U.D.C. 621.791.753: 620.179.2: 669.14.018.295-413

厚板80kg/mm²高張力鋼溶接部の遅れ割れに 及ぼす拘束応力の影響

――高張力鋼の溶接(第1報)――

Effects of Restraint Stress on Delayed Cracks in the Welds of 80kg/mm² High-strength Thick Plate Steel —Welding of High-strength Steel (1)—



要

機器の大容量化に伴い各種構造物が大形化し80kg/mm²高張力鋼の使用が増大している。従来, 球形タンク などに25~32mmのものが使用されたが溶接部の割れおよび脆(ぜい)性破壊防止対策についてさらに解明する ため今回筆者らは大容量機器の適用を目的として, 厚板50mmの80kg/mm²高張力鋼の母材特性, 溶接性および 割れ, 脆性破壊などについて一連の検討を行ない, 一適正溶接条件の把握(はあく)および溶接部の割れ特性 を明らかにすることができた。この結果に基づいて, アメリカ・ギルボア納め水車接続管に世界で初めてサブ マージアーク溶接を採用し, 満足な結果を得た。今後は水車およびその他の機器への適用を予定している。

旨

機器の大容量化に伴い構造物はますます大形化し,設計応力も 高くなり,高強度,高靱(じん)性の高張力鋼を使用しなければな らない状態となっている。一般に溶接構造物として使用されてい る軟鋼材では強度の点から超厚板となるので溶接構造化に対して の問題が生じてきた。

言

緒

1.

そこで本研究はサブマージアーク溶接および被覆アーク溶接に よる80kg/mm²高張力鋼の多層溶接継手(50t×1,000*l*×400w)に 対して、実際の溶接施工条件で溶接直角方向に作用する拘束応力 と割れとの関係を求め、割れ発生限界拘束応力を求めた。

その結果,最大割れ発生限界拘束応力はサブマージアーク溶接 継手部では $\sigma_{cf} = 56 \text{kg/mm}^2$,被覆アーク溶接継手部では $\sigma_{cf} = 64 \text{kg/mm}^2$ となり,圧力容器などの水圧テストおよび運転時の応力を 想定しても遅れ割れの発生の危険はないものと推定された。

2. 実 験

2.1 供 試 材

表1は80kg/mm²高張力鋼板の化学組成および機械的性質を,表 2は80kg/mm²高張力鋼溶接材料の溶着金属の化学組成,機械的性 質および水素試験結果を示したものである。使用した溶接補材は,

サブマージアーク溶接の場合,
4.8φのワイヤと12×200メッシュのフラックス,被覆アーク溶接の場合は直径4φおよび
5φの被覆アーク溶接棒である。

2.2 実験方法

図1に示す形状および寸法



図1 TRC試験片の形状および寸法

straint Cracking以後TRCと称す) 試験片を図2の1,000tTRC試 験機に取り付けたあと,試験溶接を図3に示すように行なった。 試験溶接に先立って,溶接材料(LH-80棒およびKB-80Cフ ラックス)に所定の350°C×1hの再乾燥処理を施し,表3に示す ような条件で試験溶接を行なった。なお,試験片の予熱は開先か ら両側へそれぞれ200mmの範囲が所定の温度になるように実施し た。試験溶接はサブマージアーク溶接を行なったあと裏面をガウ ジングし,その後上向きで3パスの手溶接を行なった。被覆アー

表1 鋼板の化学組成および機械的性質

1日の	月張強さ	降伏点				6)	戊 (9	Щ Б	台 糸	匕	1	5	1.10		板厚	秳	幻況
m ²) (%)	(kg/mm^2)	(kg/mm ²)		В	v	Mo	Cr	Ni	Cu	S	Р	Mn	Si	С	(mm)	14.	MM
6 28.6	80.6	76.3	-	<0.01	<0.025	0.50	0.49	1.00	0.23	0.004	0.005	0.76	0.26	0.12	50	´mm²高 附板	80kg / 張力鎁
100	80.	76.3	-	<0.01	<0.025	0.50	0.49	1.00	0.23	0.004	0.005	0.76	0.26	0.12	50	´mm²高 附板 -TEN80	80kg/ 張力鎁 WEL-

の引張拘束割れ(Tensile Re-

- * 科学技術庁金属材料技術研 究所
- ** 日立製作所エンジニアリン グ推進センタ

*** 日立製作所日立研究所 **** 日立製作所日立工場

滚 接 材 料		化 学 組 成 (%)											降伏点	引張強さ	伸び	絞り	水素量
(ff) 14 17 17	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	v	B	Al	(kg/mm^2)	(kg/mm^2)	(%)	(%)	(cc/100g)
被覆アーク溶接棒 5mm¢	0.07	0.55	1.51				1.66	-	0.50	_	_	_	71.0	80.6	25.3	65.7	1.3
サブマージアーク 溶接ワイヤ 4.8mm ø	0.07	0.22	1 22	0 012	0.006		9 59	0.25	0.41	CO 02	CO 01	0.000	75 5	04.6		70.0	
サブマージアーク 溶接12×200メッシュ	0.07	0.55	1.32	0.012	0.000		2.52	0.35	0.41	0.02	<0.01	0.008	75.5	84.0	29.0	70.0	0.4 (川鉄測定)

