

鉄鋼材料の破壊



75.2023
141

溶接構造物の脆性破壊

(株)神戸製鋼所 構造研究所

池 田 一 夫

昭和47年2月21日

鉄鋼材料の破壊

総 目 次

溶接構造物の脆性破壊	池 田 一 夫... 1
破壊の基礎	寺 崎 富久長... 27
脆性破壊	三 村 宏... 61
破壊の力学	宮 本 博... 81

目 次

1	はしがき	3
2	脆性破壊の機構の実験的研究	3
2.1	脆性破壊の発生	3
2.1.1	脆性破壊の発生に影響をおよぼす要因	3
2.1.2	切欠長さ	3
(a)	破壊の分類	3
(b)	低応力脆性破壊領域での破壊発生条件	4
(c)	亀裂長さと脆性破壊発生温度の関係	5
2.1.3	切欠深さ	6
2.1.4	溶接継手	7
2.1.4.1	溶接入熱量	7
(a)	ボ ン ド	7
(b)	溶接金属	8
2.1.4.2	角 変 形	9
2.1.4.3	表面切欠と角変形の重量	9
2.1.5	溶接残留応力	10
2.1.5.1	残留応力分布	10
2.1.5.2	脆性破壊発生特性への影響	10
2.1.5.3	表面切欠、角変形、使用応力の重量	11
2.1.5.4	応力除去焼鈍	12
(a)	残留応力	12
(b)	材質変化	13
2.1.6	塑 性 歪	13
2.1.7	衝撃応力	13
2.1.8	圧延方向と直角方向	14
2.1.9	曲 率	14
2.1.10	不連続構造	16
2.2	脆性破壊の伝播	16
2.2.1	亀裂伝播速度	16
2.2.2	亀裂伝播径路	17
2.3	脆性亀裂の停止	17
2.4	板厚効果	20
参 考 文 献		21

75.2023
141

溶接構造物の脆性破壊

(株)神戸製鋼所 構造研究所

池 田 一 夫

昭和47年 2 月 21 日

目 次

1	はしがき	3
2	脆性破壊の機構の実験的研究	3
2.1	脆性破壊の発生	3
2.1.1	脆性破壊の発生に影響をおよぼす要因	3
2.1.2	切欠長さ	3
(a)	破壊の分類	3
(b)	低応力脆性破壊領域での破壊発生条件	4
(c)	亀裂長さと脆性破壊発生温度の関係	5
2.1.3	切欠深さ	6
2.1.4	溶接継手	7
2.1.4.1	溶接入熱量	7
(a)	ボ ン ド	7
(b)	溶接金属	8
2.1.4.2	角 変 形	9
2.1.4.3	表面切欠と角変形の重量	9
2.1.5	溶接残留応力	10
2.1.5.1	残留応力分布	10
2.1.5.2	脆性破壊発生特性への影響	10
2.1.5.3	表面切欠、角変形、使用応力の重量	11
2.1.5.4	応力除去焼鈍	12
(a)	残留応力	12
(b)	材質変化	13
2.1.6	塑 性 歪	13
2.1.7	衝撃応力	13
2.1.8	圧延方向と直角方向	14
2.1.9	曲 率	14
2.1.10	不連続構造	16
2.2	脆性破壊の伝播	16
2.2.1	亀裂伝播速度	16
2.2.2	亀裂伝播径路	17
2.3	脆性亀裂の停止	17
2.4	板厚効果	20
参 考 文 献		21

1 はしがき

LPGタンクやLNGタンカーその他の低温用構造物の需要がますます増大してきた。溶接構造物において最も注意をはらうべきことは、鋼板が低温で脆性破壊するおそれがあることである。

第2次世界大戦中に、米国において建造された約4,000隻の戦時標準船のうち約¼が脆性破壊事故をおこして以来、脆性破壊の研究が活発におこなわれるようになり、世界各国において積極的な努力がなされた結果、最近になって漸く研究成果を実際の構造物の設計に適用できる段階に達してきたといえる。

脆性破壊の事故としては、英国のFawleyの石油タンク、米国の大陸を横断しているガス管、北大西洋、日本近海での大型船舶、およびオーストラリアのメルボルン近くのKings Bridgeなどの重大事故が報告されている。

わが国では、昭和44年1月5日に野島崎沖の太平洋上で2つに折れて沈没した50,000t 鉱石運搬船ばら丸の事故に関連して、他の原因とともに脆性破壊もその一因ではなかったろうかということがとりあげられたことは記憶に新しい。その3日後に、日本海で7,300tの木材運搬船金清丸の甲板が脆性破壊した。昭和44年春には引き続いて80キロおよび60キロ高張力鋼製のLPG貯蔵タンクがそれぞれ徳山と千葉で水圧試験時に脆性破壊し重大事故になった。

とにかく、銲継手とはちがって、溶接継手の場合は2枚の鋼板が冶金的に結合されていて、1枚の板になっているので、いったん、脆性破壊が発生すると秒速数100mから最高1,800mの高速で伝播して、一瞬のうちに船が真二つに折れて沈没したり、橋梁が折れるなど構造物の重大事故をもたらすことになり、その防止対策の確立がのぞまれる。

