

建築鉄骨「技術トピックス編」

全断面靱性を保証した 冷間プレス成形角形鋼管と 破断しにくい溶接施工法*

石井 匠**



Architectural Steel Structure (Technical Topics)

Cold Press Formed Rectangular Column Guaranteed Fracture Toughness and Non Brittle Fracture Welding Method*

by ISHII Takumi**

キーワード 冷間プレス成形角形鋼管, 炭酸ガスアーク溶接, 溶接熱影響部, 靱性

1. はじめに

ボックスコラムと呼ばれる冷間成形角形鋼管は、中低層鉄骨造のほとんどの柱材に使用されている。昭和40年代後半ごろまで柱材は圧延H形鋼が多用されてきたが、建物が間口・桁行方向とも筋違・耐震壁が不要なラーメン骨組で設計されることが多くなるにつれ、2軸曲げ強さが大きいなど、2方向の断面性能が良好な角形鋼管の需要が伸びてきた。1981年に建築基準法施行令が改正され、いわゆる「新耐震設計法」が施行されるとその需要は急激に増大した^{1,2)}。1989年度には、冷間成形角形鋼管の使用量は100万tを超えたが、それをピークに現状は60~70万t程度で推移している。

角形鋼管はその製造方法により、(1)円形鋼管をロールフォーミングして角形断面に仕上げるロール成形角形鋼管、(2)鋼板をプレス加工した後、シーム溶接して作るプレス成形角形鋼管に分けられる。製品サイズは、メーカーによって異なるが、外径200mm、厚さ6mm前後の小径管から外径1000mm、厚さ40mmの大径管が実用化されている。規格としては、STKR、BCRおよびBCPがある。STKRにはSTKR400とSTKR490がある。また、BCR、BCPはそれぞれBCR295、BCP235・325がある。STKRはJIS規格品、BCR、BCPは国土交通大臣が認定する鋼材（大臣認定材）である。BCR、BCPは

SN材（建築構造用鋼材）をベースとし、加工後の時効硬化を抑えるためにN含有量を規制した鋼材を冷間成形したもので、STKRに比べ溶接性や変形性能に関して特別に配慮された鋼材である。

一方、冷間成形角形鋼管はその製法上の理由から角部の力学的特性に懸念を持たれている。角部は常温で成形加工され、製造後も熱処理がなされないことから、鋼材の加工硬化による強度上昇や伸び能力、靱性の低下および残留応力が発生する。このことが、建物の柱として要求される性能とどう関係するのかが議論の的となる。また、近年では建物が高層化するにつれ、上述の325N/mm²の降伏点を超える高強度のプレスコラムも開発されてきており、角部からの破壊性能が建物の信頼性において重要な要素となっている。

冷間成形角形鋼管を柱材に用いた場合の柱梁接合部の形式は、図1に示す通しダイアフラム形式が一般的であ

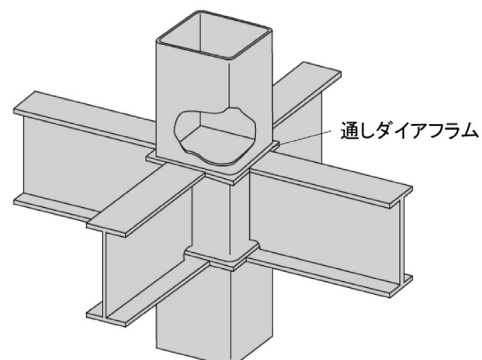


図1 通しダイアフラム形式

*原稿受付 平成23年6月6日

**正員 JFEスチール(株) Member, JFE Steel Corporation

る。これは、柱を切断しダイアフラムと梁フランジを直接溶接する形式である。これに対して、図2に示す柱は切断せず、ダイアフラムを柱内部に取り付ける、内ダイアフラム形式がある。冷間成形角形鋼管を柱に用いた設計を行う場合には、「建築物の構造規定」⁹⁾、建築構造設計指針2001¹⁰⁾の記述から、「冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル」⁹⁾によって運用されてきた。「2008年版冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル」に準拠した設計法として、2009年に冷間成形角形鋼管を柱に使用する場合の構造規定が告示化された。これによると、柱梁接合部の形式に応じて、耐震計算時の安全率を変える方式を規定している。つまり、柱崩壊を生じさせないという前提での設計が必要となるため、冷間プレス成形角形鋼管は、内ダイアフラム形式とする場合の多い熱間成形角形鋼管や四面溶接箱形断面材に対して、設計応力を割り増す必要がある。明確には示されていないが、冷間成形により角部靱性が低下していることがその主な理由である。熱間成形角形鋼管に対し、冷間成形角形鋼管の場合は、角部からの脆性破壊によって変形能力が劣化するとした報告^{6, 7)}がこの制限値の背景となっている。一方、遠藤⁸⁾ら、稲岡⁹⁾の報告では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四面溶接箱形断面材以上の塑性変形能力を有する実験結果も報告されている。

