

技術ノート

非消耗ノズル式 タンデムエレクトロスラグ溶接法の検討

Investigation of Non Consumable Tandem Electro Slug Welding

高田 和 守*
Kazumori TAKADA

湯田 誠**
Makoto YUDA

According to demanding of huge-sized steel structure, it become a tendency that extremely thick plate is used for diaphragm of box column.

So far, it was employed well-established SESNET-PROCESS to this portion, however there was limitation of thickness up to 60 mm. Recently, it was developed SESNET-TANDEM-PROCESS to achieve higher thickness of plate and high efficiency of welding.

In this report, it is introduced the characteristic of this new process and countermeasure for high-temperature-crack which is newly happend.

Keywords : SESNET-TANDEM-PROCESS, High Temperature Crack, Form Factor of welding pool, Carbon content, Dilution rate of B. M

1. まえがき

建築構造物の骨組みを構成するビルドボックス柱のダイヤフラムは、そのスキンプレートとの溶接継ぎ手を非消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接法（以下SESNET法と称す）で行うことが主流となっている。この溶接法は、スラグ浴の抵抗発熱を熱源とし1パスで高能率の溶接が可能であり、その施工は機械自体のシンプルな構造や条件設定を含めた取り扱いやすさから、定評を得ている。

一方、建築構造物は近年の傾向として、スペースの有効利用から低層部にトラス構造などを含めたメガストラクチャーを採用しており、この場合、上記溶接継ぎ手部のダイヤフラムは必然的に極厚化の傾向にある。SESNET法の適応板厚限界としては、メーカーの推奨条件では板厚60mmまでとされており、これ以上の板厚になるとファブリケーター独自で、あらゆる鋼種と溶接材料との組合せにより適正溶接条件の確立、機械的性質等の確認を行っている状況にある。その一例として、写真-1に板厚80mmを施工したマクロ試験の結果を示す。板厚60mm以上を対象とした本施工法の問題点としては、

- ① 開先断面積の増大により過大な入熱量を伴う（入熱量想定値 $\geq 900\text{kJ/cm}$ ）
- ② 機械的性質の低下（特に衝撃性能）
- ③ 長時間施工による施工の安定度

と以上があげられる。

上記問題点を含めさらに効率よく行うための対策としては、単位時間当たりの溶着金属量を増やすことが1つの対策と考えられるが、近年その意向を具体化したSESNETタンデム（2電極）がメーカーから出されている。