2 脆性破壊の機構の実験的研究

2.1 脆性破壊の発生

2.1.1 脆性破壊の発生に影響をおよぼす要因

原因のうちおもなものとしてつぎのようなものがあげられる。

温度、切欠の大きさ（長さと深さ）、応力レベル、材質〔鋼種、溶接方法や溶接熱量に依存する熱影響部（ボイドを含む）と溶接金属、異方性（圧延方向と直角方向）、SR処理のための熱処理や塑性歪による材質変化〕、溶接残留応力、角変形や目ちがいなどの工作上の誤差、曲率、不連続構造による応力集中や拘束、歪速度等。溶接構造物の種類や使用条件に応じて上記の要因のうちのいずれかを重畳させた結果、検査で見おとす欠陥の最大寸法にたいする脆性破壊発生温度をもとめ、その構造物の最低使用温度を脆性破壊発生温度より高くするように鋼板の材質と溶接条件等をきめれば脆性破壊事故を防止した構造物が出来上ることになる。

2.1.2 切欠長さ

(a) 破壊の分類

静的荷重下で切欠先端から脆性破壊が発生する特性をしらべる試験法としては池田¹⁾により考案されたDeep Notch Testが最も適している。図1に示す試験片において、切欠長さを40, 80,

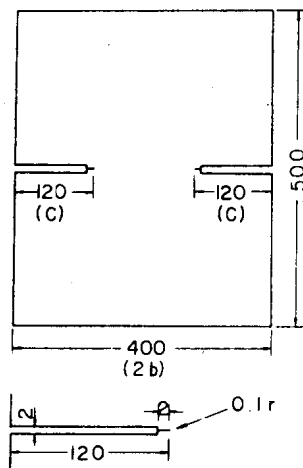


図1 Deep Notch Test 試験片および切欠部詳細

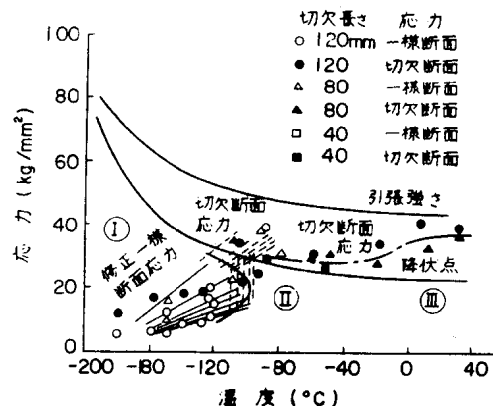


図2 軟鋼の破壊発生特性

120 mmに変化させ、種々の温度で引張って破壊させた。破壊応力と温度の関係を軟鋼の場合についてもとめると図2に示すようになる²⁾。

図において、約 -100°C 以下では低応力（切欠断面応力が降伏点より低い）脆性破壊しており領域Ⅰと名づける。 $-100 \sim 0^{\circ}\text{C}$ では切欠断面応力が切欠長さのいかんにかかわらず降伏点にほぼ等しくて脆性破壊しており領域Ⅱと名づける。 0°C 以上では切欠断面応力が引張強さに等しくなり延性破壊し、遷移部では切欠底部に三角形の延性破面が発生したのち脆性破面に転化している。

高張力鋼の場合には軟鋼とは異なり領域Ⅱがほとんどみられず低応力脆性破壊Ⅰから延性破壊Ⅲへつづく。

(b) 低応力脆性破壊領域での破壊発生条件

脆性破壊事故で最も重要なのは低応力脆性破壊領域での破壊の発生であろう。この領域での破壊発生条件としてはGriffith - Orowanのエネルギー条件〔(1)式〕が適用される。

無限板に長さ $2c$ の亀裂が存在し、亀裂に直角方向に無限遠において一様引張応力が作用して亀裂長さが微小長さ伸長した際のエネルギーの条件はつぎのとおりである。

$$\frac{\pi \sigma^2 c}{E} \geq 2 S_i \quad (1)$$

有限巾の場合には破壊の発生条件は

$$\frac{\pi [f(r)\sigma]^2 c}{E} = 2 S_i \quad (2)$$

ただし,

$$f(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi r} \left(\tan \frac{\pi r}{2} + 0.1 \sin \pi r \right)}$$

(3)

$$r = c/b$$

c = 切欠長さ, $2b$ = 試験片巾, σ = 一様断面応力, E = ヤング率,

S_i = 塑性表面エネルギー

領域①の場合について, 切欠長さが 40, 80, 120 mm の場合の破壊応力を(3)式に代入してもとめた S_i と絶対温度 T_K の逆数の関係を 60 キロ高張力鋼についてもとめると図 3 に示すようになる。図より, 切欠長さが変化してもほぼ一本の直線であらわせることがわかり, この直線関係は次式であらわされる。

$$S_i = S_{oi} e^{-2k_i/T_K} \quad (4)$$

ただし, S_{oi} , k_i = 材料定数

Deep Notch Test 試験片の切欠先端半径は 0.1 mm であるが, 図中の黒丸印は両外側に亀裂をいれた場合の値で 0.1 mm の機械的切欠でもとめた値と大差がない。

