
変動応力下の補修溶接棒 KS-1000 の開発

Newly Developed Electrodes KS-1000 for Repair Welding under Pulsating Stress

佐藤 功輝(Koki Sato) 川井 豊(Yutaka Kawai) 山口 忠政(Tadamasa Yamaguchi)
西山 昇(Noboru Nishiyama) 中西 保正(Yasumasa Nakanishi) 中村 義隆
(Yoshitaka Nakamura)

要旨：

供用化における橋梁の補修溶接では、車輛の通行にともなって生じる変動応力のために高温割れを発生することが多い。ここに変動応力下の溶接割れに対する溶接金属化学組成の影響について研究した結果、優れた耐高温割れ特性を示す変動応力下の補修溶接に適した被覆アーク溶接棒 KS-1000 の開発ができた。主な結果は次のとおりである。(1)変動応力下溶接における高温割れは溶接施工開始側に備って発生する傾向を示す。(2)KS-1000 はスリット型割れ試験片の場合初期ルートギャップ開口変位量範囲 $\Delta \delta = 0.2\text{mm}$ まで、初期拘束フリー型試験片の場合 $\Delta \delta_{1000} = 1.0\text{mm}$ まで全く割れが発生しない。(3)KS-1000 は市販溶接棒の約 3 倍の耐高温割れ性を示す。

Synopsis：

New covered electrodes KS-1000 suited to repair welding of such structures as bridges and highways etc. under pulsating stress in service conditions have been developed by examining the effect of chemical compositions on hot crack sensitivity of the metal welded under pulsating stress. KS-1000 electrodes have excellent anti-cracking characteristics, and the critical root gap opening displacement range for cracking of the newly-developed electrodes under pulsating stress is much larger than that of conventional electrodes. Though KS-1000 has only a strength level of 490 MPa, it is possible to apply it to 590-MPa class high tensile strength steel by using it for the root pass, where hot cracks in weld metal were mainly observed, and to apply conventional electrodes to the remaining passes. KS-1000 electrodes are suited not only to repair welding of the structure under pulsating stress but also to tack welding and restraint welding for jigs.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

Newly Developed Electrodes KS-1000 for Repair Welding under Pulsating Stress



佐藤 功輝
Koki Sato

鉄鋼研究所 厚板研究
部溶接研究室 主任研
究員(掛長)



川井 豊
Yutaka Kawai

エンジニアリング事業
部 研究開発センター
構造研究室 主任研究
員(課長)・工博



山口 忠政
Tadamasa Yamaguchi

鉄鋼研究所 厚板研究
部溶接研究室 主任研
究員(課長)



西山 昇
Noboru Nishiyama

鉄鋼研究所 厚板研究
部溶接研究室 室長(部
長)



中西 保正
Yasumasa Nakanishi

石川島播磨重工業(株)
技術本部技術研究所
溶接第一研究部・工博



中村 義隆
Yoshitaka Nakamura

石川島播磨重工業(株)
技術本部技術研究所
構造強度部 課長・工博

1 緒 言

橋梁などの既設構造物の補修、補強および改造工事を供用下、すなわち、社会的制約から車両等の通行を制限することなく行う場合には、自重による静的応力の他に振動および変動応力下での溶接施工になることがある。特に、変動応力により溶接開先面が相対的に変位する継手溶接(変動応力下の溶接)の場合には、現在市販のいずれの溶接棒を用いても高温割れを発生することが多く、溶接施工に多大の困難をともなうばかりでなく、施工物の寿命にも影響を与えることになる。筆者らは、変動応力下の溶接割れ発生に対する溶接金属化学組成の影響について研究した結果、溶接金属の化学成分を十分考慮することによって、優れた耐高温割れ特性をもつ被覆アーク溶接棒 KS-1000 を開発することができた。