本報告では、極厚ダイヤフラムの施工に検討中であるSESNETタンデム（以降タンデムと称し、従来型をシングルと称す）を紹介するとともに、その溶接の特徴およ

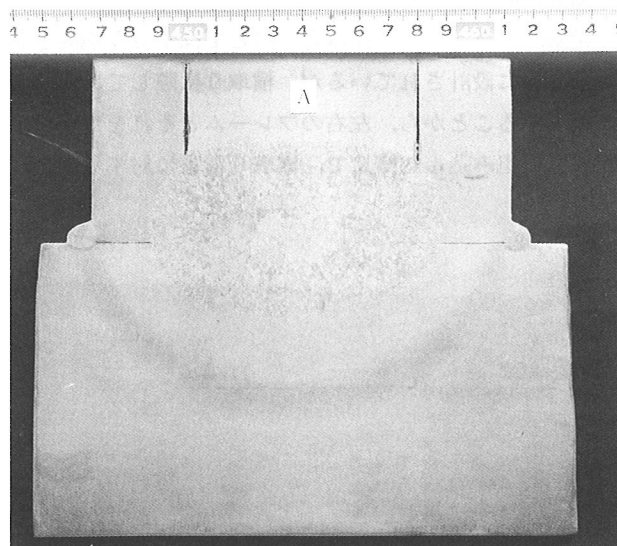


写真-1 80mm施工例

び継ぎ手の性能について実験した結果を報告する。

2. タンデムの特徴

装置の外観を写真-2, 3に示す。タンデムは、シングルを単純に2台稼働させるようにしたものであるが、制御機構は片側の電極だけで行っており、もう片側は従来どおりワイヤー送給量や電圧を個別に設定するものである。写真に示すように、電圧計は併用となっており、電極No1, 2のそれぞれの電圧値をつまみで切り替えることで確認できるようになっている。また揺動機能を使用する場合図-1に示すように、電極が開先の両端へ寄ったときの電圧指示は、個別にHIGH指示電圧値とし操作箱内にあるつまみで設定する。これは、開先の両端に十分な溶け込みを得るために意識的に両端部での高電圧値を設定するものであり、溶接スタートから10分間作動するようにシーケンサに組み込んである。10分を超えると揺動しない場合と同様に、操作箱盤面上のつまみで2電極ともにLOW指示で施工を行う仕組みになっている。電圧値の指示等、極厚材の施工を意識した機能が盛り込まれている。そのほか、写真にもあるように電極同士の干渉をさけ、ブレ防止のためのめがね状の治具をノズルに取り付けてある。

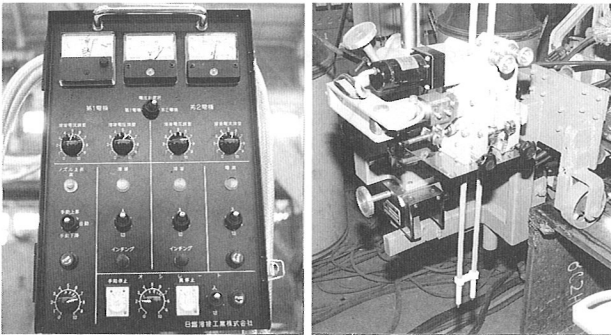


写真-2 タンデム制御部外観 写真-3 ノズル周り外観

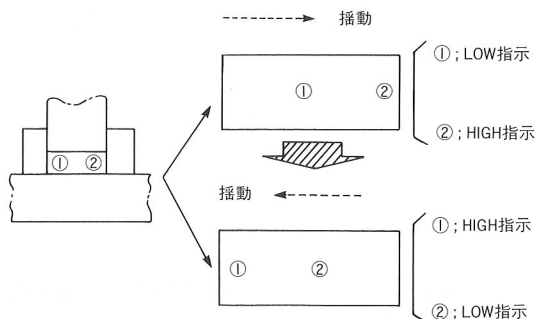


図-1 揺動状態における電圧指示 (スタートから10分間)

3. タンデム施工の検討

前項に示したように、従来のSESNETシングルの基本型に極厚材の溶接を意識した機能が追加され、とくに操作上の問題は感じられない。試験的に極厚材の溶接をい

くつか行った。以下に、その結果を示す。

(1) 実験1 (デモ実験)

a) 施工状況と超音波探傷試験結果

従来の施工では、社内実績の適応最大厚が80mmであったため、比較検討として80mmの板厚(SM520B)で検討を行った。溶接条件を表-1に示す。電極ごとの各パラメータはシングル施工と同様であり、スタート時の電圧設定以外はとくに施工としての難しさは見うけられない。ワイヤー送給量を8.5m/minに固定した結果、溶接後に溶接速度を確認すると、平均で約2.0cpmとシングルの約2倍となり、入熱量は2電極分計算値に入れるため1185kJ/cmと計上された。この値は従来より250kJ/cmほど下回っている。機械的性質の向上が期待されるところである。

実験後の超音波探傷試験結果であるが、いずれもスタート部で3~4mmほどの溶け込み幅が得られており、それ以降も十分な溶け込みが得られた。一方、内部欠陥については、建築学会基準以下のレベルではあるが、図-2に示す位置に全線にわたって溶着金属部に位置するとみなされる欠陥が検出された。

b) マクロによる考察

写真-4に代表的なマクロを示す。明らかに高温ワレと確認されるものが、溶着金属部中心に得られている。その大きさは最大20mmに達するものもあり、微少なものでは5mm以下のものがいくつか見られる。また、A-A断面に示すように、溶接方向へは超音波探傷試験結果と同様に連続的に生じていることが確認できる。

