化である。歪模様をとると歪模様のあらわれた部分は他の部分より腐食されやすい。これが溶接線両側の母材が他の部分より多く腐食するというものに対する最大の原因と考えられる。故に腐食のおそれのあるものはかかる歪模様を解消するために焼鈍するを原則とする。

そして結論として(1)防食塗料が塗られる以上は溶接部の腐食は余り考えるに及ばない。(2)電気化学的腐食説は

* 此花区桜島北町60

余りに誇大に吹聴されすぎている。(3)軟鋼においては溶接線両側の母材が溶接の内部応力のために降伏され、腐食性を増して溶接部の腐食を大ならしめることが軟鋼溶接線腐食については最も重要視すべきである。(4)軟鋼厚板の溶接においては焼鈍を施して溶接の際に材質の降伏せるものを再生して腐食を防止する必要がある。(5)軟鋼薄板の溶接では内部応力による材質の降伏も少く、また焼鈍することも困難であるから焼鈍をせぬが出来るだけ内部応力の発生を少なくする方法を考えて溶接を行い以つて腐食を防止する必要がある。(6)加熱時間は出来るだけ短かくする。これにはガス溶接より電気溶接が優つている。必要なら冷し金をあてる方法が考えられる。

(3) Spraagend Claussen : Welding Journal

Supplement, Aug. 1937

溶接部の腐食試験について多数の文献が輯録され、溶接棒の特性、溶接位置、溶接手の優劣、母材の化学組成及び製造過程、腐食液の種類及濃度温度その他多くの条件によつて異なる結果が示されている。

(4) 溶接製反応罐の腐食の一例

佐々木新太郎：溶接協会誌 9, (1937), 179

反応罐の溶接部の腐食は電気化学的な腐食でなく、この腐食をすくなくするためには、溶着部のブローホールを少くし、残留応力を最小限にするようにし、焼鈍をすすめ、また溶接熱のため母材が腐食しやすい組織になるのを防ぐことを注意している。

(5) 高圧容器の溶接（講義）

溶接部の腐食

罐胴溶接部の腐食試験

佐々木新太郎：溶接協会誌, 9, (1939), 475 569.

佐々木氏は溶接協会誌に高圧容器の溶接法の講義をあらわしその一部分に溶接部の腐食に言及し、先にのべた電気化学説の誇大視の反対を詳しく説明している。次にその内容を略述する。

(4) 溶接部の腐食。溶接部は溶着部と母材の材質が異なるので電解質液中では両者の間に電池を構成し、電気化学的腐食を起し、化学容器には溶接は不適であるという説が称えられ、鍛接のごとく第三金属を用いない方法が良いと主張する人もある。特に欧州大陸では古くから鍛接工場が発達しており溶接の発展に対し鍛接が生きんがために必要以上に宣伝するせられ上の主張が広く伝えられている。

溶接において電気化学的腐食が起ることは学説として否定は出来ないが、実用上問題にするに足らない。電気溶接が経済的で化学容器に採用すべきであるということをつぎのように説明する。

電気化学的腐食ならば母材と溶着部の電位をみれば溶着部が腐食して母材は腐食せぬ筈であるのに母材が腐食している。電気化学的な原因以外に原因があるべきである。例えば軟鋼が降伏点以上の荷重を受けて塑性変形を起していると腐食は起しやすいが、溶接部は溶接応力によつて腐食されやすい状態になっており、溶接後充分焼鈍すれば腐食されにくくなる。しかし溶着部が不健全でブローホールが多いとか焼入組織が激しく表われているときは溶着部の腐食は早い。

(4) 罐胴の溶接部の腐食試験 罐胴の溶接部より試験片を採り、70°C, 3%食塩水中で腐食減量を測定し第1表の結果を得た。単独腐食試験の場合も電気化学的腐食試験の場合も腐食量の差は殆んど認められない。

第 1 表

	単 独 腐 食 量		電 気 化 学 的 腐 食 量
	母 材 部	溶 着 部	母 材 と 溶 着 部 の
	gr/cm ²	gr/cm ²	gr/cm ²
試料 A	0.0070	0.0065	0.0058
" B	0.0058	0.0061	0.0062
" C	0.0062	0.0068	"
" D	0.0067	0.0063	0.0063