冷間成形角形鋼管と通しダイアフラムの溶接は、半自動炭酸ガスアーク溶接 (CO₂溶接) が主流である。冷間成形角形鋼管は角部が曲率をもった構造であることから、角部には欠陥を生じさせないような技量が必要であり、前記のマニュアルにはその留意点が示されている。しかし、近年では平坦部、角部ともほぼ下向きの溶接で

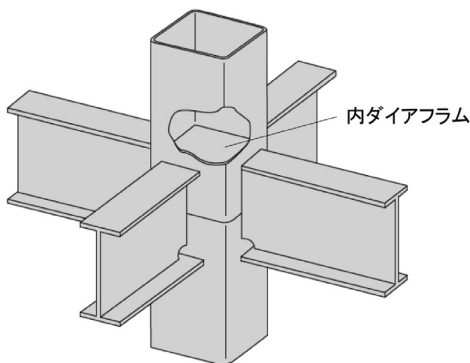


図2 内ダイアフラム形式

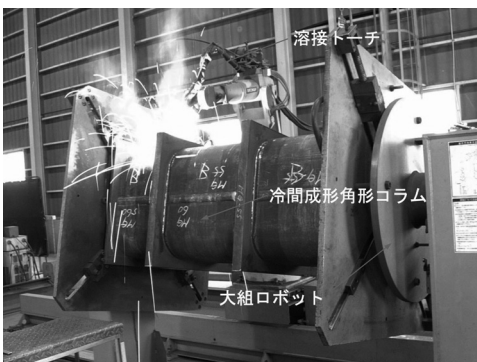


図3 大組溶接ロボットによる溶接

施工可能な回転治具を使用する溶接ロボットが普及し、安定して品質が確保できるようになっている (図3)。

このように運用されてきている冷間成形角形鋼管について、本文では、建築構造設計における高い要求性能に対応した平坦部および角部の靱性を保証した高性能な冷間プレス成形角形鋼管 BCP325T について紹介し、合わせて脆性的破壊を防止し、耐震性能を向上させる破断しにくい溶接方法「NBFW 溶接; Non Brittle Fracture Welding (脆性破断防止溶接)」について概説する。さらに、建物の高層化・大断面化に対応した降伏点が 440 N/mm² の高強度プレスコラムについて紹介し、その性能について概説する。

2. 全断面靱性を保証した冷間成形角形鋼管

2.1 BCP325T の材料特性概要

前述の背景から、角部の靱性を保証する建築構造用高性能冷間プレス成形角形鋼管 (プレスコラム) BCP325T が日本鉄鋼連盟から2003年に規格化された。

この BCP325T の概要は以下の通りである。

- (1) 平坦部のみならず、角部も靱性保証
- (2) 溶接熱影響部 (HAZ) の脆軟化部の靱性確保に配慮した化学成分
- (3) HAZ の脆軟化部の脆性破断を回避する溶接積層方法の適用 (3章参照)
- (4) 上記 (3) の適用により、柱崩壊型設計を許容する柱材に要求される塑性変形能力を安定的に有すること

BCP325T は、冷間加工による時効硬化を低窒素化することで影響を低減し、角部の外曲げ半径を板厚の 3.5 倍で冷間曲げ加工した引張強さ 490 N/mm² 級の角形断面柱用構造材である。全断面の靱性を保証するだけでなく、HAZ の脆軟化部においても同じ靱性を確保するために、文献^{10, 11)}に示した化学成分組成を満足することで、ダイアフラム CO₂ 溶接部 HAZ においても一定の靱性値が確保できるよう配慮されている。

2.2 化学成分

BCP325T は、溶接割れに対する配慮、およびダイアフラム溶接部の HAZ 靱性を確保するために、炭素当量 $C_{eq} \leq 0.44\%$ または溶接割れ感受性組成 $PCM \leq 0.28\%$ 、および HAZ 靱性指標 $f_{HAZ} \leq 0.58\%$ を満足するように規定されている (表 1)。HAZ 靱性指標 f_{HAZ} は、溶接入熱 40 kJ/cm 以下・パス間温度 350°C 以下での MAG 溶接多層多パス溶接施工において、HAZ で靱性性能 $\sigma_{E0} \geq 70$ J が確保出来ることを示している^{10, 11)}。

2.3 機械的性質

この材料は、平坦部の引張強さは 490 N/mm² 級の鋼材であるが、冷間加工を受けた角部では、降伏点、引張強

表 1 化学成分規格値

							単位%	
C	Si	Mn	P	S	N	C _{eq}	f _{HAZ}	
≤0.18	≤0.55	≤1.60	≤0.020	≤0.005	≤0.006	≤0.44	≤0.58	