シングル施工のマクロと比較してナゲット形状の大きな違いは、ダイヤフラムおよびスキンプレートへの過大な希釈である（ここでは、この形状をひし形ナゲットと

表-1 溶接条件表

ダイヤ 板厚 (mm)	ワイヤ EXT (mm)	極間 (mm)	電流 (A)		電圧 (V)		ノズル 停止時間 (S)		揺動回数 (N/min)	溶接速度 (cm/min)	入熱量 (kJ/min)
80	40	35	①	380	54	52	3	3	3	2.0	1185
			②	380	54	52	3	3			

※ワイヤ送給速度は、8.5m/minで固定。

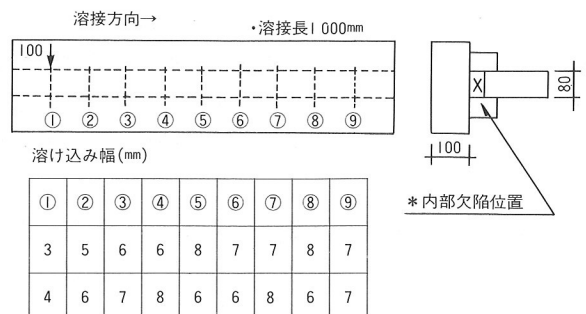
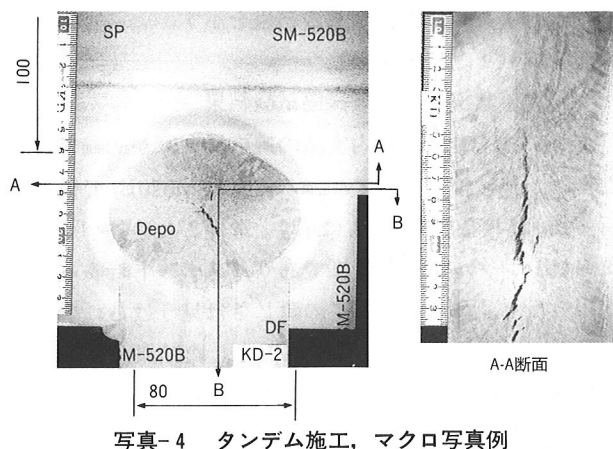


図-2 UT結果例



仮称するものとする)。この現象は、2つの電極に極間を与えているにもかかわらず、揺動により溶融熱源の集中する範囲が開先の中央部へ働くことが原因の1つと考えられる。その他の試験体からもマクロ試験の結果を確認したが、いずれもひし形ナゲットを呈していた。

施工性や、溶け込み状態についてはよい方向にあったが、新たに高温ワレの問題が生じたようである。

c) 高温ワレに関する考察

エレクトロスラグ溶接におけるワレは、ほとんどが高温ワレといわれており、その原因については、

- ① 凝固中の偏析による低融点化合物によるもの
- ② 炭素(C)含有量と結晶の発達方向によるもの
- ③ 継ぎ手の拘束力

などが過去に提唱されている。

今回の場合、極厚材であることから、母材強度の確保を化学成分値に依存している傾向があり、炭素量がやや高い。原因として②が考えられるが、②については過去にパトン研究所のデータ²⁾で示されている溶鋼浴形状係数(ψ 値)との相関が見逃せない。その関係を図-3に示す。 ψ 値($=b/H$)のうち、 b 値は今回の形状からダイヤ↔スキン方向の値で評価すべきであろう。 ψ 値を各マクロから計測すると1.4から1.6であり、溶着金属の炭素量を調査した結果0.14であることから、ややワレやすい範囲にあったものと思われる。

ここで、シングル施工がどのくらいの ψ 値を示すか、比較の意味で示したものが図-4である。 ψ 値はワレに対してかなりの安全側に位置し、板厚が厚いほど高値を示す傾向にある。この原因は、1電極のため単位時間当たりの溶着金属量がタンデム施工より少なく、結果として H 値(溶融深さ)が小さくなることが影響しているものと思われる。