(c) 亀裂長さと脆性破壊発生温度の関係

脆性破壊は降伏点と密接な関係があるので脆性破壊を考慮した構造物の設計では, 降伏点にたいして安全率を考えた設計応力がもちいられる。

一方, 降伏点の対数と絶対温度の逆数の間には直線関係があり次式であらわされる。

$$\sigma_y = \sigma_{oy} e^{k_y/T_K} \quad (5)$$

ただし, σ_{oy} , k_y = 材料定数

いま降伏点にたいする安全率を n とすると

$$\sigma = \sigma_y / n, \quad n > 1 \quad (6)$$

(2), (4), (5), (6) 式を(1)式に代入すると, 無限板に $2c$ なる長さの亀裂が存在するときの脆性破壊発生温度 T_i (絶対温度 T_K) が次式よりもとめられる。

$$e^{\frac{2(k_i + k_y)}{T_K}} = \frac{2E}{\pi} \cdot \frac{S_{oi}}{\sigma_{oy}} \cdot \frac{n^2}{c} \quad (7)$$

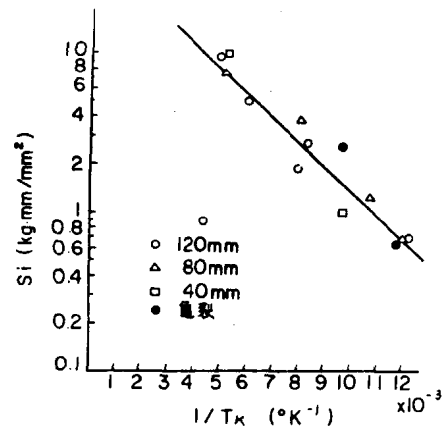


図 3 塑性表面エネルギーと絶対温度の関係 (60 キロ高張力鋼)

軟鋼，各種高張力鋼および低温構造用鋼についてもとめた無限板での亀裂長さと脆性破壊発生温度の関係を図4に示す²⁾。図より，HT 100はかなり脆性破壊発生温度は高く，軟鋼は中間的で，低温用鋼はいずれもきわめてよいことがわかる。

鋼 種	鋼 種	板厚 (mm)
A	焼準AIキルド	20
B	HW36(HT60)	20
C	HW40(HT60)	25
D	HW63(HT70)	20
E	HW63(HT70)	25
F	HW70(HT80)	19
G	HW70(HT80)	20
H	HW90(HT100)	25
I	HW90(HT100)	13
J	鋼質AIキルド 33キロ級	25
K	鋼質AIキルド 37キロ級	20
L	鋼質AIキルド 58キロ級	25
M	2.5%NI	20
N	3.5%NI	20
P	9%NI	20
Q	セミキルド	25
R	HW50(HT60)	25
S	HW63(HY80)	45

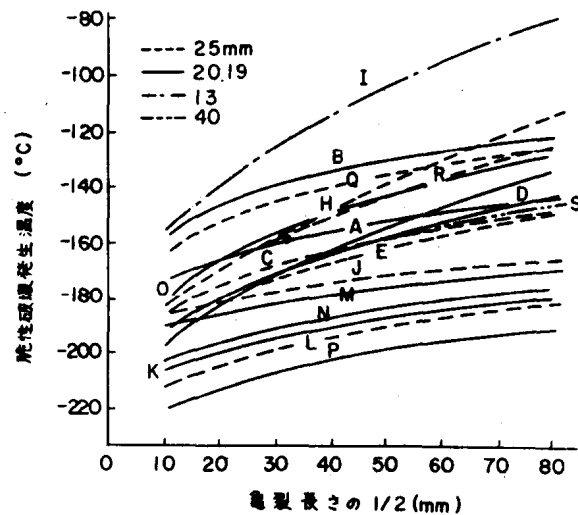


図4 無限板の場合の亀裂長さと脆性破壊発生温度の関係 ($\sigma = \sigma_y / 2.5$)

2.1.3 切欠深さ

実際の構造物の溶接部に存在する切欠としての溶接われや欠陥は表面切欠か内部切欠である。深さの異なる表面切欠をつけた広幅試験片を引張り，同一温度での破壊応力と切欠深さと板厚の比 t_1/t の関係をもとめると図5が得られ，近似的に次式であらわされる³⁾。

$$\sigma \times (t_1/t) = \text{一定} = \sigma_0 \quad (8)$$

ただし， σ_0 = 板厚貫通切欠の場合の破壊応力

(8)式の関係を(7)式に代入すると，任意の切欠深さの場合の亀裂長さと脆性破壊発生温度の関係が次式によりもとめられ，図6に示すようになる。

$$e^{-\frac{2(k_x + k_y)}{T_k}} = \left(\frac{t}{t_1}\right)^2 \frac{2E}{\pi} \frac{S_{oi}}{\sigma_{oy}^2} \frac{n^2}{c} \quad (9)$$

