

エレクトロスラグ溶接部の継手強度

STRENGTH OF WELDED JOINT BY ELECTRO-SLAG WELDING

吉村鉄也* 小林光博**
Tetsuya Yoshimura Mitsuhiro Kobayashi

溶接組立箱形断面柱（以下、ボックス柱と呼ぶ）の内ダイアフラムの溶接には、エレクトロスラグ溶接（以下、ESW と呼ぶ）法が用いられている。ESW は溶接入熱が大きく、特に TMCP 鋼に対しては溶接熱影響部が軟化する傾向にある。しかし軟化部があっても軟化幅と軟化する程度が小さく、かつ継手幅が広ければ、塑性拘束によって継手強度は大きくなることも報告されている¹⁾。そこで本報では、ある程度の梁フランジ幅をもつ柱梁接合部に対して、どの程度塑性拘束効果が得られるものなのか、ESW による溶接熱影響部の軟化傾向と軟化部が継手強度に与える影響を定量的に把握する事を目的とした継手引張試験について報告する。

キーワード：エレクトロスラグ溶接，HAZ 軟化，継手幅厚比，軟化幅，軟質度

1. まえがき

TMCP 鋼は、その製造過程で制御圧延と制御冷却を併用した技術を適用し、結晶粒を微細化することにより強度を高めた鋼材である。TMCP 鋼を内ダイアフラムに使用し、ESW を行った場合の溶接入熱は一般に 650kJ/cm ~ 1000kJ/cm となる。また、建築物の高層化や梁部材の大スパン化に伴って鋼材の板厚が厚くなり、ますます大入熱による溶接施工が不可欠となっている。しかし、大入熱溶接に伴う鋼材の熱影響部（以下、HAZ と呼ぶ）では、結晶粒の粗大化に伴う強度低下、いわゆる HAZ 軟化が避けることができない²⁾。このことから、HAZ が軟化した継手において、継手強度が母材強度より低下する可能性がある。

そこで本研究では、ボックス柱の内ダイアフラム ESW 継手部を対象に、HAZ 軟化部の継手強度への影響を定量的に把握することを目的として、溶接継手部に特有な因子が継手強度にどのように影響するかを実験的に検討した。

2. 試験体形状

試験体形状を図-1 に示す。ボックス柱を想定し、スキンプレートとダイアフラムを H 形に組み合わせた試験体とし ESW は溶接長さを 1000mm とした。スキンプレートは、板厚 $t_s=70\text{mm}$ 、材質は TMCP385C(HBL385C: J F E スチール)の 1 種類とし、ダイアフラムおよび梁フランジは、板厚 $h=60\text{mm}$ と 45mm 、材質は共に TMCP385B (HBL385B: J F E スチール)の 2 種類とした。