大入熱を伴う高能率溶接施工の高温ワレの発生に関しては、昨今の十分品質を考慮された鋼材、溶接材料、施工方法の組合せのなかで、頻度としては少なく、新たな問題といえよう。ここでは、適正条件を検討すべくいく

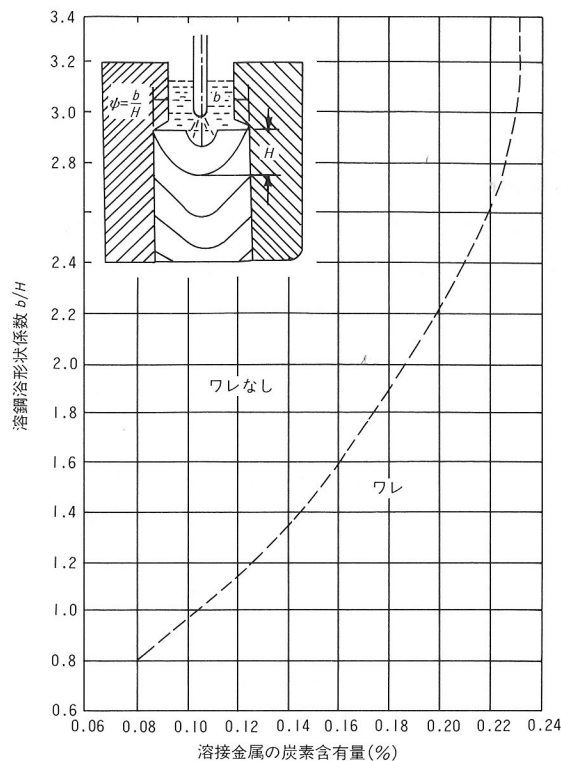


図-3 高温割れにおよぼす溶鋼浴形状係数と溶接金属の炭素含有量の関係²⁾
(ただしMn 0.7~1.5%, Si $\leq$ 0.35%, Mn/Si $\geq$ 18)

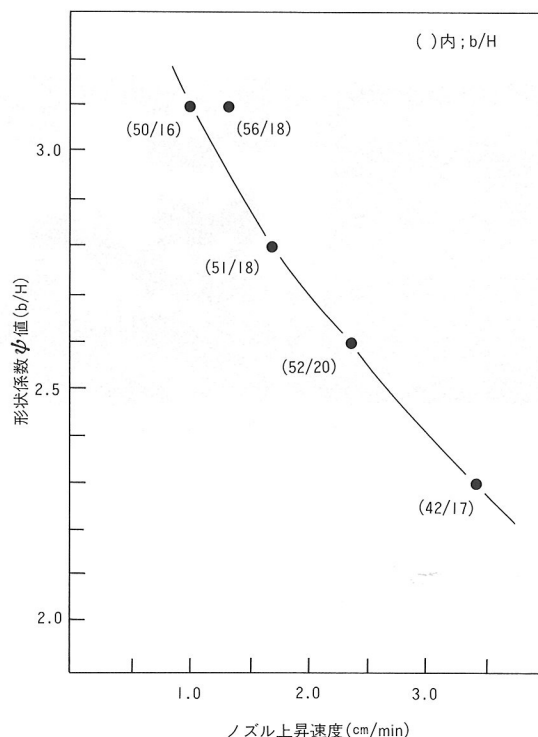


図-4 シングル施工におけるノズル上昇速度と ψ 値の関係 (板厚20~60mm)

つかの実験を行ったので、その詳細を述べる。

デモ実験の結果から、タンデム施工に関する対策の方向づけとして、

- ④ ψ 値に影響するとされる溶接条件の影響 (揺動条件と極間の組合せ)
- ⑤ ひし形ナゲットとなりやすい板厚範囲における化

学成分値の影響 (溶材 2 種類)

以上の 2 点に着目し、ワレとの相関を検討するものとした。

(2) 実験 2 (ワレ対策その 1)

実験 2 では、前項④に示した ϕ 値に影響するとされる溶接条件の影響を検討した。表-2 にパラメーターを示す。板厚は、適応板厚範囲のなかで最も大入熱を伴う 100 mm (SM490B ; C量=0.18) を採用している。