さとも上昇する傾向がある。十分な余盛を確保することによって、溶接金属の強度低下をカバーできる場合があるが、コラム母材角部に対して溶接金属の強度をオーバーマッチングさせることが望ましいとされている。溶接施工条件を決定するためにも、表2に示した平坦部の強度規格とともに、角部の引張データも提供することになっている。このデータを元に、溶接部から破壊することのない、適切な溶接施工条件を設定することができる。表3、表4に引張試験およびシャルピー衝撃試験結果を示す。これより、規格値を満足していること、角部の降伏点上昇は40%程度、引張強さの上昇は15%程度であることがわかる。

2.4 溶接部の構造性能

これまでBCP325Tの機械的性質について論じてきたが、実際の構造部材となった際には、コラム1本だけでは構造体として成立せず、ほとんどの場合ダイアフラムなどとの溶接接合部を伴う。BCP325Tの特性を發揮するためには、溶接部からの先行破壊が生じないようにすることが条件となるため、適切な溶接施工条件の設定が必要不可欠となる。

JIS Z 3312 YGW18 φ1.2を使用し、入熱 30 kJ/cm 以

表2 BCP325Tの規格
(a) 引張強さの規格

板厚t (mm)	降伏点または耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏比 (%)	伸び (%)	試験片
12 ≤ t ≤ 16	325 ≤ ≤ 445	490 ≤ ≤ 610	≤ 80	≥ 17	JIS Z 2201 1A号
16 < t ≤ 40				≥ 21	

(b) シャルピー衝撃特性の規格

	試験温度	シャルピー吸収エネルギー	試験片	採取位置	切り込み
平坦部	0°C	≥ 70J	JIS Z 2202 Vノッチ 長さ方向	試験片中心 表面下6mm	厚さ方向
角部					

表3 BCP325T 引張試験結果

板厚t (mm)	採取位置	降伏点または耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏比 (%)	伸び (%)	試験片
32	平坦部	364	533	68	50	JIS Z 2201 5号
	角部	433	558	78	29	JIS Z 2201 4号
40	平坦部	359	513	70	52	JIS Z 2201 5号
	角部	510	583	87	25	JIS Z 2201 4号

表4 BCP325T シャルピー衝撃試験結果

板厚t (mm)	試験温度 (°C)	平坦部		角部	
		吸収エネルギー平均(J)	個値(J)	吸収エネルギー平均(J)	個値(J)
32	0	240	238	135	129
			252		175
			230		102
			320		253
40	0	328	341	244	262
			323		216

下、パス間温度 250°C 以下の条件による溶接施工により、角部強度に対してオーバーマッチとなっていること、十字継手引張試験片は、母材より破断していることが確認されている。また、0°Cにおける Fusion line の吸収エネルギーは 100J 以上を確保しており、前述の溶接条件の元であれば、溶接部も $\sqrt{E_0} \geq 70J$ を確保できることになり、構造体全体で $\sqrt{E_0} \geq 70J$ を確保することが可能と考えられる。

3. 破断しにくい溶接方法

3.1 溶接部の特性

一般的に溶融金属と母材のボンド部は 1600°C 以上の温度に加熱され、近傍の母材部には、いわゆる溶接熱影響部 (HAZ) が生じる。HAZ 部の一部の組織には、強度が高く靱性・延性の低い脆化組織が晶出する¹²⁾。

溶接金属部は、溶接材料と一部母材が溶け合っ最終的に凝固したものである。また、HAZ は、母材がこの溶接熱サイクルを受けた領域で、一般にフェライト→オーステナイト変態点以上に加熱されると、マイクロ組織が変化し、その結果として母材と異なった機械的性質を呈する。HAZ における機械的性質の変化を考える上で、マイクロ組織が冷却速度によってどのように変化するかを知ることが極めて重要で、その状況は図 4¹³⁾に一例として示した 490 N/mm² 級鋼の溶接用連続冷却変態線図 (CCT 図) によりみることができる。

実際の溶接では、柱梁接合部のように多層盛溶接が行われ、HAZ は多重熱サイクルを受ける。多重熱サイクルの靱性への影響は単一のそれと異なった様相を示し、一般的には細粒化や焼戻し効果によって靱性が改善される傾向を示す。これらの組織の違いを明瞭に示したのが、図 5 および図 6 である。同一の多層盛溶接熱影響部のマイクロ組織で、図 5 は後続パスの熱サイクルを受けた箇所 (再熱部)、図 6 は受けない箇所 (原質部) を観察したものである¹¹⁾。図 5 は、細粒フェライト主体の組織となっているのに対し、図 6 は上部ベイナイト主体の組織を呈し、両者で顕著な差異が認められる。