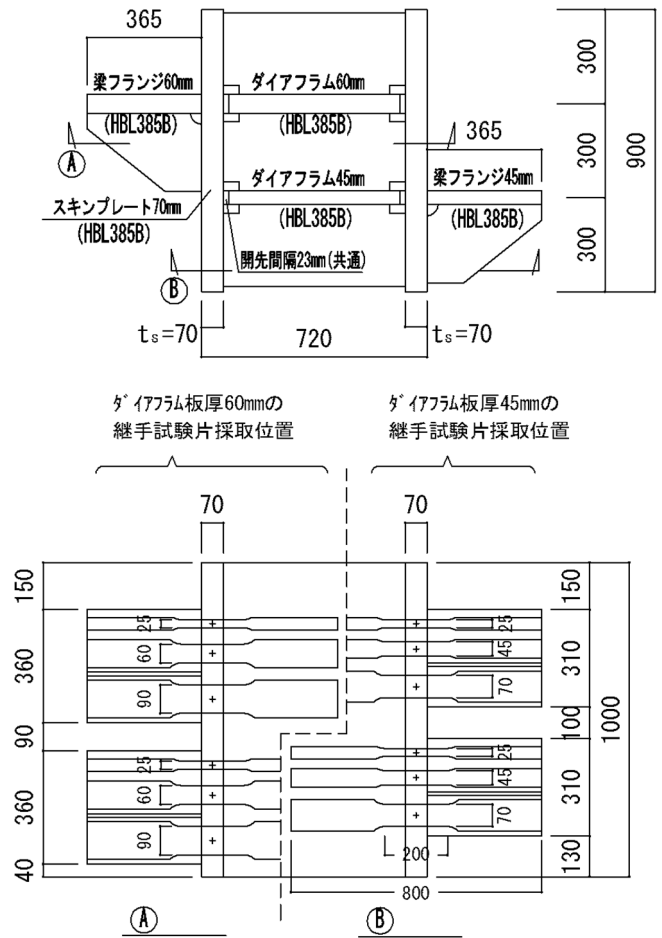


図-1 試験体および試験片採取位置

*製造本部 富津工場 生産技術部 技術課

**製造本部 富津工場 生産技術部

スキンプレートおよびダイアフラム鋼材の化学成分を表-1に示す。

3. エレクトロスラグ溶接の溶接条件

エレクトロスラグ溶接に用いた溶接材料と溶接条件を表-2および表-3に示す。溶接装置はSESNET-W55（日鐵住金溶接工業社製）である。基本的な仕様は非消耗ノズル（外径 12φ、長さ 1300mm、上昇速度 1.0~1.8cm/分）、ワイヤ（径 1.6φ、供給速度 8.0m/分）、溶着量（140g/分）、揺動（速度 2 回/分、停止時間 8.0 秒）である。電流は 380A、電圧は 52V に設定した。ノズル上昇速度はあらかじめ設定した電流値により自動制御としており、入熱を求める溶接速度に該当する。よって上記条件から、入熱はダイアフラム板厚 60mm と 45mm ではそれぞれ 988kJ/cm と 659kJ/cm となる。

4. 試験結果

4.1 HAZ 軟化部の幅

マクロ試験片を写真-1に示す。どちらの試験片も有害な欠陥は見られず、溶込み幅は 9mm~10mm あり、十分な溶込みが確保できていた。HAZ 軟化部の幅を推定するに当たって、このマクロ試験片からビッカース硬さ試験（Hv10）を実施した。図-2に示すように HAZ 部を含む矩形領域を決め横方向に 1mm ピッチ、縦方向に 2mm ピッチで格子状に測定し、ある一定の硬さ範囲をグルーピングし分布図を作成した。図-2(a)、(b)にその結果を示す。図中には、マクロ試験片から判断した溶接境界線（ボンド線）を点線で示した。また、HAZ 軟化幅を把握するため、ボンド線側（図の右側）では初めて母材の硬さ未満になる格子点に●印を表示し、ダイアフラム側（図の左側）では初めて母材硬さ以上になる格子点に●印を表示した。なお、この時に判定に用いた母材硬さは、ダイアフラム板厚 1/4 位置の母材硬さ平均値（h=60mm では Hv10=179、h=45mm では Hv10=192）とした。これによると、ボンド線側では概ねボンド線に沿って●が並んだ。一方、ダイアフラム側では、Hv10=160~170 以下の硬さについては、ボンド線とほぼ平行に分布している状態が伺えるが、今回の硬さ試験の範囲では母材硬さまで回復する範囲が明瞭に捉えられなかった。そこで本論では、裏当て金（図の下側）での●と●間距離（図中←→）を HAZ 軟化部の幅とした。それによると、ダイアフラム板厚 60mm に対しては 25mm 程度（ $X_h=25/60 \approx 0.40$ ）であり、ダイアフラム板厚 45mm に対しては 20mm 程度（ $X_h=20/45 \approx 0.45$ ）であった。なお、ここで求めた X_h （低強度部の相対厚さと呼ぶ）は板厚 h に対する軟化部の幅

表-1 鋼材の化学成分

部位	板厚 (mm)	化学成分 (%)						
		C	Si	Mn	P	S	Ceq	Pcm
ダイアフラム	60	0.15	0.34	1.29	0.012	0.002	0.30	0.23
	45	0.14	0.36	1.27	0.009	0.001	0.37	0.22
スキンプレート	70	0.11	0.36	1.29	0.009	0.002	0.38	0.22

表-2 溶接材料

溶接方法	溶接部位	規格	銘柄	メーカー
エレクトロスラグ溶接	ダイアフラム 60mm・45mm	JIS Z 3353	ワイヤ:YM-60E(1.6φ)	日鐵住金 溶接工業
		YES602-S/FES-Z	フラックス:YF-15I(20xD)	
CO ₂ 半自動溶接	梁フランジ 60mm・45mm	JIS Z 3312 G59JAIUC3MIT	KC-55G(1.4φ)	神戸製鋼所 JKW