実験の結果として、パラメーターごとのワレの有無と断面マクロから得られた各 ϕ 値を、表-3 に示す。 ϕ 値は実験 1 の値より上回っているものの、パラメーターによってはワレが発生した。ワレは、実験 1 ほどでなくカラーチェックで確認できる程度であるが、発生位置は同様である。図-5 に、パラメーターとワレの関係を示す。

本検討では、ワレない安全な施工条件は ϕ 値が 2.1 以上となるが、さらに安全な条件は、最も高い ϕ 値を示した揺動条件なしで極間を最大とした溶接条件であることがわかった。この点はタンデム施工に有効であると考えられる。表-3 には同時に母材希釈率も示しているが、希釈率が低くてもワレが発生していることから、ワレに対する ϕ 値の強い傾向が予測される。

写真-5 に断面マクロ例を示す。100mm もの板厚のため溶融幅 (b と直角方向) が要求された影響か、懸念されていたひし形ナゲットは得られていない。

(3) 実験 3 (ワレ対策その 2)

実験 3 では、ひし形ナゲットが得られやすい板厚範囲

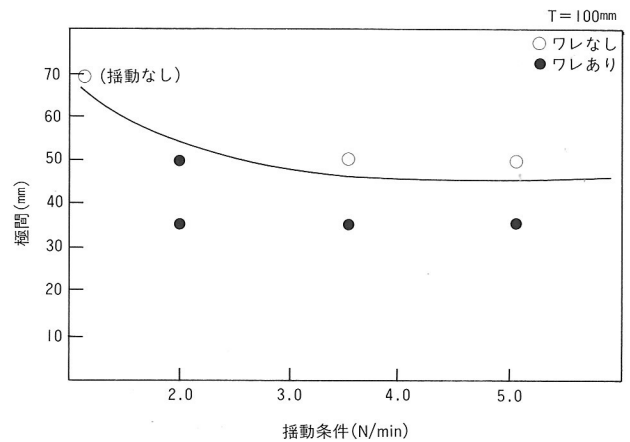


図-5 極間、揺動条件とワレの関係

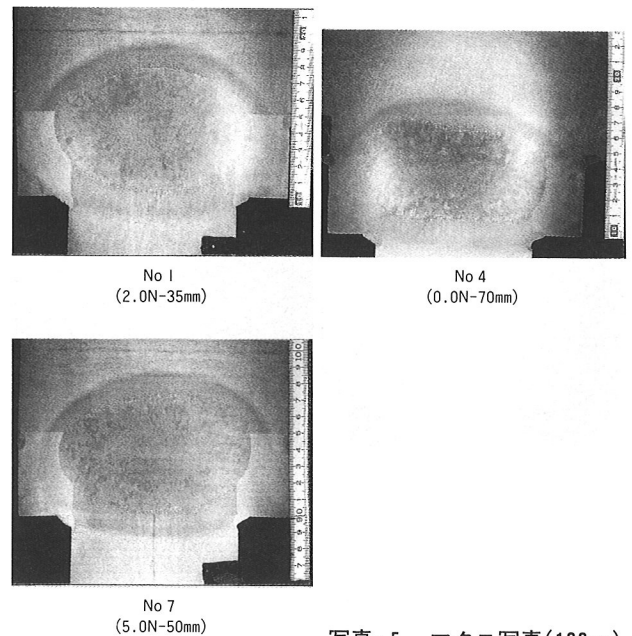


写真-5 マクロ写真(100mm)

表-2 溶接条件(実験 2)

No	板厚 (mm)		電流 (A)	電圧 (V)	速度 (CPM)	入熱量 (kJ/cm)	極間 (mm)	揺動条件	
	スキン	タイア						回数 (N/min)	停止時間 (S)
1	100	100	380	52	1.5	1 581	35	2	4
2	"	"	"	"	1.6	1 482	"	3.5	"
3	"	"	"	"	"	"	50	2	"
4	"	"	"	"	1.5	1 581	70	ナシ	ナシ
5	"	"	"	"	"	"	35	5	4
6	"	"	"	"	1.6	1 482	50	3.5	"
7	"	"	"	"	"	"	"	5	"

