

HT 52 高張力鋼の熔接

安 藤 良 夫

1. まえがき

船舶、橋梁その他の構造物において、強度を低下することなく重量を軽減しようとする努力は絶えず続けられている。構造法が鋸接から熔接となり、鋼材を軽合金で置換えるようになったのはいずれもこのあらわれといえる。さらにこの努力の一つとして高張力鋼の使用が挙げられる。

一般構造物における高張力鋼の使用はかなり古く、Ducol Steel, High Tensile Steel などを用いて鋸構造が造られている。しかし、多くの研究が行われたにもかかわらず、これらの材料はそのままの成分では強度を失うことなく完全に熔接することは不可能であった。その後熔接可能な高張力鋼を使って構造物の重量を2つの面から節約しようとする傾向は世界的のものとなり、各国ともこの方面の研究と実用化を極めて盛んに行っている。

特に船舶においては、重量の節約は各種の性能を大いに向上するもので、わが国においても今次大戦の末期に旧海軍が研究を行い、高速潜水艦の内殻を高張力鋼の熔接構造で造るなど相当の成果を挙げているが、当時は鋼材の切欠脆性に対して全く考えてなく、その他疑問の点も少なくない。

昭和 28 年より日本造船研究協会第 6 研究部会ではこれらの資料を基礎とし、米英独等の高張力鋼の規格を参照して鋼材を試作し、その熔接性試験を行い、

降 伏 点 $\geq 32 \text{ kg/mm}^2$
 引張り強さ $52 \sim 60 \text{ kg/mm}^2$
 伸 び $\geq 20 \%$

の機械的性質を有し、かつ切欠脆性を含めた熔接性の良好な高張力鋼を求める研究を始めた。これは最低強度が 52 kg/mm^2 であるところから、HT 52 高張力鋼と称している。この研究には製鋼、熔接棒、造船関係の多数の会社が協力参加したほか、熔接性試験は運研、鉄研、東大、阪大、名大など研究機関が分担して行ったが、研究の概要を述べつつ当研究室で行った熔接接手試験について述べる。

2. 供試高張力鋼の化学成分と機械的性質

本研究に使用された高張力鋼は比較的安価に製造できるものとして、合金成分は C のほか Si, Mn のみを添加したものとした。この種鋼材であり高い強度を望む

と熔接性が悪くなるので上限は 60 kg/mm^2 に抑えた。それらの供試高張力鋼は川崎製鉄、日本製鋼所、日本鋼管、八幡製鉄の 4 社で試作した 8 チャージで、化学成分中の Si 量は特に指定したものである。熔接接手試験では板厚 20 mm と 12 mm のボトム材を使用した。その化学成分 (レドール分析) を第 1 表に示す。これらの熔解は日本鋼管と八幡製鉄では塩基性平炉、川崎製鉄と日本製鋼所では電気炉で行われた。

第 1 表 供試高張力鋼の化学成分 (レドール)

製鋼所名	記号	化 学 成 分							
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
川崎製鉄	K 1	0.19	0.19	1.38	0.020	0.006	0.10	0.03	0.16
	K 4	0.14	0.46	1.27	0.013	0.005	0.06	tr.	0.18
室 蘭	M 6	0.15	0.58	1.16	0.021	0.010	0.26	0.25	0.31
	M 3	0.17	0.37	1.30	0.019	0.008	0.21	0.16	0.27
日本鋼管	N 6	0.19	0.60	1.16	0.024	0.015	0.09	tr.	0.13
	N 3	0.17	0.29	1.32	0.019	0.016	0.02	0.03	0.15
八 幡	Y 6	0.12	0.65	1.14	0.016	0.019	—	0.65	0.16
	Y 4	0.17	0.53	1.49	0.021	0.021	—	—	0.21

各製鋼所においては試作鋼について JIS に準じた引張り試験、曲げ試験が行われ、あわせてレドール分析、および製品分析オーステナイト粒度およびフェライト粒度が求められた。供試高張力鋼のボトム材の機械的試験と粒度測定結果は第 2 表に示した通りで、機械的性質は始めに指定した目標範囲に入っている。

第 2 表 供試高張力鋼の機械的性質および結晶粒度 (ボトム)