本溶接棒は、疲労試験機を用いた変動応力下の溶接割れ試験において従来の市販溶接棒の約3倍の耐高温割れ性を示し、実橋から測

要旨

供用下における橋梁の補修溶接では、車両の通行にともなって生じる変動応力のために高温割れを発生することが多い。ここに変動応力下の溶接割れに対する溶接金属化学組成の影響について研究した結果、優れた耐高温割れ特性を示す変動応力下の補修溶接に適した被覆アーク溶接棒 KS-1000 の開発ができた。主な結果は次のとおりである。(1) 変動応力下溶接における高温割れは溶接施工開始側に偏って発生する傾向を示す。(2) KS-1000 はスリット型割れ試験片の場合初期ルートギャップ開口変位量範囲 $\Delta\delta=0.2\text{ mm}$ まで、初期拘束フリー型試験片の場合 $\Delta\delta_{1000}=1.0\text{ mm}$ まで全く割れが発生しない。(3) KS-1000 は市販溶接棒の約3倍の耐高温割れ性を示す。

Synopsis:

New covered electrodes KS-1000 suited to repair welding of such structures as bridges and highways etc. under pulsating stress in service conditions have been developed by examining the effect of chemical compositions on hot crack sensitivity of the metal welded under pulsating stress.

KS-1000 electrodes have excellent anti-cracking characteristics, and the critical root gap opening displacement range for cracking of the newly-developed electrodes under pulsating stress is much larger than that of conventional electrodes.

Though KS-1000 has only a strength level of 490 MPa, it is possible to apply it to 590-MPa class high tensile strength steel by using it for the root pass, where hot cracks in weld metal were mainly observed, and to apply conventional electrodes to the remaining passes.

KS-1000 electrodes are suited not only to repair welding of the structure under pulsating stress but also to tack welding and restraint welding for jigs.

定されたルートギャップ開口変位量にたいしても十分余裕のある耐高温割れ特性をもつことが確認された。

2 KS-1000 の開発

変動応力下で発生する割れは、凝固割れと高温延性低下割れの両者を含むいわゆる高温割れであることが確認^{1,2)}されており、したがって、補修専用として開発したこの被覆アーク溶接棒 KS-1000 は C, Si, P, S を低減したほか、Mn/S を高めるなど徹底した凝固割れ防止対策および高温延性向上対策をとった。

* 昭和62年6月26日原稿受付

3 KS-1000 溶接棒の割れ感受性

3.1 Trans-Varestraint 試験

耐高温割れ性の評価は、Trans-Varestraint 試験によって行った。

この試験は、あらかじめ所定の溶接棒を用いて試験体の溝内を溶着金属で埋めた試験片を、TIG アーク (180 A, 14 V, 7 cm/min) により再溶融させながら曲げ歪を付加する方法とし、評価はこのときの割れ発生状況を観察することによって行った。

用いた溶接棒の溶着金属化学成分を Table 1 に、また、試験結果を Table 2 に示す。これらの結果でも明らかなように、市販溶接棒

Table 1 Chemical compositions of all-deposited weld metals with developed electrodes KS-1000 and conventional electrodes D 4316 and D 5816 (wt. %)

Electrode	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo
KS-1000	0.03	0.22	1.44	0.008	0.001	—	—
D 4316	0.04	0.43	0.06	0.008	0.005	—	—
D 5816	0.06	0.52	1.10	0.014	0.007	0.62	0.23

Table 2 Results of Trans-Varestraint tests

Electrode	Bending strain			
	2%	4%	6%	9%
KS-100	○ (0)	○ (0)	○ (0)	○ (0)
D 4316	● (1.5)	● (2.7)	● (4.8)	—
D 5816	● (1.9)	● (3.5)	● (5.9)	—

○: No cracked ●: Cracked (): Total crack length (mm)

JIS Z3211 D4316 および JIS Z3212 D5816 の場合は 2% の歪量ですらに割れが発生するのに対し、KS-1000 は 9% の曲げ歪量を付加しても全く割れが発生せず、優れた耐割れ性を示す。

