論文および報告

動的拘束溶接割れ試験装置の試作および
それによる二、三の実験*

鈴木春義** 稲垣道夫** 中村治方** 清水 信***

Some Experiments with the Dynamic Restraining Test Apparatus*

By Haruyoshi Suzuki,** Michio Inagaki,** Harumasa Nakamura** and Makoto Shimizu***

Abstract

To study the individual and correlated effects of mechanical and thermal restraints on weld cracking behaviours of steels and electrodes, two types of dynamic cracking testers have been used in the present paper, that is, a Murex type bending cracking tester and a new type tensile cracking tester. In the latter, one piece in a butt weld specimen is tensile and can be displaced at any constant speed against the other stationary piece during or after welding at an arbitrary instant.

Dynamic cracking tests of several mild steel coated electrodes showed that these two testers were satisfactory for classifying cracking susceptibility. Among the tested electrodes, the low hydrogen type showed the least, the high titania type the greatest and the high cellulose and illmenite types medium. susceptibility to both hot and cold cracking of weld metal.

Stainless steel coated electrodes could be satisfactorily evaluated with this dynamic cracking tester concerning the suitability for the first pass welding of a clad steel.

Comparing the two cracking test methods, the tensile restraint cracking tester was found to be more sensitive and reproducible than the Murex type bending restraint cracking tester. An instant of weld cracking in the former tester can be determined very successfully by observing a corresponding discontinuous change in the tensile load across the test weld. Further studies are being continued with the tensile restraint cracking tester.

1. 緒 言

今まで行なわれてきた溶接割れ試験方法は¹⁻¹⁰⁾いずれも大きな拘束を与えた状態で溶接を行ない、溶接金属や溶接熱影響部における割れ発生状態から溶接割れ感受性を判定するという方法である。割れ試験を行なう場合に特に問題となる点は、どのような形式の拘束（面内収縮変形の拘束や角変化の拘束等）をどの程度の厳しさで、どのような時期（溶接中もしくは溶接終了後）に与えるかという点である。しかしながら今まで行なわれてきた割れ試験方法では残念ながら拘束度を広範囲に変化することは困難であり拘束を定量的に測定することは、ほとんど行なわれていない現状である。

以上のような現状にかんがみ、各種溶接割れの研究を

行なうにあたって、溶接中もしくは溶接後に2つの形式の拘束、すなわち面内収縮変形の拘束と角変化の拘束を広範囲の変形速度で溶接部に強制的に与えて、溶接部の割れ感受性を判定するための装置として動的拘束割れ試験装置を試作した。

2. 装置の試作

本装置の概略の機構図を Fig. 1 に示したが、引張形式のものは容量 20t で、引張変形速度を 0.3~6.0 mm/min（高変形速度範囲）と 0.015~0.30 mm/min（低変形速度範囲）の範囲で、それぞれ24段階、合計48段階に変化できるようになっている。試験片は 120 mm × 200 mm（溶接辺 120 mm）角の最大板厚 25 mm までの鋼板 2 枚を突合せて取付け、その間を溶接するわけである。引張変形を開始する時刻はタイムスイッチもしくは手動により溶接開始直後からの任意の所定時刻よりはじめられるようになっている。引張変形の停止の時刻の制御はリミットスイッチもしくは手動により行なうように

* 原稿受付、昭和36年5月8日（昭和35年度溶接学会春季学術講演会において発表）

** 正員、金属材料技術研究所 Member, National Research Institute for Metals.

*** 正員、石川島播磨重工業 KK Member, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co. Ltd.

Fig. 1 Schematic diagram of dynamic restraining cracking test apparatus

なっている。

曲げ型式のものもビード表面もしくは裏面において引張形式の場合と同様な変形速度で強制引張変形を溶接部に与えられるようになっている。なお、この曲げ形式に類似の試験法はすでに英国など⁵⁻⁸⁾において行なわれている。曲げ形式のものは上述のようにビードの表曲げ、裏曲げが可能であるのと同時に、曲げ中心をビード深さ方向の任意の位置にもってこることができる仕組みになっている。曲げ変形速度の範囲は $0.22 \sim 4.54$ degree/sec (高変形速度範囲) と $0.011 \sim 0.22$ degree/sec (低変形速度範囲) であり、やはり各範囲24段階、合計48段階に変化できるようになっている。試験片は最大板厚 25 mm までの 70×110 mm (溶接辺 70 mm) 角の鋼板 2 枚を突合せまたは重ね合せて取付け、その間を溶接するようになっている。曲げ変形の開始および停止の機構は引張形式の場合と同じようになっている。