すなわち電気化学的腐食によつて溶接部の腐食が特に大とは考えられない。

また電位を測定し母材と溶着部の電位差を求めると、0.0067~0.0135V 程度の極めて少いもので、電気化学的腐食は殆んど発生しないで両者共他の原因から腐食し、特に母材が多く腐食したと考えねばならない。炭素含有量の多いものほど腐食しやすいと考えられるから母材の方が多く腐食したと考えられるべきである。

(6) 溶着鋼の腐食

大西巖：溶接協会誌, 10 (1940), 2, 41

各種溶着鋼中比重の低いものに対しその腐食度を圧延鋼材と比較したもので腐食液は硫酸、塩酸、硝酸、食塩の3%溶液中に48時間放置して求めた腐食である。気泡少く優秀な溶着部の腐食度は母材に極めて接近していることがわかる。溶接部腐食の予備試験なり。

(7) 溶接部及び銲接部の硫酸による腐食並に溶接部に關する研究

大西巖：溶接協会誌, 10 (1940), 6, 219.

軟鋼溶接部銲接部の硫酸による腐食度を比較するため腐食液として濃硫酸の外に30%の硫酸を使用して液を隔日に取換えまた連続放置の場合について腐食実験を行い、腐食進行中の状況を記録し、またその重量減を測定し、その後引張試験を行い強度の低下を比較した、その

結果軟鋼溶接部と銲接部との硫酸に対し腐食減量は溶接の方が幾分多い（濃硫酸14日後(R)9.5%, (W)6.4%減量/元量; 30% 硫酸14日後(R)20%, (W)23%）が漏減に対しては銲に比し著しく耐久度をもち、かつまた機械的強度も銲接に比し少い。（腐食しない場合の溶接銲接の接手効率を夫々100%とすると、30% 硫酸 12日後では(W)62.5%, (R)43.5%に夫々減じている）すなわち銲接においては銲頭円周並に埃隙部が腐食をうけ、漏減をきたし接手強度も低下している。

溶接部の腐食。 溶着部の肉盛部を平滑に仕上げ、30%硫酸に腐食すると、溶着部に隣接する母材部は一段著しく腐食され母材面上に明らかな境目をつくっている。その中は溶着部より5mm内外の距離である。また溶着部自身は最も著しく腐食され一様に隣接母材より低くなっている。この溶着鋼の部分のみが母材に比し遠かに腐食されるのは材料及び状態を異にするための電気化学的腐食と考えられる。溶着部と母材との電位差を測定するに溶着部は常に陽極的にして電気化学的に母材より腐食され易いことが納得出来る。しかし外観的にみると溶接部には肉盛部があるので溶着部の腐食少いようなものもこれは錯覚で事実は母材部より著しく腐食されていると考えるべきである。しかしこの腐食され易い溶着部附近に偶々アンダーカットがあればここに濃淡電池を生じ特に腐食が進行してゆくと考えられる。

次にガス切断したままの試験片を腐食した場合にも、切断部に隣接した母材が他の母材に比し腐食され易い。これらの部分の顕微鏡組織をみると電弧溶接或はガス切断熱により母材の圧延組織の消失せる境目が腐食の境目をなしている。この部分の腐食が溶接或は切断による応力とは関係なく単に組織の差異による腐食なることは明らかである。

次にこれらの切断試験片、および溶接試験片を焼鈍して腐食すれば680°Cに焼鈍すれば既に応力は除去されたと考えて良い筈なのに母材の腐食度には依然差を有している。顕微鏡組織も未だ差異を有している。これに対し850°Cに焼鈍したものは組織の差異は消失しており、母材面の腐食にも差異は消失している。

次に実用に供した溶接製混酸貯槽（硫酸、硝酸）の約10年間使用後の腐食状況を調べたところ（板厚16mmMS）溶着部に近い母材部一帯には溶接応力線の総模様があらわれ、この応力線の腐食の深さは板厚の $\frac{1}{2}$ 以上にも達している。このとき溶着部は腐食によりほとんどなくなっていた。故にこのことから考えると最も著しく腐食されるのは溶着部にして、これに次ぐものは応力線に沿う腐食である。前者は電気化学的腐食であり、後者は応力による腐食と考えられる。なおこの応力による腐食はガス切断せる軟鋼板においてもみられるところであ