3.2 変動応力下の溶接割れ試験

3.2.1 溶接割れ試験方法

実橋補修、補強および改修工事を想定した変動応力下の溶接割れ感受性の評価は、1500 kN 電気油圧式サーボ型疲労試験機を用いて変動応力を付加しながら試験溶接を行う「変動応力下の溶接割れ試験法」により行った。Fig. 1 および 2 に試験片形状および変位サイクルを示す。また、Table 3 に供試鋼板 (JIS G 3106 SM 58) の化学組成と機械的性質を示す。

Fig. 1 (A) の「スリット型試験片」は局部補修溶接の場合を想定したものである。変動応力の負荷は、Fig. 2 (a) に示したような完全片振りの荷重制御とした。溶接に先だちスリット中央部にクリップゲージを取付け、溶接の進行とルーギャップの開口変位量範囲 ($\Delta\delta$) との関係求めた。

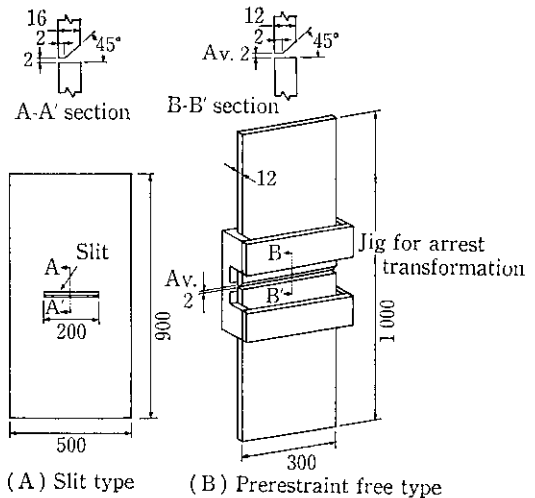


Fig. 1 Shape and dimension for weld cracking tests under pulsating stress (unit:mm)

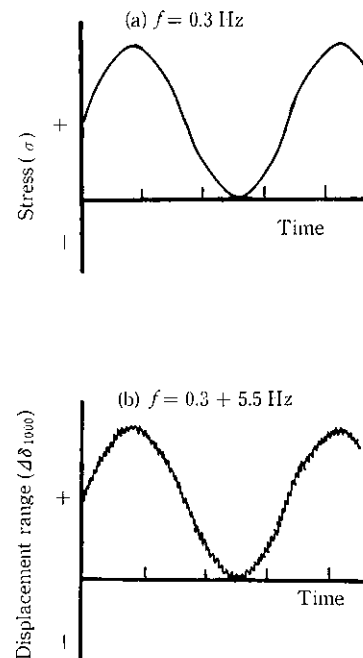


Fig. 2 Displacement of specimens during weld cracking tests under pulsating stress

Fig. 1 (B) は初期拘束のない「初期無拘束型試験片」で、補強および改修工事等における溶接長が比較的に長い場合を想定したものである。変動応力の負荷は、疲労試験機チャック間 (1000 mm) の変位量範囲 ($\Delta\delta_{1000}$) の変位制御とし、Fig. 2 (b) に示したような完全片振りとした。なお、このときの荷重は、試験片の溶接が進むにつれて増加する自己拘束力に打ちかって、 $\Delta\delta_{1000}$ が所定の値を保つように増加させた。また、このときの変位サイクルは、Fig. 2

Table 3 Chemical compositions and mechanical properties of steels used for weld cracking tests under pulsating stress

Type of specimen	Spec. JIS G 3106	Thickness (mm)	Chemical composition (wt. %)					Tensile property		
			C	Si	Mn	P	S	YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)
Slit	SM58	16	0.12	0.25	1.69	0.018	0.003	637	686	34
Prerestrain free	SM58	12	0.15	0.38	1.39	0.019	0.006	500	617	35

Table 4 Welding conditions of weld cracking tests under pulsating stress

Type of specimen	Welding position	Pass	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Pass sequence
Slit	Flat	1	160	24	10	
Pre-restraint free	Horizontal	1	150	24	10	
		2			7~12	
		3				

