

「J-STAR[®] Welding」による建築鉄骨の狭開先溶接接合

Narrow Gap Joint by “J-STAR[®] Welding” for Steel Structures

中川 郷司 NAKAGAWA Satoshi JFE スチール 建材センター 建材技術部 主任部員(課長)
石井 匠 ISHII Takumi JFE 技研 土木・建築研究部 主任研究員(課長)・博士(工学)
下川 弘海 SHIMOKAWA Hiroumi JFE スチール 建材センター 建材技術部 主任部員(課長)・博士(工学)

要旨

J-STAR[®] Welding は REM (rare earth metal) 添加ワイヤを用いた棒マイナスの CO₂ 溶接であり、極低スパッタと深い溶込みを特徴とする。従来の CO₂ 溶接では一般にレ形 35° 開先が用いられているのに対し、J-STAR Welding ではレ形 25° 開先や I 開先などの狭開先溶接が可能となる。この狭開先溶接を対象に、各種実験を行い溶接接合部の構造性能を調査した。実験の内容は、パス間温度を変化させた溶接金属の機械的性質の調査、実大規模の突合せ溶接継手の引張実験、柱梁接合部および柱接合部の載荷実験である。これらの実験により、J-STAR Welding を用いた狭開先溶接接合部が建築鉄骨として十分満足できる構造性能を有していることを確認した。

Abstract:

The J-STAR[®] Welding is performed with an electrode negative polarity using the wire added rare earth metal in CO₂ gas shielded arc welding to reduce spatter and deep penetration. This welding enables narrow gap welding such as 25° single bevel groove and square groove, while normal CO₂ arc welding generally adopts 35° single bevel groove. Several experiments were conducted to investigate the structural performance of the narrow gap welded joint: a series of the tensile tests of weld metals under the different interpass temperature levels, and loading tests of structural members with welded joint, for example beam-column joints and butt joints modeled on a beam flange. It was confirmed that the narrow gap welded joint with J-STAR Welding showed sufficient structural performance.

1. はじめに

J-STAR[®] Welding は、微量の REM (rare earth metal: 希土類元素) を添加した Si-Mn-Ti 系ワイヤを用いるとともに、極性を従来とは逆の棒マイナスとする CO₂ アーク溶接法であり、溶滴の微細スプレー移行の実現により、スパッタ発生量の大幅な低減と深溶込みが得られる¹⁻³⁾。この J-STAR Welding を用いれば、レ形 25° 開先や I 形開先といった狭開先の溶接が可能になり^{4,5)}、溶接時間の短縮や付着スパッタ除去作業の軽減など、溶接施工の効率化が期待できる⁶⁾。特に超高層ビルの鉄骨では使用鋼材の板厚が大きいことから、一般的に採用されているレ形 35° 開先の溶接と比べて溶接材料と溶接施工時間を大幅に削減できる。

筆者らは、J-STAR Welding による狭開先溶接接合部（以下、J-STAR 狭開先溶接）の品質および構造性能を明らかにするため、溶接金属の機械的性質の調査や溶接接合部に関する各種の構造実験を行った。本報告では、これらの実験

結果を紹介する。

2. 溶接金属の機械的性質

2.1 試験内容

異なるパス間温度で施工した狭開先溶接継手について、溶接金属の引張試験とシャルピー衝撃試験を実施した^{7,8)}。

継手の溶接に用いたワイヤは、JIS Z 3312 の YGW11 に適合する 490 N/mm² 級鋼用の J-STAR Welding ワイヤ (KC-500) であり、供試鋼板は板厚 25 mm の JIS G 3136 SN490B を用いた。表 1 にワイヤの化学成分を、表 2 の (a) に供試鋼板の機械的性質を示す。

継手の種類は表 3 に示すとおりであり、I 形開先 - Gap5 mm とレ形 25° 開先 - Gap2 mm の突合せ継手では 150℃、250℃、350℃ の 3 水準のパス間温度、レ形 25° 開先 - Gap2 mm の T 継手については 350℃ のパス間温度とした。溶接は自動溶接機 (ロボット) を用いた往復溶接とし、入熱は I 形開先で 6~10 kJ/cm、レ形開先で 6~30 kJ/cm である。また、パス間温度は溶接長の中央で開先面から 10 mm 離れた鋼板表面で測定した。