る。

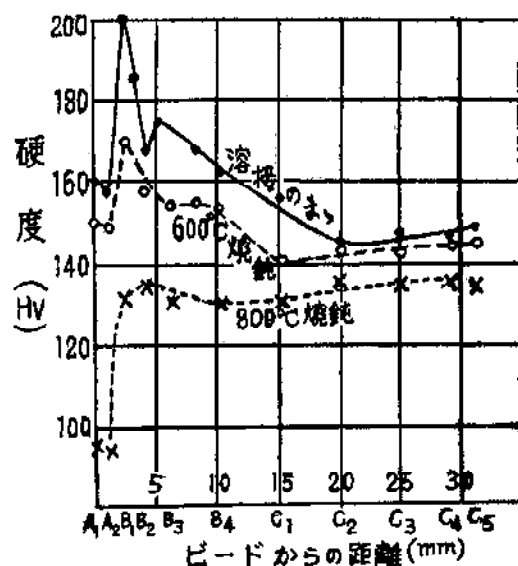
以上の実験の結果溶接部の腐食は一般の腐食のほか溶着部の電気化学的腐食、溶接応力の存在による母材部の条溝の腐食、及び溶接熱の影響による母板組織の変化による腐食の3つの特徴を説明する。

(8) 溶接部の腐食について一軟鋼板における組織電極電位と腐食量

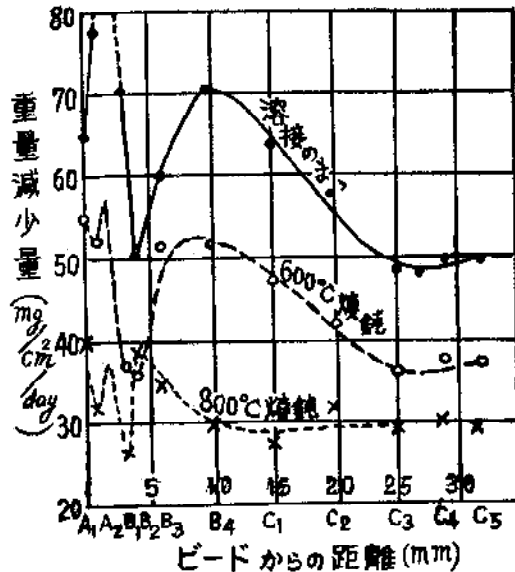
遠藤、大谷：金属学会誌，17（1953），10，479.

長さ150mm，巾78mm，厚さ8.5mmの軟鋼圧延板を2枚被覆電弧溶接棒で溶接した試料をbeadに垂直に一端から1cmの位置で切断した断面を顕微鏡組織の相違により腐食試験片を $1 \sim 2 \times 8 \times 6$ mmの寸法に切出し、溶着部上層の柱状鑄造組織部(A₁)，その下層のブローホール、不純物、パーライトの偏析の多い不均一組織部(A₂)，溶着部に隣接する粗大な過熱組織部(B₁)，ほとんど同じで少し腐食しにくい部分(B₂)，1000°C程度に過熱され組織は粗大化しパーライトの分散がことなる部分(B₃)，焼鈍部の端で微細組織部(B₄)，母材部(C₁)，(C₂)の切断試験片と、切断しない連続試験片を準備し、600°C 6時間，又800°C 1時間の焼鈍を行つたものなどについて硬度の測定を行つて応力と歪を推定し、また腐食量を測定し、さらに電極電位を3% H₂SO₄中でINKCIで測定した。そして第1，2，3図のごとき結果を得て、腐食量と組織・歪，腐食量と電極電位の関係について考察を加えた。すなわち

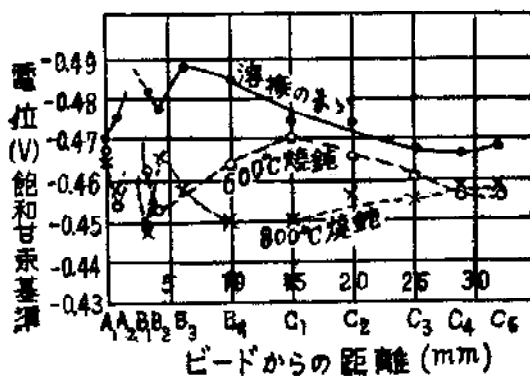
- (i) 腐食のはげしいのは組織の急変部分で
- (ii) 硬度と腐食量，従つて歪と腐食量の傾向は大体同じであるが、歪の小さい、細粒のものが柱状の部分より腐食量が多く、それも歪の影響とは考えられないほど大きいこと



第1図 硬 度



第2図 腐食量 (3% H_2SO_4 , 1day Max $2^\circ \pm 3^\circ C$)



第3図 電位 (3% H_2SO_4 , 20hrs.)

