

建築用鋼材-2

耐震・制震鋼材

Steel for Seismic Design and Hysteresis Dampers

石井 匠
Takumi Ishii

JFEスチール(株) スチール研究所
土木・建築研究部 主任研究員

1 はじめに

1981年の新耐震設計法施行により、塑性域でのエネルギー吸収が耐震性に重要となり、部材には塑性変形性能が要求されるようになった。鋼材にもその要求に応えるため、塑性変形性能向上を意図した建築構造用圧延鋼材(SN)や冷間成形角形鋼管(「BCR」、「BCP」)が開発されている¹⁾。しかしながら、1995年兵庫県南部地震では、鉄骨造で最も一般的である角形鋼管柱とH形断面梁からなる柱梁接合部を中心に多くの破断が観察された²⁾。その被害事例の中には、部材の十分な塑性化が発揮されずに梁フランジが破断してしまう事例が散見され、鉄骨造の耐震信頼性を脅かすものとして問題視された。これを機に早期破断を防止するための研究がなされ、鋼材の強度特性や靱性特性が重要視されるようになっていく。

一方、上記地震を機に機能性や修復性の向上を目指した性能設計が脚光を浴び、免震構造や制震構造を用いた制御設計が建物に採用されるようになっていく。制震構造に組み込まれる部材は様々なものが開発されているが、履歴型ダンパーとしては鋼材を利用したものが多い³⁾。その部材に用いる鋼材は降伏点が低く、早期に降伏することやエネルギー吸収能力に富むことが重視される。

以下では、1995年兵庫県南部地震を機に開発された鋼材の中から「耐震建築溶接構造用鋼材」、「高性能冷間プレス成形角形鋼管BCP325T」、「低降伏点鋼LY100、LY225」を紹介し、開発背景、機械的性質および部材性能について概説する。

2 耐震建築溶接構造用鋼材

2.1 開発背景

上述のように兵庫県南部地震の被害事例の中には、保有耐力接合(接合部の耐力が、接合される部材のもつ全塑性モーメントの α 倍の耐力となるように設計すること)された接合

部において脆性的破断現象なるものが発生し、問題視された。そこで(独)建築研究所、(社)日本鉄鋼連盟、(社)日本溶接協会による共同研究がなされ、破断の原因究明とその防止策確立を目指した活動が行われている⁴⁾。

梁端溶接接合部の脆性的破断の発生条件として、当初、数多くの要因が想定され、実験や解析によって、その影響が調査されてきた。地震以前は、材料靱性(ここではシャルピー吸収エネルギーを指す)の重要性は認識されてはいたが、梁端溶接接合部の脆性的破断に及ぼす影響に関する実験データは得られていなかった。兵庫県南部地震以降、多くの破壊実験によって破断の発生条件が調査され、材料靱性の影響も明らかになってきた。実大レベルの継手引張試験や柱梁部分架構実験の結果(図1)から、0℃で70J以上のシャルピー吸収エネルギーがあれば、鋼材引張強さに相当する耐力が確保できるとしている。また、0℃で27J以上70J未満のシャルピー吸収エネルギーの場合は、上記耐力を1割低減することとしている。70Jや27Jの要求値は溶接部にも適用される。溶接部には鋼材の熱影響部(以下HAZと略す)も含まれ、鋼材・溶接金属と同様に靱性が求められる。共同研究では、HAZの性

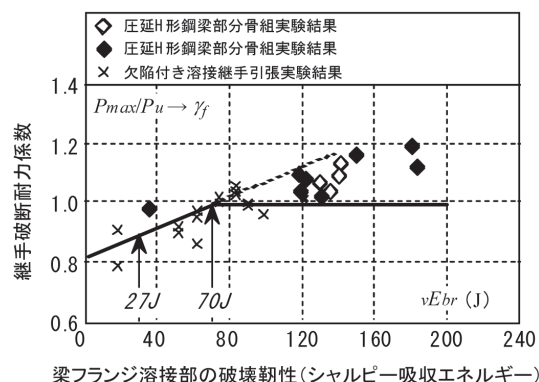


図1 破壊実験で得られた脆性的破断の発生条件⁴⁾
(梁端溶接接合部の靱性と継手破断耐力関係)