* 溶材 ; YM-55AT を使用

表-3 断面マクロによる計測結果

No	マクロ計測値		ϕ 値 (b/H)	母材希釈率 (%)	高温ワレの有無
	b	H			
1	73	36	2.03	60.0	微小ワレあり
2	70	38	1.84	63.5	"
3	69	34	2.03	61.8	"
4	54	24	2.25	64.5	ワレなし
5	76	38	2.00	63.6	微小ワレあり
6	72	34	2.12	62.8	ワレなし
7	69	33	2.09	63.1	"

における溶着金属成分の影響として、溶接材料を 2 種類検討した。比較した溶接材料は YM-55A (C 量 ; 0.03) と靱性対策用として採用している YM-55AT (C 量 ; 0.10) である。表-4 に各パラメーターを示す。また、ここでは同時に、YM-55AT でのシングル施工も比較のため行った。なお、使用した鋼材は 75mm (SM520B-TMC) である。

実験の結果を表-5 に、断面マクロ例を写真-6 に示す。ワレが発生しなかった試験体からは、機械試験も行った。結果として、

- ① YM-55AT を適用した場合、タンデム施工は高温ワレが発生したが、シングル施工では機械的性質を含め品質に問題は生じなかった。
- ② YM-55A を適用したタンデム施工では高温ワレは得られなかったが、溶着金属を中心とした機械的性質は母材規格値を満足しなかった。

以上のように、ワレに対する溶着金属中の炭素含有量の影響を予測したが、表-5 に示すように、施工方法と溶

表-4 溶接条件(実験3)

No	板厚(mm)		電流 (A)	電圧 (V)	速度 (CPM)	入熱量 (kJ/cm)	極間 (mm)	揺動条件	
	スキン	ダイア						回数(N/min)	停止時間(s)
1	70	75	380	53	0.98	1 233	-----	7	5
2	70	75	"	"	2.20	1 099	40	7	4
3	70	75	"	"	"	"	"	"	"

※使用溶材 No1; シングル(YM-55AT)
No2; タンデム(YM-55A)
No3; タンデム(YM-55AT)

表-5 施工結果と機械試験結果

No	UT結果	ワレの有無	希釈率	デボ中量	全溶着金属引張試験	各部衝撃試験
1	欠陥なし	なし	55%	0.152	625 615(N/mm ²) (合格)	43.7~77.2J (合格)
2	欠陥なし	なし	60%	0.141	540 588(N/mm ²) (伸び, 満足せず)	24.3~81.6J (デボ満足せず)
3	欠陥有り II, 全線	大, 小 あり	63%	0.147	※機械試験行わず。	

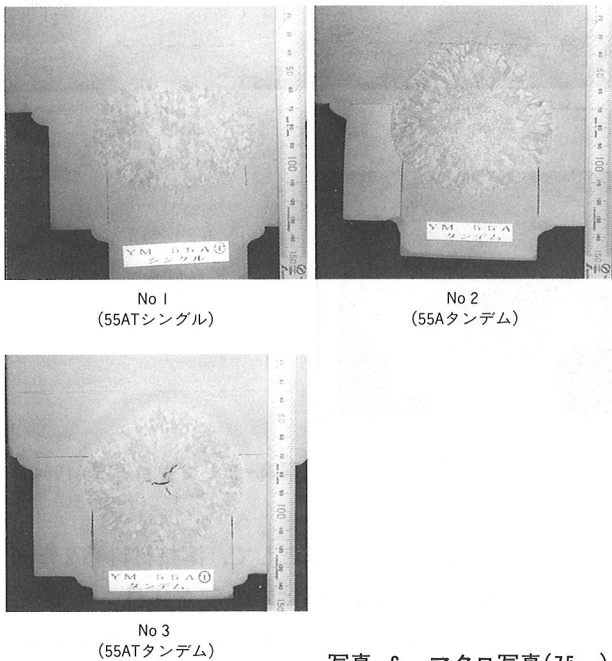


写真-6 マクロ写真(75mm)