302 日 立 評 論

VOL. 54 NO. 4 1972



(a) TRC試験機の外観



(b) 試験片の角変形測定

図2 1,000t TRC試験機と試験片取付状況

表3 溶 接 条 件

継三	手の	······	济拉次 劫	棒径	予熱・パス	溶接電流	アーク電圧	溶接速度	溶接入熱	/#: **
種	頖	八人奴	俗佞安务	(mm)	间 温 度 (°C)	(A)	(v)	(cm/min)	(J / cm)	1順 考
Ħ	P	1	下向き	4.0	150~200	180	25	8.6	31,400	被覆アーク 溶接
ブ	1	2	下向き	5.0	150~200	210	25	7.5	42,000	被覆アーク 溶接
7	ク ※	3~6	下向き	4.8	150~200	600	25	25	45,700	サブマージ アーク溶接
ジ	倍接	7	上向き	4.0	150~200	160	25	16.5	14,600	被覆アーク 溶接
	継	8	上向き	4.0	150~200	160	25	7.0	34,300	11
	手	9	上向き	4.0	150~200	160	25	4.7	51,000	"
被	溶	1	下向き	4.0	150~200	180	25	8.6	31,400	11
覆	接	2 ~ 7	下向き	5.0	150~200	240	25	9.0	40,000	"
P	継	8	上向き	4.0	150~200	160	25	16.5	14,600	"
1	手	9	上向き	4.0	150~200	160	25	7.0	34,300	"
7		10	上向き	4.0	150~200	160	25	4.7	51,000	被覆アーク 溶接



図3 試験溶接の状況







ク溶接継手部の試験の場合は表面に7パス溶接を行なったあと裏

3. 実験結果とその検討

3.1 サブマージアーク溶接継手の拘束応力と割れについて

サブマージアーク溶接継手についてTRC試験を行なった結果, 限界平均拘束応力値以上の負荷により遅れ破壊としての割れの発 生が認められた。発生した割れは溶接ビード表面の隣接ビード境 界にそった溶接金属たて割れであり,図5および図6はその代表 例を示したものである。

このような溶接金属たて割れは溶接ビード表面から1mm以下の 深さしか進展しないことが多かったが、平均拘束応力値が著しく 高い場合にはかなり深くまで進展したと思われる形跡が認められ た。その割れを溶接金属横断面上で顕微鏡観察すると、図5に示 したように、隣接ビード境界の後側に溶着した側の溶接金属に発 生し、境界線にそって進展していることがわかる。この部分は凝 固後の冷却過程がかなり速くなる部分であり、また、ビードとビ ードとの境界であるため、応力集中係数が高くなっている部分で ある。

溶接金属たて割れはある一定の潜伏期間を経た後に発生し,図 7に示すように時間の経過とともにある程度まで成長してゆくこ とがわかった。

サブマージアーク溶接に対して拘束応力を種々変えて行なった TRC試験結果を平均拘束応力値 omで整理して,後述の被覆アーク 溶接継手の試験結果とともに図8に示した。

これによると、サブマージアーク溶接継手の割れ発生の限界平

面をガウジングし、上向きで3パスの手溶接を行なった。その試
験溶接積層法は図4に示すとおりである。
試験溶接完了後,溶接線直角方向に所定の引張拘束を与え,そ
のままの状態で染色探傷法により時間の経過に伴う割れの発生状
況を調べた。約100時間までの負荷で割れまたは破断を生じない
試験片は荷重を取り去ったあと必要に応じて試験溶接部横断面の
割れ検査を行なった。

8

均拘束応力値は53kg/mm²であることがわかる。図8に示されたサブ マージアーク溶接継手の、平均拘束応力 $\sigma_m = 81 \text{kg/mm}^2$ で約135時間 の負荷を与えた試験片に対して、故意に強制破壊させたところ、継 手全長に脆性破壊を生じ破断した。その破面を観察すると、図9 から明らかなように溶接始端付近から終端近くまで溶接表面から 約1mm以下の深さまで溶接金属たて割れが発生していることがわ かる。この割れは図5に示す染色探傷により検出された割れに 厚板80kg/mm²高張力鋼溶接部の遅れ割れに及ぼす拘束応力の影響 303