能を確認する溶接施工試験を省略する目安として、鋼材の化学成分からなる指標（マグ溶接熱影響部靱性指標： f_{HAZ} と称す）を提示している⁵⁾。 f_{HAZ} は、 $f_{HAZ} = C + Mn/8 + 6(P + S) + 12N - 4Ni$ (mass%)（ただし、Ti量が0.005% ≤ の場合はTi=0）と表される。これは溶接入熱40kJ/cm以下、パス間温度350℃以下のマグ溶接の施工条件をとまなうが、これによりHAZの靱性が推定できる。具体的には、HAZで確保できる0℃のシャルピー吸収エネルギーの目安は、 $f_{HAZ} \leq 0.58\%$ の場合は $\sqrt{E_0} \geq 70J$ 、 $f_{HAZ} \leq 0.63\%$ の場合は $\sqrt{E_0} \geq 27J$ となる。

2.2 規格内容

本鋼材は引張強さが400Nおよび490N級を対象としている。SN鋼にマグ溶接熱影響部靱性指標： f_{HAZ} をオプション設定するものである。表1、表2に規定内容を示す。また、H形鋼のシャルピー衝撃試験片は、SN規格での採取位置のほかに、図2に示すフランジ幅中央の裏面側からも採取する。例

表1 耐震建築溶接構造用圧延鋼材 種類の記号と適用厚さ

種類の記号	厚さ(mm)
SN400B70, SN400B27, SN490B70, SN490B27	12 超え100 以下
SN400C70, SN400C27, SN490C70, SN490C27	16 以上100 以下

表2 耐震建築溶接構造用圧延鋼材 母材および熱影響部の靱性に関する規定

規格名	シャルピー吸収エネルギー $\sqrt{E_0}$ (J)	マグ熱影響部靱性指標 f_{HAZ} (質量%)
SN400B70	$\sqrt{E_0} \geq 70$	$f_{HAZ} \geq 0.58$
SN400C70		
SN490B70		
SN490C70		
SN400B27	$\sqrt{E_0} \geq 27$	$f_{HAZ} \geq 0.63$
SN400C27		
SN490B27		
SN490C27		

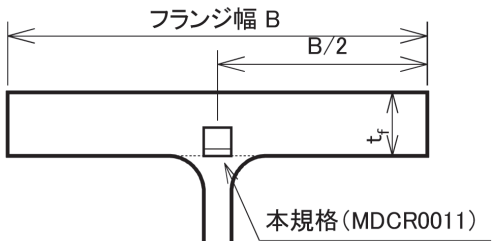


図2 H形鋼のシャルピー衝撃試験片の採取位置

えば、SN490B70は、この位置での0℃でのシャルピー吸収エネルギー、 E_0 の最低値70Jを規定している。なお、本鋼材は（社）日本鉄鋼連盟の製品規定「耐震建築溶接構造用鋼材（MDCR0001-2003）」として制定されている。

3 高性能冷間プレス成形角形鋼管「BCP325T」

3.1 開発背景

プレスコラムメーカー各社は、1995年5月に、SN鋼をベースとした「BCP235」、「BCP325」に関して日本建築センター評価を取得した。ただし、プレスコラム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た。つまり、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とである⁶⁾。このことが、建物の柱として要求される性能に影響を与えるとされてきた。そこで、1998年にコラムを用いた45度方向繰返し曲げ実験（コラム角部が最外縁となるように引張圧縮荷重を与える試験）を実施している。その結果、脆性破壊する恐れのある幅厚比の領域のコラムについても、延性破壊モードとなり、同じ幅厚比の熱間コラムや溶接4面BOX柱等、他の柱材に対しても十分大きな塑性変形能力があることを示した⁷⁾。さらにその後、高炉3社とプレスコラムメーカー3社の共同研究により、通しダイアフラムの溶接施工方法にも留意した、角部の0℃のシャルピー吸収エネルギー、 $\sqrt{E_0} \geq 70J$ を保証する冷間プレス成形角形鋼管「BCP325T」の開発に至っている。

冷間成形角形鋼管を柱に用いた設計は「冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル」によって運用されてきた。2009年には、「2008年版冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル」⁸⁾に準拠した設計法として、冷間成形角形鋼管を柱に使用する場合は構造規定が告示化された。それによると、プレスコラムは、柱崩壊を生じないという前提での設計が必要となるため、熱間コラムや溶接4面BOX柱に対して、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、上述の冷間成形により角部靱性が低下していることがその理由の1つである。しかし、「BCP325T」では角部の靱性を保証しているため、特殊な溶接法（後述する「NBFW法」）を用いることが条件となるが、設計応力の割増するの必要のない熱間コラムや溶接4面BOX柱と同等の設計が可能となっている。