記 号	機 械 的 性 質				結 晶 粒 度	
	板厚 mm	降伏点 kg/mm ²	抗張力 kg/mm ²	伸 び	フェライト 粒 度	オーステナイト 粒 度
K 1	20	39.1	60.1	25.0	7	4~5
	12	39.8	61.8	23.0	8	3~4
K 4	20	34.7	52.4	29.0	7	2,4,6
	12	88.2	55.2	26.0	8	3,4
M 6	20	43.0	57.5	25.5	8	6,7,8
	12	44.0	60.5	24.0	8	6,7,8
M 3	20	45.5	60.2	25.0	6~7	6,7,8
	12	47.0	60.5	20.0	7~8	6,7,8
N 6	20	39.3	59.9	21.0	7~8	6,7
	12	38.2	60.0	25.0	8	5
N 3	20	34.7	54.2	27.0	7~8	6,7,8
	12	33.9	55.4	27.5	7~8	7~8
Y 6	20	32.6	52.2	20.5	6~7	6~7
	12	37.3	52.2	26.5	7~8	6~7
Y 4	20	37.4	59.4	24.0	6	7
	12	35.6	59.7	22.0	7	6

3. 熔接性試験の概要

溶接性に関しては多数の試験方法があり、その相関性を確立する研究も別に行われているが、当時の段階ではまだ不十分であったので多数の試験が行われた。

母材の切欠脆性を主として求める試験としては標準シャルピー試験、簡易脆性試験、シュナット試験、母材のリーハイ試験が行われた。これらの諸試験の遷移温度は fracture transition においても、ductility transition においても相関性が見られ、今後の試験においては最も簡単でしかも標準と考えられるシャルピー試験を行い、fracture 遷移温度を示すと考えられる剪断破面率遷移温度と、ductility transition に近いもの示すと考えられる 15 ft-1 b 遷移温度を比較すれば十分であると認められた。

Si 量と母材の切欠脆性の関係は、他の化学成分の影響を除くと、Si が 0.3~0.6% の範囲では遷移温度はほぼ一定で、0.6% 以上からその上昇が見られるようで、この種高張力鋼の Si 量は 0.55 以下が望ましい。後述べるように硬化性、亀裂性の点から C, Mn 量は増加できないので、所要の強度をうるためには Si をそんなに少なくすることはできない。

供試高張力鋼の切欠脆性を現用の造船用軟鋼と比較すると、全体としてキルド鋼よりやや劣る程度で、リムド鋼の上位に相当し、板厚 20 mm 以下ならば十分使用できる。焼準処理を行えば切欠靱性は著しく向上するが、強度の低下は免れない。

溶接部の切欠脆性を主として求める試験としては、コメレル試験（オーストリア試験）、溶接したリーハイ試験、欠陥のある接手試験、脆化領域試験、大型衝撃試験が行われた。母材の切欠靱性が良好でも、溶接による硬化が大きいと溶接部の延性が減少する。溶接部の硬化性をあらわす等価炭素量としては Voldrich, Tremlett などの式があるが、本研究では $C_{eq} = C + \frac{1}{4}Mn + \frac{1}{12}Si$ が大体 0.55 以下ならば熱影響部の最高硬度は 350 ヴィッカーズ以下であって、実用上差支えないと考えられた。

溶接部の硬化性と切欠脆性は密接な関係があり、供試高張力鋼のように軟鋼に比して硬化性の大きい材料では切欠のないコメレル試験の曲げ角度が靱性の差を良くあらわしている。

溶接部の亀裂性を求める試験としては鉄研式スリット型亀裂試験、リーハイ型亀裂試験、T型亀裂試験が行われた。はじめの2つは適当に拘束を与えて突合せ溶接を行い、低温亀裂を試験する方法で、ここでも熱影響部の最高硬度が 350 ヴィッカーズを超えなければよいことが認められた。T型試験は高温亀裂を求めるものであるが、低温亀裂に対すると同様に P, S を特に少なくする必要のあることが結論された。

