

80キロ高張力鋼の球形タンクへの応用

海 野 三 蔵*
小 林 昭 夫**
松 本 勉***

I ま え が き

今回八幡製鉄により開発された80キロ高張力鋼は、かねて米国のU. S. Steel 社より輸入され石川島播磨重工により球形タンクの材料として活用されてきたT-1鋼と同様の低炭素合金鋼であり、引張り強さ、降伏点応力の高さのみならず低温における切欠靱性の高いことで著しい特長をもつ優秀な鋼材である。WEL-TEN80と呼ばれるこの高張力鋼は、工業的規模で生産されるようになった後も各種の厳密なテストを行い、後記の如く良好な性質が確認されている。

この鋼材は、八幡製鉄戸畑工場内の酸素圧送設備のレシーバーとして設置された440 m³の球形タンク材料として使われ、次に同一目的での500 m³の球形タンク材料として使用された。以来この鋼材は各種の用途に用いられつつあるが、本文は代表的な一例として440 m³の球形タンク製作にあたっての二、三の事項を報告して参考に供したい。

II WEL-TEN80について

WEL-TEN80の特性を知るため、工場生産された鋼材について試験を行った結果、WEL-TEN80はT-1鋼に比して靱性、溶接性共にややすぐれた性質を示した。以下に試験値の一部を示す。

i) 化学成分

厚 さ	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B
12.7 mmおよび 25.4 mm	0.12	0.24	0.76	0.012	0.009	0.25	0.92	0.53	0.38	0.06	0.0021
45 mm	0.13	0.22	0.67	0.023	0.011	0.22	1.02	0.49	0.42	0.07	0.0027

表 1

ii) 引張り及び曲げ試験

* 八幡製鉄KK技術部鋼材試験課長 工博

** 石川島播磨重工業KKプラント設計部プラント設計二課長

*** 八幡製鉄KK市场部

厚さ	方向	引張試験				曲げ試験
		降伏点 kg/mm^2	引張強さ kg/mm^2	降伏比 %	伸び %	
12.7	L	80.7	84.3	96	28.4	$r=1.5t$ 良
	C	80.8	85.0	95	27.4	
20.0	L	84.3	88.2	96	32.4	//
	C	85.0	88.7	96	32.7	
25.4	L	85.0	88.2	96	36.0	//
	C	82.9	85.2	97	37.0	
45.0	L	79.2	84.4	94	26.3	$r=2.0t$ 良
	C	79.7	85.0	94	25.7	