動的拘束外力の測定は引張形式の場合には引張シャフトに電気抵抗線歪ゲージ (SR-4) を貼り付け、動的抵抗

Photo. 1 Apparatus for dynamic restraining cracking test (tension type)

線歪計およびオシログラフ (電磁もしくは高感度電子管式ペン書き) により求めることができたが、曲げ形式の場合には装置の関係から曲げ応力の測定が困難なために拘束外力の測定は行っていない。

Photo. 1 には、引張形式のものを自動被覆アーク溶接装置と組合せて動的抵抗歪計および電磁オシログラフなどの計測器を取付けた外観写真を示した。試験片の部分を拡大して示したのが Photo. 2 であるが、右下方に見える引張シャフトに SR-4 を貼り付けている。

Photo. 3 には曲げ形式のものの外観写真を示した。

Photo. 2 Appearance around test specimen (tension type)

Photo. 3 Apparatus for dynamic restraining cracking test (bending type)

3. 軟鋼モデル溶接棒による割れ試験結果

Table 1 Chemical composition of base metal

Plate thickness (mm)	Chemical composition (%)				
	C	Mn	Si	P	S
12	0.12	0.23	0.27	0.005	0.020

Table 2 Chemical compositions and mechanical properties of all-weld-metals of test electrodes

Electrode	Chemical compositions of all-weld-metals (%)						Mechanical properties of all-weld-metals			
	C	Mn	Si	P	S	Cu	Y.P. (kg/mm ²)	T.S. (kg/mm ²)	Elong. (%)	R.A. (%)
D 4311 (illmenite)	0.08	0.40	0.06	0.021	0.013	—	41.6	46.7	25.0	44.8
D 4311 (high cellulose)	0.09	0.68	0.35	0.009	0.017	0.14	47.3	57.5	22.5	49.3
D 4313 (high titania)	0.10	0.48	0.35	0.010	0.015	—	52.2	56.0	19.6	32.1
D 4316 (low hydrogen)	0.11	0.76	0.30	0.024	0.019	—	41.8	51.6	31.0	62.8

試験材としては、Table 1 にその化学組成を示した板厚 12mm の軟鋼板を用い、Table 2 に示したような合計 4 種類の直径 4mm の軟鋼モデル溶接棒により割れ試験を行なった。ここに使用した軟鋼モデル溶接棒は日本溶接協会溶接棒部会において作成された製造履歴の明らかなものである。この試験では溶接電流 130A、溶接速度 150 mm/min の一定溶接条件で試験溶接を行ない、溶接開始後 5 sec 経ってから所定の変形速度でもって、引張りもしくは表曲げの強制変形を行ない、溶接終了と同時に変形を終了した。なお高速度の表曲げ変形の場合には溶接終了前に限界曲げ角度 (30 degree) にいたることもあったが、その場合には限界曲げ角度になると同時に溶接、変形ともに終るようにした。試験ビード長さは引張りの場合には約 95 mm、表曲げの場合には約 65 mm とした。

この試験で見出された割れは Photo. 4 に示したようなビードたて割れであり、試験後の破面を観察すれば、

Photo. 4 Appearance of cracks occurred in the dynamic restraining cracking test **Fig. 2** Typical example of thermal cycle and loading curve in the dynamic restraining cracking test of mild steel model electrodes

Photo. 4 にその例を示したように、(1) 全長にわたって高温割れをおこした着色破面、(2) 高温割れと主として銀白色の脆性破面を呈する低温割れとの混合した破面、(3) 全長にわたって低温割れをおこした破面、(4)