諸外国では多くの高張力鋼が焼準によって材質向上をはかっているが、本供試鋼材では板厚 20 mm 以下なら

ば圧延のまま十分使用できる鋼材が得られる。しかし溶接性の向上ばかりに目を奪われず、焼準によって強度の下ることに注意しなければならない。

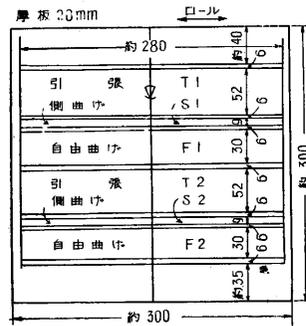
HT 52 高張力鋼用の溶接棒としては各種試験の結果十分使用できる溶接棒の製造が可能であることがわかった。溶接棒は低水素系のものがよいが、使用者の立場からすれば作業性のよいものがほしいわけで、この点一層の研究が望ましい。

供試高張力鋼の溶接接手試験は一連の試験の一環をなすものであるが、当所で行ったので次節に少し詳細に述べる。

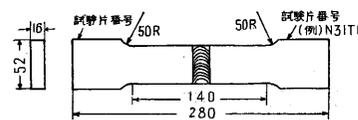
4. 溶接接手試験

溶接接手試験では実際の使用状態に近い状態で突合せ溶接接手を造って、静的な引張り、曲げ試験および疲労試験を行った。

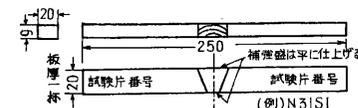
板厚 20 mm に対する試験板を第 1 図に示す。これより横引張り試験片、側曲げ試験片、自由曲げ試験片を切り出して試験を行ったが、それらの試験片形状はそれぞれ第 2, 3, 4 図に示した通りである。板厚 12 mm に対する試験板は第 5 図の通りで、これからはそれぞれ第 6, 7, 8 図に示した横引張り試験片、縦引張り試験片、型曲げ試験片（表曲げおよび裏曲げ）を切り出した。



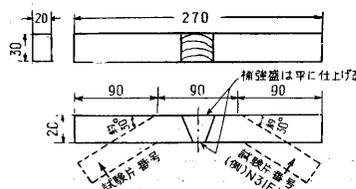
第 1 図



第 2 図 引張り試験片



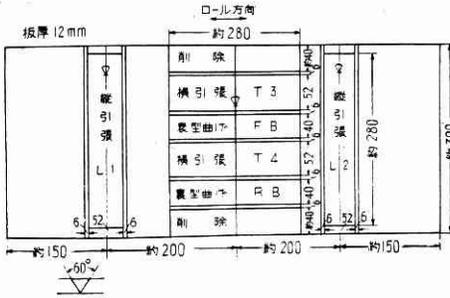
第 3 図 側曲げ試験片



第 4 図 自由曲げ試験片

せて使用した。

溶接条件は第 3 表に示した通りで、手溶接には 60° V 型の開先加工を行い、低水素系の溶接棒 4 種を使用した。ユニオンメルト溶接には X 型、Y 型の開先を使用し、心線 Oxweld #36, #40, #40 A とフラックス Grade 20, 50, 70, 80, 85, 90 を適当に組合

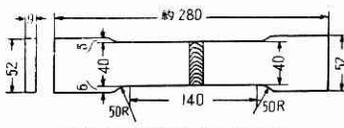


第 5 図

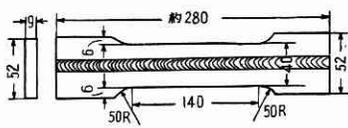
第3表 熔接条件

板 厚		20 mm	12 mm
手	熔接棒径	5 mm	4 mm
	電流	130—150 A	105—115 A
熔	アーク電圧	23—28 V	20—30 V
	開 先	60° V型	60° V型
接	層数	13—14	8—9
		2	1—2
ユニオンメルト 溶接	パ ス	F. P. B. P.	F. P. B. P.
	心線直径	3/16 in	3/16 in
	電 流	900 A	820 A
	アーク電圧	31 V	31 V
	熔接速度	15 in/min	16 in/min
	開 先	90° X型	75° Y型

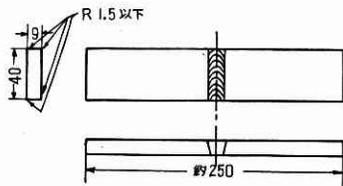
ただし, F. P. : Finishing Pass, B. P. : Backing Pass



