The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	船体構造要素におけるすみ肉溶接継手の脚長低減に関する研究
Author(s)	橋本, 啓介
Citation	大阪大学, 1978, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/741
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

船体構造要素におけるすみ肉溶接継手の脚長低減に関する研究

昭和53年5月

橋　本　啓　介

船体構造要素におけるすみ肉溶接継手の脚長低減に関する研究

目　　次

緒　　論……1

第1章　有効溶込みを考慮した前面すみ肉溶接継手の静的強度……3
1．1　緒　　言……3
1．2　実 験 方 法……4
1．3　実験結果とその解析，P_o 実験式……7
1．4　最大のど応力と破壊角に関する考察……12
1．5　溶込み深さと脚長の低減……17
1．6　結　　言……19

第2章　すみ肉溶接の溶込み深さに関する熱伝導論的考察……20
2．1　緒　　言……20
2．2　平板ビード溶接の溶込み深さに関する熱伝導論的考察……20
2．3　すみ肉溶接形状，寸法の定義……25
2．4　すみ肉溶接の溶込みと溶込み代表量 d の関係……27
2．5　結　　言……29

第3章　すみ肉溶接の溶込みに関する実験……30
3．1　緒　　言……30
3．2　実 験 方 法……30
3．3　実験結果（1）電極溶融速度……34
3．4　実験結果（2）溶着速度と脚長……35
3．5　実験結果（3）溶込み断面積と溶込み深さ……35
3．6　結　　言……35

第4章　すみ肉溶接の脚長と溶接条件の関係……60
4．1　緒　　言……60
4．2　電極材の溶融速度と溶着速度……60
4．3　溶着速度実験式，公称脚長の算定……62
4．4　公称脚長を得るための溶接条件……65
4．5　結　　言……69

第5章　すみ肉溶接の溶込みと溶接条件の関係……71

5．1　緒　　言……71
5．2　溶接条件と溶込み代表量d……71
5．3　溶込み形状係数δ(M)の実験式，標準アーク電圧の算定……75
5．4　溶込み代表量dの実験式，溶込み深さpの算定……79
5．5　結　　言……86

第6章　提案した諸実験式の船体縦通材等実用溶接への適用……88
6．1　緒　　言……88
6．2　適用した実用溶接……88
6．3　実用溶接の諸実測データ……89
6．4　実験式計算値と実用溶接実測値の比較……90
6．5　UF実験用引張試験片作製による諸実験式実用性の確認……92
6．6　断面形状に関する実験式の実用性……94
6．7　結　　言……96

第7章　本研究の応用，数値計算例……103
7．1　緒　　言……103
7．2　溶接条件の選定について……103
7．3　低減脚長とその溶接条件の算定……108
7．4　結　　言……111

総　　括……112
参考文献……115
本論文に関連した発表論文……116

緒　　論

船体構造要素におけるすみ肉溶接継手は，作業能率上開先をとらない場合が比較的多いが，溶込み深さを溶接条件によって定量的に制御し保証することができれば，かなり厚い板でも開先加工を省略することができ，しかも定量的に脚長を低減することが可能であろう。このことは，船体構造の溶接継手の中で占めるすみ肉継手の割合が少なくとも80%を超えることを思えば，能率上，経済上きわめて有利であることは明らかである。

いうまでもなく，すみ肉溶接のサイズ（のど厚または脚長）は継手の設計強度（最大のど応力）から定められ継手の強度を保証する重要な因子であるが，実際にはその有効溶込み（両部材が実際に接合している部分）が継手強度を支配する大きな因子であることは周知のとうりである。そこで，当然その溶込みに対応する脚長低減の問題が起ってくるわけで，それにはまず，すみ肉脚長および溶込み深さと破壊強度との間の普通性のある定量的関係を把握する必要がある。

静荷重を受けるすみ肉溶接の強度については，古くから理論的に実験的に数多くの研究がなされてきたが，主として溶込みの効果を考慮しないものが多かったようである。しかし，その後 Deep fillet weld の問題が採り上げられるようになり，最近ではスエーデンの生産技術協会（Swedish Institute for Production Engineering Research）において，溶込み深さによる脚長低減の問題に関し広範な実験的研究[1]が行なわれており，また大阪大学の佐藤教授等により溶込み深さを考慮した綿密な理論的研究[2),3)]が発表されている。

現在，サブマージアーク溶接法などの自動アーク溶接法が発達普及して，船体構造の溶接には広範に採り入れられており，寸法，品質ともに安定した Deep fillet weld が得られるようになったし，また開先をとってグルーブ溶接を併用したすみ肉継手は，非常に溶込みの深い一種の Deep fillet weld と考えられるから，このような場合，すみ肉溶接継手の強度保証を単に脚長のみに依存することは不合理，不経済であろう。従来，各国においてもサブマージアーク溶接の場合，公称のど厚にある一定係数を乗ずるか，あるいは一定値を加算するなどの方法により，ある程度の脚長低減を認めている例は少なくない。しかし，いずれも定性的にある程度の Deep fillet weld を予期しての処置であって，有効溶込みの深さを定量的に考慮した算定結果によるものではない。

そこで本研究では，実用的でしかも再現性の高い低減脚長算定式の作成を目途として，まず前面すみ肉溶接の模型試験片により系統的な引張試験を行なった上，すみ肉溶接継手の強度を脚長と溶込み深さの関数として把握し，これより溶込み深さの値に応じて許容さるべき低減脚長の算定式を導いた[21)]。

しかし，このような低減脚長を設計の段階で計画的に採用するためには，すみ肉継手の所要強度に必要なのど厚（つまり公称脚長）と溶込み深さを得るための溶接条件を明確にする必要

があり，施工に当ってそれらのすみ肉溶接寸法が溶接条件によって正確に制御され再現されなければならない。したがって，本研究ではさらに，大脚長の Deep fillet weld に対し最も利用頻度が高いと思われるサブマージアーク溶接法により数多くの系統的な実験を行なって，すみ肉溶接の公称脚長ならびに溶込み深さの推定に資するための実験式を導くことにした[20]。

すみ肉溶接のサイズと溶接条件の関係については，既に豊富な資料が実用に供されており，また，一般に溶込みと溶接条件の関係についても古くから多くの研究[4),5),6)]がなされているが，あえてこの問題をここに採り上げた理由は，とくにすみ肉溶接継手の有効溶込みと溶接条件の関係を確実に把握する必要があるためであり，また脚長がこの有効溶込みの深さと密接な関連をもっていると考えたからである。

第1章　有効溶込みを考慮した前面すみ肉溶接継手の静的強度[21)]

1. 1　緒　　言

本章では，脚長低減の問題に関連して前面すみ肉溶接の静的強度を採り上げ，次のような項目について実験的研究を行なった。

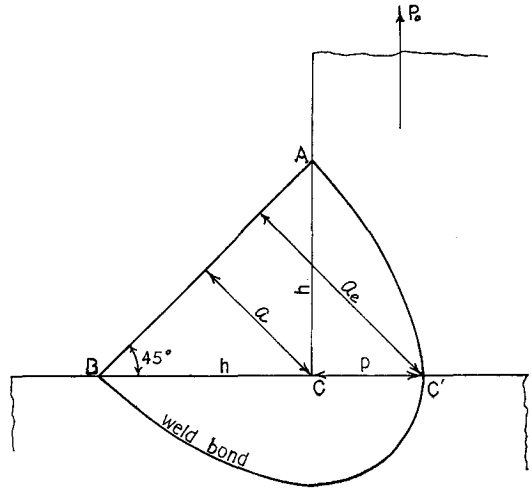
(a)　すみ肉溶接継手においては，脚長が増すに従いその破壊応力は低下する傾向にあるが[7),8)]，その定量的追求。

(b)　Deep fillet weld では，溶込みを考慮した有効のど厚が強度上どのような効果を与えるか，その定量的追求。

(c)　以上の(a)，(b)を組合わせて考える場合，その寸法効果が破壊強度にどのように現われてくるかその定量的追求。

そして，これらの実験は，溶接施工上の冶金的諸因子による実験結果の変動を避けるため，すべて圧延鋼板をもって作製した前面すみ肉継手の模型試験片を用いて引張試験を行ない，上述各項の寸法効果のみを抽出検討した。

その結果，溶込み深さを含むすみ肉寸法と破壊荷重との関係を表わす実験式を求めたが，こ



Note : P_0 = Load per unit weld length
a = Nominal throat depth
a_e = Effective throat depth
h = Leg length
p = Effective penetration

Fig. 1-1　Cross-section of a nominal fillet weld

の破壊荷重実験式については，実際のすみ肉溶接継手試験片の引張試験を行なってその実用性を確認した。

便宜上，前者の模型継手による系統的実験の Code を *MF*，後者の実際の溶接継手による確認実験の Code を *UF* で表わし，それぞれ *MF* 実験，*UF* 実験と呼ぶ。なお，その他使用した諸記号の主要なものを摘記してあらかじめ下に示しておく。Fig. 1—1 参照

P：破壊荷重，kg

ℓ：有効溶接長（試験片厚さ），mm

h：すみ肉脚長，mm

p：すみ肉溶接継手の溶込み深さ，mm

a：すみ肉溶接のど厚，mm $=h/\sqrt{2}$

a_e：すみ肉溶接有効のど厚，mm $=(h+p)/\sqrt{2}$

P_o：単位溶接長当りの破壊荷重，kg/mm $=P/\ell$

σ：最大のど応力，kg/mm^2 $=P_o/a=\sqrt{2}P_o/h$

σ_u：すみ肉溶接の破壊応力，kg/mm^2

σ_w：溶着金属の引張強さ，kg/mm^2

1. 2 実験方法

(1) 模型継手による実験（*MF* 実験）

Table 1-1 Series of experiment MF

Series(I)		Series(II)		Series(III)		
p=0		h=16 mm		h+p=20 mm		
No	h mm	No	p mm	No	h mm	p mm
11	24	21	0	31	20	0
12	22	22	2	32	18	2
13	20	23	4	33	16	4
14	18	24	6	34	14	6
15	16	25	8	35	12	8
16	14	26	10	36	10	10
17	12	27	12	37	8	12
18	10	28	14	38	6	14
19	8	-	-	-	-	-
10	6	-	-	-	-	-

Note: Refer to Fig. 1-2
h: leg length, mm
p: effective penetration, mm

まず，模型継手試験片による *MF* 実験では，Table 1—1 に示すように Series(Ⅰ)，(Ⅱ) および (Ⅲ) の 3 種類の系統的実験を行なった。

Series (Ⅰ) は，溶込み $p=0$ で脚長 h を系統的に変化せしめたもの，

Series（Ⅱ）は，脚長$h=16$mmと一定値に保持し，溶込みpを系統的に変化せしめたもの，Series（Ⅲ）は，脚長と溶込みの和を$h+p=20$mmと一定値に保持し，hとpの双方を系統的に変化せしめたものである。

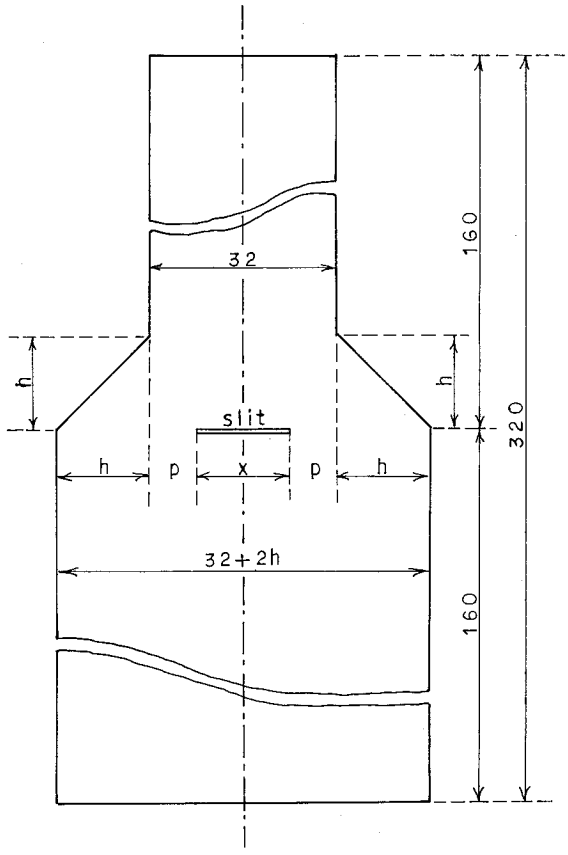


Fig. 1-2 Idealized model specimen of a fillet weled Tee-joint for the experiment MF

試験片は Fig. 1—2 に示すような前面すみ肉継手の模型であるが，試験片材としてはメーカーの異なるA，B２種類の圧延軟鋼板を用い，それぞれMFA実験，MFB実験として区別した。いずれも公称板厚10mmのＪＩＳ ＳＳ41である。MFA，MFBとも Table 1—1 に示す各系統の試験片全数（同一寸法のものを２枚づつ作製）をそれぞれ１枚の板材よりロール方向に採取した。この場合，試験片の周囲はガス切断後切削仕上げ，スリットは幅0.5mmの放電加工による。

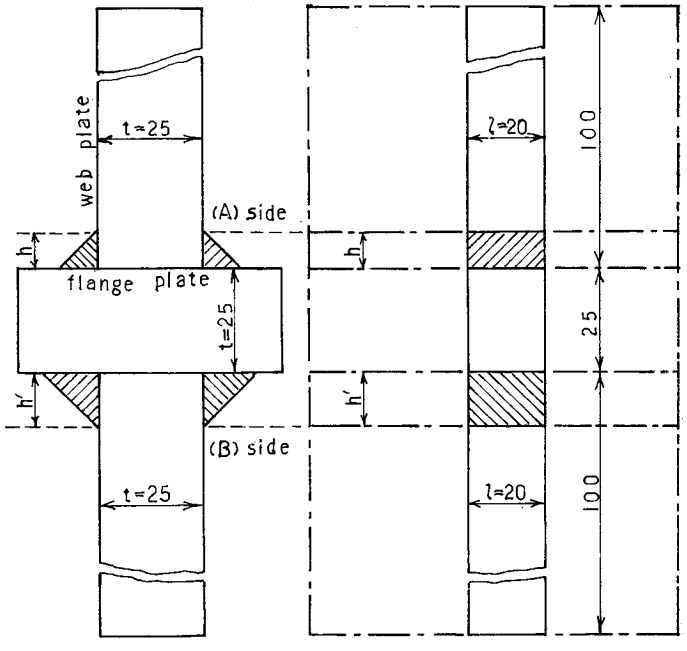
あらかじめ各試験片の厚さ（つまり有効溶接長）ℓ，脚長h，溶込み深さpについて精密な寸法を実測した後，上述３系統の引張破壊試験を行ない破壊荷重Pを求めたが，倍率４の写真により破壊角（Ψ）の計測も行なった。

なおこの場合，試験片自体の強さが溶着金属の強さに該当するので，MFA，MFBとも，

それぞれの模型試験片と同一の試験材からＪＩＳ　Z2201の１号試験片４枚づつを採取し，その引張強さを求めた。

(2)　すみ肉溶接継手による実験（ＵＦ実験）

次に，ＭＦ実験によって得られた実験式の実用性確認のために行なったＵＦ実験では，Fig. 1-3 に示すような十字すみ肉溶接継手をサブマージアーク溶接によって作製し，その引張試験を行なって破壊荷重Pを求めた。



Note: t=plate thickness, mm
l=weld length, mm
(A) side=test joint, leg length h
(B) side=hold joint, leg length h'

Fig. 1-3 Specimen design of a cruciform fillet welded joint for the experiment UF

試験材は板厚25mmの軟鋼板（ＪＩＳ　ＳＳ41）を用い，軟鋼用電極ワイヤにより下向単層すみ肉溶接を行なったが，図示のように(A)側が試験継手（破壊側継手），(B)側が保持継手である。

(A)側試験継手の溶接は，径3.2mmおよび4.8mmの電極ワイヤを用いてウエブ材両面まったく同一溶接条件で施工した。この場合の溶接条件は第２章以降で得られた諸実験式を利用し，平形すみ肉で脚長hはほぼ５～12mm，溶込みpはほぼ0～７mmの範囲の値が段階的に得られるように選定した。得られた試験継手の溶接部寸法を Table 1-2 に示す。いずれもウエブ材両面溶接部の平均値である。ただし，両面の寸法差はだいたい0.5mm以内に収まっていた。

(B)側保持継手の溶接は，引張試験による破断を防ぐため径6.4mmの電極ワイヤを用い，比較

Table 1-2 Fillet size (h) and effective penetration (p) of each welded joint specimen (Experiment UF)

(3.2 φ)			(4.8 φ)		
Ser. No	h mm	p mm	Ser. No	h mm	p mm
FAB3-1	5.3	0	FAB5-1	7.1	2.1
" 2	5.9	0.9	" 2	8.3	3.2
" 3	6.9	2.2	" 3	9.0	4.3
" 4	8.1	3.0	" 4	9.8	5.1
" 5	9.0	3.5	" 5	10.6	5.5
" 6	9.3	3.9	" 6	11.1	6.0
" 7	9.8	4.5	" 7	11.3	6.4

Note: Each value of h and p is the average of both side welds of a Tee-joint.
$h=\sqrt{2}\cdot a$

的大電流，低速度の溶接条件を選んで，溶接部の寸法をいずれも試験継手側よりはるかに大きな値となるようにした。

これらの十字継手はすべて安定溶接ビードの長さを300 mm以上とし，溶接完了後，応力除去焼鈍を行なってから鋸盤により溶接長 $\ell=20$mmに切取り，同一継手から2ないし3個の引張試験片を作製した。鋸切断した溶接部両面はマクロエッチング処理の上倍率4の写真に撮影，破断前のビード断面積（S_1），溶込み断面積（S_2），脚長（h），のど厚（a），溶込み深さ（p）等を測定，破断後同じく倍率4のマクロ写真により破壊角（Ψ）を実測した。なお，溶着金属の引張強さは，同一試験材を用い，ＪＩＳ　Ｚ 3111　Ａ1号試験片によって求めた。

1．3　実験結果とその解析，P_o実験式

破壊荷重 P kgと脚長 h mmおよび溶込み p mmとの関係を

$$P=A\ell(h+p)^n \quad kg$$

または $P_o=Ah^{n1}(+p/h)^{n2}$ kg/mm

のような関数形で与えられるものと仮定し，MF実験で得られたデータ P，h，p，ℓ 等によってその係数 A および指数 n を求めた。その結果を以下に示す。実験式はすべて上記 P_o 式の形でまとめたので，これを P_o 実験式と略称する。

(1)　各 Series 実験の結果

Ser.（Ｉ）実験の場合はすべて $p=0$ であって，実験式は次のとうり得られた。

$$P_o=Ah^{0.8} \quad \cdots\cdots(1.1)$$

ただし，MFＡでは　$A=43.22$

MFBでは　$A=46.54$

Fig. 1-4 に（1·1）式に対する実験値のプロット図を示す。

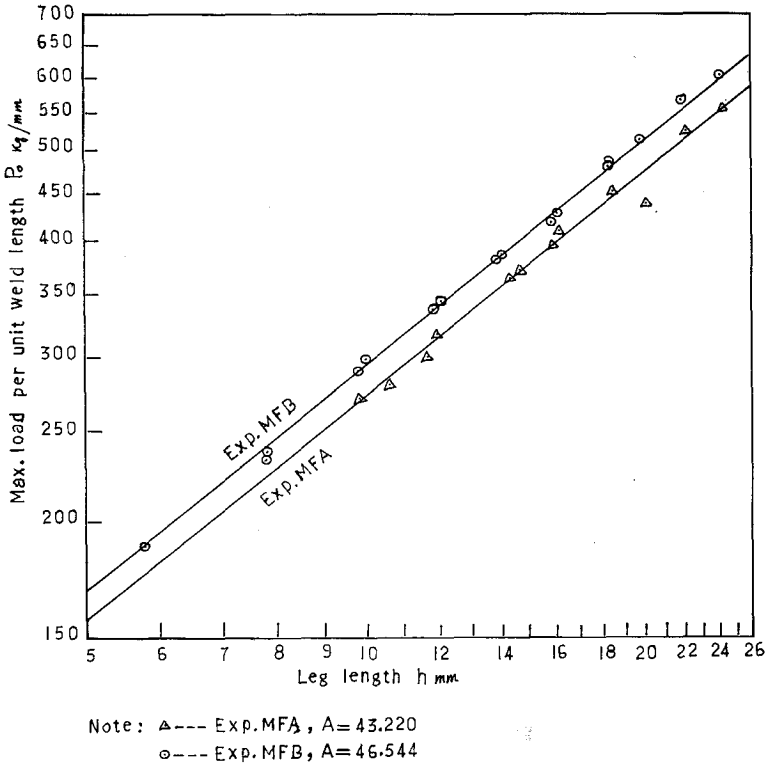


Fig. 1-4 A plot of the data of Experiment MF, Ser. (I) on the curve $P_0=Ah^{0.8}$

Ser.（Ⅱ）実験の場合は脚長が一定で，$h=16$mm

MFA実験により $P_0=391.138\ (1+p/h)^{1.1}$

MFB実験により $P_0=422.961\ (1+p/h)^{1.1}$

が得られた。いま，(1·1) 式より $p=0$ のとき $P_0=Ah^{0.8}$ であるから

MFAでは　$P_0=391.138=A\times16^{0.8}$　$\therefore A=42.56$

MFBでは　$P_0=422.961=A\times16^{0.8}$　$\therefore A=46.03$

したがって両式をまとめて，

$$P_0=Ah^{0.8}\ (1+p/h)^{1.1} \quad \cdots\cdots (1.\ 2)$$

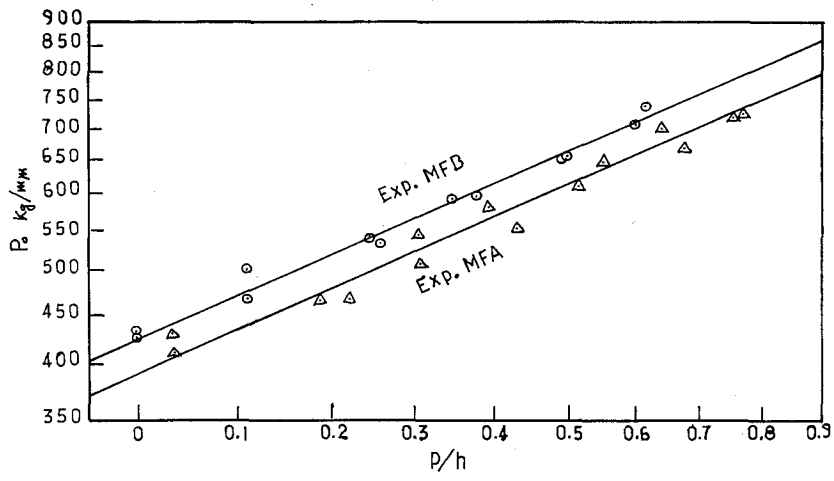
ただし，MFAでは$A=42.56$

MFBでは$A=46.03$

Fig. 1-5 に (1.2) 式に対する実験値のプロット図を示す。

Ser.（Ⅲ）実験の場合は脚長と溶込みの和が一定で，$h+p=20$mm

MFA実験により $P_0=469.712\ (1+p/h)^{0.3}$



Note: △---Exp. MFA, A=42.563, h=16 mm
⊙---Exp. MFB, A=46.026, h=16 mm

Fig. 1-5 A plot of the data of Experiment MF, Ser. (II) on the curve $P_0=Ah^{0.8}(1+p/h)^{1.1}$

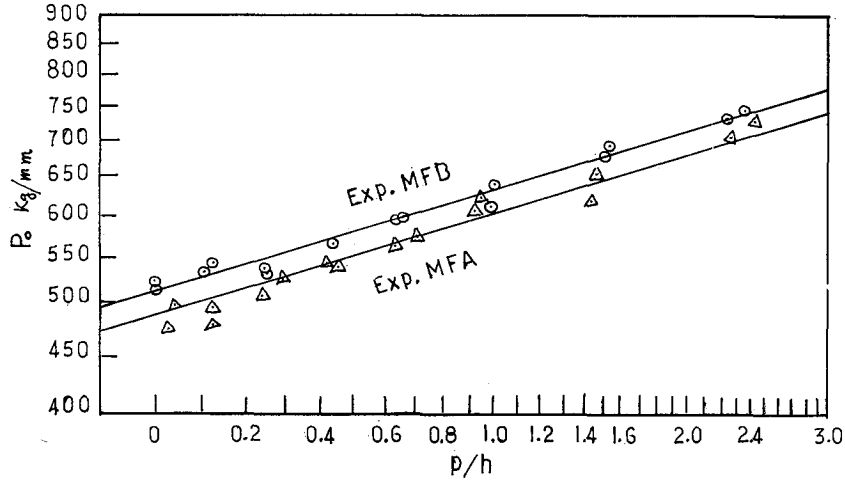
MFB実験により $P_0=512.531\ (1+p/h)^{0.3}$

が得られた。いま，

$$(1+p/h)^{0.3}=\frac{h^{0.8}}{(h+p)^{0.8}}\cdot(1+p/h)^{1.1}$$

のように書き替えることができるので，上の2式はそれぞれ次のようになる。

MFAによる式は $P_0=42.76h^{0.8}\ (1+p/h)^{1.1}$



Note: △---Exp. MFA, A=42.757, h+p=20 mm
⊙---Exp. MFB, A=46.655, h+p=20 mm

Fig. 1-6 A plot of the data of Experiment MF, Ser. (III) on the curve $P_0=Ah(h+p)^{0.8}(1+p/h^{0.3})$

MFBによる式は $P_{\circ}=46.66h^{0.8}\ (1+p/h)^{1.1}$

したがって両式をまとめると，

$$P_{\circ}=A\ (h+p)^{0.8}\ (1+p/h)^{0.3}$$

または $P_{\circ}=Ah^{0.8}\ (1+p/h)^{1.1}$ ……(1. 3)

ただし，MFAでは$A=42.76$

MFBでは$A=46.66$

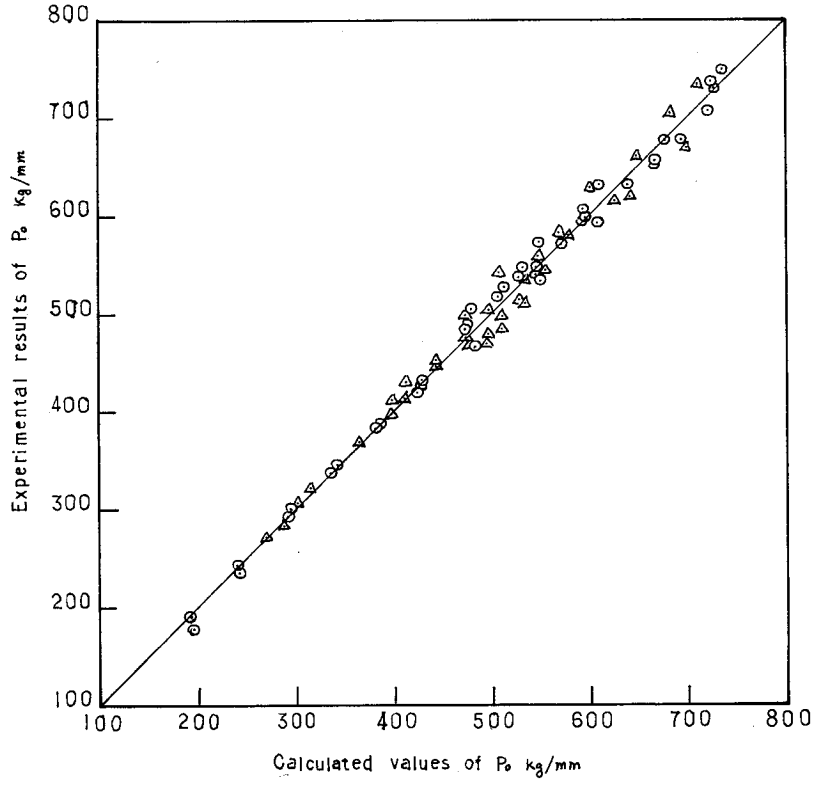
Fig. 1-6 に (1.3) 式に対する実験値のプロット図を示す。

(2) $P_{\circ}$ 実験式のまとめ，係数 A に対する考察

以上 (1.1), (1.2), (1.3) の式を綜合すると，結局 $P_{\circ}$ 実験式は次のようにまとまる。

$P_{\circ}=Ah^{0.8}\ (+p/h)^{1.1}$ ……(1. 4)

そして，係数Aはそれぞれの平均値をとって，



Note : $P_{\circ}=a_{\sim}h^{0.8}(1+p/h)^{1.1}$

△---Exp. MFA, $a_{\sim}=43.0$ kg/mm²

⊙---Exp. MFB, $a_{\sim}=46.4$ kg/mm²

Fig. 1-7 A plot of experimental results vs. calculated values of P_0 (Experiment MF)

$$\left.\begin{array}{l}\text{MFA実験の場合，}\ A=42.85\fallingdotseq 43.0\\ \text{MFB実験の場合，}\ A=46.41\fallingdotseq 46.4\end{array}\right\}\cdots\cdots(1.\ 5)$$

一方，それぞれの試験材自体の引張試験から，次のような引張強さ σ_w が得られた。

$$\left.\begin{array}{l}\text{MFA試験材では，}\ \sigma_w=42.94\fallingdotseq 43.0\ kg/mm^2\\ \text{MFB試験材では，}\ \sigma_w=46.44\fallingdotseq 46.4\ kg/mm^2\end{array}\right\}\cdots\cdots(1.\ 6)$$

式（1.5）と（1.6）を比較することにより，$A\fallingdotseq\sigma_w$ の関係があると考えてよいであろう。この σ_w は，それぞれの模型継手試験に関し溶着金属の引張強さに該当するもので，$p=0$ のときすみ肉溶接の破壊面に関する最大応力である。また，P_o 実験式（1.4）から，$p=0$ で $\ell=1$，$h=1$ のとき $P_o=A$ であるから，係数 A は $p=0$ の場合の単位すみ肉溶接の破壊荷重，つまり破壊応力である。したがって，$p=0$ の場合，すみ肉溶接継手の破壊応力（A）は，溶着金属の引張強さ（σ_w）にほぼ等しいと考えてもさしつかえないであろう。

以上より，P_o 実験式（1.4）は一般に次のように表わされる。

$$P_o=\sigma_w h^{0.8}\ (1+p/h)^{1.1}\quad kg/mm\ \cdots\cdots(1.\ 7)$$

Fig. 1-7 に（1.7）式による計算値 P_o と，その実験値 P_o との比較プロットを示す。

(3) UF 実験による P_o 実験式の実用性確認

まず UF 実験のデータ $P_o kg/mm$，$h mm$，$p mm$ の実測値により，P_o 実験式（1.4）からその係数 A の値を算出してみた結果，平均値として

$$A=46.95\fallingdotseq 47.0\quad kg/mm^2$$

が得られた。ただし，この場合の脚長はのど厚 a の実測値から $h=\sqrt{2}\,a$ として算出したもの（いわゆる公称脚長）である。UF 実験の場合，いずれもほぼ平形すみ肉が得られているのでだいたい $h\fallingdotseq\sqrt{2}\,a$ であって，その脚長 h は MF 実験における脚長 h に該当するものと考えてよいであろう。

一方，溶着金属の引張強さは

電極ワイヤ 3.2ϕ の場合，$\sigma_w=47.75\quad kg/mm^2$

同じく，　4.8ϕ の場合，$\sigma_w=46.30\quad kg/mm^2$

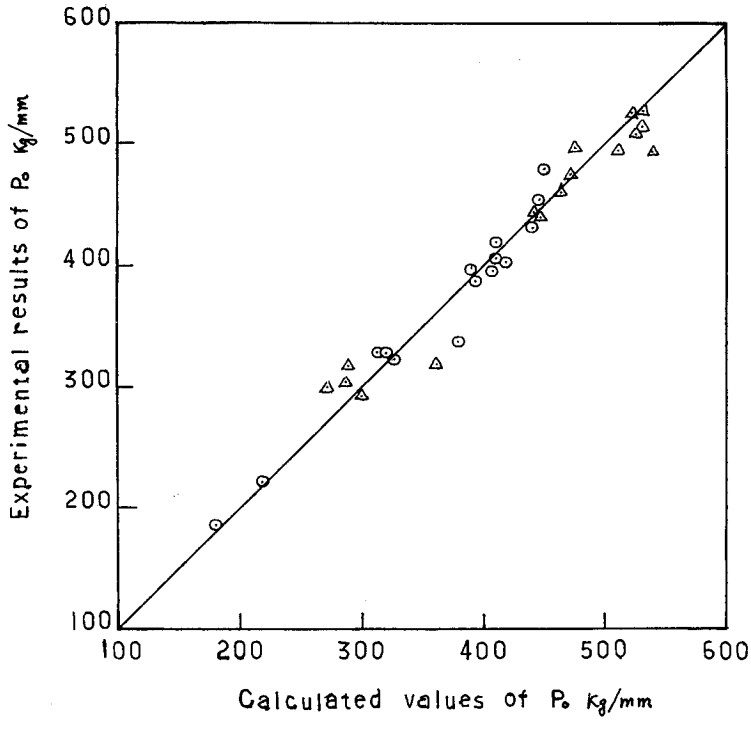
両者の平均値としては，　$\sigma_w=47.0\quad kg/mm^2$

が得られた。そこで（1.7）式より，

3.2ϕ の場合，$P_o=47.75\ h^{0.8}\ (1+p/h)^{1.1}$

4.8ϕ の場合，$P_o=46.30\ h^{0.8}\ (1+p/h)^{1.1}$

としてそれぞれの計算値 P_o と，対応する実験値 P_o との比較プロットを行なってみたが，Fig. 1-8 に示すようにかなり良好な結果が得られた。したがって，P_o 実験式（1.7）は十分実用性があるものとしてよいであろう。



Note: $P_0 = \sigma_w h^{0.8}(1+P/h)^{1.1}$

⊙---3.2 Φ, $\sigma_w = 47.75$ Kg/mm²

△---4.8 Φ, $\sigma_w = 46.30$ Kg/mm²

Fig. 1-8 A plot of experimental results vs. calculated values of P_0 (Experiment UF)

1. 4 最大のど応力と破壊角に関する考察

(1) $P=0$ の場合の最大のど応力および破壊角

すみ肉溶接継手の強度は，通常最大平均のど応力によって評価される。つまり，

$$\text{最大のど応力}\ \sigma=\frac{P}{a\,\ell}=\frac{P_0}{a}\ kg/mm^2 \cdots\cdots (1.\ 8)$$

であって，この σ をもって強度を比較するわけである。すみ肉溶接が，その最小断面積であるのど厚断面 a で破壊するものとすれば，この σ が破壊面の最大応力である。したがって，破壊面の最大応力が溶着金属の強度 σ_w に等しいと考えることにより，$\sigma=\sigma_w$ というきわめて単純な関係が得られる。

しかし，すみ肉溶接の破壊面は必ずしものど断面ではなく，Fig. 1-9 に示すようにそれより小角度（Ψ）の断面（a_u）で破壊することが多い。そして一般に，

$$\sigma<\sigma_w \cdots\cdots (1.\ 9)$$

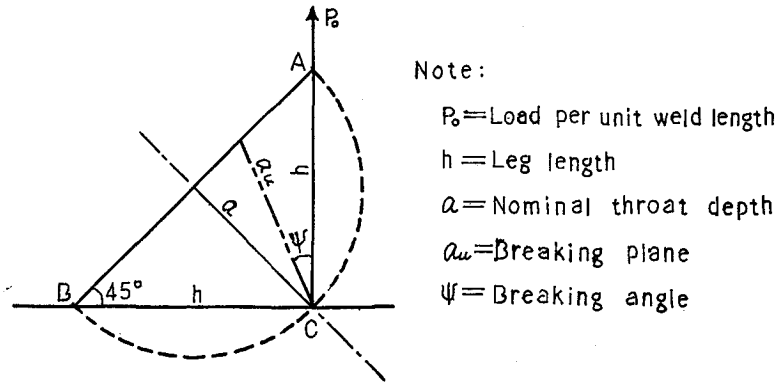


Fig. 1-9 Throat depth and breaking plane of a nominal fillet weld (P=0)

の関係があることが理論的にあるいは実験的に実証されている。たとえば，理論的には従来弾性破損の法則から導かれた各種の説注)が提唱されているが，主として破壊角と関連づけて論ぜられており，塑性応力分布が一様で各部同時に破断するという考え方に立脚しているものが多い。しかし，実際の破断はルート部から始まって次第に外方に進展して行くため，断面形状の変形や加工硬化などの問題も起ってくるはずで，当然すみ肉寸法つまり脚長の影響なども考えられる。そのほか，最大のど応力 σ と破壊角 Ψ に関しては多くの実験的研究も行なわれてきたが，明確な定説はないようである。

注）最大応力説……$\sigma=0.871\,\sigma_w$　$\Psi=41.5°$

最大主歪説……$\sigma=0.792\,\sigma_w$　$\Psi=36°$

最大剪断応力説……$\sigma=0.586\,\sigma_w$　$\Psi=22.5°$

内部摩擦説……$\sigma=0.614\,\sigma_w$　$\Psi=25°$

剪断歪エネルギ説…$\sigma=0.654\,\sigma_w$　$\Psi=27°$

その後，IIW15委員会が中心になって行なわれた実験結果から Ligtenberg[9] が与えた σ の式を示すと，$p=0$ の場合，

$$\sigma=0.80\sigma_w \quad \cdots\cdots(1.10)$$

また，最近佐藤等[2),3)] が理論的に求めた結果から $p=0$ の場合の σ 式を抽出して示すと，

降伏強度に関し，$\sigma=0.73\,\sigma_w$ ……(1.11)

破壊強度に関し，$\sigma=0.844\,\sigma_w$* ……(1.12)

（ただし，＊印は硬化率を 0.2 として筆者が計算したもの）

さてここで，MF 実験によって求めた実験式を (1.8) 式に導入してみると，$P=0$ のとき $P_o=\sigma_w h^{0.8}$ であるから，$a=h/\sqrt{2}$ として

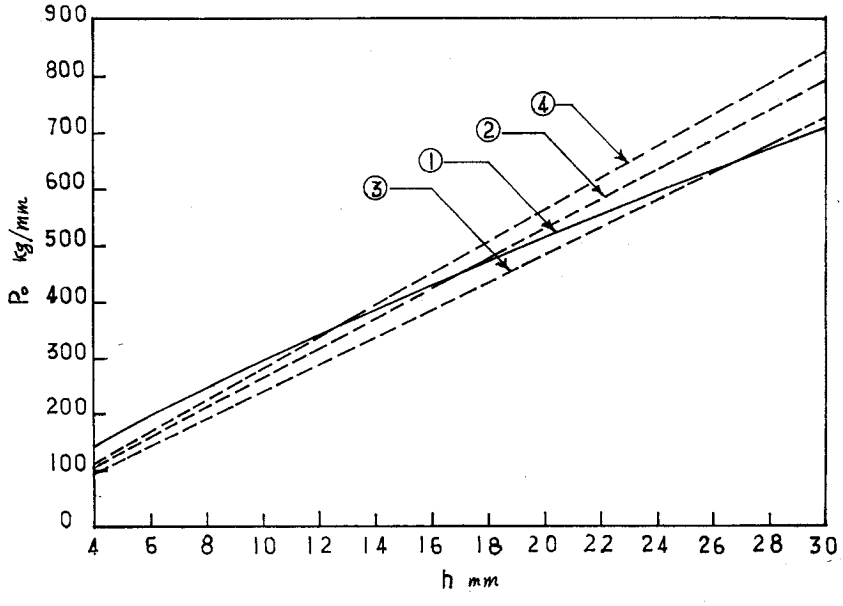
$$\sigma=\frac{\sqrt{2}}{h^{0.2}}\cdot\sigma_w \qquad \text{ただし，} h\geq 5.657 \quad \cdots\cdots(1.13)$$

この実験式によると，いわゆるすみ肉溶接の強度比 σ/σ_w の値が従来の式のように定数ではなく h の関数となっていて，h が増すほど σ の値は減少してくる。そして，$h<5.657$ のとき

$\sigma<\sigma_w$ となって不合理である。したがって，この (1.13) 式の適用範囲は $h\geq 5.657$mm に限定され，$h\leq 5.657$mmの範囲では $\sigma=\sigma_w$ と考えるべきであろう。

そもそも実験式 $P_o=\sigma_w h^{0.8}$ は，脚長hがある程度大きくなった場合を考えて求めたものであるから，$h<6$ mmの範囲では実験を行なっていない。したがって，一般に P_o 実験式(1.7)は$h<6$ mmの場合適用範囲外とすべきであろう。

参考までに，MFB 実験の例に倣い $\sigma_w=46.5$ kg/mm² とし，(1.10)，(1.11)，(1.12)，(1.13) の各式についてそれぞれ P_o 式を算出，P_o-h 曲線を比較してみると Fig. 1-10 のようになる。



Note: ①---$P_o=\sigma_w h^{0.8}=46.5\,h^{0.8}$

②---$P_o=0.8\sigma_w a=26.3\,h$-------Ligtenberg [9]

③---$P_o=0.73\sigma_w a=24.0\,h$, (yield.load)---Sato [2),3)]

④---$P_o=0.844\,\sigma_w a=27.75\,h$-----Sato [2),3)]

Strength of weld metal $\sigma_w=46.5$ kg/mm²

Fig. 1-10 Comparison of several proposed P_0 equations when $P=0$

次に，*MF* 実験の Ser.（I），$p=0$ の場合について破壊角 Ψ を実測し，これを脚長hをベースにしてプロットした結果を Fig. 1-11 に示す。

平均値 $\Psi=22.5°$ ……(1.14)

となったが，hが小さくなるに従って Ψ は増大する傾向が認められ，ばらつきがかなりあるので信頼性は低いが，この実測データから $\Psi°$ と $h$mm の関係を求めてみた結果，次のような実験式が得られた。

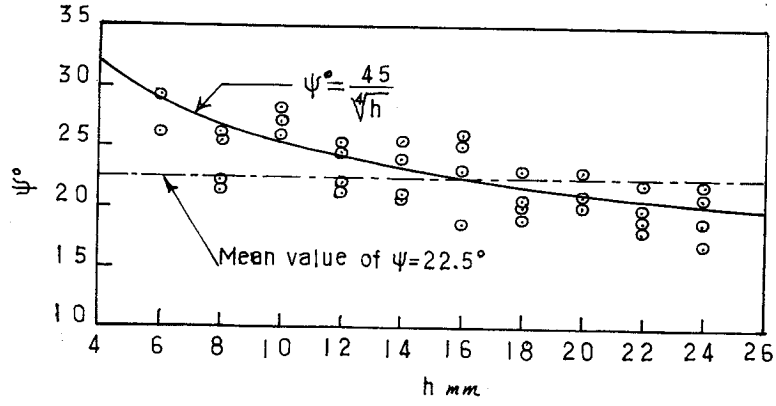


Fig. 1-11 A plot of experimental results of breaking angle ψ when (P=0)

$$\Psi^\circ = \frac{45}{\sqrt[4]{h}} \quad \cdots\cdots(1.15)$$

この実験式によると，単位すみ肉溶接（$h=1$ mm）の場合 $\Psi=45°$ で，$a=a_u$ となって破壊面はのど断面と一致することになる。なお，（1.13）式から $h=5.657$ のとき $\sigma=\sigma_w$ であるが，この h を（1.15）式に代入してみると $\Psi=29°$ となる。Fig. 1-12 に，（1.13）式と（1.15）式

