

耐破断性に優れた溶接接合法「NBFW[®] 法」

NBFW[®] (Non Brittle Fracture Welding) Method, Preventing Joint Part of Structural Members from Occurring Early Brittle Fracture

木下 智裕 KINOSHITA Tomohiro JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部 主任研究員 (副課長)
村上 行夫 MURAKAMI Yukio JFE スチール 建材センター 建材開発部 主任部員 (課長)
松井 和幸 MATSUI Kazuyuki (株) セイケイ 執行役員 (常務)

要旨

NBFW[®] 法は、母材側にオーバーラップさせたビード (ビード U) とその上に積層した再熱ビード (ビード T) を設けることにより、表層における溶接止端部 HAZ (熱影響部) の材質改善と、き裂を母材側に誘導することによる早期の脆性破断発生の危険性を減じることができる。柱-ダイアフラム溶接部および梁端溶接部に NBFW[®] 法を適用した部材による構造実験を実施し、早期に脆性破断することなく良好な変形性能が発揮されることを確認した。また、実験を模擬した FEM (有限要素法) 解析により、表層 HAZ における相当塑性ひずみが緩和されることを明らかにした。

Abstract:

Application of NBFW[®] (Non Brittle Fracture Welding) method which provides overlapped bead to base metal, bead U, and temper bead T to weld joint part makes it possible to improve the quality of surface heat affected zone (HAZ) and plastic deformability by leading the crack to the base metal. This paper gives the outline of loading test of column-diaphragm member specimen and column-beam member specimen in which NBFW[®] is applied to weld joint parts. It was verified that applying the NBFW[®] leads good deformability without early brittle fracture. Also by finite element method (FEM) analysis it was verified that NBFW[®] decreases the effective strain on surface HAZ.

1. はじめに

建築鉄骨構造では、大地震に対して設計で想定したよりも早期に (部材変形量が小さいうちに) 崩壊することなく、塑性変形などによって適正に地震エネルギーを吸収することが求められる。そのためには、鉄骨部材同士の接合部、特に溶接接合部における早期の脆性破断発生を防止する必要がある。

一般に、溶接施工に際して形成される熱影響部 (HAZ) の一部組織では、強度が高く靱性・延性の低い脆化組織が認められる。大地震などにより大変形が生じ、HAZ が存在する溶接止端部において延性き裂が発生すると、上記の脆化組織内をき裂が進展し、柱材としての本来の部材変形性能を発揮する以前に脆性破断が生じる危険性がある。したがって、良好な部材変形性能を確保するには、大地震等で柱鉄骨が塑性化したとしても、この HAZ の脆化組織にき裂を進展させないようにすることが有効である。

冷間プレス成形角形鋼管 (以下、プレスコラム) は、角部は常温で成形加工され、鋼材の加工硬化による強度上昇

や延性、靱性の低下および残留応力が発生するため、地震時の変形に対して早期にき裂が発生して脆性破断する危険性が指摘されている¹⁾。このため、プレスコラムを柱部材として適用するに際しては、構造設計時にダイアフラム形式ごとに規定された作用応力を割り増すこと (設計ペナルティ) が課せられている^{2,3)}。

本論では、主にプレスコラム-通しダイアフラム溶接継手を対象とし、溶接止端部 HAZ における材質改善と、母材へき裂進展を誘導して HAZ に沿った脆性破断を防止すべく開発された溶接積層法 NBFW[®] (Non Brittle Fracture Welding) 法について、その特徴および適用効果を概説する。また、角部における母材靱性を保証し、NBFW[®] 法を適用することで上記の設計ペナルティを免除された高性能プレスコラム G385T について、部材載荷実験結果と併せてその特徴を記す。さらに、梁端溶接部に NBFW[®] 法を適用した場合の効果についても実験・解析によって検証する。

2. NBFW[®] 法の概要と適用効果

1章で述べたように、建築鉄骨構造においては溶接接合部の早期脆性破断を防止することが耐震安全性の確保に直結

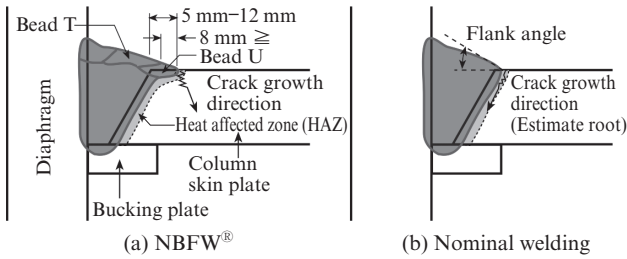


図1 NBFW®法の概要

Fig. 1 Outline of NBFW® method

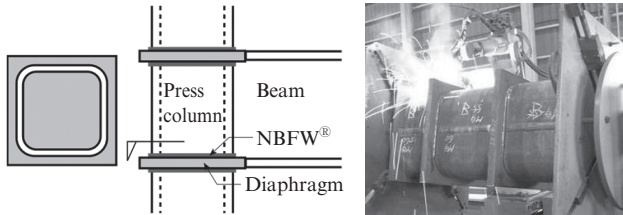


図2 通しダイアフラム継手

Fig. 2 Weld joint of diaphragm-press column

する。本章では、プレスコラムに対して脆性破断を防止するための溶接積層法として広く適用されているNBFW®法について概説する。なお、NBFW®法の詳細については文献4,5)に解説されているので別途参照されたい。