3.2 レ型開先完全溶け込み溶接での問題点

上記の観点から、現在広く利用されているレ型開先完全溶込み溶接について問題がないかを検討する。レ型開

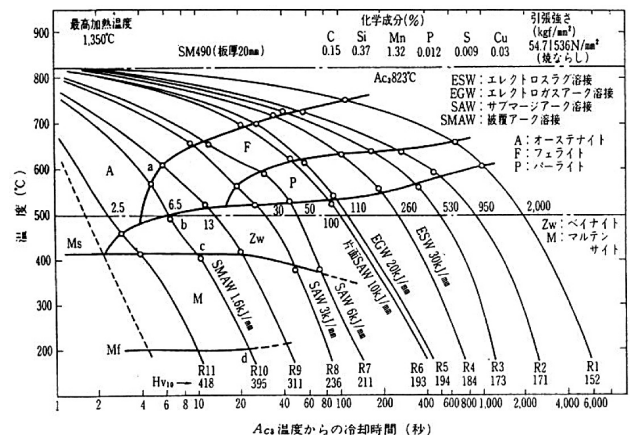


図4 SM 490 N/mm² 鋼の溶接用連続冷却変態線図¹²⁾

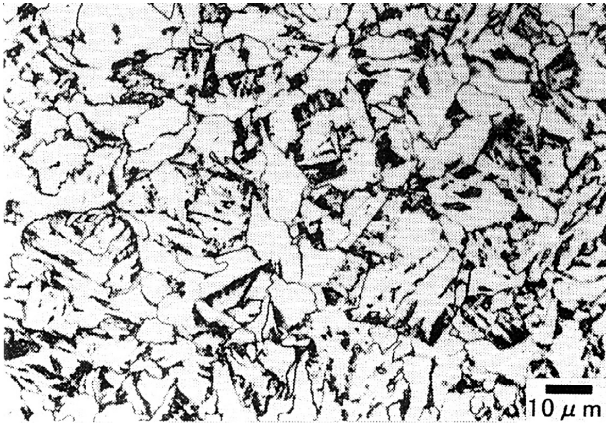


図5 多層溶接熱サイクルを受けた場合の組織例
入熱 40 kJ/cm, 予熱・パス間温度 350℃



図6 単一溶接熱サイクルを受けた場合の組織例
入熱 40 kJ/cm, 予熱・パス間温度 350℃

先完全溶込み溶接は、梁端のフランジと通しダイアフラムの溶接、四面溶接箱形断面材のスキンプレートと梁フランジの溶接、冷間成形角形鋼管と通しダイアフラムの溶接、柱継手の溶接等に広く利用されている。図7に代表的なレ型開先完全溶け込み溶接の例を示す。図中斜線部は溶接熱影響部（HAZ）である。このHAZがすべて再熱を受けていれば靱性確保上問題はない。再熱がかかりにくい部位は初層溶接での裏当て金およびその近傍と最終層の止端部近傍のHAZである。とくに最終層近傍のHAZは単一の熱サイクルのみであるため、鋼種、溶接条件にもよるが、高張力鋼では一般に上部ベイナイト組織を呈し、低靱性を示す。告示1464号でも指摘されているが、アンダーカットはこの溶接止端部に発生しやすい。アンダーカットが無くても溶接止端部は形状的に応力集中が大きくなりやすい。この部分のHAZの靱性が低いということは、脆性破断防止の観点からは重要な問題である。

また再熱を受けたとしてもHAZの中で靱性が最も低いのはボンド部に沿った所である（図8¹³⁾参照）。通常のレ型開先完全溶け込み溶接での開先角度は約35°となっており、溶接部の最大主応力（図9参照）とボンド面が比較的直交している。このため脆性破断が発生しやすい状況にある。

