

建築構造用鋼材の開発と実用化

Development and Commercialization of Steels for Building Construction

山口種美^{*⁽¹⁾} Tanemi YAMAGUCHI
 岡田忠義^{*⁽²⁾} Tadayoshi OKADA
 長谷川博行^{*⁽³⁾} Hiroyuki HASEGAWA
 望月晴雄^{*⁽⁴⁾} Haruo MOCHIZUKI
 萩原賢次^{*⁽⁵⁾} Kenji HAGIWARA
 宇野暢芳^{*⁽⁶⁾} Nobuyoshi UNO
 計良光一郎^{*⁽⁷⁾} Koichiro KEIRA

抄 録

近年、限られた土地の有効利用を目指して建築物が高層化すると共に、使用効率の高い室内空間を求めて大スパンの架構の建築物が増えている。このため、建築骨組の鋼材に要求される特性は高強度化、高性能化及び極厚・大型化であり、更に大入熱溶接による熱影響等の検討も必要である。厚板、H形鋼、鋼管の490N鋼までの既存品種を対象にして、高性能化を目指した製造技術及び利用技術開発を行った。また、高性能鋼としての性能を併せもつ高強度の建築構造用590N、780N鋼や極厚H形鋼、更には制振ダンパー用途の極低降伏点鋼等の開発と実用化を行った。

Abstract

Buildings are increasing in height and span for more effective utilization of limited land and area and more efficient use of room space. In this tendency, properties required of steels for building frames are higher strength, higher performance, greater thickness and larger size. Also needed are studies on such subjects as the influence of resultant heat from high heat input welding, etc. For the existing variety of steels up to 490N/mm² grade for plates, H-shapes and pipes, both manufacturing and utilization technologies have been developed with the objective of achieving the higher performance. This paper discusses the development and commercialization of 590N/mm² and 780N/mm² grades having both high strength and high performance and of extra-heavy H-shape steels for building construction, and also of low yield point steels for response-control damping use.

1. 緒 言

建築構造は大きく分類すると鉄骨造、鉄骨鉄筋コンクリート造、鉄筋コンクリート造、木造に分類される。近年、鉄骨造は木造のしのご比率になってきており、このような鉄骨市場の拡大と建築物の高層化、大スパン化への技術ニーズに伴い、鉄骨建築用の新しい鋼材の開発¹⁾が活発に行われ、実物件への適用がなされてきた。本論では、新日本製鐵における建築構造用高張力鋼及び高性能鋼の開発と実用化について述べる。

図1に示すように、建築用の鋼材の開発の方向は、高強度化、高性能化及び極厚・大型化を指向してきた。高強度化については、490N/mm²から590N/mm²そして780N/mm²クラスまでの建築専用の鋼材（以下、引張強度が490N/mm²、590N/mm²そして780N/mm²の鋼材をそれぞれ490N鋼、590N鋼、780N鋼と略す）の開発を行ってきた。一方、高性能鋼化、つまり骨組の耐震性能を確保するために建築構造用鋼材に不可欠とされる降伏比（YR）、降伏点又は耐力のばらつき²⁾の制御、板厚方向性能、溶接性能等（以下、このような建

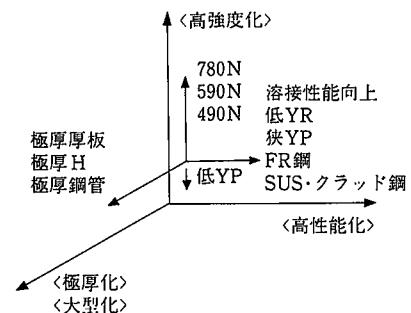


図1 建築構造用鋼材の開発の方向

築構造物の耐震性能及び溶接性能を確保するために必要な性能を付与した鋼材を“高性能鋼”と呼ぶ）については、製造技術の進展により490N鋼はもとより、780Nクラスの高強度においても要求性能を満たすものが可能となった。1995年6月に制定された建築構造用圧延鋼材（JIS G 3136, SN材）は400N、490N鋼の高性能鋼である。極厚・大型化については、熱加工制御法（TMCP）による製造法に

*⁽¹⁾ 建材営業部門 建材開発技術部 部長代理
 *⁽²⁾ 建材営業部門 建材開発技術部 掛長 工博
 *⁽³⁾ 建材営業部門 建材開発技術部 掛長
 *⁽⁴⁾ 厚板営業部門 厚板営業部 部長代理（現：千曲鋼材㈱）

*⁽⁵⁾ 鋼管営業部門 鋼管営業部 部長代理
 *⁽⁶⁾ 技術開発本部 鉄鋼研究所
 鋼構造研究開発センター 主任研究員
 *⁽⁷⁾ 建材営業部門 建材開発技術部 専門部長

より、厚板及び極厚H形鋼の商品化が完了し、更に590N、780N鋼の厚板についても100mmまでの製造技術を確認した。また、耐火鋼(FR鋼)や制振ダンパー用途の極低降伏点鋼などの機能材料も実用化が急速に進んでいる。

以上のように、現状では例えば、590N鋼の100mmの極厚厚板を鋼管に曲げ加工し、YR等の建築特有の性能要求を満足したもののような、極めて高度な要求仕様にも応えられるレベルにある。

2. 建築構造用高性能鋼材

厚板、H形鋼、鋼管の490N鋼までの既存品種を対象にして、高性能化を目指し、製造技術及び利用技術開発を実施してきた。以下、各品種における商品開発と実用化の現状を述べる。なお、590N鋼、780N鋼も当然高性能鋼としての性能の確保がなされているが、これについては3章で別途詳述する。