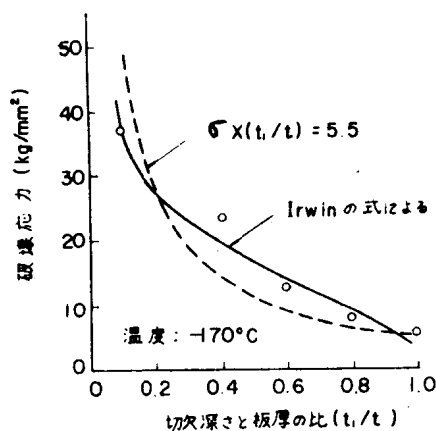


図5 母材での楕円表面切欠の破壊発生
応力と t_1/t の関係

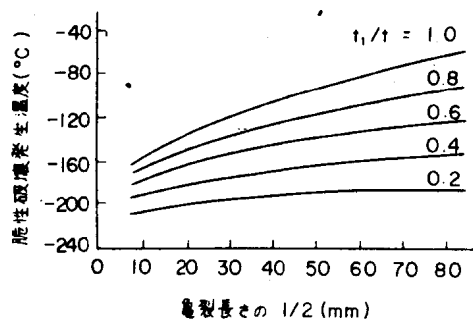


図6 無限板における脆性破壊発生温度
と亀裂長さの1/2の関係におよぼす
 t_1/t の影響

2.1.4 溶接継手

2.1.4.1 溶接入熱量

(a) ボンド

溶接線によって板厚を貫通する切欠が存在し、溶接線に直角方向に外力が作用する場合の脆性破壊発生特性は図7に示す溶接継手つき Deep Notch Test 試験片によりもとめられる⁴⁾。切欠は母材の熱影響部のなかで最も脆化していると考えられるボンドに沿ってつける（開先はL型かK型）か溶接金属内（開先はV型かX型）につける。

80 キロ高張力鋼（HT80）についてもとめた母材と溶接部の脆性破壊発生特性を図8に示す⁴⁾。被覆アーク溶接により 13,000 Joule/cm，サブマージアーク溶接（自動溶接）により 35,000，58,000 Joule/cm の入熱量で溶接したボンドと溶接金属の特性を母材と比較して示している。溶接構造物が完成したのちには検査がおこなわれ、溶接われなどが発見されると補修される。したがって、検査で見落とされる亀裂長さ（ $2c$ ）の最大値を適当にきめて（これは検査能力にも依存する），その場合の脆性破壊発生温度をもとめ、それより高い温度で使用するれば脆性破壊事故は生じないはずである。いま、 $2c = 80 \text{ mm}$ （この値はかなり安全側であろう）のときの脆性破壊発生温度 $[T_i]_{c=40}$ を材質判定の基礎にする。

図8より、 $[T_i]_{c=40}$ についてみると、溶接入熱量が 13,000，35,000，58,000 Joule/cm の場合のボンドは母材よりそれぞれ 26，76，80 °C 上昇する。

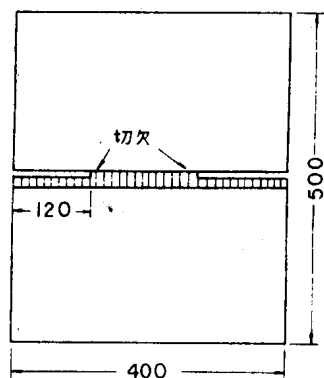


図7 溶接継手つき Deep
Notch Test 試験片

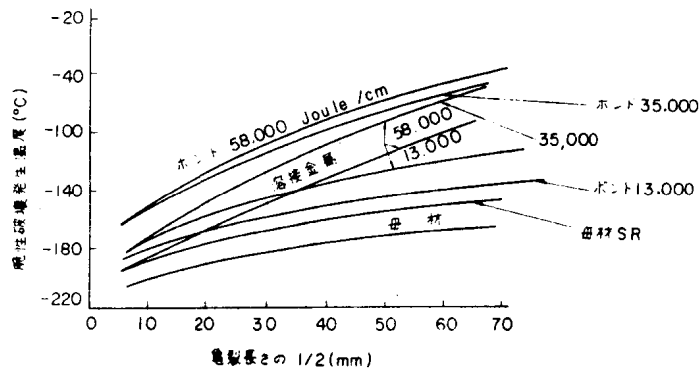


図 8 HT80 の母材，ボンド，溶接金属の亀裂長さの
 $\frac{1}{2}$ と脆性破壊発生温度の関係 ($\sigma = \sigma_y / 2.5$)

つぎに，HT60 の脆性破壊発生特性
 の 1 例を図 9 に示す⁴⁾。溶接入熱量が
 15,000 Joule/cm (手溶接) から
 39,000, 60,000 Joule/cm (自動溶
 接) へと増加してもボンドや溶接金属
 の特性にほとんど影響をおよぼさない。

HT100 の場合の 1 例を図 10 に示す。
 手溶接の場合，溶接入熱量による脆化の
 差はみられないが，前述の他鋼種より脆
 性破壊発生温度は高くなっている。