割れ

のと考えられる。あとの二つの割れは内部で発生した割れである が,いずれも溶着金属の引張強さに近い高い拘束応力下で長時間 負荷されたことによって, 最初は小さな水素による遅れ割れが時 間の経過とともに成長していったものと考えられる。

図9(a), (b), (c)において注目される点は強制破断時の脆性破壊 が上記したような潜在した溶接金属割れから生じてはおらず、主 要な破壊の発生個所は図9(a)に示された目盛で約85mmの位置の板 厚方向上部より約5の個所と図9(c)の約415mmの位置のほぼ板厚 方向中心の個所の2個所と考えられる点である。





(c) 負荷時間135h



(c) 溶接終端側

図9 サブマージアーク溶接継手の破面 $(\sigma_m = 81 \text{kg/mm}^2)$

9

図7 サブマージアーク溶接継手部のたて割れの成長状況($\sigma_m = 81 \text{kg/mm}^2$)

相当しているものと考えられる。以上の割れ以外に試験片の強制 破断以前に図中に示す目盛で45~65mm, 210~225mmおよび 255~ 265mmの各範囲にかなり大きな溶接割れが潜在していたことが理 解される。このうち最初の割れは表面割れに連なっており、その 破断模様から推定すると,表面割れが内部へ向かって成長したも

304 日 立 評 論

3.2 被覆アーク溶接継手の拘束応力と割れについて

被覆アーク溶接継手のTRC試験の限界平均拘束応力値は図8よ り明らかなように58kg/mm²である。この値はサブマージアーク溶 接継手の場合よりも5kg/mm²高い値であり、また同一拘束応力値 でも割れ発生潜伏期間はサブマージアーク溶接継手の場合に比し、 2倍程度長くなることが判明した。

以上の結果より、今回の被覆アーク継手はサブマージアーク溶 接継手よりさらに遅れ破壊割れに対しては安全であることがわか った。

3.3 溶接金属たて割れに及ぼす表面仕上げの影響

今回のサブマージアーク溶接継手に認められた割れはきわめて 高拘束応力の場合を除き,溶接金属表面のビード境界に現われる かなり浅いたて割れであるため,溶接部のグラインダ仕上げを行 なえば,その発生を防ぐことが可能ではないかと考えられた。そ こでこの点を実験的に確かめるために,図10に示すようにビード とビードとの境界付近をわずかであるがグラインダ仕上げを行な って,サブマージアーク溶接継手に平均拘束応力値68kg/mm²で約 70時間のTRC試験を実施した。その結果表面には10mm程度の割れ が観察されたが,その長さはグラインダ仕上げを行なわない場合 よりもかなり短く,かつ横断面で観察した深さも仕上げを行なわ ない場合の約半分になっていた。

以上の結果から溶接金属のビード境界部をグラインダ仕上げし て、その切欠き効果を軽減するとともに、境界部近傍の急冷凝固 組織を削除することにより表面たて割れの発生をかなり軽減でき ることがわかった。この方法により表面たて割れの発生を完全に 防止すすためには溶接金属表面を数ミリメートル程度削除して境 界部をほぼ平滑に仕上げる必要があると考える。









図10 ビード境界部をグラインダ仕上げ加工した外観

3.4 表面作用応力の測定

10

今回のTRC試験では、過酷な試験をするために図4に示したように厚板の試験片のほぼ板厚半分しか試験溶接を行なっていない。したがって、板厚方向に均一な引張応力分布が期待されるかどうかを確かめるために、引張拘束を与えて割れの発生の認められなかった試験片の表側溶接金属表面数個所に、ひずみ測定用ゲージをはりつけて荷重を取り去った後に開放される弾性ひずみ量を測定した(図11参照)。このようにして測定した表面作用応力値は試験の負荷時に着力点間(中心線)を結ぶ線と試験溶接金属の板厚方向の中心点との偏心度 e の値(図12参照)により変化するので、e の値の変化による表面作用応力値 σ_f と平均拘束応力値 σ_m との比の値の変化を求めた。その結果、図12に示すように、 σ_f/σ_m の値は e の値にほぼ比例して変化するが、その値はさほど大きなものでないことがわかった。

3.5 溶接熱サイクル測定結果

サブマージアーク溶接継手についてはアルメルクロメル熱電対 により各パスのボンドにおける冷却過程を測定し各種冷却時間を 求めた。その実験結果を示したのが図13である。また参考のため にYスリット割れ試験で求めた冷却曲線についても図中に示した。 これよりTRC試験片の場合800°Cから500°Cおよび800°Cから300°C までの各冷却時間はそれぞれ約25秒および100秒であることがわ かった。次に溶接部からの水素の逃散に直接関係のある凝固直後

から100°Cまでの冷却時間は27分であった。

4.考察

今回行なったTRC試験で検出された割れはすべて表側溶接金属の表面たて割れであったので、図8に示したTRC試験結果は図12に示した測定結果を用いて、表側溶接金属の表面作用応力値で整理したほうがより正しい評価ができるものと考えられる。図14は