2.1 建築構造用TMCP鋼

2.1.1 建築構造用TMCP厚板 (商品名: BT-HT325, 325B, 325C, 355, 355B, 355C; 数値は降伏点又は耐力)

(1) 建築構造用TMCP厚板の特長

建築構造用TMCP厚板は、従来の鋼材の“極厚高張力鋼=高炭素当量(溶接性の指標)=溶接性が悪化”といった弱点を、水冷型TMCPによる製造技術で解決したものである。図2にTMCPで製造された鋼板の炭素当量と引張強さの関係を示す。TMCP鋼の最大の特長は、低炭素当量でも従来鋼に対して高い強度を有することである。このため、TMCPで製造された厚鋼板は、40mmを超える極厚においても高い強度と優れた溶接性能を有する。表1、2にそれぞれ建築構造用TMCP鋼(建設大臣一般認定取得品)の化学成分及び機械的性質の規格値を示す。この表中、BT-HT325Cのように記号の末尾にCがついている鋼種は、板厚方向の性能を確保した鋼材である。

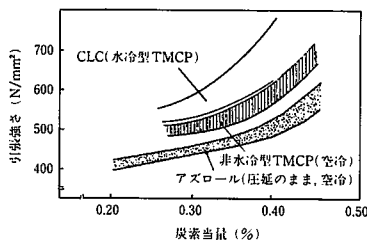


図2 炭素当量と引張強さ

表1 化学成分

種類の記号	厚さ	化学成分 (%)				
		C	Si	Mn	P	S
BT-HT325	厚さ ≤ 50mm	≤ 0.18	≤ 0.55	≤ 1.60	≤ 0.035	≤ 0.035
	厚さ > 50mm	≤ 0.20				
BT-HT325B	厚さ ≤ 50mm	≤ 0.18	≤ 0.55	≤ 1.60	≤ 0.030	≤ 0.015
	厚さ > 50mm	≤ 0.20				
BT-HT325C	厚さ ≤ 50mm	≤ 0.18	≤ 0.55	≤ 1.60	≤ 0.020	≤ 0.008
	厚さ > 50mm	≤ 0.20				
BT-HT355	厚さ > 40mm ≤ 100mm	≤ 0.20	≤ 0.55	≤ 1.60	≤ 0.035	≤ 0.035
BT-HT355B	厚さ > 40mm ≤ 100mm	≤ 0.20	≤ 0.55	≤ 1.60	≤ 0.030	≤ 0.015
BT-HT355C	厚さ > 40mm ≤ 100mm	≤ 0.20	≤ 0.55	≤ 1.60	≤ 0.020	≤ 0.008

本鋼材は、極厚においても高強度を確保し溶接性に優れるため、母材及び溶接部の設計基準強度(F値)に関する建設大臣の材料一般認定を受けており、板厚が40mmを超え100mm以下においても強度の低減が不要となり、設計上、大きなメリットを有する。

(2) 建築構造用TMCP厚板の利用技術開発

建築構造用TMCP鋼板は、主として高層建築の4面溶接ボックス断面柱に使用されている。図3に標準的な柱梁接合部の例を示す。この溶接接合部の継手強度、靱性及びTMCP鋼で問題点とされる大入熱溶接部の軟化等について、数多くの試験を行い、その性能を確認している。一例として、図3のような実大モデルを製作し、溶接継手性能の確認試験を行った。図4、表3に試験結果のうち柱スキンプレートを挟んだ梁フランジとダイアフラムの十字溶接継手部の引張試験結果を示す。溶接時の入熱により熱影響部(HAZ)の結晶粒が粗大化し、軟化がわずかに生じるが、引張試験結果では継手強度は母材仕様を十分満足している。

表2 機械的性質

種類の記号	降伏点又は耐力 (N/mm²)	引張強さ (N/mm²)	降伏比 (%)	伸び	
				試験片	(%)
BT-HT325	≥ 325	490~610	≤ 80	厚さ ≤ 50mm 1A号	≥ 21
				厚さ > 40mm 4号	≥ 23
BT-HT325B	325	490~610	≤ 80	厚さ ≤ 50mm 1A号	≥ 21
				厚さ > 40mm 4号	≥ 23
BT-HT325C	~445	490~610	≤ 80	厚さ ≤ 50mm 1A号	≥ 19
				厚さ > 40mm 4号	≥ 21
BT-HT355	≥ 355	520~640	≤ 80	厚さ ≤ 50mm 1A号	≥ 19
				厚さ > 40mm 4号	≥ 21
BT-HT355B	355	520~640	≤ 80	厚さ ≤ 50mm 1A号	≥ 19
				厚さ > 40mm 4号	≥ 21
BT-HT355C	~475	520~640	≤ 80	厚さ ≤ 50mm 1A号	≥ 19
				厚さ > 40mm 4号	≥ 21

備考 1. 降伏比 = $\frac{\text{降伏点又は耐力}}{\text{引張強さ}} \times 100$
 2. 表中の値はL又はC方向の規定値とする。