図1に従来溶接法とNBFW®法の概要を比較して示す。図1(b)に示すように、ビードUと称する開先面側表層に一定寸法張り出したビードを設け、その上にビードTと称する再熱ビードを積層していることを特徴とする。

まず、ビードUによって、脆化部を含むHAZおよび融合部(FL)が一直線ではなくなり、表層HAZに生ずるき裂の伝播経路が複雑化されることで、き裂が母材へ流れやすくなる。母材の靱性が一定以上(一般には0°Cにおけるシャルピー吸収エネルギー70J以上が目安となる)確保されている場合には、早期の脆性破断発生の危険性が低減される。さらに、フラック角(溶接最終層と母材表面のなす角)を小さく管理しやすく、表層HAZ, FLが従来溶接に比べて作用モーメントが最大となる位置より若干離れることから、表層HAZにおける応力、ひずみ集中の低減も期待できる。また、ビードTによって、ビードUおよび溶接部止端(表層HAZ)が再熱され、組織が微細化することで靱性改善効果が見込まれる。

ただし、上述の効果を最大限発揮させるためには、ビードUおよびビードTはその寸法は図1に示される範囲で、溶接入熱とパス間温度は下記の条件にて適切に管理し、最終層は3パス以上に分けて施工しなければならない⁵⁾。

ビードU: 入熱 15~22 kJ/cm, パス間温度 250°C以下

ビードT: 入熱 15~25 kJ/cm, パス間温度 250°C以下

前述のように、NBFW®法はプレスコラム-通しダイアフラム継手において広く適用されており、その溶接は鉄骨製作

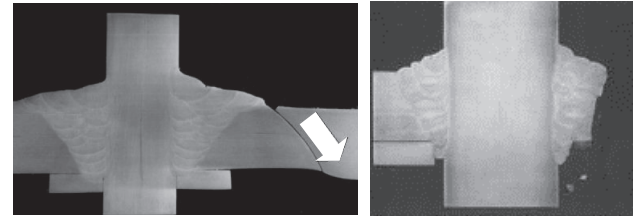


写真1 破断状況の比較

Photo 1 Compare with state of fracture

工場にて溶接ロボットにより施工されるのが一般的である(図2参照)。上述の施工条件を満足するよう積層パターンがロボットメーカーによってプログラム化されており⁶⁾、安定して適正に施工することが可能となっている。

写真1は、通しダイアフラムを有するプレスコラム部材の载荷実験における終局状態を示すものであり、プレスコラム角部における通しダイアフラム継手における破断状況を表している。写真1(a)はNBFW®法による試験体であり、表層HAZより生じた延性き裂が母材側に進展した状況を表している。写真1(b)は従来溶接による試験体であり、HAZに沿って脆性的に破断した事例である。その他、文献7~9)などにてNBFW®法をプレスコラム-通しダイアフラム継手に適用した部材による载荷実験結果が報告されているが、いずれも最終破断状況は写真1(a)と同様に母材にき裂が進展しており、HAZに沿った脆性破断発生事例は報告されていない。

3. 高性能プレスコラムによる構造実験・解析

3.1 高性能プレスコラム

文献2)では、プレスコラムを含む冷間成形角形鋼管柱では、冷間加工による材質劣化を考慮し、構造設計時に作用応力割増係数を乗じて安全率を見込むこと(設計ペナルティ)が求められている。一方、溶接四面BOXや熱間成形角形鋼管については設計ペナルティが不要もしくは低減されることから、部材断面が剛性ではなく耐力によって決定付けられる場合には冷間成形角形鋼管は不利になる。一方、文献10)などで、角部にある程度の靱性があれば、冷間成形角形鋼管も同じ幅厚比の溶接四面箱形断面材と同等以上の塑性変形能力を有するという実験結果が報告されている。

そこで、NBFW®法を適用して表層HAZからのき裂を母材へ誘導することと、化学成分を最適化することで良好な母材角部の靱性を確保・保証(0°Cにおけるシャルピー吸収エネルギー70J以上)することにより、設計ペナルティを免除することが認められたプレスコラム(以下、高性能プレスコラム)が開発されている。表1に(株)セイケイ-JFEスチールのプレスコラム製品(建築構造用鋼材として国土交通大臣認定を取得したもの)の規格一覧を示す。そのうち、

表1 プレスコラムの規格一覧 ((株) セイケイ, JFE スチール)
Table 1 Spec of press column (Product by SEIKEI Column Corp. and JFE Steel)