注：12.7mm、20.0mm、25.4mmはJIS 5号 45mmはJIS 4号

オ 2 表

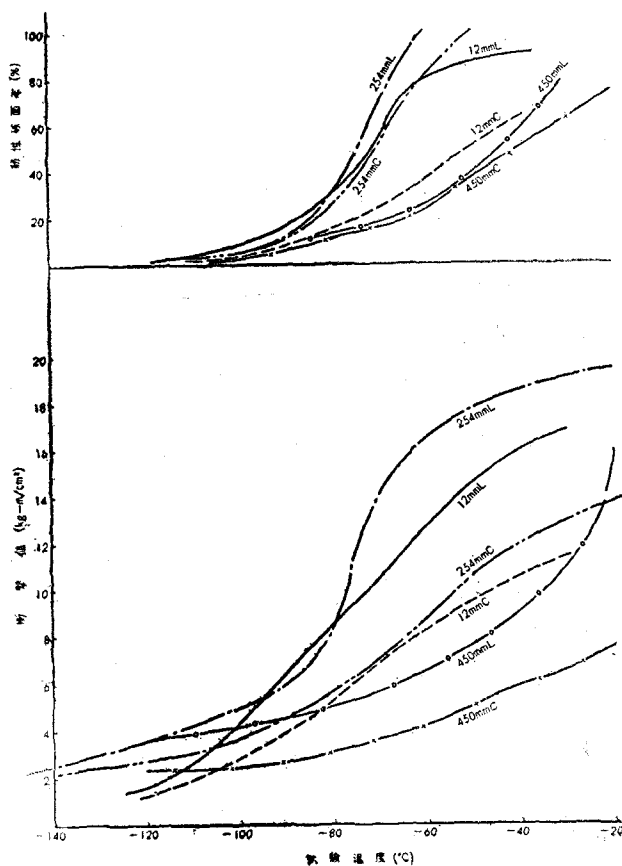
左表に見られる如く、
WEL-TEN80は極めて高い降伏比を示している。

iii) 切欠靱性試験

(1) シャルピー試験

2mmVノッチの遷移曲線および各種ノッチによる遷移温度を示す。

2mmVノッチシャルピー試験



オ 1 図

厚 さ mm	試験 方向	2mm V ノッチ		2mm Uノッチ	5mm Uノッチ	プレスノッチ
		Tr15 (°C)	Trs (°C)	Tr15 (°C)	Tr15 (°C)	Trc (°C)
12.7	L	-107	-70	-159	-139	-36
	C	-96	-50	-159	-140	-20
25.4	L	-140	-77	-158	-149	-69
	C	-133	-74	-156	-148	-50
45.0	L	-130	-48	-157	-146	-38
	C	-110	-40	-155	-142	-25

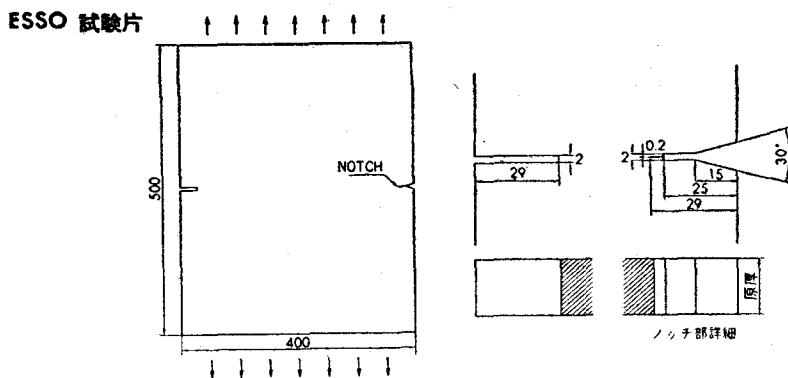
注：Tr15 …… 各試験において衝撃エネルギーが15ft-lb を示す温度

Trs …… 破断面の 50 %が靱性破面を示す温度

オ 3 表 各試験遷移温度表

(2) ESSO 試験

大型試験による割れ発生特性を調査するため、ESSO試験を行った。試験片および結果を下に示す。



オ 2 図

厚 さ	試験片採用方向	Tri (°C)	T24 (°C)
12.7 mm	L	-82	-97
	C	-66	-77
25.4 mm	L	-50	-77
	C	-64	-75

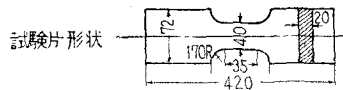
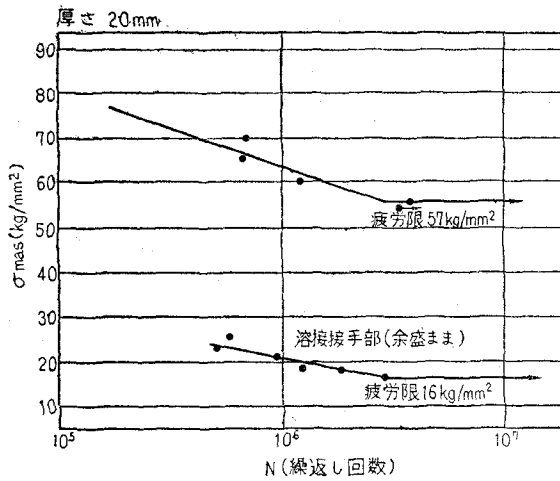
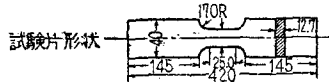
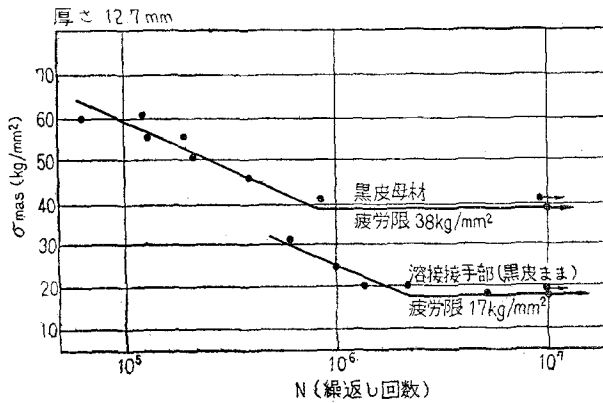
注：Tri …… 応力を降伏点の $\frac{1}{2}$ をとったときの脆性破壊の非発生温度