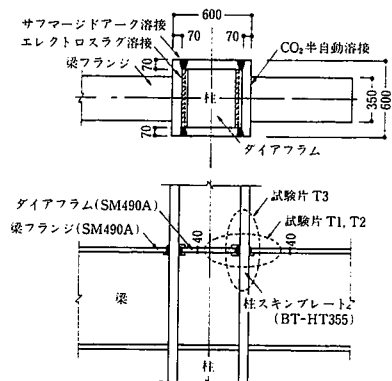


図3 ボックス柱の柱梁接合部

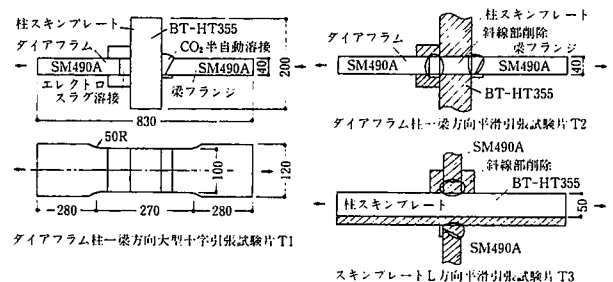


図4 溶接継手引張試験片

表 3 溶接継手引張試験結果

試験片 符号	試験片寸法		ゲージ長 (mm)	荷 質		応 力		破断位置	*2 一様 伸び (%)	破断 伸び (%)
	板厚 (mm)	板幅 (mm)		*1降 伏点 (ton/)	引張 強さ (ton/)	*1降 伏点 (ton/)	引張 強さ (ton/)			
T1	39.6	100.1	270	132	216	33.3	54.5	母材 (SM490A)	10.6	18.6
T2	40.1	100.1	270	131	215	32.6	53.6	母材 (SM490A)	16.8	26.5
T3	50.2	100.3	200	178	270	35.4	53.6	中央(Depo, HAZ,母材) (BT-HT355)	14.2	29.1

* 1 各ゲージにおける0.2%耐力

* 2 荷重-伸び曲線より求めた一様伸び

建築構造用 TMCP 鋼の開発と商品化以降、ほとんどの高層建築の柱材に本鋼材が採用されており、既に新日本製鐵では累計で約5万tの製造実績を有している。

2.1.2 建築構造用 TMCP 極厚H形鋼 (商品名: NSGH325B, 325C; 数値は降伏点又は耐力)

(1) 建築構造用 TMCP 極厚H形鋼の特長

本鋼材は非水冷型熱加工制御法(非水冷型 TMCP 法)と呼ばれる新しい圧延方法で製造されたもので、規格は厚板の TMCP 鋼板と同様である(表1, 2参照)。製造方法として TMCP を使用しているため、40mm を超える板厚領域においても、溶接性能の確保と母材及び溶接部の強度の低減が不要な性能を有している。また、開断面であるため、ボックス断面に比較して柱梁仕口の加工や品質検査の大幅な簡素化が可能となる。

表4に化学成分の規格値と製造実績を示す。溶接、加熱矯正等の加工性向上のため、炭素当量及び溶接割れ感受性組成を低減した成分系となっている。表5に機械的性質の規格値と製造実績を、表6に衝撃試験実績を示す。各部位・方向において、耐震性、耐ラメラ

表 4 化学成分分析結果

	板厚(mm)	C	Si	Mn	P	S	Ceq.	P _{CM}
規格値	>50	≤0.20	≤0.55	≤1.60	≤0.020	≤0.008	≤0.40	≤0.26
分析値	70	0.11	0.16	1.44	0.007	0.004	0.37	0.20

Ceq = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14

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

表 5 引張試験結果

区分	試験 部位	板厚 (mm)	方 向	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	YR (%)	伸び (%)	絞 り (%)
規格値	1/4F	>50	L	325~445	490~610	≤80	≥23	平均≥25 個々≥15
試験値	1/4F	70	L	395	508	78	38	min.78
			Z	364	512	71	33	
	1/4W	45	L	360	502	72	38	
			Z	373	513	73	32	77

表 6 衝撃試験結果

区 分	試 験 部 位	板 厚 (mm)	方 向	vE _{0c} (平均値)	
				吸収エネルギー (J)	脆性破面率 (%)
規 格 値	1/4F	>50	L	≥27	
試 験	1/4F	70	L	298	7
			C	253	9
	1/4W	45	L	326	0
			C	228	17

テア性、耐衝撃性(耐脆性亀裂伝播停止性)に優れた機械試験値を保持している。

(2) 建築構造用 TMCP 極厚H形鋼の利用技術開発

本鋼材は主に高層建築物の柱材として使用されるため、溶接継手としては図5に示すような柱柱の突合せ継手、柱梁のT継手が主体となる。これら溶接継手について、表7の溶接施工条件で引張及び衝撃試験を行った結果を表8, 9にそれぞれ示す。各試験値とも母材並の優れた強度、靱性を保持している。

柱材としての性能を確認するため、図6に示す実大柱の単純曲げ試験を実施した。荷重-変形の関係を図7に示す。単純曲げ試験の結果だけではあるが、TMCP 極厚H形鋼は建築構造用として要求される耐力及び塑性変形性能を十分有していることがうかがえる。