Designation	Mechanical properties							Chemical composition (mass%)					
	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	YR (%)	El			RA (%)	\sqrt{E} (J)	P	S	C _{eq}	P _{CM}	f _{HAZ}
				t (mm)	Test piece	(%)							
BCP235	235-355	400-510	≤80	12	JIS 1A	18≤	—	27*1≤ (0°C)	≤0.030	≤0.015	≤0.36	≤0.26	—
BCP235C				12<t≤16		22≤	25≤Ave. 15≤Each		≤0.020	≤0.008			
BCP325	325-445	490-610	≤80	12	JIS 1A	17≤	—	27*1≤ (0°C)	≤0.030	≤0.015	≤0.44	≤0.29	—
BCP325C				12<t≤16		21≤	25≤Ave. 15≤Each		≤0.020	≤0.008			
BCP325T	325-445	490-610	≤80	12≤t≤16	JIS 1A	17≤	—	70*2≤ (0°C)	≤0.020	≤0.005	≤0.44	≤0.29	≤0.58
				16<t≤40		21≤							
G385B	385-505	550-670	≤80	19≤t≤50	JIS 5	26≤	—	70*1≤ (0°C)	≤0.030	≤0.015	≤0.40	≤0.26	≤0.58
G385C				JIS 4	20≤	25≤Ave. 15≤Each	≤0.020		≤0.008				
G385T	385-505	550-670	≤80	19≤t≤32	JIS 1A	15≤	—	70*2≤ (0°C)	≤0.020	≤0.005	≤0.40	≤0.26	≤0.52
				32<t≤40		16≤	25≤Ave. 15≤Each						
G385T-Z25				JIS 4	20≤								
G440B	440-540	590-740	≤80	19≤t≤32	JIS 1A	15≤	—	47*1≤ (-40°C)	≤0.030	≤0.008	≤0.44	≤0.22	—
				32<t≤40		16≤	25≤Ave. 15≤Each						
G440C				JIS 4	20≤								

YS: Yield strength TS: Tensile strength El: Elongation YR: Yield ratio \sqrt{E} : Charpy absorbed energy

RA: Reduction of area in through thickness tensile test

*1 Flat part *2 Flat part and corner part

Carbon equivalent: C_{eq} = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14

Weld crack sensitivity composition: P_{CM} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B

The HAZ toughness estimation parameter for MAG welding: f_{HAZ} = C + Mn/8 + 6(P + S) + 12N-4Ti (If the chemical composition of Ti ≤ 0.005%, it is regarded as zero.)

BCP325 T と G385T, G385T-Z25 が上記のプレスコラムに該当する。なお、BCP325T は一般社団法人日本鉄鋼連盟による共通規格材であり、G385T は (株) セイケイ, JFE スチールが開発し大臣認定を取得した個別規格材である。いずれの鋼種も最適な成分設計 (特にリン (P), 硫黄 (S) を低減), 最適な圧延条件を設定することで、母材の靱性を向上させるとともに、冷間加工部である角部靱性を高値に保証しており、NBFW[®] 法を適用することで設計ペナルティを免除することが認められている³⁾。ここでは、550 N/mm² 級高性能プレスコラムである G385T について、その荷重実験結果と FEM (有限要素法) 解析結果を以下にまとめる。

3.2 荷重実験結果

本節では G385T による通しダイアフラム継手を有する柱部材による構造実験結果について示す。表 2 に試験体一覧を、図 3 に試験体形状および荷重方法概要を示す。実験は両端単純支持で中央の通しダイアフラム-プレスコラム継手を荷重する 3 点曲げ実験である。荷重は正負交番の繰返し荷重とし、材端 (ここでは通しダイアフラム-コラム溶接部) が全塑性モーメントに達したときの部材変形角 θ_p を基準変位とし、 $\pm 0.5\theta_p \rightarrow \pm 1.0\theta_p \rightarrow \pm 2.0\theta_p \rightarrow \pm 4.0\theta_p \rightarrow \pm 6.0\theta_p \rightarrow \dots$ の

順に各振幅につき 2 サイクルずつ荷重した。

図 4 に実験結果を、写真 2 に荷重終了後の試験体の一例 (試験体 T2) を示す。ただし、図 4 の縦軸は累積塑性変形倍率 η であり、(1) 式で定義される指標である。

$$\eta = \Sigma W / (M_p \cdot \theta_p) \dots\dots\dots (1)$$

ΣW : 塑性ヒンジが吸収したエネルギー (kJ)

M_p : 対象部材の全塑性モーメント (kN・m)

θ_p : 対象部材の全塑性モーメント時の部材回転角 (rad)