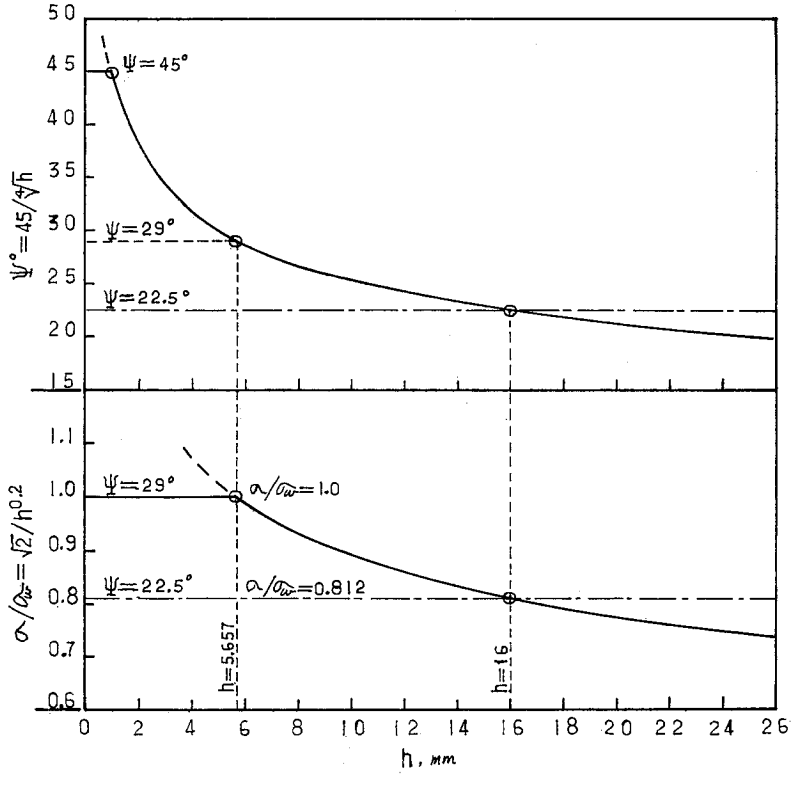


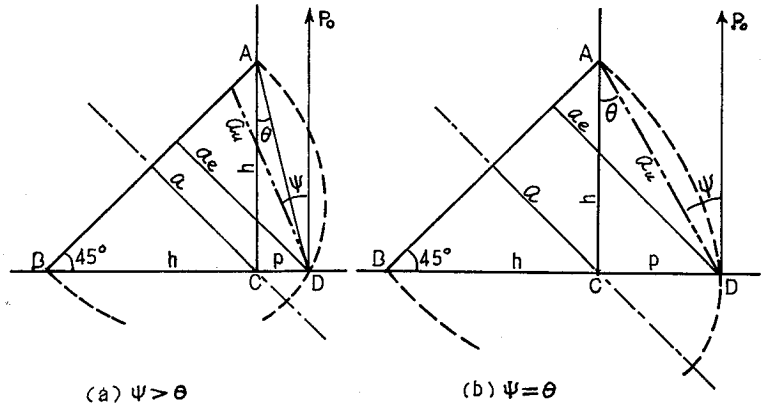
Fig. 1-12 Relation between strength ratio σ/σ_w and breaking angle ψ with regard to leg length h when $P=0$

により，$p=0$ の場合の$\sigma/\sigma_w-\Psi-h$ の関係を表わす曲線を示す。

これらの結果から，$h<6$ ㎜の小脚長の範囲では$a \fallingdotseq a_u$，$\sigma \fallingdotseq \sigma_w$ と考えても実用的にはさしつかえないのではあるまいか。P_o 実験式 (1.7) は $A=\sigma_w$ として導かれたものであるが，これは $p=0$ の単位すみ肉溶接の場合，$\Psi=45°$（したがって $a=a_u$，$\sigma=\sigma_w$）という仮定によるものである。なお，先に示した (1.12) 式＊印は，(1.14) 式 $\Psi=22.5°$ を佐藤等の理論式[2] に適用し，破壊強度に関する硬化率 $n \fallingdotseq 0.2$ を算出して求めたものである。

(2) $p>0$ の場合の有効のど厚と最大のど応力および破壊角

Fig. 1-13 に Deep fillet weld 断面各部の説明図を示す。図から明らかなように，



Note：

P_o=Load per unit weld length	a= Nominal throat depth
h=Leg length	a_e=Effective throat depth
p=Effective penetration	θ=Penetration angle
a_u=Breaking plane	Ψ=Breaking angle

Fig. 1-13 Effective throat depth and breaking planeof a deep fillet weld

$$p/h \leq 1\ (\theta \leq 45°)\ \text{では}\ a_e=\frac{h+p}{\sqrt{2}}=\frac{h(1+p/h)}{\sqrt{2}} \cdots\cdots (1.16)$$

$$p/h \geq 1\ (\theta \geq 45°)\ \text{では}\ a_e=\sqrt{h^2+p^2}=h\sqrt{1+(p/h)^2} \cdots\cdots (1.17)$$

したがって，最大のど応力は $\sigma=P_o/a_e$ に (1.7) 式を導入して，

$$p/h \leq 1\ (\theta \leq 45°)\ \text{では}\ \sigma=\frac{\sqrt{2}(1+p/h)^{0.1}}{h^{0.2}}\cdot\sigma_w \cdots\cdots (1.18)$$

$$p/h \geq 1\ (\theta \geq 45°)\ \text{では}\ \sigma=\frac{(p/h)^{1.1}}{h^{0.2}\sqrt{1+(p/h)^2}}\cdot\sigma_w \cdots\cdots (1.19)$$

また，破壊面の断面寸法 a_u も h，p を含む関数であって，次のよう表わされる。

$$a_u=\frac{a(1+p/h)}{\cos(45°-\Psi)}=\frac{h(+p/h)}{\sqrt{2}\cos(45°-\Psi)} \cdots\cdots (1.20)$$

したがって，$p=0$ のときは

$$a_u=\frac{a}{\cos(45°-\Psi)}=\frac{h}{\sqrt{2}\cos(45°-\Psi)} \cdots\cdots (1.21)$$

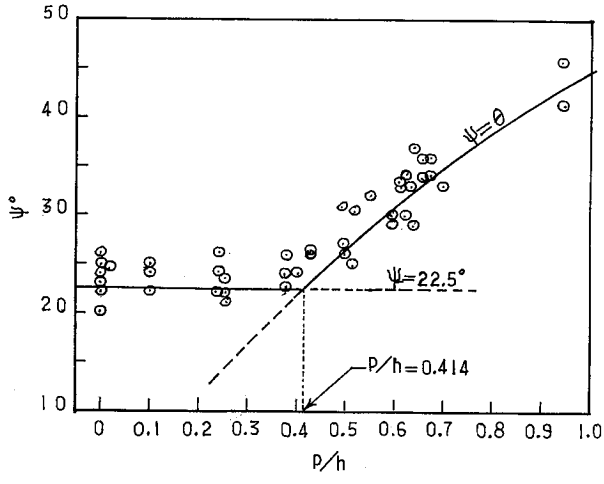
MF 実験において破壊角 Ψ を実測した結果

$\theta=0\sim22.5°$ では，$\Psi\fallingdotseq22.5°$ ……(1.22)

$\theta\geq22.5°$ では，　$\Psi\fallingdotseq\theta$ ……(1.25)

のような傾向が認められた。ここで，$p/h=\tan\theta$ したがって $\theta=22.5°$ のとき $p/h=0.414$

先に Fig. 1-11 において，$p=0(\theta=0)$ の場合の Ψ と h の関係を示したが，Fig. 1-14 は $p>0$ の場合について Ψ と p/h の関係を示した図である。Ψ の MF 実験値をプロットしてあるが，実験値はかなりよく (1.22)，(1.23) 式の曲線に沿っている。



Note : $\theta=\tan^{-1}(P/h)$

Fig. 1-14 A plot of experimental results of breaking angle ψ when $P\geq0$

1. 5 溶込み深さと脚長の低減

いま，h_o＝設計脚長（溶込みを考慮しない場合の脚長）

h ＝低減脚長（溶込みを考慮した場合の脚長）

とする。単純に，溶込み深さ p の大さだけ脚長 h_o を低減しうるとすると，

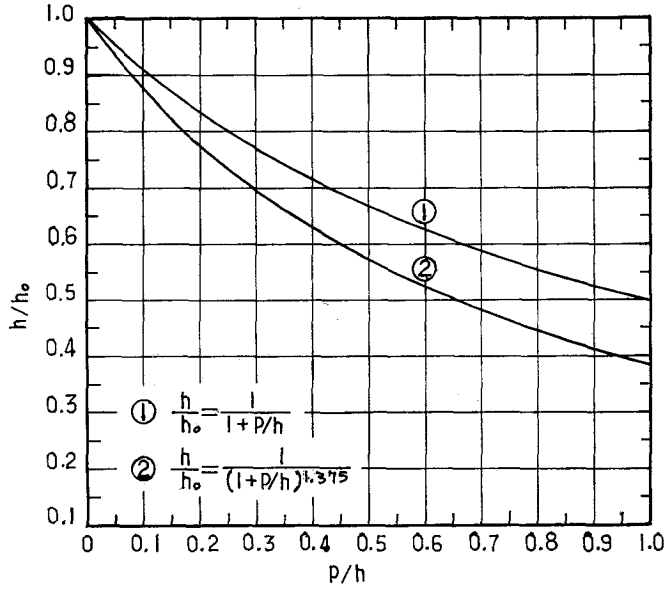
$$h=h_o-p \quad \therefore h=\frac{h_o}{1+p/h} \cdots\cdots (1.24)$$

しかし，本実験の結果から (1.7) 式で与えた P_o 実験式が求められているから，これを適用してみる。すなわち，(1.7) 式において溶込み深さ p の効果を考え，h_o の場合と h の場合とで破壊荷重 P_o が等しいとすれば，

$p=0$ のとき，$P_o=\sigma_w h_o^{0.8}$

$p>0$ のとき，$P_o=\sigma_w h^{0.8}(1+p/h)^{1.1}$

したがって，この両式より P_o を消去して



Note: h_0 = Designed leg length

h = Reduced leg length

p = Effective penetration

Fig. 1-15 Relation between h/h_0 and p/h

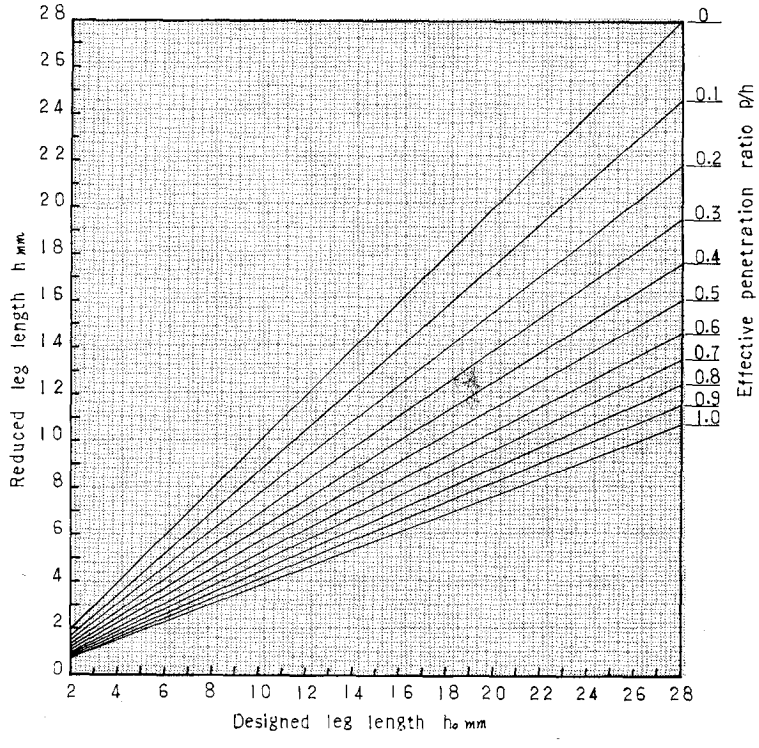


Fig. 1-16 h-h_0 DIAGRAM

$$\left.\begin{array}{l}\text{低減脚長}\ h=\dfrac{h_{\circ}}{(1+p/h)^{1.375}}\\ \text{または，脚長低減率}\ \dfrac{h}{h_{\circ}}=\dfrac{1}{(1+p/h)^{1.375}}\end{array}\right\}\cdots\cdots(1.25)$$

これは，溶込率 p/h の場合に許容される低減脚長 h を与える実験式である。Fig. 1-15 に (1.24) 式および (1.25) 式に関する $h/h_{\circ}-p/h$ 曲線を示すが，(1.24) 式の h は常に(1.25) 式の h より大であるから，溶込み深さ p の大さだけ脚長を低減すれば常に安全側にあるわけである。なお，Fig. 1-16 に $h-h_{\circ}-p/h$ 線図を示す。

1. 6 結　　言

本章では，すみ肉溶接強度の基本ともいうべき前面すみ肉溶接の静的強度に関し，脚長(h)と溶接み深さ（p）の寸法効果のみを抽出するため，軟鋼板によるすみ肉溶接継手の模型試験片を用いて引張試験を行なった。その結果，まず単位溶接長当りの破壊荷重 $P_{\circ}$ を脚長 h と溶込率 p/h および溶着金属の強さ σ_w の関数として表わす次の実験式を得た。

$$P_{\circ}=\sigma_w h^{0.8}(1+p/h)^{1.1}\quad kg/mm\quad \text{ただし}\quad h>5.675mm$$

したがって，$h>5.675mm$の範囲では，すみ肉溶接継手の最大のど応力 σ と σ_w との比が次式のような h と p/h の関数となる。

$$p/h\leq 1\ \text{では，}\ \frac{\sigma}{\sigma_w}=\frac{\sqrt{2}(1+p/h)^{0.1}}{h^{0.2}}$$

$$p/h\geq 1\ \text{では，}\ \frac{\sigma}{\sigma_w}=\frac{(1+p/h)^{1.1}}{h^{0.2}\sqrt{1+(p/h)^2}}$$

以上より，溶込み p を無視して算定される設計脚長 $h_{\circ}$ と，p の効果を考慮した低減脚長 h との関係を上の $P_{\circ}$ 実験式から導き，脚長低減率 $h/h_{\circ}$ を次のような溶込率 p/h の関数として与えた。

$$\frac{h}{h^{\circ}}=\frac{1}{(1+p/h)^{1.375}}$$

ただし，上に求められた実験式に関しては，それ自体なんら安全率を考慮していないので，その適用に当っては適当な安全率を考慮する必要があろうが，まず施工に際して溶込率 p/h が確実に保証されなければならない。所要の溶込み深さ p，脚長 h を保証する溶接条件の選定に関しては，第2章以下で与えられる諸実験式が有効に利用されるわけである。

なお，開先をとったすみ肉溶接継手に対しては，開先の深さを p と考えることにより，溶接条件によって保証する必要があるのは脚長 h のみとなる。したがって，脚長低減の実施は比較的容易となるであろう。

第2章　すみ肉溶接の溶込み深さに関する熱伝導論的考察

2. 1　緒　　言

第1章において，脚長の低減率 h/h_0 をすみ肉溶接の溶込率 p/h の関数として与えたが，この実験式から所要の低減脚長 h を定めるためには，施工に際して溶込率 p/h が保証されなければならない。そのためには，すみ肉溶接の溶込み深さ p ならびに脚長 h と溶接条件の関係がそれぞれ確立される必要がある。

そこで本章では，まず一般的に溶込みと入熱量（溶接条件）の関係を溶接熱伝導理論に基いて考察を行ない，次でこれをすみ肉溶接の溶込み深さに結びつけることにした。溶込みに関する基礎理論としては，熱伝導理論に基く移動点熱源理論が古くから提唱され，たとえば，Rosenthal equation[10]から出発した田中[11]，Christensen[6] 等の論文があるが，ここでもまったく同様の考えから出発した。

その結果，すみ肉溶接の溶込みを，移動点熱源理論から導かれた溶込み半径の関数として表わした。この溶込み半径は，入熱量つまり溶接条件の関数として与えられるので，すみ肉溶接の溶込みが溶接条件から理論的に算出されるわけである。

2. 2　平板ビード溶接の溶込み深さに関する熱伝導論的考察

溶込みに関する基礎的な考察を行なうため，半無限体の表面上を等速度で直進する移動点熱源を想定し，ある瞬間の熱源位置を原点として x 軸を熱源の移動方向，z 軸を表面に垂直な方向に選んで xyz 座標系を考えると（Fig. 2.1参照），準定常状態で表面からの熱放散を無視した場合の温度分布は次式で与えられる。[10),11)]

$$\theta=\frac{q}{2\pi kr}\cdot exp\left\{-\frac{V}{2k}(r+x)\right\} \quad \cdots\cdots(2.\ 1)$$

ここで，$\theta=\theta_c-\theta_0$ (°C)，　θ_c：任意の点(x, y, z)の温度 (°C)

θ_0：初期温度(°C)

$q=\dfrac{Q}{c\cdot\gamma}$ (°C.mm/s)，　Q：単位時間の入熱量(Cal/s)

c：材料の比熱(Cal/g.°C)

γ：材料の比重(g/mm^3)

$k=\dfrac{\mu}{c\gamma}$ (mm^2/s)，　μ：材料の熱伝導率(Cal/mm.s.°C)

$r=\sqrt{x^2+y^2+z^2}$，任意の点の位置ベクトル(mm)

V：熱源の速度＝溶接速度(mm/s)

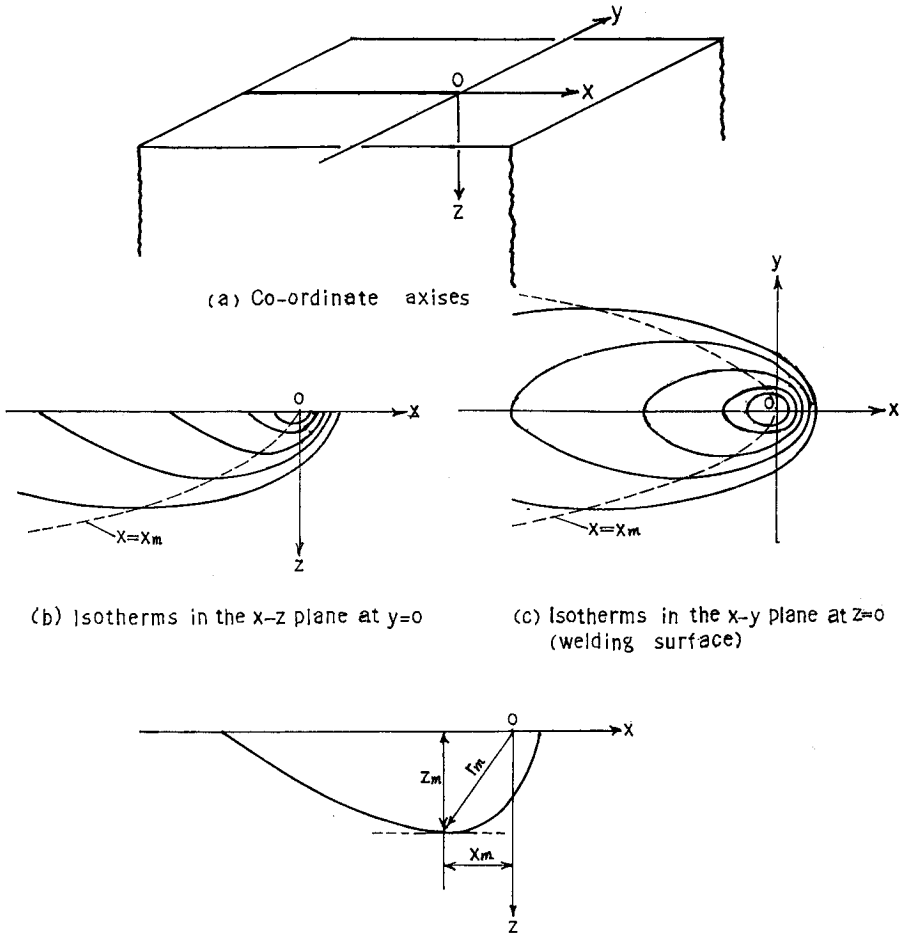


Fig. 2-1 Temperature distribution for point source moving across the surface of a semi-infinite body

いま，
$$\left.\begin{aligned}\alpha &\equiv \frac{q}{2\pi k}=\frac{Q}{2\pi\mu}(mm.^{\circ}C)\\ \beta &\equiv \frac{V}{2k}(1/mm)\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(2.\ 2)$$

とおけば，α，βは溶接条件と材料によって定まる定数で，(2. 1)式は次のように表わされる。

$$\theta=\frac{\alpha}{r}\cdot exp\left\{-\beta(r+x)\right\}\cdots\cdots(2.\ 3)$$

この式から，α，βの一定値に対して各断面の等温線はFig.2.1に示すようになる。

さて，溶接部断面の溶込線が，溶接時の溶融線を表わすものと考うれば，溶込みの深さは材料の融点に相当する等温線の最大深さ，つまり融点等温面の最大幅の点におけるzの値で与えられる。いま，一般に等温面が最大幅をとる位置x_mは，

$$\frac{\partial\theta}{\partial x}=0 \text{ を満足する } \quad x=x_m \cdots\cdots\text{(i)}$$

で与えられるから，$x=x_m$の位置で$r=r_m$とすれば，

$$\theta=\frac{\alpha}{r_m}\cdot exp\left\{-\beta(r_m+x_m)\right\}\cdots\cdots\text{(ii)}$$

(i)式によりx_mを計算すると，

$$x_m=\frac{\beta r_m{}^2}{1+\beta r_m}\cdots\cdots\text{(iii)}$$

を得るから，このx_mを(ii)式に代入して，

$$\theta=\frac{\alpha}{r_m}\cdot exp\left(-\frac{\beta r_m}{1+\beta r_m}\right)\cdots\cdots\text{(iv)}$$

そしてこのとき各等温線の最大深さz_mは，

$$z_m=\sqrt{r_m{}^2-x_m{}^2}=\frac{r_m}{1+\beta r_m}\sqrt{1+2\beta r_m}\cdots\cdots\text{(v)}$$

そこで，融点に対応するθをθ_M（融点までの温度上昇）とし，$\theta=\theta_M$のとき$r_m=r_M$，$z_m=d$（溶込み深さ）とすれば，

$$\text{(iv)式より}\quad \theta_M=\frac{\alpha}{r_M}\cdot exp\left(-\frac{\beta r_M}{1+\beta r_M}\right)\cdots\cdots(2.\ 4)$$

$$\text{(v)式より}\quad d=\frac{r_M}{1+\beta r_M}\cdot\sqrt{1+2\beta r_M}\cdots\cdots(2.\ 5)$$

したがって，溶接条件と材料が与えられればθ_Mおよびα，βが定まるから，(2.4)と(2.5)の両式からr_Mを消去すれば，そのときの溶込み深さd(mm)を求めることができる。

しかし，この計算は繁雑なのでこれらの式の変数を適当な無次元量に変換し，所要の変数範囲についてr_Mを共通パラメータとする曲線を作っておけば，任意の条件に対し曲線上から溶込みが求められるであろう。そのためにいま，

$$\beta d\equiv D \qquad \beta r_M\equiv\rho \qquad \frac{\alpha\beta}{\theta_M}\equiv N\cdots\cdots(2.\ 6)$$

とおけば，(2.4)，(2.5)式はそれぞれ次のような無次元式に変換される。

$$N=\rho\cdot exp\left(\frac{\rho}{1+\rho}\right) \qquad D=\frac{\rho}{1+\rho}\sqrt{1+2\rho}\cdots\cdots(2.\ 7)$$

この式からρをパラメータとしてNとDの関係を表わすN—D線図が作成される。Fig. 2. 2にその線図を示すが，与えられた材料および溶接条件についてα，β，θ_MよりNが算出されれば，この線図から直ちにDが求められ，$d=D/\beta$より溶込み深さdを算定することができる。

なお，適当にNの実用範囲を限定すればNとDの関係は近似的に

$$D=KN^n\cdots\cdots(2.\ 8)$$

の形で表わされるものと仮定してその近似式を求めてみた[13]。ここではFig. 2. 3に示してあるように対数目盛上でNの範囲を等間隔 $\log N=\log 3$ に分割したが，この程度の小範囲ならば近似的に $\log D=n\log N+\log K$の直線関係が成立するとしても大きな誤差はないようである。そこで，(2.7)式より求めたNとDの数値を用い最小自乗法によって(2.8)式のnとKの値を計算

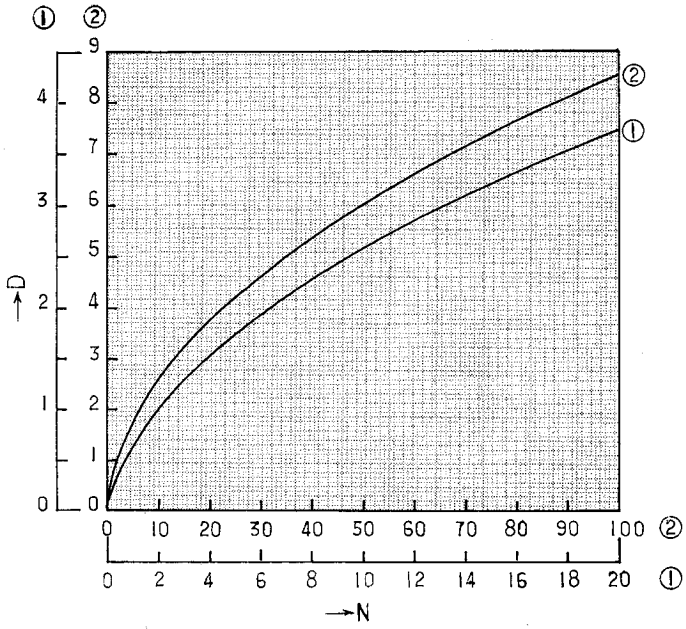


Fig. 2-2 N-D DIAGRAM

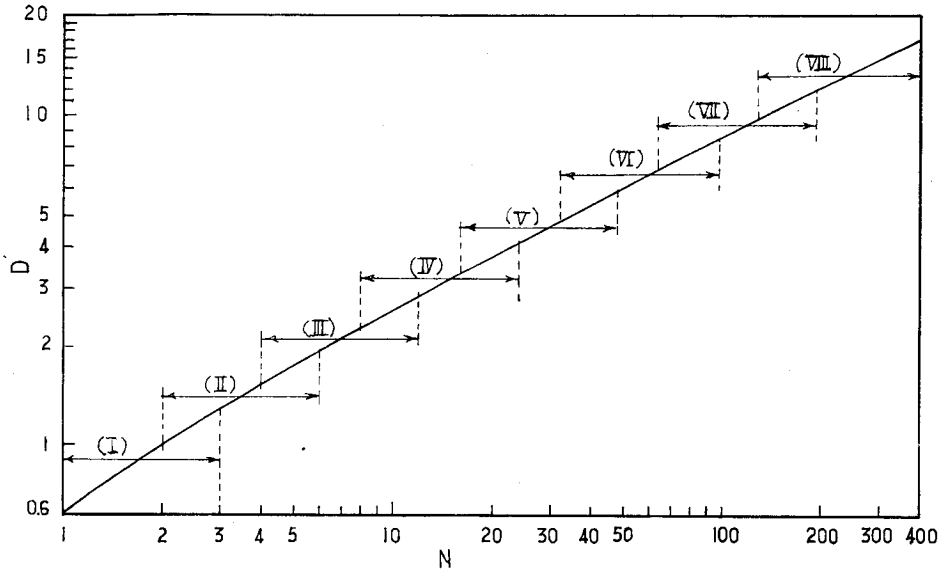
した結果，それぞれのNの範囲につきTable2.1に示す値が得られた。Fig. 2. 3にはNのそれぞれの範囲に対する近似式に番号を付して示してある。

Table 2-1 Approximate N-D equation; $D=KN^n$

Eq.No	Limit of N	n	K	D	σ
I	1----3	0.661	0.61800	0.6---1.3	0.00555
II	2----6	0.606	0.65137	1.0---1.9	0.00533
III	4---12	0.567	0.69393	1.5---2.8	0.00490
IV	8---24	0.540	0.73769	2.3---4.1	0.00560
V	16---48	0.521	0.78095	3.3---5.8	0.00438
VI	32---96	0.512	0.80733	4.8---8.3	0.00389
VII	64--192	0.507	0.82478	6.8--11.8	0.00370
VIII	128--384	0.503	0.84123	9.7--16.8	0.00238

Note: σ= Standard deviation of D

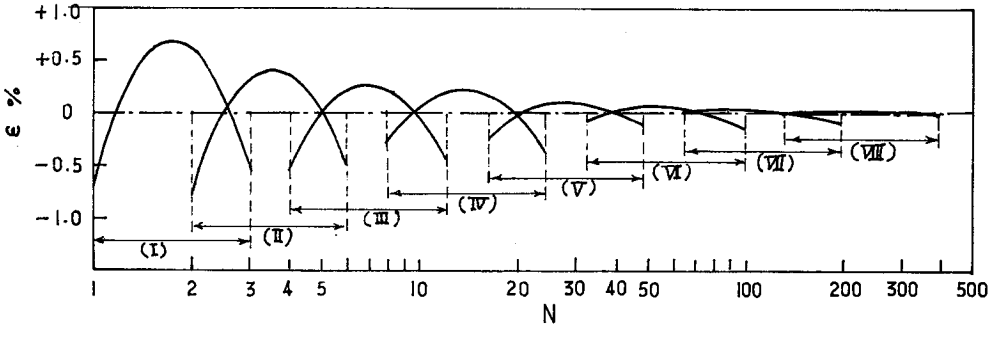
原式(2.7)に対する各近似式の誤差曲線をFig. 2. 4に示し，同じく標準偏差を算出して Table 2.1に付記してあるが，その偏差はきわめて微小であり，これらの近似式は十分実用的に利用しうると考えてよいであろう。



Note: (I),(II),----are the equation Nos. as shown below:

(I)---$D=0.618N^{0.661}$ (V)---$D=0.781N^{0.521}$
(II)---$D=0.651N^{0.606}$ (VI)---$D=0.807N^{0.512}$
(III)---$D=0.694N^{0.567}$ (VII)---$D=0.825N^{0.507}$
(IV)---$D=0.738N^{0.540}$ (VIII)---$D=0.841N^{0.503}$

Fig. 2-3 N-D Diagram and appricable limits of the approximate equations $D=KN^n$ with logarithmic coordinate



Note: Relative error $\varepsilon(\%)=\frac{D-\bar{D}}{D}\times 100$

D:D-value obtained from the moving point heat source theory

$\bar{D}$:D-value obtained from the approximate equation $D=KN^n$

(I),(II),---- : Nos. of the approximate N-D equations, see Fig.2-3

Fig. 2-4 Relative error curves of D-value for the approximate N-D equations

アーク溶接の場合，アークの発生熱量はアーク電圧E(V)とアーク電流（溶接電流）I(A)によりEI(KWH)で定まるから，アークの熱効率をηとすると単位時間の入熱量Q(Cal/s)は次

式で与えられる。

$$Q=0.24\,\eta EI \cdots\cdots (2.\ 9)$$

したがって，(2.6)式のNおよびDは次のように表わされる。

$$N=\frac{VQ}{4\pi k\mu\theta_M}=\frac{0.06\,\eta EIV}{\pi k\mu\theta_M} \cdots\cdots (2.10)$$

$$D=\frac{Vd}{2k} \qquad \therefore d=\frac{2kD}{V} \cdots\cdots (2.11)$$

以上より，材料定数k，μ，θ_M，溶接条件E，I，Vおよびアークの熱効率ηが与えられれば，(2.10)式からNの値が算出され，Fig. 2. 2のN—D線図またはFig. 2. 3に示す近似式(2.8)からDが定まり，(2.11)式から溶込み深さdを求めることができる。

このdは，平板にビード溶接を行なった場合の溶込み深さを代表する量であるが，一般に溶込み深さに関する基本的な量と考えられるので，本論文では便宜上このdを**溶込み代表量**と名付ける。

2. 3 すみ肉溶接形状，寸法の定義

次節において，すみ肉溶接の溶込みと前節の溶込み代表量dとの関係を求めるが，それに先立ち本論文で用いたすみ肉溶接の形状，寸法の定義を明らかにしておくことにする。

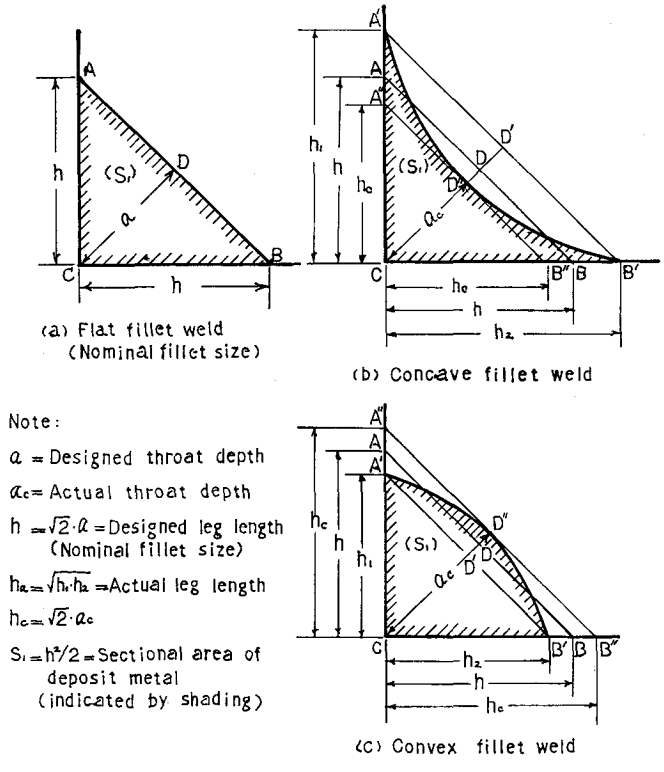


Fig. 2-5 Definition of the size of a fillet weld

Fig. 2. 5にすみ肉溶接の溶着断面（ビード断面）を示す。理想的なすみ肉溶着断面形状としては（a）図に示してある2等辺直角三角形の平形すみ肉溶接を考え，これをもってすみ肉溶接の標準公称断面とする。これに対し，(b)図は凹形すみ肉溶接，(c)図は凸形すみ肉溶接である。そして，それぞれの寸法を次のように定義する。

a ：公称のど厚（設計のど厚）

a_c：実測のど厚

$h_c = \sqrt{2}\, a_c$

$h = \sqrt{2}\, a$ ：公称脚長（設計脚長）

$h_a = \sqrt{h_1 h_2}$：実測脚長

$S_1 = h^2/2$：溶着断面積（斜線部分）

Fig. 2. 6にすみ肉溶接の溶着断面と溶込み断面を含む全溶融部断面を示す。本論文では，図示の全溶融部断面（$ABDEA$）の形状をすみ肉斜辺（AB）を短軸とする半楕円と仮定して，

$\bar{d}$ ：公称溶込み（GH）

d_o：ルート溶込み（CF）

p ：有効溶込み（CE）

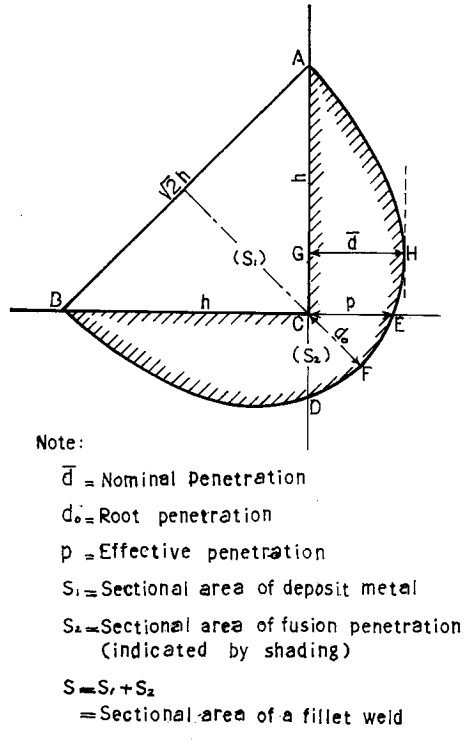


Fig. 2-6 Sectional area and fusion penetration of a fillet weld

と名付ける。そして，次のような断面積を考える。

S_1：溶着断面積（すみ肉ビード断面ΔABC）

S_2：溶込み断面積（母材溶融部断面，図の斜線部分）

$S=S_1+S_2$：すみ肉溶接断面積（全溶融部断面）

ここで，仮定したすみ肉溶接の半楕円は，短軸が$h/\sqrt{2}$，長軸が$d_\circ+(h/\sqrt{2})$であるから，まったく幾何学的な関係から次の各式が得られる。

$$\left.\begin{aligned}\frac{\overline{d}}{h}&=\frac{1}{\sqrt{2}}\left\{\sqrt{\left(\frac{d_\circ}{h}\right)^2+\sqrt{2}\left(\frac{d_\circ}{h}\right)^2+1}-\frac{1}{\sqrt{2}}\right\}\\ \frac{p}{h}&=\frac{(d_\circ h)^2+\sqrt{2}(d_\circ/h)^2}{(d_\circ/h)^2+\sqrt{2}(d_\circ/h)^2+1}\\ &=\frac{4(\overline{a}/h)\{(\overline{d}/h)+1\}-1}{4(\overline{d}/h)\{(\overline{d}/h)+1\}+1}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(2.12)$$

$$\left.\begin{aligned}S&=\frac{\pi}{2}\left(d_\circ+\frac{h}{\sqrt{2}}\right)\frac{h}{\sqrt{2}}\\ S_1&=\frac{h^2}{2}\\ S_2&=\frac{h}{\sqrt{2}}\left\{\frac{\pi}{2}\left(d_\circ+\frac{h}{\sqrt{2}}\right)-\frac{h}{\sqrt{2}}\right\}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(2.13)$$

2．4　すみ肉溶接の溶込みと溶込み代表量dの関係

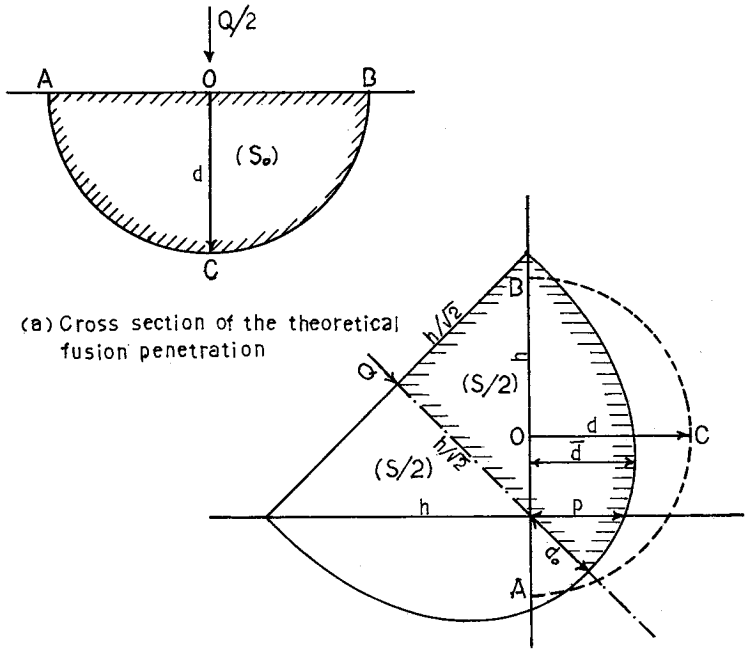
理想的なすみ肉断面形状における公称溶込み$\overline{d}$，ルート溶込み$d_\circ$および有効溶込みpと，移動点熱源理論から導かれた溶込み代表量dとの関係を求めるため，本論文では次の仮定を設ける。

いま，Fig. 2. 7に示すように，（a）図の点熱源による理論溶込み断面($S_\circ$)を，（b）図のすみ肉溶接断面に破線で示してあるように結びつける。つまり，片方のすみ肉脚の上に任意の一点Oを中心とする半径dの溶込み半径を考え，この半円の面積$S_\circ$が実際の溶融部半楕円の面積Sの½になるようにdを想定して，これをすみ肉溶接の片脚に関する溶込み代表量dとする。すなわち，

$$\frac{S}{2}=S_\circ=\frac{\pi d^2}{2}\cdots\cdots(2.14)$$

と仮定するわけである。したがって，アークによる全入熱量を(2.9)式のQとすると，この理論溶融部に対する入熱量は$Q/2$となり，$S_\circ$はこの$Q/2$による溶込み断面積である。

以上の仮定に基き，この(2.14)式と，先に導いたすみ肉溶接半楕円の各式(2.12)，(2.13)から，以下に示すような，溶込み代表量dと実際の溶込み$\overline{d}$，$d_\circ$，pとの関係を与える各式が得られる。



Note: O=A moving point heat source
d=Depth (a radious) of the theoretical penetration
$\bar{d}$, d_o, p=Depth of actual penetration of a fillet weld
h=Leg length
S_o=Cross-sectional area of the theoretical penetration
S=Cross-sectional area of a fillet weld
S_o=S/2 (indicated by shading)
Q=Heat input

Fig. 2-7 The relation between theoretical fusion penetration due to a moving point heat source and actual fusion penetration of a fillet weld

$$d_\circ = \frac{h}{\sqrt{2}}\left\{\left(\frac{2d}{h}\right)^2 - 1\right\} \quad \cdots\cdots (2.15)$$

$$\bar{d} = \frac{h}{2}\left\{\sqrt{\left(\frac{2d}{h}\right)^4 + 1} - 1\right\} \quad \cdots\cdots (2.16)$$

$$p = h \cdot \frac{(2d/h)^4 - 1}{(2d/h)^4 + 1} \quad \cdots\cdots (2.17)$$

あるいは, $$d = \frac{h}{2}\sqrt{\frac{\sqrt{2}\,d_\circ}{h} + 1} \equiv d(d_\circ) \quad \cdots\cdots (2.18)$$

$$d = \frac{h}{2}\sqrt[4]{\left(\frac{2\bar{d}}{h} + 1\right)^2 - 1} \equiv d(\bar{d}) \quad \cdots\cdots (2.19)$$

$$d = \frac{h}{2}\sqrt[4]{\frac{1 + (p/h)}{1 - (p/h)}} \equiv d(p) \quad \cdots\cdots (2.20)$$

$$d=\sqrt{\frac{S}{\pi}}\equiv d(\mathrm{S}) \quad \cdots\cdots(2.21)$$

上式(2.18)ないし(2.21)の$d(d_{\circ})$, $d(\overline{d})$, $d(p)$, $d(s)$は，それぞれ$d_{\circ}$, $\overline{d}$, p, Sから算出したdを意味する。

さらに，S_1およびS_2に対しても，Sに関する(2.14)式，(2.21)式と同様な考え方を適用することにより，

$$\left.\begin{array}{l} d(\mathrm{S}_1)=\sqrt{\dfrac{S_1}{\pi}} \text{ および } d(\mathrm{S}_2)=\sqrt{\dfrac{S_2}{\pi}} \\ d(\mathrm{S})=\sqrt{d(s_1)^2+d(s_2)^2} \end{array}\right\} \cdots\cdots(2.22)$$

すみ肉溶接の断面形状が仮定した正しい半楕円である限り，上に示した$d(d_{\circ})$, $d(\overline{d})$, $d(p)$は等しいはずである。したがって，これらをまとめて$d(\mathrm{M})$で表わすと，

$$d(d_{\circ})=d(\overline{d})=d(p)\equiv d(\mathrm{M}) \quad \cdots\cdots(2.23)$$

また当然　$d(\mathrm{M})=d(\mathrm{S})$ $\cdots\cdots(2.24)$

2. 5 結　　言

本章では，すみ肉溶接の溶込み深さ(p)と溶接条件の関係を確立するため，まず一般的に移動点熱源理論に基く溶込み深さ(d)と，溶接条件すなわちアーク電圧，溶接電流，溶接速度などとの理論的関係を明らかにし，この基本的な溶込み深さdを溶込み代表量と名付けた。