(b) のように振幅の異なる 0.3 Hz および 5.5 Hz の 2 種類の正弦波の重畳波を用い、この速い変位サイクル (5.5 Hz) の変位量範囲は、 $\Delta\delta_{1000}$ の 10% を負担するようにした。これらの試験条件は、実橋における振動測定結果³⁾ を参考に決定した。

なお、溶接は 4 mm 径棒を用い、スリット型割れ試験では下向き、1 パス溶接、初期無拘束型割れ試験では横向き、3 パス溶接で行った。Table 4 にこのときの溶接条件を示す。

3.2.2 溶接による変位量の変化

荷重制御スリット型試験片 (Fig. 1 (A)) の変形、試験片板厚 16 mm、幅 200 mm、スリット幅 168 mm) の場合の溶接とクリップゲージを用いて測定したルートギャップ開口変位量範囲 $\Delta\delta$ の関係は、Fig. 3 に示したように、全スリット長さの 1/2 を溶接が進行する時点 C での $\Delta\delta$ は初期値 ($\Delta\delta=0.15$ mm) の約 60% となり、終了する時点 E でのそれは約 20% となる。

さらに、Fig. 4 は初期無拘束型試験片の場合における $\Delta\delta_{1000}$ を 0.5 mm に保つための必要荷重 (ΔP) を示したものである。溶接が進むにつれ必要荷重は次第に増加し 1 層目終了時には約 80 kN、2 層目終了時には約 120 kN となる。また、同時に溶接線をはさんだゲージ長 300 mm での変位量範囲 ($\Delta\delta_{300}$) についても示したが、1 層目の溶接完了後ではこの $\Delta\delta_{300}$ が 0.1 mm 程度となり、初期の同 0.5 mm にたいして約 1/5 に減少し、ほぼ前述同様の $\Delta\delta$ の減少挙動を示す。また、2 層目の溶接を行うことによってこの $\Delta\delta_{300}$ はさらに減少する。

このような溶接にともなう $\Delta\delta$ および $\Delta\delta_{300}$ の減少は、溶接の進行にともなって自己拘束力が増加し、変位 (歪) が疲労試験機チャック間の試験片長さ方向全体に分散することを示している。

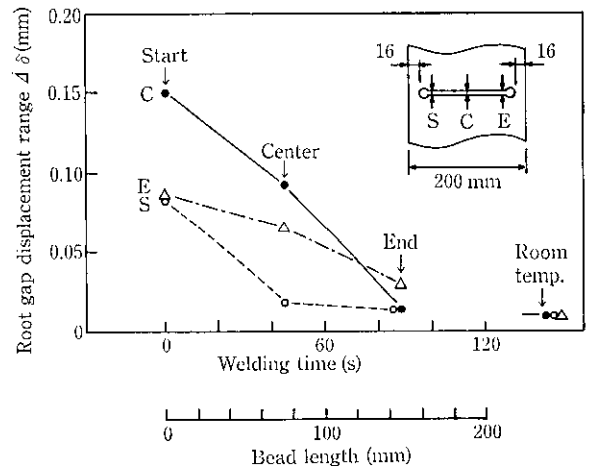


Fig. 3 Variation of root gap displacement during weld cracking tests under pulsating stress (Slit type specimen)

これらの現象は、変動応力下の溶接割れが溶接開始部により発生しやすいことを示唆しており、また、1 層目の溶接が完全なものであれば、2 層目以降の溶接では変動応力下の溶接割れがほとんど起こり難い変位量範囲に減少することを示している。

3.2.3 溶接割れ試験結果

スリット型試験片の場合の初期 $\Delta\delta$ 設定値と断面割れ率の関係を Fig. 5 に示す。市販溶接棒の D 4316 および D 5816 のいずれもが、 $\Delta\delta$ が 0.1 mm 以下ですでに割れが発生するのにに対し、KS-1000 では、 $\Delta\delta$ が 0.2 mm でも全く割れが発生しない。