T24 …… 応力を 24 kg/mm^2 にとったときの値

オ 4 表

iv) 疲労試験

20トンおよび50トン万能疲労試験機を用いて、片振り引張り疲労試験を行った。結果をオ
3図に示す。



- 注：(1) 20トンおよび50トン万能疲労試験機
(2) 溶接条件120℃に予熱4mmφ⑤ L-80使用
(3) 板厚20mmは25.4mm鋼板を研磨したもの

オ 3 図

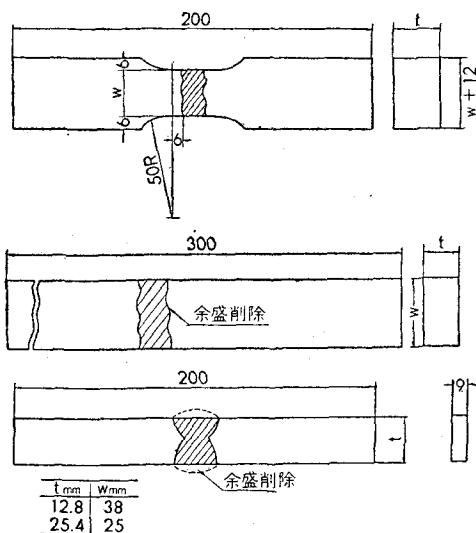
V) 溶接継手強度試験

板厚 12.7 mmおよび 25.4 mmのものについて、60°X型突合せ継手により、引張り、側曲げ、自由曲げの試験を行った。溶接棒は WEL-TEN80用として作られた ⑤ L-80を使用した。結果は下表の如く、いずれも母材の公称降伏点を満足し、かつ何等の欠陥なく屈曲することが確認されている。

厚 さ mm	応 力 除 去 温 度 ℃	降 伏 点 kg/mm ²	引 張 強 さ kg/mm ²	破 断 位 置	側 曲 げ	自 由 曲 げ
12.7	な し	77.8	82.2	溶接金属	良 好	>30% 割れなし
	590±10	76.0	80.5	溶接金属	良 好	>30% 割れなし
25.4	な し	76.5	87.0	溶接金属	良 好	>30% 割れなし
	590±10	80.8	84.0	溶接金属	良 好	>30% 割れなし

才 5 表 引張および曲げ試験

試験片形状



才 4 図

溶 接 条 件

使 用 棒 径 4mm、5mm
棒 乾 燥 温 度 370±15℃、1時間
貯 蔵 温 度 150±15℃
電 流 極 性 直流逆極、 4mm、140～160 A