次に，すみ肉溶接の溶着部断面形状を，脚長（h）を2等辺とする直角三角形とし，これと母材溶込み断面を含むすみ肉溶接の全溶融部断面形状が，すみ肉斜辺を短軸とする半楕円をなすと仮定して，これに溶込み代表量dを導入した。その結果，すみ肉溶接の溶込み深さpを，次のような溶込み代表量dと公称脚長hの関数として表わすことができた。

$$p=h\cdot\frac{(2d/h)^4-1}{(2d/h)^4+1}$$

この式のdもhも，ともに溶接条件の関数であるから，pは当然溶接条件から算出されるはずである。しかし，この式はすみ肉溶接部の断面形状が，上述のような理想的半楕円をなすという仮定のもとに成立っているのであるから，実用上，この仮定と実際との間の誤差を明らかにし，実験等による補正が必要である。また，溶接条件からdあるいはhを算出するにはいろいろな不確定要素たとえばアークの熱効率，溶融池形成の様相，電極材の溶着率など未だ普遍的に充分な解明が行なわれていない諸因子を含んでいるので，この点からも実験的追求ないし実験式の導入が必要であろう。

第3章　すみ肉溶接の溶込みに関する実験

3. 1　緒　　言

前章で示したように，すみ肉溶接の溶込み深さpは溶込み代表量dと公称脚長hとの関数であるから，pと溶接条件の関係を確立するためにはこのd，hと溶接条件の関係を明らかにする必要がある。そのため，サブマージアーク溶接法による系統的なすみ肉溶接の実験を行なった。本章では，その実験の方法を述べ，実験の結果得られたデータを本章の末尾にまとめて示す。

なお，筆者が別の研究で行なったビード溶接実験のデータも付記してあるが，これはとくに電極ワイヤの溶融速度を求めるために本研究に引用したものである。

3. 2　実験方法

すみ肉溶接実験用のT継手試験片をFig. 3. 1に示す。板厚25㎜の軟鋼板（ＪＩＳ　ＳＳ41）を用いたが，溶接電流が1000A 以上の場合板厚を30㎜とした。すべてサブマージアーク溶接法

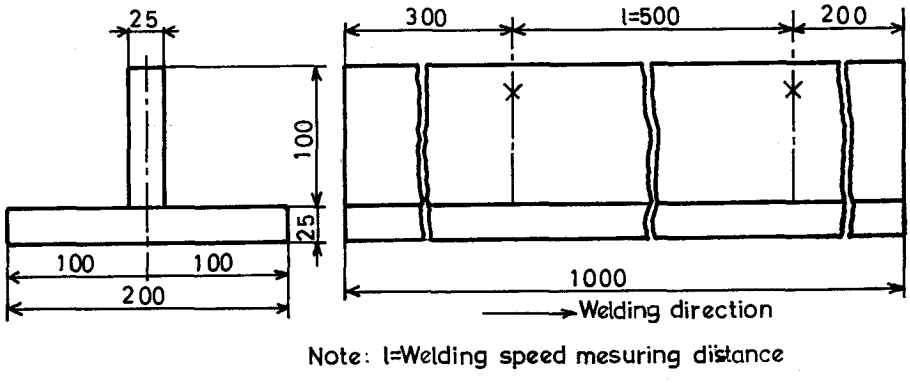


Fig. 3-1 Specimen design of a Tee joint for the experiments UR, UM and UQ

による下向単層すみ肉溶接で，使用した電極材料（フラックスを含む）の銘柄を異にする3系統の実験より成るため，便宜上次のように実験記号（Gode）を定めて区分した。使用電極ワイヤの公称径（ϕ）は，2.4，3.2，4.0，4.8，6.4㎜の5種類である。

実験Gode	電極ワイヤ	フラックス
UR	*KW*—36	♯ 60
UM	*US*—36	*G* 60
UQ	*KW*—36	*KF*51

溶接条件としては Table 3.1，3.2，3.3に示すごとく，溶接電流Ｉ，溶接速度Ｖ，アーク電

圧Eの3因子を選び，それぞれその中の1因子を系統的に変化せしめたI-Series, V-Series, E-Seriesの実験を行なった。表中Data欄の数字は，それぞれ等間隔で段階的に変化せしめた数（詳細は実験結果のTable 3.6参照）を示している。電源は，*UR*, *UM*実験が交流，*UQ*実験は直流正極性である。

Table 3-1 Series of experiment UR

Code	Series	φ mm	L mm	I A	E v	V cm/min	Data
URI	I-Ser.	2.4	30	300---600	35	45	7
		3.2	30	350---800	34	50	10
		4.0	40	400---850	34	54	10
		4.8	50	550--1000	36	57	10
		6.4	50	750--1200	36	65	10
URV	V-Ser.	2.4	30	350	35	20---70	6
		3.2	30	500	34	25---75	6
		4.0	40	650	34	30---80	6
		4.8	50	800	36	35---85	6
		6.4	50	1000	36	40---90	6
URE	E-Ser.	2.4	30	380	31---39	25	9
		3.2	30	550	30---46	35	9
		4.0	40	650	31---47	45	9
		4.8	50	750	30---39	55	10
		6.4	50	950	29---38	75	10

Note: Positioned fillet welding by submerged arc process with AC

φ: Diameter of electrode, mm

L: Extention of electrode, mm

I: Welding current, A

E: Arc voltage, v

V: Welding speed, cm/min

Table 3-2 Series of experiment UM

Code	Series	φ mm	L mm	I A	E v	V cm/min	Data
UMI	I-Ser.	2.4	30	300---460	35	25	9
		3.2	30	350---750	34	34	9
		4.0	40	450---850	28---44	42	9
		4.8	50	550--1000	28---46	44	10
		6.4	50	700--1200	32	74	11
UMV	V-Ser.	2.4	30	380	35	23---27	9
		3.2	30	500	35	34---50	9
		4.0	40	650	36	34---50	9
		4.8	50	750	33	52---56	9
		6.4	50	950	32	69.5--74.5	11
UME	E-Ser.	3.2	30	500	28---44	42	9
		4.0	40	650	28---44	42	9
		4.0	40	700	30---46	44	9
		4.8	50	800	28---44	44	9
		4.8	50	850	30---46	46	9

Note: Positioned fillet welding by submerged arc process with AC

Table 3-3 Series of experiment UQ

Code	Series	Φ mm	L mm	I A	E v	V cm/min	Data
UQI	I-Ser.	2.4	30	200---500	35	55	7
		3.2	30	300---700	33	60	9
		4.0	30	400---850	30	65	10
		4.8	35	550---1000	34	70	10
		6.4	35	750---1400	38	75	10
UQV	V-Ser.	2.4	30	350	35	30---75	10
		3.2	30	500	33	35---80	10
		4.0	30	650	30	40---80	10
		4.8	35	800	34	45---90	10
		6.4	35	1100	38	50---95	10
UQE	E-Ser.	2.4	30	350	24---32	55	5
		3.2	30	500	24---38	60	8
		4.0	30	650	28---36	65	5
		4.8	35	800	28---42	70	8
		6.4	35	1100	28---44	80	5

Note: Positioned fillet welding by submerged arc process with DC

Table 3-4 Series of Experiment UB

Series	Φ mm	L mm	I A	E v	V cm/min	Data
I-Ser. Code:UBI	2.4	30	250---450	27---40	25	5
	3.2	30	350---600	28---40	34	6
	4.0	40	500---750	30---40	42	6
	4.8	50	650---900	32---40	52	6
	6.4	50	850--1200	34---40	70	8
E-Ser. Code:UBE	2.4	30	350	28---38	25	6
	3.2	30	500	29---39	34	6
	4.0	40	650	30---40	42	6
	4.8	50	800	31---41	52	6
	6.4	50	1050	32---42	70	6

Note: Bead welding on flat mild-steel plate using submerged arc process

溶接中の電流値およびアーク電圧の測定は溶接機のメータに依らず，別に電流計（クラッチメータ）および電圧計を用いて実測した。とくに溶接速度はメータ計測値の信頼性が低いので，Fig. 3.1の試験片に示してあるように速度測定点A，Bを定めておき，この間の走行時間をストップウォッチで実測して求めた。

また，電極ワイヤの溶融速度を求めるため，溶接中ワイヤの送給速度を実測したが，これはワイヤ送給ローラの回転速度（本実験では3回転する時間）をストップウォッチで実測し，これに1回転の送給長さ（これは定数で本実験機では152 mm）を乗じて求めた。

溶接速度測定点ABの範囲では，ほぼ安定した溶接条件のビードが得られるのでこの範囲を試験ビードとし，これより少なくとも3個の断面を採取して倍率4のマクロ腐食断面写真を作成，溶接部の断面積，諸寸法を実測して（断面積の測定はプラニメータによる），その平均値をもって1データとした。データの数つまり試験ビード数はTableのDate欄に示すとうりで総計391である。倍率4のマクロ腐食断面写真数例をFig. 3.2に示す。

なお，以上の実験のほか，とくに電極溶融速度を求めるため，筆者が別の研究[23]で行なったビード溶接実験のデータを引用したが，この実験はTable 3.4に*UB*実験として示してある。板厚22㎜ないし32㎜の軟鋼平板上にサブマージアーク溶接法によって行なったビード溶接実験で，電極材料はワイヤ*KW*-36，フラックス*KF*-50の組合せを用いている。試験片や実験データの採取方法は前述すみ肉溶接実験とまったく同じ要領で行なったものである。

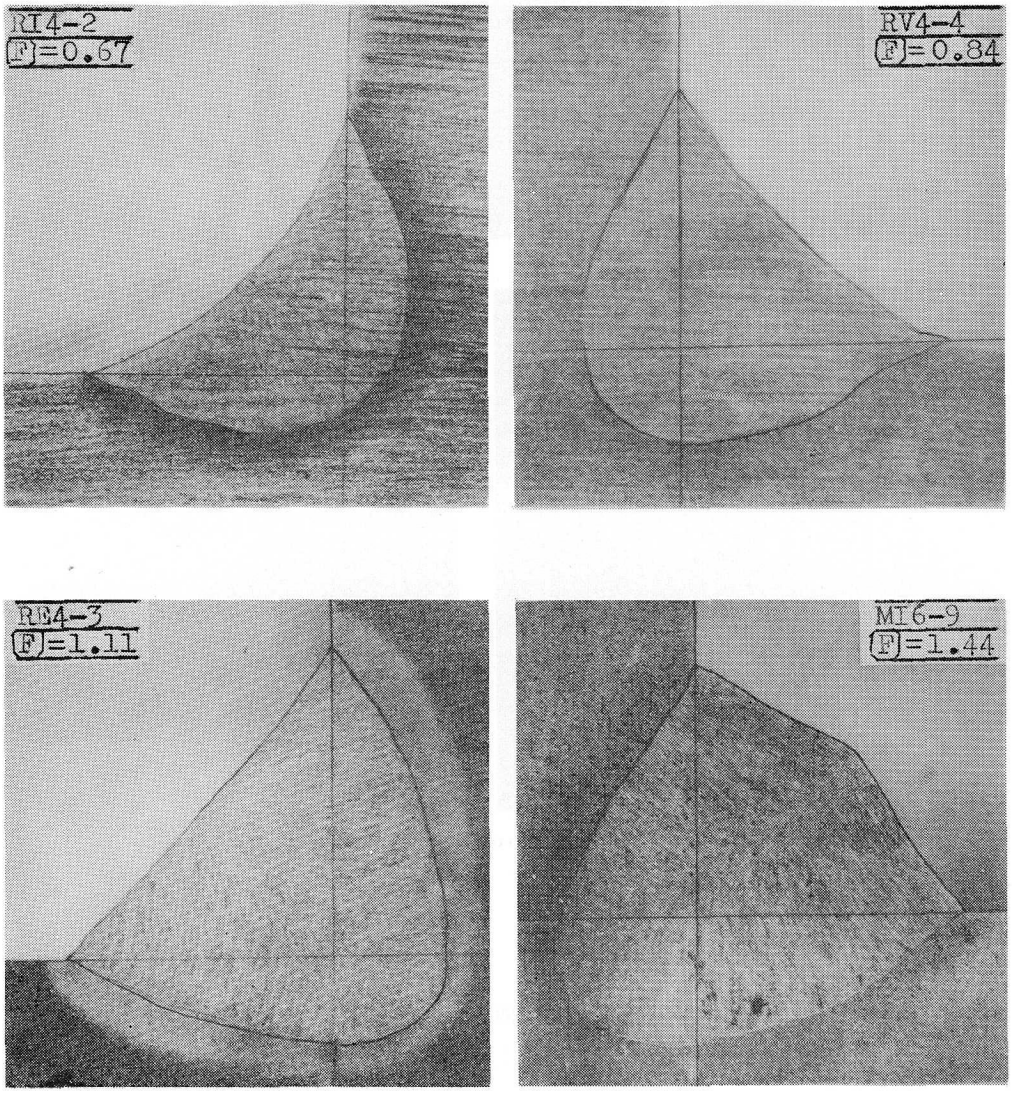


Fig. 3-2 (1) Examples of macro-etching cross-section of fillet weld

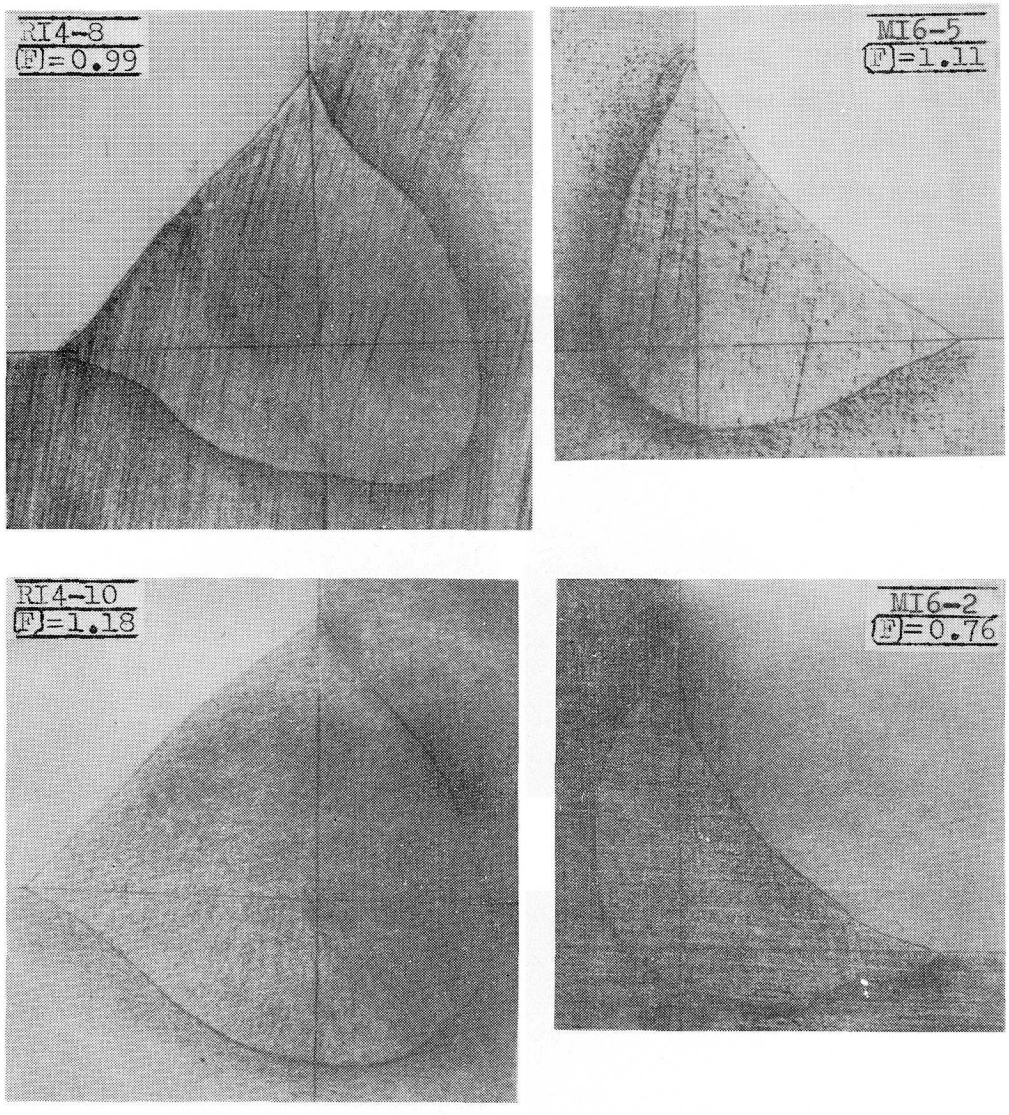


Fig. 3-2 (2) Exampies of macro-etching cross-sectjon of fillet weld

3. 3 実験結果（1）電極溶融速度

ここでは，Ser.，No.(試験片番号)ごとに電極ワイヤの送給速度 v mm/S，同じく溶融速度 $\lambda_e l$ mm³/Sおよび λ_e mm³/S.Aの実験結果を示す。本章末尾の Table 3.5 参照。

$$\text{ただし，}\ \lambda_e = \lambda_e\,(\mathrm{S}) = \frac{\pi\phi^2 v}{4\,I} \qquad \cdots\cdots(3.\ 1)$$

送給速度 v の測定は I-Series と E-Series の実験において行なったわけであるが，UQ実験では v の実測を行なっていないので，ここではURI，URE実験の結果を示す。なお，ビード溶接実験のデータとしてUBIとUBE実験を引用したのでそれも加えてある。

3. 4 実験結果（2）溶着速度と脚長

ここでは，マクロ腐食断面写真により測定して得られた溶着断面積 S_1 mm²，溶着速度 λ(S) mm³/S.A，脚長実測値 h_a mm，および公称脚長 h(S) mmを，溶接条件 I，E，V とともに Ser. No ごとに示す。本章末尾の Table 3-6 参照。ただしここで，

$$\lambda(\mathrm{S})=\frac{S_1 V}{I} \quad \cdots\cdots (3.\ 2)$$

$$h\ (\mathrm{S}) = \sqrt{2 S_1} \quad \cdots\cdots (3.\ 3)$$

h_aは水平脚長と垂直脚長の平均値である。

3. 5 実験結果（3）溶込み断面積と溶込み深さ

ここでは，マクロ腐食断面写真により測定して得られた全溶融部断面積 S mm²，溶込み断面積S_2 mm²および溶込み深さ$\overline{d}$，d_o，p mmをSer. Noごとに示し，あわせてこれらの実測値から求めた溶込み代表量の実験値d(M)ならびにd(S)を示してある。本章末尾の Table 3.7参照。

ここで，d(M)は前章(2.23)式で示した値で，溶込み深さ実測値から，それぞれ(2.18)，(2.19)，(2.20)式によって算出した$d(d_o)$，$d(\overline{d})$，$d(p)$ 等の平均値である。また，d(S)は同じく(2.21)式$d(\mathrm{S})=\sqrt{S/\pi}$より算出した値である。

3. 6 結　　言

本章では，サブマージアーク溶接法による軟鋼継手の系統的なすみ肉溶接実験について述べたが，その結果得られた次のような各種の実験値を溶接条件とともに表にまとめて示した。

(1) 電極溶融速度

(2) 溶着速度と脚長

(3) 溶込み断面積と溶込み深さ

これらの表はすべて本章の末尾にまとめてあるが，次章以降，これらの実験値を用い，脚長あるいは溶込み深さと溶接条件の関係を表わす実験式を求めたわけである。

Table 3-5(1) Experimental results of electrode melting rate (Experiment URI)

ϕ mm	Ser. No	I A	E V	v mm/s	$\lambda_e \cdot I$ mm²/s	λ_e mm³/s·A
2.4	RI2-1	295	35	26.0	118.0	0.400
	" 2	350	"	32.8	148.8	0.425
	" 3	390	"	40.2	181.8	0.466
	" 4	440	"	49.9	226.1	0.514
	" 5	500	"	56.2	254.5	0.509
	" 6	550	"	63.4	286.8	0.522
	" 7	590	"	71.9	325.7	0.552
3.2	RI3-1	340	34	16.2	130.8	0.385
	" 2	400	"	19.7	158.9	0.397
	" 3	450	"	22.7	182.7	0.406
	" 4	500	"	27.2	219.4	0.439
	" 5	550	"	31.6	254.8	0.463
	" 6	600	"	34.0	273.8	0.456
	" 7	670	"	40.7	327.6	0.489
	" 8	700	"	41.1	330.6	0.472
	" 9	760	"	43.8	352.6	0.464
	" 10	810	"	50.0	402.8	0.497
4.0	RI4-1	420	34	12.9	162.5	0.387
	" 2	460	"	13.5	169.8	0.369
	" 3	510	"	17.1	215.7	0.423
	" 4	560	"	18.9	237.8	0.425
	" 5	600	"	21.7	273.0	0.455
	" 6	660	"	26.5	334.2	0.506
	" 7	700	"	27.2	342.1	0.489
	" 8	750	"	28.0	352.0	0.469
	" 9	810	"	30.6	385.7	0.476
	" 10	840	"	39.9	413.6	0.492
4.8	RI5-1	550	36	13.1	237.7	0.432
	" 2	620	"	15.4	278.6	0.449
	" 3	640	"	15.1	273.6	0.428
	" 4	700	"	16.7	303.1	0.433
	" 5	750	"	19.2	348.8	0.465
	" 6	800	"	21.9	396.6	0.496
	" 7	850	"	22.4	406.7	0.479
	" 8	880	"	22.8	414.0	0.470
	" 9	950	"	25.1	454.5	0.478
	" 10	995	"	27.2	493.6	0.496
6.4	RI6-1	750	36	9.9	320.4	0.427
	" 2	800	"	10.7	344.4	0.431
	" 3	850	"	10.6	341.7	0.402
	" 4	900	"	12.1	389.8	0.433
	" 5	950	"	13.8	445.9	0.469
	" 6	1000	"	15.4	496.6	0.497
	" 7	1050	"	16.6	536.6	0.511
	" 8	1100	"	16.1	520.6	0.473
	" 9	1150	"	17.3	558.0	0.485
	" 10	1200	"	18.0	582.0	0.485

Table 3-5(2) Experimental results of electrode melting rate (Experiment URE)

ϕ mm	Ser. No	I A	E V	v mm/s	$\lambda_e \cdot I$ mm³/s	λ_e mm³/s·A
2.4	RE2-1	380	31	42.2	191.1	0.503
	" 2	"	32	43.4	196.5	0.517
	" 3	"	33	44.0	199.4	0.525
	" 4	"	34	41.3	187.2	0.493
	" 5	"	35	40.5	183.4	0.483
	" 6	"	36	42.2	191.1	0.503
	" 7	"	37	39.2	177.5	0.467
	" 8	"	38	41.6	188.4	0.496
	" 9	"	39	41.1	185.9	0.489
3.2	RE3-1	550	30	40.8	328.3	0.597
	" 2	"	32	39.7	319.7	0.581
	" 3	"	34	38.6	310.6	0.565
	" 4	"	36	36.8	296.5	0.539
	" 5	"	38	35.9	289.5	0.526
	" 6	"	40	34.2	275.4	0.501
	" 7	"	42	32.2	259.1	0.471
	" 8	"	44	31.9	256.9	0.467
	" 9	"	46	31.9	256.9	0.467
4.0	RE4-1	650	31	29.9	376.2	0.579
	" 2	"	33	29.4	370.3	0.570
	" 3	"	35	29.0	364.7	0.561
	" 4	"	37	27.3	343.7	0.529
	" 5	"	39	26.2	329.5	0.507
	" 6	"	41	25.1	316.4	0.487
	" 7	"	43	23.6	296.7	0.457
	" 8	"	45	22.6	284.4	0.438
	" 9	"	47	25.3	318.5	0.490
4.8	RE5-1	750	30	23.5	426.6	0.569
	" 2	"	31	23.3	423.3	0.565
	" 3	"	32	23.2	420.1	0.560
	" 4	"	33	22.8	413.8	0.552
	" 5	"	34	23.0	416.9	0.556
	" 6	"	35	22.7	412.2	0.550
	" 7	"	36	22.7	412.2	0.550
	" 8	"	37	22.5	407.7	0.544
	" 9	"	38	22.6	410.7	0.548
	" 10	"	39	22.0	398.8	0.532
6.4	RE6-1	950	29	16.3	526.0	0.554
	" 2	"	30	16.5	531.8	0.560
	" 3	"	31	16.5	531.8	0.560
	" 4	"	32	16.7	537.6	0.566
	" 5	"	33	16.8	543.6	0.572
	" 6	"	34	16.7	537.6	0.566
	" 7	"	35	16.6	534.7	0.563
	" 8	"	36	16.1	520.4	0.548
	" 9	"	37	16.2	524.2	0.552
	" 10	"	38	15.5	499.2	0.526

Table 3-5(3) Experimental results of electrode melting rate (Experiment UMI)

ϕ_{mm}	Ser. No	I_A	E_V	v mm/s	$\lambda_e \cdot I$ mm³/s	λ_e mm³/s·A
2.4	MI2-1	300	35	26.6	120.6	0.402
	" 2	320	"	28.9	130.8	0.409
	" 3	340	"	32.5	147.4	0.434
	" 4	360	"	35.7	161.5	0.449
	" 5	380	"	38.3	173.5	0.457
	" 6	400	"	39.4	178.6	0.446
	" 7	420	"	46.1	208.7	0.497
	" 8	440	"	50.6	229.3	0.521
	" 9	460	"	51.3	232.1	0.505
3.2	MI3-1	350	34	17.9	144.4	0.413
	" 2	400	"	20.5	164.9	0.412
	" 3	450	"	23.2	186.6	0.415
	" 4	500	"	27.4	220.6	0.441
	" 5	550	"	32.0	257.4	0.468
	" 6	600	"	35.4	284.9	0.475
	" 7	650	"	40.5	326.1	0.502
	" 8	700	"	44.5	357.9	0.511
	" 9	750	"	48.0	386.2	0.515
4.0	MI4-1	450	28	15.8	198.6	0.4415
	" 2	500	30	18.6	234.8	0.470
	" 3	550	32	19.1	240.5	0.437
	" 4	600	34	21.7	273.9	0.457
	" 5	650	36	23.1	290.4	0.447
	" 6	700	38	25.7	323.6	0.462
	" 7	750	40	26.1	328.7	0.438
	" 8	800	42	27.9	351.5	0.439
	" 9	850	44	33.9	426.2	0.501
4.8	MI5-1	550	28	12.8	232.5	0.423
	" 2	600	30	16.0	290.8	0.485
	" 3	650	32	17.3	313.0	0.482
	" 4	700	34	19.0	344.5	0.492
	" 5	750	36	20.6	374.2	0.499
	" 6	800	37	22.6	409.6	0.512
	" 7	850	37	24.1	436.8	0.514
	" 8	900	37	24.9	451.1	0.501
	" 9	950	37	27.5	498.5	0.525
	" 10	1000	42	28.0	507.2	0.507
6.4	MI6-1	700	32	9.6	309.6	0.442
	" 2	750	"	10.8	349.4	0.466
	" 3	800	"	11.6	375.3	0.469
	" 4	850	"	12.7	409.9	0.482
	" 5	900	"	12.9	416.6	0.463
	" 6	950	"	13.1	422.9	0.445
	" 7	1000	"	14.5	468.5	0.468
	" 8	1050	"	15.4	497.1	0.473
	" 9	1100	"	16.4	529.6	0.481
	" 10	1150	"	16.9	543.7	0.473
	" 11	1200	"	19.0	612.1	0.510

Table 3-5(4) Experimental results of electrode melting rate (Experiment UME)

ϕ mm	Ser.No	I A	E V	v mm/s	$\lambda_e I$ mm³/s	λ_e mm³/s·A
3.2	ME3-1	500	28	32.4	260.8	0.522
	" 2	"	30	33.3	268.0	0.536
	" 3	"	32	31.2	251.3	0.503
	" 4	"	34	30.7	247.4	0.495
	" 5	"	36	31.5	253.9	0.508
	" 6	"	38	30.0	241.2	0.483
	" 7	"	40	29.2	235.3	0.471
	" 8	"	42	27.2	219.3	0.439
	" 9	"	44	27.2	219.3	0.439
4.0	ME4-1	650	28	29.4	369.4	0.568
	" 2	"	30	28.3	355.6	0.547
	" 3	"	32	29.5	370.7	0.570
	" 4	"	34	27.4	344.3	0.530
	" 5	"	36	26.2	329.2	0.506
	" 6	"	38	25.4	319.1	0.491
	" 7	"	40	23.6	296.5	0.456
	" 8	"	42	24.4	306.6	0.472
	" 9	"	44	24.0	301.5	0.464
4.0	ME4-11	700	30	32.5	408.7	0.584
	" 12	"	32	32.3	406.5	0.581
	" 13	"	34	32.8	413.1	0.590
	" 14	"	36	30.4	382.2	0.546
	" 15	"	38	29.0	364.7	0.521
	" 16	"	40	27.9	350.6	0.501
	" 17	"	42	26.0	327.8	0.468
	" 18	"	44	25.5	320.8	0.458
	" 19	"	46	24.4	307.7	0.440
4.8	ME5-1	800	28	24.4	441.5	0.552
	" 2	"	30	24.1	436.1	0.545
	" 3	"	32	23.4	423.4	0.529
	" 4	"	34	22.0	398.1	0.498
	" 5	"	36	21.8	394.4	0.493
	" 6	"	38	21.9	396.3	0.495
	" 7	"	40	22.6	408.9	0.511
	" 8	"	42	21.0	380.0	0.475
	" 9	"	44	19.1	345.6	0.432
4.8	ME5-11	850	30	27.1	491.4	0.578
	" 12	"	32	27.0	489.2	0.576
	" 13	"	34	25.7	466.4	0.549
	" 14	"	36	27.0	489.2	0.576
	" 15	"	38	25.6	464.4	0.546
	" 16	"	40	25.5	462.5	0.544
	" 17	"	42	25.7	466.4	0.549
	" 18	"	44	24.8	449.3	0.529
	" 19	"	46	23.0	416.9	0.491

Table 3-5(5) Experimental results of electrode melting rate (Experiment UBI)

ϕ mm	Ser. No	I A	E V	v mm/s	$\lambda_e I$ mm³/s	λ_e mm³/s·A
2.4	BI2-1	350	34	29.6	134.2	0.384
	" 2	400	37	36.2	163.8	0.409
	" 3	450	40	44.0	199.4	0.443
	" 4	500	43	47.5	215.0	0.430
	" 5	550	47	58.4	264.6	0.481
3.2	BI3-1	350	28	15.3	123.7	0.354
	" 2	400	30	17.1	138.2	0.346
	" 3	450	33	21.7	174.7	0.388
	" 4	500	35	27.4	220.3	0.441
	" 5	550	37	31.6	254.8	0.463
	" 6	600	40	36.2	291.2	0.485
4.0	BI4-1	500	30	14.8	186.4	0.373
	" 2	550	32	16.5	208.3	0.379
	" 3	600	34	19.6	246.4	0.411
	" 4	650	36	22.3	281.0	0.432
	" 5	700	38	25.3	318.5	0.455
	" 6	750	40	29.6	372.9	0.497
4.8	BI5-1	650	32	13.9	252.4	0.388
	" 2	700	34	16.0	291.2	0.416
	" 3	750	34	18.9	342.9	0.457
	" 4	800	38	23.3	422.4	0.528
	" 5	850	38	24.0	435.1	0.512
	" 6	900	40	26.3	476.5	0.529
6.4	BI6-1	850	34	10.3	334.5	0.394
	" 2	900	34	11.2	361.7	0.402
	" 3	950	36	13.2	427.2	0.450
	" 4	1000	36	14.1	455.1	0.455
	" 5	1050	38	15.2	491.7	0.468
	" 6	1100	38	16.3	524.6	0.477
	" 7	1150	40	17.4	562.3	0.489
	" 8	1200	40	19.0	611.5	0.510

Table 3-5(6) Experimental results of electrode melting rate (Experiment UBE)

ϕ mm	Ser. No	I A	E V	v mm/s	$\lambda_e I$ mm³/s	λ_e mm³/s·A
2.4	BE2-1	350	28	32.8	148.4	0.424
	" 2	"	30	33.7	152.8	0.437
	" 3	"	32	33.6	152.0	0.434
	" 4	"	34	33.2	150.3	0.430
	" 5	"	36	31.8	144.0	0.412
	" 6	"	38	32.0	144.8	0.414
3.2	BE3-1	500	29	24.8	199.6	0.399
	" 2	"	31	26.0	209.5	0.419
	" 3	"	33	27.6	222.2	0.445
	" 4	"	35	25.3	203.8	0.408
	" 5	"	37	24.3	195.5	0.391
	" 6	"	39	24.3	195.5	0.391
4.0	BE4-1	650	30	21.7	273.1	0.420
	" 2	"	32	21.4	270.0	0.415
	" 3	"	34	21.5	271.0	0.417
	" 4	"	36	21.4	269.0	0.414
	" 5	"	38	21.1	266.4	0.410
	" 6	"	40	20.8	261.8	0.403
4.8	BE5-1	800	33	20.5	371.9	0.465
	" 2	"	35	22.7	410.9	0.514
	" 3	"	37	21.8	394.5	0.493
	" 4	"	39	20.9	379.5	0.474
	" 5	"	41	19.4	353.1	0.441
	" 6	"	43	20.0	363.1	0.454
6.4	BE6-1	1050	32	14.8	477.4	0.455
	" 2	"	34	15.6	504.6	0.481
	" 3	"	36	15.5	498.9	0.475
	" 4	"	38	15.8	510.4	0.486
	" 5	"	40	15.7	507.1	0.483
	" 6	"	42	15.8	510.4	0.486

Table 3-6(1) Experimental results of deposition rate and leg length (Experiment URI)

Φ mm	Ser.No	I A	E V	V mm/s	S_1 mm²	λ(s) mm³/s·A	ha mm	h(s) mm
2.4	RI2-1	295	35	7.19	21.5	0.514	7.1	6.5
	" 2	350	"	"	24.3	0.509	6.7	6.9
	" 3	390	"	"	31.7	0.593	7.5	7.9
	" 4	440	"	"	37.0	0.619	7.8	8.6
	" 5	500	"	"	45.2	0.628	7.9	9.5
	" 6	550	"	"	47.9	0.630	7.2	9.7
	" 7	590	"	"	56.0	0.683	7.3	10.5
3.2	RI3-1	340	34	8.37	21.1	0.512	7.2	6.5
	" 2	400	"	"	29.2	0.576	8.5	7.6
	" 3	450	"	"	30.6	0.582	8.0	7.8
	" 4	500	"	"	32.8	0.551	9.3	8.1
	" 5	550	"	"	35.6	0.563	7.9	8.4
	" 6	600	"	"	42.1	0.585	8.4	9.1
	" 7	670	"	"	52.5	0.646	8.1	10.2
	" 8	700	"	"	51.6	0.626	7.5	10.1
	" 9	760	"	"	53.4	0.599	8.1	10.3
	" 10	810	"	"	61.7	0.643	8.8	11.1
4.0	RI4-1	420	34	8.93	24.7	0.532	8.4	7.0
	" 2	460	"	"	29.3	0.550	9.0	7.6
	" 3	510	"	"	29.8	0.529	9.2	7.7
	" 4	560	"	"	30.5	0.471	8.6	7.8
	" 5	600	"	"	40.6	0.606	9.5	8.9
	" 6	660	"	"	38.9	0.539	9.2	8.8
	" 7	700	"	"	43.6	0.579	10.0	9.3
	" 8	750	"	"	48.7	0.549	9.7	9.8
	" 9	810	"	"	50.7	0.584	9.5	10.0
	" 10	840	"	"	59.7	0.623	10.2	10.9
4.8	RI5-1	550	36	9.47	30.6	0.557	9.4	7.8
	" 2	620	"	"	37.7	0.540	9.9	8.6
	" 3	640	"	"	34.7	0.544	9.7	8.3
	" 4	700	"	"	41.3	0.565	10.4	9.0
	" 5	750	"	"	41.9	0.524	10.5	9.1
	" 6	800	"	"	51.6	0.564	10.1	10.1
	" 7	850	"	"	53.4	0.635	9.9	10.3
	" 8	880	"	"	58.8	0.617	10.3	10.8
	" 9	950	"	"	65.6	0.652	10.2	11.4
	" 10	995	"	"	64.9	0.615	10.3	11.3
6.4	RI6-1	750	36	10.85	38.0	0.551	12.0	8.7
	" 2	800	"	"	47.1	0.641	12.3	9.7
	" 3	850	"	"	43.3	0.550	11.6	9.3
	" 4	900	"	"	47.5	0.573	11.4	9.7
	" 5	950	"	"	52.1	0.596	10.8	10.2
	" 6	1000	"	"	56.9	0.619	10.4	10.6
	" 7	1050	"	"	60.9	0.631	11.2	11.0
	" 8	1100	"	"	65.9	0.652	11.2	11.4
	" 9	1150	"	"	64.3	0.608	10.8	11.3
	" 10	1200	"	"	69.2	0.624	10.2	11.7

Table 3-6(2) Experimental results of deposition rate and leg length (Experiment URV)

Φ mm	Ser.No	I A	E v	V mm/s	S₁ mm²	λ(S) mm³/s·A	ha mm	h(S) mm
2.4	RV2-1	350	35	3.31	46.5	0.446	8.5	9.6
	" 2	"	"	5.11	33.8	0.495	8.1	8.2
	" 3	"	"	6.41	29.1	0.527	8.0	7.6
	" 4	"	"	8.21	22.5	0.528	6.5	6.7
	" 5	"	"	9.96	18.0	0.500	6.2	6.0
	" 6	"	"	10.45	17.9	0.535	6.4	5.9
3.2	RV3-1	500	35	4.23	57.2	0.475	9.4	10.7
	" 2	"	"	5.69	49.3	0.573	10.2	9.9
	" 3	"	"	9.09	37.9	0.690	8.6	8.7
	" 4	"	"	10.10	32.2	0.638	8.2	8.0
	" 5	"	"	10.54	26.8	0.565	7.6	7.3
	" 6	"	"	12.25	21.8	0.536	7.7	6.6
4.0	RV4-1	650	35	4.63	76.0	0.550	12.2	12.3
	" 2	"	"	6.32	58.2	0.566	10.2	10.7
	" 3	"	"	8.15	48.1	0.603	10.2	9.8
	" 4	"	"	10.08	36.9	0.570	9.2	8.5
	" 5	"	"	11.85	33.2	0.606	9.4	8.1
	" 6	"	"	12.98	27.7	0.562	8.7	7.4
4.8	RV5-1	800	37	6.00	86.4	0.648	13.1	13.1
	" 2	"	"	7.17	71.8	0.644	11.9	11.9
	" 3	"	"	9.67	54.0	0.654	10.5	10.4
	" 4	"	"	11.17	41.8	0.591	9.9	9.1
	" 5	"	"	13.00	35.9	0.585	9.6	8.4
	" 6	"	"	13.50	31.9	0.532	9.0	7.9
6.4	RV6-1	1000	36	6.62	102.0	0.689	12.0	14.2
	" 2	"	"	8.37	75.5	0.659	12.1	12.2
	" 3	"	"	9.97	64.1	0.627	11.1	11.3
	" 4	"	"	11.62	57.8	0.672	10.5	10.7
	" 5	"	"	13.30	42.0	0.571	9.0	9.1
	" 6	"	"	14.97	38.4	0.576	9.3	8.7

Table 3-6(3) Experimental results of deposition rate and leg length (Experiment URE)

ϕ mm	Ser.No	I A	E v	V mm/s	S_1 mm²	$\lambda(s)$ mm³/s·A	h_a mm	$h(s)$ mm
2.4	RE2-1	380	31	4.25	44.5	0.504	10.0	9.4
	" 2	"	32	"	48.9	0.552	11.0	9.8
	" 3	"	33	"	48.1	0.541	11.1	9.8
	" 4	"	34	"	45.2	0.507	11.0	9.5
	" 5	"	35	"	51.3	0.557	12.1	10.1
	" 6	"	36	"	46.4	0.520	11.4	9.6
	" 7	"	37	"	45.4	0.509	11.0	9.5
	" 8	"	38	"	47.4	0.528	11.7	9.7
	" 9	"	39	"	45.5	0.506	11.7	9.5
3.2	RE3-1	550	30	5.92	53.8	0.575	9.0	10.3
	" 2	"	32	"	65.6	0.706	10.6	11.4
	" 3	"	34	"	53.2	0.578	10.6	10.3
	" 4	"	36	"	50.3	0.541	10.9	10.0
	" 5	"	38	"	49.0	0.522	11.0	9.9
	" 6	"	40	"	48.6	0.518	11.5	9.8
	" 7	"	42	"	45.8	0.494	11.2	9.5
	" 8	"	44	"	45.1	0.490	10.8	9.5
	" 9	"	46	"	48.6	0.532	11.0	9.8
4.0	RE4-1	650	31	7.64	60.9	0.712	10.1	11.0
	" 2	"	33	"	50.2	0.584	9.8	10.0
	" 3	"	35	"	49.0	0.590	10.0	9.9
	" 4	"	37	"	46.3	0.546	10.3	9.6
	" 5	"	39	"	43.7	0.518	10.6	9.3
	" 6	"	41	"	42.1	0.492	10.3	9.1
	" 7	"	43	"	43.6	0.509	10.7	9.3
	" 8	"	45	"	42.7	0.499	10.8	9.2
	" 9	"	47	"	49.2	0.581	10.7	9.9
4.8	RE5-1	750	30	9.52	44.7	0.571	8.6	9.4
	" 2	"	31	"	48.8	0.618	9.2	9.8
	" 3	"	32	"	43.5	0.576	8.9	9.3
	" 4	"	33	"	44.4	0.573	9.2	9.4
	" 5	"	34	"	47.0	0.594	10.0	9.6
	" 6	"	35	"	42.1	0.535	10.0	9.1
	" 7	"	36	"	45.4	0.562	9.6	9.5
	" 8	"	37	"	44.8	0.558	9.5	9.4
	" 9	"	38	"	45.3	0.575	9.9	9.5
	" 10	"	39	"	37.3	0.469	9.6	8.6
6.4	RE6-1	950	29	12.50	44.8	0.597	8.5	9.4
	" 2	"	30	"	45.7	0.594	8.8	9.5
	" 3	"	31	"	46.1	0.607	9.1	9.6
	" 4	"	32	"	43.0	0.573	9.5	9.2
	" 5	"	33	"	46.5	0.613	9.4	9.6
	" 6	"	34	"	51.1	0.662	9.5	10.1
	" 7	"	35	"	44.5	0.590	9.3	9.4
	" 8	"	36	"	41.5	0.528	9.6	9.1
	" 9	"	37	"	41.7	0.557	9.6	9.1
	" 10	"	38	"	37.5	0.504	9.4	8.6

Table 3-6(4) Experimental results of deposition rate and leg length (Experiment UMI)