溶接部の止端部はアンダーカットのような欠陥が発生しやすいとともに、形状的応力集中が存在し、また強

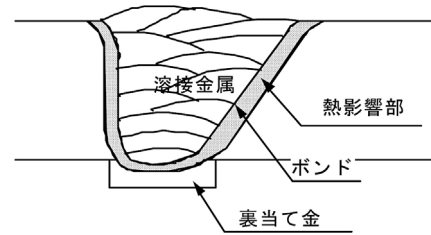


図7 代表的なレ型開先完全溶け込み溶接の例

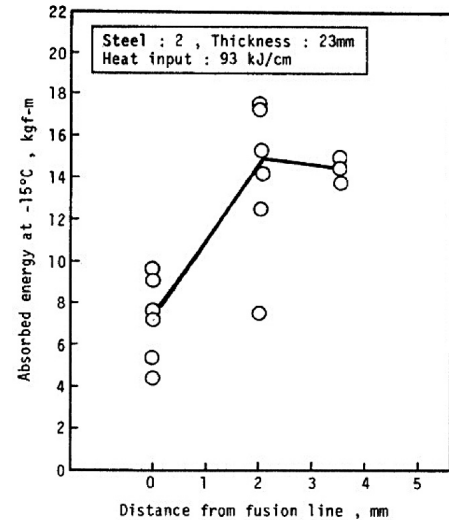


図8 熱影響部の靱性比較¹³⁾

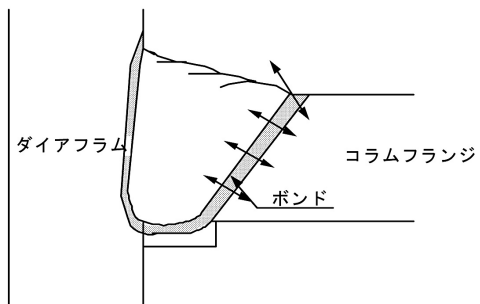


図9 溶接部近傍の最大主応力方向

度、靱性の観点からも破断を引き起こしやすい。冒頭でも触れたように、コラムとダイアフラムの溶接部の脆性破壊が問題となったが、冷間塑性加工による角部の強度上昇と溶接部性能との関係の不整合性、ダイアフラムとの溶接部近傍ではポアソン比による直交方向変形に対する局部曲げがもたらす溶接止端部の応力の拡大等により変形能力を低下させていたと考えられる。多くの他の溶接構造でも溶接止端部の応力集中から疲労き裂が発生し、脆性破壊に至るものが多いことを考えると、この止端部を改善することが溶接構造の性能向上に寄与すると考えられる。

3.3 改良溶接方法

最終層の溶接手順が図7の状態であれば、止端部近傍の溶接金属、HAZは再熱を受けないため、上述したように再熱部と比較して靱性が低くなる。

図10に溶接部のマクロ写真を示す。熱影響部はかなりの領域に拡がっている。400 N/mm²級材、490 N/mm²級

材では HAZ の強度は母材とほとんど変化はないが、TMCP 鋼、高強度鋼のように冷却速度を調整し強度を高めた鋼材、あるいは、冷間成形角形鋼管の角部、円形鋼管のように冷間塑性加工を受け、硬化している部分では、HAZ は周辺母材より強度が低下する可能性がある。溶接でこれらの強度を正しく評価し溶接材料の選択、溶接条件の設定を行っていても、HAZ の強度が不足する結果となる。

ここに挙げたように、強度および靱性が低く、かつ応力集中が起こる箇所からの脆性破壊を防止する溶接方法 (Non Brittle Fracture Welding (脆性破断防止溶接) = 「NBFW」法) を以下に示す。図11, 図12がその溶接方法の積層方法である。規定している項目は下記4項目である。

- (1) ビード U 及びビード T を含む最終層は、原則として3パス以上に分けて施工する
- (2) ビード U とビード T の溶接入熱・パス間温度は下記範囲で施工する
(ビード U) 15-22 kJ/cm 250℃ 以下
(ビード T) 15-25 kJ/cm 250℃ 以下
- (3) ビード U はコラムスキンプレートの上面開先端

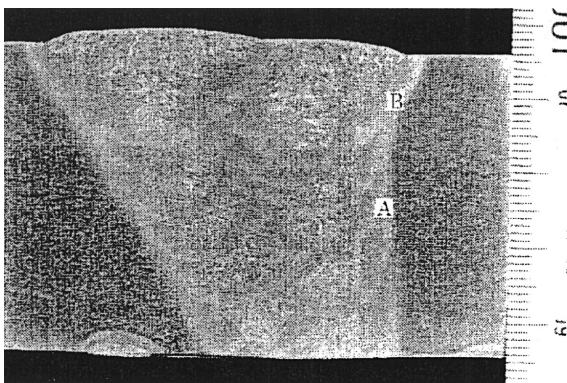


図10 溶接部断面マクロの例

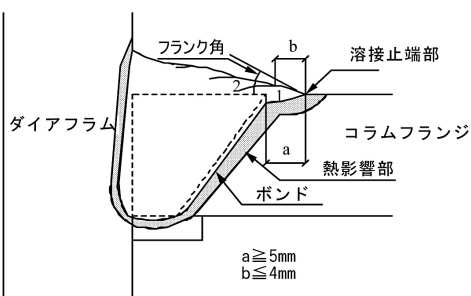
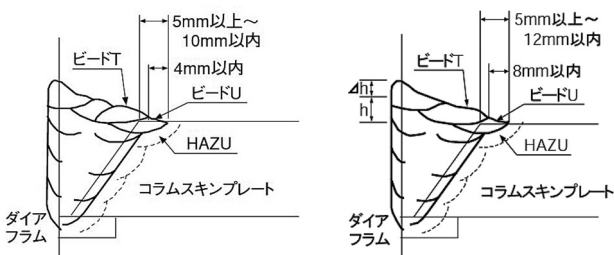


図11 改善溶接方法 (「NBFW」法)



余盛高さ：突き合される材の1/4以下

図12 「NBFW」法の新旧比較

- より 5 mm 以上 10 mm 以内に溶接部止端を置く
- (4) ビード T はビード U の溶接止端部から 4 mm 以内に溶接止端部を置く

「NBFW」法は従来溶接法と比べて、最終層の形状、積層方法が異なり、また最終パスが止端部になっていない。1のパスと2のパスは図に示すように a を 5 mm 以上、b を 2 mm 以上 8 mm 以下とする。なお、現在、「NBFW」法は寸法規定が緩和¹⁰⁾され、図12となっている。