なお、本鋼材は建築基準法(建設省告示1906号)に定めるF値の

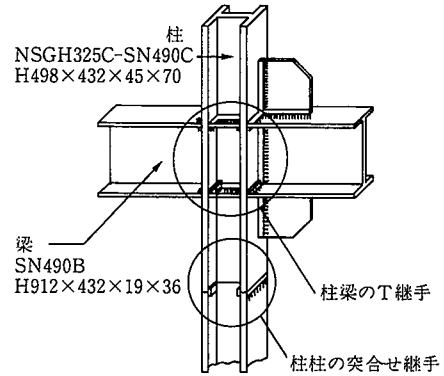


図5 極厚H形鋼柱の柱梁接合部

表 7 溶接施工条件

試験体	溶 接 位 置	溶接想定 場所姿勢	開先形状	溶接施工条件				
				パス 回数	電流 A	電圧 V	速度 cm/min	入熱 J/cm
柱梁	フランジ	現 場 下 向		20	290	37	23 45	14 310 27 990
				27	270	39	22 76	8 310 28 710
柱柱	フランジ	現 場 横 向		68	270	33	30 40	13 370 17 820

溶接方法: CO₂半自動 溶接材料: YM-26 1.2mmφ 層間温度: ≤250°C

表 8 溶接継手引張試験結果

試 験 体 部 位	柱 柱		柱 梁		
	引張強さ (N/mm ²)	破断位置	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	破断位置
1/4フランジ	536.4	HAZ	-	562.9	ボンド

表 9 溶接継手衝撃試験結果 単位(J)

試 験 体 方 向 位 置	柱 柱				柱 梁			
	L 方向				Z 方向			
	母材	溶接金属	ボンド	HAZ	母材	溶接金属	ボンド	HAZ
1/4F(1/2t)	152 (52)	83 (33)	198 (38)	140 (51)	141 (52)	114 (28)	118 (50)	47 (86)

(注釈) () 内は脆性破面率(%). 試験温度: vE_{0c}

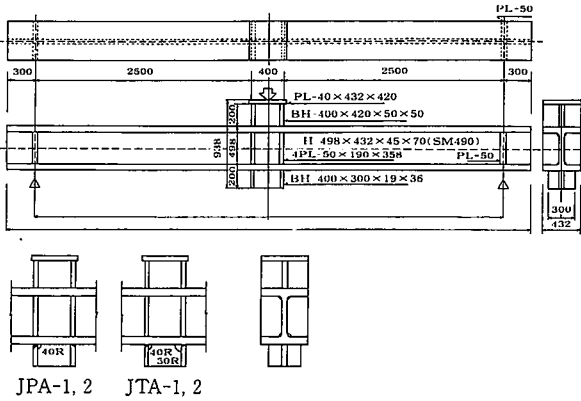


図6 試験体概要図

低減が不要な強度を保有させているが、現時点では個別物件ごとの評定、認定が必要である。今後、数物件の実績を踏まえ、一般認定化を進める予定である。

2.1.3 TMCP プレスバンド鋼管

設計の多様化に伴い、横浜ランドマークタワー向け SM570Q : φ900×90 (径厚比 D/t=10.0) のように極厚の鋼管が使用されるケース²⁾が増えてきた。以下に、建築構造用 TMCP 鋼板 BT-HT325 及び BT-HT355 を鋼管にプレス曲げ加工した場合について、応力除去焼鈍 (SR) の有無をパラメータとして実施した性能確認試験結果の概要を述べる。

試験対象鋼管を表10に示す。鋼管サイズは、BT-HT325 : φ750×70 (径厚比 D/t=10.7), BT-HT355 : φ850×70 (D/t=12.1) である。SR 条件は JIS Z 3700 により、保定温度は 595°C, 保定時間は 1 時間/25mm 以上とした。試験は、造管前の厚板について化学成分分析、音響異方性、引張試験、衝撃試験を、造管後の鋼管について SR 前後の引張試験、溶接部引張試験、衝撃試験を実施した。試験結果はいずれも規定値 (保証値) を満足していたが、ここでは BT-HT325 の場合の引張試験結果を表11に示す。試験結果は、SR による材質改善効果がうかがえ、SR 前鋼管の降伏比を除いて規定値を満足している。

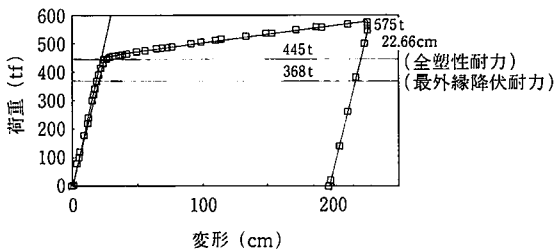


図7 極厚H形鋼単純曲げ試験JTA1 荷重-変形の関係

表 10 対象鋼管

No	鋼種	寸法 (D/t)	SR前後
①	BT-HT325	φ750×70×750 (10.7)	前
②	〃	〃	後
③	BT-HT355	φ850×70×750 (12.1)	前
④	〃	〃	後

注1) SRは応力除去焼鈍。
注2) SR条件はJIS Z3700による。
(保定温度: 595°C, 保定時間: 1時間/25mm以上)

TMCP プレスバンド鋼管は、2.1.1 項で見えてきたように、板素材において低降伏比、炭素当量及び溶接性割れ感受性組成を指標とする溶接性、シャルピー吸収エネルギー等を保証した材であり、造管後の鋼管においても TMCP 厚板の所定の性能を満たしている。

2.2 建築構造用圧延鋼材 (SN 材)

1981年施行の新耐震設計法では、鉄骨骨組の変形性能の確保が重要な要素となり、これに伴い鋼素材にも鋼材の降伏後の余力と塑性変形性能が要求されてきた。一方、従来建築構造用としては汎用の規格である SS, SM 材が多用されてきたが、これらの鋼材には上述の要求規定がない。このため、1994年6月に建築構造用専用の鋼材規格“建築構造用圧延鋼材 (JIS G 3136) : SN 材”が制定された。今回、H形鋼を例にその概要と製造実績を紹介する。