第 6 図 横引張り試験片



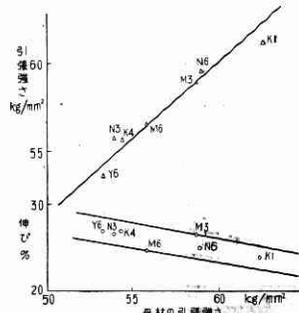
第 7 図 縦引張り試験片



第 8 図 型曲げ試験片

横引張り試験の結果では、適当な HT52 高張力鋼用の低水素系溶接棒を使用すれば、いずれの供試高張力鋼についても 100% の接手効率が得られることが確認された。一般に熔着金属の強度、特に降伏点が母材よりも大きくなる溶接棒を使用するのが普通で、軟鋼用の溶接棒でも 52 kg/mm² 以上の強度がでるが、60kg/mm² に近い母材に使用した場合は溶接部で破断し、接手効率は 93~100% であった。

縦引張り試験の結果の一部をまとめたのが第 9 図である。これは軟鋼用の溶接棒を用いた場合の伸びと引張り

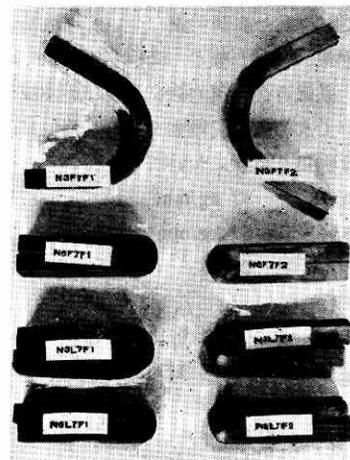


第 9 図 母材の引張り強さに対する縦引張り試験片の伸びおよび引張り強さ

強さを母材の引張り強さについて描いたものである。たとえば、板の横縁に使用する場合には熔着金属の強度は高くなければならないので高張力鋼用溶接棒を使用するのが望ましいが、縦引張りをうける縦縁に使用する場合はむしろ伸びの方が重要で、伸びの大きい軟鋼用の溶接棒を用いれば、ほとんど強度を損することなく母材と同等の延性を有することを示している。供試高張力鋼の引張り強さと伸びの積はほぼ一定であったが、第 9 図から明かなように、縦引張り試験の引張り強さと伸びについても同様であることがわかる。

各試験片について硬度試験を行ったが、一般に熱影響部の硬化の大きいものは縦引張り試験の伸びが少なかった。また溶接棒を十分乾燥して使用したにもかかわらず、一部の熔着部に銀点 (fish eye) が現われて伸びの減じたものがあった。最近では溶接棒も改善されたようであるが、低水素系の溶接棒は湿気に対して敏感であるから、使用者は十分乾燥した後、1 時間以内に使用することが望ましい。

曲げ試験は各種型曲げ、自由曲げとも一応良好な成績であった。一部に不合格のものがあったが、この原因は供試高張力鋼の側よりもむしろ溶接棒の側にあると考えられた。この当時の溶接棒は実験する高張力鋼もない時代に造った試作品で十分満足とはいえなかったが、現在

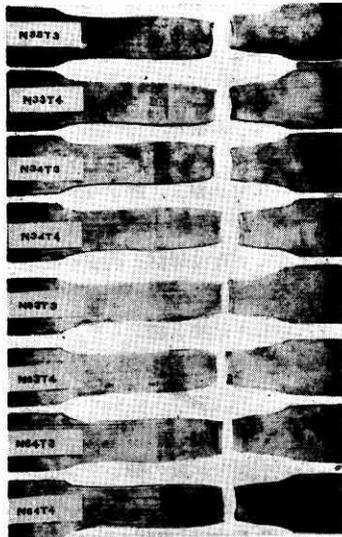


第 10 図 自由曲げ試験の例 供試高張力鋼 N3, N6 溶接棒 F L76, L B76

では優秀なものが製造されている。第 10 図は HT 52 高張力鋼用低水素系溶接棒を用いた自由曲げ試験の例で、下の 6 本は両端が密着するまで曲げても亀裂を生ぜず、十分な延性を有していたが、上の 2 本はこの曲げ角度で熔着部に亀裂を生じた。

ユニオンメルト溶接試験の結果は極めて優秀で、接手

試験のみの結果から見れば手熔接よりも良く、十分実用できる。小型船のように平面の直線熔接の少ない場合はあまり使用できないが、橋梁、桁材、鋼管、大型船など応用範囲は広いと考えられる。第11図は板厚 12mm に対するユニオンメルト熔接接手の横引張り試験結果の一部で、いずれも母材部で破断し、接手効率 100% であ