低温構造用鋼としての 9 % Ni 鋼の母
 材とボンドの特性を図 11 に示すが，い
 ずれもきわめてすぐれていることがわか
 る⁵⁾。

つぎに，溶接入熱量がボンドの脆化におよぼす影響を HT60 ないし HT100 についてもとめた例
 を図 12 に示す⁶⁾。図は日本溶接協会鉄鋼部会 EW 委員会での供試鋼の一部についてもとめたも
 のである。図より，HT60 では溶接入熱量が相当大きくなってもボンドの脆化はすすまないが，
 HT80 の A と B ではサブマージ溶接によるボンドの脆化が顕著であることがわかる。

(b) 溶接金属

溶接金属の脆性破壊発生温度と溶接入熱量の関係を図 13 に示す⁶⁾。同一材料で入熱量のこと
 なるものを破線によりむすんでいるが，入熱量の影響は小さいことがわかる。図 8 でボンドと溶

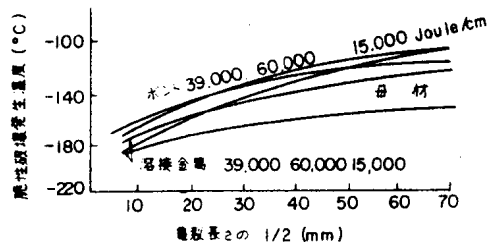


図 9 HT60 の母材，ボンド，溶接金属の亀
 裂長さの $\frac{1}{2}$ と脆性破壊発生温度の関係
 ($\sigma = \sigma_y / 2.5$)

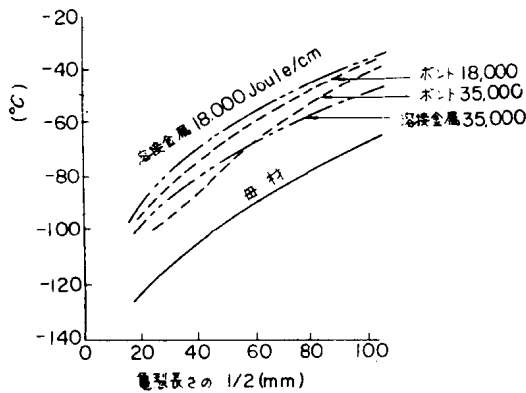


図 10 HT100 の母材、ボンド、溶接金属の亀裂長さの 1/2 と脆性破壊発生温度の関係 ($\sigma = \sigma_y / 2.5$)

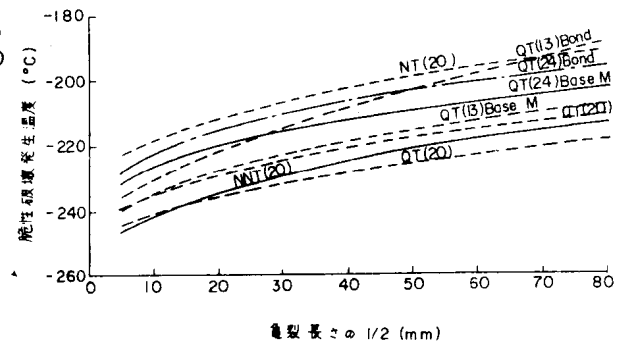


図 11 9%Ni 鋼の母材とボンドの脆性破壊発生温度と亀裂長さの 1/2 の関係 ($\sigma = \sigma_y / 2.5$)

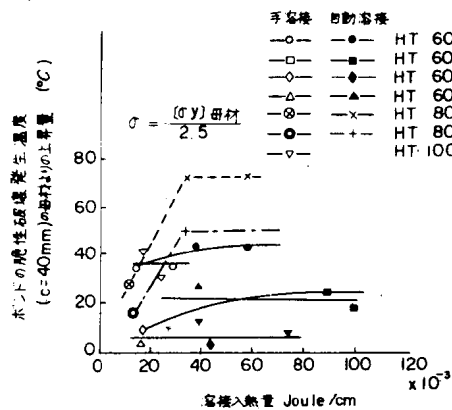


図 12 ボンドの脆性破壊発生温度 $[T_i]_{c=40}$ と溶接入熱量の関係 ($\sigma = [\sigma_y] \text{母材} / 2.5$)

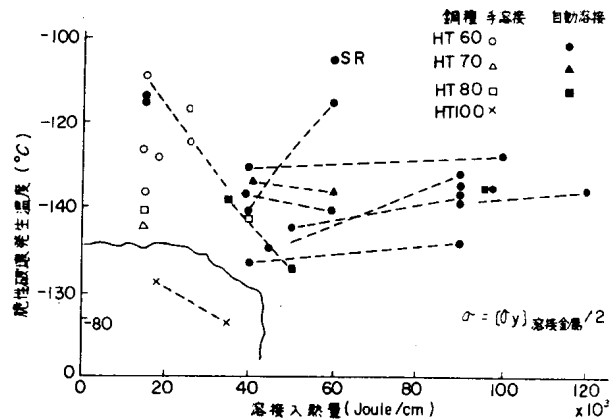


図 13 高張力鋼用溶接材料による溶接金属の脆性破壊発生温度と溶接入熱量の関係 ($\sigma = \sigma_y / 2.5$)