図14 最大拘束応力と割れとの関係

このようにして整理した結果を示したものである。図8と比較すると、割れ発生限界応力値が実際には3~6kg/mm²高くなっていることがわかる。

本実験は圧力容器を対象としたものであるが、このような圧力 容器の溶接継手には、溶接施工時の割れとそのあとの水圧試験時 の割れとの問題を含んでいる。今回行なったTRC試験結果から溶 接後の水圧試験時の割れについて検討を行なった。 れ発生を防ぐためにきわめて有効である。たとえば80kg/mm²高張 力鋼溶接継手のTRC試験において,負荷前に室温で24時間放置す ることにより,割れ発生限界拘束応力値が27kg/mm²上昇すること が判明している(図16参照)。

以上の検討結果から予熱 150℃,溶接入熱値約45,000J/cmで, 溶接施工する限りにおいては今回のサブマージアークおよび被覆 アーク両溶接継手はじゅうぶん管理された水圧試験において割れ 発生の危険はほとんどないものと推定された。溶接施工時に注意 すべき点としては、特にアンダーカットを生ずると、その切欠き 効果により遅れ割れの潜伏期間を縮め、割れ発生の危険性を生ず ることがあげられる。



一般に水圧試験値は設計水圧×1.3+3が採用されるようである。 したがって実際に割れ発生が問題になるのは溶接直角方向に作用 する応力による溶接継手のたて割れであると考えられる。いま, 図14において溶接ビードの表面作用応力値が80kg/mm²の場合には, サブマージ溶接継手の割れ発生の潜伏時間はほぼ6時間程度であ り,被覆アーク溶接継手についてはこれよりもさらに長時間にな る。この結果は換言すれば溶接完了直後に水圧試験を行ない,そ の最高水圧を連続してかけたとしても割れが発生するまでに6時 間程度の負荷時間を要するということである。参考として図14の TRC試験結果に対して拘束応力と割れ発生時間との関係を整理し て図15に示した。すなわち,この図より水圧試験時の局部応力が 70kg/mm²のときサブマージアーク溶接継手部の割れ発生限界時間 は約14時間,被覆アーク溶接継手部の割れ発生限界時間は約28時 間である。

現実に実施されている圧力容器の水圧試験ではかなり低い水圧 から漸次高い水圧へ移るように配慮され、かつそれぞれの水圧が 間欠的にきわめて短時間加えられるようになっている。したがっ て溶接継手近傍では、最高水圧時には70kg/mm²程度の引張応力が 作用するが、その時間がきわめて短い時間である限りにおいては 割れ発生の心配はない。さらに溶接組立完了後しばらく放置して から水圧試験が実施されるものと考えられる。この放置は遅れ割





5. 結 言

80kg/mm²高張力鋼サブマージアーク溶接および被覆アーク溶接 継手部の割れに及ぼす拘束応力の影響について検討を行なった。 その結果を要約すると次のとおりである。

- (1) TRC試験により表側溶接金属のビード境界から、表面たて 割れが発生することを確認した。この割れは隣接ビード境界 の後側に溶接した溶接金属近傍に発生し拘束応力がきわめて 高い場合を除き、その深さは表面より約1mm以下のきわめて 浅い割れであった。
- (2) 予熱およびパス間温度150~200℃溶接入熱値40,000~46,000
 J/cmで溶接施工したサブマージアークおよび被覆アーク溶接
 継手の割れ発生限界最大拘束応力値は σcf = 56kg/mm², σcf = 64kg/mm² である。
- (3) 圧力容器の水圧試験を想定して考えると、今回のサブマージアークおよび被覆アーク溶接継手は割れ発生潜伏時間がかなり長いためにじゅうぶん管理された水圧試験においては割れ発生の危険はほとんどないものと推定される。
- (4) 被覆アーク溶接継手はサブマージアーク溶接継手よりもさらに遅れ破壊割れに対して安全である。
- (5) 表側溶接金属の隣接ビード境界近傍をグラインダ仕上げすることにより、表面たて割れの発生をかなり軽減できる。

終わりに臨み,本研究を行なうにあたり,終始ご指導をい ただいた科学技術庁,金属材料技術研究所,中村治方(現在 新日本製鐵株式会社),当社の根本技師長,竹内部長,佐々木

主管研究員のかたがたに対して深く謝意を表する。

参考文献

(1) 稲垣ほか:各種高張力鋼溶接部のTRC試験結果と水素の影響について:溶接学会誌 34 第8号(昭40-8)
(2) 鈴木ほか:引張拘束割れ試験による高張力鋼溶接部のルート割れにおよぼす拘束外力の影響について 32 第1号(昭38-1)

11