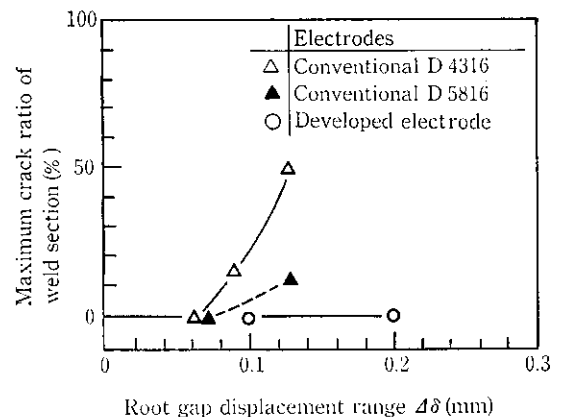


Fig. 5 Results of weld cracking tests under pulsating stress (Slit type specimen)

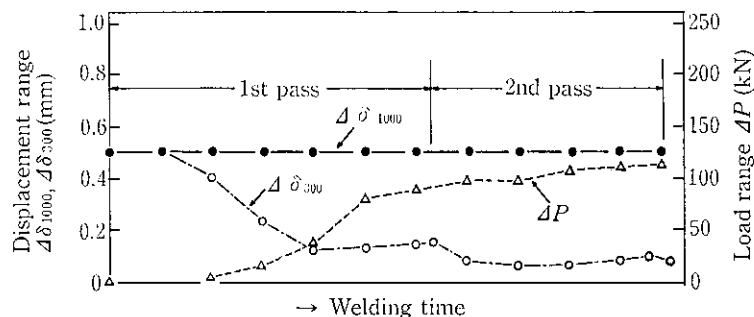


Fig. 4 Variation of displacement and load during weld cracking tests under pulsating stress (Prerestraint free type specimen)

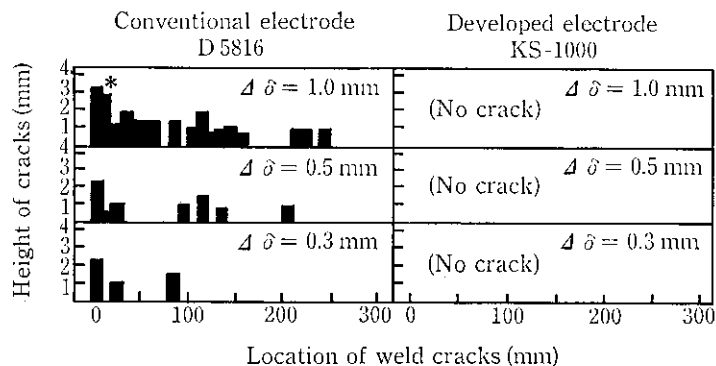


Fig. 6 Distribution of cracks in specimens tested under pulsating stress (Prerestrained free type specimen)

Note: *Inclusive of 2nd pass layer

Fig. 6 は初期無拘束型試験片における $\Delta\delta_{1000}$ と割れの大きさの関係を溶接線方向の割れ発生位置別に示したものである。KS-1000 は、 $\Delta\delta_{1000}$ が 1.0 mm まで全く割れの発生が認められないのに対し、市販溶接棒 (D 5816) では、 $\Delta\delta_{1000}$ が 0.3 mm ですでに割れが発生し、 $\Delta\delta_{1000}$ が 1.0 mm では溶接線のほぼ全長にわたって割れが発生している。

割れは、図からも明らかなように溶接開始側にかたよって発生する。また、割れは 1 層目が貫通割れを起こした場合を除き、2 層目以降には全く割れが発生しない。これらの結果は、前述した溶接の進行にともなう自己拘束力の増加による $\Delta\delta_{300}$ や $\Delta\delta$ の減少から割れ発生傾向を推定した結果とよく一致する。

また、市販溶接棒の場合において、溶接開始側のほか、溶接ビード長さの 100 および 200 mm 付近にも割れが偏在するのは、溶接クレタ部に相当する部分である。これらは、アーク溶接のビード終端は急冷凝固のためクレタを生じ、凝固時の収縮が原因で割れが発生しやすい傾向を示すのに加え、本試験ではさらに変動応力が付加され、高温割れ感受性が助長されたことに起因する。