3.2 規格内容

プレス成形角形鋼管の「BCP235」、「BCP325」の機械的性質はSN材とまったく同一であるが、「BCP325T」は鋼管角部の靱性を保証するため、化学成分に厳格な規定を設けてい

る(表3、4)。具体的にはP、Sの上限値をさらに厳格化している。また、SN鋼には規定はないが冷間加工による時効効果を低減するためトータル窒素の規定を設けている。さらにマグ溶接熱影響部靱性指標を $f_{HAZ} \leq 0.58\%$ を満足するように規定している(表5)。 f_{HAZ} は、溶接入熱 40kJ/cm 以下・パス間温度 350°C 以下でのマグ溶接多層多パス溶接施工において、HAZ靱性 $vE_0 \geq 70\text{J}$ が確保出来ることを示している。

「BCP325T」を柱材に使用する場合、「NBFW法；Non Brittle Fracture Welding (脆性破断防止溶接)」⁹⁾という溶接積層方法を用いることにより、設計応力を割増するペナルティが免除される。図3が「NBFW法」の積層方法の規定である。

- (1) ビードUおよびビード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) $15\text{--}22\text{kJ/cm}$ 250°C 以下
(ビードT) $15\text{--}25\text{kJ/cm}$ 250°C 以下
- (3) ビードUはコラムスキンプレートの上面開先端より 5mm 以上 12mm 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 8mm 以内に溶接止端部を置く

表3 「BCP325T」 引張強さの規格値

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
$12 \leq t \leq 16$	$325 \leq \quad \leq 445$	$490 \leq \quad \leq 610$	≤ 80	≥ 17	JIS Z 2201 1A号
$16 < t \leq 40$				≥ 21	

表4 「BCP325T」 シャルピー衝撃特性の規格値

	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	$\geq 70\text{J}$	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5 「BCP325T」 化学成分規格値

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

「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。この効果については、

- (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。

などであり、これにより、HAZ部からの脆性破壊を防止することが可能となる。

「NBFW法」を適用した「BCP325T」の 45° 方向繰返し曲げ実験¹⁰⁾から得られた荷重－変形関係を図4に示す。また、溶接部の破壊部位のマクロ断面を図5に示す。履歴ループは大変形まで安定しており、十分な塑性変形能力を得ている。また、溶接部から発生したき裂はビード線からコラム母材側に流れ、かつ母材にはくびれが生じており、鋼材のもつ保有性能を十分に発揮している。

4 低降伏点鋼

4.1 開発背景

地震や風の履歴型の振動エネルギーを特定の構造部材に吸

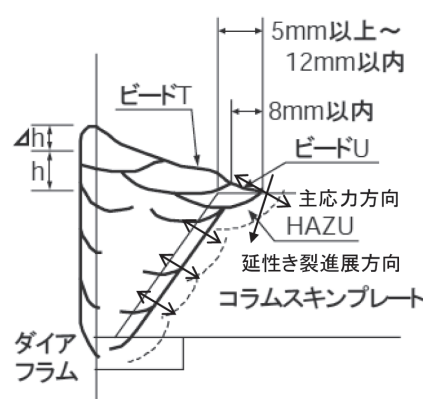


図3 「NBFW法」

収させる制振構法が1995年兵庫県南部地震以降、数多く採用されている。主要構造である柱・梁の損傷を防止することにより、被災後の建物の修復性を高めるのが目的である。この制震部材に使用する鋼材には、降伏し易く塑性変形能力の高い鋼材が好ましく、また繰返しによる疲労特性も重要となる。

4.2 規格内容

履歴型ダンパー用の鋼材は軟鋼より一層降伏点が高い鋼材が望まれ、極力低い降伏点と高い伸び延性を兼備することが重要となる。(社)日本鉄鋼連盟は、その製品規定「建築構造用低降伏点鋼材」として降伏点が100N/mm²と225N/mm²の2種類の鋼材を制定している。表6に化学成分、表7に機械的性質の規格を示す。添加元素は不純物、介在物を極力低減させた純鉄に近いものとし、そのうえ圧延とその後の焼なまし処理で所定の特性が付与されている。降伏点および引張強

さは狭レンジであり、とくに降伏点はSN材の120N/mm²に対して、40N/mm²と狭くなっている。

図6に低降伏点鋼と普通鋼SS400などの応力-歪関係を示す¹¹⁾。低降伏点鋼はSS400等と比較して降伏点が1/4～1/3と低く、50%を超える大きな伸び性能を有することがわかる。また、低降伏点鋼の低サイクル疲労特性も普通鋼と同様である(図7)。