材の組合せによる炭素量との関連については判然としな
い結果となった。また、機械的性質の低下は、過大な母
材希釈により溶材自信の持ちえている性能が低下したた
めと考えられる。

(4) 実験4 (ワレ対策その3)

これまでの実験からタンデム施工における高温ワレは、
施工条件による ψ 値の改善が効果大と予測される。母材、
溶材の組合せによる溶着金属の炭素量の問題も残ってい
るが、現状の組合せでは強度確保の点から限界があると
考えられる。よって母材希釈率を抑え、 ψ 値が改善される
溶接条件の検討が必要であろう。

ここでは、 ψ 値の改善に着目し、高温ワレが発生しやす
いとされる60, 70mmにて再検討を行うものとした。実験
2の結果を参考とし、極間を上げ揺動条件なしを固定条

件として、

- ① ワイヤー送給速度を8.5m/minとしたもの
- ② 特に ψ 値の改善としb/HのHを下げ、 ψ 値を大き
く得るためにワイヤー送給速度を6.0m/minとした
もの

以上を比較検討した。溶材はYM-55ATである。

その結果を図-6に示す。ワイヤー送給速度の違いによ
る高温ワレの有無が明確となっている。ワレの生じなかつ
たものは、形状係数のうちHが約4割程度改善され結
果として、 ψ 値も良好となっている。また、写真-7に示
すように同条件の断面マクロからは、懸念されたひし形
のナゲット形状が大きく改善されていることが確認でき
る。

図-6には、実験2のデータ(100mm)も同時にプロッ
トしたが、各板厚ごとにワレに関するワイヤー送給量臨
界値(図中の予測線)が得られそうである。ワイヤー送
給速度は低下したが、結果として溶接速度はシングルの
1.5倍程度となり、入熱量もわずかではあるが低減する傾
向にある。

4. まとめと考察

極厚ダイアフラム向けに新規開発されたSESNETタ
ンデムを適応するため、その施工性と溶接部の特性につ
いて検討を行った。多電極化されたということで能率面
ではかなり向上が図れると思われたが、従来の延長とさ

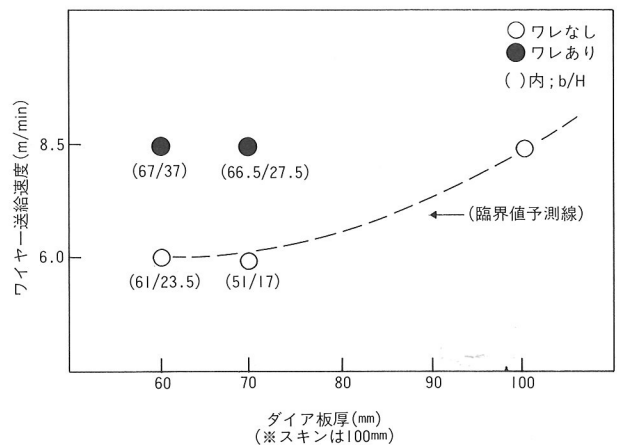


図-6 ワイヤー送給速度とワレの関係

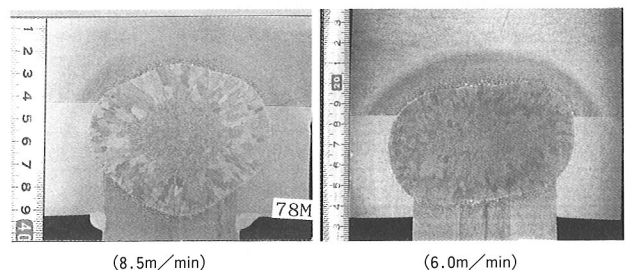


写真-7 マクロ写真(60mm)

れた施工条件では、溶着金属中に発生する高温ワレが否めないといった結果となった。高温ワレ対策としてのこれまでの実験から、現状の鋼材と溶接材料の組合せでは形状係数 ψ (b/H) 値の改善がよいとされ、これを実現させる施工面での対策は、