ϕ mm	Ser.No	I A	E V	V mm/s	S_1 mm²	$\lambda(s)$ mm³/s·A	h_a mm	$h(s)$ mm
2.4	MI2-1	300	35	4.14	30.4	0.435	9.5	7.8
	" 2	320	"	"	35.4	0.444	10.6	8.4
	" 3	340	"	"	39.0	0.470	10.6	8.8
	" 4	360	"	"	43.7	0.495	11.1	9.3
	" 5	380	"	"	47.4	0.504	11.2	9.7
	" 6	400	"	"	51.7	0.515	11.4	10.1
	" 7	420	"	"	58.0	0.594	12.0	10.7
	" 8	440	"	"	59.9	0.585	12.0	10.9
	" 9	460	"	"	61.1	0.569	12.1	11.0
3.2	MI3-1	350	34	6.08	28.6	0.477	9.2	7.5
	" 2	400	"	"	32.7	0.469	9.6	8.0
	" 3	450	"	"	48.5	0.777	10.5	8.8
	" 4	500	"	"	46.3	0.565	10.2	9.6
	" 5	550	"	"	52.5	0.612	10.3	10.2
	" 6	600	"	"	60.0	0.631	9.9	10.9
	" 7	650	"	"	68.4	0.644	10.0	11.7
	" 8	700	"	"	81.7	0.712	10.3	12.7
	" 9	750	"	"	77.0	0.636	10.8	12.4
4.0	MI4-1	450	28	7.00	28.3	0.441	8.9	7.5
	" 2	500	30	"	32.5	0.456	9.3	8.0
	" 3	550	32	"	38.4	0.489	10.3	8.7
	" 4	600	34	"	45.0	0.525	10.4	9.4
	" 5	650	36	"	49.0	0.528	11.1	9.9
	" 6	700	38	"	55.2	0.552	10.0	10.5
	" 7	750	40	"	52.8	0.493	11.2	10.2
	" 8	800	42	"	59.6	0.522	11.1	10.9
	" 9	850	44	"	60.0	0.495	11.5	10.9
4.8	MI5-1	550	28	7.33	29.6	0.396	9.5	7.7
	" 2	600	30	"	36.0	0.441	10.0	8.4
	" 3	650	32	"	42.0	0.474	10.5	9.1
	" 4	700	34	"	45.6	0.479	10.9	9.5
	" 5	750	36	"	51.2	0.501	11.7	10.1
	" 6	800	37	"	52.8	0.484	11.3	10.2
	" 7	850	37	"	60.9	0.525	10.7	11.0
	" 8	900	37	"	56.5	0.461	11.1	10.6
	" 9	950	37	"	71.3	0.551	10.4	11.9
	" 10	1000	42	"	56.3	0.414	10.2	10.6
6.4	MI6-1	700	32	12.38	28.3	0.492	9.5	7.5
	" 2	750	"	"	30.0	0.479	9.6	7.7
	" 3	800	"	"	33.8	0.512	9.9	8.2
	" 4	850	"	"	36.1	0.513	10.2	8.4
	" 5	900	"	"	41.8	0.561	10.2	9.1
	" 6	950	"	"	46.9	0.628	9.7	9.6
	" 7	1000	"	"	47.5	0.608	9.2	9.7
	" 8	1050	"	"	50.4	0.611	9.3	10.0
	" 9	1100	"	"	52.4	0.604	9.1	10.2
	" 10	1150	"	"	54.6	0.592	8.7	10.4
	" 11	1200	"	"	63.1	0.662	8.5	11.2

Table 3-6(5) Experimental results of deposition rate and leg length (Experiment UMV)

ϕ_{mm}	Ser.No	I A	E V	V mm/s	S_1 mm²	$\lambda(s)$ mm²/s·A	h_a mm	h(s) mm
2.4	MV2-1	380	35	4.50	41.5	0.493	10.2	9.1
	" 2	"	"	4.55	53.0	0.635	10.9	10.3
	" 3	"	"	4.39	43.3	0.501	10.8	9.3
	" 4	"	"	4.23	47.2	0.527	10.7	9.7
	" 5	"	"	4.55	49.5	0.593	11.0	9.9
	" 6	"	"	4.28	51.5	0.581	11.4	10.1
	" 7	"	"	4.24	46.3	0.517	11.1	9.6
	" 8	"	"	3.88	49.7	0.510	11.7	9.9
	" 9	"	"	3.97	51.3	0.536	11.9	10.1
3.2	MV3-1	500	35	8.33	27.9	0.465	8.9	7.4
	" 2	"	"	8.00	29.7	0.476	9.2	7.7
	" 3	"	"	7.66	29.3	0.449	9.0	7.6
	" 4	"	"	7.33	29.8	0.438	9.5	7.7
	" 5	"	"	7.00	31.8	0.445	10.3	7.9
	" 6	"	"	6.66	34.6	0.462	10.4	8.3
	" 7	"	"	6.33	37.9	0.481	11.3	8.7
	" 8	"	"	6.00	39.7	0.478	11.4	8.9
	" 9	"	"	5.66	39.1	0.444	11.5	8.8
4.0	MV4-1	650	36	8.33	40.2	0.515	9.8	8.9
	" 2	"	"	8.00	42.9	0.529	9.9	9.2
	" 3	"	"	7.66	46.0	0.543	10.3	9.5
	" 4	"	"	7.33	48.0	0.542	10.7	9.8
	" 5	"	"	7.00	47.6	0.513	10.6	9.7
	" 6	"	"	6.66	49.2	0.505	11.0	9.9
	" 7	"	"	6.33	53.4	0.520	11.5	10.3
	" 8	"	"	6.00	56.8	0.525	11.6	10.6
	" 9	"	"	5.66	61.5	0.536	12.6	11.0
4.8	MV5-1	750	33	9.91	41.8	0.552	9.2	9.1
	" 2	"	"	9.80	44.7	0.585	9.6	9.4
	" 3	"	"	9.68	43.3	0.560	9.0	9.3
	" 4	"	"	9.64	42.5	0.547	9.3	9.2
	" 5	"	"	9.48	42.0	0.531	9.4	9.1
	" 6	"	"	9.24	44.9	0.554	9.5	9.4
	" 7	"	"	9.41	44.2	0.555	9.3	9.4
	" 8	"	"	9.21	47.1	0.580	9.4	9.7
	" 9	"	"	9.25	46.7	0.576	9.7	9.6
6.4	MV6-1	950	32	13.19	43.7	0.608	9.7	9.3
	" 2	"	"	12.94	44.3	0.605	9.4	9.4
	" 3	"	"	13.00	45.2	0.619	9.7	9.5
	" 4	"	"	12.84	45.6	0.618	9.7	9.5
	" 5	"	"	12.81	46.9	0.633	9.5	9.6
	" 6	"	"	12.79	45.4	0.612	9.9	9.5
	" 7	"	"	12.65	47.0	0.627	10.1	9.7
	" 8	"	"	12.52	45.4	0.599	10.3	9.5
	" 9	"	"	12.40	46.6	0.609	9.8	9.6
	" 10	"	"	12.30	47.5	0.615	10.1	9.7
	" 11	"	"	11.65	50.5	0.620	10.2	10.0

Table 3-6(6) Experimental results of deposition rate and leg length (Experiment UME)

ϕ mm	Ser.No	I A	E V	V mm/s	S_1 mm²	$\lambda(S)$ mm³/s·A	h_a mm	h(S) mm
3.2	ME3-1	500	28	7.00	39.0	0.547	8.8	8.8
	" 2	"	30	"	40.8	0.572	9.5	9.0
	" 3	"	32	"	39.3	0.550	9.3	8.8
	" 4	"	34	"	41.5	0.582	10.2	9.1
	" 5	"	36	"	42.6	0.597	10.1	9.2
	" 6	"	38	"	37.2	0.521	10.3	8.6
	" 7	"	40	"	35.1	0.492	10.2	8.3
	" 8	"	42	"	37.2	0.522	10.6	8.6
	" 9	"	44	"	34.0	0.477	9.8	8.2
4.0	ME4-1	650	28	7.00	47.7	0.514	9.5	9.7
	" 2	"	30	"	54.7	0.589	11.3	10.4
	" 3	"	32	"	52.8	0.569	11.2	10.2
	" 4	"	34	"	49.2	0.530	11.3	9.9
	" 5	"	36	"	43.5	0.469	10.9	9.3
	" 6	"	38	"	41.8	0.451	10.6	9.1
	" 7	"	40	"	41.6	0.449	10.3	9.1
	" 8	"	42	"	39.5	0.426	10.1	8.8
	" 9	"	44	"	42.6	0.459	10.4	9.2
4.0	ME4-11	700	30	7.74	53.6	0.584	9.1	10.3
	" 12	"	32	"	54.7	0.581	9.4	10.4
	" 13	"	34	"	49.4	0.590	10.0	9.9
	" 14	"	36	"	52.3	0.546	10.4	10.2
	" 15	"	38	"	45.1	0.521	10.6	9.5
	" 16	"	40	"	51.5	0.501	11.1	10.1
	" 17	"	42	"	54.0	0.468	11.1	10.3
	" 18	"	44	"	48.4	0.458	10.3	9.8
	" 19	"	46	"	45.5	0.440	10.2	9.5
4.8	ME5-1	800	28	7.33	63.3	0.581	9.9	11.2
	" 2	"	30	"	60.8	0.558	10.0	11.0
	" 3	"	32	"	62.0	0.569	11.1	11.1
	" 4	"	34	"	62.8	0.576	11.9	11.2
	" 5	"	36	"	58.1	0.533	12.5	10.7
	" 6	"	38	"	61.7	0.566	12.7	11.1
	" 7	"	40	"	61.5	0.564	12.0	11.0
	" 8	"	42	"	50.9	0.467	11.1	10.0
	" 9	"	44	"	48.8	0.448	9.6	9.8
4.8	ME5-11	850	30	8.02	65.0	0.597	9.1	11.4
	" 12	"	32	"	64.1	0.607	9.7	11.3
	" 13	"	34	"	62.0	0.576	10.6	11.1
	" 14	"	36	"	62.5	0.582	10.6	11.1
	" 15	"	38	"	62.7	0.585	11.4	11.1
	" 16	"	40	"	56.2	0.537	11.4	10.6
	" 17	"	42	"	59.5	0.584	11.6	10.9
	" 18	"	44	"	52.7	0.498	11.2	10.2
	" 19	"	46	"	53.5	0.515	11.3	10.3

Table 3-6(7) Experimental results of deposition rate and leg length (Experiment UQI)

Φ mm	Ser.No	I A	E V	V mm/s	S, mm²	λ(s) mm³/s·A	ha mm	h(s) mm
2.4	QI2-1	200	35	9.16	10.4	0.477	5.8	4.5
	" 2	250	"	"	13.3	0.489	6.4	5.1
	" 3	300	"	"	17.0	0.522	6.3	5.8
	" 4	350	"	"	21.2	0.529	6.0	6.5
	" 5	400	"	"	28.2	0.648	5.7	7.5
	" 6	450	"	"	30.3	0.617	6.1	7.7
	" 7	500	"	"	39.7	0.729	7.8	8.9
3.2	QI3-1	300	33	10.00	10.0	0.333	5.2	4.4
	" 2	350	"	"	13.3	0.381	6.9	5.1
	" 3	400	"	"	17.2	0.422	7.5	5.8
	" 4	450	"	"	20.1	0.448	7.6	6.3
	" 5	500	"	"	21.8	0.438	7.4	6.6
	" 6	550	"	"	28.6	0.520	8.1	7.5
	" 7	600	"	"	36.3	0.605	5.7	7.8
	" 8	650	"	"	39.0	0.583	5.6	8.7
	" 9	700	"	"	46.2	0.600	5.9	9.6
4.0	QI4-1	400	30	10.83	14.2	0.386	6.5	5.3
	" 2	450	"	"	19.4	0.468	7.1	6.2
	" 3	500	"	"	21.2	0.460	7.1	6.5
	" 4	550	"	"	20.2	0.398	7.2	6.3
	" 5	600	"	"	23.0	0.416	7.0	6.7
	" 6	650	"	"	25.4	0.424	6.8	7.1
	" 7	700	"	"	26.0	0.403	6.5	7.2
	" 8	750	"	"	38.4	0.556	7.1	8.7
	" 9	800	"	"	38.6	0.524	8.4	8.7
	" 10	850	"	"	36.3	0.463	7.9	8.5
4.8	QI5-1	550	34	11.66	20.5	0.436	8.0	6.4
	" 2	600	"	"	20.2	0.393	7.5	6.3
	" 3	650	"	"	26.8	0.482	7.8	7.3
	" 4	700	"	"	24.3	0.405	7.4	6.9
	" 5	750	"	"	31.8	0.496	7.7	7.9
	" 6	800	"	"	34.1	0.498	8.1	8.2
	" 7	850	"	"	39.5	0.543	8.7	8.8
	" 8	900	"	"	43.4	0.564	8.7	9.3
	" 9	950	"	"	40.5	0.498	7.4	9.0
	" 10	1000	"	"	45.4	0.530	8.0	9.5
6.4	QI6-1	750	38	12.50	33.4	0.558	9.7	8.1
	" 2	800	"	"	35.0	0.548	10.6	8.3
	" 3	850	"	"	35.9	0.529	9.3	8.4
	" 4	900	"	"	37.7	0.525	10.1	8.6
	" 5	950	"	"	36.9	0.486	9.4	8.5
	" 6	1000	"	"	49.0	0.614	10.0	9.9
	" 7	1100	"	"	39.8	0.453	9.3	8.9
	" 8	1200	"	"	55.2	0.575	9.2	10.5
	" 9	1300	"	"	60.7	0.584	9.0	11.0
	" 10	1400	"	"	65.8	0.588	8.2	11.4

Table 3-6(8) Experimental results of deposition rate and leg length (Experiment UQV)

ϕ_{mm}	Ser.No	I_A	E_V	$V_{mm/s}$	S_1 mm^2	$\lambda(s)$ $mm^{3/2}/s^A$	h_a mm	h(s) mm
2.4	QV2-1	350	35	5.00	32.7	0.467	8.7	8.0
	" 2	"	"	5.83	25.1	0.419	8.1	7.0
	" 3	"	"	6.66	17.7	0.339	7.0	5.9
	" 4	"	"	7.50	19.8	0.426	6.8	6.3
	" 5	"	"	8.33	16.5	0.395	6.5	5.7
	" 6	"	"	9.16	15.3	0.402	6.0	5.5
	" 7	"	"	10.00	14.5	0.415	6.3	5.3
	" 8	"	"	10.83	16.5	0.516	5.7	5.7
	" 9	"	"	11.66	15.1	0.505	6.7	5.5
	" 10	"	"	12.50	13.9	0.498	6.2	5.2
3.2	QV3-1	500	33	5.83	48.8	0.570	9.9	9.8
	" 2	"	"	6.66	36.1	0.481	9.2	8.4
	" 3	"	"	7.50	34.7	0.522	9.2	8.3
	" 4	"	"	8.33	27.2	0.455	8.7	7.3
	" 5	"	"	9.16	22.7	0.416	7.6	6.7
	" 6	"	"	10.00	22.2	0.444	7.5	6.6
	" 7	"	"	10.83	20.6	0.448	7.0	6.4
	" 8	"	"	11.66	18.8	0.439	7.0	6.1
	" 9	"	"	12.50	17.2	0.431	6.9	5.8
	" 10	"	"	13.33	17.0	0.456	6.8	5.8
4.0	QV4-1	650	30	6.66	46.3	0.475	8.3	9.6
	" 2	"	"	7.50	43.9	0.620	8.1	9.3
	" 3	"	"	8.33	43.8	0.506	8.3	8.8
	" 4	"	"	9.16	38.8	0.499	9.0	9.3
	" 5	"	"	10.00	39.7	0.611	8.2	8.9
	" 6	"	"	10.83	30.9	0.515	7.0	7.8
	" 7	"	"	11.66	27.1	0.522	7.4	6.5
	" 8	"	"	12.50	21.3	0.383	7.0	7.3
	" 9	"	"	13.33	-	-	-	-
	" 10	"	"	14.16	18.8	0.412	6.9	6.1
4.8	QV5-1	800	34	7.50	64.8	0.608	10.2	11.3
	" 2	"	"	8.33	54.2	0.565	9.7	10.4
	" 3	"	"	9.16	51.0	0.585	8.7	10.1
	" 4	"	"	10.00	43.6	0.546	8.8	9.3
	" 5	"	"	10.83	44.3	0.600	8.7	9.4
	" 6	"	"	11.66	41.5	0.606	8.8	9.1
	" 7	"	"	12.50	34.4	0.538	8.1	8.3
	" 8	"	"	13.33	31.4	0.524	7.3	7.9
	" 9	"	"	14.16	32.1	0.569	7.4	8.0
	" 10	"	"	15.00	29.0	0.544	7.2	7.6
6.4	QV6-1	1100	38	8.33	66.1	0.501	11.9	11.5
	" 2	"	"	9.16	63.8	0.532	11.5	11.3
	" 3	"	"	10.00	59.7	0.544	10.4	10.9
	" 4	"	"	10.83	58.4	0.576	9.4	10.8
	" 5	"	"	11.66	45.9	0.487	10.0	9.5
	" 6	"	"	12.50	49.2	0.560	9.2	9.9
	" 7	"	"	13.33	38.6	0.468	8.5	8.7
	" 8	"	"	14.16	40.6	0.523	8.4	9.0
	" 9	"	"	15.00	38.8	0.529	9.1	8.8
	" 10	"	"	15.83	34.1	0.492	8.9	8.2

Table 3-6(9) Experimental results of deposition rate and leg length (Experiment UQE)

ϕ mm	Ser.No	I A	E v	V mm/s	S_1 mm²	$\lambda(s)$ mm³/s·A	ha mm	h(s) mm
2.4	QE2-1	350	24	9.16	17.0	0.446	6.3	5.8
	" 2	"	26	"	16.8	0.442	6.2	5.8
	" 3	"	28	"	18.1	0.475	6.7	6.0
	" 4	"	30	"	13.3	0.349	6.4	5.1
	" 5	"	32	"	17.7	0.464	7.1	5.9
3.2	QE3-1	500	24	10.00	28.7	0.575	6.8	7.5
	" 2	"	26	"	21.2	0.425	6.9	6.5
	" 3	"	28	"	20.9	0.418	7.5	6.4
	" 4	"	30	"	23.7	0.475	8.1	6.8
	" 5	"	32	"	21.7	0.435	8.0	6.5
	" 6	"	34	"	22.3	0.447	7.8	6.6
	" 7	"	36	"	19.3	0.383	7.2	6.2
	" 8	"	38	"	22.9	0.460	7.5	6.7
4.0	QE4-1	650	28	10.83	27.0	0.450	7.0	7.3
	" 2	"	30	"	34.0	0.567	7.7	8.2
	" 3	"	32	"	30.0	0.501	8.3	7.7
	" 4	"	34	"	30.0	0.501	8.5	7.7
	" 5	"	36	"	29.7	0.495	8.6	7.7
4.8	QE5-1	800	28	11.66	53.1	0.675	9.1	10.3
	" 2	"	30	"	44.0	0.643	8.3	9.3
	" 3	"	32	"	40.4	0.590	8.3	8.9
	" 4	"	34	"	39.8	0.581	9.9	8.9
	" 5	"	36	"	35.9	0.525	9.5	8.4
	" 6	"	38	"	34.2	0.499	10.0	8.2
	" 7	"	40	"	37.0	0.541	10.0	8.6
	" 8	"	42	"	35.2	0.513	10.7	8.3
6.4	QE6-1	1100	28	13.33	48.7	0.591	8.5	9.8
	" 2	"	32	"	47.2	0.572	8.5	9.7
	" 3	"	36	"	47.3	0.574	8.9	9.7
	" 4	"	40	"	49.5	0.600	9.6	9.9
	" 5	"	44	"	47.2	0.573	8.6	9.7

Table 3-7(1) Experimental results of fusion penetration (Experiment URI)

ϕ_{mm}	Ser.No	S mm^2	S_2 mm^2	$\bar{d}$ mm	d_o mm	p mm	$d_{(M)}$ mm	$d_{(S)}$ mm
2.4	RI2-1	35.9	14.3	1.35	0.62	0.43	3.39	3.38
	" 2	43.1	18.8	1.81	0.87	1.08	3.75	3.70
	" 3	55.2	23.5	2.04	1.40	1.58	4.34	4.19
	" 4	70.8	33.7	2.66	2.16	2.39	4.93	4.74
	" 5	87.7	42.4	3.48	3.43	3.43	5.75	5.28
	" 6	99.7	51.8	4.20	4.66	4.20	6.23	5.63
	" 7	121.8	65.8	5.39	6.41	5.04	7.11	6.22
3.2	RI3-1	35.6	14.4	1.31	0.37	0.52	3.30	3.36
	" 2	53.8	24.5	2.00	0.95	1.20	4.12	4.13
	" 3	55.7	25.1	2.02	1.25	1.47	4.25	4.21
	" 4	68.6	35.8	2.35	1.29	1.60	4.48	4.67
	" 5	82.3	46.6	3.64	3.54	3.56	5.31	5.12
	" 6	95.2	53.1	3.93	3.75	3.85	5.75	5.50
	" 7	125.7	73.1	5.27	5.58	5.20	6.81	6.32
	" 8	113.9	62.2	4.81	5.87	4.60	6.71	6.02
	" 9	131.5	78.1	5.58	6.91	5.18	7.09	6.47
	" 10	167.6	105.9	6.93	8.12	6.56	7.90	7.30
4.0	RI4-1	44.3	19.5	1.54	0.50	0.62	3.63	3.75
	" 2	57.5	28.1	2.22	1.14	1.41	4.22	4.27
	" 3	66.8	36.9	2.70	1.79	2.14	4.49	4.61
	" 4	70.6	40.1	3.06	2.45	2.81	4.72	4.74
	" 5	93.3	53.2	3.47	2.91	3.18	5.41	5.45
	" 6	91.5	52.5	3.54	3.50	3.50	5.45	5.39
	" 7	110.8	67.1	4.25	4.33	4.25	5.98	5.94
	" 8	129.2	80.4	5.20	6.12	5.02	6.69	6.41
	" 9	133.3	82.5	5.33	6.20	5.29	6.82	6.51
	" 10	164.1	104.4	6.04	6.45	5.97	7.42	7.22
4.8	RI5-1	63.6	32.9	2.27	1.12	1.43	4.31	4.50
	" 2	82.4	44.7	3.06	2.31	2.60	5.09	5.12
	" 3	76.8	42.0	2.62	1.83	2.12	4.75	4.94
	" 4	100.3	58.9	3.60	3.16	3.45	5.55	5.65
	" 5	103.6	61.6	4.06	3.91	4.00	5.79	5.74
	" 6	128.6	77.0	4.64	4.41	4.62	6.47	6.40
	" 7	128.2	74.8	5.08	5.70	4.91	6.83	6.39
	" 8	141.8	82.9	5.20	5.16	5.20	7.03	6.71
	" 9	164.5	98.8	6.02	6.87	5.81	7.73	7.23
	" 10	186.8	121.8	6.97	8.04	6.68	8.04	7.71
6.4	RI6-1	89.4	51.3	3.00	1.66	1.97	5.00	5.33
	" 2	110.0	62.8	3.45	2.54	2.89	5.70	5.91
	" 3	111.9	68.6	3.85	3.33	3.56	5.73	5.96
	" 4	125.5	77.9	4.47	4.29	4.41	6.61	6.32
	" 5	136.0	83.8	4.89	4.77	4.89	6.60	6.58
	" 6	146.5	89.5	5.41	5.95	5.31	7.09	6.82
	" 7	164.5	103.5	6.00	6.41	6.00	7.40	7.23
	" 8	170.2	104.3	5.79	6.33	5.70	7.67	7.36
	" 9	180.6	116.2	6.33	7.25	6.18	7.78	7.58
	" 10	213.9	144.7	7.83	9.20	7.33	8.53	8.25

Table 3-7(2) Experimental results of fusion penetration (Experiment URV)

ϕ mm	Ser.No	S mm²	S_2 mm²	$\bar{d}$ mm	d_0 mm	p mm	d(M) mm	d(S) mm
2.4	RV2-1	63.1	16.5	1.39	0.50	0.50	4.67	4.48
	" 2	51.3	17.5	1.47	1.37	1.12	4.26	4.04
	" 3	50.4	21.3	1.70	0.58	0.72	3.96	4.00
	" 4	40.6	18.1	1.72	0.93	1.33	3.62	3.59
	" 5	34.7	16.7	1.65	0.84	1.06	3.28	3.32
	" 6	33.9	16.0	1.70	1.04	1.27	3.31	3.28
	" 7	29.6	15.6	1.85	1.66	1.70	3.14	3.07
3.2	RV3-1	102.2	45.0	3.04	2.29	2.70	5.99	5.70
	" 2	86.3	36.9	2.71	2.00	2.18	5.51	5.24
	" 3	78.2	40.2	3.06	2.50	2.83	5.14	4.99
	" 4	67.7	35.4	2.77	2.18	2.52	4.70	4.64
	" 5	54.8	28.0	2.41	1.75	2.06	4.22	4.17
	" 6	49.3	27.4	2.06	1.41	1.66	3.75	3.96
4.0	RV4-1	147.3	71.3	3.70	2.58	3.14	6.95	6.84
	" 2	117.9	59.7	3.75	3.29	3.62	6.38	6.12
	" 3	104.7	56.6	3.79	2.83	3.31	5.87	5.77
	" 4	82.0	45.1	3.31	3.12	3.20	5.24	5.11
	" 5	83.4	50.1	3.25	3.08	3.18	5.01	5.15
	" 6	66.5	38.8	2.83	2.00	2.39	4.42	4.60
4.8	RV5-1	207.9	121.5	5.95	6.33	5.85	8.45	8.13
	" 2	171.1	99.3	5.25	5.45	5.22	7.61	7.38
	" 3	131.3	77.2	4.41	3.98	4.25	6.46	6.46
	" 4	105.6	63.8	4.20	4.08	4.12	5.84	5.79
	" 5	95.0	59.0	3.89	3.66	3.81	5.40	5.50
	" 6	84.5	53.0	3.70	3.37	3.60	5.06	5.18
6.4	RV6-1	243.6	141.6	7.37	8.37	7.00	9.58	8.80
	" 2	181.6	106.1	5.97	7.08	5.64	8.14	7.60
	" 3	166.1	101.9	5.68	6.00	5.68	7.47	7.27
	" 4	147.9	90.0	5.45	6.16	5.39	7.17	6.86
	" 5	119.2	77.1	5.04	5.37	5.00	6.21	6.16
	" 6	104.7	66.3	4.39	4.35	4.36	5.74	5.77

Table 3-7(3) Experimental results of fusion penetration
(Experiment URE)

ϕ mm	Ser.No	S mm²	S_2 mm²	$\bar{d}$ mm	d_0 mm	p mm	d(M) mm	d(S) mm
2.4	RE2-1	74.3	29.8	2.10	0.87	1.02	4.91	4.86
	" 2	71.4	22.5	1.58	0	0	4.77	4.76
	" 3	77.8	29.7	1.93	0.25	0.33	4.91	4.97
	" 4	74.4	29.1	1.97	0	0	4.76	4.86
	" 5	77.0	25.6	1.60	0	0	4.88	4.95
	" 6	77.5	31.0	1.89	0	0	4.78	4.96
	" 7	74.6	29.2	1.89	0	0	4.73	4.87
	" 8	75.2	27.7	1.81	0	0	4.79	4.89
	" 9	79.0	33.4	1.89	0	0	4.74	5.01
3.2	RE3-1	103.5	49.6	3.35	3.25	3.31	6.08	5.74
	" 2	104.7	39.0	2.72	2.54	2.60	6.26	5.77
	" 3	107.4	54.1	3.35	3.20	3.22	6.05	5.84
	" 4	102.5	52.1	3.18	2.87	3.12	5.82	5.71
	" 5	111.3	62.2	3.50	2.95	3.14	5.86	5.95
	" 6	112.2	63.6	3.56	3.12	3.41	5.88	5.97
	" 7	113.2	67.4	3.75	3.20	3.58	5.81	6.00
	" 8	110.6	65.4	3.93	3.37	3.72	5.85	5.93
	" 9	130.4	81.8	4.43	4.04	4.33	6.23	6.44
4.0	RE4-1	101.9	41.0	2.83	2.54	2.70	6.11	5.69
	" 2	103.3	53.1	3.60	3.62	3.56	6.04	5.73
	" 3	103.1	54.0	3.54	3.79	3.52	5.99	5.72
	" 4	109.1	62.8	3.83	4.00	3.81	5.97	5.89
	" 5	102.9	59.2	3.60	3.37	3.47	5.70	5.72
	" 6	114.0	71.9	4.12	4.04	4.06	5.84	6.02
	" 7	116.1	72.5	4.06	3.33	3.75	5.80	6.08
	" 8	111.6	68.9	3.85	3.16	3.58	5.68	5.96
	" 9	128.3	79.0	4.29	3.87	4.02	6.20	6.39
4.8	RE5-1	96.3	51.5	3.93	4.20	3.85	5.94	5.53
	" 2	95.0	46.2	3.60	3.83	3.56	6.00	5.50
	" 3	90.6	47.1	3.43	3.62	3.37	5.68	5.37
	" 4	95.3	50.9	3.60	3.75	3.60	5.78	5.50
	" 5	102.4	55.4	3.79	3.93	3.79	5.98	5.71
	" 6	102.5	60.3	4.08	4.45	4.00	5.88	5.71
	" 7	103.0	57.6	3.97	4.41	3.93	6.02	5.72
	" 8	104.7	59.8	3.87	4.12	3.81	5.92	5.77
	" 9	114.0	68.7	4.50	5.20	4.39	6.24	6.02
	" 10	103.0	65.6	4.20	4.33	4.10	5.64	5.72
6.4	RE6-1	97.2	52.4	3.89	3.87	3.87	5.89	5.56
	" 2	96.1	50.3	3.66	3.75	3.62	5.86	5.53
	" 3	99.9	53.8	3.81	3.95	3.81	5.95	5.64
	" 4	101.3	58.3	3.68	3.50	3.58	5.70	5.68
	" 5	106.3	59.7	4.06	4.45	4.02	6.10	5.81
	" 6	111.6	60.5	3.81	3.75	3.70	6.15	5.96
	" 7	109.3	64.7	4.14	4.25	4.12	5.99	5.90
	" 8	110.3	68.8	4.22	4.20	4.16	5.85	5.92
	" 9	109.0	67.2	4.14	4.20	4.10	5.84	5.89
	" 10	108.4	70.9	3.89	4.04	3.85	5.54	5.87

Table 3-7(4) Experimental results of fusion penetration (Experiment UMI)

ϕ mm	Ser.No	S mm²	S_2 mm²	$\bar{d}$ mm	d_0 mm	p mm	d(M) mm	d(S) mm
2.4	MI2-1	54.2	23.8	1.70	0	0	3.93	4.15
	" 2	69.8	34.4	2.22	0	0	4.36	4.71
	" 3	60.3	21.3	1.41	0	0	4.26	4.38
	" 4	74.3	30.5	1.83	0	0	4.63	4.86
	" 5	79.4	32.0	2.02	0.29	0.33	4.92	5.02
	" 6	86.1	34.4	2.14	0.45	0.60	5.18	5.23
	" 7	95.6	37.5	2.29	0.87	1.06	5.56	5.51
	" 8	101.1	41.2	2.41	0.91	1.25	5.68	5.67
	" 9	110.1	48.9	2.70	1.83	2.08	5.97	5.92
3.2	MI3-1	47.5	18.8	1.50	0	0	3.75	3.88
	" 2	55.7	23.0	1.72	0.45	0.56	4.14	4.21
	" 3	75.4	16.8	1.18	0	0	4.96	4.90
	" 4	88.1	41.8	2.77	1.79	2.20	5.36	5.29
	" 5	99.9	47.3	3.16	2.50	2.83	5.86	5.64
	" 6	122.2	62.2	4.12	4.20	4.08	6.68	6.23
	" 7	148.7	80.2	4.97	5.12	4.93	7.45	6.88
	" 8	168.9	87.2	5.52	6.66	5.20	8.22	7.33
	" 9	183.8	106.7	6.35	7.50	5.97	8.34	7.64
4.0	MI4-1	49.1	20.8	1.64	0.25	0.27	3.83	3.95
	" 2	61.1	28.6	2.20	0.83	1.12	4.35	4.41
	" 3	80.6	42.2	2.62	2.00	2.27	4.96	5.06
	" 4	92.7	47.7	3.00	2.29	2.66	5.44	5.43
	" 5	115.0	66.0	4.06	4.16	4.04	6.18	6.05
	" 6	134.6	79.4	4.08	3.50	3.85	6.37	6.54
	" 7	131.9	79.0	4.66	5.12	4.66	6.63	6.48
	" 8	156.2	96.5	4.83	4.62	4.75	6.90	7.05
	" 9	165.0	105.0	5.29	5.33	5.29	7.12	7.24
4.8	MI5-1	53.4	23.7	1.77	0.50	0.58	3.99	4.12
	" 2	77.0	41.0	2.52	1.45	1.83	4.73	4.95
	" 3	84.3	42.3	2.75	2.33	2.47	5.23	5.18
	" 4	101.7	56.0	3.20	2.62	3.00	5.58	5.69
	" 5	126.7	75.4	4.10	3.45	3.85	6.19	6.35
	" 6	134.1	81.3	4.62	4.62	4.62	6.55	6.53
	" 7	177.7	116.8	6.41	7.66	6.12	7.70	7.52
	" 8	158.0	101.5	5.81	6.70	5.58	7.26	7.09
	" 9	207.6	136.3	6.85	8.25	6.58	8.31	8.13
	" 10	201.3	144.9	7.41	7.79	7.29	7.70	8.00
6.4	MI6-1	55.0	26.6	2.10	0.33	0.54	3.99	4.18
	" 2	70.2	40.2	2.58	1.08	1.45	4.35	4.73
	" 3	72.4	38.5	2.60	1.50	1.75	4.64	4.80
	" 4	79.9	43.8	2.79	1.70	2.18	4.85	5.04
	" 5	89.0	47.1	3.08	2.50	2.83	5.34	5.32
	" 6	107.2	60.3	3.77	3.83	3.68	5.96	5.84
	" 7	107.1	59.5	4.14	4.50	4.08	6.17	5.84
	" 8	113.0	62.5	4.25	4.83	4.14	6.38	5.99
	" 9	122.3	69.9	4.68	5.29	4.52	6.64	6.24
	" 10	129.4	74.7	5.22	6.12	4.95	6.97	6.41
	" 11	147.0	83.8	5.75	6.70	5.35	7.54	6.84

Table 3-7(5) Experimental results of fusion penetration (Experiment UMV)

ϕ mm	Ser.No	S mm²	S_2 mm²	$\bar{d}$ mm	d_0 mm	p mm	d(M) mm	d(S) mm
2.4	MV2-1	72.8	31.2	2.06	0.79	1.04	4.75	4.81
	" 2	77.0	23.9	1.50	0	0	4.90	4.95
	" 3	71.2	27.9	1.81	0.54	0.66	4.70	4.76
	" 4	79.5	32.2	2.08	0.75	0.95	5.01	5.03
	" 5	80.6	31.1	2.00	0.33	0.43	5.01	5.06
	" 6	79.6	28.0	1.79	0	0	4.96	5.03
	" 7	75.0	28.6	1.79	0	0	4.73	4.88
	" 8	79.9	30.1	1.81	0	0	4.89	5.04
	" 9	86.6	35.3	2.10	0	0	5.06	5.25
3.2	MV3-1	64.6	36.7	2.66	1.58	2.06	4.33	4.53
	" 2	69.4	39.7	2.72	1.66	2.10	4.47	4.70
	" 3	62.5	33.2	2.45	1.62	1.97	4.36	4.46
	" 4	64.1	34.3	2.22	1.00	1.16	4.23	4.51
	" 5	65.3	33.5	2.20	0.83	1.06	4.31	4.56
	" 6	74.0	39.3	2.43	1.45	1.81	4.63	4.85
	" 7	81.8	43.8	2.54	1.41	1.87	4.83	5.10
	" 8	79.0	39.3	2.37	1.16	1.52	4.83	5.01
	" 9	78.4	39.3	2.14	0.87	1.06	4.68	4.99
4.0	MV4-1	99.6	59.4	4.06	3.91	4.00	5.70	5.63
	" 2	103.2	60.2	3.91	3.79	3.87	5.79	5.73
	" 3	105.2	59.1	3.85	3.25	3.64	5.85	5.78
	" 4	111.8	63.8	3.66	3.33	3.52	5.91	5.96
	" 5	107.1	59.5	3.64	3.50	3.58	5.91	5.84
	" 6	115.0	65.8	3.79	3.62	3.70	6.04	6.05
	" 7	129.8	76.4	3.95	3.66	3.85	6.28	6.42
	" 8	135.0	78.1	3.97	3.16	3.47	6.36	6.55
	" 9	128.1	66.5	3.60	3.20	3.45	6.46	6.38
4.8	MV5-1	95.8	54.0	3.70	3.70	3.70	5.67	5.52
	" 2	93.2	48.4	3.41	3.37	3.33	5.70	5.44
	" 3	96.6	53.3	3.68	3.83	3.62	5.76	5.54
	" 4	99.7	57.1	3.87	3.87	3.77	5.77	5.63
	" 5	90.5	48.5	3.70	3.45	3.60	5.65	5.36
	" 6	95.9	50.9	3.54	3.83	3.52	5.80	5.52
	" 7	100.8	56.5	3.75	3.87	3.72	5.83	5.66
	" 8	111.4	64.3	4.08	4.20	4.04	6.10	5.95
	" 9	105.7	59.0	3.93	3.95	3.89	6.01	5.80
6.4	MV6-1	97.7	54.0	3.72	3.70	3.68	5.77	5.57
	" 2	101.8	57.4	3.93	4.16	3.91	5.92	5.69
	" 3	98.6	53.4	3.52	3.45	3.52	5.76	5.60
	" 4	104.9	59.2	3.77	3.91	3.72	5.91	5.77
	" 5	100.0	53.0	3.25	2.62	2.87	5.65	5.64
	" 6	99.1	53.7	3.68	3.54	3.62	5.82	5.61
	" 7	103.6	56.5	3.50	3.45	3.45	5.84	5.74
	" 8	107.6	62.2	3.79	3.62	3.70	5.86	5.85
	" 9	104.6	57.9	3.75	3.79	3.75	5.93	5.77
	" 10	106.3	58.8	3.70	3.95	3.70	5.99	5.81
	" 11	108.8	58.2	3.79	3.62	3.77	6.10	5.88

Table 3-7(6) Experimental results of fusion penetration (Experiment UME)

ϕ_{mm}	Ser.No	S_{mm^2}	$S_{2\ mm^2}$	$\bar{d}_{mm}$	$d_{0\ mm}$	p_{mm}	$d(M)_{mm}$	$d(S)_{mm}$
3.2	ME3-1	71.3	32.2	2.20	0.95	1.08	4.71	4.76
	" 2	74.8	34.0	2.14	0	0	4.61	4.88
	" 3	72.6	33.3	2.19	0.91	1.22	4.71	4.80
	" 4	73.7	32.1	1.95	1.00	1.18	4.75	4.84
	" 5	80.0	37.4	2.62	2.37	2.46	5.23	5.04
	" 6	82.0	44.8	2.60	2.04	2.16	4.90	5.11
	" 7	80.7	45.6	3.06	2.12	2.68	4.93	5.07
	" 8	88.9	51.6	2.43	1.10	1.27	4.71	5.32
	" 9	84.1	50.0	3.08	2.00	2.43	4.86	5.17
4.0	ME4-1	105.2	57.5	3.50	3.00	3.37	5.80	5.78
	" 2	120.3	65.6	3.35	2.08	2.43	5.94	6.18
	" 3	111.8	58.9	3.08	1.95	2.29	5.71	5.96
	" 4	106.6	57.4	3.20	2.58	2.95	5.73	5.82
	" 5	98.4	54.8	3.47	3.16	3.41	5.62	5.59
	" 6	94.6	52.7	3.39	2.91	3.27	5.48	5.48
	" 7	101.7	60.0	3.54	2.41	2.91	5.44	5.69
	" 8	104.6	65.1	3.79	2.83	3.39	5.45	5.77
	" 9	102.3	59.7	3.39	2.33	2.89	5.43	5.70
4.0	ME4-11	113.8	60.2	4.20	4.66	4.10	6.49	6.01
	" 12	118.8	64.1	4.31	4.87	4.22	6.60	6.15
	" 13	114.8	65.4	4.16	4.37	4.16	6.25	6.04
	" 14	115.2	62.9	3.43	2.50	2.91	5.92	6.05
	" 15	115.4	70.2	4.16	3.91	4.08	5.98	6.06
	" 16	127.1	75.5	4.66	5.00	4.66	6.55	6.36
	" 17	135.6	81.5	4.58	4.91	4.50	6.63	6.57
	" 18	127.8	79.3	4.34	4.25	4.25	6.23	6.37
	" 19	130.7	85.2	4.60	4.54	4.60	6.17	6.45
4.8	ME5-1	127.6	64.3	4.27	4.54	4.18	6.91	6.37
	" 2	127.9	67.0	4.02	4.45	3.95	6.73	6.38
	" 3	136.3	74.3	4.25	4.58	4.18	6.86	6.58
	" 4	135.1	72.2	4.10	4.37	4.10	6.82	6.55
	" 5	139.2	81.0	4.18	4.45	4.16	6.66	6.65
	" 6	151.5	89.7	4.54	3.91	4.31	6.82	6.94
	" 7	154.5	92.9	4.75	4.66	4.64	6.97	7.01
	" 8	140.7	89.7	4.52	3.95	4.35	6.35	6.69
	" 9	142.8	93.9	4.83	3.95	4.58	6.32	6.74
4.8	ME5-11	139.0	74.0	5.04	5.70	4.89	7.32	6.65
	" 12	140.0	75.9	5.04	5.83	4.87	7.31	6.67
	" 13	143.1	81.1	4.85	6.04	4.77	7.20	6.75
	" 14	154.9	92.3	5.50	6.70	5.20	7.46	7.02
	" 15	158.8	96.1	5.22	5.95	5.14	7.30	7.11
	" 16	158.3	102.0	5.60	6.08	5.45	7.12	7.09
	" 17	156.4	96.8	5.35	5.37	5.35	7.12	7.05
	" 18	169.8	117.0	6.02	6.20	6.02	7.06	7.35
	" 19	172.0	118.4	5.75	5.58	5.75	6.96	7.40

Table 3-7(7) Experimental results of fusion penetration (Experiment UQI)

ϕ mm	Ser.No	S mm²	S_2 mm²	$\bar{d}$ mm	d_0 mm	p mm	d(M) mm	d(S) mm
2.4	QI2-1	20.8	10.4	1.25	0.22	0.37	2.42	2.57
	" 2	27.0	13.6	1.35	0.45	0.45	2.75	2.93
	" 3	32.0	15.6	1.12	0.50	0.50	2.97	3.19
	" 4	44.5	23.3	2.35	1.90	2.16	3.86	3.76
	" 5	56.2	28.0	2.86	2.73	2.78	4.57	4.23
	" 6	72.5	42.2	4.03	4.43	3.96	5.20	4.80
	" 7	88.9	49.1	4.05	4.63	3.96	5.77	5.32
3.2	QI3-1	21.7	11.7	1.26	0.58	0.91	2.44	2.63
	" 2	39.0	25.6	2.04	1.37	1.66	3.08	3.52
	" 3	34.1	16.8	1.50	0.70	0.91	3.15	3.29
	" 4	42.2	22.1	2.02	1.25	1.41	3.60	3.66
	" 5	47.9	26.0	2.29	2.02	2.33	3.91	3.90
	" 6	68.6	40.0	3.00	2.50	2.66	4.59	4.67
	" 7	81.0	44.7	4.36	4.83	4.26	5.68	5.07
	" 8	94.4	55.3	4.96	5.60	4.81	6.06	5.48
	" 9	108.1	61.9	5.56	6.46	5.05	6.68	5.86
4.0	QI4-1	32.1	17.9	1.56	0.75	0.75	2.94	3.19
	" 2	41.3	21.8	1.91	1.12	1.33	3.50	3.62
	" 3	46.2	25.0	2.20	1.16	1.50	3.71	3.83
	" 4	48.3	28.1	2.16	1.95	1.97	3.75	3.92
	" 5	64.1	41.1	3.33	2.83	3.08	4.36	4.51
	" 6	66.5	41.1	3.46	3.31	3.34	4.61	4.60
	" 7	64.0	37.9	3.35	2.95	3.29	4.58	4.51
	" 8	88.1	49.7	4.66	4.66	4.66	5.85	5.29
	" 9	105.4	66.8	4.79	5.16	4.75	5.95	5.79
	" 10	96.1	59.7	4.52	5.00	4.47	5.74	5.53
4.8	QI5-1	44.9	24.3	2.08	0.93	1.25	3.59	3.78
	" 2	51.9	31.7	2.62	1.54	1.91	3.80	4.06
	" 3	65.4	38.6	3.14	2.56	2.87	4.53	4.56
	" 4	75.3	51.0	3.89	3.50	3.83	4.66	4.89
	" 5	82.9	51.0	3.91	3.75	3.87	5.18	5.13
	" 6	93.1	58.9	4.06	4.20	4.06	5.41	5.44
	" 7	121.0	81.4	5.08	5.45	5.06	6.10	6.20
	" 8	120.1	76.6	5.33	5.70	5.29	6.39	6.18
	" 9	108.3	67.7	4.95	5.54	4.87	6.14	5.87
	" 10	123.6	78.2	5.54	6.41	5.41	6.62	6.27
6.4	QI5-1	90.6	57.2	3.39	2.58	3.00	4.99	5.37
	" 2	90.1	55.0	3.27	1.95	2.33	4.95	5.35
	" 3	99.3	63.3	3.58	3.83	3.50	5.35	5.62
	" 4	122.0	84.3	4.81	4.87	4.84	5.87	6.23
	" 5	101.0	64.0	4.15	4.06	4.12	5.57	5.67
	" 6	130.9	81.8	4.37	3.88	4.25	6.21	6.45
	" 7	129.2	89.3	5.09	5.31	5.06	6.10	6.41
	" 8	167.6	112.3	6.70	7.20	6.70	7.44	7.30
	" 9	192.6	131.9	7.72	8.95	7.55	8.11	7.83
	" 10	203.4	137.6	8.16	9.56	7.63	8.49	8.04