5mm, 210~230A

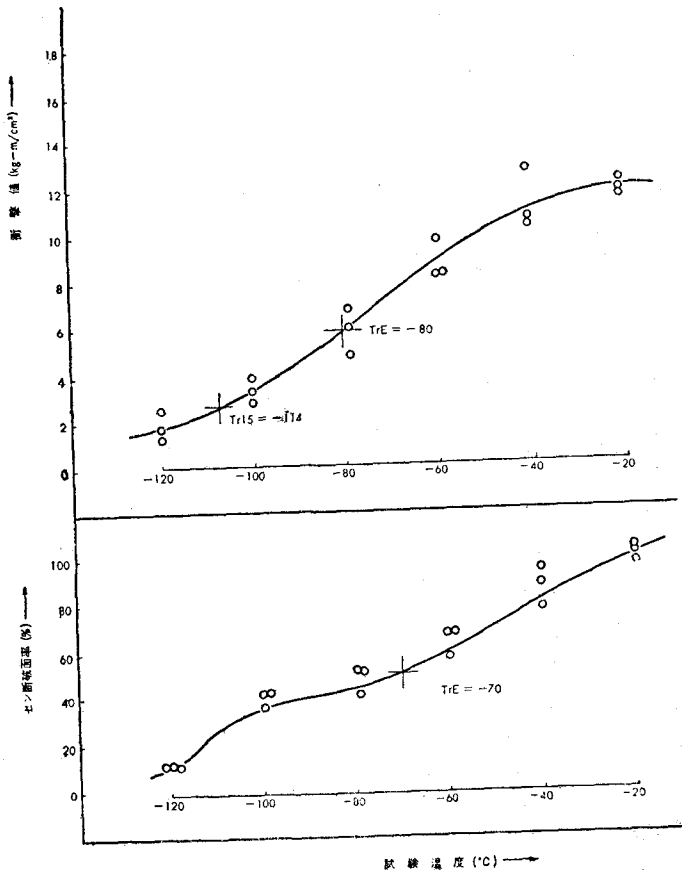
予熱温度 120~150°C

層間温度 180~200°C

vi) 溶接継手シャルピー試験

溶接継手部の切欠靱性を知るため、各種ノッチによるシャルピー試験を行った。溶接条件は溶接継手強度試験のときと同様で、開先角度20°、開先間隔は12mmである。2mmVノッチの遷移曲線をオ5図に、各種ノッチの遷移温度をオ6表に示す。

2mm V ノッチシャルピー試験



オ5図 2mmVノッチシャルピー試験(厚さ 2.54mm)

切欠の種類	遷移温度	厚さ 25.4 mm	厚さ 12.7 mm
2 mm V ノッチ	Tr E	- 80°C	- 69°C
	Tr 15	- 114°C	- 90°C
	Tr S	- 70°C	- 77°C
2 mm U ノッチ	Tr 15	- 166°C	- 156°C
	Tr 20	- 163°C	- 153°C
	Tr S	- 90°C	- 88°C
プレスノッチ	Tr E	- 50°C	- 52°C
	Tr S	- 66°C	- 52°C

表6 遷移温度表

VII) T型隅肉割れ試験

JIS-Z3151によりT型隅肉割れ試験を行ったが、磁気探傷法で検査の結果、厚さ12.7 mm、25.4 mmともに割れの発生は認められなかった。

VIII) 小型リーハイ型割れ試験及び小型鉄研式割れ試験

前者は溶接棒の割れ感受性を表わし、後者は鋼材の割れ感受性を表わす試験である。両試験の結果、WEL-TEN80の割れ防止に必要な予熱温度は100°C程度であり、割れ感受性の点ではT-1鋼と同程度であること、および⑤ L-80溶接棒はWEL-TEN80よりも割れ感受性が低く、高温保存されて含有水素量の少ない場合は割れ防止に必要な予熱温度は75°C程度であることが分った。

III 高張力鋼使用による経済的利益

WEL-TEN80の代表的応用例として取り上げた440 m³球形タンクは表6図の如き形状で、設計圧力24 kg/cm²G、常用圧力22 kg/cm²G、幾何容積440 m³、球内径9440 mm、板厚25.4 mmを使用している。

このタンクは酸素ガスの圧送設備のレシーバーで、圧送に必要な最低圧力は7 kg/cm²Gであり、それ以上の圧力での貯蔵分は酸素ガスの需要供給のアンバランスのためのクッションとなるわけで、その量は440×(22-7)=6600 N m³となる。もし46キロの炭素鋼板を用いて製作した場合、同一仕様では板厚約60 mmを要する。この厚さは応力除去をしない現地溶接を主体とする球形タンクには不適当と考えられている。現地溶接構造物の板厚の限度をいくらで押えるかは