この効果については、3.1節において説明した原理に合致したものである。つまり、

- (1) ビード U を置くことにより、材軸方向に平行な Fusion line を生成する (HAZ の生成方向と主応力方向と直交させない)。
- (2) 余盛によって溶接部近傍の断面積を増し、HAZ の強度低下をカバーする。
- (3) 所定の距離 a および b を確保することにより、ビード U 近傍の脆化を防ぎ、開先面に沿った Fusion line から遠ざける。

などにより、HAZ 部からの脆性破壊を防止することが可能となる。

図10からもわかるように通常の溶接では HAZ が断面を貫通している。しかも溶接は余盛もなく断面積は母材と同じである。HAZ の強度が母材より低下している場合には、熱影響部が強度的にクリティカル断面となる可能性があるが、本溶接では HAZ には溶接の余盛があり、母材より断面積が大きい。また最終層をこのように溶接することは、フランク角 (図11参照、母材と溶接金属のなす角度) も小さくなり、応力集中も小さくなる。

3.4 改良効果例

実験概要を図13および表5に示す。部材の全塑性モーメント M_p に対応する基準変位 δ_p を使い、1/2の変形量で正負1回加力した後、2倍、4倍、6倍、8倍、10倍の変形量を各2回与える正負交番繰返し载荷を行った。試験

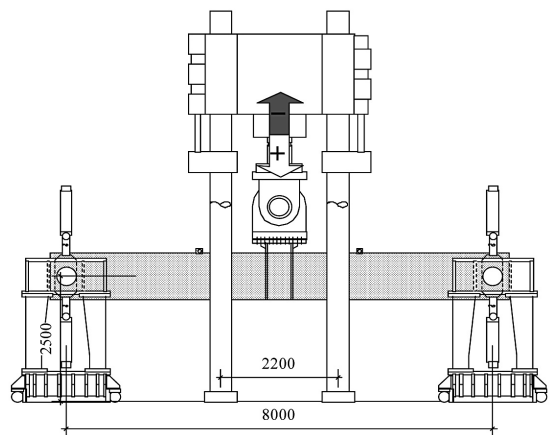


図13 実験概要

表5 試験体一覧

試験体名	载荷方向	B (mm)	t (mm)	B/t	幅厚比 ランク	A (cm ²)	Ix (cm ⁴)	Zx (cm ³)	Zpx (cm ³)
5TP-20	45°	650	32	20	FA	754	454,139	11,030	16,640
5TP-16	45°	650	40	16	FA	902	521,199	13,062	19,922

体は図13にあるように、中央部に通しダイアフラムを溶接した3点曲げ試験体である。試験体は計2体で、鋼管の板厚を変化させて、幅厚比を変えている。柱-通しダイアフラム溶接部には「NBFW」法を適用している。試験体は終局が破断と予想されるFAランクの試験体である。

図14に代表例として試験体5TP-20の履歴ループを示す。10 δ_p に向かう途中(9 δ_p 付近)までの変形に耐えており、履歴ループも紡錘型の安定した形状となっている。図15に実験終了後のダイアフラム近傍溶接部を、図16に柱-通しダイアフラム溶接部から発生したき裂の断面マクロを示す。破断線がビード線からコラム母材側に流れている。また、母材にはくびれが生じていることがみとれ、コラム母材はき裂進展に対して、十分な靱性を保有していると考えられる。図17は塑性変形性能について、従来のコラム、それ以外の熱間成形角形鋼管、四面溶接箱形断面材の累積塑性変形倍率と比較したものを示す。

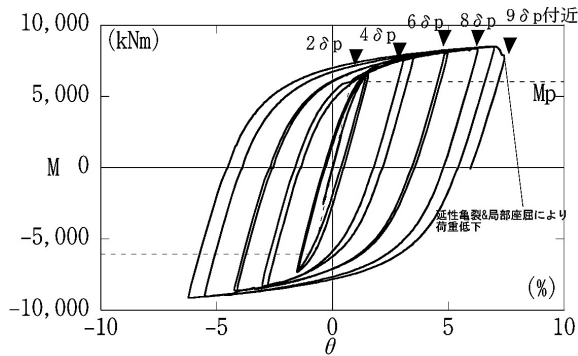


図14 荷重-変形関係 (5TP-20)

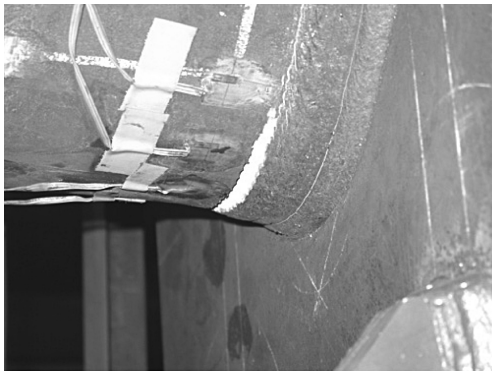


図15 き裂外観 (5TP-20)