接金属が同等の特性を有すること、すなわち、バランスのとれた溶接継手が要求され、いたずらに溶接金属のみをよくするのは賢明ではない。

2.1.4.2 角 変 形

溶接工作の不備により、2枚の鋼板が同一平面内に溶接されないで、溶接継手部でいくぶん折れ曲がったようになっている（角変形が生じていると称する）場合、図 14 に示すように、角変形が大きいほど脆性破壊発生温度は上昇する⁷⁾（HT80 をサブマージ溶接した場合）。

2.1.4.3 表面切欠と角変形の重畳

溶接継手部のボンドに表面切欠が存在し、さらに角変形が重畳する場合については次式が適用される（図 15）⁸⁾。

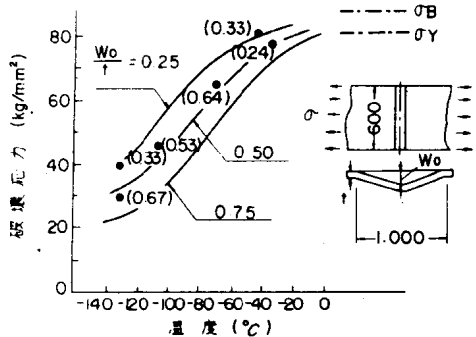


図 14 広幅継手試験板の破壊応力-温度曲線

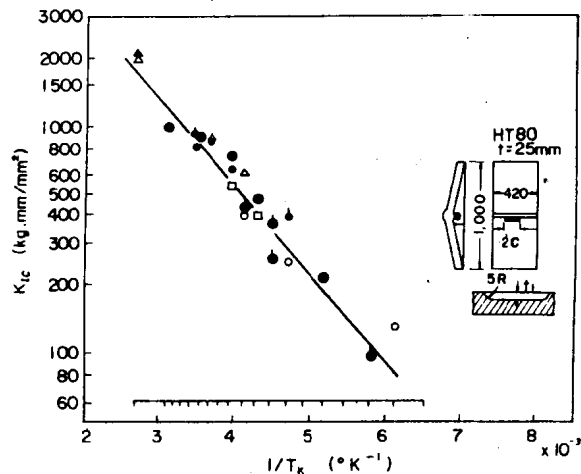


図 15 切欠長さ、切欠深さ、角変形がことなる場合の K_{IC} の対数と絶対温度の逆数の関係

$$K_{IC} = K_P + K_B$$

$$= f(c/b) \frac{t_1}{t} \sigma \sqrt{\pi c} + \frac{f(c/d)}{f(t_1/t)} \cdot Y_B \cdot \frac{e}{t} \frac{t_1}{t} \sigma \sqrt{\pi c} \quad (10)$$

ただし、

$$f(c/b) = \sqrt{\frac{2b}{\pi c} \tan \frac{\pi c}{2b}}, \quad f(t_1/t) = \sqrt{\frac{2t}{\pi t_1} \tan \frac{\pi t_1}{2t}} \quad (11)$$

$$Y_B = 1.99 - 2.47 \left(\frac{t_1}{t} \right) + 12.97 \left(\frac{t_1}{t} \right)^2 - 23.17 \left(\frac{t_1}{t} \right)^3 + 24.80 \left(\frac{t_1}{t} \right)^4$$

$2c$ = 切欠長さ, $2b$ = 試験片幅, t_1/t = 切欠深さ比, e = 角変形 (1 mにつき)

2.1.5 溶接残留応力

2.1.5.1 残留応力分布

縦継手および十字継手において、溶接残留応力 (縦継手方向) の分布はそれぞれ図 16(a), (b) に示ようになる。各種高張力鋼の縦継手方向の応力の引張最大値を縦継手の場合 (σ_1) および十字継手の場合 (σ_2) についてもとめ、各鋼種の降伏点の規格値 σ_y との比をとると表 1 に示ようになる⁹⁾。

2.1.5.2 脆性破壊発生特性への影響

図 16 に示す溶接残留応力が重畳する場合の亀裂の拡大にともなう歪エネルギーの解放率は一様応力の場合より大きくなる。残留応力の有無の場合の脆性破壊発生温度と亀裂長さの 1/2 の関係の 1 例を図 17 に示す。図より、残留応力の重畳により脆性破壊発生温度は数 10 度上昇する。