KS-1000 の場合には、これらの部分も含めて割れは全く発生しない。

Fig. 7 は、初期無拘束型試験片を用いたときの $\Delta\delta_{1000}$ と溶接ビード全長を 10 mm 間隔に切断、研磨および検鏡して求めた割れ発生率 (断面割れ発生個数/検査断面総数, %) の関係を示したもので

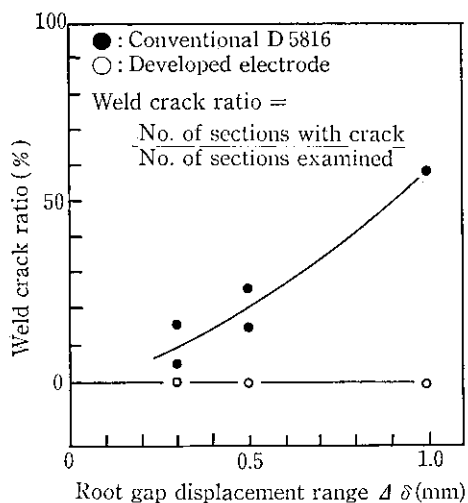


Fig. 7 Results of weld cracking tests under pulsating stress (Prerestrained free type specimen)

ある。市販溶接棒 (D 5816) では、図からも明らかなように $\Delta\delta_{1000}$ が 0.3 mm ですでに割れが発生し、 $\Delta\delta_{1000}$ が 1.0 mm では溶接線の 60% に割れが発生している。これに対し、開発溶接棒では、 $\Delta\delta_{1000}$ が 1.0 mm まで全く割れの発生が認められない。

これらの結果からも明らかなように、ここに補修専用として開発した KS-1000 は、従来の市販溶接棒に対して約 3 倍のルートギャップ開口変位量範囲に耐え、実橋から測定された最大ルートギャップ変位量範囲値に対しても十分余裕をもった耐割れ性を示す。

4 溶接金属の性能

4.1 溶着金属の性能

JIS Z 3212 の溶着金属の引張試験および衝撃試験法により行った溶着金属の機械的性質の結果を Table 5 に示す。KS-1000 は 490

Table 5 Mechanical properties of all-deposited weld metal with developed electrode

Tensile property			CVN property*1			
YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	$\sqrt{v}E_{-40}$ (J)	$\sqrt{v}E_{-20}$ (J)	$\sqrt{v}E_0$ (J)	$\sqrt{v}T_{rs}$ (°C)
472	527	29	71.5	209	321	-32

*1 CVN property: Charpy V notch property

MPa 以上の引張強度を確保できるとともに、降伏点は SM 50, SM 50 Y および SM 53 (JIS G 3106) クラスを満足する。さらに、伸びおよびシャルピー吸収エネルギーについても、上記母材の要求値 ($\sqrt{v}E_0 \geq 47$ J) を満足する。

4.2 溶接継手の性能

軟鋼および 50 キロハイテンの継手溶接には、KS-1000 をそのまま適用してもよいが、SM 58 の継手溶接に適用するには若干強度が不足する。本溶接棒の引張強度を相応に上げることは可能であるが、変動応力下の耐溶接割れ性を考慮したときにこの方法は必ずしも得策ではない。したがって、SM 58 クラス等の鋼材を用いた実施工溶接では、初層の溶接に、本開発溶接棒を用いて変動応力下の溶接割れを完全に防止し、2 層目以降の溶接を D 5816 市販溶接棒 (たとえば川鉄溶接棒 KSA-86) を用いて行うのがよい。

KSA-86 の化学成分および機械的性質を Table 6 に示す。

Table 6 Chemical compositions and mechanical properties of KSA-86 (AWS A5・5 E 9016 G equiv.)