SN 材の規格の特長は、機械的性質の規定として、降伏点又は耐力の上下限值, 降伏比, シャルピー吸収エネルギー, 板厚方向性能 (C 鋼種) など、耐震設計に係る規定を加えたことと、溶接性の確保 (Ceq) や P, S 等の不純物元素の規制を強化したことである。

SN 材の化学成分及び機械的性質の規格値, 製造実績を従来鋼 (SS400) と比較して表12, 13に示す。SN400A は塑性変形を生じさせず、本格的な溶接をしない部材・部位を使用対象にしている。B 材は一般部材・部位, C 材は更に板厚方向に力を受ける部位を想定

表 11 BT-HT325の場合の引張試験結果

SR前後	板厚 mm	試験片	位置	方向	降伏点又は耐力 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	降伏比 %	伸び %	絞り %	
規定値	>40	4号	-	L,C	≥325	490~610	≤80 ^{*1} (85 ^{*2})	≥23	-	
厚板	70	4号	3/4t	L	383	527	73	36	-	
				C	400	541	74	59	-	
		5号	全厚	L	396	541	73	58	-	
				C	392	533	74	28 ^{*3}	75	
		WES 1106	-	Z	398	533	75	28 ^{*3}	75	
				C	386	532	73	28 ^{*3}	75	
鋼管	70	SR前①	4号	1/4t	L	491 ^{*4}	556	88	30	-
					C	493 ^{*4}	556	89	30	-
			5号	全厚	L	431 ^{**}	533	81	30	-
					C	443 ^{**}	534	83	30	-
		SR後②	4号	1/4t	L	440	540	81	34	-
					C	429	542	79	33	-
5号	全厚	L	L	400	523	76	34	-		
			C	384	522	74	33	-		
5号	全厚	L	L	429	554	77	53	-		
			C	424	557	76	53	-		

注1) ①, ②は表10の対象鋼管におけるNo
注2) 降伏比は, *1は目標値, *2は保証値
注3) Z方向引張試験時の伸び (*3) は参考値
注4) 降伏点又は耐力は, 無印は降伏点, *4は0.2%オフセット耐力

表 12 化学成分 (板厚 16 < t < 40mm 400N鋼) 単位%

規格名称	炭素当量 Ceq	C	Si	Mn	P	S
SN400B	≤0.36	≤0.20	≤0.35	0.60≤	≤1.40	≤0.030 ≤0.015
SN400B (製造実績例)	0.29	0.16	0.14	0.71	0.018	0.007
SS400 (規格)	-	-	-	-	≤0.050	≤0.050

表 13 機械的性質 (板厚 16 < t < 40mm 400N鋼)

規格名称	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏比 (%)	伸び (%)	シャルピー °C(J)
SN400B(規格)	235 ≤ ≤ 355	400 ≤ ≤ 510	≤ 80	≥ 22	0 ≥ 27
SN400B(製造実績例)	281	437	64	34	131
SS400(規格)	≥ 235	400 ≤ ≤ 510	-	≥ 21	-

して、板厚方向の性能を規定した鋼種となっている。

1994年9月には、建設省告示の改正(新告示1906号,旧1794号)によりSN材が法的にもその使用が認められ、今後、建築構造用鋼材の主流となる。

2.3 建築用円形鋼管 (建築構造用 UO 鋼管)

(1) 建築用円形鋼管の特長

設計デザインの多様化と鋼管の内部にコンクリートを充填した合成構造のコンクリート充填鋼管構造(CFT構造)の普及に伴い、円形鋼管コラムの需要が増えてきた。従来、中小径の鋼管はトラス部材に多用され、建物の柱材としては遠心鑄造鋼管が主として使用されてきた。CFT構造の場合、厚板を冷間で造管したUO鋼管、プレスバンド鋼管が板厚と外径から最適な素材となる。しかしながら、従来配管向けに製造されていたUO鋼管やプレスバンド鋼管を建物の柱材に使用する場合は、YR、管軸方向の性能等、建築構造用としての材質特性が必要となる。また、寸法精度の確保も必要である。

プレスバンド鋼管については既に2.1.3項で紹介したので省略し、以下UO鋼管³⁾について述べる。表14に鋼管に造管後でSM490Aと同様な性能を目標として製造したUO鋼管の機械的性質の例を示す。図8に、鋼管の板厚方向の機械的性質の変化を示す。断面の内外面で若干の加工硬化があるが、全厚で見た場合、現状のUO鋼管の製造範囲(径厚比D/tが20程度以上)においては、加工硬化の影響は

表 14 製管後の母材部引張試験結果

	方向	YP	TS	YR	伸び
規格値	-	≥ 315	490/610	-	≥ 21
①φ812.8×28 (D/t=29.0)	L	406	559	73%	25%
	C	454	573	79%	42%
②φ711.2×28 (D/t=25.4)	L	415	592	70%	26%
	C	454	608	75%	41%
③φ711.2×25 (D/t=28.4)	L	431	599	72%	25%
	C	418	598	70%	40%

(注) YP, TSの単位はN/mm²。YPは0.2%オフセット耐力。
D/t: 径厚比 (D: 外径, t: 板厚)