横軸は幅厚比 D/t を鋼管平板部スキンプレートの引張試験結果による降伏耐力 σ_y で基準化した一般化幅厚比 α で整理している。

T1 試験体は局部座屈により耐力低下したため、最大耐力から耐力が 5% 低下した時点を終局としてデータを整理した。その他の試験体は、いずれもダイアフラム溶接部ピード止端から発生した延性き裂が鋼管母材側へ進展し、大きく塑性変形した後、破断した。これは「溶接 (熱影響) 部での破壊を防止して鋼管母材の性能を最大限に発揮させる」

表 2 G385T 曲げ試験体

Table 2 Bending specimens of G385T

No.	D (mm)	t (mm)	D/t	r (mm)	LD	M _p (kN・m)	θ _p (rad)
T1	450	19	23.7	66.5	45°	1 993	0.011 4
T2	500	32	15.6	112	45°	3 786	0.010 6
T3	500	32	15.6	112	45°	3 729	0.010 5
T4	400	32	12.5	112	45°	2 288	0.013 8
T5	500	32	15.6	112	0°	4 194	0.011 8
T6	500	32	15.6	112	45°	4 045	0.011 4
T7	600	32	18.8	112	45°	6 115	0.009 3

D: Width of cross-section t: Thickness of cross-section
 r: The outer diameter of the corner of square tube section
 LD: Loading direction M_p: Calculated full plastic moment
 θ_p: Calculated rotation angle at M_p
 *Column-diaphragm joint are all weld by NBFW[®] (Fig. 1(a)).

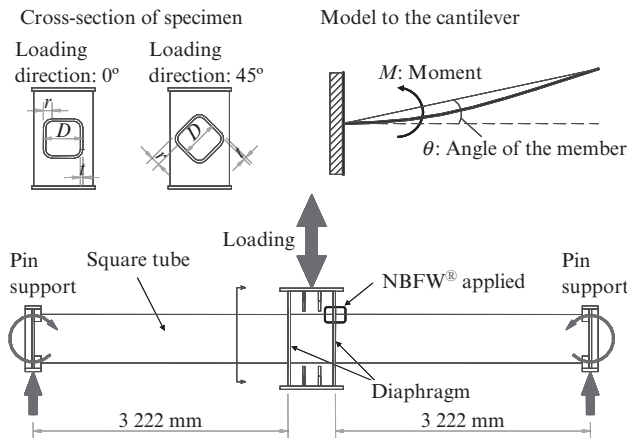


図 3 G385T の曲げ実験概要

Fig. 3 Overview of G385T bending test

という NBFW[®] 法で想定している破壊モードである。

以上の結果より、NBFW[®] 法を適用した G385T では、安定したエネルギー吸収能力が期待でき、早期に脆性破断することなく延性き裂を目標どおりに母材側に誘導できることが確認された。なお、G385T について、本節で述べた 3 点曲げ実験の他にも短柱圧縮実験や、耐火性能検証実験、CFT (Concrete filled tube) 柱の圧縮曲げ実験などの建築構造物の柱としての性能を検証した各種構造実験を実施しており、良好な結果が得られている。その成果は上述の 3 点曲げ実験結果詳細と併せて文献 11) にまとめられているので、別途参照されたい。

3.3 FEM 解析結果

3.2 節で述べた G385T による 3 点曲げ実験結果より、NBFW[®] 法を適用することで写真 2 に示すように想定どおりの破壊性状が得られ、良好な塑性変形性能が得られることが実証された。一方、NBFW[®] 法で期待した表層 HAZ にお

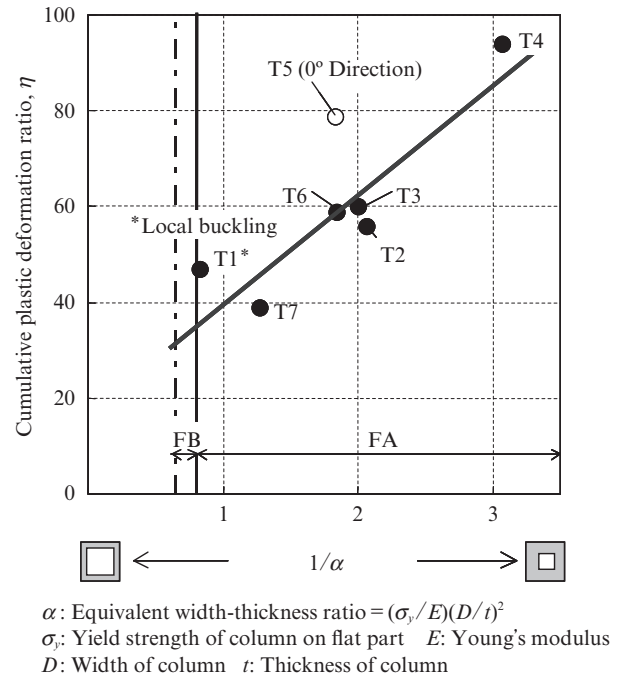


図 4 G385T の曲げ実験結果

Fig. 4 Result of G385T bending test

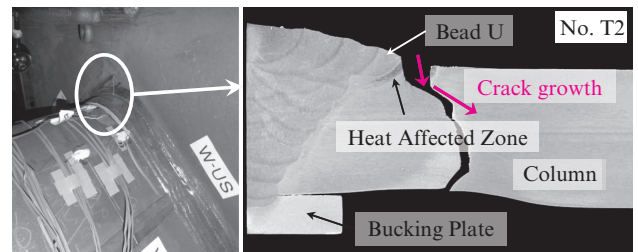


写真 2 载荷終了後の試験体 (T2)