表 1 各種高張力鋼の縦継手および十字継手の最大引張残留応力と保証降伏点

鋼種	σ_y^a	σ_1^b	σ_1/σ_y	σ_2^c	σ_2/σ_y
HT 60	50	42	.84	54	1.08
HT 70	60	44	.73		
HT 80	70	45	.64	48	0.69
HT100	80	48	.53		

a, 保証降伏点

a, b, c, 単位 kg/mm^2

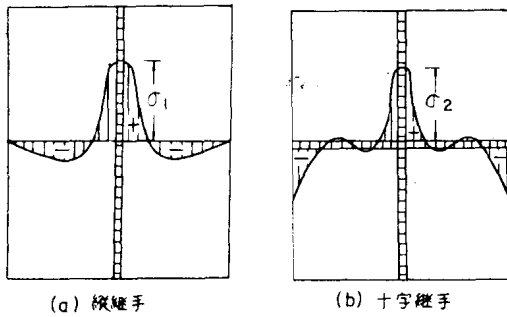


図 16 溶接残留応力分布

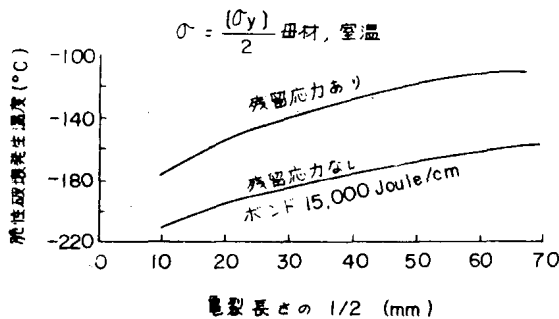


図 17 HT60 における残留応力の有無の場合の脆性破壊発生温度と亀裂長さの 1/2 の関係

各種高張力鋼について、 $c = 20$ および 40 mm の場合の脆性破壊発生温度の上昇量を降伏点にたいしてもとめると図 18 に示すようになり、残留応力の影響は大きいことがわかる⁹⁾。

2.1.5.3 表面切欠、角変形、残留応力の重畳

HT 60 型の LPG タンクの脆性破壊事故に関連して、表面切欠、角変形、残留応力が重畳する場合の破壊応力と温度の関係をしらべ図 19 が得られた。これらの因の重畳により脆性破壊発生温度がかなり上昇することがわかる¹⁰⁾。

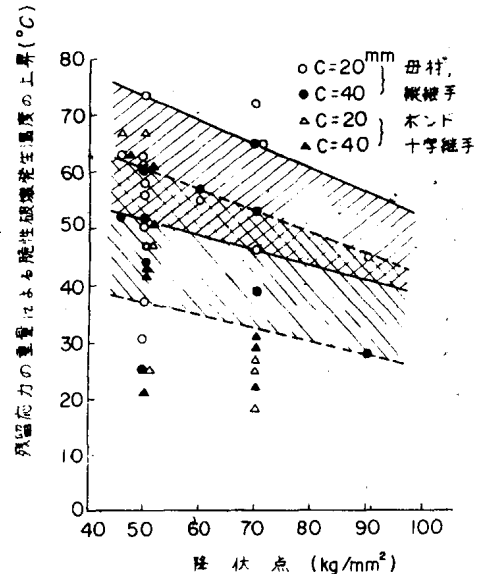


図 18 各種高張力鋼における縦継手および十字継手の残留応力の重畳による脆性破壊発生温度の上昇量の推定値 ($c = 20, 40 \text{ mm}$)

2.1.5.4 応力除去焼鈍

(a) 残留応力

残留応力の影響をのぞくために応力除去焼鈍（SR処理）がおこなわれる。図 20 に示す試験片に 320, 520, 620 °C × 1 hr の熱処理を加えると破壊応力が上昇することが図 21 よりわかる¹¹⁾。