実用上問題ないと判断される。また、図9は、建築構造用として製造されたUO鋼管(SM490A)の製造実績のうち降伏点又は耐力(YP)、引張強度(TS)及びYRを示す。YRは概ね80%以下となっており、建築構造用として十分な性能を有している。

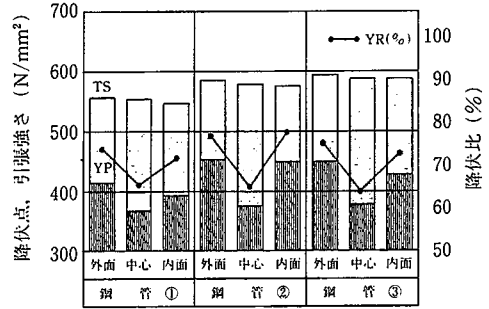
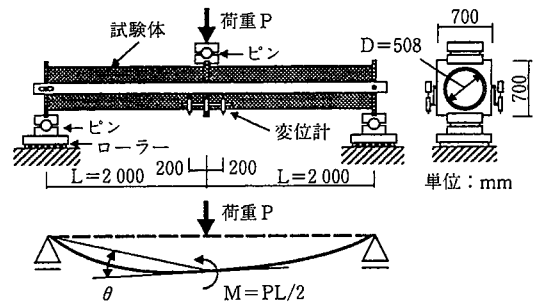


図8 母材部引張試験結果(板厚方向分布)



* θは局部座屈が進展する側の部材角。

図10 試験体と載荷、測定方法

表 15 試験結果

試験体名	最大耐力 Mmax (tf·m)	計算耐力 Mp (tf·m)	Mmax Mp	Mp時の 弾性限 変位 θp(%)	局部座屈 発生時の 変位 θLb(%)	最大耐力 時の変位 θmax (%)	塑性変形 能力 θmax θp
C20-85	301.0	250.4	1.20	0.71	3.99	5.69	≥ 7.03
C20-75	326.0	260.4	1.25	0.73	-	6.18	≥ 7.45
C32-85	184.4	144.9	1.27	0.62	2.44	4.86	6.86
C32-75	202.0	159.0	1.27	0.66	2.43	6.14	8.25
C42-85	140.5	116.5	1.21	0.64	2.17	2.81	3.41
C42-75	149.5	122.2	1.22	0.67	2.44	3.70	4.56
C56-85	105.8	105.0	1.01	0.75	1.56	2.13	1.84
C56-75	103.2	92.9	1.11	0.67	1.59	2.49	2.73

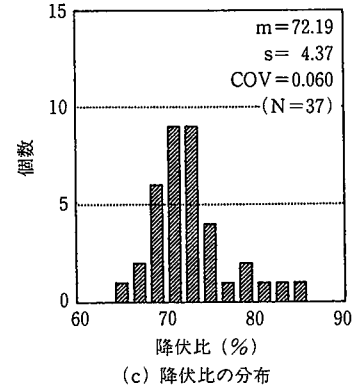
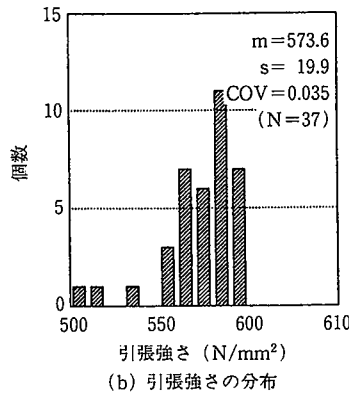
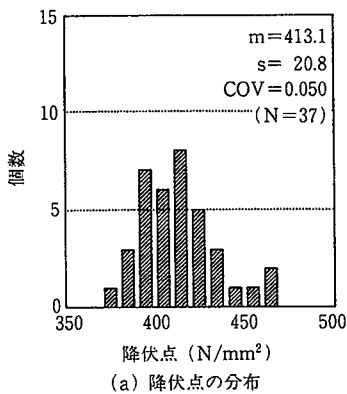


図9 機械的性質の製造実績データ (SM490A, 母材L方向)

(2) 建築用構造用 UO 鋼管の利用技術開発

柱材としての性能を確認するため、図10に示す実大鋼管の単純曲げ試験を実施した。試験体一覧を表15に、試験結果のうち荷重-変形の関係の一例を図11に示す。図12に耐力上昇率及び塑性変形倍率と鋼管の径厚比の関係を示す。試験結果から、建築用の UO 鋼管は、建築構造用として要求される耐力及び塑性変形性能を十分有していることが確認された。

2.4 低降伏点鋼, 極低降伏点鋼 (商品名: BT-LYP235, 100; 数値は降伏点又は耐力)

(1) 低降伏点鋼, 極低降伏点鋼の特長

地震入力に対して、建物に制振デバイスを組み込み、その制振効果により地震入力エネルギーを積極的に負担させ、耐震性能を向上させる技術が急速に進んできた。ダンパーとしては、オイルダンパーのような粘性材料、鉛などの粘弾性材料を用いたもの、あるいは摩擦を利用したものなどが実用化されている。鉄鋼系の材料としては、強度が低い低降伏点鋼や更に強度を小さくした極低降伏点鋼を使用した履歴エネルギー吸収タイプの制振技術⁴⁻⁷⁾が注目されている。