Photo 2 Final state of specimen T2

ける応力・ひずみの集中緩和効果に関しては、実験で精緻に評価することは困難であることから、本節では、図 3 の 3 点曲げ実験をモデル化した FEM 解析によって NBFW[®] 法の適用効果を検証する。

実験では表層 HAZ からの延性き裂発生以後の挙動を正確に評価することは難しいため、き裂発生は考慮せずに、それまでの表層 HAZ における相当塑性ひずみに着目して検証する。一般には延性き裂の発生およびその進展のクライテリアは応力多軸度と相当塑性ひずみによって決定づけられるとされるが、文献 12) によれば、表層からの延性き裂発生クライテリアは応力多軸度に依存せず、相当塑性ひずみによってのみ決定づけられることが示されている。すなわち、相当塑性ひずみの大小を比較することで、表層 HAZ での延性き裂の発生しやすさを評価できると考えられる。

解析モデル概要を図 5 に、解析ケース一覧を表 3 に示す。載荷点におけるプレスコラム-ダイアフラム溶接部に NBFW[®] 法を適用した場合と適用しない場合とで表層 HAZ での相当

塑性ひずみを比較する。モデル化に際しては、プレスコラムの平板部と角部、母材とHAZは区分し、それぞれ独立した応力-ひずみ曲線を与えた。また、実際の試験をなるべく正確にモデル化するために、プレスコラム板厚方向の強度傾斜も再現し、板厚方向に5等分割し、硬さ試験結果に基づき個別に応力-ひずみ曲線を与えた。なお、解析 Case 1 と Case 2 で溶接部の形状以外（素材の応力-ひずみ曲線、形状など）はすべて同一とした。

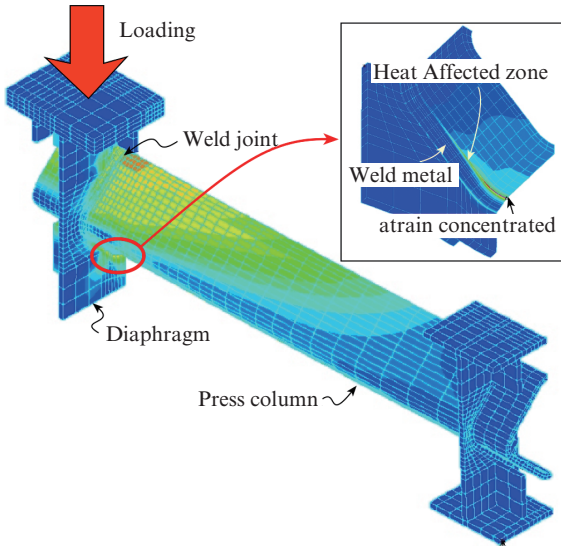


図5 FEM解析モデルの概要
Fig. 5 Overview of finite element method (FEM)

表3 解析モデル一覧

Table 3 Analysis models of finite element method (FEM)

Case	Section	Column	Welding
1	□ 500 mm × 32 mm	G385T (Press column)	NBFW [®]
2			Nominal

表4 試験体一覧（ト字形部材実験）

Table 4 Specimen (Beam-column member)

No.	Section	Flange	Web	Welding
1B	BH-500 × 200 × 12 × 19	HBL [®] 385B	HBL [®] 385B-L	Nominal
2B				NBFW [®]

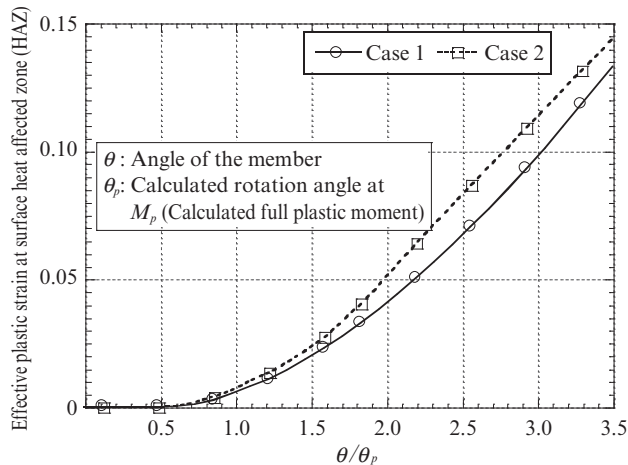


図6 解析結果（相当塑性ひずみ）

Fig. 6 Result of finite element method (FEM) (Effective plastic strain)