Table 3-7(8) Experimental results of fusion penetration (Experiment UQV)

Φ_{mm}	Ser.No	S mm^2	S_2 mm^2	$\bar{d}$ mm	d_o mm	p mm	d(M) mm	d(S) mm
2.4	QV2-1	54.0	21.3	1.77	0.45	0.58	4.15	4.14
	" 2	48.2	23.1	1.83	0.16	1.43	3.86	3.92
	" 3	32.8	15.0	1.54	0.46	0.65	3.16	3.23
	" 4	38.6	18.7	1.70	0.68	0.85	3.40	3.50
	" 5	33.4	16.8	1.62	0.70	0.89	3.05	3.26
	" 6	31.8	16.4	1.75	1.08	1.33	3.13	3.18
	" 7	31.1	16.6	1.58	1.06	1.25	3.01	3.15
	" 8	32.9	16.3	2.04	1.33	1.60	3.34	3.23
	" 9	31.8	16.6	1.58	0.62	0.81	3.00	3.18
	" 10	26.9	12.9	1.39	0.62	0.75	2.84	2.92
3.2	QV3-1	77.2	28.4	2.79	2.29	2.66	5.56	4.96
	" 2	70.9	34.8	2.62	1.81	2.12	4.82	4.75
	" 3	67.0	32.2	2.43	1.54	1.91	4.65	4.61
	" 4	61.5	34.2	2.41	1.31	1.75	4.18	4.42
	" 5	51.0	28.3	2.56	1.79	2.29	4.00	4.03
	" 6	50.4	28.2	2.37	1.75	2.01	3.91	4.00
	" 7	45.4	24.7	2.14	1.75	2.06	3.75	3.80
	" 8	42.0	23.1	2.18	1.58	1.87	3.60	3.65
	" 9	40.6	23.4	2.14	1.58	1.91	3.46	3.59
	" 10	38.4	21.3	2.03	1.43	1.65	3.40	3.49
4.0	QV4-1	116.1	69.7	4.70	4.95	4.70	6.30	6.07
	" 2	120.8	76.8	5.52	6.45	5.31	6.55	6.20
	" 3	105.9	62.0	4.70	4.95	4.62	6.18	5.80
	" 4	116.9	78.0	4.91	4.79	4.81	5.94	6.10
	" 5	95.2	55.5	4.29	4.58	4.29	5.82	5.50
	" 6	77.7	46.8	3.91	3.87	3.93	5.14	4.97
	" 7	69.3	42.2	3.54	3.41	3.39	4.76	4.69
	" 8	56.6	35.3	3.00	2.31	2.65	4.09	4.24
	" 9	-	-	-	-	-	-	-
	" 10	47.5	28.6	2.56	1.95	2.33	3.75	3.89
4.8	QV5-1	141.2	76.3	4.93	5.70	4.64	7.29	6.70
	" 2	126.5	72.3	4.43	4.95	4.37	6.61	6.34
	" 3	122.0	71.0	4.95	5.58	4.79	6.67	6.23
	" 4	109.2	65.5	4.47	4.75	4.41	6.09	5.89
	" 5	102.9	58.6	4.18	4.58	4.06	6.03	5.72
	" 6	97.6	56.1	4.06	4.37	4.02	5.83	5.57
	" 7	86.1	51.7	3.97	4.12	3.93	5.25	5.23
	" 8	89.3	57.8	4.31	4.54	4.29	5.35	5.33
	" 9	80.9	48.8	3.87	4.04	3.83	5.23	5.07
	" 10	74.8	45.8	3.68	3.70	3.56	4.95	4.88
6.4	QV6-1	180.2	114.0	5.91	6.29	5.89	7.65	7.57
	" 2	172.7	108.8	5.62	5.50	5.56	7.38	7.41
	" 3	167.0	107.2	5.93	6.25	5.91	7.37	7.29
	" 4	150.4	91.9	5.64	5.91	5.60	7.21	6.91
	" 5	130.4	84.5	5.08	4.66	4.91	6.32	6.44
	" 6	129.2	80.0	4.97	5.20	4.95	6.54	6.41
	" 7	115.6	77.0	5.10	5.41	5.08	6.04	6.06
	" 8	115.4	74.7	5.15	5.37	5.12	6.16	6.06
	" 9	110.8	72.0	4.39	4.00	4.22	5.72	5.94
	" 10	100.0	65.9	4.29	3.95	4.18	5.43	5.64

Table 3-7(9) Experimental results of fusion penetration
(Experiment UQE)

Φ_{mm}	Ser.No	S mm²	S_2 mm²	$\bar{d}$ mm	d_o mm	p mm	$d(M)_{mm}$	$d(S)_{mm}$
2.4	QE2-1	33.3	16.3	1.66	1.04	1.33	3.23	3.25
	" 2	35.8	18.9	1.89	1.25	1.50	3.32	3.37
	" 3	39.5	21.4	2.00	1.12	1.33	3.43	3.55
	" 4	33.0	19.7	2.00	1.12	1.41	3.04	3.24
	" 5	40.3	22.6	2.02	1.04	1.35	3.39	3.58
3.2	QE3-1	61.5	32.7	2.77	1.95	2.39	4.46	4.42
	" 2	52.6	31.3	2.85	2.31	2.70	4.05	4.09
	" 3	52.2	31.3	2.62	1.62	2.00	3.86	4.08
	" 4	56.6	32.9	2.37	1.50	1.81	3.98	4.24
	" 5	54.3	32.5	2.43	1.70	2.03	3.89	4.15
	" 6	60.3	37.9	2.61	2.29	2.40	4.06	4.38
	" 7	50.5	31.1	2.26	1.66	1.93	3.67	4.01
	" 8	55.1	32.1	2.40	2.20	2.22	4.04	4.18
4.0	QE4-1	60.4	33.4	2.91	2.20	2.60	4.43	4.38
	" 2	81.6	47.6	3.68	3.50	3.64	5.22	5.09
	" 3	72.8	42.7	3.18	2.91	3.08	4.79	4.81
	" 4	72.5	42.5	3.14	2.83	2.97	4.77	4.80
	" 5	77.7	48.0	3.44	2.91	3.30	4.83	4.97
4.8	QE5-1	107.7	54.6	3.99	3.66	3.90	6.27	5.85
	" 2	104.7	60.6	4.43	4.29	4.41	6.04	5.77
	" 3	100.4	60.0	4.50	4.37	4.45	5.88	5.65
	" 4	105.6	65.8	4.12	4.00	4.08	5.71	5.80
	" 5	106.3	70.4	4.91	4.60	4.89	5.75	5.81
	" 6	99.0	64.7	3.97	3.83	3.91	5.34	5.61
	" 7	112.1	75.0	4.50	4.16	4.50	5.67	5.97
	" 8	109.5	74.3	4.25	3.83	4.14	5.46	5.90
6.4	QE6-1	115.7	67.0	4.31	3.62	4.14	6.15	6.07
	" 2	133.8	86.6	5.72	6.39	5.56	6.75	6.52
	" 3	142.0	94.7	5.68	6.04	5.64	6.71	6.72
	" 4	147.5	98.0	5.60	5.66	5.60	6.75	6.85
	" 5	122.9	75.6	4.50	4.00	4.50	6.06	6.25

第4章　すみ肉溶接の脚長と溶接条件の関係

4. 1　緒　　言

本章では，脚長hと溶接条件の関係を採り上げる。すみ肉溶接のサイズを表わす公称脚長は，電極ワイヤの溶融速度とその溶着速度によって定まるので，第3章で与えられた実験データによりまず電極溶融速度の実験式を定め，これより溶着速度の実験式を求める。

さらに，この溶着速度から公称脚長を算出するためには，平形すみ肉溶接であるということが必須条件なので，平形すみ肉を得るために必要な溶接条件各因子間のバランスを規制する実験式を求めることにした。

4. 2　電極材の溶融速度と溶着速度

すみ肉溶接ビードのサイズは溶着速度によって定まるわけであるが，溶極式アーク溶接法の場合，溶着速度は電極材の溶融速度に比例して定まる。従来，この溶融速度や溶着速度は，g/s, kg/min, lb/min などの重量単位で表示されているが，すみ肉溶接のサイズを規制する溶接条件を検討する上では容積単位を用いるのが便であるから，本研究では容積単位を採用し，単位電流当りの電極溶融速度を $\lambda_e mm^3$/S.A，同じく溶着速度を λmm^3/S.A で表わすことにした。したがって，溶接電流I Aによる電極の溶融速度（いわゆる Melting rate）は $\lambda_e I mm^3$/S，同じく溶着速度（いわゆる Deposition rate）は$\lambda I mm^3$/S である。

電極の溶融速度に関しては，サブマージアークの溶接法による軟鋼の溶接に対し，次のような Wilson 等の実験式が求められている[14)]。

$$MR=\frac{I}{1000}\left\{0.35+\phi^2+2.08\times10^{-7}\left(\frac{I\,L}{\phi^2}\right)^{1.22}\right\}\ lb/\mathrm{min} \cdots\cdots(4.\ 1)$$

ここでMR：電極溶融速度，lb/min

I：溶接電流，A

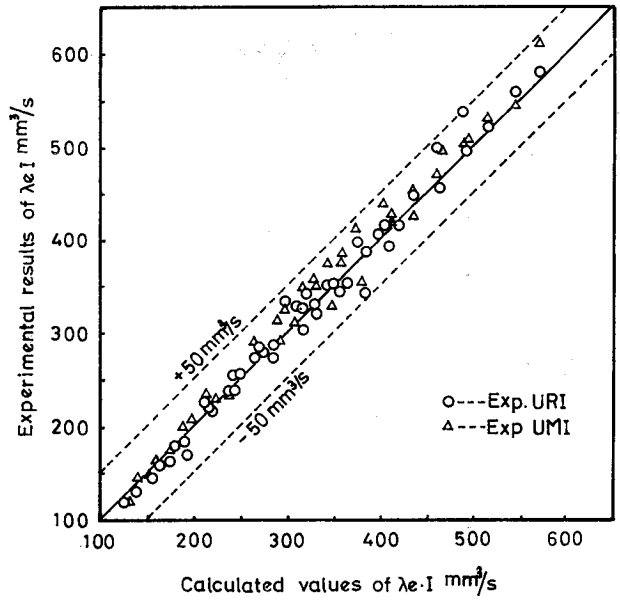
ϕ：電極径，in

L：電極突出長さ，in

この実験式は，電極ワイヤ突出長さLの影響（抵抗熱）に重点をおいて求められたものであるが，本研究ではLに関する系統的な実験を行なっていないので，電極溶融速度の実験式としてこのWilson等の実験結果を導入することにした。そこで，まず（4.1）式の ft-lb 単位を容積単位(mm^3)に換算すると次のようになる。（軟鋼電極ワイヤの密度を7.8 g/cm^3と仮定）

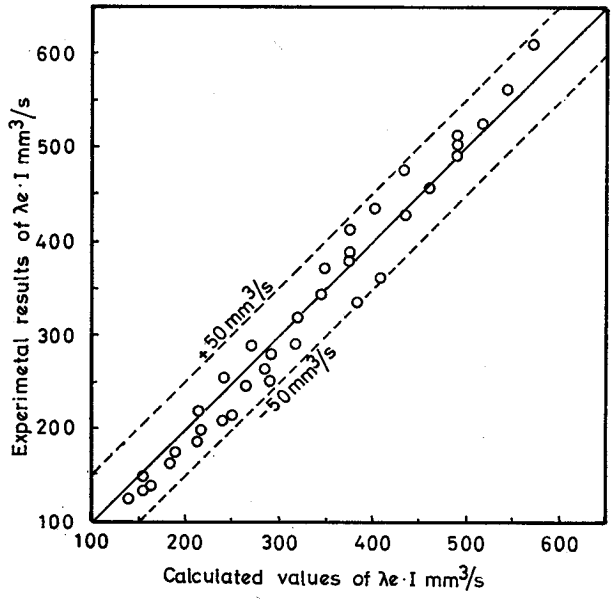
$$MR=\lambda_e I=I\left\{0.339+1.502\times10^{-3}\phi^2+1.043\times10^{-5}\left(\frac{I\,L}{\phi^2}\right)^{1.22}\right. mm^3/\mathrm{S} \cdots\cdots(4.\ 2)$$

あるいは，これを書き替えて



Note : Standard deviation of λe I=5.2%

Fig. 4-1 A plot of experimental results vs. calculated values of electrode melting rate λ_e I (Exp. URI, UMI)



Note: Standard deviation of λe I=9.0 %

Fig. 4-2 A plot of experimental results vs. calculated values of electrode melting rate λ_e I (Exp. UBI)

$$\left.\begin{array}{l}\lambda_e=A_eI^{1\cdot22}+B_e\ \ mm^3/\mathrm{S.A}\\ \text{ただし，}\ A_e=1.043\times10^{-5}(L/\phi^2)^{1\cdot22}\\ \qquad\qquad B_e=1.502\times10^{-3}\phi^2+0.339\end{array}\right\}\cdots\cdots(4.\ 3)$$

Wilson 等の実験式から導いた(4.3)式の再現性を確認するため，この式から算出した計算値 $\lambda_e I mm^3/\mathrm{S}$と，これに対応する実験値（第3章Table 3.5）の比較プロットを行なった。その結果をFig. 4.1に示す。なお，念のため別の研究[22]で行なった平板上のビード溶接の実験値についても同様な比較プロットを行ない，その結果をFig. 4.2に示す。計算値に対する実験値のばらつきの標準偏差は，Fig. 4.1の場合5.2%，Fig. 4.2の場合9.0%ときわめて小さく，Wilson 等の実験式はかなり再現性が良く，(4.3)式は十分実用性があると考えてよいであろう。

いま，ここで必要なのは溶着速度 $\lambda mm^3/\mathrm{S.A}$ であるから，実験式(4.3)の λ_eを溶着速度 λ に導入するため，次のようなパラメータ ξ を考える。

$$\xi=\frac{\lambda}{\lambda_e}$$

そうすると，$\lambda=\xi\lambda_e=\xi(A_eI^{1\cdot22}+B_e)mm^3/\mathrm{S.A}$ ……(4. 4)

ここで，ξ の値が明らかになれば，溶接条件より溶着速度を算定する実験式が定まる。

4. 3 溶着速度実験式，公称脚長の算定

第3章において(3.1)式，(3.2)式により λ_e と λ の実験値が求められているから，いま溶着速度の実験式を定めるためこれらの実験値 $\lambda_e(\mathrm{S})$，$\lambda(\mathrm{S})$を用いると，

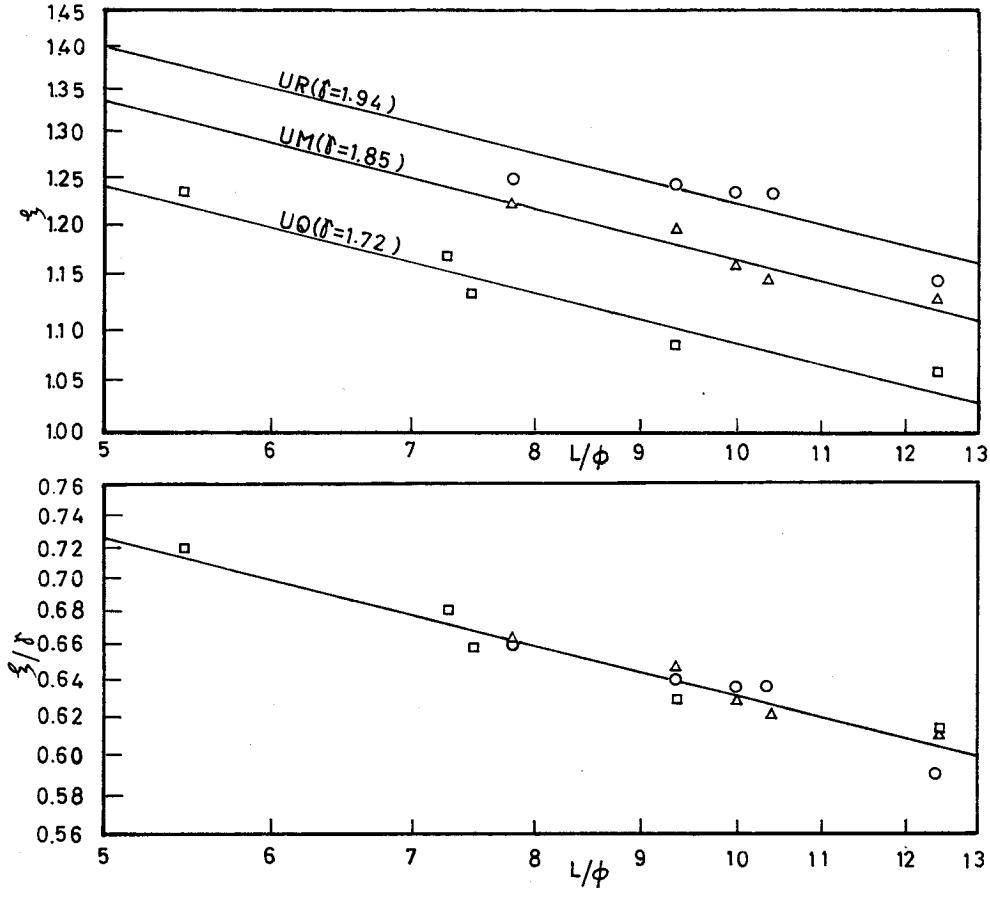
$$\xi=\frac{\lambda(\mathrm{S})}{\lambda_e(\mathrm{S})}\equiv\xi(\mathrm{S})\cdots\cdots(4.\ 5)$$

のように表わされ，これより ξ の実験値 $\xi(\mathrm{S})$が求められる。この $\xi(\mathrm{S})$の値を検討した結果，I，V，E に関わらず，L/ϕと ξ との間に規則的な関係が認められたので，これを実験式にまとめ次の式が得られた。

$$\xi=\frac{\gamma}{(L/\phi)^{0\cdot2}}\cdots\cdots(4.\ 6)$$

この実験式の曲線に対し，実験値 $\xi(\mathrm{S})$をプロットした結果をFig. 4.3に示す。（ただし，UQ実験に関しては $\lambda_e(\mathrm{S})$が求められていないので(4.3)式の λ_e を用いた）

この実験式(4.6)の係数 γ は，同一Codeの実験ではほぼ一定値を示したが，電極材料や電源種別（AC, DC）の異なる他のCodeの実験とは明らかに異なった値を示し次のような結果が得られた。



Note : ○-----Exp. UR △---Exp. UM □---Exp. UQ

Fig. 4-3 Plot of experimental data on the curve $\xi=\gamma/(L/\phi)^{0.2}$

*UR*実験	ϕ	L/ϕ	ξ(s)	γ
	2.4	12.500	1.141	1.892
	3.2	9.375	1.241	1.941
	4.0	10.000	1.233	1.953
	4.8	10.417	1.232	1.969
	6.4	7.813	1.278	1.927

平均値1.936 ∴ $\gamma=1.94$

*UM*実験	ϕ	L/ϕ	ξ(s)	γ
	2.4	12.500	1.123	1.862
	3.2	9.375	1.195	1.869
	4.0	10.000	1.157	1.833
	4.8	10.417	1.142	1.825
	6.4	7.813	1.220	1.841

平均値1.846 ∴ $\gamma=1.85$

UQ実験	ϕ	L/ϕ	ξ(s)	γ
	2.4	12.500	1.055	1.748
	3.2	9.875	1.080	1.690
	4.0	7.500	1.130	1.691
	4.8	7.292	1.168	1.738
	6.4	5.469	1.235	1.735

平均値1.720 $\therefore \gamma=1.72$

以上より，γは一種の材料定数と考えられるが，なお留意すべきは直流正極性で行なったUQ実験のγの値が他に比べて著しく低いことである。これは明らかに極性効果によるものと考えられる。この傾向は第6章の実用溶接の結果においても認められ，交流で$\gamma=1.85$，直流で$\gamma=1.64$という値が得られている。（第6章6.3）

さて，ξの値が(4.6)式のように定まると，これを(4.4)式に代入して溶着速度λの実験式が次のように与えられる。

$$\left.\begin{aligned}&\lambda=\frac{\gamma}{(L/\phi)^{0.2}}(A_eI^{1.22}+B_e)\,mm^3/\mathrm{S.A}\\&\text{ただし，}A_e=1,043\times10^{-5}(L/\phi^2)^{1.22}\\&\qquad B_e=1,502\times10^{-3}\phi^2+0.339\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(4.\ 7)$$

ここで(4.7)式のγを**溶着係数**(Coefficient of deposition)と名付ける。この溶着係数γは使用材料（電極ワイヤ，フラックス，母材等）に関しあらかじめ試験溶接を行なってその値を確認しておく必要があるが，軟鋼交流溶接の場合は，前述の試験結果からほぼ1.75〜1.95の範囲の値をとるものと思われ，実用的には平均1.85程度をとれば大差ないであろう。しかし，直流溶接の場合γの値は極性効果が大きく影響するので，必ず同一極性で試験溶接を行なってγを求めることが望まれる。γ推定の試験溶接に関しては本項末尾の付記参照のこと。

なお，(4.7)式のA_e，B_eは軟鋼材に対する値であるが，上述の試験溶接により溶着係数γの値が調整されるので，その他の任意の鋼種についてもそのまま適用可能であろう。

使用材料に関し溶着係数γが定まり，溶接条件ϕ，L，I，E，V等が与えられると，上式(4.7)から溶着速度λが求められるから，次式によってすみ肉溶接のサイズが算定される。

$$\left.\begin{aligned}&\text{公称のど厚}\,a=\sqrt{\frac{\lambda I}{V}}\,mm\\&\text{公称脚長}\,h=\sqrt{\frac{2\lambda I}{V}}\,mm\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(4.\ 8)$$

λの実験値λ(s)は，第3章において(3.2)式によりTable 3.6に示すごとく求められているから，URI，UMI，UQI実験のデータによりSer. Noごとに(4.7)式からλの計算値を求め，溶着速度$\lambda I\,mm^3/\mathrm{s}$と，同じく実験値$\lambda$(s)$I\,mm^3/\mathrm{s}$との比較プロットをFig. 4.4に示す。そのばらつきの標準偏差は8.3％で，溶着速度実験式(4.7)は十分実用性があると考えてよいであろう。

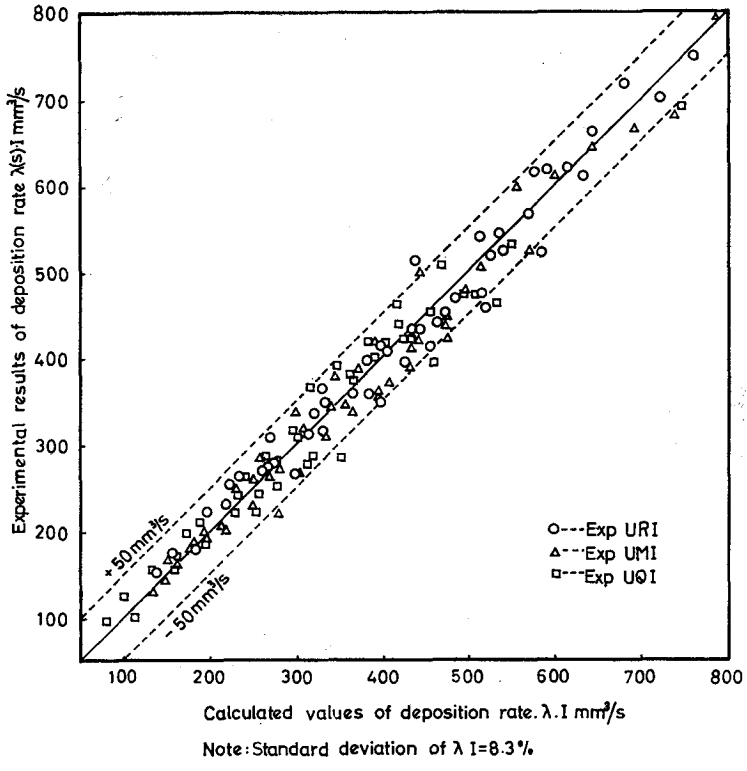


Fig. 4-4 A plot of experimental results vs. calculated values of deposition rate λ I

（付記）γ 推定の試験溶接について

まず，使用電極径 ϕ に対し，適当な溶接条件 L(㎜)，I(A)，E(V)，V(㎜/S) を定めて単層すみ肉溶接を行ない，試験ビードのマクロ腐食断面写真により溶着断面積 S_1(㎜^{2}) を測定すれば，

(3.2) 式より　$\lambda(\mathrm{S})=\dfrac{S_1 V}{I}$

(4.3) 式より　$\lambda_e=A_e I^{1.22}+B_e$

(4.5) 式より　$\xi(\mathrm{S})=\dfrac{\lambda(\mathrm{S})}{\lambda_e}$

が得られるから，求むる溶着係数は

$$\gamma=\xi(\mathrm{S})\left(\frac{L}{\phi}\right)^{0.2} \quad \cdots\cdots (4.9)$$

なお，λ(S)はある程度の変動が予想されるから，なるべく電極径 ϕ が異なるごとに試験溶接を行なうことが望ましい。

4. 4　公称脚長を得るための溶接条件

(4.8) 式で示したように，公称脚長 h は$\lambda I/V$の関数であるから，実際の脚長h_aと公称脚長 h

との比 h/h_a は溶接条件 $\lambda I/V$ の値によって，

$h/h_a<1$（凹形），$h/h_a=1$（平形），$h/h_a>1$（凸形）

のように変化するであろう。また，このような形状の変化はアーク電圧 E によっても影響を受け，E が高いほど凹形になり，逆に E が低いほど凸形になる傾向のあることは，定性的にはよく知られている。

まず，このようなすみ肉溶接ビード形状に及ぼす溶接条件の影響を，定量的に実験式で表わしてみることにする。便宜上実験式の記号を

$$\frac{h}{h_a}\equiv H \qquad \sqrt{\frac{\lambda I}{V}}\equiv U$$

のごとく簡略化し，求むる実験式の関数形を次のように仮定する。

$$H=KU^nE^m \cdots\cdots(4.10)$$

I Ser., V Ser. 実験では ϕ ごとにアーク電圧 E が一定なので $E\equiv E_C$ とし，E-Ser. 実験では ϕ ごとに U が一定なので $U\equiv U_C$ として表わせば，(4.10) 式は次のように二つの式に分割される。

$$H=KE_c{}^mU^n=\alpha U^n \quad ただし\alpha=KE_c{}^m \cdots\cdots(4.11)$$

$$H=KU_c{}^nE^m=\beta E^m \quad ただし\beta=KU_c{}^n \cdots\cdots(4.12)$$

実験値としては，公称脚長 $h=h(\mathrm{S})=\sqrt{S_1}$，溶着速度 $\lambda=\lambda(\mathrm{S})=S_1V/I$ を用い，I-Ser. と V-Ser. のすべての実験データから (4.11) 式の n と α，E-Ser. 実験のすべてのデータから (4.12) 式の m と β を求めた結果，指数 n，m についてはほぼ共通した値となり，平均値として次の値が得られた。

$$n=0.659\fallingdotseq\frac{2}{3} \qquad m=-0.661\fallingdotseq-\frac{2}{3}$$

係数 α，β は，E_C と U_C が実験 Code および電極径ごとに異なる値なので当然同様な変化をなす定数であって，次のように求められた。

ϕ	α			β			
	UR	UM	UQ	UR	UM	UM	UQ
2.4	0.348	0.241	0.350	9.165	—	—	8.050
3.2	0.310	0.259	0.327	10.418	9.522	—	8.500
4.0	0.273	0.252	0.330	10.510	9.602	10.370	9.660
4.8	0.261	0.267	0.313	10.468	10.267	11.362	10.026
6.4	0.251	0.272	0.278	10.600	—	—	11.510

以上より，(4.11)，(4.12)式はそれぞれ次のようになる。

$$H=\alpha U^{2/3} \quad または\frac{H}{\alpha}=U^{2/3} \cdots\cdots(4.13)$$

$$H=\frac{\beta}{E^{2/3}} \quad または \quad \frac{H}{\beta}=\frac{1}{E^{2/3}} \cdots\cdots(4.14)$$

Fig. 4. 5, Fig. 4. 6に上のそれぞれの実験式曲線に対する実験値のプロット図を示すが，いずれも曲線を1本にまとめるためH/α，H/βの値を用いている。

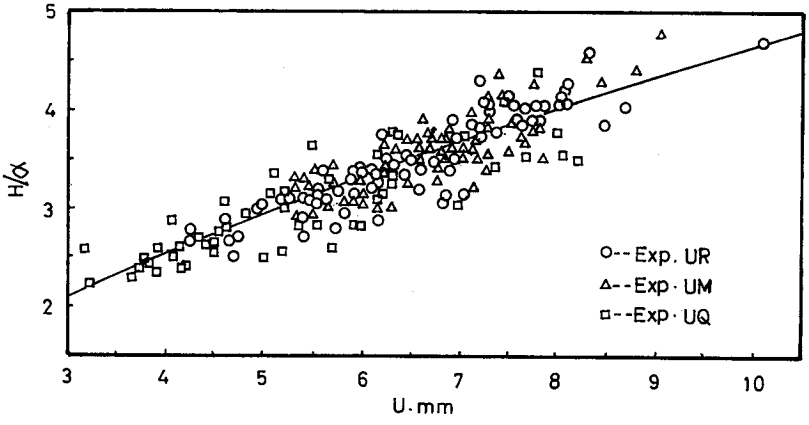


Fig. 4-5 A plot of experimental results on the curve $H=\alpha U^{2/3}$

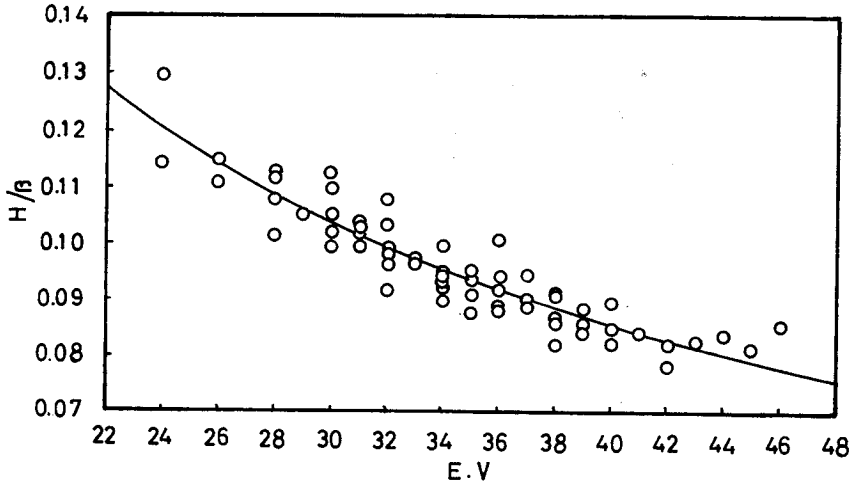


Fig. 4-6 A plot of experimental results on the curve $H=\beta/E^{2/3}$

次に，(4.13)式と(4.14)式を組合わせ(4.10)式の形にまとめると，Hの実験式は結局次のようなU/Eの関数として表わされる。

$$H=K\left(\frac{U}{E}\right)^{2/3} \quad \cdots\cdots(4.15)$$

この場合係数Kは(4.11)，(4.12)式から

$$K=\alpha E_c^{2/3}=\frac{\beta}{U_c^{2/3}}$$

で与えられるが，実験値のデータから平均値として次のような値が得られた。

I-Ser., VSer. 実験値より $\alpha E_c^{2/3}=3.10$

E-Ser. 実験値より　　$\beta/U_C^{2/3}=2.90$

したがって，両者の平均値をとってKとすると

$$K=3.0$$

となる。しかし，この係数Kはかなりのばらつきがあり，Fig. 4. 7に(4.15)式に対する実験値データのすべてをプロットしてあるが，ほぼ$K=3$を中心にして$K=2.4$〜3.6の範囲に散布している。したがって，この変動範囲を考慮するとKの値は次のように表わせる。

$$K=3\ (1\pm0.2)$$

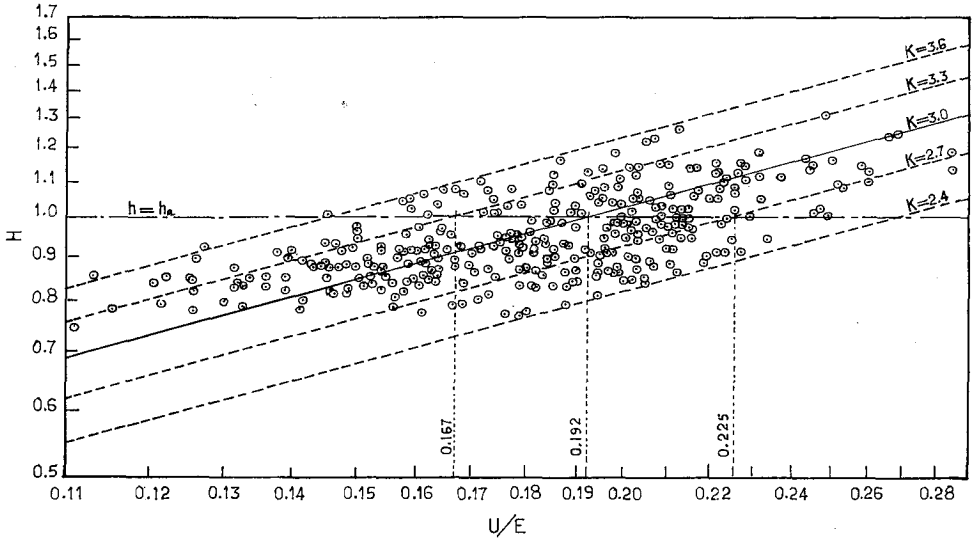


Fig. 4-7 A plot of the experimental data on the curve $H=K(U/E)^{2/3}$

Hつまり h/h_a というすみ肉形状を定めるパラメータは，その性質上実験値としてはどうしてもばらつきが大きくなりがちである。そこで，Hのばらつきに関しある程度合理的な許容変動範囲を定めるため，基準値として$K=3$とした実験式

$$H=3\left(\frac{U}{E}\right)^{2/3} \quad \cdots\cdots(4.16)$$

によってh/h_aの計算値を求め，その実験値$h(s)/h_a$との標準偏差σを計算した結果，

$$\sigma=0.102\fallingdotseq0.1$$

を得た。したがって，係数Kにこのσの値を導入して，

$$K=3(1\pm\sigma)=3(1\pm0.1)$$

とし，次のようなHの許容変動範囲を与える実験式を定めた。

$$H=3(1\pm0.1)\left(\frac{U}{E}\right)^{2/3} \quad \cdots\cdots(4.17)$$

さて，(4.8)式で与えた公称脚長hが，実際の脚長h_aを表わすためには $h=h(s)=h_a$，つ

まり平形すみ肉でなければならない。したがって，脚長hの算定に用いられる溶接条件λ，I，V等は，このような条件を満足する値であることが必要である。いま，そのような溶接条件をもって一つの標準溶接条件とすると，その算定式は(4.16)式ないし(4.17)式において，$H=1$とおくことによって得られる。

基準値は(4.16)式より，

$$3\left(\frac{U}{E}\right)^{2/3}=1 \qquad \therefore \frac{\lambda I}{VE^2}=\frac{1}{27}=0.037 \quad \cdots\cdots(4.18)$$

変動範囲を考慮すると(4.17)式より

$$3(1\pm0.1)\left(\frac{U}{E}\right)^{2/3}=1 \qquad \therefore \frac{\lambda I}{VE^2}=0.028\sim0.050 \quad \cdots\cdots(4.19)$$

この両式は公称脚長を得るために必要な溶接条件各因子相互のバランスを規制する実験式であって，(4.18)式が標準溶接条件を定める式であり，(4.19)式はその許容変動範囲を与える。

実用溶接条件としては，応力集中などの観点から凸形すみ肉を避けてむしろ軽微な凹形すみ肉が望まれる。つまり実用的には一般に$K\leq3$の範囲で$\lambda I/VE^2$の値を選定したほうがよいわけである。第6章に示す実用溶接のデータにもそのような傾向が現われている。（第6章Fig. 6. 3）

4. 5 結　　言

本章では，まずすみ肉溶接のサイズ（のど厚aまたは脚長h）と溶接条件（溶接電流I，アーク電圧E，溶接速度V，電極径ϕ，電極突出長さL等）との関係を求めるため，電極溶融速度から溶着速度の実験式を求めたが，単位電流当りの溶着速度を容積単位でλ mm³/S.A のごとく表わし，次の実験式を得た。

$$\lambda=\frac{\gamma}{(L/\phi)^{0.2}}(A_eI^{1.22}+B_e)\ \mathrm{mm^3/S.A}$$

ここで，$A_e=a(L/\phi^2)^{1.22}$，$B_e=b\phi^2+c$

ただし軟鋼の場合

$$a=1.043\times10^{-5},\quad b=1.502\times10^{-3},\quad c=0.339$$

γは溶着係数と名付けた一種の材料定数

溶着係数γは電流の極性によっても変化する材料定数で，あらかじめ使用材料ごとに試験溶接を行なって定める必要があり，その算定方法も示したが，軟鋼の交流溶接ではだいたい$\gamma=1.75\sim1.95$の範囲である。

以上のλにより，すみ肉溶接のサイズと溶接条件の関係は次式で与えられる。

$$\text{公称のど厚}\ a=\sqrt{\frac{\lambda I}{V}}\ \mathrm{mm} \qquad \text{公称脚長}\ h=\sqrt{\frac{2\lambda I}{V}}\ \mathrm{mm}$$

次に，実際の脚長が上式で与えられる公称脚長となるためには，平形すみ肉溶接を形成する必要があるが，そのためには必要な溶接条件相互のバランスを規制する実験式を次のように求めた。

$$\frac{\lambda I}{VE^2}=0.037 \qquad \text{許容範囲}0.037 \fallingdotseq 0.028 \sim 0.050$$

この値の標準値は0.037であるが，これが大きくなるほどすみ肉溶接は凸形となるので，実用的には許容範囲内で標準値より小さめにとるのがよいであろう。

第5章　すみ肉溶接の溶込みと溶接条件の関係

5. 1　緒　　言

すみ肉溶接の溶込み深さpを定める一つの因子，公称脚長hについては，前章において溶着速度の実験式を求めることによって溶接条件との関係を確立した。次に，pのいま一つの重要な因子である溶込み代表量dについては，既に第2章において示したとうり溶接条件との関係が理論的に求められている。

本章では，dを含めてすみ肉溶接の溶込みと溶接条件の関係を実験的に追求し，実験式によってこれらの関係を定めることにした。そのために必要な実験のデータはすべて第3章で示した実験結果によって与えられる。

なお，hとdよりpを定めるためには，第2章で仮定したように溶接部の断面形状が半楕円をなすということが必須条件であるから，本章ではまずこの条件を満足するために必要な溶接条件について検討し，その上でdと溶接条件の関係を与える実験式を求めることにした。

5. 2　溶接条件と溶込み代表量d

(1)　溶込みに関する見掛けの熱効率$\bar{\eta}$について

溶接条件（N）と溶込み（d）の理論的関係は，第2章において示したように，

(2.11)式より　$d=\dfrac{2kD}{V}$

(2. 8)式より　$D=KN^n$

(2.10)式より　$N=\dfrac{V(Q/2)}{4\pi k\mu\theta_M}$

$$=f\eta EIV \quad ただし \quad f=\frac{0.03}{\pi k\mu\theta_M}$$

の3式によって与えられているわけであるが，これらの式からdを算出するには，材料定数fおよび溶接条件E，I，Vとともにアークの熱効率ηの値が必要である。

アークの熱効率に関する従来の研究によれば，被覆アーク溶接[15),16),17)]ではだいたい$\eta=0.7$～0.9，サブマージアーク溶接[6)]では$\eta=0.91$～0.99といった値が得られているが，筆者も別の実験[12),18)]において，被覆アーク溶接（重力式）で$\eta=0.85$，サブマージアーク溶接で$\eta=0.97$の値を得ている。

しかし，ここで留意すべきことは，たとえηの値が定まったとしても，実際の溶込み深さd_o，$\bar{d}$，pなどは単に溶接条件の因子E，I，V等の値のみで定まるものではなく，電極径ϕも含めてこれら因子間の比率によって影響を受けることである。たとえば，電極端の電流密度I/ϕ^2が増すと電流がよく集中し，その結果ビード幅が狭くなって溶込み深さが増大することは

既に実験的にも明らかにされている[19]。アークの長さとともに変化するアーク電圧に関しても同様のことが考えられるであろう。正常なすみ肉ビード断面形状を得るためにも，バランスのとれた溶接条件が必要なことは前章（4.18）式に関進して述べたところであるが，とにかくすみ肉溶接断面形状は，各溶接条件因子間のバランスが適正でないと，はじめに仮定した半楕円形が崩れて，いわゆる梨の実形になったり三日月形になったりすることはよく知られている。

以上のことから，同じ入熱量（Q）であっても溶接条件各因子間の比率によって，溶込みに関与するNの値が見掛け上変化してくるものと考えるべきであろう。そこで，見掛上のNの変化をすべて熱効率ηの変化に起因するものと仮定して，これを溶込みに関する見掛けの熱効率$\bar{\eta}$とする。溶込みの推定には，このηを用いてNを算定する必要がある。

(2) 溶込み形状係数 δ(M) について

見掛けの熱効率$\bar{\eta}$導入の必要性を裏付け，これを定量的に表わすデータとして，実験溶接の結果からdの実験値である（2.21）式の d(S) および（2.23）式の d(M) を求め，この両者を比較してみた。

すなわち，全溶融部断面積S，溶着断面積 S_1 および溶込み深さ d_o，$\bar{d}$，p 等の実測値を用い，まず（2.21）式

$$d(\mathrm{S})=\sqrt{S/\pi} \quad \cdots\cdots (\mathrm{i})$$

より d(S) を算出。次で $h(\mathrm{S})=\sqrt{2S_1}$ の h と，d_o，$\bar{d}$，p から（2.18），（2.19），（2.20）の各式によって $d(d_o)$，$d(\bar{d})$，$d(p)$ を計算した上，（2.23）式を参照して

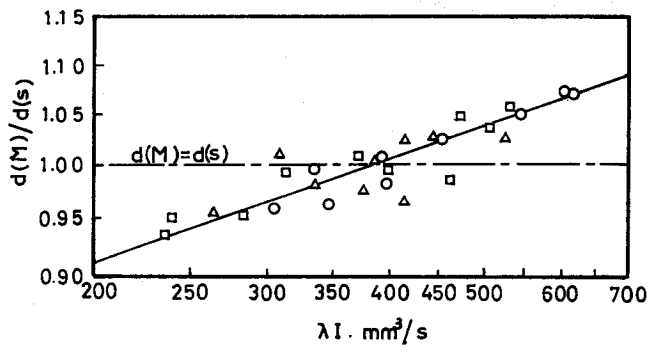
$$d(\mathrm{M})=\frac{d(d_o)+d(\bar{d})+d(p)}{3} \quad \cdots\cdots (\mathrm{ii})$$

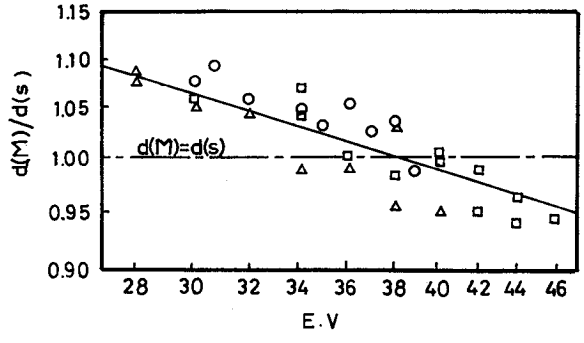
より d(M) を算出した。実験値 $d(d_o)$，$d(\bar{d})$，$d(p)$ は必ずしも（2.23）式で示すように等しくないので，その平均値をとって d(M) としたわけである。

その結果，もし溶融部断面が理想的な半楕円なら当然上の（i），（ii）は等しく，$d(\mathrm{M})=d(\mathrm{S})$ となるべきであるが，実際は溶接条件により必ずしもこの関係が成立しないことが判明した。d(M) と d(S) のすべての実験値データは第3章の Table 3.7 に表示してあるが，1例として Fig. 5.1 に I-Ser. および E-Ser. 実験のデータによる $d(\mathrm{M})/d(\mathrm{S})$ と溶接条件の関係をプロットして示す。$d(\mathrm{M})/d(\mathrm{S})$ の比は λI あるいはEの増加に伴なってかなり規則的に変化している。

このように $d(\mathrm{M})\neq d(\mathrm{S})$ となるのは，すみ肉溶接断面形状が，移動点熱源理論に基く溶込みと等しい断面積をもつ理想的な半楕円とした（2.12），（2.13），（2.14）式等の仮定によって当然起ってくる誤差であって，たとえば Fig. 5.2 に示すビード溶接の例からも容易に理解できるであろう。(a)図と(b)図はともに等しい溶込み断面積Sのビード溶接であって，d(S) は当然両者等しいが，溶込み形状が異なるため$d(\bar{d})$の値は等しくない。つまり $d(\mathrm{M})\neq d(\mathrm{S})$ である。Fig. 5.3 のすみ肉溶接の例についにもまったく同様のことがいえる。そこで

$$\frac{d(\mathrm{M})}{d(\mathrm{S})}\equiv\delta(\mathrm{M}) \quad \cdots\cdots (5.\ 1)$$

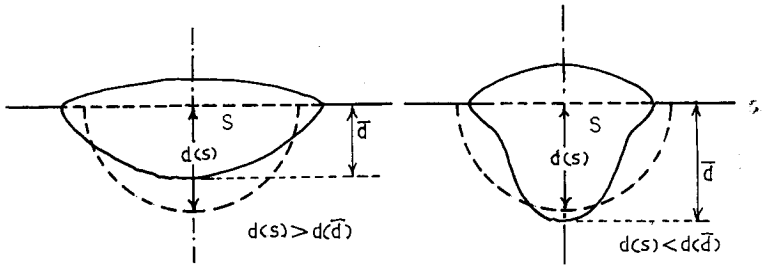




Note: Diam of electrode Φ=4.8mm

○--- Exp.UR △--- Exp.UQ □--- Exp.UM

Fig. 5-1 Plot of experimental results of d(M)/d(S)



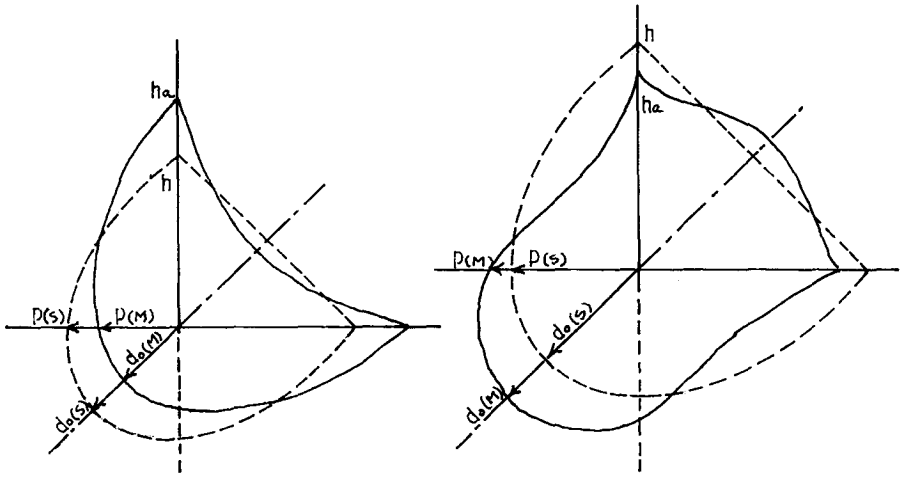
(a) Wide and shallow penetration (b) Narrow and deep penetration

Note: (i) Solid line shows actual fusion penetration.