この鋼材を制振ダンパーとして組み込んだ設計方法では、地震時に柱や梁の主要構造部材に先行してダンパーを降伏させ、制振効果を発揮させることを狙う。例えば、490N 鋼で設計された主要構造部材に先行して降伏させるためには、ダンパーの形状や使用方法に加えて降伏耐力が小さいことが必要である。更に、設計で狙った荷重で降伏させると共に、ダンパーの信頼性を確保するために降伏耐力のばらつきの制御が必要となる。また、地震時にはダンパー素材は、塑性域にわたる繰返し変形を受けるため、優れた伸び性能と低サイクル疲労特性も要求される。

表16, 17に新日本製鐵で開発、商品化を行った低降伏点鋼板, 極低降伏点鋼板の化学成分及び機械的性質の(社内)規格と製造結果例を示す。図13に応力-歪曲線の例を示す。二つの鋼材は以下のような特長を持つ。降伏点又は耐力は、235N/mm²(BT-LYP235)及び100N/mm²(BT-LYP100)と低く、ばらつきの範囲の絶対値も小さい。破断までの伸びは40~50%以上であり、非常に大きな伸び性能を有する。溶接等の加工性は従来の軟鋼と変わらない。図14はBT-

表 16 化学成分 (単位: %)

鋼種	試験体名	板厚 (mm)	C	Si	Mn	P	S	
L Y P 2 3 5	製造目標値		≤0.18	—	—	≤0.035	≤0.035	
	試験結果	№1	12	0.05	0.03	0.27	0.021	0.012
		№2	20	0.04	0.02	0.24	0.018	0.008
		№3	40	0.04	0.01	0.27	0.018	0.009
L Y P 1 0 0	製造目標値		≤0.03	—	—	≤0.035	≤0.035	
	試験結果	№1	6	0.003	0.02	0.14	0.007	0.012
		№2	9					
		№3	12					

備考)・分析試験の要領は、JIS G 3106による。

表 17 機械的性質

鋼種	試験体名	板厚 (mm)	試験方向	降伏点又は耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	試験片形状
L Y P 2 3 5	製造目標値			215~245	300~400	≥40	JIS 5号
	試験結果	№1	L	238	335	55	
			C	229	332	55	
		№2	C	224	325	62	
№3	C	215	313	71			
L Y P 1 0 0	製造目標値			90~130	200~300	≥50	JIS 5号
	試験結果	№1	L	123	255	58	
			C	116	251	59	
		№2	L	123	253	63	
	№3	L	103	260	64		
		C	100	263	66		

備考)・L方向: 試験片を圧延方向に平行に採取して、試験を実施したもの。
 ・C方向: 試験片を圧延方向に直角に採取して、試験を実施したもの。
 ・LYP100は0.2%オフセット耐力。

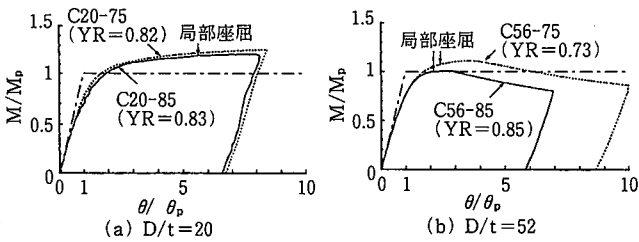


図11 荷重-変形の関係の一例

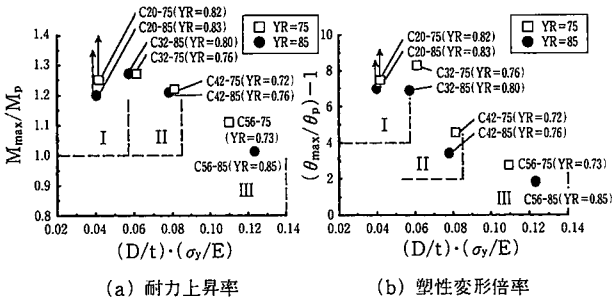


図12 耐力上昇率及び塑性変形倍率と径厚比の関係

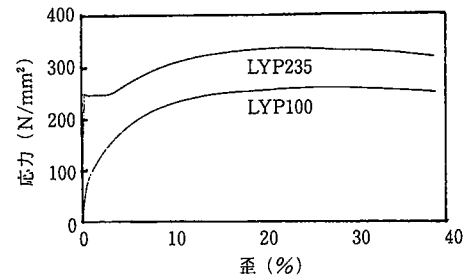


図13 応力-歪線図(LYP235: t=12, LYP100: t=6)

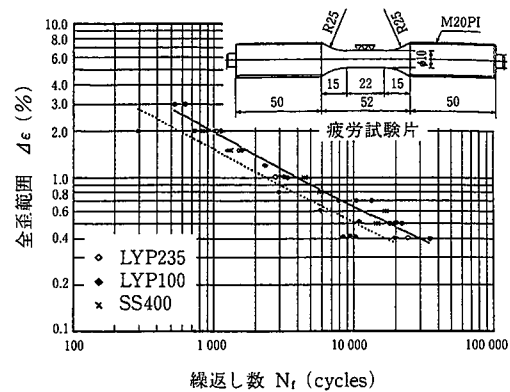


図14 低サイクル疲労試験結果

LYP235, 100及びSS400の低サイクル疲労試験結果である。BT-LYP100がSS400に比較して若干低サイクル疲労性能が劣るが、これは鉄の結晶粒の粗大化によるものと推定される。