表 2 試験体鋼材の機械的性質

Table 2 Mechanical properties of steel used for specimens

Group	Member	Specification	Size (mm)	Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Yield ratio (%)	Absorbed energy at 0°C (J)
(a)	Plate	SN490B	25	362	521	30	69	294
(b)	Plate	SN490B	25	358	526	29	68	225
		SN490C	25	356	527	28	68	208
		SN490C	28	369	538	32	69	216
(c)	Beam flange	SN490B	25	362	521	30	69	249
	Beam web	SN490B	12	341	513	27	66	—
	Column	BCR295	□-400×16	371	445	44	83	226
	Diaphragm	SN490C	28	369	538	32	69	216
(d)	Column (Flat)	BCP325	□-400×25	362	528	28	69	193
	Column (Corner)			433	558	29	78	115

表 1 溶接ワイヤの化学成分

Table 1 Chemical composition of welding wire

(mass%)						
C	Si	Mn	P	S	Ti	Others
0.05	0.7	1.5	0.01	0.01	0.2	REM

REM: Rare earth metal

表 3 溶接継手の種類

Table 3 Types of welded joint

No.	Interpass temperature	Groove shapes
1	150°C	
2	250°C	
3	350°C	
4	150°C	
5	250°C	
6	350°C	
7	350°C	

引張試験片は JIS Z 3111 の A2 号試験片 (6φ) とし、板厚 1/2 位置から採取した。また、シャルピー衝撃試験片は V ノッチ (2 mm) 試験片とし、板厚 1/2 位置で破断面が溶接金属のほぼ中央になるように採取した。

2.2 継手の溶接結果

外観検査および断面マクロ試験を行った。写真 1 に、代表例としてパス間温度 350°C の継手の断面マクロを示す。いずれの継手においても溶接欠陥や溶込み不良は認められなかった。

このほか、固形エンドタブを用いた異幅の溶接継手を製作し、溶接部表面および端部の外観検査、放射線透過試験、始末端の 3 面マクロ試験、裏曲げ試験を実施して溶接部の品質を調査した。溶接始末端の固形エンドタブには溶接金属との接触面をフラットに加工したセラミックスを用い、溶接入熱 30 kJ/cm 以下、パス間温度 250°C 以下、溶接姿勢は下向きとした。調査結果の一部として溶接端部の外観を写真 2 に示す。いずれの試験においても有害な欠陥は認め