(ii) Broken line shows theoretical fusion penetration which is the same area as above (i)

Fig. 5-2 Two kinds of fusion penetration of bead welds

とおき，この δ(M) を**溶込形状係数** (Coefficient of fineness on fusion penetration) と名付け，これを溶込み代表量 d に導入する。



(a) Wide and shallow penetration
$h<h_a$, $d(M)<d(S)$

(b) Narrow and deep penetration
$h>h_a$, $d(M)>d(S)$

Note: (i) Solid line shows actual penetration.
(ii) Broken line shows normal semi-ellipse penetration which is the same area as above (i).

Fig. 5-3 Two kinds of fusion penetration of fillet welds

(3) $\bar{\eta}$, $\delta(\mathrm{M})$ を導入して d の補正

いま，見掛けの熱効率 $\bar{\eta}$ を解析的に表現するため，(1)項で示した N および D を便宜上次のように書き替える。

$$N=A\eta \quad \text{ただし} \quad A=fEIV$$

$$D=Bd \quad \text{ただし} \quad B=\frac{V}{2k}$$

$$D=KN \quad \text{または} \quad N=\left(\frac{D}{K}\right)^m \quad \text{ここで} \quad m=\frac{1}{n}$$

以上の3式から，

$$\eta=\frac{B^m d^m}{AK^m}$$

いま，$d=d(\mathrm{M})$ のとき $\eta=\bar{\eta}$ であるから上式より

$$\bar{\eta}=\frac{B^m d(\mathrm{M})^m}{AK^m}=\frac{B^m}{AK^m}\cdot d(\mathrm{S})^m\cdot\delta(\mathrm{M})^m$$

この $\bar{\eta}$ を N に導入して

$$D=KN^n=KA^n\bar{\eta}^n=\frac{KA^nB^{mn}}{K^{mn}A^n}\cdot d(\mathrm{S})^{mn}\cdot\delta(\mathrm{M})^{mn}$$

$D=Bd$, $mn=1$ であるから上式より

$$d=d(\mathrm{S})\cdot\delta(\mathrm{M})\cdots\cdots(5.\ 2)$$

この (5. 2) 式の d は，見掛けのアーク熱効率 $\bar{\eta}$ に対応する見掛けの溶込み量とも云うべき値で，溶接条件が適切であってすみ肉断面形状が正常な半楕円をなす場合は，当然 $\delta(\mathrm{M})=1$, $d=d(\mathrm{S})=d(\mathrm{M})$ である。

現在のところ，上述の見掛けのアーク熱効率 $\bar{\eta}$ が解明されるに至っていないので，ここでは次節以下，$d(\mathrm{S})$ および $\delta(\mathrm{M})$ の実験式を求めて，(5. 2) 式の d を溶接条件の関数として表わすことにした。

5. 3 溶込形状係数 $\delta(\mathrm{M})$ の実験式，標準アーク電圧の算定

まず，$\delta(\mathrm{M})$ に対する I，E および V の影響をみるため各 Series の実験値のデータをプロットして検討した結果，I と E に関しては先に Fig. 5.1 で例示したようにかなり規則的な変化が見られたが，V に関しては Fig. 5.4 に示すごとくほとんど規則的な変化は認められなかった。これは，$d(\mathrm{M})$ と $d(\mathrm{S})$ に対する V の影響が同一で，$\delta(\mathrm{M})$ の分子と分母で打消されるから当然であろう。

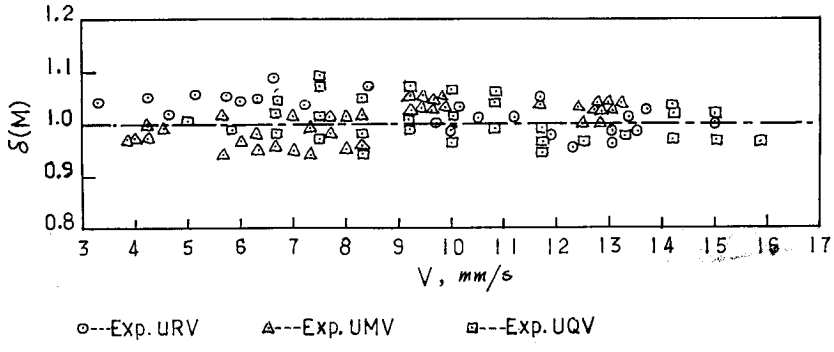


Fig. 5-4 Experimental result of the effect of welding speed V on $\delta(\mathrm{M})$

そこで，$\delta(\mathrm{M})$ と I および E の関係を表わす関数形を次のように仮定したが，電流密度 I/ϕ^2 と電極突出長さ L が I と関連して $\delta(\mathrm{M})$ に影響を与えることを考慮し，電流値に関するパラメータとしては λI を用いた。

$$\delta(\mathrm{M})=C(\lambda I)^n E^m \cdots\cdots(5.\ 3)$$

I-Ser. 実験では ϕ ごとに E が一定なので $E\equiv E_C$

E-Ser. 実験では ϕ ごとに λI が一定なので $\lambda I\equiv(\lambda I)_C$

として表わせば，(5.3) 式は次のように二つの式に分割される。

$$\delta(\mathrm{M})=CE_C{}^m(\lambda I)^n=k_1(\lambda I)^n \quad \text{ただし}\ k_1=CE_C{}^m\cdots\cdots(5.\ 4)$$

$$\delta(\mathrm{M})=C(\lambda I)_C{}^n E^m=k_2E^m \quad \text{ただし}\ k_2=C(\lambda I)_C{}^n\cdots\cdots(5.\ 5)$$

I-Ser. 実験のデータから (5.4) 式の n と k_1，E-Ser. 実験のデータから (5.5) 式の m と k_2 を求めた結果，指数 n，m についてはほぼ共通した値となり，平均値として次の値が得られ

た。

$$n=0.143\fallingdotseq 0.14 \qquad m=-0.254\fallingdotseq -\frac{1}{4}$$

係数 k_1, k_2 は E_C と $(\lambda I)_C$ が実験 Code および電極径 ϕ ごとに異なる値なので，当然それに応じた変化をなす定数であって次のように求められた。

	k_1			k_2			
ϕ	*URI*	*UMI*	*UQI*	*URE*	*UME*	*UME*	*UQE*
2.4	0.468	0.486	0.481	2.384	—	—	2.218
3.2	0.466	0.462	0.468	2.495	2.317	—	2.218
4.0	0.453	0.444	0.454	2.498	2.368	2.524	2.371
4.8	0.437	0.432	0.435	2.530	2.462	2.548	2.410
6.4	0.422	0.413	0.403	2.450	—	—	2.427

以上より，(5.4) 式，(5.5) 式はそれぞれ次のようになる。

$$\delta(\mathrm{M})=k_1(\lambda I)^{0.14} \text{ または } \frac{\delta(\mathrm{M})}{k_1}=(\lambda I)^{0.14} \cdots\cdots (5.\ 6)$$

$$\delta(\mathrm{M})=\frac{k_2}{\sqrt[4]{E}} \text{ または } \frac{\delta(\mathrm{M})}{k_2}=\frac{1}{\sqrt[4]{E}} \cdots\cdots (5.\ 7)$$

Fig. 5.5, Fig. 5.6 に上のそれぞれの実験式曲線に対する実験値のプロット図を示すが，$\delta(\mathrm{M})/k_1$, $\delta(\mathrm{M})/k_2$ を用いて曲線を1本にまとめてある。

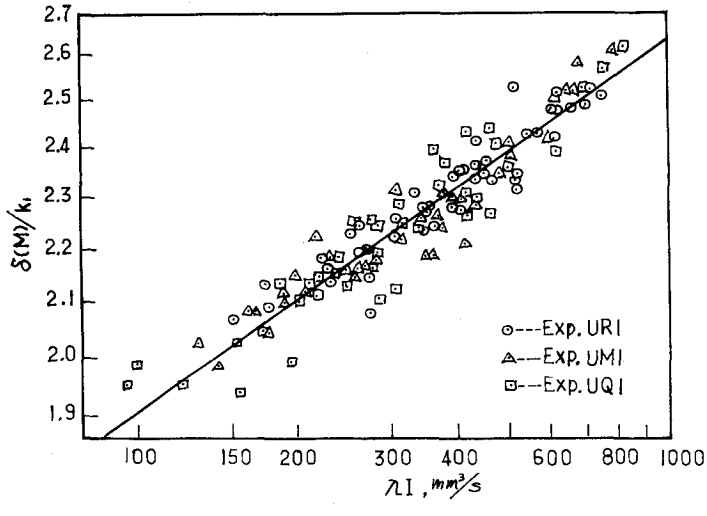


Fig. 5-5 A plot of experimental data on the curve $\delta(\mathrm{M})/k_1=(\lambda I)^{0.14}$

次に，(5.6)式と (5.7) 式を組合わせて (5.3) 式の形にまとめると，

$$\delta(\mathrm{M})=\frac{C(\lambda I)^{0.14}}{\sqrt[4]{E}} \cdots\cdots (5.\ 8)$$

この場合係数 C は，

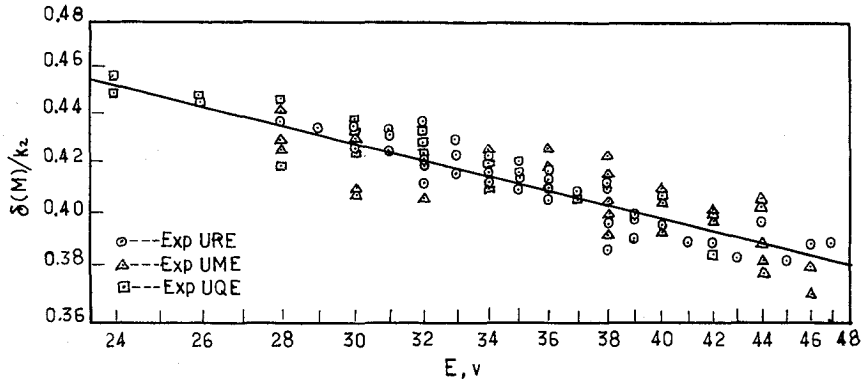


Fig. 5-6 A plot of experimental data on the curve $\delta(M)/k_2=1/\sqrt[4]{E}$

(5.4) 式から　$C=k_1\sqrt[4]{E_C}\equiv C_1$

(5.5) 式から　$C=\dfrac{k_2}{(\lambda I)_C^{0.14}}\equiv C_2$

そして，当然 $C_1=C_2=C$ でなければならない。この C_1，C_2 をそれぞれ E-Ser.，I-Ser. 実験値より算出してみた結果，Fig. 5.7 に示すように C_1 と C_2 はほぼ等しく，かつ ϕ に応じて規則的に変化し，だいたい1本の曲線に沿っている。（注：2.4ϕ に関しては *URE*, *UME*, *UQE* それぞれの C_1 の値がややばらつきが大きかったので3点に分けてプロットしてある）

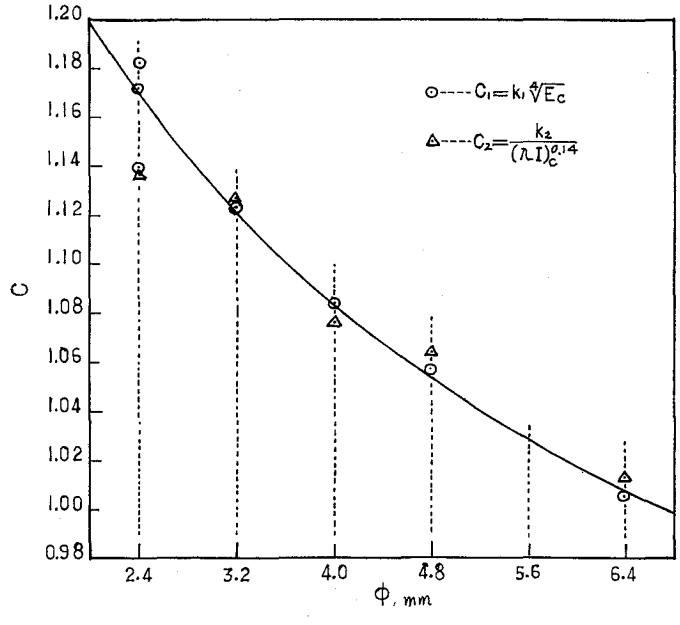


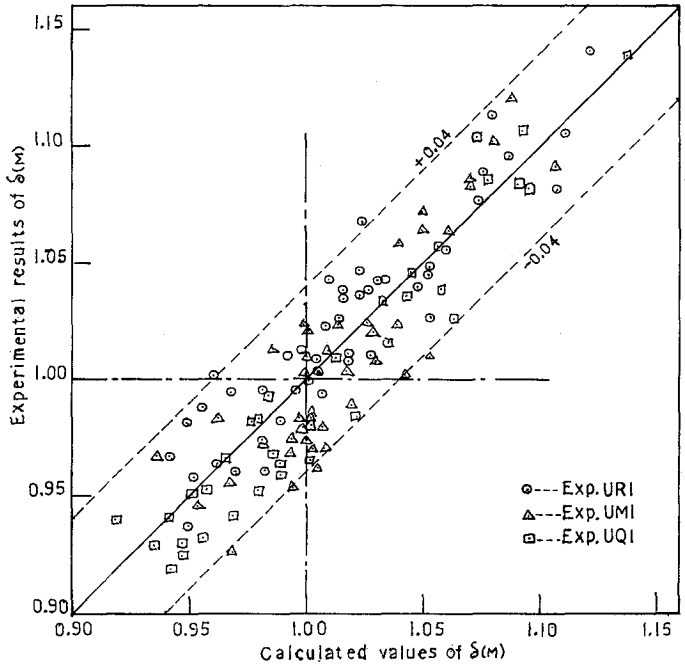
Fig. 5-7 A plot of experimental data C_1 and C_2 on the curve $C=4/3\phi^{0.15}$

そこで，この C と ϕ の関係を求めて次式を得た。

$$C=\frac{4}{3\phi^{0.15}} \quad \cdots\cdots (5.9)$$

このCの式を (5.8) 式に代入すると，δ(M) の実験式が次のように与えられる。

$$\delta(\mathrm{M})=\frac{4(\lambda I)^{0.14}}{3\phi^{0.15}\sqrt[4]{E}} \quad \cdots\cdots (5.10)$$



Note: Experimental value of $\delta(\mathrm{M})=d(\mathrm{M})/d(\mathrm{S})$
Calculated value of $\delta(\mathrm{M})=4(\lambda I)^{0.14}/3\phi^{0.15}\sqrt[4]{E}$

Fig. 5-8 A plot of experimental results vs. calculated values of δ(M)

実験データにより (5.10) 式の計算値を求め，これと δ(M) の実験値 d(M)/d(S) との比較プロットを Fig. 5.8 に示す。実験値のばらつきはほぼ ±0.04 の範囲に収まっているが，これも先に第4章で (4.16) 式に関して述べた H の場合と同様，δ(M) の値はその性質上実験値としてばらつきが大きくなりがちである。したがって，計算値に対する実験値の標準偏差 σ を求めた結果，

$$\sigma=0.0215\fallingdotseq 0.02$$

が得られたので，この σ をもって δ(M) の許容変動範囲とすれば，

$$\delta(\mathrm{M})=\frac{4(\lambda I)^{0.14}}{3\phi^{0.15}\sqrt[4]{E}}\pm 0.02 \quad \cdots\cdots (5.11)$$

d(M) と d(S) が一致する場合，つまり δ(M)=1 はすみ肉溶接の溶込み断面形状が正常であるための条件であるが，いま δ(M)=1 のとき $E\equiv E_0$ とすると，(5.8) 式あるいは (5.10) 式より

$$\frac{C(\lambda I)^{0.14}}{\sqrt[4]{E_{\circ}}}=1 \qquad \therefore \quad E_{\circ}=C^4(\lambda I)^{0.56}=\frac{3.16(\lambda I)^{0.56}}{\phi^{0.6}} \quad \cdots\cdots(5.12)$$

この（5.12）式は，すみ肉溶接が正常な溶込み断面形状をなす場合のアーク電圧 $E_{\circ}$ を与える式である。ϕ と L が与えられると上式は I のみの関数となるから，その場合この $E_{\circ}$ は任意の溶接電流 I に対する標準（適正）アーク電圧となる。なお，（5.11）式で与えた変動範囲を考慮すると，

$$E_{\circ}=(1\pm0.08)C^4(\lambda I)^{0.56}=(2.9\sim3.4)\cdot\frac{(\lambda I)^{0.56}}{\phi^{0.6}} \quad \cdots\cdots(5.13)$$

（5.12）式がアーク電圧 E の標準値で，（5.13）式がその許容変動範囲を与える。

溶込み形状を規制する δ(M) に関しては，V の影響はほとんど無視できることが確認されたが，すみ肉溶接の表面形状（凹形，凸形）に対しては V の影響がきわめて重要で，第4章の（4.18）式で与えられる標準溶接条件には V を含んでいる。

5. 4 溶込み代表量 d の実験式，溶込み深さ p の算定

溶込み代表量 d に関しては，先に（5. 2）式によって $d=d(\mathrm{S})\cdot\delta(\mathrm{M})$ の関係が与えられたが，このうち δ(M) については，（5.10）式によってその実験式が溶接条件の関数として与えられた。したがって，d(S) を溶接条件の関数として表わせば d の実験式が定まり，任意の溶接

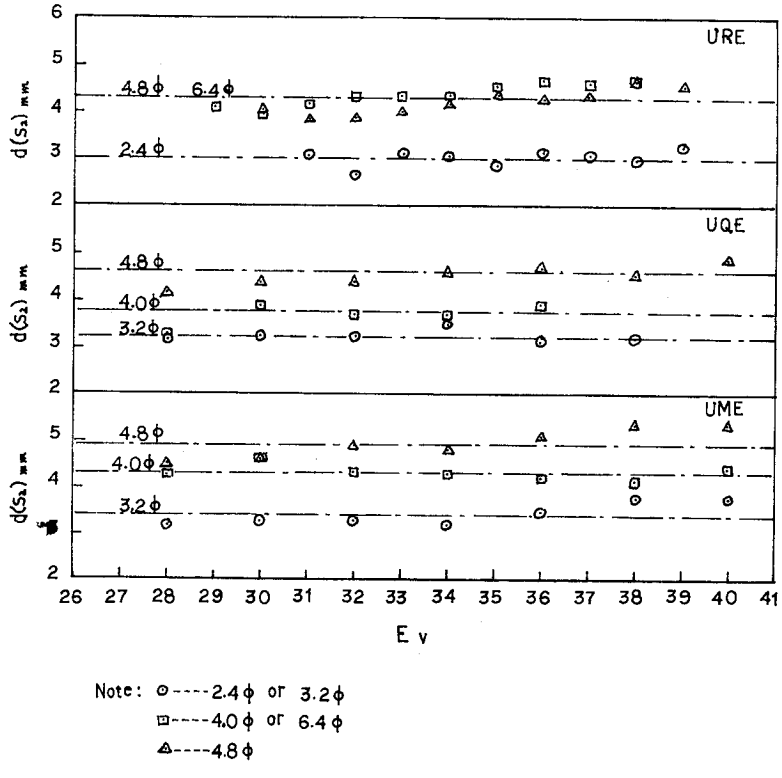


Fig. 5-9 Experimental results of the effect of arc voltage E on fusion penetration $d(S_2)$

条件からdを算出することができる。

いま（2.22）式から　$d(\mathrm{S})=\sqrt{d(\mathrm{S}_1)^2+d(\mathrm{S}_2)^2}$

ここで，$d(\mathrm{S}_1)=\sqrt{S_1/\pi}$，$S_1=\lambda I/V$ の関係があるから，上式の中 $d(\mathrm{S}_1)$ の実験式は直ちに次のごとく定まる。

$$d(\mathrm{S}_1)=\sqrt{\frac{\lambda I}{\pi V}} \quad \cdots\cdots(5.14)$$

したがって，ここでは実験値のデータにより d（S_2）と溶接条件の関係を検討した。その結果，電流値Iと溶接速度Vに関しては $d(\mathrm{S}_2)$ に対しかなり規則的な変化が見られたが，アーク電圧Eに関しては Fig. 5.9 に例示してあるようにあまり規則的な変化は認められなかった。

そこで，$d(\mathrm{S}_2)$ と溶接条件の関係を次式のように仮定した。

$$d(\mathrm{S}_2)=\alpha(\lambda I)^n V^m \quad \cdots\cdots(5.15)$$

I-Ser. 実験では ϕ ごとに V が一定なので $V\equiv V_C$

V-Ser. 実験では ϕ ごとに λI が一定なので $\lambda I\equiv(\lambda I)_c$

として表わせば，(5.15) 式は次のように二つの式に分けられる。

$$d(\mathrm{S}_2)=\alpha V_c{}^m(\lambda I)^n=a(\lambda I)^n \quad ただし \quad a=\alpha V_c{}^m \quad \cdots\cdots(5.16)$$

$$d(\mathrm{S}_2)=\alpha(\lambda I)_c{}^n V^m=bV^m \quad ただし \quad b=\alpha(\lambda I)_c{}^n \quad \cdots\cdots(5.17)$$

そして係数 α に関しては次の関係がある。

$$\alpha=\frac{a}{V_c{}^m}=\frac{b}{(\lambda I)_c{}^n} \quad \cdots\cdots(5.18)$$

I-Ser. 実験のデータから (5.16) 式の n と a，V-Ser. 実験のデータから (5.17) 式のmとbを求め次の結果が得られた。

指数n，mについてはほぼ共通した値となり，その平均値として次のように求められた。

$n=0.819\fallingdotseq 0.8$　　$m=-0.369\fallingdotseq -0.4$

係数aとbは，V_c，$(\lambda I)_c$ が実験 Code および電極径 ϕ ごとに異なる値なので，当然それに応じた変化をなす定数として求められた。表にして示す。

	$a\times10^2$			b		
ϕ	URI	UMI	UQI	URV	UMV	UQV
2.4	3.732	4.826	4.066	5.563	5.487	5.485
3.2	3.658	3.950	4.019	7.383	7.478	7.217
4.0	3.686	4.200	3.816	9.850	9.845	10.209
4.8	3.566	4.309	3.777	12.155	10.196	12.958
6.4	3.222	3.333	3.620	14.153	14.118	15.669

以上より，(5.16)，(5.17) 式はそれぞれ次のようになる。

$$d(\mathrm{S}_2)=a(\lambda I)^{0.8} \quad または \quad \frac{d(\mathrm{S}_2)}{a}=(\lambda I)^{0.8} \quad \cdots\cdots(5.19)$$

$$d(\mathrm{S}_2)=\frac{b}{V^{0.4}} \quad または \quad \frac{d(\mathrm{S}_2)}{b}=\frac{1}{V^{0.4}} \quad \cdots\cdots(5.20)$$

Fig. 5.10, Fig. 5.11 に上記それぞれの実験式曲線に対する実験値のプロット図を示すが，$d(S_2)/a$, $d(S_2)/b$ を用いて曲線をそれぞれ1本にまとめた。

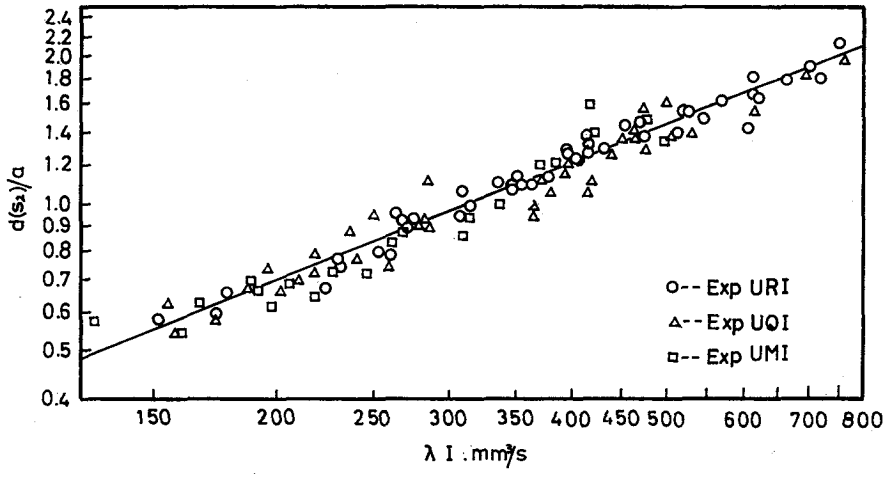


Fig. 5-10 A plot of experimental results on the curve $d(S_2)=a(\lambda I)^{0.8}$

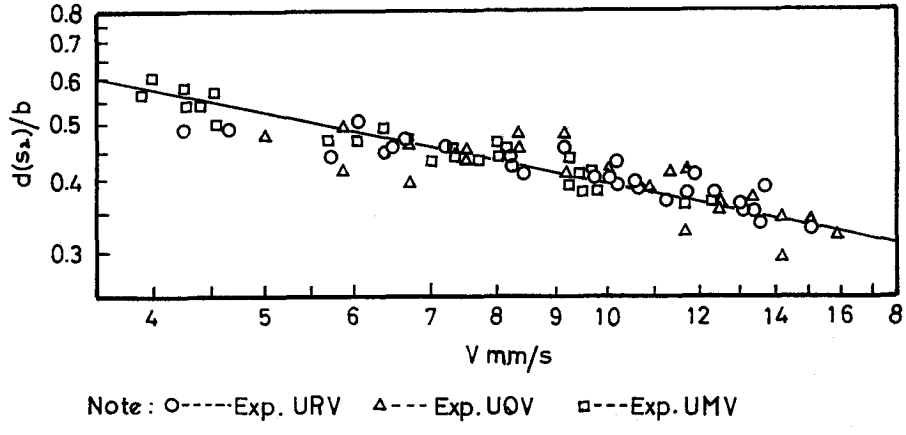


Fig. 5-11 A plot of experimental results on the curve $d(S_2)=b/V^{0.4}$

次に，(5.19) 式と(5.20) 式を組合わせて (5.15) 式の形にまとめると，

$$d(S_2)=\alpha\left(\frac{\lambda I}{\sqrt{V}}\right)^{0.8} \quad \cdots\cdots(5.21)$$

そして，係数 α は (5.18) 式から

$$\alpha_1=\frac{a}{V_c^{0.4}} \qquad \alpha_2=b(\lambda I)_c^{0.8} \qquad \alpha=\frac{\alpha_1+\alpha_2}{2}$$

として次のような結果が得られた。

UR実験	ϕ	$\alpha_1\times10^2$	$\alpha_2\times10^2$	$\alpha\times10^2$
	2.4	8.216	8.745	8.481
	3.2	8.557	8.383	8.470
	4.0	8.851	8.628	8.740
	4.8	8.764	8.448	8.606
	6.4	8.363	8.199	8.281

平均値＝8.516　∴　$\alpha=0.085$

UM実験	ϕ	$\alpha_1\times10^2$	$\alpha_2\times10^2$	$\alpha\times10^2$
	2.4	8.523	7.845	8.184
	3.2	8.134	9.650	8.892
	4.0	9.149	9.256	9.202
	4.8	9.560	8.123	8.841
	6.4	9.120	8.640	8.880

平均値＝8.800　∴　$\alpha=0.088$

UQ実験	ϕ	$\alpha_1\times10^2$	$\alpha_2\times10^2$	$\alpha\times10^2$
	2.4	9.863	9.603	9.733
	3.2	10.096	9.209	9.653
	4.0	9.897	9.912	9.904
	4.8	10.090	9.688	9.889
	6.4	9.941	9.735	9.838

平均値＝9.803　∴　$\alpha=0.098$

この係数αは，先に第4章で求めた溶着係数γと同様に，同一 Code の実験ではほぼ一定値を示しており，電極材料や電源種別（AC，DC）の異なる他の Code の実験とは明らかに異なった値となっている。また，極性効果も明らかに現われ，γの場合とは逆に，直流正極性で行なったUQ実験のαは他の交流実験のものに比し著しく大である。この傾向は第6章に示す実用溶接の結果においても認められ，交流で$\alpha=0.091$，直流で$\alpha=0.107$という値が得られている。（第6章 6.3）

このαもγと同じく一種の材料定数と考えられるが，γの溶着係数に対応して**溶込み係数**（Coefficient of fusion penetration）と呼ぶことにする。この溶込み係数αは電極材料や母材の種類によって変わるばかりでなく，極性によって大きな差異があるから，あらかじめ試験溶接を行なってその値を確認しておく必要があろう。この場合のαの算定式は，

$d(\mathrm{s}_2)$ の実験値＝$\sqrt{S_2/\pi}$　　λの実験値＝$\lambda(\mathrm{s})=\sqrt{S_1V/I}$

を用い，(5.21) 式より

$$\alpha=\frac{\sqrt{S_2/\pi}}{(\lambda(\mathrm{s})\cdot I/\sqrt{V})^{0.8}}=\sqrt{\frac{S_2}{\pi S_1{}^{1.6}V^{0.8}}} \quad\cdots\cdots(5.22)$$

で与えられる。したがって，先に第4章4.4の付記で述べたγの試験溶接において，さらに溶込み断面積 $S_2(mm^2)$ を実測しておけば，γと同時に (5.22) 式によってαの値を求めることができる。

以上により，(2.22) 式にしたがって (5.14) 式と，(5.21) 式を組合わせると，αを材料定数として次のように $d(\mathrm{S})$ の実験式が定まる。

$$d(\mathrm{S})=\sqrt{\frac{\lambda I}{\pi V}+\alpha^2\left(\frac{\lambda I}{\sqrt{V}}\right)^{1.6}}\ mm \quad \cdots\cdots(5.23)$$

Fig. 5.12 に，上式から算出した $d(\mathrm{S})$ の計算値とその実験値の比較プロット図を示す。実験値はSの実測値により $d(\mathrm{S})=\sqrt{S/\pi}$ から求めたものである。両者の偏差を計算した結果，標準偏差0.26mm，平均相対誤差5.4%が得られた。なお，Fig. 5.13 に $d(\mathrm{S})$ に対するEの影響を示すが，規則的な変化はほとんど認められない。

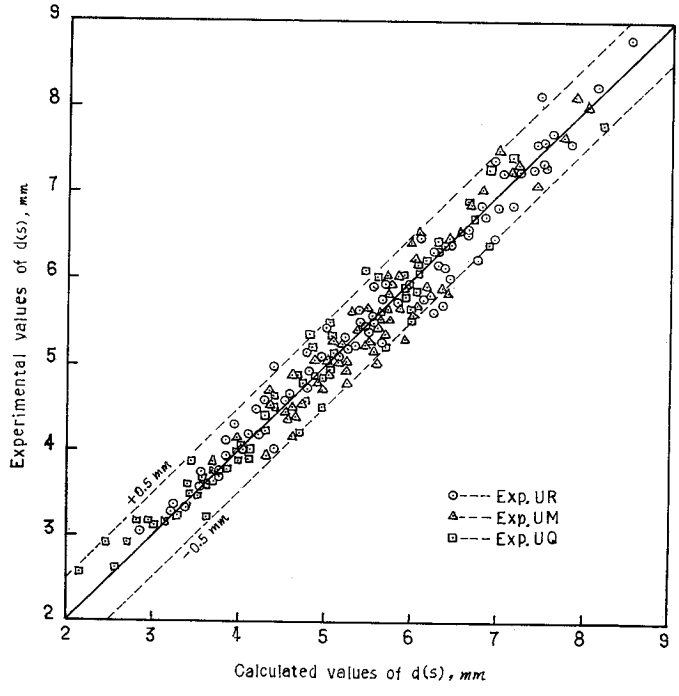


Fig. 5-12 Aplot of experimental values vs. calculated values of theoretical fusion penetration d(S)

溶込み深さpの算定は，

$$(2.17)\ 式 \quad p=h\cdot\frac{(2d/h)^4-1}{(2d/h)^4+1}\ mm$$

によるのであるが，この式のdは(5.23)式の $d(\mathrm{S})$ と(5.10)式の $\delta(\mathrm{M})$ から $d=d(\mathrm{S})\cdot\delta(\mathrm{M})$ によって求められ，hは(4.8)式によって算出される。この場合，dおよびhはいずれも溶接条件の関数として与えられるから，溶込み深さpが任意の溶接条件によって算定されるわけで

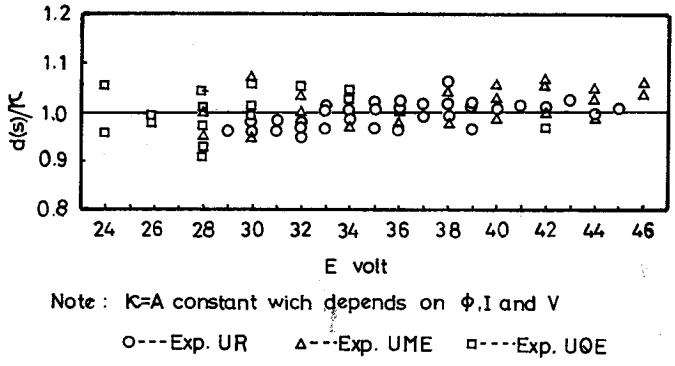


Fig. 5-13 Experimental results of the effect of arc voltage E on fusion penetration d(S)

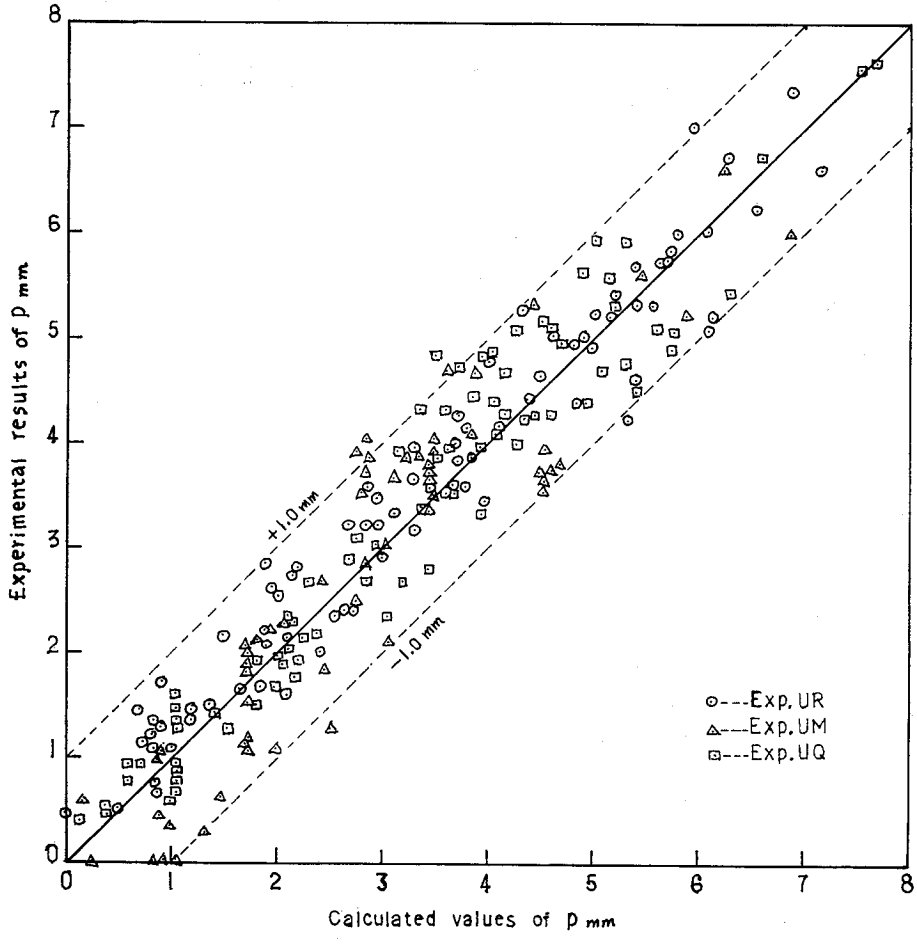


Fig. 5-14 A plot of experimental results vs. calculated values of effective fusion penetration p

ある。すべての実溶接条件についてpを算出し，pの実則値との比較プロットを行なった結果をFig. 5.14 に示す。この溶込み深さpの算定式には，本研究で求められたほとんどの実験式が包含されているから，結局これらの実験式の実用性に対する綜合確認プロットと考えてよいであろう。計算値に対する実測値のばらつきはほぼ±1 ㎜の範囲内に収まっているが，その標準偏差を求めてみた結果0.54㎜であった。

なお，実用上直接必要ないが，pと同様断面形状を半楕円として導かれた

(2.16) 式 $\bar{d}=\frac{h}{2}\left\{\sqrt{\left(\frac{2d}{h}\right)^4+1}-1\right\}$

(2.15) 式 $d_{\circ}=\frac{h}{\sqrt{2}}\left\{\left(\frac{2d}{h}\right)^2-1\right\}$

についても，その信頼性確認資料として参考までに計算値と実測値の比較プロットを行なってみた。その結果をそれぞれFig. 5.15, Fig. 5.16 に示す。$\bar{d}$のプロットのばらつきはpと同様