表-3 溶接条件

溶接方法	ダイアフラム板厚	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (m/分)	入熱 (kJ/cm)	ノズル狙い位置	ノズル揺動条件
ESW	60mm	380	52	1.2	988	キャップ中央	待機 8 秒
ESW	45mm	380	52	1.8	659	キャップ中央	待機 8 秒

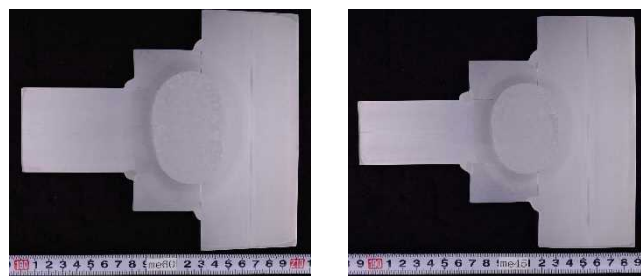


写真-1 マクロ試験片

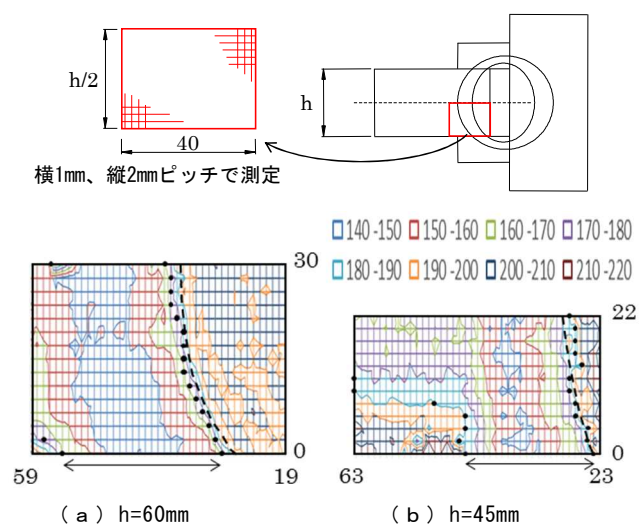


図-2 硬さ試験結果

H の占める割合であり，低強度部となる軟化部を含む継手の強度を支配する因子の 1 つとされている。

4.2 HAZ 軟化部の強度

試験片採取位置を図-3 に示す。硬さ試験の結果をもとに得られた位置から母材 (BM)，溶接金属 (WM) および HAZ 軟化部を特定し，それぞれダイアフラム板厚 (h) に対して h/2, h/4 および表面 5mm の位置から 6φ の丸棒試験片 (JIS Z 3111 A2 号) を採取し，引張試験を行った。HAZ 軟化部は，試験片の中心を前述した硬さ試験での最低硬さ位置に合わせている。表-4 に試験結果を示す。母材については丸棒試験片の他，全厚の引張試験 (JIS Z 2241 5 号) も実施した。HAZ 軟化部の引張強さは，母材の同じ位置の引張強さに対して 0.95~0.80，母材全厚の引張強さに対して 0.86~0.83 であった。

4.3 継手部の強度

継手引張試験片の採取位置を図-1 に，形状・寸法を図-4 に示す。試験変数は継手の幅厚比 W/h である。ダイアフラム板厚と梁フランジ板厚を同厚・同材質とし，板厚 h=60mm に対して，試験片幅 W を 25mm(W/h=0.4)，60mm(W/h=1.0)，90mm(W/h=1.5) の 3 種類，板厚 h=45mm に対しては，試験片幅 W を 25mm(W/h=0.6)，45mm(W/h=1.0)，70mm(W/h=1.6) の 3 種類とした。それぞれの変数に対して試験片を 2 体とし，合計 12 体とした。破壊状況を写真-2 に示す。いずれの試験片もダイアフラム側の HAZ 軟化部より破断している。破断箇所はくびれが生じており，十分な伸びを伴っての破断であった。