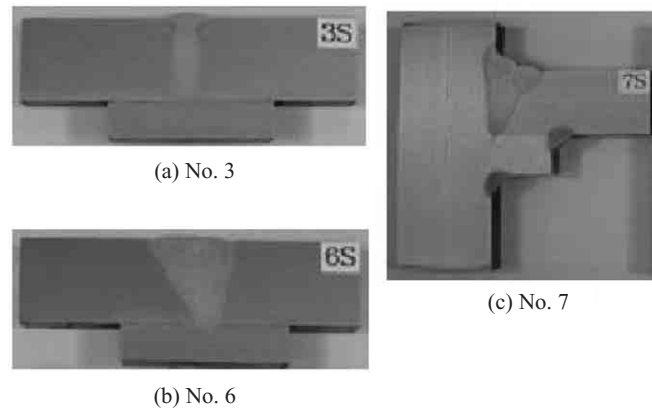


写真 1 溶接継手の断面マクロ組織

Photo 1 Macrostructures of welded joints

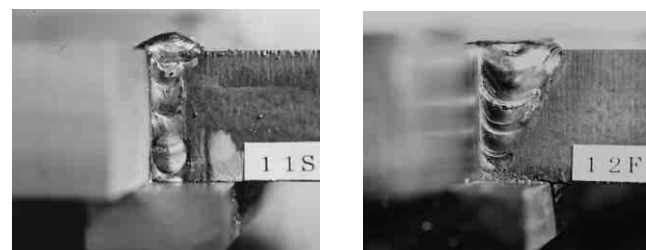


写真 2 固形エンドタブを用いた継手の溶接部外観

Photo 2 Weld bead appearance of welded joints used ceramic tab

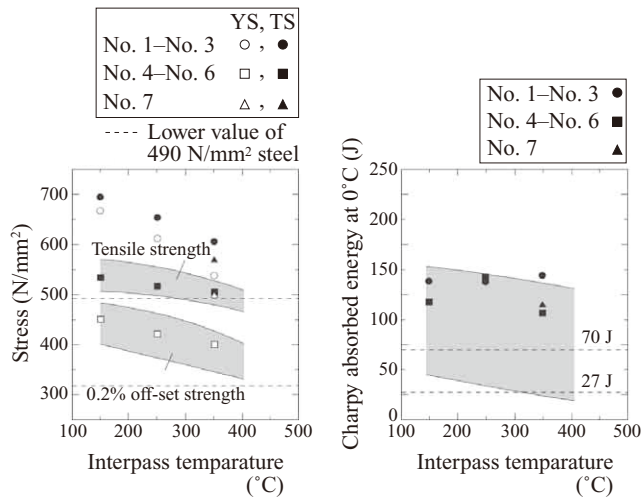


図1 溶接金属の強度およびシャルピー衝撃値
Fig.1 Strength and Charpy impact value of weld metal

られず、J-STAR 狭開先溶接の健全性が確認できる結果となった。

2.3 溶接金属の強度・靱性

溶接金属の引張試験およびシャルピー衝撃試験（0°C）結果とパス間温度の関係を図1に示す。図中のハッチ部は従来のCO₂溶接を用いたレ形35°開先継手の実験結果⁹⁾（ワイヤ YGW11, 板厚 25 mm, 溶接入熱 40 kJ/cm）の範囲を示したものであり、破線は 490 N/mm² 鋼規格の強度下限値および文献 10) で示される継手破断耐力の靱性指標であるシャルピー衝撃値 27 J, 70 J を示している。いずれの溶接継手においても溶接金属の強度は母材（SN490B）の強度を上回り、従来のCO₂溶接と同様にパス間温度の上昇とともに降伏点、引張強さも低下する傾向を示した。また、I形開先の突合せ継手およびレ形開先のT継手は、レ形開先の突合せ継手よりも高い強度を示した。これはI形開先の入熱が小さいことやT継手の冷却速度が大きいことが理由としてあげられる。一方、溶接金属のシャルピー衝撃値はパス間温度の影響が小さく、いずれの継手においても高位に安定した結果が得られた。

3. 溶接継手の引張実験

3.1 実験方法

角形鋼管柱とH形鋼梁の仕口部を想定した実大規模の継手引張実験を行い、J-STAR 狭開先溶接継手の性能確認を行った。

表4に試験体一覧を、図2に試験体の形状を示す。試験体は通しダイアフラム形式の柱梁接合部をモデル化した突合せ溶接継手であり、梁フラジ材軸方向の応力勾配を想定し、溶接部近傍にて破断するようにテーパを設けた¹¹⁾。

継手タイプは、梁フランジ厚と通しダイアフラム厚が等しい「同厚継手」、梁フランジ厚より通しダイアフラム厚が大きい「異厚継手」の2種類とした。開先形状はI形開先-Gap5 mm, レ形25°開先-Gap2 mmで、同厚継手については比較のためレ形35°開先-Gap7 mmの実験も行った。溶接姿勢は主に下向きとしたが、同厚継手のレ形25°開先-Gap2 mmについては横向き溶接も実施した。

試験体に用いた鋼板は 490 N/mm² 級鋼であり、その機械的性質を表2の(b)に示す。溶接は KC-500 を用いた J-STAR Welding であり、溶接入熱は I 形開先で 6~10 kJ/cm, レ形開先で 6~30 kJ/cm, パス間温度は 250°C 以下とした。また、溶接始末端は、機械加工により 10 R 仕上げとした。