- a) LONGITUDINAL CRACK ON BEAD SURFACE
- b) FRACTURED SURFACE WITH 100% HOT CRACK
- c) FRACTURED SURFACE WITH 55% HOT CRACK AND 45% COLD CRACK
- d) FRACTURED SURFACE WITH 100% COLD CRACK
- e) FRACTURED SURFACE WITH 50% HOT CRACK 25% COLD CRACK AND 25% NO CRACK
- f) FRACTURED SURFACE WITH NO CRACK

灰色の延性破面を示す、試験中には割れを生じなかった部分と高温および低温割れの混合した破面、(5) 試験中には全然割れなかった灰色の延性破面に分類できる。

上述のように高温割れと低温割れとはその破面からおよその分類はできるが、引張り形式の場合には拘束外力と溶接熱サイクルをオシログラフに記録できるので、拘束外力曲線の不連続部から割れ発生時期を探知できるゆえ、高温割れと低温割れをはっきり区別できる。その一例として Fig. 2 を示した。この図は試験ビードを 4 等分する 3 点の熱サイクル曲線と拘束外力曲線を溶接開始からの経過時間に対して図示したものであるが、溶接開始後、約 34 sec 経ってから最初の割れが発生したことがわかる。試験後の破面を图中に示したが、これと対応させて考えると濃青色に着色した部分が、この割れに相当するものと考えられ約 $750^{\circ}\text{C} \sim 450^{\circ}\text{C}$ において発生したものと考えられる。次いで溶接開始後約 40 sec 経って溶接が終了するかしないうちにクレタ付近に第 2 回目の割れが発生したことがわかるが、その温度域は約 $1000^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$ と考えられる。第 3 回～第 5 回目の割れ発生は溶接開始後、約 72 sec～91 sec の間に認められるが、これらはいずれも約 200°C 付近で生じた割れで、その破面は着色せず金属光沢を有していた。

Fig. 3 Tensile restraining crackining test results of mild steel model electrodes, including hot crack and cold crack

Fig. 4 Tensile restraining cracking test results of mild steel model electrodes, with regard to hot crack only

Fig. 5 Tensile restraining cracking test results of mild steel model electrodes, with regard to cold crack only

Fig. 2 の例からも若干その傾向がうかがわれるが、本試験を進めるにしたがって高温割れと低温割れの境界を約 200°C におくことが妥当であると考えられたので、以下においては約 200°C 以上で発生した割れを高温割れ、約 200°C 以下で発生した割れを低温割れとして区別した。

引張り形式による割れ試験結果を Fig. 3～Fig. 5 に示した。Fig. 3 は高温割れと低温割れを合せた合計割れ長さのビード全長に対する百分率を引張変形速度に対して図示したものである。この結果によると D 4313 (高酸化チタン系) 溶接棒が他の 3 種、すなわち D 4316 (低水素系) 溶接棒、D 4301 (イルミナイト系) 溶接棒、および D 4311 (高セルローズ系) よりも低変形速度で割れが急増している点で前者が後者よりも割れをおこしやすいことがわかる。なお後者の 3 種の溶接棒の中でも D 4316 が若干割れ難いことがうかがわれる。Fig. 4 および Fig. 5 は Fig. 3 の結果をそれぞれ高温割れと低温割れに分けてまとめたものである。Fig. 4 の結果によると高温割れについては D 4313 溶接棒よりもむしろ D 4301 および D 4311 溶接棒のほうがその感受性の高い点が注目される。Fig. 5 に示した低温割れ (約 200°C 以下で発生した割れ) については D 4313 溶接棒が他の溶接棒にくらべて著しくその感受性が高く D 4301、D 4316 溶接棒ではほとんど低温割れが認められなかった。Fig. 3～Fig. 5 の結果をまとめて考えると D 4313 溶接棒が最も割れ感受性、特に約 200°C 以下で発生する低温割れに対する感受性が高い。D 4301 および D 4311 溶接棒の割れ感受性がそれに次いでいるが、前者は主として高温割れ、後者はいくぶん低温割れに対してその感