(イ) 溶着部の腐食のはげしいこと

などから組織差の腐食に対する影響の特に大きいことがわかり溶接部の腐食は組織、成分などの合成的効果と考えられる。

腐食量と電極電位については大体同一の傾向を示すが溶着部は母材部より腐食がはげしいが、必ずしも電位は卑でないか卑であつても差は少く3% H_2SO_4 中で約5mV貴である。従つて溶着部の腐食は電位差によるよりはむしろ自身の不均一組織内での電気化学的作用によると考えられる。また溶着部、母材境界部の腐食は組織、歪成分の差にもとづく電位差によるものと思われる切断試料の傾向が連続試料の場合と同じことから電気化学的腐食は極く狭い範囲で block をなして起ると思われる。

なお800°Cに焼鈍して組織、歪の差をなくすれば腐食量を約50~60%に減じ得る。

(9) 高流速の海水中で溶接部の腐食抵抗の試験

N.A. Langer: Autmat, Suarká Akad. Nauk

Uhr. SSR, 7, No. 4 93~96 (1954):

C.A., 49, 15711a

海水中における溶接部の耐食性を試験する装置についてのべている。ペークライト・ラッカーを塗布した容器内に合成海水を入れ供試材でつくつた円板をこの液の中で25km/hrの速度で回転し侵食深さを実測している。

(10) 溶接棒鋼における接触腐食

T. Noren: Tek. Tidskr., 85, 735~738(1955):

C. A., 50, 3984g.

溶接部の内部と周辺における腐食図が示されている。電気溶接棒の種類と操作とが腐食に大きな影響を与える。熱い酸性の溶接棒はほとんど腐食を増さないが、冷い塩基性の棒は最も腐食を生じる。

(11) 鋼溶接部の応力腐食割れに対する予熱の効果

E.P. De Garmo & I. Cornet: Weld. J., 34,

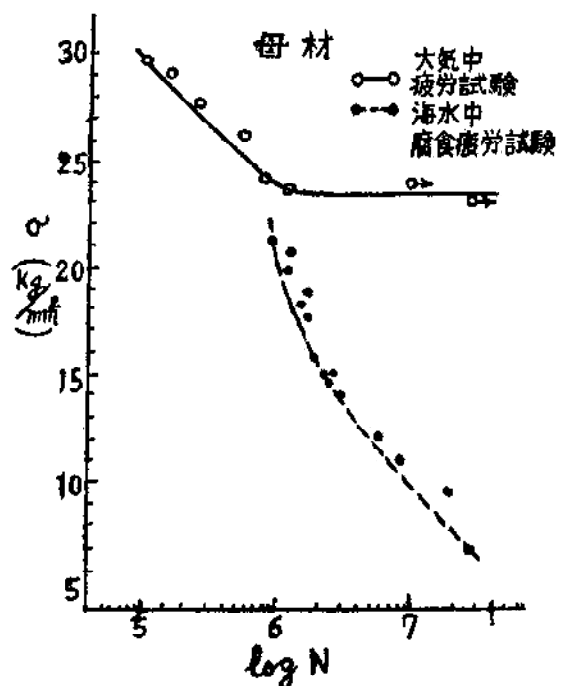
(1955) 472S~495S

三種の低炭素鋼溶接部の230°Cの60%硝酸石灰、3%硝酸混合溶液中における応力腐食割れを種々の熱処理の下で研究した。予熱は割れを減するに非常に有利で低温による応力除去と同程度有効であつたが高温による応力除去ほど有効でなかつた。

(12) 鋼材の応力腐食に関する研究軟鋼及び溶接部の腐食疲労

南義夫, 古賀秀人造船協会論文集, (1956)99.101.