図-5 に継手引張試験結果を継手強度 (eσTJ) - 歪 (ε) 関係で示す。eσTJ は，最大引張荷重実験値を初期断面積で除した値で，歪は図-4 に示す区間で測定した変形から求めた平均歪である。初期剛性や降伏荷重においては継手の幅の違いによる差異は認められず，ほぼ同一の挙動を示している。継手幅の違いにより引張り強さに違いが見られ，継手幅が広くなるに従って大きくなるのがわかる。いずれの試験片も 5%以上の歪を示しており，十分な塑性変形能力を有していると言える。

図-6 に継手強度 (eσTJ) - 継手幅厚比 (W/h) 関係を示す。図中には，ダイアフラム母材全厚の降伏強度，引張強度および同引張強度の 0.8 倍強度を表示した。

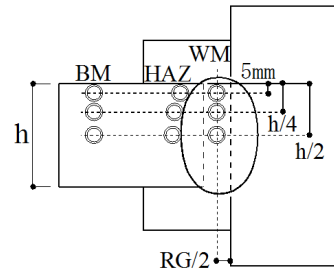


図-3 試験片採取位置

表-4 引張試験結果

ダイアフラム 板厚 h	採取位置		降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
	部位	板厚方向			
60mm	Depo	h/2	452	634	26
		h/4	447	637	25
		表面 5mm	470	649	24
	HAZ	h/2	300	507	32
		h/4	296	510	41
		表面 5mm	292	512	39
	BM	h/2	365	534	33
		h/4	418	567	34
		表面 5mm	495	619	32
母材全厚		417	593	51	
45mm	Depo	h/2	475	643	27
		h/4	470	649	26
		表面 5mm	478	651	21
	HAZ	h/2	311	520	40
		h/4	303	517	41
		表面 5mm	305	518	40
	BM	h/2	401	558	34
		h/4	465	600	33
		表面 5mm	531	651	28
母材全厚		475	620	49	

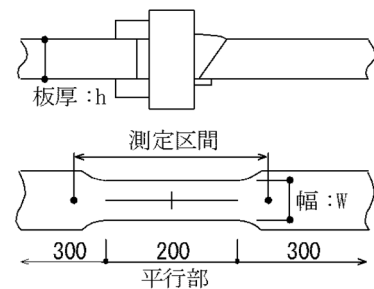


図-4 継手引張試験片の形状・寸法

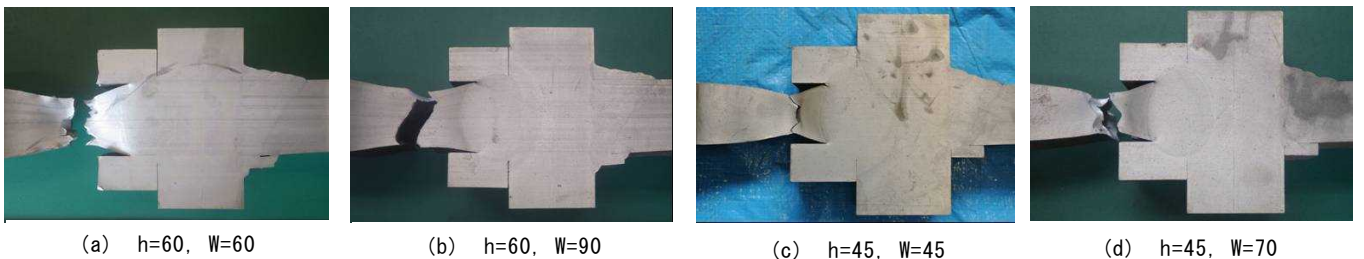


写真-2 破壊状況

いずれもダイアフラム母材全厚の引張強度を下回っているが、幅厚比 W/h が大きくなるに従い、継手強度が大きくなっており、板厚 $h=60\text{mm}$ の場合は、 W が h の 2.0 倍程度で、板厚 $h=45\text{mm}$ の場合は W が h の 2.5 倍程度で継手強度が母材全厚強度を超えることが予想される。また、板厚 $h=60\text{mm}$ と 45mm を比較すると、前項で求めた低強度部の相対厚さ (X_h) が大きい継手の場合 (45mm の場合 $X_h \approx 0.45$ であった)、十分な塑性拘束効果が得られる試験体の幅厚比は大きくなることわかる。