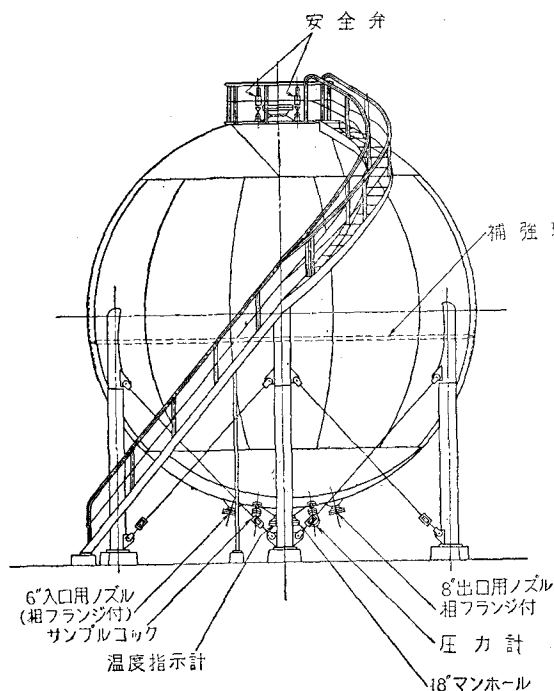


図 6

仕 様

球 内 径 9,440 mm

幾 何 容 積 440 m³

設 計 圧 力 24 kg/cm² (G)

最 高 使 用 圧 力 22 kg/cm² (G)

使 用 鋼 材 球 本 体

WELTEN80 (25.4 mm)

脚 柱

WELTEN80 SS41

興味のある技術的問題であるが、米国の ASME Code の例を参考とすれば一般的には 1 1/4 inch (31.8 mm) であり、衝撃値の高い材料 (ASTM A-300 を合格した材料) では 1 1/2 inch (約 38 mm) が特として認められているにすぎない。従って、最高板厚を 1 1/4 inch で押えた場合、普通鋼使用では最高圧は 15 kg/cm²、最大容量 250 m³ となり、常用圧力を最高圧力の 2 kg/cm² 下とすればその有効貯蔵量を同一にするためには 4.5 個を必要とし、合計重量は 250 ton となる。

	A	B	B/A
使 用 材	80 キロ高張力鋼	46 キロ炭素鋼板	
仕 様	440 m ³ × 1 基 設計圧 24 kg/mm ² 板 厚 25.4 mm ガス量 (24-2-7) × 440 = 6,600	250 m ³ × 4.4 基 設計圧 15 kg/mm ² 板 厚 31.7 mm ガス量 (15-2-7) × 250 = 1,500 個 数 4.5 を要す	
鋼 材	65 Ton	55 Ton × 4.5 = 250 Ton	3.9 倍
付 属 品	1	5	5 倍
敷地面積	900 m ²	2,800 m ²	3.1 倍

表 7

80キロ高張力鋼板は普通鋼に比し、遙かに高価で、加工費、溶接ともコストは高くつくが重量65ton程度しか要さないで、普通鋼使用の場合と較べると3.9分の1となり著しく割安となり、附属品の費用、敷地面積(隣接構造物との必要間隔10mとして)はそれぞれ大きな差が生ずるので、球形タンクの材料としての80キロ高張力鋼の経済的な効用は極めて大きなものがある。

勿論、前述の比較は普通鋼材との比較であり、既に60キロ高張力鋼が広く普及している現状ではあるが、球形タンクのごとく鋼板に生ずる応力が殆んど張力である形状では切欠靱性の高い高張力鋼の優位さは容器の高圧化、大容量化と共にますます認識されるであろう。

Ⅳ 設計応力について

今回の球形タンクの設計は、その溶接部の最高引張り応力が2380kg/cm²以下になる様に設計された。これは高圧ガス取締法による高圧設備として「引張強さ又は降伏点応力の1.6倍に対し安全率4を取り」更に溶接効率(85.2%)を乗じたものである。

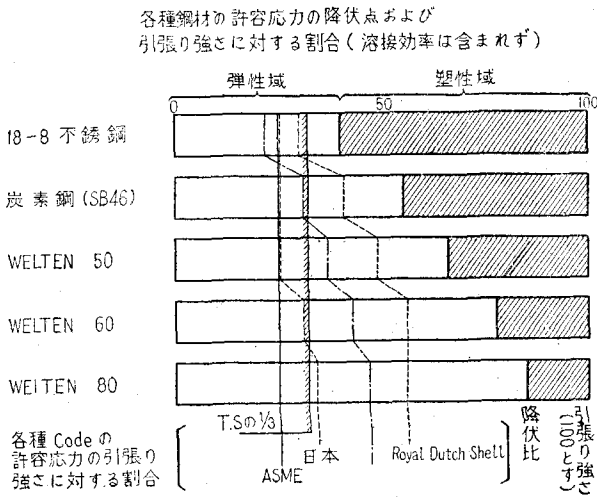
労働安全衛生規則では、引張り強さの1/4又は降伏点の1/2.5を取る事になっており、溶接効率は同じ85.2%である。この2つの方式は結果的には全く同一の許容応力となっているが、この種の高降伏点応力に対する許容応力は世界各国のCodeがいずれも異り、又しばしば変わってきたが、傾向としては絶えず高応力を許容する方向に向っている。