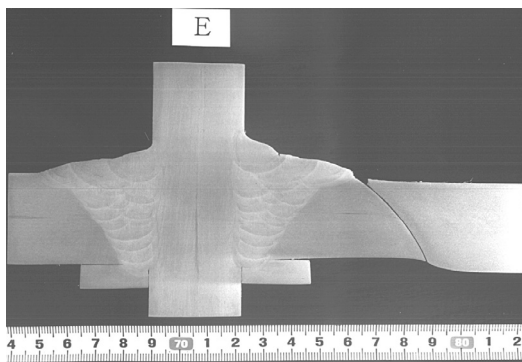


図16 き裂断面マクロ (5TP-20)

す。荷重方法の違いにより、ばらつきが大きいものもあるが、従来材や熱間材に対して、同じ幅厚比ではほぼ2倍以上の累積塑性変形能力を保有していることがわかる。

4. 高強度冷間プレス成形角形鋼管

4.1 概要

冷間プレス成形角形鋼管 (BCP) は、経済性に優れた合理的な柱材として広く使用されている。しかしながら、強度 (490 N/mm²級) および板厚 (最大 40 mm) の制限などにより、適用できる建築物の規模は限られていたため、高軸力が要求されるような大規模建築物には、強度や板厚の制限の少ない四面溶接箱形断面柱で施工される例が多かった。こうした建築設計に対応するためより高強度の YP 440 N/mm²級 (HT590) 鋼や、中間的な強度の YP 385 N/mm²級 (HT550) 鋼が実用化されている。

ここでは、590 N/mm²級プレスコラムの構造性能について、確性試験について紹介する。

4.2 材料特性

表6に、プレスコラム母材平坦部および角部の引張試験結果を示す。これより、冷間加工による角部の強度上昇は、0.2%耐力の場合は1.32~1.35倍、引張り強さは1.12~1.15倍であることがわかる。

次に、母材平坦部および角部のコラム外表面下1mm位置より採取したシャルピー衝撃試験の結果を表7に、板厚40mmの遷移曲線を図18に示す。冷間加工の影響により、角部のエネルギー遷移曲線は平坦部に対し全体的に高温側にシフトしているが、平坦部、角部とも σ_{E_0} (0℃におけるシャルピー衝撃吸収エネルギー) は200J

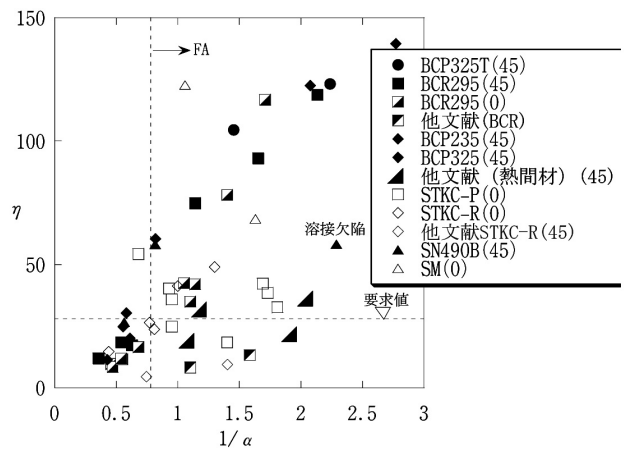


図17 変形能力の比較

表6 引張試験結果

板厚t (mm)	採取位置	降伏点または耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏比 (%)	伸び (%)	試験片
19	平坦部	500	633	79	21	JIS Z 2201 1A号
	角部	658	708	93	39	JIS Z 2201 12B号
25	平坦部	489	629	78	23	JIS Z 2201 1A号
	角部	659	702	94	43	JIS Z 2201 12B号
40	平坦部	510	649	79	24	JIS Z 2201 1A号
	角部	678	756	90	42	JIS Z 2201 12B号

表7 シャルピー衝撃試験結果

板厚t (mm)	採取位置	試験温度 (°C)	0°C シャルピー吸収エネルギー			
			1	2	3	平均 (J)
19	平坦部	-40	353	351	346	350
		0	354	345	362	354
	角部	0	319	345	313	326
25	平坦部	-40	343	334	338	338
		0	343	341	336	340
	角部	0	280	194	276	250
40	平坦部	-40	313	311	309	311
		0	310	314	314	313
	角部	0	238	242	243	241