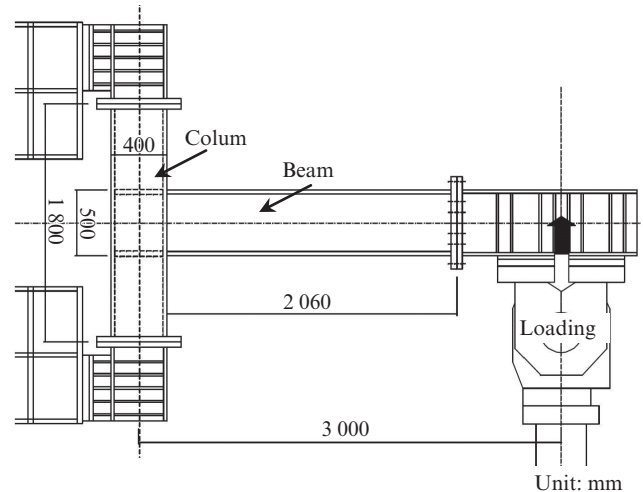


図7 ト字形部材実験の概要

Fig. 7 Loading test by beam-column member

図6に解析結果を示す。ただし、縦軸は相当塑性ひずみであり、横軸は部材変形角 θ を全塑性モーメント M_p 到達時の部材変形角 θ_p で基準化したものである。図6より、NBFW[®]法を適用することで、表層HAZにおける相当塑性ひずみが低減されていることがわかる。

4. 梁端溶接部への適用検討

3章では、プレスコラム-通しダイアフラム継手にNBFW[®]法を適用した場合について、その効果を実験および解析で検証した。一方、梁端溶接部（柱スキムプレート-梁フランジ継手）について、一般には梁に適用される鋼材の延性・靱性・溶接性は良好な場合が多く、脆性破断は生じにくい。したがって、NBFW[®]法のビードTによる靱性改善効果が部材変形性能向上には直結しにくい。一方で、ビードUによる表層HAZへの応力集中緩和効果が期待でき、部材変形性能向上につながる可能性がある。また、今後需要が増加すると考えられる高強度梁への適用を想定し、梁端溶接部へのNBFW[®]法適用効果を検証した部材実験結果とFEM解析結果を以下に示す。

4.1 载荷実験

表4に試験体一覧を示す。図7に载荷方法の概要を示す。いずれの試験体も梁フランジにはHBL[®]385B材を、ウェブにはHBL[®]385B-L材を使用した（いずれも建築構造用

550 N/mm² 級鋼, 国土交通大臣認定材)。表 5 には使用鋼材の機械的性質を示す。試験体 No. 1B は梁端溶接部を通常のレ形 35°開先の完全溶け込み溶接としたものであり、試験体 No. 2B は梁端溶接部に NBFW®法を適用したものである。

表 5 引張試験結果 (JIS 5号)

Table 5 Tensile test result (Test by JIS 5 test piece)

Designation	Thickness (mm)	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	El %	YR %
HBL®385B	19	452	573	45	79
HBL®385B-L	12	394	555	47	71

YS: Yield strength TS: Tensile strength El: Elongation
YR: Yield ratio

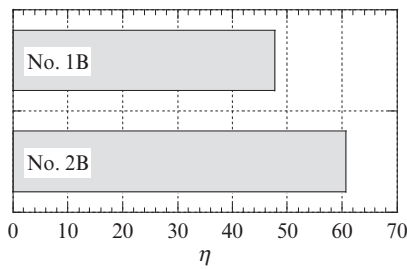


図 9 累積塑性変形倍率の比較

Fig. 9 Test result (η)

M : Moment at weld joint
 M_p : Full plastic moment of beam section
 θ : Angle of the beam member
 θ_p : Calculated rotation angle at M_p
 η : Cumulative plastic deformation ratio

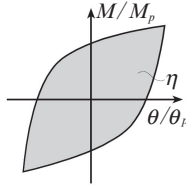


図 10 η の定義

Fig. 10 Definition of η

載荷は正負交番の繰返漸増振幅載荷とし、梁端での作用モーメントが全塑性モーメント M_p に達するときの梁の部材変形角計算値 θ_p を基準とし、 $1\theta_p \rightarrow 2\theta_p \rightarrow 4\theta_p \rightarrow 6\theta_p$ と載荷し破断に至るまで継続した。

図 8 に実験結果を示す。ただし、縦軸は梁端での作用モーメント M を全塑性モーメント M_p で無次元化した値であり、横軸は梁の部材変形角 θ を θ_p で無次元化したものである。図 9 には累積塑性変形倍率 η (=塑性変形性能の指標) を比較して示す。累積塑性変形倍率 η は図 10 に示すように履歴ループで囲われる面積の総和として定義する ((1) 式と同じ定義)。写真 3 には載荷終了後の梁端接合部の破断状況を示す。いずれの試験体も梁端溶接部の始端における表層 HAZ より延性き裂が進展し、最終的には脆性的に破断した。なお、フランジ端部では板厚方向に HAZ に沿って延性き裂が生じたが、途中より母材へき裂が流れていた。