軟鋼板および溶接部よりつくつた試験片を用いて海水中で腐食を行つた後の疲労試験, 又腐食疲労試験を片持

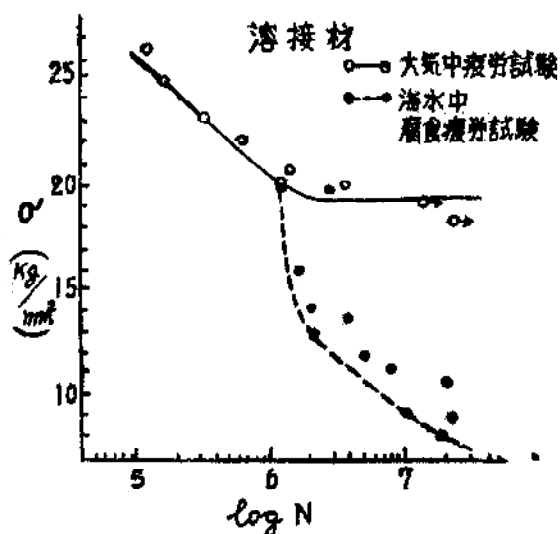


第4図

第 2 表

	母 材 部		溶 着 部	
	疲労限度 kg/mm ²	大気中の疲労強度 に対する比(%)	疲労限度 kg/mm ²	大気中の疲労強度 に対する比(%)
大 気 中 疲 労 試 験	23.5	100	19.2	100 [81.7]
海 水 中 腐 食 疲 労 試 験	6.5	27.7 ^(3×10⁷) (に於て)	7.3	38.0[112.3] ^(3×10⁷) (に於て)
1 月海水中で腐食した後大気中疲労試験	22.4	95.3	19.0	99.0[84.8]
2 月 " "	18.7	79.6	13.5	70.3[72.2]
6 月 " "	18.3	77.8	14.1	73.4[77.0]
12月 " "	16.6	70.6 ^(3×10⁷) (に於て)	13.2	68.8[79.5] ^(3×10⁷) (に於て)

但し〔 〕内は対応する母材に対する比



第 5 図

梁型回転曲試験機で約 2,900rpm の繰返数で行った結果第 4 図、第 5 図のよな S-log N 曲線を得、疲労限度を第 2 表のごとく求めた。

つぎに夫々の試験片の破面状況をしらべ、溶接部の破断は大部分境界が起点となつてゐることを認めた。腐食状況を顕微鏡でしらべ、疲労強度について詳しく考察を加えつぎのごとく結論した。

(i)疲労強度は大気中の約80%に低下し主として点食に原因するようである。(ii)溶着部の腐食は母材にくらべて著しいとは限らない。試験によつては母材の電位が卑で溶着部に対して防食作用を果している場合もある。(iii)腐食疲労の場合は応力の共存により点食が速かに形成され割れ発生の起点となり、強度は著しく低下し、明瞭な疲労限度が得られない。3×10⁷の繰返数では母材は大気中の約30%で溶接材では約40%である。(iv)溶接材の大気中の疲労強度は母材の約80%であつて、境界部の影響と考えられるが、腐食疲労の場合は腐食の影響のため境界部の影響は打消され、母材と溶接材の強度の差はほとんど無くなる。

(13) 軟鋼溶接部の自然電極位について

松尾孝一郎他 2 溶接協会誌, 27(1958), 2, 260

軟鋼母材に種々の被覆電弧溶接棒で一層ビードを置いたものから試験片をとり、溶接部を溶着部、熱影響部、母材部とに分けそれ以外の部分をパラフィンで覆つて各部分を 3% 及び飽和食塩水中で飽和カロメル電極を用いて自然電極をマクロ的に測定し、また熱影響部を再現するために周囲をドライアイスで囲んだ 10mm 角の母材の一端でカーボン電極を用いてアークをとばし、加熱、冷却速度を計つてつくつた試験片によつて熱影響部の粗い組織と細い組織をつくり、それについて前記と同様に自然電極電位をミクロに測定した。その結果は第 3 表のごとき値を得た。

第 3 表

	溶着部	熱 影 響 部		母材部
		粗い組織部	細い組織部	
マクロ的測定	mV -0.444	mV -0.430		mV -0.445
ミクロ的測定	"	mV -0.422	mV -0.455	"

すなわち溶着部と母材部の自然電極電位は同程度であるが、熱影響部の間には約 10mV の自然電極電位差が存在し、熱影響部を粗い組織と細い組織部とに分けて考えると細い組織部は溶着部および母材部より卑になり、粗い組織部は貴となる。腐食されやすいものからいうと細い組織部、母材部、溶着部、粗い組織部の順になつてゐる。また溶接棒の種類による相違は見出せなかつた。

(15) 鋼溶接部の腐食

J. U. Mac Ewan & H.H. Yates: Corrosion, 15 (1959) 1, 2t~6t

46種類の鋼溶接部を 3% 食塩水中で 12ヶ月交互浸漬試験した。