米国のASMEのUnfired Pressure vessel Codeは許容応力を引張り強さからの比率(かつては1/2、現在は1/4)で取り、各国の法規中もっとも保守的であると評されている。

ただし溶接効率は100%(X Ray 検査合格のもの)をとり、溶接部の強さに対する信頼度はもっとも高い。

ドイツのDINは完全な降伏点Baseで安全率は1.8である。

オ7図は各種鋼材の許容応力と引張り強さ、降伏点に対する割合をまとめたものである。この表のとおりASMEの規定の様な引張り強さ規準では降伏点の低いやわらかい材料(例えば不銹鋼)では圧力試験時に降伏点に到達する危険が生じ、また高降伏比をもつ鋼材では降伏点に対し余りに安全側となる。



オ 7 図

勿論、疲労強さその他材料の破壊に大きな影響を与える要素が存在し、PVRC (Pressure vessel Research Committee) 等は引張り強さ Base を無視出来ないとの Report を出しているが、脆性破壊を生じないと、与えられる温度では降伏点以下で生じた破壊例は殆んどないので米国に於いても高降伏点鋼材に対して降伏点基準は広がりつつあり NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) の Code は T-1 材料に対しては多く適用されている。才 8 表は米国に於ける各種の Code および Inquiry に基く T-1 鋼 (80 キロ高張力鋼) の許容応力をまとめたものである。

		Nominal Stress PSI	Joint eff %	Design Stress PSI	Kg/cm ²	
1.	Inquiry to ASME Boiler Code *2 50% of min yield strength	50,000	100	50,000	3,500	*1 T-1 鋼は Y.P. 100,000 P.S.I. 以上 ultimate strength 115,000 ~130,000 P.S.I. で国産 80kg ハイ テンと全く同一 の機械的性質で ある。
2.	Suggested for critical design *3 1/3 of min ultimate strength	38,500	100	38,500	2,700	
3.	NACA Specifications 40% of *5 min yield	40,000	90	36,000	2,540	
4.	API low-pressure rules applied to T-1 (0.5 PSI to 5 PSI gas pressure at top, smaller of 60% of min yield or 1/3 of min ultimate strength)	38,500	95	26,500	2,560	*2 *3 現在 ASME で discussion され ている案 *3 案は M.W. Ko- llong より 1955 以来主張されて 将来 ASME の Un- fired Pressure vessel に正式に 採用されて可能 性がある。
5.	5 PSI to 15 PSI gas pressure at top 1/4 of min ultimate strength *4	28,800	95	27,300	1,970	
6.	Inquiry to ASME Boiler Code smaller of 62.5% min yield or					*4 API ASME が ASME の 8 章に統 合されて以来採 用される事はマ レである。 *5 現在 もっとも 米国で多く採用 されている T- 1 の設計方式。
7.	1/4 of min ultimate Core 1204, ASME Code (Unfired Pressure vessel) 1/4 of ultimate *6	28,800	100	28,500	2,030	
		28,800	100	28,800	2,030	
8.	高圧ガス取締法 1/4 of ultimate or 1.6 times of yield 労働安全衛生規則 Safety factor 2.5 for yield 1/2 of ultimate	40,000 (28.2 g/mm ²)	85.2	34,000	2,400	

才 8 表 T-1 鋼 *1 の設計応力に関する案と現行 Code

これら各種の Code の内、Royal Dutch Shell の規格は一民間会社の規格であるが、現在使用されているものではもっとも高い許容応力を認めている点で注目値する。

即ち、降伏点の 75% 又は引張り強さの 55% のうち低い方を設計応力として認めたもので、溶接効率は 90% である。同 Code は設計計算書で Load について極めて細かく明示してあ