Fig. 6 Bending restraining crack test results of mild steel model electrodes

受性の高い点が相違している。D 4316 溶接棒は高温割れおよび低温割れのいずれに対してもその感受性が低いことがわかる。

次に上記の溶接棒の中、D 4311 および D 4313 溶接棒により曲げ形式の動的拘束割れ試験を行なった結果を Fig. 6 に示した。曲げ形式の場合には曲げ中心を試験板の裏面と開先の中心線との交点 (Fig. 6 参照) にもってきて表曲げを行なったので、ビードの肉厚全体にわたって引張変形がかかるようになっている。また曲げ形式の場合には引張形式の場合にみられたような低温割れはほとんどみとめられなかったので Fig. 6 に示したビード割れ率は高温割れ率と考えてよい。Fig. 6 の結果によると D 4313 溶接棒のほうが D 4311 溶接棒よりも高温割れをおこしやすいという結果がえられて前述の引張形式の場合の Fig. 4 の結果と一見矛盾するようである。しかしながら曲げの場合の角変形速度をビード表面での引張変形速度およびビードの肉厚にかかる平均引張変形速度に換算して Fig. 6 に示したように横軸にとると、曲げの場合の試験条件が引張りの場合の高変形速度の場合に相当していることがわかる。一方 Fig. 4 をみると引張変形速度が 6.0 mm/min の試験条件では D 4313 溶接棒のほうが D 4311 溶接棒よりも高温割れをおこしやすいという曲げの場合と同様な傾向があらわれている。以上の二つの結果を考慮に入れると、Fig. 6 の結果が必ずしも Fig. 4 の結果と矛盾するものでないことが理解されよう。

いずれにしても曲げ形式は引張形式にくらべて試験材

Fig. 7 Reproducibility of tensile restraining cracking test results

Fig. 8 Reproducibility of bending restraining cracking test results

自身の割れ感受性を見出すことの感度が低く、拘束外力が計測困難な点、したがって割れ発生時期が求められない点、歪もしくは応力分布がビードの深さ方向に均一でない点、低温割れを検出できない点などをあわせ考えるとき、引張形式の動的拘束割れ試験が曲げ形式のそれよりもすぐれていると判断される。

Fig. 7 および Fig. 8 には引張形式および曲げ形式についてそれぞれ行なった再現性試験の結果を示した。両図とも D 4311 溶接棒を用い、130 A, 150 mm/min の

Table 3 Chemical compositions of base metals

Steel	Plate thickness (mm)	Chemical composition (%)							
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Nb
Type 347 stainless steel	12	0.06	1.55	0.74	0.012	0.009	18.5	11.2	0.76
	25	0.06	1.38	0.43	0.016	0.010	18.4	11.3	0.57
Stainless clad steel	20 { 4	0.03	1.72	0.57	0.022	0.012	18.6	10.6	—
	16	0.16	1.35	0.43	0.018	0.021	0.05	0.07	—

Table 4 Chemical compositions and mechanical properties of all-weld-metals of test electrodes

Electrode	Chemical compositions of all-weld-metals (%)								Mechanical properties of all-weld-metals		
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Nb	T.S. (kg/mm ²)	Elong. (%)	R.A. (%)
D 347	0.06	1.34	0.58	0.022	0.007	20.2	9.1	0.76	65.8	36.6	—
D 309	0.06	1.53	0.44	0.018	0.008	24.1	13.1	—	66.1	39.1	58.2
D 310	0.09	1.41	0.45	0.021	0.009	27.9	20.4	—	60.2	39.1	56.1
E 312	0.10	1.50	0.48	0.023	0.010	29.6	10.1	—	79.6	22.4	32.0

一定溶接条件で割れ試験を行ない、Fig. 7 では引張変形速度が 4.8 mm/min と 5.4 mm/min の両方の試験条件につきそれぞれ 9 個および 10 個の割れ試験を行ないその再現性を調べた。Fig. 8 は角変形速度が 1.13 degree/sec の試験条件で 10 回繰返した場合の結果である。両図の縦軸に示した累積ひん度とはあるビード割れ率以下の割れ率を示す試験片数が全試験片数の何 % あるかを示す値である。それゆえ、再現性のよいものほど、ビード割れ率のある値のところで累積ひん度曲線の傾斜が大となるわけである。Fig. 7 の結果をみると、4.8 mm/min の引張変形速度では割れをおこさないものが全体の約 60 % あるのに対して 5.4 mm/min の場合にはビード全長にわたって割れを生じたものが全体の約 80 % あった。この結果からこの割れ試験も “go or no go” test