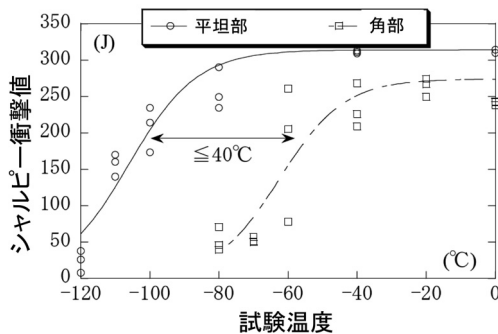


図18 シャルピー遷移曲線

以上の靱性値を有していることがわかる。

なお、本プレスコラム「NBFW」法を適用した3.4節と同様の柱曲げ実験において実用上問題ない塑性変形能力を有していることが確認されている¹⁷⁾。また、高強度プレスコラムとしては、385 N/mm²プレスコラムも商品化されている。現状では角部保証した商品は開発されていないが、こちらも「NBFW」法を適用した柱曲げ実験において問題ないことが確認されている¹⁸⁾。

5. まとめ

平坦部のみならず角部の靱性を保証した高性能な冷間プレス成形角形鋼管 BCP325T, 440 N/mm²の高強度プレスコラムについて紹介し、合わせて脆性的破壊を防止し、耐震性能を向上させる破断しにくい溶接方法「NBFW」法について概説した。

建築における溶接性能は、兵庫県南部地震での多くの建築鉄骨での破断事例、建築基準法の一部改正における溶接に関する規制強化、バス間温度管理の規制等により、材質面から考え直されてきた。溶接施工の効率を重視してきた考えに対して、強度や靱性など品質確保に重きがおかれてきていると考えられる。また溶接技術は他分野で発展したものを建築が利用している状況だが、建築鉄骨で要求される溶接部性能は、応力が弾性範囲に留

まる他分野の溶接部よりはるかに厳しいものである。しかし溶接手順や条件を少し変更するだけで溶接熱影響部の最脆化部であり、しかも応力集中部となる止端部の靱性を改善することができ、その結果高い変形能力を有する溶接継手を得ることが可能である。本文の解説が溶接性能向上の一助になれば幸いである。また、末尾となりましたが、参考にさせていただいた各文献の著者の皆様には感謝します。

参考文献

- 1) 金谷弘：冷間成形角形鋼管柱の最近の話題，日本鉄鋼協会，鉄と鋼，第77年，第5号，1991年5月。
- 2) 矢島詠子，平野道勝：戦後の我が国の鉄骨構造の発展に関する研究その2，日本建築学会学術講演梗概集，構造系(C-1)，pp.539-542, 1997年9月。
- 3) 建築センター：建築物の構造規定2001。
- 4) 東京都建築構造行政連絡会：建築構造設計指針2001。
- 5) 建築センター：冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル，1996年9月。
- 6) 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，第494号，1997年4月，pp.129-136。
- 7) 牧野義隆，穂積秀雄，西内晃二，平野道勝：幅厚比の異なる冷間プレス成形角形鋼管の曲げ実験，日本建築学会学術講演梗概集，構造 III，1995年8月，pp. 257-258。
- 8) 遠藤良治，岡本晴仁，今井章彦，笹治峻，樋岡真也：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その1，その2，日本建築学会大会学術講演梗概集，1998年9月，pp.687-690。
- 9) 樋岡真也，形山忠輝，岡本晴仁：建築鋼種係冷間成形角形鋼管の変形性能，鋼構造年次論文報告集，第4巻，1996年11月，pp.189-196。
- 10) 建築研究所・日本鉄鋼連盟・日本溶接協会：先端技術による新しい鋼構造建築システムの開発・建築構造用溶接材料と溶接接合部性能評価法の確立 最終報告書，2002年。
- 11) 古谷仁志，植森龍治，栗飯原周二，富田幸男，池辺卓，小嶋敏文，岡本晴仁，久保高宏，安藤隆一，樋口孝一，向井昭義，森田耕次：建築柱梁接合部を再現した溶接部のHAZ靱性に及ぼす鋼材化学成分の影響とその定式化，鋼構造論文集，第8巻，第32号，2001年12月，pp.17-30。
- 12) 溶接学会編：溶接・接合技術，産報出版，1996年，pp.158。
- 13) 鈴木元昭ほか：60 kg/mm²級高張力鋼の大入熱溶接，溶接学会論文集，第1巻，第2号，1983年。
- 14) 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，第11巻，第41号，2004年3月，pp.1-9。
- 15) 岡本晴仁，平野攻ほか：脆性破断を回避する溶接施工方法(NBFW溶接法)，鉄構技術，Vol.16, No.177, 2003年2月，pp.35-40。
- 16) BCJ 評定-ST0170-01：建築センター。
- 17) 猪砂利次，中村 信行，岡本 晴仁，加村久哉，形山忠輝，平野攻：590 N/mm²級冷間プレス成形角形鋼管の構造性能，日本建築学会学術講演梗概集，構造系(C-1)，2002年8月，pp.539-542。
- 18) 村上行夫，藤沢清二，藤澤一善：新しい建築構造用高強度鋼材 550 N/mm²級鋼の特徴，JFE 技報(10)，2005年12月，pp.35-40。