载荷試験は、試験体の温度を 0°C に保ち、静的引張载荷（目標速度：0.03 mm/s）を行った。なお、試験体の保冷は、

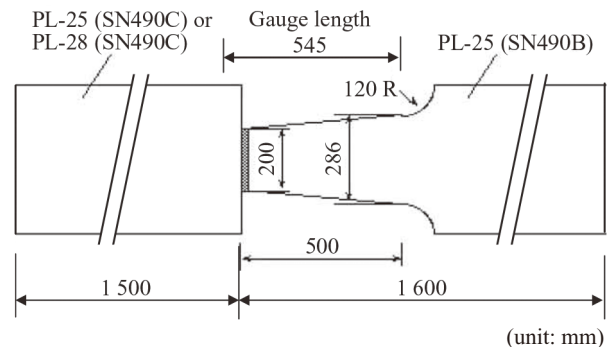


図2 継手引張試験体形状
Fig.2 Measurement of specimen for tensile joint test

表4 継手引張試験体一覧
Table 4 Specimens for tensile test of welded joint

Number	Jointed plate Specification: Thickness (mm)	Groove shape	Gap (mm)	Welding position
1	SN490C: 25+SN490B: 25	Square	5	Flate
2		Single bevel 25°	2	
3		Single bevel 35°	7	
4	SN490C: 28+SN490B: 25	Square	5	Flate
5		Single bevel 25°	2	
6	SN490C: 25+SN490B: 25	Single bevel 25°	2	Horizontal