として考えるべきことがわかる。Fig. 8 の結果を Fig. 7 の結果と比較して考えると、再現性の点でも曲げ形式が引張形式よりも若干劣ることがうかがわれる。

4. オーステナイト系ステンレス鋼 溶接棒による割れ試験結果

次にオーステナイト系ステンレス鋼溶接棒を用いて、軟鋼モデル溶接棒について行なったと同様な要領で動的拘束割れ試験を行なった。

供試鋼板および溶接棒 (4 mm 径) はそれぞれ Table 3 および Table 4 に示したものである。

Fig. 9 Typical example of thermal cycle and loading curve in the dynamic restraining cracking test of austenitic stainless steel electrodes

Fig. 10 Tensile restraining cracking test result of D 347 electrode with 12 mm thickness stainless steel plate

Fig. 11 Tensile restraining cracking test result of D 347 electrode with 25 mm thickness stainless steel plate

この場合の割れ試験要領で前述の軟鋼の場合と異なる点の一部において溶接電流および溶接速度を変化して割れ試験を行なった点だけである。

オーステナイト系ステンレス鋼の割れ試験で見出された割れは、Fig. 9 に示した結果からもわかるように、約 300°C 以上で発生した高温割れである。Fig. 9 の例では溶接終了直後に約 1100°C~300°C の温度範囲で割れが発生したことがわかる。

Fig. 10 と Fig. 11 に引張形式による D 347 (19Cr-10Ni-Nb) 溶接棒の割れ試験結果を示したが、Fig. 10 は板厚 12 mm の場合、Fig. 11 に板厚 25 mm の場合の結果である。いずれの場合も低速度、大電流で溶接した場合に高温割れをおこしやすいという結果がでてい。低溶接速度ということは引張強制変形を溶接終了と同時に止める関係上、高溶接速度の場合にくらべて、同じ変形速度であってもビードに与える最終の引張変形量が大きいということになる。このことが溶接速度がおそ

Fig. 12 Correlation between cracking percentage and tensile displacement during welding

Fig. 13 Bending restraining crack test result of D 347 electrode with 12 mm thickness stainless steel plate

Fig. 14 Tensile restraining cracking test result of various types of stainless steel electrodes with clad steel

くなるほど、高温割れをおこしやすい原因になっていると考えられる。それゆえ Fig. 10 および Fig. 11 の結果を溶接中の引張変形量の平均値（ビード中央部における変形量に相当する値）で整理してみると Fig. 12 に示したようになる。この図では、引張変形量が 2.0mm を超えると高温割れが著しくなるという結果があらわれている。溶接電流の割れにおよぼす影響については、これらの結果から明らかでない。

曲げ形式による割れ試験結果を Fig. 13 に示した。この結果からわかるように、曲げの場合も引張りの場合

とほとんど同じ結果がえられた。

次にステンレスクラッド鋼を用いてステンレス鋼側の初層溶接時を想定し、Fig. 14 に示したような開先形状で Table 4 に示した各種オーステナイト系ステンレス鋼溶接棒の割れ感受性を比較した。試験結果を Fig. 14 に示したが、発生した割れはいずれも高温割れであり、低温割れは認められなかった。3種のオーステナイト系ステンレス鋼溶接棒の間の割れ感受性の差異は明りようにあらわれており、E 312 (29Cr-9Ni) 溶接棒の割れ感受性が特に低いことが注目される。この試験での溶接条件は前述の軟鋼モデル溶接棒の場合と同じであるゆえ、母材および板厚の相違はあるけれども、あえて、両者の高温割れ感受性を比較すると、Fig. 4 と Fig. 14 からわかるように D 310 (25Cr-20Ni) 溶接棒は軟鋼モデル溶接棒よりも高温割れ感受性が高く、D 309 (24Cr-12Ni) 溶接棒は軟鋼モデル溶接棒と同程度の、E 312 溶接棒はそれよりずっとすぐれた高温割れ感受性を有することが推察される。