Chemical composition (wt. %)						Tensile property			CVN property	
C	Si	Mn	P	S	Mo	YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	vE_{-20} (J)	vE_0 (J)
0.07	0.45	1.35	0.010	0.006	0.25	590	660	30	200	220

Table 7 Welding conditions for welded joint performance tests¹⁾

Electrode	Diameter (mm)	Welding position	Pass	Current (A)	Heat input (KJ/cm)
Developed KSA-86	4	Flat	1	130	18~20
	4	Flat	2~7	170	18~20

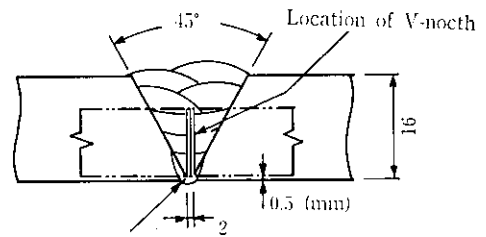
Table 8 Results of welded joint performance tests

Tensile property			CVN property				Bend test	
YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	vE_{-40} (J)	vE_{-20} (J)	vE_0 (J)	$vT_{1/2}$ (°C)	Root bend	Face bend
—	622*	—	44.1	132	151	-29	Good	Good

* Location of fracture: Weld metal

SM 58(16mm 板厚)を用い、Table 7 に示した溶接条件のように 2 種類の溶接棒を組み合わせ (1 層目を KS-1000 による裏波溶接, 2 層目以降を KSA-86) 継手溶接を行った試験結果を Table 8 に示す。なお、このときの積層法と衝撃試験片の採取要領 (1 層目の溶接部を含むようにした) を Fig. 8 に示す。

これらの結果からも明らかなように、この場合の継手溶接強度は、鋼材の規格値 (568 MPa) を十分に超え、シャルピー吸収エネルギーも要求値 ($vE_{-40} \geq 47$ J) を十分満足し、曲げ特性も裏曲げ、側曲げともに良好である。



1st pass: KS-1000

2nd pass and thereafter: KSA-86

Fig. 8 Welding pass sequence of welded joint test with developed electrode (unit:mm)

5 結 言

供用下の橋梁に発生する変動応力のもとでの補修溶接に適した補修専用被覆アーク溶接棒 KS-1000 を開発した。

- (1) 変動応力下の溶接割れ試験は疲労試験機を用いて、変動サイクル $f=0.3$ および $0.3+5.5$ Hz で行った。
- (2) 市販溶接棒の変動応力下の高温割れは溶接施工開始側に偏って発生する傾向を示した。
- (3) C, Si, P, S を低減するなどの溶接金属成分を十分考慮した KS-1000 は、開口変位量範囲 ($\Delta\delta$) がスリット型試験片の場合 $\Delta\delta=0.2$ mm, 初期拘束フリー型試験片の場合 $\Delta\delta_{1000}=1.0$ mm まで全く割れが発生しない。
- (4) KS-1000 は従来の市販溶接棒に対して約 3 倍の $\Delta\delta$ に耐え、実橋から測定された最大 $\Delta\delta$ に対しても十分余裕をもった耐溶接割れ性を示す。

参 考 文 献

- 1) 中西保正, 中村義隆, 村山武弘, 酒井啓一, 河野武亮, 上條建夫: 「変動応力载荷中の溶接施工に関する研究 (第 1 報) — 変動応力下の溶接割れ試験 —」, 溶接学会論文集, 3 (1985) 1, 60-68
- 2) 中村義隆, 中西保正, 武田 茂, 荒井 進, 酒井啓一, 村山武弘, 浅井寿一郎, 上條建夫: 「供用中の補修溶接施工に関する研究 — 第 1 報 変動応力下の溶接割れ試験 —」, 石川島播磨技報, 25 (1985) 3, 152-157
- 3) 河野武亮, 酒井啓一, 村山武弘, 中西保正, 井元 泉: 「変動応力载荷中の溶接施工に関する研究 — 実構造物の変形挙動と溶接割れ試験との関係について —」, 溶接学会全国大会講演概要集第 37 集 (昭和 60 年秋期全国大会), (1985), 226-227