第11図 ユニオンメルト熔接の横引張り試験の例 供試高張力鋼 N3, N6 板厚 12 mm, 心線径 3/16 in, 心線熔剤の組合せは上より各 2 本ずつ (#36, G90) (#36, G85) (#36, G90, #40A, G50)

ユニオンメルト熔接接手の場合も 10⁷ 回の繰返しに対して 30 kg/mm² 以上の疲労強度があり、実用上心配はないと考えられた。

5. 結論

各製鋼所において試作した高張力鋼について広汎な熔接性試験を行った結果、引張り強さ 52~60 kg/mm² の熔接船舶用 Si-Mn 系低合金高張力鋼に適当な化学成分と機械的性質について次の暫定規格案を決定した。具備すべき機械的性質は引張り試験において

降伏点 $\geq 32 \text{ kg/mm}^2$
引張り強さ 52~60 kg/mm²
伸び $\geq 20 \%$

とし、熔接性試験では

- (1) Vノッチシャルピー衝撃試験における
0°C の衝撃値 $\geq 3.5 \text{ kg-m/cm}^2$
- (2) コメレル試験における
最大曲り角度 $\geq 120^\circ$

(ただし、板厚 $\geq 18 \text{ mm}$ の場合について、試験温度 20°C 以下で行う)

と定めた。化学成分としては下表左側に示す成分範囲と規定したが、上述の機械的性質を有し、熔接性試験に合

格する場合に限って、熔接性試験を追加して下表右側に示した成分範囲まで制限を緩和することとなった。

化学成分 (レドール分析)

	規格案	救済案
C	$\leq 0.18 \%$	$\leq 0.20 \%$
Mn	$\leq 1.25 \%$	$\leq 1.35 \%$
Si	$\leq 0.55 \%$	$\leq 0.60 \%$
P	$\leq 0.030 \%$	$\leq 0.035 \%$
S	$\leq 0.030 \%$	$\leq 0.035 \%$
Cu	$\leq 0.30 \%$	$\leq 0.030 \%$
Ni	$\leq 0.25 \%$	$\leq 0.25 \%$
Cr	$\leq 0.10 \%$	$\leq 0.10 \%$

追加すべき熔接性試験の条件は次の通りである。

- (a) Vノッチシャルピー衝撃試験における
+20°C の衝撃値 $\geq 6.3 \text{ kg-m/cm}^2$
-20°C の衝撃値 $\geq 1.8 \text{ kg-m/cm}^2$
- (b) ビードをおいた試験片断面における熱影響部の最高硬度

$H_{\max} \leq 350$ ヴィッカーズ

本研究の結果、熔接性と化学成分の間には一連の関係が認められたが、熔接性はたとえば製鋼条件、圧延条件、粒度など化学成分以外の要因の影響を強く受けるので、化学成分のみで鋼材の品質を正確に示すことは不可能で、熔接性試験が承認試験に取入れられたわけである。

今回の結果では Mn を主体とした米英系の高張力鋼よりも、ドイツ系の Si-Mn 鋼の方が引張り強さおよび降伏点が増加しても熔接による硬化が少なく、しかも切欠脆性があまり低下せず有利なことが確認された。

6. あとがき

熔接可能な HT 52 高張力鋼が本研究の結果わが国でも実用される段階に入ったが、諸外国ではさらに強力な熔接用高張力鋼が使用されている。日本造船研究協会第 21 部会でもこの問題がとり上げられ、引張り強さ 60~70 kg/mm² の HT 60 高張力鋼の研究が行われているが、これについてはまたの機会に報告する。

今回の HT 52 高張力鋼の研究に当っては各製鋼所、熔接棒製造所の協力を得たほか、当所の研究については工学部木原博教授のご指導を頂き、日本鋼管鶴見造船所、大阪変圧器の各社の協力を得、また研究費については日本造船研究協会の援助を得たことに対し厚く御礼申上げる。(1955. 5. 23)

表紙写真

右下は自由曲げ、左下は側曲げ、右上手前から 2 本は横引張り、後は縦引張りの各試験。熔接部は充分な延性を有し、100% の接手効率のあることを示している