5. 今後の研究課題

以上の二、三の実験においては溶接中に引張りもしくは曲げの強制変形を与えて各種溶接棒の割れ感受性を比較した。このような非常にきびしい試験条件では、溶接棒間の割れ感受性を相対的に比較することはできても、実際の溶接施工時の割れ感受性を予測し、判定することはできない。さらに特に高温割れについてはこのような外的なマクロの歪以外に、局所的なミクロの歪が重要な因子である。このような点を考慮して今後の研究を進める必要が感じられる。

次に高張力鋼の低温割れについて、この装置を用いて冷却速度、拘束応力、水素含有量、塑性歪量等の相関関係を求めるべく目下実験中であるが、この点については次の機会に報告する予定である。

6. 結 論

本装置の試作ならびにそれによる二、三の実験を行なった結果、次のような結論がえられた。

(1) 試作した動的拘束割れ試験装置により被覆アーク溶接棒の溶接割れ感受性を相対的に比較検討できるこ

とがわかった。

(2) 本装置については、引張形式のほうが拘束外力が計測できる点、割れ発生時期を推定できる点、歪もしくは応力分布がビードの深さ方向に均一である点、低温割れを検出できる点、試験結果の再現性がよい点、試験法の感度が若干よい点などの諸点において、曲げ形式よりもすぐれていることがわかった。

(3) 軟鋼モデル溶接棒による割れ試験の結果、D 4313 溶接棒が最も割れ感受性、特に約 200°C 以下で発生する低温割れに対する感受性が高いことがわかった。D 4301 溶接棒および D 4311 溶接棒の割れ感受性がそれに次いでいるが、前者は主として高温割れ、後者はいくぶん低温割れに対してその感受性が高い点が相違している。D 4316 溶接棒は高温割れおよび低温割れのいずれに対してもその感受性が最も低いことがわかった。

(4) オーステナイト系ステンレス鋼溶接棒による割れ試験では高温割れのみが認められたが、クラッド鋼のステンレス鋼側の初層溶接時の割れ感受性では D 310 (25Cr-20Ni) 溶接棒が最も高く、E 312 (29Cr-9Ni) 溶接棒が著しく低かった。D 309 (24Cr-12Ni) 溶接棒については D 310 溶接棒よりも割れ感受性が少し低いことがわかった。

最後に本研究に使用した軟鋼モデル溶接棒、一部のオーステナイト系ステンレス鋼溶接棒およびクラッド鋼板は日本溶接協会溶接棒部会技術委員会より提供して頂いたものであり、ここに厚く御礼申し上げます。なお本研究の実施にあたっては、第6部片平和男君の熱心な御協力を得ましたことをここに記して深甚の謝意を表します。

文 献

- 1) Stout, R. D., Doty, W. D'orville, "Weldability of Steels", WRC, 1-381 (1953)
- 2) Stout, R. D., et al: Wdg Jnl, Vol. 25, 522S-531S (1946)
- 3) Stout, R. D., et al: ibid.. Vol. 26, 673S-682S (1947)
- 4) 大谷, 藤原: 溶接学会誌, Vol. 16, 239-249 (1947)
- 5) Rollason, E. C., Roberts, D. F. T: British Wdg. Jnl., Vol. 1, 441-449 (1954)
- 6) Jones, P. W: ibid, Vol. 4, 189-197 (1957)
- 7) 石崎, 西: 溶接学会誌, Vol. 27, 671-676 (1958)
- 8) 中根, 村本, 菅, 横井: 溶接学会誌, Vol. 28, 229-235 (1959)
- 9) 鈴木, 村瀬, 中村: 材技研報告, Vol. 2, 57-66 (1959)
- 10) 鈴木, 齋垣, 中村: 材技研報告, Vol. 3, 288-306 (1960)