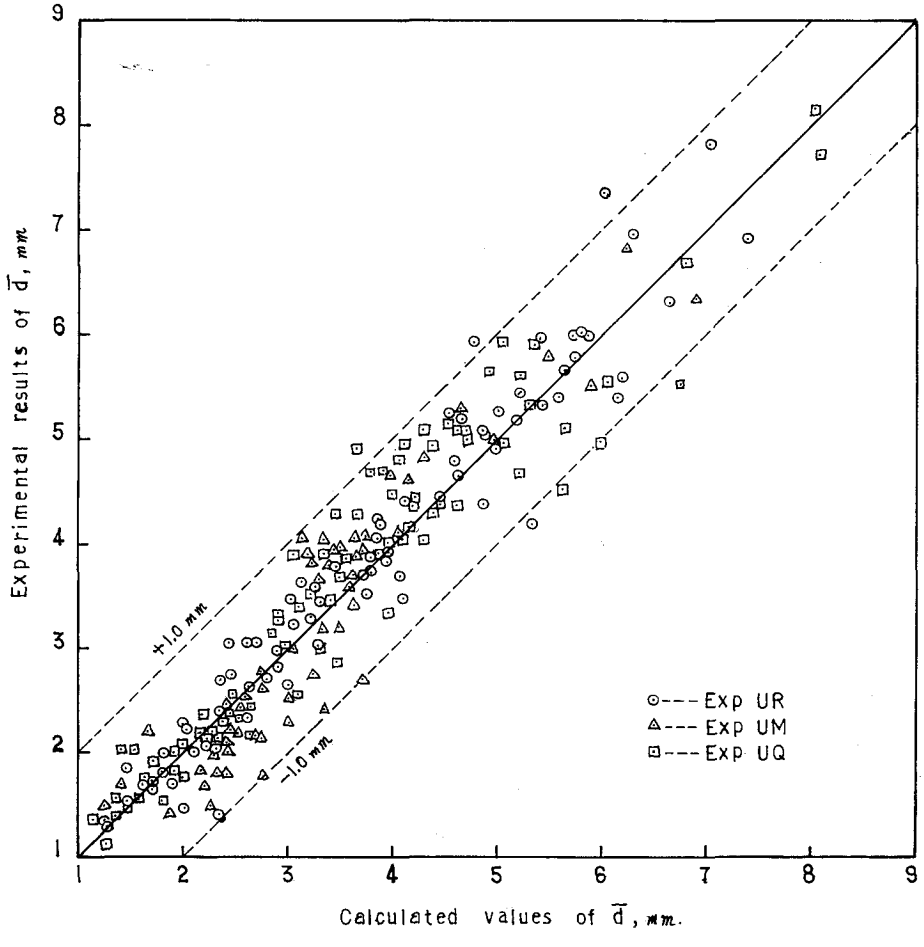


Fig. 5-15 A plot of experimental results vs. calculated values of nominal fusion penetration $\bar{d}$

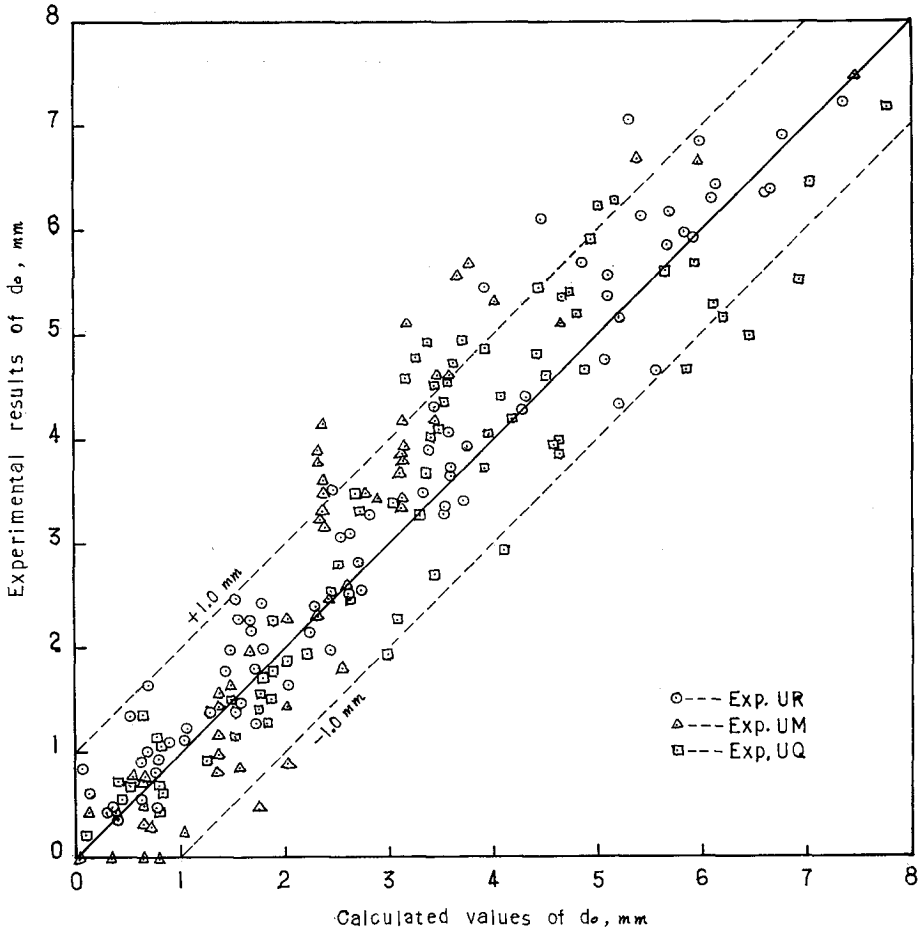


Fig. 5-16 A plot of experimental results vs. calculated values of root fusion penetration d_0

ほぼ±1 mmの範囲に収まっているが，それに比べd_0はばらつきがかなり大きい。これは，δ(M)の値により溶込み形状の変化が最も大きく現われるのはd_0であるから当然であろう。

5. 5 結　　言

第2章において与えたごとく，すみ肉溶接の断面形状が正しい半楕円をなすと仮定すれば，溶込み深さpは溶込み代表量dと公様脚長hとの関数として次式で表わされる。

$$p=h\cdot\frac{(2d/h)^4-1)}{(2d/h)^4+1)}$$

しかし，実際の断面形状は必ずしも正常な半楕円ではないので，その実際の断面積から算出される溶込み代表量d(S)と，上式の溶込み代表量dとは必ずしも一致しない。そこで，本章ではこの誤差を補正するため溶込みに関する形状係数δ(M)を設定し，

$$d=d(\mathrm{S})\cdot\delta(\mathrm{M})$$

なる関係を導き出した。

そして，実験溶接のデータにより，次のように $d(\mathrm{S})$ および $\delta(\mathrm{M})$ の実験式が溶接条件の関数として求められた。

$$d(\mathrm{S})=\sqrt{\frac{\lambda I}{\pi V}+\alpha^2\left(\frac{\lambda I}{\sqrt{V}}\right)^{1.6}}$$

$$\delta(\mathrm{M})=\frac{4(\lambda I)^{0.14}}{3\phi^{0.15}\sqrt[4]{E}}$$

$d(\mathrm{S})$ の式の α は溶込み係数と名付けた一種の材料定数で，使用材料ごとに試験溶接を行なって確認する必要があるが，軟鋼の交流溶接ではだいたい $\alpha=0.08\sim0.09$ の範囲であった。

また，$\delta(\mathrm{M})=1$ は，溶込み断面形状が正常な半楕円をなすという条件であるから，このときのアーク電圧を $E_{\circ}$ として次のような標準アーク電圧 $E_{\circ}$ の算定式を求めた。

$$E_{\circ}=\frac{3.16(\lambda I)^{0.56}}{\phi^{0.6}}$$

アーク電圧としてこの値を用うれば，当然 $d=d(\mathrm{S})$ である。

以上の各式ならびに前章で求めた脚長 h の式により，溶込み深さ p が任意の溶接条件から算出できる。実験溶接のすべてのデータを用いて p の計算値と実則値の比較を行なった結果，そのばらつきはほぼ ±1 ㎜ 以内に収まり，標準偏差は 0.54㎜ であつた。こ程度の溶込みの変動は，実用的には問題ないと思われる。

第6章　提案した諸実験式の船体縦通材等実用溶接への適用

6. 1　緒　　言

第4章，第5章において，すみ肉溶接の脚長および溶込みと溶接条件の関係を与える実験式を求め，さらに正常なすみ肉溶接断面形状を得るための溶接条件実験式を定めたが，これらの諸実験式に対しては，その再現性，実用性を確認しておく必要がある。

そこで，これらの実験式を利用して実際に施工された実用溶接の資料をできるだけ広範に渉って収集し，各溶接試験片の断面を採取してその実測値を求めた。そして得られた実測値を各実験式による計算値と比較してその実用性を検討したわけである。

利用した実用溶接はすべてサブマージアーク溶接によるもので，主として交流溶接による船体縦通材の資料であるが，なお直流溶接による各種溶接構造の資料も含まれており，さらに第1章の引張試験に使用したすみ肉溶接十字継手試験片の資料も加えた。

6. 2　適用した実用溶接

実験式の実用性確認のために適用した実用溶接は Table 6-1 に示すように3グループに大別される。本研究では便宜上UK，UF，UPの Code に類別して整理した。いずれもサブマージアーク溶接法による軟鋼材の下向単層すみ肉溶接で Code UP のみ直流正極性を用いたもの，他はすべて交流溶接である。

Table 6-1　Series of practical welding UK, UF and UP

Code	Series	ϕ mm	L mm	I A	E v	V cm/min	Data
UK (AC)	A-Ser.	2.4	30	300---500	28---34	25	4
		3.2	30	400---800	30---38	30	5
		4.0	40	400---900	30---38	42.5	6
		4.8	40	500--1080	30---41	38.5	7
		6.4	40	700--1100	28---37	42	5
	B-Ser.	2.4	30	300---500	27---32	39	4
		3.2	30	400---800	29---38	44	5
		4.0	40	400---900	30---38	54	6
		4.8	40	500--1060	30---40	54	7
		6.4	40	700--1100	29---38	58	5
UF (AC)	A-Ser.	3.2	30	290---590	24---30	63.6	4
		3.2	30	540---670	32---36	44.6	3
		4.8	35	610---950	28---34	75	4
		4.8	35	860--1010	36---40	56.7	3
	B-Ser.	3.2	30	290---590	24---30	62	4
		3.2	30	540---670	32---36	46.8	3
		4.8	35	610---950	28---34	73	4
		4.8	35	860--1010	36---40	55.5	3
UP (DC)	I-Ser.	3.2	30	300---700	31	60	5
		4.0	30	400---850	30	65	10
		4.8	30	500---950	32	70	10
	V-Ser.	3.2	30	500	31	40---80	5
		4.0	30	650	30	40---85	10
		4.8	30	750	32	45---90	10

Code UK の溶接は主として船体縦通材フランジの溶接で，その他トランスバース構造なども一部含まれている。作業能率も考慮に入れて最適溶接条件を選定するために行なった実用実験溶接で，溶接条件は本研究提案の諸実験式を利用してかなり広い範囲に選ばれている。実船には板厚に応じ，その中から最適条件を選び出して適用したわけであるが，本章における実験式の実用性確認には，これらの資料のすべてを利用した。A-Series と B-Series の2系統に分れているのは，溶接速度によって類別したので，B-Ser. が比較的高速の溶接である。使用電極材はすべて同一銘柄のもので，ワイヤ KW-43 とフラックス KB-8 の組合わせを用いている。

Code UF の溶接は，本論文第1節の UF 実験で使用したすみ肉溶接十字継手を作製するために行ったすみ肉溶接である。電極径は3.2㎜と4.8㎜の2種類を用い，脚長 h と有効溶込み p の値がほぼ段階的に得られるように溶接条件を選んだのであるが，その算定はすべて本研究で求められた実験式を利用したわけである。A-Series と B-Series は全く同一溶接条件で施工したものであるが，溶接速度の設定値と実際の値に多少の変動があったので，Table にはそれぞれ実測値が示してある。使用電極材料は Code UK のものと同一銘柄のものである。

Code UP の溶接は，各種の産業機械構造および機械台構造の溶接で，Code UK と同様，本研究提案の諸実験式を利用し最適溶接条件を選定するために行なった実用実験溶接である。ただし，直流溶接の資料としてとくに直流正極性で行なったもののみを選んだが，これには Table に示すとうり，電極径 3.2，4.0，4.8㎜について電流値を変化させた I-Series と溶接速度を変化させた V-Series がある。この溶接条件の中から作業能率も含めて最適条件を選び，板厚に応じてそのまま実際の溶接に使用したわけであるが，本章における実験式の実用性確認には，これら直流溶接の資料をすべて利用した。使用電極材料は，ワイヤ Y-D，フラックス YF-15 の組合せである。

以上の UK, UF, UP 各実用溶接の実験方法，試験片の寸法等は，実施工場が異なるので多少の相異はあるが，第3章3.2で述べてある本研究の実験方法とほぼ同じ要領で行なっている。ただし，試験片の板厚は対象構造物に応じて各種の寸法のものが使用されており，だいたい電流値により12～25㎜の範囲である。（UF 実験の試験片については第1章の Fig. 1.3 参照）

いずれも同一溶接ビードから3個以上の断面を採取して，倍率4のマクロ腐食断面写真を作成，各部断面積，脚長，溶込み深さ等の実測値を求めた上，各溶接ビードごとにその平均値をとり1データとした。データの数（試験ビード数）は総計132である。

6. 3 実用溶接の諸実測値データ

倍率4のマクロ断面写真により，次のような諸実測値データを求めた。

溶接部の各部断面積 S，S_1，S_2

溶接速度 λ(s)

脚長 ha，h(s)

公称のど厚 a (Code UF のみ)

溶込み深さ d_o, $\bar{d}$, p

これらのデータはすべて溶接条件 I, V, E とともに Table 6.2 (UK), Table 6.3 (UF), Table 6.4 (UP) として本章末尾にまとめてある。

6. 4 実験式計算値と実用溶接実測値の比較

まず，次の各式によって Code 別に溶着係数 γ と溶込み係数 α を求めた。

(4. 3) 式 $\lambda_e = A_e I^{1.22} + B_e$

(4. 5) 式 $\xi(\mathrm{S}) = \dfrac{\lambda(\mathrm{S})}{\lambda_e}$

(4. 9) 式 $\gamma = \xi(\mathrm{S})(L/\phi)^{0.2}$

(5.22) 式 $\alpha = \sqrt{\dfrac{S_2}{\pi S_1^{1.6} V^{0.8}}}$

その結果は次のとうりである。

Code	ϕ	L/ϕ	$\xi(\mathrm{S})$	γ	α
UK	2.4	12.500	1.106	1.833	0.0905
(AC)	3.2	9.375	1.195	1.870	0.0928
	4.0	10.000	1.194	1.892	0.0912
	4.8	8.333	1.210	1.849	0.0896
	6.4	6.250	1.239	1.789	0.0932
	平均			1.846	0.0914
				$\gamma=1.85$	$\alpha=0.091$
UF	3.2	9.375	1.147	1.795	0.0935
(AC)	4.8	7.292	1.250	1.860	0.0887
	平均			1.828	0.0911
				$\gamma=1.83$	$\alpha=0.091$
UP	3.2	9.375	1.066	1.668	0.1076
($DCSP$)	4.0	7.500	1.101	1.648	0.1173
	4.8	6.250	1.109	1.600	0.0971
	平均			1.639	0.1073
				$\gamma=1.64$	$\alpha=0.107$

UK と UF は同一銘柄の電極材料を用いているため，γ, α ともほとんど同じ値を示している。UP は電極材料の相異もあるが明らかに直流による極性効果が現われている。

次に，単位電流当りの溶着速度 λ の実験式として

(4.7) 式 $\lambda = \dfrac{\gamma}{(L/\phi)^{0.2}} \cdot (A_e I^{1.22} + B_e)$

が与えられているが，上に求めた γ を用い上式より Ser. No. ごとに溶着速度 λ mm^3/S を計算

し，対応する実測値 $\lambda(\mathrm{S})\cdot I$ と比較プロットした結果を Fig. 6.1 に示す。プロットはほぼ±50mm³/s 以内に収まっており標準偏差約7％が得られた。この程度の偏差であれば溶着速度 λ の実験式は十分実用性があるとしてよいであろう。

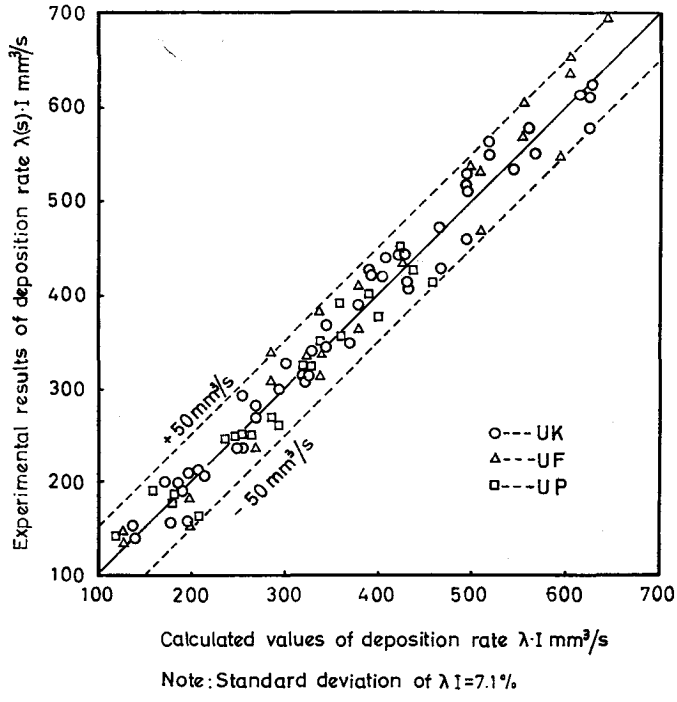


Fig. 6-1 A plot of experimental results vs. calculated values of deposition rate λ I (UK, UF, UP)

以上求められた α と γ を用い，

(5.23) 式 $d(\mathrm{S})=\sqrt{\dfrac{\lambda I}{\pi V}+\alpha^2\left(\dfrac{\lambda I}{\sqrt{V}}\right)^{1.6}}$

(5.10) 式 $\delta(\mathrm{M})=\dfrac{4(\lambda I)^{0.14}}{3\rho^{0.15}\sqrt[4]{E}}$

から Ser. No. ごとに $d(\mathrm{S})$ と $\delta(\mathrm{M})$ を計算すれば

(5. 2) 式 $d=d(\mathrm{S})\cdot\delta(\mathrm{M})$

より d の計算値が求められ，同じく

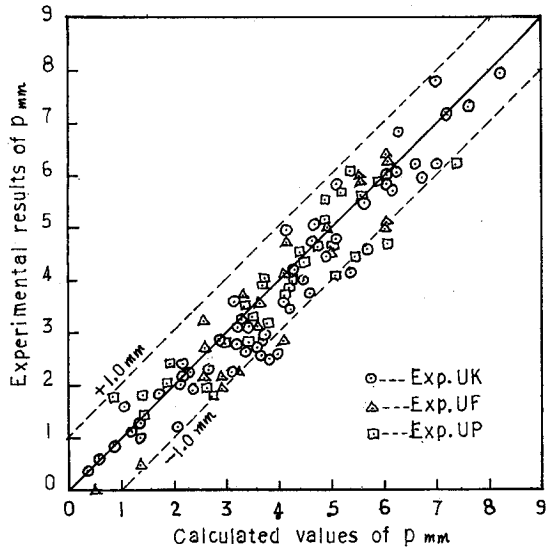
(4. 8) 式 $h=\sqrt{\dfrac{\lambda I}{V}}$

より h の計算値が得られる。したがって，これらの計算値 d，h を用いて

(2. 7) 式 $p=h\cdot\dfrac{(2d/h)^4-1}{(2d/h)^4+1}$

より，溶込み深さ p の計算値が算出される。Fig. 6.2 にこの p の計算値と，対応する実測値の比較プロットを示すが，計算値に対する実測値のばらつきはほぼ±1mmの範囲にあり，標準偏

差0.58㎜が得られた。この程度の偏差であれば，d(S)，δ(M) の実験式を含めてこの溶込み深さpの算定式は充分実用性があるものと考えてよいであろう。



Note: Standard deviation of p= 0.58 mm

Fig. 6-2 A plot of experimental results vs. calculated values of effective fusion penetration p (UK, UF and UP)

6. 5 *UF* 実験用引張試験片作製による諸実験式の実用性確認

Code *UF* の溶接は，第1章で述べた *UF* 実験の引張試験を行なうためのものであるから，脚長hと溶込み深さpの大きさが段階的に得られる必要がある。そのため，あらかじめhとpの値を設定し，その寸法のすみ肉溶接が得られるように本研究で提案した諸実験式を利用して溶接条件を定めたわけである。

したがって，その溶接結果は提案した諸実験式の再現性を確認する資料ともなるので，各寸法の設定値（h_o，p_o）と得られた溶接部の実測値（h，p）を比較して Table 6.5, Table 6.6 に示す。ここで(A)，(B)の区別は，T継手両側の溶接 A-Ser. と B-Ser. で同一溶接条件によるもの，(M)はその平均値である。設定値に対する実測値の標準偏差は，hが0.22㎜，pが0.19㎜であった。

Table 6.5 に示した脚長の実測値hはすべて平形すみ肉と仮定した場合の脚長で，実測値$h=h(\mathrm{S})=\sqrt{2S_1}$ であるが，公称のど厚aから求めた脚長を $h(a)$ とすると $h(a)=\sqrt{2}a$ であるから $h(s)\fallingdotseq h(a)$ であればほぼ平形すみ肉であることを示す。Table 6.7 に，この $h(s)$ と $h(a)$ の比較を Ser. No. ごとに示すが，いずれもその差は微小で，$h(a)$ に対する $h(s)$ の標準偏差は0.21㎜であった。したがって，*UF* 実験の溶接はだいたい平形すみ肉と考えてよいであろう。なお，第1章 Table 1.2 に示した脚長hは Table 6.7 に示す（A）$h(a)$ と（B）$h(a)$ の平均

値である。

以上の結果から，脚長h，溶込み深さpともだいたい設定値に近い値が得られ，提案した諸実験式の実用性を確認することができた。

Table 6-5 Required leg length (h_o) and actual leg length (h)

Ser.No	h_o mm	(A)h mm	(B)h mm	(M)h mm
FAB3-1	5.0	5.08	5.20	5.14
" 2	6.0	5.92	5.99	5.95
" 3	7.0	6.92	7.29	7.11
" 4	8.0	7.81	8.17	7.99
" 5	9.0	9.11	9.31	9.21
" 6	9.5	9.47	9.43	9.45
" 7	10.0	9.85	10.23	10.04
FAB5-1	7.0	7.21	7.45	7.33
" 2	8.0	8.27	8.32	8.29
" 3	9.0	8.73	9.24	8.99
" 4	10.0	10.45	9.90	10.18
" 5	10.5	10.48	10.58	10.53
" 6	11.0	10.95	11.41	11.18
" 7	11.5	11.54	11.50	11.52

Table 6-6 Required penetration (p_o) and actual penetration (p)

Ser.No	p_o mm	(A)p mm	(B)p mm	(M)p mm
FAB3-1	0	0	0	0
" 2	1.0	0.75	1.00	0.88
" 3	2.0	2.19	2.31	2.25
" 4	3.0	3.25	2.75	3.00
" 5	3.5	3.35	3.58	3.47
" 6	4.0	3.91	3.92	3.92
" 7	4.5	4.78	4.26	4.52
FAB5-1	2.0	2.19	1.97	2.08
" 2	3.0	3.43	2.98	3.20
" 3	4.0	4.38	4.32	4.35
" 4	5.0	5.06	5.13	5.09
" 5	5.5	5.46	5.52	5.49
" 6	6.0	6.04	5.96	6.00
" 7	6.5	6.52	6.35	6.43

Table 6-7 Comparison between h(a) and h(s)

(A)			(B)		
Ser. No	h(a)mm	h(s)mm	Ser. No	h(a)mm	h(s)mm
FA3-1	5.30	5.08	FB3-1	5.30	5.20
" 2	6.19	5.92	" 2	5.66	5.99
" 3	6.72	6.92	" 3	7.07	7.29
" 4	7.78	7.81	" 4	8.49	8.17
" 5	9.02	9.11	" 5	9.02	9.31
" 6	9.37	9.47	" 6	9.19	9.43
" 7	9.72	9.85	" 7	9.90	10.23
FA5-1	7.07	7.21	FB5-1	7.07	7.45
" 2	8.31	8.27	" 2	8.31	8.32
" 3	8.84	8.73	" 3	9.19	9.24
" 4	10.08	10.45	" 4	9.55	9.90
" 5	10.61	10.48	" 5	10.61	10.58
" 6	10.96	10.95	" 6	11.31	11.41
" 7	11.31	11.54	" 7	11.31	11.50

6. 6 断面形状に関する実験式の実用性

すみ肉溶接ビードの形状（凹形，凸形）と溶接条件の関係については

(4.15) 式 $H=K\left(\frac{U}{E}\right)^{2/3}$ ただし $H=\frac{h}{h_a}$, $U=\sqrt{\frac{\lambda I}{V}}$

が求められており，(4.18) 式に示すように $K=3$（標準値），$H=1$ を満足する溶接条件のとき平形すみ肉のいわゆる公称断面形状をなすわけである。実用溶接条件としては，応力集中な

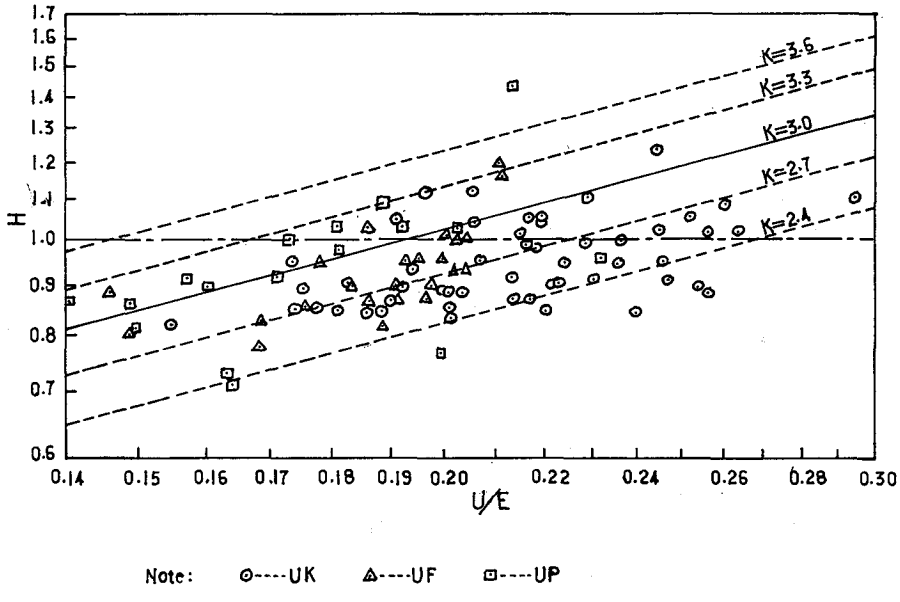


Fig. 6-3 A plot of practical welding data UK, UF and UP on the curve $H=K(U/E)^{2/3}$

どの観点から平形すみ肉よりも軽微な凹形すみ肉が望まれる。つまり，実用的には $H \leq 1$, $K \leq 3$ の範囲で U/E の値を選定したほうがよいわけである。Fig. 6.3 に，実用溶接のデータについて H と U/E の関係をプロットした結果を示すが，概して $H \leq 1$, $K \leq 3$ の範囲に多くプロットされている。

次に，溶込み断面を含めた全溶接部断面の形状を考えてみる。

(4.18) 式から $\dfrac{27\lambda I}{VE^2}=1$

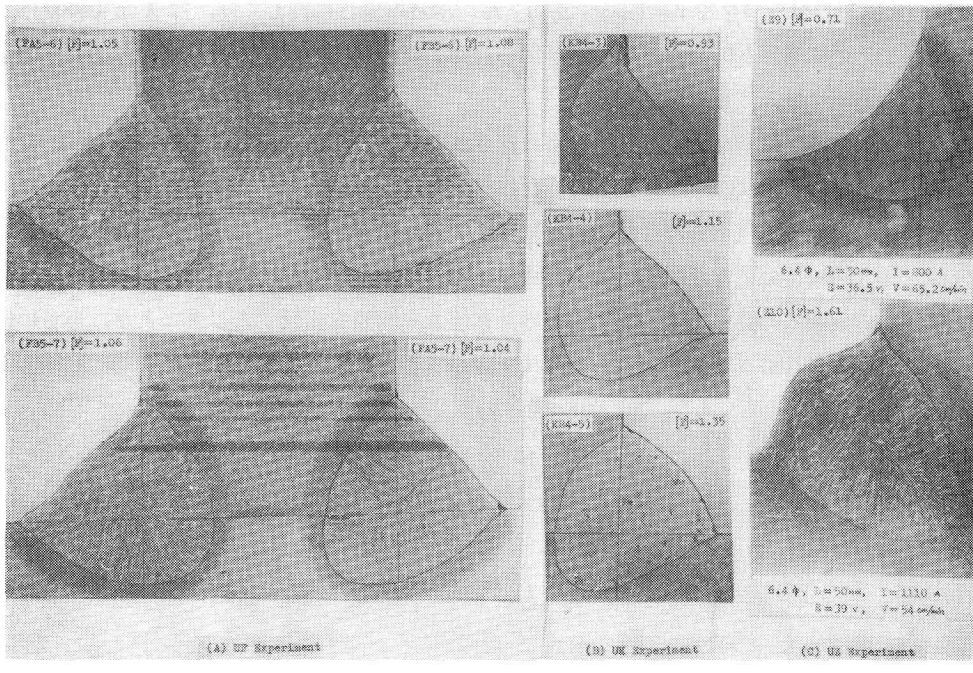


Fig. 6-4 Cross-sectional profiles of fillet welds with regard to [F]-value

は正常な溶着断面形状（平形すみ肉）を得る条件，

(5.10) 式から $\dfrac{4(\lambda I)^{0.14}}{3\beta^{0.15}\sqrt[4]{E}}=1$

は正常な溶込み断面形状（半楕円）を得る条件であるが，この両式の辺々相乗すると，

$$[F] \equiv \left(\frac{27\lambda I}{VE^2}\right)\left(\frac{4(\lambda I)^{0.14}}{3\beta^{0.15}\sqrt[4]{E}}\right)=1$$

上の (4.18) 式，(5.10) 式を満足する溶接条件であれば，この $[F]=1$ の式も満足するであろう。Fig. 6.4 にそれぞれの溶接条件から算出した $[F]$ の値を付記してマクロ断面写真の数例を示す。(A)図は，とくに平形すみ肉で正常な半楕円断面形状になるように溶接条件を選定して行なったUF実験用T継手の例，(B)図は電流値 I を段階的に変化させたUK実験の例である。(C)図は実用溶接の例ではないが，とくに $[F]$ の値が1より過小（Z 9）または過大（Z10）になるように溶接条件を選んで施工した例である。断面形状の良好（ほぼ平形すみ肉

で半楕円）なものほど〔F〕=1 に近い値を示している。なお，第3章において例示した Fig. 3.2 の断面写真例にも，それぞれこの〔F〕の値が付記してある。

6. 7 結　　言

ここでは，本研究において得られた溶接条件に関する諸実験式の実用性を確認するため，船体縦通材をはじめ各種溶接構造物に実際に施工されたすみ肉溶接に対し，これらの実験式を適用してその計算値と実測値を比較した。その結果，まず脚長を定める溶着速度に関しては，±50㎜³/s 以内のばらつきで平均相対誤差約7％，溶込み深さに関しては，ほぼ ±1㎜以内のばらつきでその標準偏差0.58㎜という値が得られた。この程度の誤差であれば，提案した諸実験式は十分実用に供しうるであろう。

また，これらの実験式を用い，数段階に設定された脚長と溶込み深さから溶接条件を求めて，すみ肉溶接の引張試験片（UF実験）を作製したが，標準偏差 0.2㎜ 程度の誤差でほぼ所要寸法のすみ肉溶接が得られ，これら諸実験式の実用性を確認することができた。

なお，すみ肉溶接の正常な断面形状を保持するために提案した，溶接条件諸因子間のバランスを規制する実験式に関しても，実用溶接の計算値と実測値を比較することにより，あるいはそれぞれの溶接条件による溶接部の断面形状を調べることによって，実用的に有効に利用しうることを確認した。

Table 6-2(1) Experimental data of Code UK : welding conditions and cross-sectional areas

ϕ mm	Ser.No	I_A	E_V	V mm/s	S mm²	S_1 mm²	S_2 mm²
2.4	KA2-1	300	28	4.12	62.5	36.6	25.8
	" 2	350	29.5	3.98	121.8	50.2	71.6
	" 3	400	31.5	4.16	91.0	50.8	40.2
	" 4	500	34	4.16	138.5	71.9	66.5
2.4	KB2-1	300	27	6.41	37.1	21.5	15.6
	" 2	350	28	6.52	55.2	23.6	31.5
	" 3	400	29.5	6.52	64.6	31.3	33.3
	" 4	500	32	6.45	112.2	50.6	61.6
3.2	KA3-1	400	30	4.98	74.5	40.1	34.4
	" 2	500	32.5	5.06	92.7	46.3	46.3
	" 3	600	34	5.06	127.6	61.7	65.8
	" 4	700	36.5	5.06	203.8	82.8	121.0
	" 5	800	38.5	5.06	237.5	104.4	133.0
3.2	KB3-1	400	29	6.84	58.0	28.0	30.0
	" 2	500	31	7.18	79.0	32.8	46.2
	" 3	600	33	7.18	108.2	47.1	61.0
	" 4	700	36	7.43	148.3	59.3	88.9
	" 5	800	38	7.43	182.8	68.7	114.0
4.0	KA4-1	400	30	6.92	70.3	30.3	40.0
	" 2	500	31	6.92	91.1	38.5	52.6
	" 3	600	33	6.92	118.2	53.0	65.2
	" 4	700	35	7.24	134.2	61.2	73.0
	" 5	800	37	7.16	202.0	77.0	125.0
	" 6	900	38	7.16	246.0	100.6	145.4
4.0	KB4-1	400	30	9.10	39.7	17.0	22.7
	" 2	500	31	9.10	73.1	30.8	42.2
	" 3	600	33.5	9.10	89.8	37.6	52.2
	" 4	700	36	8.85	134.2	52.7	81.5
	" 5	800	37	8.85	159.1	63.5	95.6
	" 6	900	38	8.89	175.0	60.8	114.1
4.8	KA5-1	500	30	6.44	83.8	45.4	38.4
	" 2	600	32	6.44	103.7	48.7	55.0
	" 3	700	34	6.44	153.1	65.4	87.7
	" 4	800	36	6.44	175.3	73.1	102.1
	" 5	900	38	6.21	224.3	85.8	138.5
	" 6	1000	40	6.21	268.3	99.6	168.6
	" 7	1080	41	6.50	348.7	115.0	233.7
4.8	KB5-1	500	30	9.32	51.1	24.3	26.7
	" 2	600	32	9.32	83.3	33.7	49.5
	" 3	700	34	9.32	110.0	45.5	64.4
	" 4	800	36	8.95	124.6	44.2	80.4
	" 5	900	38	8.14	-	-	-
	" 6	1000	40	8.14	191.4	70.8	120.6
	" 7	1060	40	9.33	-	-	-
6.4	KA6-1	700	28	8.41	119.2	46.3	72.9
	" 2	800	31.5	6.58	153.9	62.8	91.1
	" 3	900	34	6.54	189.0	78.8	110.2
	" 4	1000	35	6.58	235.9	87.6	148.3
	" 5	1100	37	6.72	273.1	90.2	182.9
6.4	KB6-1	700	29	10.95	80.4	31.7	48.6
	" 2	800	31	9.56	108.5	40.9	67.6
	" 3	900	33	9.28	142.3	49.3	93.0
	" 4	1000	34	9.27	167.6	59.2	108.3
	" 5	1100	38	9.11	199.7	66.9	132.8

Table 6-2(2) Experimental data of Code UK : deposition rate, leg length and fusion penetration

Φ mm	Ser.No	λ(s) mm³/s-A	h_a mm	h(s) mm	$\bar{d}$ mm	d_o mm	p mm
2.4	KA2-1	0.504	9.0	8.5	2.12	0.25	0.37
	" 2	0.571	11.0	9.7	2.25	0.62	0.87
	" 3	0.529	10.6	10.1	2.68	1.43	1.87
	" 4	0.599	13.2	11.9	3.25	2.00	2.50
2.4	KB2-1	0.461	6.9	6.5	1.75	0.50	0.56
	" 2	0.440	8.1	6.8	2.35	1.12	1.62
	" 3	0.511	8.5	7.9	2.75	1.62	2.06
	" 4	0.653	11.6	10.0	3.18	2.25	2.62
3.2	KA3-1	0.499	10.1	8.9	2.31	0.81	1.12
	" 2	0.469	9.7	9.6	2.87	1.87	2.18
	" 3	0.521	11.1	11.1	3.78	2.75	3.25
	" 4	0.599	12.6	12.8	5.90	5.56	5.87
	" 5	0.661	14.2	14.4	6.00	6.37	6.00
3.2	KB3-1	0.479	8.8	7.4	2.12	0.87	1.12
	" 2	0.471	9.0	8.1	3.00	2.12	2.43
	" 3	0.565	9.3	9.7	3.75	3.50	3.62
	" 4	0.630	9.6	10.8	5.28	5.12	5.22
	" 5	0.639	11.6	11.7	5.90	6.62	5.87
4.0	KA4-1	0.524	9.1	7.7	2.56	1.00	1.31
	" 2	0.533	10.3	8.7	2.87	1.50	1.93
	" 3	0.612	11.3	10.2	3.65	2.68	3.12
	" 4	0.634	10.5	11.0	4.28	3.87	4.06
	" 5	0.690	11.5	12.4	6.06	6.75	6.06
	" 6	0.801	11.3	14.1	7.68	9.12	7.37
4.0	KB4-1	0.389	6.8	5.8	1.75	0.87	1.00
	" 2	0.561	8.8	7.8	2.93	2.00	2.25
	" 3	0.570	9.6	8.6	3.37	2.50	2.81
	" 4	0.632	9.8	10.0	5.00	5.25	5.00
	" 5	0.703	10.0	11.3	5.68	6.50	5.50
	" 6	0.601	10.4	11.0	6.25	7.31	6.25
4.8	KA5-1	0.585	10.8	9.5	2.34	0	0
	" 2	0.523	11.6	9.8	3.06	2.00	2.25
	" 3	0.602	10.8	11.4	4.06	3.25	3.62
	" 4	0.589	12.8	12.0	4.93	4.50	4.81
	" 5	0.592	13.8	13.1	6.06	6.50	5.75
	" 6	0.619	13.0	14.1	7.90	9.50	7.21
	" 7	0.692	15.1	15.1	8.56	10.00	8.00
4.8	KB5-1	0.466	8.2	6.9	2.25	1.00	1.25
	" 2	0.524	9.7	8.2	3.25	2.50	2.87
	" 3	0.606	10.6	9.3	3.43	2.56	3.00
	" 4	0.531	11.0	9.7	4.81	5.18	4.75
	" 5	-	-	-	-	-	-
	" 6	0.577	12.1	11.9	6.34	6.93	6.28
	" 7	-	-	-	-	-	-
6.4	KA6-1	0.557	11.4	9.6	3.87	2.37	2.87
	" 2	0.517	12.7	11.2	4.37	3.50	3.81
	" 3	0.573	14.0	12.5	5.12	3.87	4.18
	" 4	0.576	13.0	13.2	6.12	6.50	6.12
	" 5	0.551	12.4	13.4	8.12	9.62	7.87
6.4	KB6-1	0.497	9.6	8.1	3.12	2.25	2.65
	" 2	0.508	10.3	9.2	3.87	2.87	3.50
	" 3	0.509	11.0	9.9	4.81	4.06	4.46
	" 4	0.549	12.0	10.8	4.81	4.50	4.56
	" 5	0.555	11.0	11.5	6.93	7.25	6.87

Table 6-3(1) Experimental data of Code UF: welding conditions and cross-sectional areas

ϕ_{mm}	Ser.No	I_A	E_V	$V_{mm/s}$	S_{mm^2}	S_1 mm^2	S_2 mm^2
3.2	FA3-1	290	24	10.28	22.5	12.9	9.5
	" 2	400	26	10.21	35.6	17.5	18.1
	" 3	500	28	10.95	56.3	23.9	32.4
	" 4	590	30	10.95	75.4	30.4	44.9
	" 5	540	32	7.43	98.1	41.4	56.6
	" 6	600	34	7.43	102.9	44.8	58.0
	" 7	670	36	7.43	130.3	48.5	81.8
3.2	FB3-1	290	24	9.91	26.2	13.5	12.7
	" 2	400	26	10.15	33.3	17.9	15.3
	" 3	500	28	10.59	58.1	26.5	31.5
	" 4	590	30	10.59	81.5	33.3	48.2
	" 5	540	32	7.79	97.0	43.3	53.7
	" 6	600	34	7.79	107.8	44.4	63.3
	" 7	670	36	7.79	128.1	52.2	75.8
4.8	FA5-1	610	28	12.53	62.7	26.0	36.7
	" 2	730	30	12.53	87.5	34.1	53.3
	" 3	840	32	12.53	105.9	38.0	67.8
	" 4	950	34	11.71	141.0	54.5	86.4
	" 5	860	36	9.45	153.2	54.8	98.3
	" 6	940	38	9.45	174.1	60.0	114.1
	" 7	1010	40	9.45	187.2	66.5	120.6
4.8	FB5-1	610	28	12.20	61.9	27.7	34.2
	" 2	730	30	12.20	83.3	34.5	48.7
	" 3	840	32	12.20	117.5	42.7	74.7
	" 4	950	34	11.60	125.2	49.0	76.1
	" 5	860	36	9.25	149.3	55.9	93.3
	" 6	940	38	9.25	179.3	65.1	114.1
	" 7	1010	40	9.25	191.3	66.1	125.1

Table 6-3(2) Experimental data of Code UF: deposition rate, fillet size and fusion penetration

ϕ mm	Ser.No	$\lambda(s)$ mm³/s·A	h_a mm	$h(s)$ mm	a mm	$\bar{d}$ mm	d_o mm	p mm
3.2	FA3-1	0.458	5.7	5.0	3.75	1.12	0	0
	" 2	0.447	7.6	5.9	4.37	1.56	0.50	0.75
	" 3	0.466	7.6	6.9	4.75	2.50	2.12	2.18
	" 4	0.524	8.4	7.8	5.50	3.27	3.00	3.25
	" 5	0.571	10.5	9.1	6.37	3.55	2.75	3.34
	" 6	0.556	10.0	9.4	6.62	3.87	3.79	3.91
	" 7	0.537	11.0	9.8	6.87	4.78	5.37	4.78
3.2	FB3-1	0.499	6.7	5.2	3.75	1.12	0	0
	" 2	0.375	6.6	5.9	4.00	1.12	1.75	1.00
	" 3	0.564	7.7	7.2	5.00	2.66	2.41	2.30
	" 4	0.644	8.2	8.1	6.00	3.12	2.25	2.75
	" 5	0.625	11.0	9.3	6.37	3.62	3.50	3.58
	" 6	0.566	11.1	9.4	6.50	3.87	3.70	3.92
	" 7	0.608	11.4	10.2	7.00	4.15	4.25	4.25
4.8	FA5-1	0.550	8.4	7.2	5.00	2.75	1.79	2.18
	" 2	0.601	8.7	8.2	5.87	3.62	3.62	3.42
	" 3	0.556	9.0	8.7	6.25	4.50	4.91	4.37
	" 4	0.730	9.1	10.4	7.12	5.12	5.75	5.06
	" 5	0.623	11.5	10.4	7.50	5.08	5.00	5.46
	" 6	0.603	10.8	10.9	7.75	6.14	6.95	6.04
	" 7	0.646	11.2	11.5	8.00	6.58	7.50	6.51
4.8	FB5-1	0.569	9.2	7.4	5.00	2.50	1.56	1.96
	" 2	0.592	9.3	8.3	5.87	3.12	2.50	2.97
	" 3	0.634	9.3	9.2	6.50	4.41	4.95	4.31
	" 4	0.575	8.3	9.9	6.75	5.50	6.50	5.12
	" 5	0.602	11.4	10.5	7.50	5.18	5.70	5.52
	" 6	0.641	11.4	11.4	8.00	6.10	7.00	5.95
	" 7	0.629	11.2	11.5	8.00	6.39	7.25	6.35

Table 6-4(1) Experimental data of Code UP: welding conditions and cross-sectional areas