図 5 より、試験体 No. 1B で $\eta=47.8$ 、試験体 No. 2B で $\eta=60.7$ が得られている。また、NBFW®法を適用した試験体 No. 2 は試験体 No. 1 に比べて、 η が約 2 割大きく、NBFW®法を適用することで塑性変形性能が向上する結果となった。NBFW®法の適用効果については、FEM 解析でも検証しており、その結果概要を 4.2 節に示す。

4.2 FEM 解析

解析モデルは前述の実験試験体 No. 1B と No. 2B を模擬

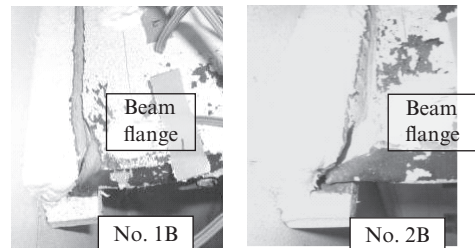


写真 3 載荷終了後の試験体

Photo 3 Final state of specimen

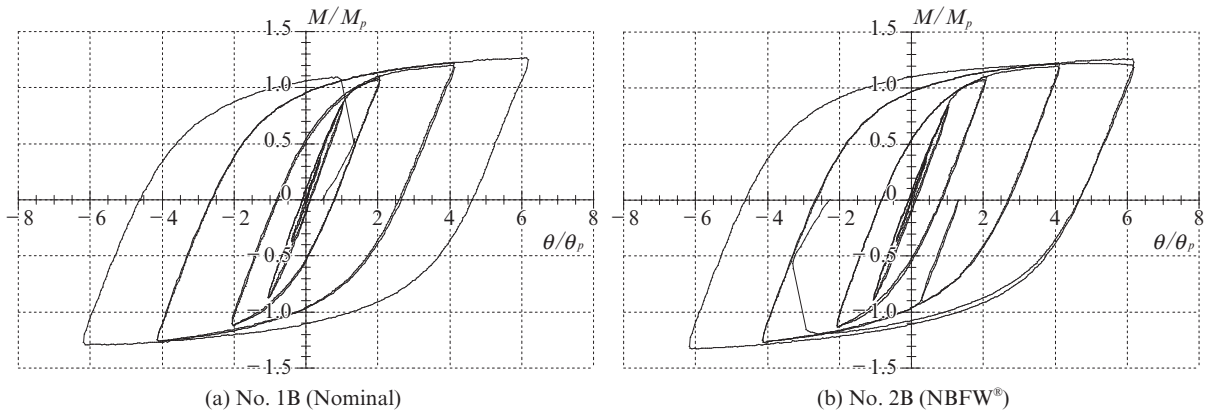


図 8 梁端曲げモーメント-部材変形角関係

Fig. 8 Test result (Bending moment-deformation)

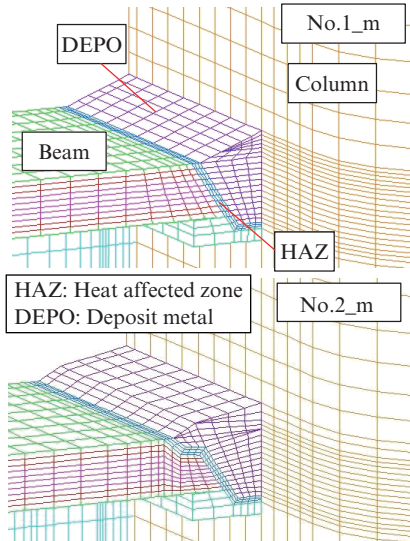


図 11 解析モデル

Fig. 11 Analysis model

したものであり、それぞれ No. 1_m, No. 2_m と記す。図 11 にはモデル化した溶接部を示す。それぞれ表層 HAZ での相当塑性歪の大きさを比較した。

図 12 には梁端が全塑性モーメントに達したときの溶接止端部での相当塑性ひずみコンター図を示す。図 13 に解析結果を示す。図 13 の縦軸は表層 HAZ での相当塑性ひずみであり、横軸は载荷点変位である。図 13 より、NBFW®法を適用することで、表層 HAZ への歪集中が緩和されており、破断の起点となる表層からの延性き裂発生を遅延させる効果が期待でき、部材変形性能向上に寄与するものと考えられる。

5. おわりに

本論で得られた知見を以下にまとめて示す。

- (1) NBFW®法について、その概要と適用効果について概説した。NBFW®法を適用することで、溶接止端における靱性改善効果とき裂を確実に靱性の優れる母材側へ誘導する効果が見込まれる。
- (2) 角部靱性を保証した高性能プレスコラム G385T もしくは BCP325T では、柱-通しダイヤフラム継手に NBFW®法を適用することで、一般の冷間成形角形鋼管柱に課せられる設計ペナルティを免除することが認められている。
- (3) G385T を用いた 3 点曲げ実験およびそれをモデル化した FEM 解析により、NBFW®法を適用することで良好な部材変形性能（エネルギー吸収能力）を確保できることを確認した。
- (4) ト字形部材実験およびそれをモデル化した FEM 解析により、梁端溶接部(柱スキンプレート-梁フランジ溶接部)