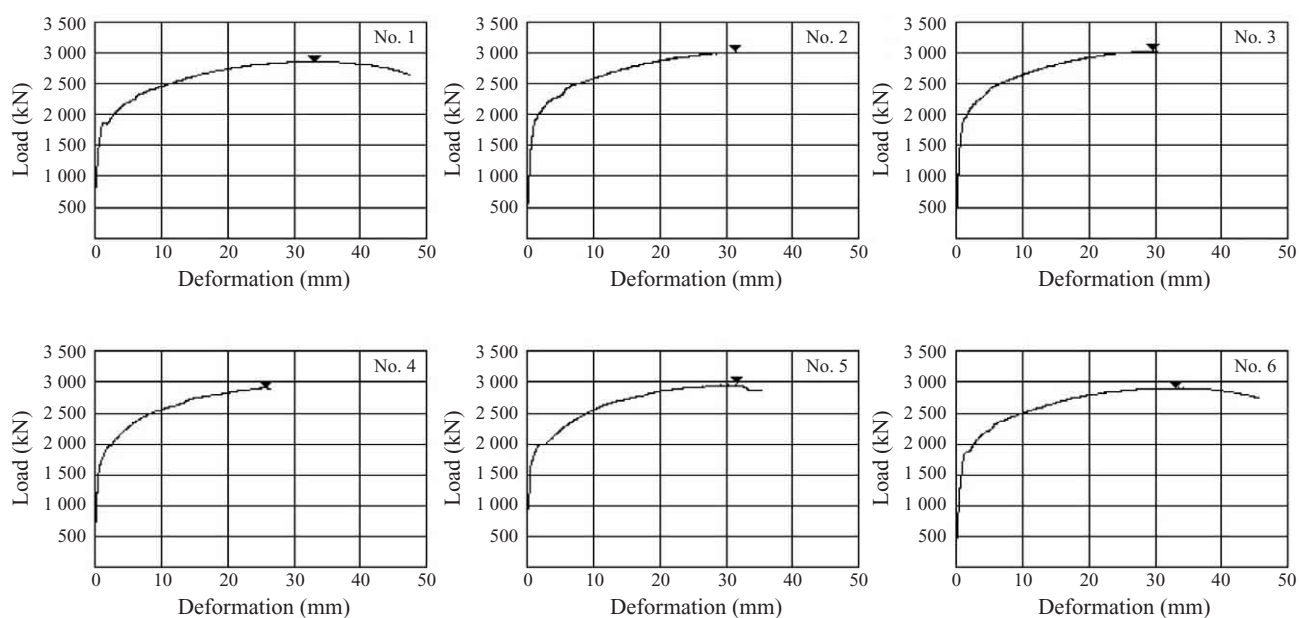


図3 継手の荷重 - 変形関係

Fig.3 Relations between load and deformation of joint

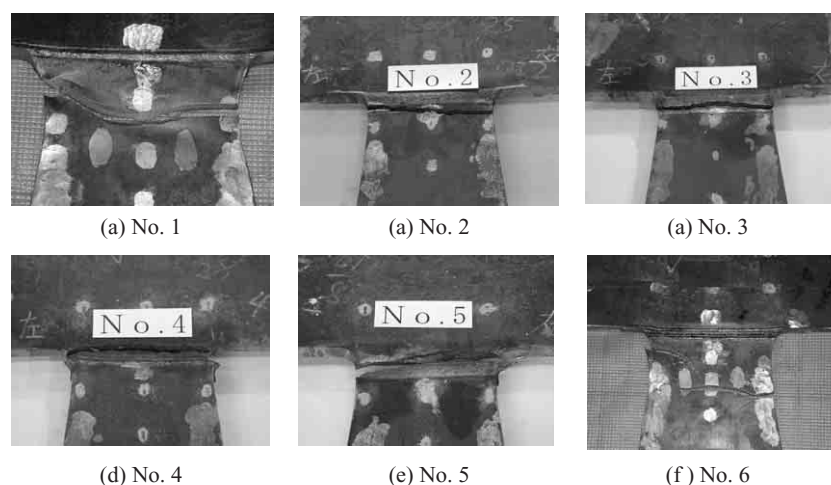


写真3 継手の破断状況

Photo 3 Appearances of fractured joint

試験対象部分に冷却ボックスを取り付け、液体窒素を適量送給し温度を保持した。変位の測定は継手の両側面で行い、標点間距離は図2に示すようにダイアフラム溶接部を含む545 mmとした。

3.2 実験結果

実験結果として、引張試験から得られた荷重 - 変形関係を図3に、各試験体の破断状況を写真3に示す。なお、図3中の▼印は最大耐力 P_{max} を示している。

No. 1, No. 6 試験体は梁フランジ幅端部の母材から延性き裂が発生し、その後脆性破壊に転化して破断に至った。No. 2, No. 3 および No. 4 試験体は梁フランジ幅端部の溶接初層部で、No. 5 試験体は梁フランジ幅中央部の溶接初層部で、それぞれ脆性き裂が発生し、き裂が伝播して破断

に至った。

最大耐力を継手の断面積（破断面）で除した最大応力は、いずれの試験体も梁フランジの素材試験から得られた引張強さの約 1.1 倍であるほか、継手全体として十分な塑性変形を示しており、鉄骨における梁フランジ溶接継手として問題のない構造性能を有している。

4. 鉄骨部材の載荷実験

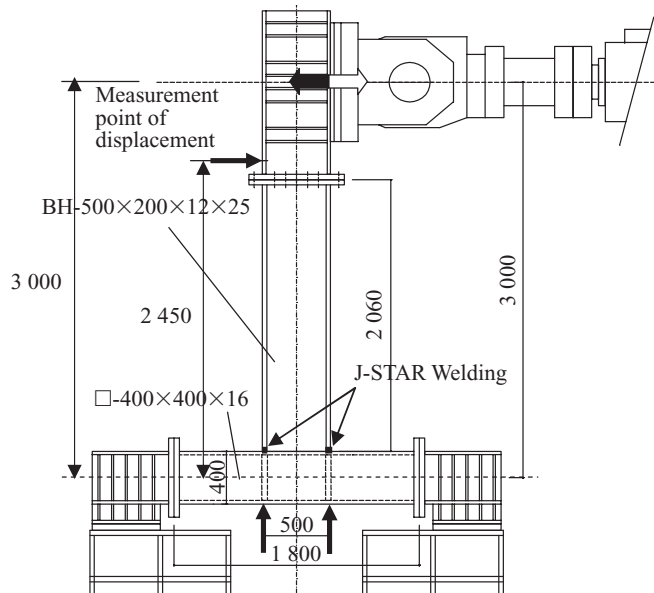
4.1 実験方法

J-STAR 狭間先溶接接合部を有する鉄骨部材の載荷実験を行い、構造部材としての接合部性能を調査した。実験内容は、柱梁接合部の曲げ実験^{6,8)}と柱曲げ実験⁷⁾の2種類とし、前者は梁フランジとダイアフラムの接合部に、後者