- ① 極間を大きくとり、揺動条件なしの施工(b 値の低減、および母材希釈量の低減)
- ② 従来よりワイヤー送給量を下げた施工(H 値の低減)

と以上の2点を配慮することが、溶接後の品質を確保することにつながることを確認した。今回はワレに至らないものもあったが、板厚ごとの母材希釈率と炭素量の関係については、今後の検討課題と思われる。

5. 今後の展開 (溶材の試作と品質向上)

これまでの検討結果から、高温ワレを防止する施工条件については、1つの方向付けができたものと考えられる。

メーカー側では、試作の溶材 (希釈後の機械的性質を考慮し化学成分構成を検討したもの) にて検討を進めている³⁾。その1部を紹介するが、図-7は溶接条件として極間を固定し、パラメーターとしてワイヤー送給速度を変化させた実験結果 (溶接条件、機械試験等の詳細は割愛する) である。このことから、

- ① ワレない ψ 値の範囲は板厚ごとに傾向をもつ。
- ② 板厚60~80mmの範囲ではワイヤー送給速度7.3 m/minで、板厚90mm以上の範囲では8.5 m/minでも

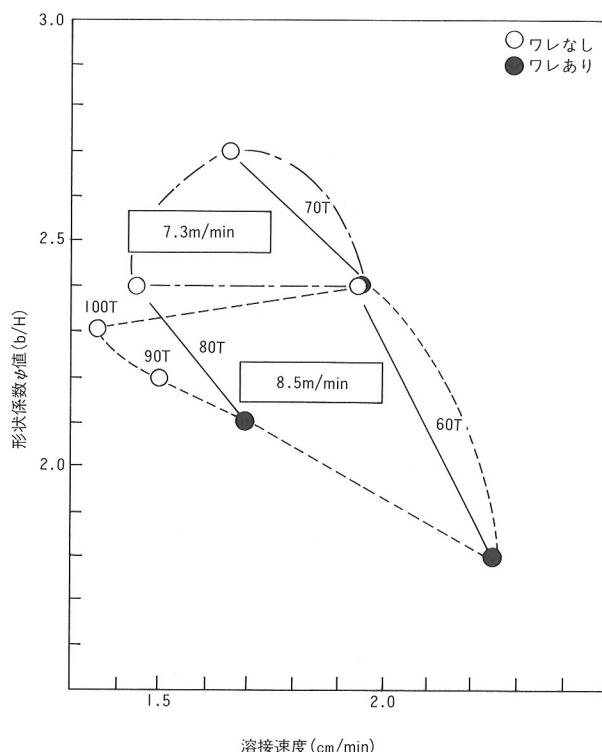


図-7 溶接速度および形状係数 ψ 値とワレの関係³⁾

施工可能である。

と以上の結果が得られている。

試作の溶材では、能率面での向上がみられる。また同時に行った機械試験では、とくに問題は生じていない。図中に同 ψ 値 (2.4) であるにもかかわらず、ワレの有無がみられるのは母材希釈率の違い (ワレ有り; 61%, ワレ無し; 57%) によるものと考えられるが、一方90, 100 mmのように母材希釈率が高めでも、条件により b , H 値が改善されれば、ワレない可能性がある。試作の溶材および今回の設定条件にてよい結果が得られたが、今後、板厚ごとのあらゆる溶接条件における ψ 値と母材希釈のあり方についても、細かく検討するべきであろう。

6. あとがき

極厚材ダイアフラムのエレクトロスラグ溶接に対し、新規に開発されたSESNETタンデムを検討した。その結果、高能率施工が普及されるなか、新たな問題点に接し、実用に向けて適応可能な条件を見きわめることができた。今後、極厚材使用の物件に対し大いに活用していきたい。

なお、本実験の一部を担当してくださいました日鉄溶接工業(株)研究所の各位に、本誌面をかりて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 溶接学会編: 溶接便覧, PP393~398, 丸善出版.
- 2) 上野, 有安, 共編: 消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接法, pp165, 森北出版.
- 3) 日鉄溶接工業技術資料: 日鉄溶接工業(株)研究所より提供.