低降伏点鋼を用いた履歴型の制震部材としては、図8に示すようなタイプがあり、1995年兵庫県南部地震以降広く普及し、利用されている。一例として制震壁(図9)を用いた実験の荷重-変形関係を図10に示す¹²⁾。

5 おわりに

本稿では、1995年兵庫県南部地震を機に開発された鋼材の中から「耐震建築溶接構造用鋼材」、「高性能冷間プレス成形

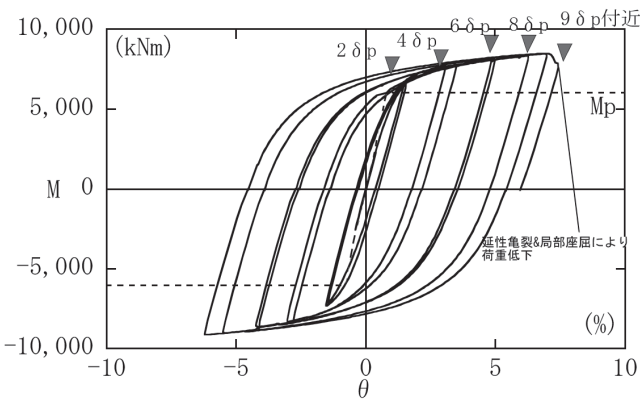


図4 荷重-変形関係 (5TP-20)¹⁰⁾

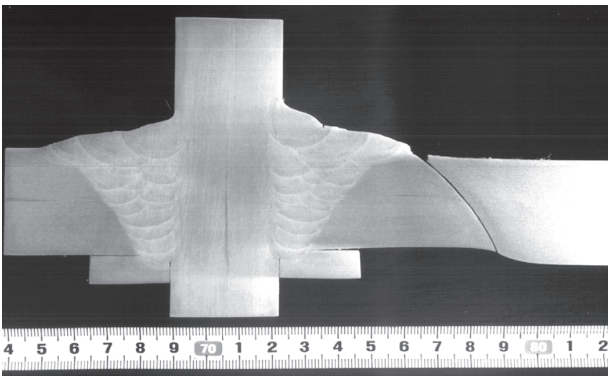


図5 き裂断面マクロ (5TP-20)¹⁰⁾

表6 低降伏点鋼 化学成分規格値

種類の記号	質量%					
	C	Si	Mn	P	S	N
LY100	≦0.01	≦0.03	≦0.20	≦0.025	≦0.015	≦0.006
LY225	≦0.10	≦0.05	≦0.50	≦0.025	≦0.015	≦0.006

表7 低降伏点鋼 機械的性質の規格値

種類の記号	下降伏点 または耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏比 (%)	伸び	
				試験片	(%)
LY100	100±20	200≦ ≦300	≦60	5号	≧50
LY225	225±20	300≦ ≦400	≦80	5号	≧40

角形鋼管BCP325T」、「低降伏点鋼LY100、LY225」を取り上げ、概説した。鋼材メーカーとして、常に時代の設計法に合った新しい高性能鋼材を開発・供給していくことは重要である。今後も経済環境や技術動向を見極め、複雑化する建築構造物に対応を図るために、設計者、施工者のニーズを的確に捉え、高品質の製品を積極的に開発することが肝要であろう。