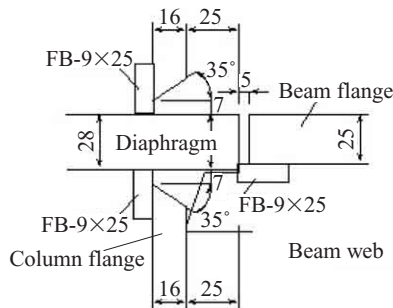
は角形鋼管柱とダイアフラムの接合部にJ-STAR狭開先溶接を適用した。

4.1.1 柱梁接合部実験

試験体形状および荷重装置の概要を図4に示す。試験体は、柱にBCR295、梁にSN490Bの溶接組立H形鋼を用い、梁端接合部はノンスカラップ工法とした。梁フランジと



(a) Specimen and loading set-up



(b) Detail of beam-column joint
(unit: mm)

図4 柱梁接合部試験体

Fig.4 Specimen of beam-column

ダイアフラムの溶接は、J-STAR WeldingによるI開先-Gap5 mmの狭開先溶接を適用し、溶接条件は入熱25 kJ/cm以下、パス間温度250℃以下である。試験体に使用した鋼材の機械的性質は表2の(c)に示す。

荷重試験は、試験体の柱端部を高力ボルト接合し、梁端部に交番繰返し荷重を与えた。なお、柱梁接合部は冷却ボックスで囲み、液体窒素を送り込むことで試験温度を0℃に保持した。

4.1.2 柱曲げ実験

試験体は、図5に示すように中央部に通しダイアフラムを溶接した3点曲げ試験体であり、柱は幅厚比区分がFAランクのBCP325、□-400×25を用いた。鋼材の機械的性質は表2の(d)に示す。通しダイアフラムとコラムの溶接は、J-STAR Weldingによるレ形25°開先-Gap2 mmの狭開先溶接であり、入熱25 kJ/cm以下、パス間温度250℃以下とした。なお、試験体は、製作の都合により長さ200 mmの短尺コラムとダイアフラムを溶接した後、短尺コラムにシャフトコラムを溶接（レ形35°YGW-18を用いた半自動溶接）した。

荷重方法は、試験体を支点間距離5 mで両端ピン支持し、試験体中央部に正負交番繰返し荷重を行った。

4.2 実験結果

4.2.1 柱梁接合部実験

柱梁接合部実験の結果のうち、全塑性耐力 M_p で無次元化した梁端フェースモーメント (M/M_p) と梁端相対変形角 θ の関係を図6に示す。試験体は、 $\pm 6\theta_p$ ($\theta_p: M_p$ に対応する弾性変形角) の1サイクル目の荷重まで安定した紡錘形の履歴特性を示したが、 $6\theta_p$ の2サイクル目の正側荷重時に梁フランジが脆性破断した。破断の起点は梁のフランジとウェブの交差部であり、延性き裂は観察されなかった。一方、梁端フランジの狭開先溶接部には、始末端部において延性き裂が確認された以外の損傷は認められなかった。