ϕ_{mm}	Ser.No	I A	E V	V mm/s	S mm²	S_1 mm²	S_2 mm²
3.2	PI3-1	300	31	10.00	37.8	13.8	23.9
	" 2	400	"	"	51.8	17.6	34.2
	" 3	500	"	"	74.0	25.1	48.8
	" 4	600	"	"	107.2	34.8	72.3
	" 5	700	"	"	119.0	42.6	76.3
4.0	PI4-1	400	30	10.83	47.2	17.5	29.6
	" 2	450	"	"	48.1	17.9	30.2
	" 3	500	"	"	55.0	20.1	34.9
	" 4	550	"	"	72.8	22.8	50.0
	" 5	600	"	"	80.2	24.6	55.5
	" 6	650	"	"	95.2	29.3	65.9
	" 7	700	"	"	106.1	32.7	73.3
	" 8	750	"	"	113.1	34.4	78.6
	" 9	800	"	"	-	-	-
	" 10	850	"	"	-	-	-
4.8	PI5-1	500	32	11.66	41.3	15.9	25.4
	" 2	550	"	"	34.4	13.8	20.6
	" 3	600	"	"	50.9	21.0	29.8
	" 4	650	"	"	50.9	21.3	29.5
	" 5	700	"	"	59.3	22.0	37.2
	" 6	750	"	"	71.1	27.5	43.6
	" 7	800	"	"	84.0	33.4	50.6
	" 8	850	"	"	86.9	34.3	52.6
	" 9	900	"	"	98.5	38.6	59.9
	" 10	950	"	"	105.4	42.0	63.4
3.2	PV3-1	500	31	6.66	107.5	36.1	71.3
	" 2	"	"	8.33	101.3	30.9	70.4
	" 3	"	"	10.00	81.5	23.2	58.2
	" 4	"	"	11.66	64.4	19.5	44.9
	" 5	"	"	13.33	58.3	19.5	38.8
4.0	PV4-1	650	30	6.66	139.7	47.4	92.2
	" 2	"	"	7.50	119.4	40.5	78.8
	" 3	"	"	8.33	124.3	41.4	82.9
	" 4	"	"	9.16	105.0	36.0	69.0
	" 5	"	"	10.00	106.9	35.1	71.8
	" 6	"	"	10.83	95.7	29.7	65.9
	" 7	"	"	11.66	85.8	26.6	58.6
	" 8	"	"	12.50	80.2	24.5	55.6
	" 9	"	"	13.33	82.5	24.8	57.7
	" 10	"	"	14.16	75.3	20.8	54.5
4.8	PV5-1	750	32	7.50	100.3	42.5	57.7
	" 2	"	"	8.33	98.8	42.1	56.7
	" 3	"	"	9.16	90.4	38.7	51.7
	" 4	"	"	10.00	76.5	33.0	43.4
	" 5	"	"	10.83	74.5	30.3	44.1
	" 6	"	"	11.66	69.8	27.9	41.8
	" 7	"	"	12.50	69.5	26.9	42.5
	" 8	"	"	13.33	65.8	25.2	40.5
	" 9	"	"	14.16	62.4	24.3	38.0
	" 10	"	"	15.00	56.4	22.2	34.2

Table 6-4(2) Experimental data of Code UP: deposition rate, leg length and fusion penetration

ϕ mm	Ser.No	$\lambda(s)$ mm$^{1/2}$/s·A	h_a mm	$h(s)$ mm	$\bar{d}$ mm	d_o mm	p mm
3.2	PI3-1	0.463	6.25	5.27	2.12	1.25	1.75
	" 2	0.441	7.00	5.94	2.70	1.70	2.25
	" 3	0.503	7.15	7.09	3.91	3.58	4.04
	" 4	0.581	7.08	8.35	5.27	5.70	5.91
	" 5	0.609	6.50	9.23	6.29	6.70	6.29
4.0	PI4-1	0.476	7.41	5.92	2.50	1.41	2.04
	" 2	0.433	7.22	5.99	2.62	1.50	1.79
	" 3	0.436	7.81	6.34	2.79	2.14	2.29
	" 4	0.450	7.56	6.76	3.83	3.37	3.91
	" 5	0.445	7.68	7.02	4.10	4.04	3.95
	" 6	0.488	7.87	7.65	4.72	5.00	4.83
	" 7	0.507	7.87	8.09	5.08	5.79	4.50
	" 8	0.498	8.16	8.30	5.20	5.87	4.70
	" 9	-	-	-	-	-	-
	" 10	-	-	-	-	-	-
4.8	PI5-1	0.371	6.47	5.64	2.37	1.45	1.79
	" 2	0.293	5.79	5.25	2.14	1.04	1.41
	" 3	0.409	7.50	6.48	2.35	1.87	2.45
	" 4	0.384	7.62	6.54	2.31	1.62	2.00
	" 5	0.368	7.29	6.64	3.10	2.29	2.83
	" 6	0.429	7.43	7.42	3.41	3.25	3.54
	" 7	0.487	8.22	8.17	3.66	3.58	4.08
	" 8	0.471	8.06	8.28	3.87	4.33	3.75
	" 9	0.501	8.10	8.78	4.39	5.16	4.37
	" 10	0.434	8.22	9.17	4.47	5.64	4.12
3.2	PV3-1	0.431	7.66	5.85	4.85	4.87	5.58
	" 2	0.516	7.62	5.68	4.52	4.70	5.04
	" 3	0.465	7.00	5.09	4.41	4.12	4.75
	" 4	0.455	6.91	4.52	3.60	3.16	3.62
	" 5	0.520	6.83	4.32	3.27	2.75	3.20
4.0	PV4-1	0.486	6.97	6.66	5.56	6.20	5.66
	" 2	0.468	8.62	6.16	5.41	5.87	6.16
	" 3	0.531	8.39	6.29	5.64	6.00	5.75
	" 4	0.508	8.41	5.78	4.58	4.66	4.66
	" 5	0.541	8.16	5.83	4.91	5.25	5.16
	" 6	0.497	7.85	5.52	4.66	4.95	4.70
	" 7	0.479	7.54	5.22	4.35	4.25	4.66
	" 8	0.473	7.60	5.05	4.20	4.29	4.37
	" 9	0.510	7.25	5.12	4.41	4.50	4.54
	" 10	0.454	7.04	4.89	4.10	4.45	4.25
4.8	PV5-1	0.426	9.43	5.66	3.93	4.04	3.91
	" 2	0.468	10.35	5.61	3.04	2.37	2.54
	" 3	0.474	9.62	5.36	3.10	2.79	2.75
	" 4	0.441	8.33	4.93	3.33	3.08	3.29
	" 5	0.438	8.08	4.87	3.16	2.91	2.83
	" 6	0.435	7.60	4.71	3.27	2.91	3.29
	" 7	0.449	7.58	4.70	3.18	2.83	2.91
	" 8	0.449	7.16	4.57	3.14	2.83	3.12
	" 9	0.460	7.29	4.45	2.77	2.50	2.16
	" 10	0.444	6.41	4.23	3.10	2.41	2.79

第7章　本研究の応用，数値計算例

7. 1　諸　　言

本研究で提案した諸実験式は，船体構造要素を考えてサブマージアーク溶接法による軟鋼材のすみ肉溶接を対象として求められたものであるから，実験条件もだいたいそのような実用範囲に限られており，したがって実験式の適用範囲もある程度限定されるであろう。

本章では，所要の脚長と溶込みを得るために提案した諸実験式に関し，実験の結果を勘案しつつその適用について二三の留意事項を述べ，さらに，脚長の低減を目途として所要の溶接条件を定める数値計算例を示しておく。

7. 2　溶接条件の選定について

(1.25)式　$\dfrac{h}{h_{\circ}}=\dfrac{1}{(1+p/h)^{1.375}}$

によって，脚長を $h_{\circ}$（設計脚長）から h（低減脚長）に低減するためには，溶込率 p/h が適切な溶接条件によって保証されなければならない。したがって，ここでは軟鋼材のサブマージアーク溶接を中心に，溶接条件の選定資料をまとめておくことにする。

(2.17)式　$p=h\cdot\dfrac{(2d/h)^4-1}{(2d/h)^4+1}$

(4. 8)式　$h=\sqrt{\dfrac{2\lambda I}{V}}$

はいずてもすみ肉溶接部の断面形状が，平形すみ肉半楕円であるという条件のもとに成立っているのであるから，これらの式によって所要の p/h を得るためには，そのような理想的な断面形状を保持しうるバランスのとれた溶接条件を選ぶことが前提となる。

(5.10)式　$\delta(\mathrm{M})=\dfrac{4(\lambda I)^{0.14}}{3\phi^{0.15}\sqrt[4]{E}}$

で与えられる $\delta(\mathrm{M})$ は，電極径 ϕ に対し溶接電流 I とアーク電圧 E のバランスを規制する溶接条件のパラメータであるが，I，E の値が過大あるいは過小となり $\delta(\mathrm{M})=1$ の条件から甚だしく離れてくると，この実験式の信頼性は著しく低下する。実験溶接の結果を綜合してみると，

$$0.9>\delta(\mathrm{M})>1.1$$

の範囲を超えた場合，溶込み断面形状は著しく歪んで正常な溶接とは云えなくなり，$\delta(\mathrm{M})$ 実験式の適用範囲外と考えるべきであろう。したがって，溶接条件の選定は，その許容変動範囲を含めて原則として $\delta(\mathrm{M})=1$ となるようにしなければならない。すなわち，

(5.~~21~~12)式　$E_{\circ}=\dfrac{3.16(\lambda I)^{0.56}}{\phi^{0.6}}$　ただし　$3.16\fallingdotseq 2.9\sim 3.4$

を満足する $E_{\circ}$ と I の組合わせを選ぶべきである。

この E_0 は I によって増減するわけであるが

$$25\text{v} > E_0 > 45\text{v} \qquad (\phi \text{ によって多少変動})$$

の範囲を超えて過大，過小になると，アークが不安定になりビードが著しく乱れてくるのが認められた。したがって，この点から（5.12）式によって各電極径 ϕ に対する使用電流 I の値が制限されてくる。

$$(4.18)\text{式} \quad \frac{\lambda I}{VE^2}=0.037 \qquad \text{ただし} \quad 0.037 \fallingdotseq 0.028 \sim 0.050$$

はすみ肉溶接のビード形状（凹形，凸形）を規制する実験式で，I，E および V の間のバランスを与えるものであるが，これを書き替えて

$$V=\frac{27\lambda I}{E^2}$$

の関係から，溶接速度 V を増して能率を上げるために I を増したい場合でも，E が上述の E_0 の範囲内に収まるように（5.12）式によって λ，I を定めて V の大さを決定すべきである。ただし，（4.18）式はかなり広い許容変動範囲があるから，この許容範囲内である程度 V の大さを加減することができる。

次に，材料定数である溶着係数 γ および溶込み係数 α は，あらかじめ使用材料について試験溶接を行ないその値を求めておく必要があるが，本研究で用いたすべての軟鋼交流溶接（UR, UM, UK, UF）のデータから，それぞれの変動範囲および平均値は次のようであった。

$$\gamma=1.75 \sim 1.95 \fallingdotseq 1.85$$

$$\alpha=0.08 \sim 0.09 \fallingdotseq 0.085$$

そこで，この平均値を基準にして，それぞれの変動範囲について h および d の偏差を計算してみた結果，h の偏差は4％以下，d の偏差は5.5％以下であった。この程度の偏差であれば実用的には問題ないと思われるので，軟鋼交流溶接の場合実用近以値として $\gamma=1.85, \alpha=0.085$ の値が利用できるであろう。

したがって，いま $\gamma=1.85$，$\alpha=0.085$ を選び，$E=E_0$，$\delta(\text{M})=1$ の場合を考えて，各実験式により軟鋼交流溶接に対する標準溶接条件を算出し，さらにこの標準条件により脚長 h と溶込み深さ p を計算してみた。なお電極突出長さ L は，$L=10\phi$ またはこれに近い値を選び次のように定めた。

ϕ mm……	2.4	3.2	4.0	4.8	6.0
L mm……	30	30	40	50	50

以上の計算の結果は，下記のようにすべて線図としてまとめた。

Fig. 7-1 には（5.12）式から算出した標準電圧 E_0 と溶接電流 I の関係を $I-E$ 線図として示す。

Fig. 7-2 には（4.18）式から算出した標準溶接速度 V（cm/min）と溶接電流 I の関係を $I-V$ 線図として示す。なお，V に関しては同式に示すようにかなりの許容変動範囲があるので，その上限値と下限値の線を併記してある。

Fig. 7-3 には，これらの標準条件によって（4. 8）式および（2.17）式から算出した脚長 h，溶込み深さ p，溶込率 p/h の値を電流値 I をベースにして示してある。

Fig. 7-4 には，各電極径 ϕ につき電極突出長さ L を変化させた場合の溶着速度 λI と I の関係を I—λI 線図として与えてある。この線図は，任意の L について λI と I の関係を求めたいとき便である。

なお，L を Fig. 7-1 ないし Fig. 7-3 の各線図と同一に $L \fallingdotseq 10\phi$ と固定した場合，λI と I の関係は ϕ に関わらず近似的にほぼ1本の曲線にまとまるので，この関係を次のような近似式で表わしてみた。

溶着速度 $\lambda I = 0.195 I^{1.155}$ mm^3/s

ただし，$\gamma = 1.85$ $L \fallingdotseq 10\phi$

この実用近似式の曲線を Fig. 7-5 に示す。Fig. 7-4 の I—λI 線図との誤差は僅少で，標準偏差は6.83mm^3/s 約2.4%程度である。

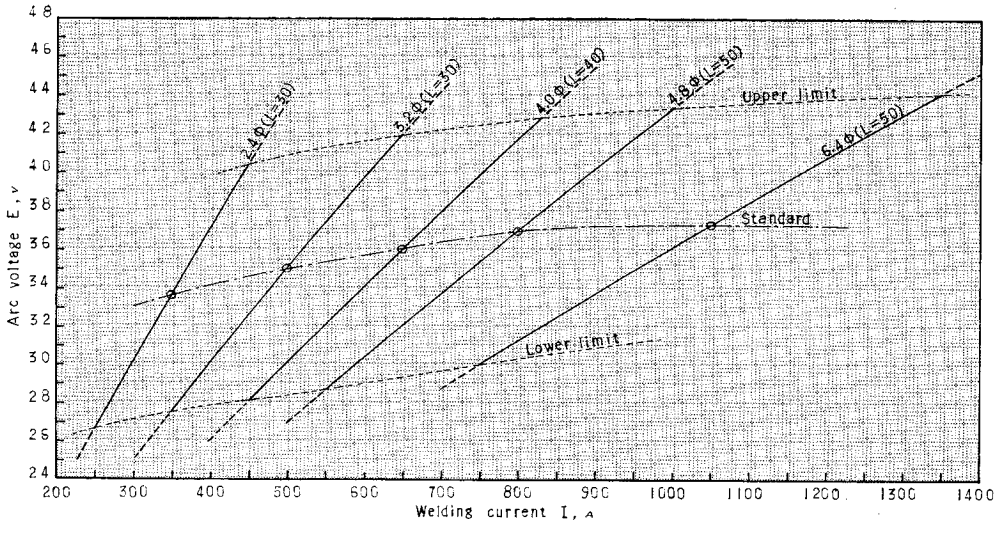


Fig. 7-1 I-E DIAGRAM for AC welding of mild steel (A standard welding condition of submerged arc welding)

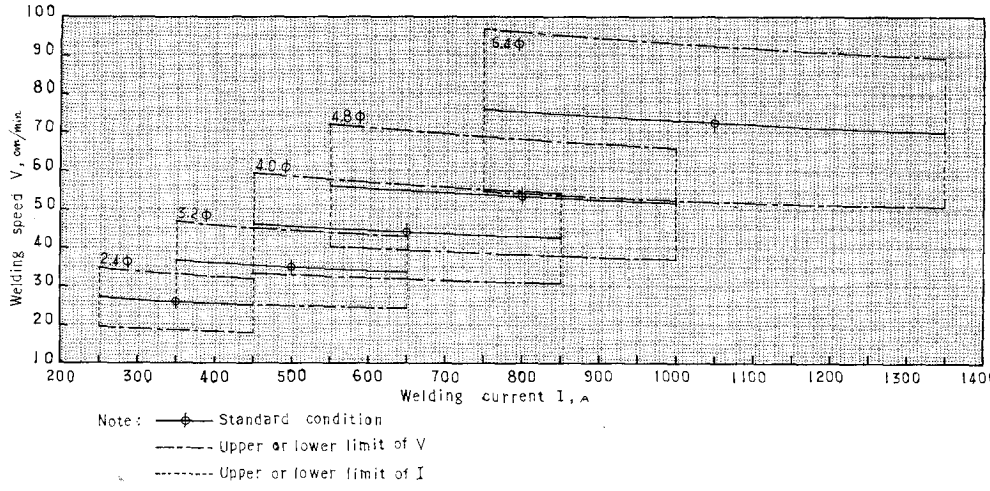


Fig. 7-2 I-V DIAGRAM for AC welding of mild steel (A standard welding condition of submerged arc welding)

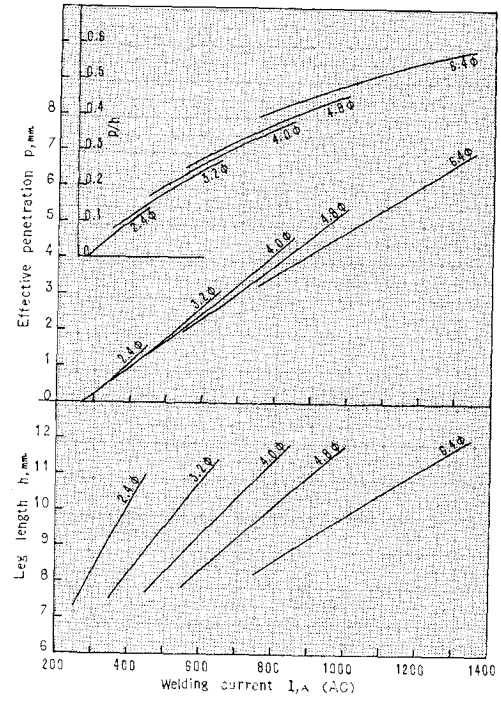
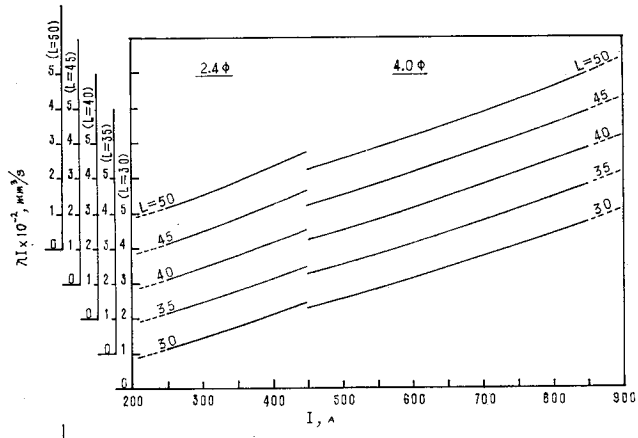
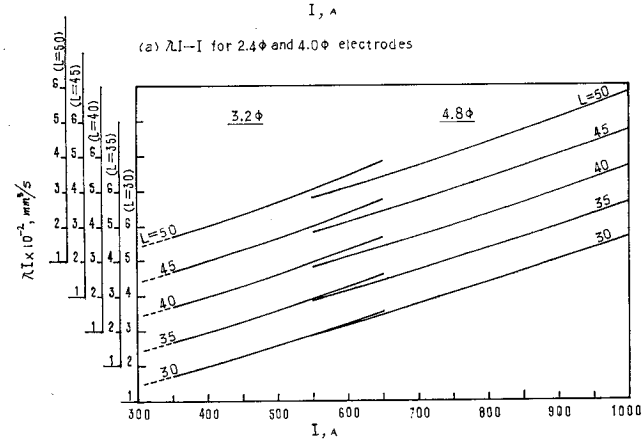


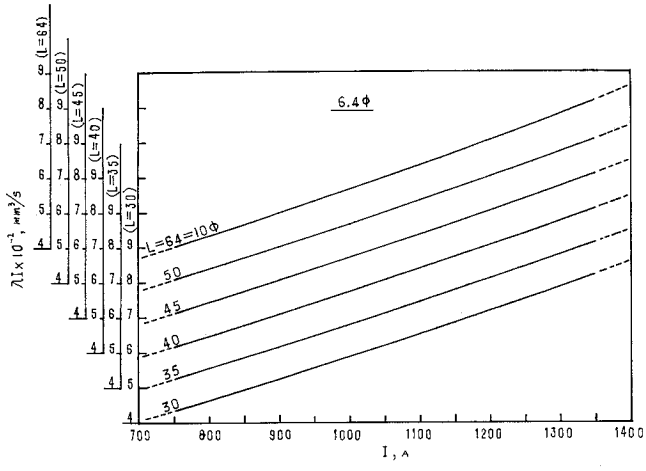
Fig. 7-3 h, p and p/h calculated with the empirical formulae according to the standard welding conditions shown as Fig. 7-1 and Fig. 7-2



(a) λI–I for 2.4Φ and 4.0Φ electrodes



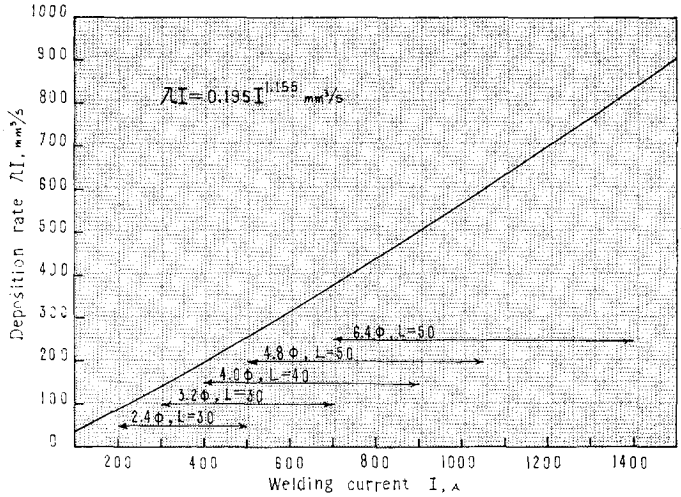
(b) λI–I for 3.2Φ and 4.8Φ electrodes



(c) λI–I for 6.4Φ electrode

Note: I=Welding current, A
λI=Deposition rate, mm³/s
L=Extension of electrode, mm
Φ=Diam. of electrode, mm
Coefficient of deposition rate γ=1.850

Fig. 7-4 λI-I DIAGRAM for submerged arc welding of mild steel with AC.



Note: Coefficient of deposition rate γ=1.850

Fig. 7-5 An appoximate λI-I curve for submerged arc weldingof mild steel w ithAC.

7. 3 低減脚長とその溶接条件の算定

普通のサブマージアーク溶接法により単層で正常なすみ肉溶接を得るためには，下向溶接で脚長7 ㎜ないし12㎜の範囲内（Fig. 7-3参照）水平溶接ならば8 ㎜程度までであろう。それ以上の脚長は累層溶接となる。そこで，まずこの範囲の低減脚長が得られるように

$$(1.25)式 \quad h=\frac{h_{\circ}}{(1+p/h)^{1.875}} \qquad \therefore \quad p/h=(h_{\circ}/h)^{0.727}-1$$

を利用して，与えられた設計脚長 $h_{\circ}$ に対し適当な溶込率 p/h を選定する。（この場合，溶接部断面形状が半楕円をなすと云う条件から $p/h<1$ でなければならない）そして，この選んだ p/h を（1.25）式に代入して h を計算し，安全側にまるめて求むる低減脚長とする。

溶接条件を適切に選定することにより，上述の p/h と h が保証されれば，低減脚長 h によって設計脚長 $h_{\circ}$ に相当する継手強度が得られるわけである。この h と p/h を確保するための溶接条件は，第4章，第5章で提案した諸式によって算出されるわけであるが，以下具体的に数値計算例によってその概要を述べてみる。

ただし，サブマージアーク溶接法による軟鋼交流溶接で，$\gamma=1.85$，$\alpha=0.085$とする。

(1) いま下に示すように（a）ないし（e）の5種類の設計脚長 $h_{\circ}$ が与えられたとし，それに対し，それぞれ脚長が単層溶接の可能な範囲に入るよう溶込み率 p/h を選んで（1.25）式から算出した低減脚長 h の値を下表に示す。

	$h_{\circ}$ ㎜	p/h	h ㎜	$h_{\circ}$ ㎜(検算)
(a)	9.5	0.15	7.839≒8	9.695
(b)	11.5	0.2	8.950≒9	11.564

(c)	12.5	0.3	8.714≒9	12.910
(d)	15.5	0.4	9.759≒10	15.883
(e)	19.0	0.5	10.880≒11	19.210

(2) 上の h と p/h から d を計算しておく，計算式は

(2.17)式　$p=h\cdot\dfrac{(2d/h)^4-1}{(2d/h)^4+1}$　より　$d=\dfrac{h}{2}\sqrt[4]{\dfrac{1+p/h}{1-p/h}}$

	h mm	p/h	d mm
(a)	8	0.15	4.314
(b)	9	0.2	4.980
(c)	9	0.3	5.253
(d)	10	0.4	6.180
(e)	11	0.5	7.239

(3) ここで溶接条件の選定に入るが，まず電極径 ϕ および電極突出長さ L を定める。ϕ は Fig. 7-3 を参照し，所要の p/h に無理のないことを確めつつ選び，L はだいたい $L\fallingdotseq 10\phi$ を目安にして適当に定むればよい。選定結果を次に示す。

	ϕ mm	L mm		ϕ mm	L mm
(a)	3.2	30	(d)	3.8	50
(b)	4.0	40	(e)	6.4	50
(c)	4.0	40			

(4) ϕ と L を定めたら溶接条件 I，V，E の算定に入る。この場合，既に h と d が定まっており，適正溶接条件 $\delta(\mathrm{M})=1$ から当然 $d=d(\mathrm{S})$ であるから，(4.8) 式の h と (5.32) 式の $d(\mathrm{S})$ を満足するように I，V，E を定めなければならない。そこで，まずこの両式から V を求めて λI を算出する。その計算要領次のとうり。

(4.8) 式　$h=\sqrt{\dfrac{2\lambda I}{V}}$　から　$\dfrac{\lambda I}{V}=\dfrac{h^2}{2}$

(5.23)式　$d(\mathrm{S})=\sqrt{\dfrac{\lambda I}{\pi V}+\alpha^2\left(\dfrac{\lambda I}{\sqrt{V}}\right)^{1.6}}$　から

$d(\mathrm{S})=d$　$\alpha=0.085$ として　$\dfrac{\lambda I}{\sqrt{V}}=\left\{\dfrac{\sqrt{d^2-h^2/2\pi}}{0.085}\right\}^{1.25}$

この両式に既知の h と α を代入して $\lambda I/V$ と $\lambda I/\sqrt{V}$ の値を計算すると，

$$V=\left(\frac{\lambda I/\sqrt{V}}{\lambda I/V}\right)^2$$

より V が求められるから，この V を用い (4. 8) 式より次のように λI が算出される。

$$\lambda I=\frac{h^2}{2}\times V$$

これらの計算結果を下表に示す。

	h mm	d mm	$\lambda I/V$	$\lambda I/\sqrt{V}$	V mm/s	λI mm³/s
(a)	8	4.314	32.0	82.55	6.564	212.9
(b)	9	4.980	40.5	102.48	6.403	259.3
(c)	9	5.253	40.5	116.91	8.333	337.4
(d)	10	6.180	50.0	151.58	9.190	459.5
(e)	11	7.238	60.5	194.28	10.312	623.8

(5) λI から I を決定する。上で求められた λI は，所要の p/h を得るに必要な I を定めるための資料であって，この λI から ϕ と L に応じ Fig. 7-4 の I—λI 線図または Fig. 7-5 の近似式を利用して I を決定する。ただし溶接電流 I は実用上なるべく端数のないよう安全例にまるめたものとする。その選定結果を下に示す。

	ϕ mm	L mm	λI mm³/s	I, A
(a)	3.2	30	212.9	430
(b)	4.0	40	259.3	520
(c)	4.0	40	337.4	650
(d)	4.8	50	459.5	840
(e)	6.4	50	623.8	1090

(6) I より λ および E を算出する。I が決定したら，あらためて

(4. 7) 式 $\lambda=\frac{\gamma}{(L/\phi)^{0.2}}(A_e I^{1.22}+B_e)$

から λ を算出して λI を決定し，

(5.12) 式 $E_o=\frac{3.61(\lambda I)^{0.56}}{\phi^{0.6}}$

から E_o を計算，これを適当にまるめて E の実用値とする。計算結果次のとうり。

	I A	λ mm³/s.A	λI mm³/s	E V
(a)	430	0.494	212.31	31.60≒32
(b)	520	0.500	260.21	30.98≒31
(c)	650	0.524	340.85	36.04≒36
(d)	840	0.547	459.80	38.20≒38
(e)	1090	0.575	632.44	38.42≒38

(7) 以上決定した λI と E および既知の h を用い，まず (4. 8) 式より V を計算，次で (4.18) 式より $\lambda I/VE^2$ の値を算出し，この値が許容範囲にあることを確認して V を決定する。すなわち，

(4. 8)式より $V=\frac{\lambda I}{h^2/2}$

(4.18)式より　$\dfrac{\lambda I}{VE^2}=0.028\sim0.050$

その計算結果を次に示す。

	V mm/s	V cm/min	$\lambda I/VE^2$
(a)	6.635	39.808≒39.8	0.0313
(b)	6.425	38.549≒38.5	0.0422
(c)	8.416	50.496≒50.5	0.0312
(d)	9.196	55.176≒55.2	0.0346
(e)	10.4535	62.721≒62.7	0.0419

$\lambda I/VE^2$ の値はいずれも許容範囲内にあり，溶接速度の実用値を上記 V cm/min のように決定する。

(8)　溶接条件のまとめ

	ϕ mm	L mm	I A	E V	V cm/min
(a)	3.2	30	430	32	39.8
(b)	4.0	40	520	31	38.5
(c)	4.0	40	650	36	50.5
(d)	4.8	50	840	38	55.0
(e)	6.4	50	1090	38	62.7

(9)　溶接条件から所要溶込率 p/h の確認検算

	得られた溶接条件		(4.14)式	(5.23)式	(2.17)式	所要溶込率
	λI mm³/s	V cm/min	h mm	d mm	p mm	p/h
(a)	212.312	39.8	8.001≒ 8	4.312	1.193	0.149≒0.15
(b)	260.208	38.5	9.006≒ 9	4.986	1.820	0.202≒0.2
(c)	340.847	50.5	9.000≒ 9	5.264	2.734	0.304≒0.3
(d)	459.800	55.0	10.016≒10	6.190	4.028	0.402≒0.4
(e)	632.438	62.7	11.002≒11	7.265	5.560	0.505≒0.5

7.4　結　　言

本章では，提案した諸実験式によって溶接条件を選定する場合の参考資料として，溶接条件に関連する各種の線図を作成し，さらに脚長低減に必要な所定の溶込みを得るための溶接条件に関し，その数値計算例を示した。いずれも，サブマージアーク溶接法による軟鋼材の交流溶接を対象としたものである。

総　　括

本研究では，まずすみ肉容接継手の脚長低減を目途として，軟鋼板の模型継手試験片ならびに実際の溶接継手試験片による引張試験を行なったが，その結果，すみ肉溶接継手の静的強度が必ずしものど厚したがって脚長（h）に比例して直線的に増大するものでないこと，およびすみ肉溶接の有効溶込み（p）の増加に伴なってその強度が規則的に高まっていくことを確認し，これを定量的に把握することができた。そして，単位溶接長当りの破壊荷重 $P_{\circ}$（kg/mm）を脚長 h（mm）と溶込率 p/h および溶着金属の引張強さ σ_w（kg/mm²）の関数として表わす次の実験式を得た。

$$P_{\circ}=\sigma_w h^{0.8}(1+p/h)^{1.1} \quad kg/mm \cdots\cdots (1.7)$$

ただし　$h>5.675$mm

したがって，$h>5.675$mm範囲では，すみ肉溶接継手の最大のど応力 σ と σ_w の比は，次式のような h と p/h の関数となる。

$$p/h\leq 1 \text{ では } \quad \frac{\sigma}{\sigma_w}=\frac{\sqrt{2}(1+p/h)^{0.1}}{h^{0.2}} \cdots\cdots (1.18)$$

$$p/h\geq 1 \text{ では } \quad \frac{\sigma}{\sigma_w}=\frac{(1+p/h)^{1.1}}{h^{0.2}\sqrt{1+(p/h)^2}} \cdots\cdots (1.19)$$

以上の結果より，溶込み深さに応じて許容さるべき低減脚長を算定する実験式を導いたが，これは溶込み深さ p を無視して算定される設計脚長 $h_{\circ}$ と，p の効果を考慮した低減脚長 h との比，つまり脚長低減率 $h/h_{\circ}$ を，次のような溶込率 p/h の関数として与えたものである。

$$\frac{h}{h_{\circ}}=\frac{1}{(1+p/h)^{1.375}} \cdots\cdots (1.25)$$

この実験式によって設計脚長 $h_{\circ}$ に対する低減脚長 h を得るためには，施工に際して溶込率 p/h が保証されなければならない。つまり，所要の脚長 h と溶込み深さ p が確実に得られるように適切な溶接条件の選定を必要とする。したがって，h ならびに p と溶接条件との関係を確立する必要がある。

そのために，まずすみ肉溶接の溶着部断面形状を，脚長 h を2等辺とする直角三角形とし，これと母材溶込み断面を含むすみ肉溶接の全溶融部断面形状を，すみ肉斜辺を短軸とする半楕円と仮定した。

次いで，溶込み深さと溶接条件の関係を確立するため，溶接条件と溶込みに関する基本的な量として，半無限体表面上の移動点熱源による溶込半径 d を考え，この d を溶込み代表量と名付けて，先に仮定した半楕円のすみ肉溶接の溶込みに導入した。これは，仮定したすみ肉溶接半楕円の1/2断面積（すみ肉の片脚を考えて）が，移動点熱源理論による溶込断面積 $\pi d^2/2$ に等しいとしたわけである。

その結果まったく幾何学的に，すみ肉溶接の有効溶込み深さ p が，脚長 h と溶込み代表量 d

の関数として次のように表わされる。

$$p=h\cdot\frac{(2d/h)^4-1}{(2d/h)^4+1}\cdots\cdots(2.17)$$

上式のhもdも溶接条件の関数であるから，pは当然溶接条件から算出されるはずである。しかし，この式はすみ肉溶接部が前述のような理想的な断面形状をなすという仮定のもとに成立しているのであるから，実用上この仮定と実際との間の誤差を考慮する必要がある。そのためには実験による補正ないし実験式の導入が必要になってくる。

そこで，本研究では大脚長の Deep fillet weld に対し，最も使用頻度の高いサブマージアーク溶接法を対象として，溶接条件よりhとdを推定するための実験式を求めた。材料は軟鋼材とし，溶接条件としては，電極ワイヤ径 ϕ(mm)，電極突出長さ L (mm)，溶接電流I(A)，アーク電圧E (V)，溶接速度V (mm/S) の諸因子を考えた。

脚長hは溶着速度によって定まるので，まず電極の溶融速度から溶着速度の実験式を求めたが，単位電流当りの溶着速度を容積単位で λmm³/S.A のごとく表わし，次の実験式を得た。

$$\lambda=\frac{\gamma}{(L/\phi)^{0.2}}(A_eI^{1.22}+B_e)\quad \mathrm{mm}^3/\mathrm{S.A}\cdots\cdots(4.\ 7)$$

ここで，$A_e=a(L/\phi^2)^{1.22}$　$B_e=b\phi^2+c$

a，b，cは材料定数で，軟鋼の場合

$a=1.043\times10^{-5}$　$b=1.502\times10^{-3}$　$c=0.339$

上式に含まれる γ は，溶着係数と名付けた一種の材料定数で，電流の極性によって変化する。

この λ により，脚長hと溶接条件の関係は次式で与えられる。

$$h=\sqrt{\frac{\lambda I}{V}}\quad \mathrm{mm}\cdots\cdots(4.\ 8)$$

しかし，この脚長hの式は，すみ肉溶着部断面の形状がhを等辺とする直角三角形をなすとして与えられたものであるから，実際の脚長が上式で与えられるためには平形すみ肉溶接を形成する必要がある。したがって，そのために必要な溶接条件諸因子間のバランスを規制する実験式を次のように求めた。

$$\frac{\lambda I}{VE^2}=0.037\cdots\cdots(4.18)$$

ただし，許容変動範囲0.037≒0.028～0.050

次に，溶込み代表量dと溶接条件の関係を与える実験式は，下に示すような関数として求められた。

$$d=d(\mathrm{S})\cdot\delta(\mathrm{M})\cdots\cdots(5.\ 2)$$

$$d\ (\mathrm{S})=\sqrt{\frac{\lambda I}{\pi V}+\alpha^2\left(\frac{\lambda I}{\sqrt{V}}\right)^{1.6}}\cdots\cdots(5.23)$$

$$\delta\ (\mathrm{M})=\frac{4\,(\lambda I)^{0.14}}{3\,\phi^{0.15}\ \sqrt[4]{E}}\cdots\cdots(5.10)$$

ここで，d(S) は与えられた溶接条件によって得られるすみ肉溶接の溶融部全断面積に対応するdであるが，その溶融部断面の形状は必ずしも仮定した理想的な半楕円ではなく，溶接条件諸因子間相互の比率によって変化してくる。したがって，先に示したすみ肉溶接の溶込み深さpを求むる式 (2.17) に適用するdとしては，溶接条件に応じてこのd(S) の値を補正する必要がある。δ (M) がその補正係数で，上式 (5.10) に示すような溶接条件に関する実験式として求められた。すみ肉溶接の断面形状が，仮定した正常な半楕円をなをすときは δ (M)＝1 となるわけであるが，このときのEを E_0 で表わし，(5.10) 式より次の式が得られた。

$$E_0 = \frac{3.16(\lambda I)^{0.56}}{\phi^{0.6}} \quad \cdots\cdots (5.12)$$

ただし，許容変動範囲3.16≒2.9～3.4

本研究では，この E_0 をもって与えられた ϕ，I に対する標準アーク電圧とした。溶接電圧としてこの E_0 を用うれば当然$d=d$(S) となる。

また，d(S) の式 (5.23) に含まれている α は溶込み係数と名付けた一種の材料定数で，先に述べた溶着係数 γ と同様，電流の極性によって変化する。

この溶着係数 γ ならびに溶込み係数 α は，ともに使用する材料，すなわち，電極ワイヤ，フラックス，母材等の組合わせによって異なり，さらに電流の極性によって変化するので，上述の諸実験式を適用するに当っては，あらかじめ使用材料ごとに同一極性の電流で試験溶接を行なって，その値を確めておく必要がある。本研究の実験で用いたわが国で一般に市販されている電極材料の組合わせでは，軟鋼材の交流溶接の場合だいたい次のような値であった。

$$\gamma = 1.75 \sim 1.95 \fallingdotseq 1.85$$

$$\alpha = 0.08 \sim 0.06 \fallingdotseq 0.085$$

同一材料でも，直流正極性の場合は γ の値がこれよりはるかに小さくなり，α の値は著しく増してくる。

以上のように，すみ肉溶接の脚長ならびに溶込み深さと溶接条件との関係を与える実験式が求められたが，なおこれらの諸実験式は，船体縦通材の溶接，すみ肉溶接引張試験片の作製をはじめ各種の実用溶接に適用して，その再現性，実用性の確認を行なった。

以上の結果，所要の設計脚長と溶込率が設計の段階で指示され，その溶込率を確保すべき溶接条件が算定される。しかし，実際にその溶接条件によって所要の溶込率を確保するためには，当然施工上の厳しい検査，管理が必要であろう。

参　考　文　献

1) IIW Document XV-268-69, "Utilization of the penetration for fillet welds", (1965)

2) 佐藤邦彦，瀬尾健二："局部収縮理論にもとずくすみ肉溶接継手の強度解析" 溶接学会誌，Vol. 41, No. 4 (1972), p. 59

3) 佐藤邦彦，瀬尾健二 "前面すみ肉継手の変形挙動と強度に関する研究"，溶接学会誌，Vol. 41, No. 10 (1972), p. 43

4) C. E. Jackson and A. E. Shrubsall : "Control of penetration and melting ratio with welding Technique", A. W. J., Vol. No. 4 (1953), p. 172S

5) 渡辺正紀，佐藤邦彦："溶接継手の溶込みと溶接条件との関係"，溶接学会誌，Vol. 24, No. 12 (1955), p. 34, Vol. 25, No. 1 (1956), p. 18

6) N. Christensen et. al. : "Distribution of temperatures in arc welding", B. W. J., Vol. 12, No. 2 (1965), p. 54

7) W. Hovgaard : U. S. Naval Inst. Annapollis, Vol. 226 (1946)

8) 鶴田明　外："大型隅肉溶接の強度について"，溶接学会誌，Vol. 25, No. 8 (1956), p. 38

9) IIW Document XV-247-68, International Test Series, Final report (1968)

10) D. Rosenthal : "Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting", A. W. J., Vol. 10, No. 5 (1941), p. 220S

11) 田中正三："移動熱源による熱伝導について"，溶接学会誌，Vol. 12, No. 9 (1943), p. 347

12) 橋本啓介："隅肉溶接に対する溶込みの算定"，溶接学会誌Vol. 38, No. 4 (1969), p. 399, Vol. 38, No. 8 (1969), p. 857

13) 橋本啓介："溶接条件と溶込みの関係を与える実用近似式"，関東学院大学工学部研究報告, Vol. 15, No. 1 (1971), p. 1

14) J. L. Wilson et. al. : "The heat effect of I^2R heating on electrode melting rate", A. W. J., Vol. 35, No. 1 (1956), p. 1S

15) 安藤弘平："溶接電弧より母材に与えられる熱量に関する一考察"，溶接学会誌，Vol. 18, No. 1, 2, 3, (1948), p. 4

16) 安藤弘平，三木勇："溶接アークの熱効率について" 溶接学会誌，Vol. 20, No. 11, 12 (1951), p. 27, Vol. 21, No. 11 (1952), p. 13

17) 安藤弘平，三木勇："溶接アークの比溶着熱について" 溶接学会誌，Vol. 22, No. 3 (1953), p. 8

18) 橋本啓介："重力式接触溶接法の溶接条件に関する研究"，関東学院大学工学部研究報告，Vol. 13, No. 2 (1968), p. 109

19) F. Mantai : "Automatisches schweissen unter einem Shlackenpulver", Verlag Technick, Berlin (1952)

20) 橋本啓介："すみ肉溶接の脚長ならびに溶込みの推定と溶接条件の選定に関する実験的研究"，造船学会論文集，Vol. 141 (1977), p. 302

21) 橋本啓介："有効溶込みを考慮した前面すみ肉溶接継手の静的強度と脚長の低減に関する実験的研究"，造船学会論文集，Vol. 141 (1977), p. 314

22) 橋本啓介，山田秀輔："アーク溶接における溶着速度と溶込みに関する研究，（I）ビード溶接による実験的研究"，関東学院大学工学部研究報告，Vol. 21, No. 2 (1978), p. 37

本論文に関連した発表論文

1. "隅肉溶接に対する溶込みの算定(Ⅰ)溶込みの基礎理論ならびに浅い溶込みの隅肉溶接について"，溶接学会誌，Vol. 38, No. 4 (1969), 399—409
2. "隅肉溶接に対する溶込みの算定(Ⅱ)深い溶込みの隅肉溶接について"，溶接学会誌，Vol. 38, No. 8, (1969), 857—865
3. "溶接条件と溶込みの関係を与える実用近似式"，関東学院大学工学部研究報告，Vol. 15, No. 1 (1971), 1—14
4. "すみ肉溶接の脚長ならびに溶込みの推定と溶接条件の選定に関する実験的破究"，造船学会論文集，Vol. 141 (1977), 302—313
5. "有効溶込みを考慮した前面すみ肉溶接継手の静的強度と脚長の低減に関する実験的研究"，造船学会論文集，Vol. 141 (1977), 314—321