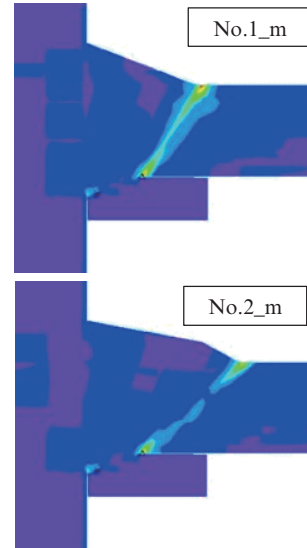


図 12 相当塑性ひずみコンター図

Fig. 12 Contour of effective strain

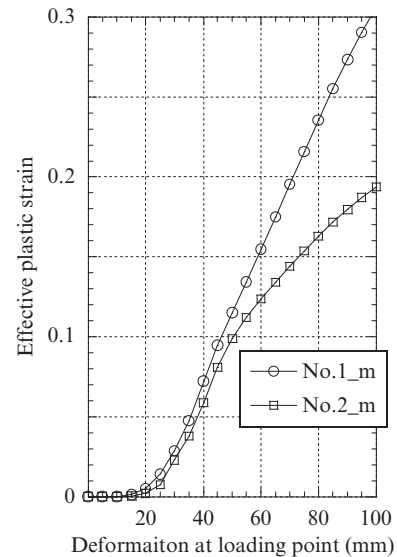


図 13 FEM 解析結果

Fig. 13 Finite element method (FEM) Result

についても、NBFW®法を適用することで、部材変形性能向上を期待できる。

なお、「NBFW」は JFE スチールおよび (株) セイケイ による登録特許 (特許 3711495 号, 特許 3817669 号, 特許 3937389 号, 特許 3937402 号), 登録商標 (商標第 5436721 号) である。

参考文献

- 1) 桑村仁, 松本由香, 武谷政國. 熱間成形および冷間成形角形鋼管の脆性破壊. 日本建築学会構造系論文集. 1997-04, no. 494, p. 129-1362.
- 2) 日本建築センター. 2007 年度版建築物の構造関係技術基準解説書. 2007-08.
- 3) 日本建築センター. 2008 年度版冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル. 2008-12.

- 4) 岡本晴仁, 形山忠輝, 小嶋敏文, 平野攻. 脆性破断を回避する溶接施工方法 (NBFW 溶接法). 鉄鋼技術. 2003-02, p. 35-40.
- 5) 平野攻, 戸森康一, 沖晃司ほか. NBFW 積層条件と継手の強度及び衝撃特性. 鋼構造論文集. 2010-06, vol. 17, no. 66, p. 1-10.
- 6) 高田篤人, 松村浩史, 脇中秀人. 鉄骨コラムにおける NBFW 法への溶接ロボット適用技術の開発. 溶接学会全国大会講演概要. 2007-09, no. 81.
- 7) 沖晃司, 松井和幸, 中川佳, 大森章夫, 石井匠, 加村久哉. 建築構造用高性能 550 N/mm² 級冷間プレス成形角形鋼管 (その 1, その 2). 日本建築学会大会学術講演梗概集. 2013-09, C-1, 構造 III, p. 1199-1202.
- 8) 遠藤良治, 岡本晴仁, 今井章彦, 笹治峻, 稲岡真也. 斜め入力を受けた場合の建築構造用冷間成形角形鋼管の力学性状に関する研究. 日本建築学会大会学術講演梗概集. 1998-09, C-1, 構造 III, p. 687-690.
- 9) 形山忠輝, 森田耕次, 岡本晴仁ほか. 全断面靱性を保証した冷間成形角形鋼管の構造特性. 鋼構造論文集. 2004-03, vol. 11, no. 41, p. 1-9.
- 10) 稲岡真也, 形山忠輝, 岡本晴仁. 建築構造用冷間成形角形鋼管の変形性能. 鋼構造年次論文報告集. 1996-11, vol. 4, p. 189-196.
- 11) 中川佳, 植木卓也, 難波隆行. 耐震安全性と経済性を両立させる建築構造用 550 N/mm² 級鋼「HBL385 シリーズ」. JFE 技報. 2013-01, no. 31, p. 8-15.
- 12) 川端友弥, 大畑充, 南二三吉. 高強度鋼における延性き裂の進展とその後の脆性破壊限界条件に関する検討. 日本船舶海洋工学論文集. 2007-06, vol. 5, p. 235-243.



木下 智裕



村上 行夫



松井 和幸