り実際応力が code 許容応力を超えない配慮を払っている。

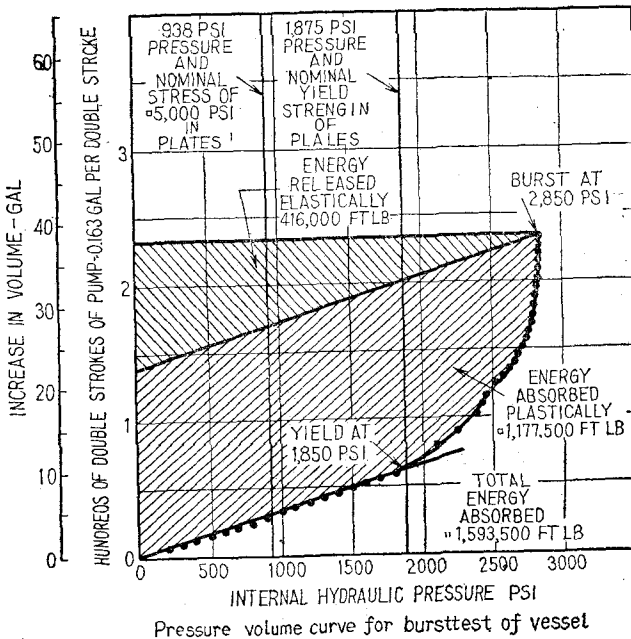
しかし、優秀な設計者は生じ得べき応力に対する十分な解析能力を持っている事を前提とすれば、製作技術の進歩を合わせ考え、高降伏点鋼に対する許容応力は更に上る余地があると云えよう。

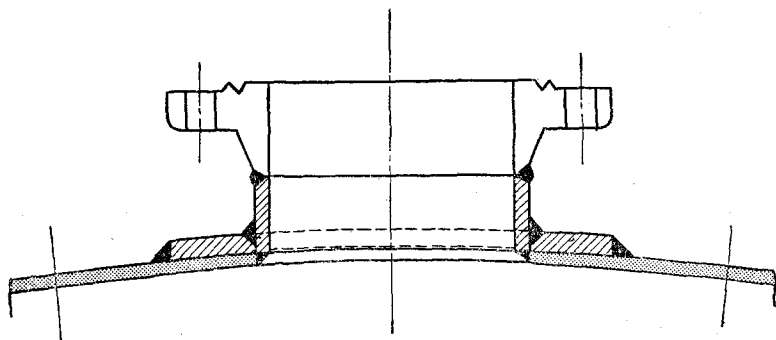
V 開口部分について

ノズル等、開口部分の設計は高張力鋼使用の場合特に注意を要する個所である。

現在迄この種の合金調質鋼による 80 キロ高張力鋼を使用した破壊実験は 1952 年に米国の Chicago Bridge & Iron 社が、1957 年に石川島重工が行って居り、いずれの場合も設計圧より遙かに高い圧力でも破壊せず、降伏点応力程度の over stress をかけ且つ大きな衝撃荷重を与えて初めて胴体に龜裂が生じている。いずれの実験でも -40°C 程度で十分な靱性を示し脆性破壊の恐れは全然なく、その破断に至る「圧力-膨脹線図」は十分納得のゆくものである。才 8 図は CBI 社の T-1 使用 ($Y_P = 90,000 \text{ Psi}$ の時代) の場合の線図である。