5. まとめ

ボックス柱の内ダイアフラム ESW 継手部を対象に、HAZ 軟化部の継手強度への影響を定量的に把握するため、実験的検討を行った結果、軟化部を含む継手の強度を類推するための、以下の結果が得られた。

①軟化部の相対厚さ X_h (=軟化部の幅/板厚) はダイアフラム板厚 60mm に対しては $X_h \approx 0.40$ 、板厚 45mm に対しては $X_h \approx 0.45$ であった。

②軟質度 S_r (=軟化部の引張強さ/母材の引張強さ) は $S_r=0.95 \sim 0.80$ であった。

③ESW 部の継手強度は板厚 $h=60\text{mm}$ の場合は、板厚の 2.0 倍程度で、板厚 $h=45\text{mm}$ の場合は板厚が 2.5 倍程度で母材全厚強度を超えることが予想される。

なお、本実験は限られた条件、範囲で行われた結果であるので、基準化のためには十分な実験データの蓄積が必要であると考えられる。

謝辞

本研究は森田耕次千葉大学名誉教授、川岸工業(株)、JFE スチール(株)、(株)駒井ハルテックとの共同研究として実施したものであります。ここに紙面を借りて関係された方々に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 大畑充：溶接継手強度の基礎，溶接学会誌，第 77 巻，第 7 号，pp.678-684,2008
- 2) 新富達也，竹士伊知郎，橋本義和，大畑充，望月正人，豊田政男：溶接 HAZ 軟化が継手強度に及ぼす影響に関する検討—細粒鋼溶接継手の変形ならびに強度特性に関する研究（第 1 報）—，溶接学会論文集，Vol.21，No.3,pp.397-403,2003

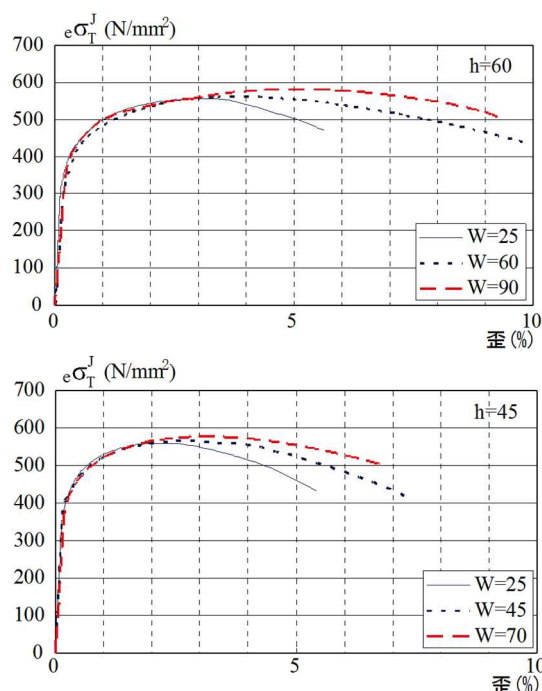


図-5 継手強度（応力-歪）

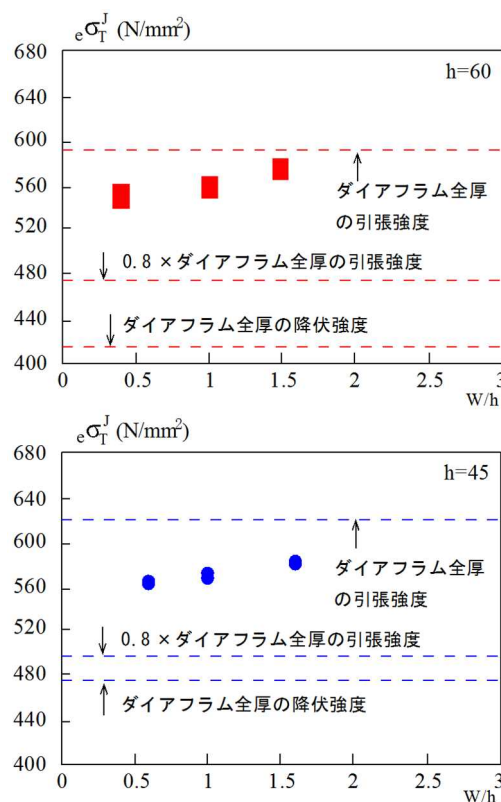


図-6 継手強度（応力-継手幅比）