また、試験体の変形能力は、全体の履歴曲線から求めた

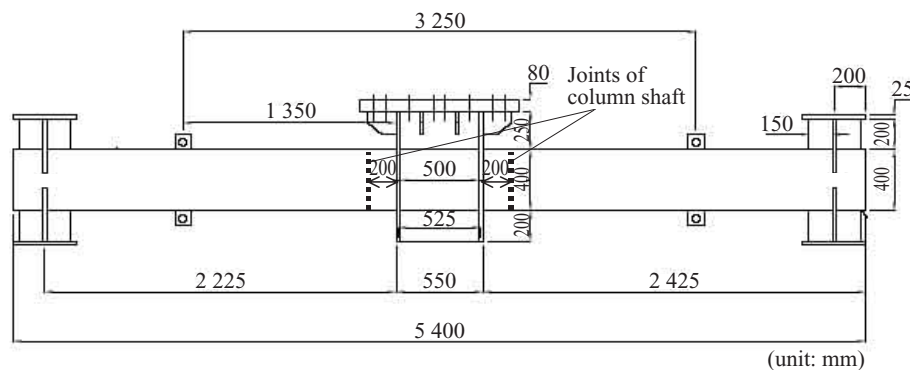


図5 柱曲げ試験体

Fig.5 Specimen of bending for column

表5 技術性能証明における J-STAR狭開先溶接の適用条件

Table 5 Applicable condition of J-STAR narrow gap welding on “Assessment of technology for building construction”

Type of penetration	Groove type	Backing	Welding method	Welding position	Applicable plate thickness, T	Tensile strength of welded steel
Full Penetration	Single bevel 25° /Gap 2 mm	Existing	Semi-automatic welding and Robotic welding	Flate and Horizontal	$6 \text{ mm} \leq T \leq 40 \text{ mm}$	$\leq 490 \text{ N/mm}^2$
	Square/Gap 5 mm	Existing	Robotic welding	Flate	$6 \text{ mm} < T \leq 25 \text{ mm}$	

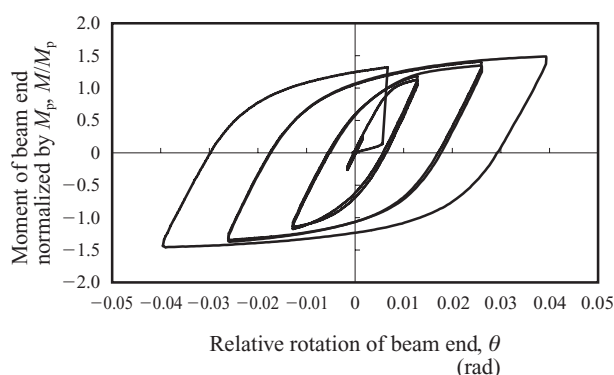


図6 柱梁接合部試験体の履歴性状

Fig.6 Hysteretic curve of beam-column joint

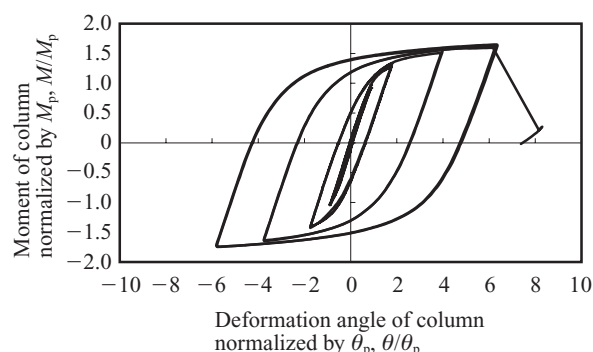


図7 柱曲げ試験体の履歴性状

Fig.7 Hysteretic curve of column-diaphragm joint

累積塑性変形倍率（正負方向の合計） η_A が 47、骨格曲線から求めた累積塑性変形倍率（正負方向の合計） η_S が 19 であり、建築鉄骨の耐震設計上、塑性変形能力を期待する骨組に必要とされる変形倍率¹²⁾ ${}_{\text{req}}\eta_A \geq 10$, ${}_{\text{req}}\eta_S \geq 5$ （いずれも破断した載荷方向の値）を十分満足する結果となった。

4.2.2 柱曲げ実験

柱曲げ実験の結果として、図7にコラムの全塑性モーメント M_p とこれに対応する弾性変形角 θ_p で無次元化した荷重-変形関係を示す。試験体は $\pm 6\theta_p$ までの変形に耐えており、履歴ループも紡錘形の安定した形状となっている。なお、破断は試験体製作の都合で設けた柱シャフトの溶接部で発生しており、実験対象とした狭開先溶接部では破断しなかった。