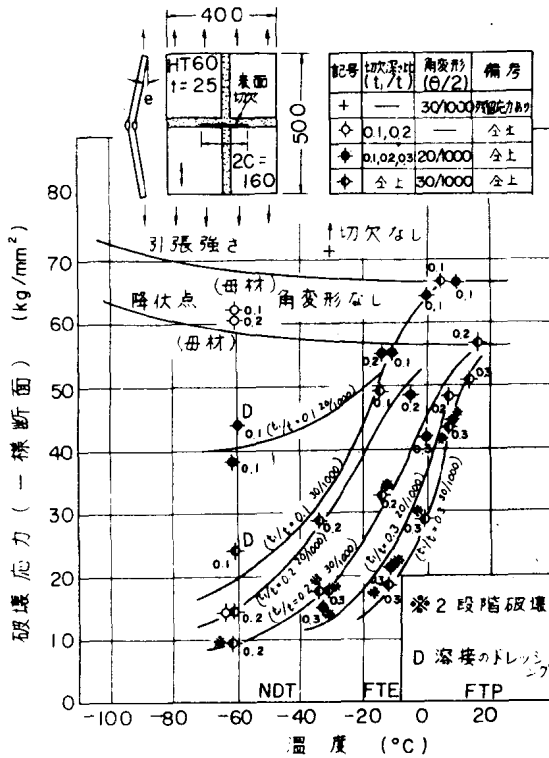


図 19 表面切欠，角変形，残留応力付きの十字継手試験片の破壊応力（一様断面）と温度の関係

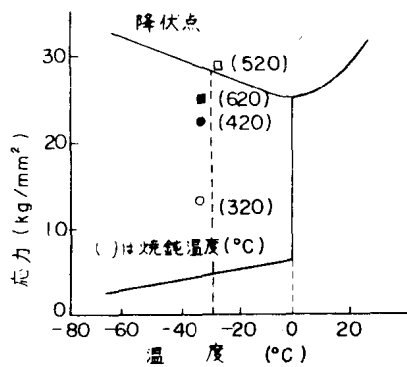


図 21 応力除去焼鈍の影響

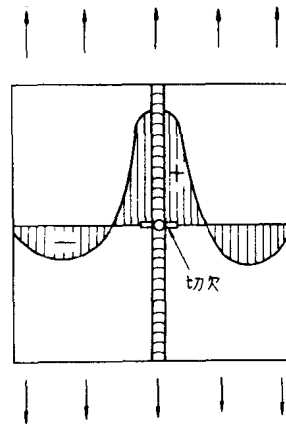


図 20 溶接ビード付き広幅引張り試験片の残留応力分布

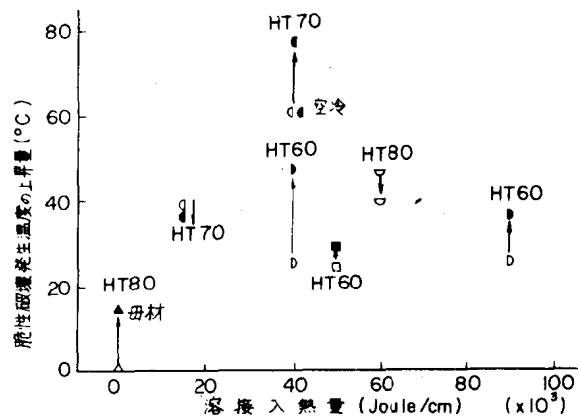


図 22 SRによる脆性破壊発生温度の上昇（降下）量と溶接入力熱量の関係〔ただし，HT70での空冷（1例）以外は炉冷〕（ $\sigma = \sigma_y$ ボンド/2.5）

(b) 材質変化

SR処理により材質が影響を受ける。図22はボンドについてのSR処理の有無による脆性破壊発生温度 $[T_i]_{c=40}$ の上昇 $\uparrow$ または下降 $\downarrow$ を溶接入熱量にたいしてもとめたものである。ただし、母材をベースにしている。HT70の40,000 Joule/cmの1例(空冷)以外は炉冷のものである⁶⁾。図より、SR処理による脆化はせいぜい20℃位であり、材質の改善されるものもあるようである。

2.1.6 塑性歪

通常、曲げ加工時の塑性歪はせいぜい2～3%といわれている。曲げ加工と引張りによる载荷方法の差異の材質脆化への影響はあまりないようである。軟鋼、HT60、HT80(2例)、HT100の場合の素材と塑性加工後の脆性破壊発生温度 $[T_i]_{c=40, \sigma=\sigma_y/2.5}$ の差と塑性歪の関係を図23に示す¹²⁾。HT60とHT80では脆化は少ないことがわかる。

なお、溶接おきビードの材質(脆性破壊発生特性)への影響はなく、線状加熱も脆性破壊発生特性にほとんど影響しない¹³⁾。

図20の試験片に限界温度 T_c 以上の温度で予荷重をあたえると、除荷により残留応力は減少して低温で荷重を加えても低荷重破壊することなく、破壊応力は予荷重での応力より若干高くなることが図24よりわかる。

なお、熱間加工によっても材質が脆化することがある。

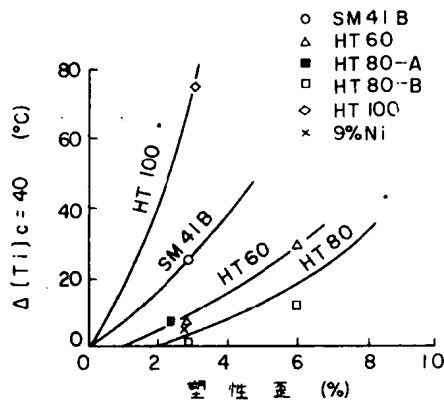


図23 塑性歪と脆性破壊発生温度の上昇量の関係

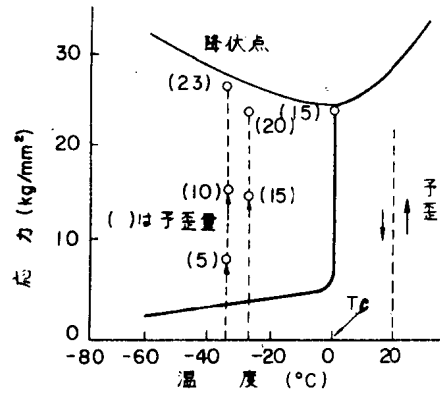


図24 予歪による残留応力除去の影響

2.1.7 衝撃応力

切欠のある大型試験片に衝撃引張荷重をあたえる装置がないので、やむを得ず、切欠部に局部的に衝撃荷重をあたえて衝撃応力の重畳による脆性破壊発生温度への影響をしらべる方法がおこなわれている。図25に示すESSO試験片において、Vノッチに楔を打ちこむと切欠き先端には衝撃応力が一様応力に重畳されるとともに、歪速度が大きくなるために降伏点が上昇して切欠き先端