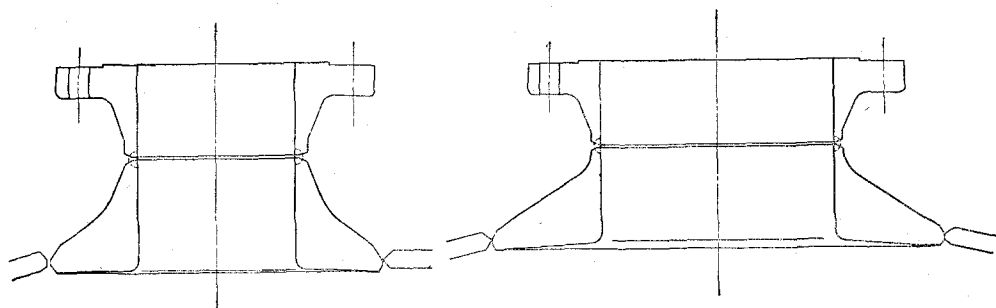
この場合の破断はマンホール取付部より始まる tear crack であった。





オ 9 図

オ 9 図は代表的な開口部の補強断面図であり、破断は Y.P. を超えて生じているのでこの補強効果は一応十分とは云えるが、開口部補強部近辺からの tear crack の例の多いこと、又図に示す通り球体の如く突合わせ両側溶接でなく、隅肉溶接と一方向からの V 開先で X Ray 検査が困難であり、2 枚合わせなので大きなラミネーションを残す厚板に近い構造なので応力集中の高い部分に適用する事は好ましくない。80 キロ高張力鋼ではこの応力集中部に生ずる高い応力と切欠効果、溶接施工の点から考えてオ 10 図の構造が望ましい。



オ 10 図

又特に注意した溶接を行った上、応力除去をなし、X 線、マグナフラックス test により溶接施工を確認すべきであろう。今回の 440 m^3 の設計はこの方法をとっている。

VI 拘束部分について

高張力鋼の使用は即ち高い歪を球胴板に認める事であり、これらの伸びの拘束は著しい局部応力を生ずる。

例えば、球体胴板各部は球中心から内圧の増加と共に拡がるうとし、その量は許容応力に比例

するので配管等がもし完全に Rigid であればその据根は高い曲げ応力と剪断応力を生ずる。

普通配管部についてはバランス・タイプ・エクспанション・ジョイントで容易に解決できるが、脚柱による抵抗その他不可避的ないくつかの拘束があるので、そのための局部曲げ応力と membrane stress との合成応力を極力小さくする努力を払わねばならない。

曲げと引張りとの合成応力の許容値については、いわゆる「安全率」で吸収して了っていて法規上明確でない場合が多いが、外国の傾向では通常許容応力の 50% over 程度迄ならはつきりと認める傾向がある。高張力鋼タンクの設計の場合特に疲労との関連を注意すべきである。

又、脚柱、梯子等当然普通鋼を使用する部分も多いがこれらを球体に直接取り付けの事はさけるべきと考えられる。すなわち、球体の如き高応力部分には同一の高張力鋼のみと溶接し、明らかに低応力しか生じない部分で初めて普通鋼と溶接すべきであろう。これは普通鋼部分が大きな歪をうける球体の反復変位についていけないことが主な理由であるが、形状、溶接方法により著しく寿命を異にする疲労問題であるため、更に将来の研究が待たれる。

現在は、例えば W.L. Morgan の ASTM Meeting の報告 (Analysis of Brittle Behavior in Ship Plate) の "All parts attached to the structure by welding should be equal to those required in the main strength member" を否定する根拠は見当らない。

今回の 440 m^3 はノズル、脚柱上部、ブラケット等一切の応力部との溶接部は、一切 80 キロ高張力鋼を用いてある。

VII 製作と溶接

80 キロ高張力鋼のプレス加工は、その特性上当然の事乍ら高い Spring Back と強い反力とに注意せねばならない。又、曲げ加工は塑性度僅かに 1% 以下ではあるが降伏点が高いため大きな板の端部は相当な収縮が生ずるので予め考慮しておかねばならない。

ノズル部分等可成り大きい塑性変形を与える箇所ではこの材料の特徴である切欠靱性をなるべく落さない様設計に注意を要する。

溶接については他の機会に述べるが、溶接棒は ⑤ L-80 を用い、概ね満足すべき結果を得た。要は棒の乾燥、予熱等の細い条件についての管理方式、溶接者の熟練度である。

VIII あとがき

球形タンクの材料に 80 キロ高張力鋼を用いた場合の一例をあげて現行の設計方式の概略を書き記した。この鋼材はやがて球形タンク材料のもっとも重要な役割を果たすと期待されており、設

計方式も改善されて行くことであろう。安全を第一に考える圧力容器であるので、各方面からの研究、開発により資料が豊富となり、より安全、より経済的な球形タンクが製作される事を望んでやまないものである。