累積塑性変形倍率 η_A は 93 であり、既往のコラム実験のデータ¹³⁾ と比較しても遜色のない結果である。今回の破断

部位が、調査対象であるダイアフラムとコラム溶接部ではなかったことを考慮すれば、J-STAR 狭開先溶接を用いた継手は十分な変形能力を有しているといえる。

5. J-STAR 狭開先溶接の施工指針

建築鉄骨工事における CO_2 溶接の突合せ溶接では、一般にレ形 35°-Gap7 mm の開先が用いられている。一方、J-STAR Welding は、これまでに述べたようにレ形 25° 開先-Gap2 mm や I 形開先-Gap5 mm の狭開先溶接が可能であり、建築鉄骨の溶接接合部として十分な性能を有している。そこで、J-STAR 狭開先溶接について第三者による技術評価を得るために、財団法人日本建築総合試験所の建築技術性能証明（以下、技術性能証明）を 2007 年 5 月に取得した。

技術性能証明の適用範囲を表5に示す。レ形 25° 開先の適用板厚については、施工実験で確認した最大板厚が 40 mm までであったことや技術性能証明取得の目的が中小規模の建築鉄骨製作における技術整備であったため 40 mm 以下としているが、溶接技術としては特に板厚に制限があるわけではない。一方、I 形開先については、安定したアーク形態が得られるワイヤの突出し長さ 30 mm 以下となる板厚 25 mm 以下を対象とした。

また、具体的な開先寸法（限界許容寸法）は、レ形開先では開先角度 23° 以上、ルート間隔 1.5 mm 以上、ルート面 2 mm 以下であり、I 形開先ではルート間隔 4.5 mm 以上である⁶⁾。

6. おわりに

J-STAR® Welding による狭開先溶接について、溶接金属の機械的性質の調査、実大規模の突合せ溶接継手の引張実験、柱梁接合部と柱接合部の載荷実験を行い、J-STAR 狭開先溶接接合は従来の CO_2 溶接接合同様に、健全で建築鉄骨として十分な性能を有していることが確認できた。

参考文献

- 1) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一. 溶接学会講演概要集, 2004, 第 75 集, p. 250-253.
- 2) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一. 溶接技術, 2005, vol. 53, no. 3, p. 64-69.

- 3) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一, 平田好則. 溶接学会論文集. 2008, vol. 26, no. 1, p. 37-41.
 - 4) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一. 溶接学会講演概要集. 2006, 第78集, p. 136-137.
 - 5) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一. 溶接学会講演概要集. 2006, 第79集, p. 110-111.
 - 6) 片岡時彦, 中川郷司, 石井匠. JFE 技報. 2007, no. 18, p. 41-46.
 - 7) 石井匠, 中川郷司, 片岡時彦, 池田倫正. 溶接学会講演概要集. 2007, 第80集, p. 92-95.
 - 8) 中川郷司, 石井匠, 片岡時彦. 日本建築学会大会学術講演梗概集. 2007, 九州, p. 851-854.
 - 9) 向井昭義, 中野利彦, 岡元晴仁, 森田耕次. 日本鋼構造協会鋼構造論文集. 2000, vol. 7, no. 26, p. 13-25.
 - 10) 鉄骨梁端溶接接合部の脆性的破断防止ガイドライン・同解説. 日本建築センター. 2003-9, p. 5-9.
 - 11) 鈴木孝彦, 石井匠, 森田耕次, 高梨晃一. 日本鋼構造協会鋼構造論文集. 1999, vol. 6, no. 23, p. 149-164.
 - 12) 鋼構造接合部の力学性状に関する研究の現状. 日本建築学会. 1993-10, p. 126-134.
- 13) 冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル (改訂版). 日本建築センター. 2003-09, p. 69-70.



中川 郷司



石井 匠



下川 弘海