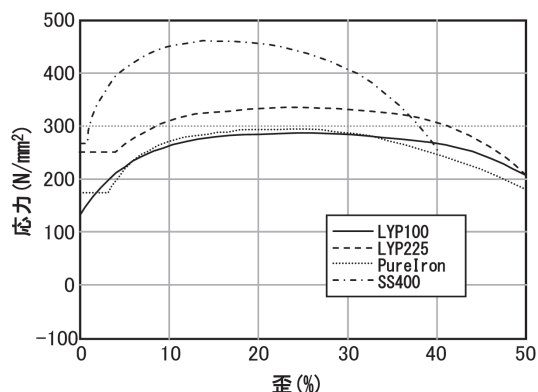


図6 鋼材の応力-歪曲線の比較¹¹⁾

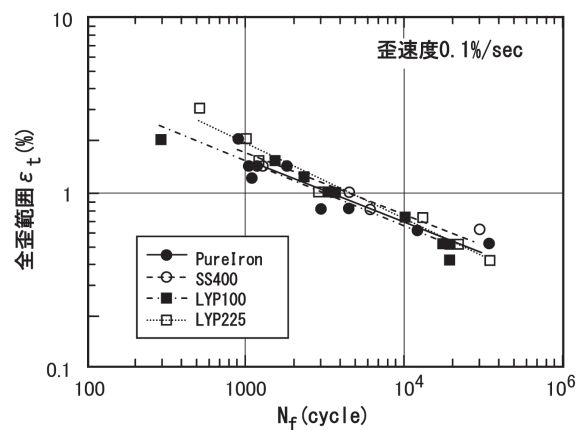


図7 全歪範囲-破断繰返し数の関係¹¹⁾

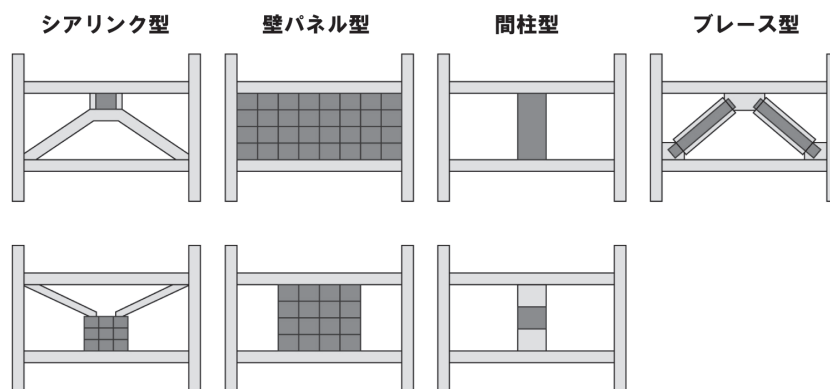


図8 制震構造に用いられる履歴ダンパー³⁾

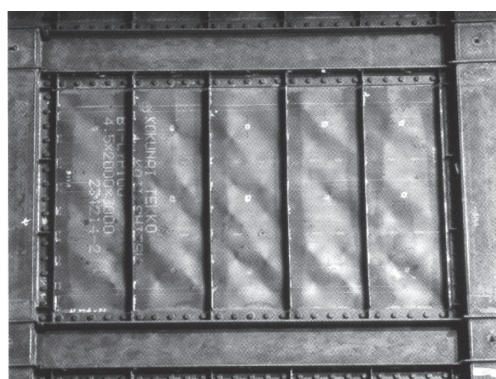
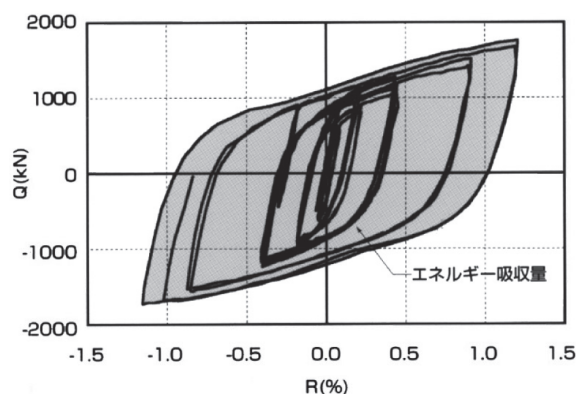


図9 制震壁パネル載荷実験後の状況¹²⁾



*) ラーメンフレームと低降伏点鋼制振パネルの和

図10 層せん断力-層間変形角*) 関係¹²⁾

- 4) 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)
- 5) 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, 樋口幸一, 向井昭義, 森田耕次: 鋼構造論文集, 8 (2001) 32, 17.
- 6) 桑村仁, 松本由香, 武谷政國: 日本建築学会構造系論文集, 494 (1997) , 129.
- 7) 遠藤良治, 岡本晴仁, 今井章彦, 笹治峻, 稲岡真也: 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1998) , 687.
- 8) 2008年版冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル, 建築センター, (2008)
- 9) 岡本晴仁, 形山忠輝, 小嶋敏文, 平野攻: 鉄構技術, 16 (2003) 177, 35.
- 10) 形山忠輝, 森田耕次, 岡本晴仁, 塚本裕昭, 平野攻, 尾野好彦, 志村保美, 吉田譲, 渡邊一夫, 塩飽豊明, 川辺壮一: 鋼構造論文集, 11 (2004) 41, 1.
- 11) 佐伯英一郎, 杉沢充, 山口種美, 望月晴雄, 和田章: 日本建築学会構造系論文集, 472 (1995) , 139.
- 12) 松岡祐一, 緑川光正, 鳥井信吾, 藤澤一善, 中田安洋, 福田浩司, 岩田衛: 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1996) , 829.

(2011年9月16日受付)