(2) 低降伏点鋼，極低降伏点鋼の利用技術開発

図15, 16は、低降伏点鋼材及び極低降伏点鋼材を使用した制振パネルの試験結果である。この例では、BT-LYP100のせん断降伏により、安定したエネルギー吸収性能を発揮させている。図17はBT-LYP235をハニカム状に加工して制振壁として使用した例⁹⁾である。このように、地震エネルギーを低降伏点鋼あるいは極低降伏点鋼の制振デバイスに集中させ、メインの骨組の損傷を制御する技術が実用化されてきている。

3. 建築構造用590N，780N 鋼

建築構造の高層化，大スパン化の進展に伴い，一部の高層建築物や大スパン架構では，柱に高応力の状態が発生し，490N級の鋼材では100mmに近い過大な板厚になるため，加工や溶接施工上の問題が生じてきていた。このようなニーズに応えるために，590N 更には780N級の強度を確保し，かつ高性能鋼の要求を満足した建築構造用鋼材の開発に取り組んできた。本鋼板の使用により，鋼重量の低減による建設コストの削減と共に，過大な板厚となることを軽減することで製品の信頼性を高めることが可能となる。

3.1 建築構造用590N 鋼 (商品名：BT-HT440B, 440C；数値は降伏点又は耐力)

(1) 開発の経緯

1988年からの5か年計画で，建設省の総合技術開発プロジェクト“建設事業への新素材・新材料利用技術の開発”が実施され，その一環として590N級高性能鋼の研究開発が鋼材倶楽部内に設けられた“高性能鋼利用技術小委員会”において行われ，利用技術指針⁸⁾，溶

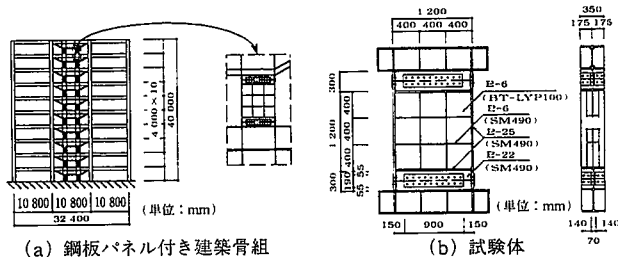


図15 鋼板パネル付き建築骨組及び試験体

接施工指針⁹⁾，高力ボルト設計施工指針¹⁰⁾等が作成された。

本鋼板を使用するに当たっては，現時点では建築基準法に基づく建設大臣認定が必要であるが，現在，メーカー各社で上記指針に示された材料規格，設計・施工指針，F値，構造ランク別幅厚比等について，1995年度中の大臣認定取得を目指して準備中である。なお，上記指針の規格内容をSN材の体系と整合性を持たせるべく表18のように若干修正を加えている。

(2) 建築構造用590N 鋼の特長

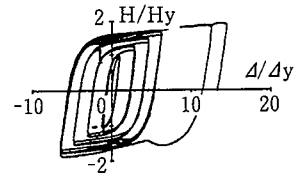


図16 実験結果の一例

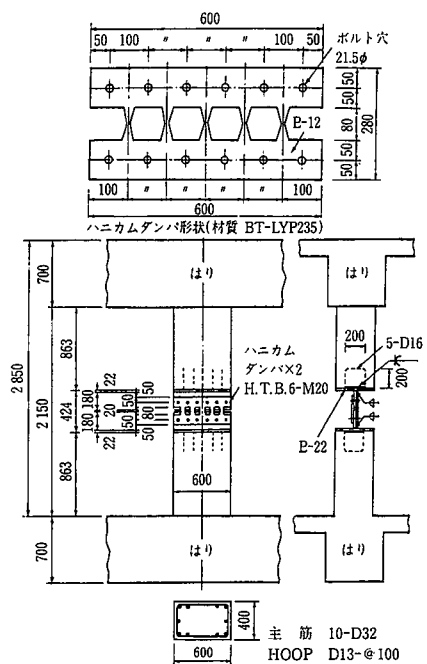


図17 ハニカム状制振壁の使用例

表 18 BT-HT440鋼板の規格

(a) 化学成分(重量%)

種類	板厚mm	C	Si	Mn	P	S	Ceq	P _{CM}	
総プロ仕様	SA440 I	19~100	≤0.18	≤0.55	≤1.60	≤0.035	≤0.008	≤0.47(0.44)	≤0.30(0.28)
	SA440 II								
大臣認定案	BT-HT440B	19~100	≤0.18	≤0.55	≤1.60	≤0.030	≤0.008	≤0.47(0.44)	≤0.30(0.28)
	BT-HT440C					≤0.020			

C_{eq}, P_{CM}は，板厚19以上40以下の場合括弧内，40超100以下の場合括弧外の値以下とする。

(b) 機械的性質

種類	板厚mm	降伏点又は耐力 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	降伏比 %	伸び %	吸収エネルギー [0°C] J	Z 絞り %
総プロ仕様	19~100	≥440	590~740	≤80	≥20(26)	≥47	-
		440~540					
大臣認定案	19~100	440~540	590~740	≤80	≥20(26)	≥47	-
							≥25

伸びは，板厚19以上の場合括弧内5号試験片，20超の場合括弧外4号試験片の値以上とする。

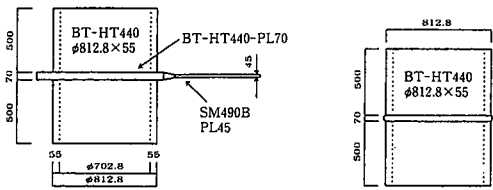
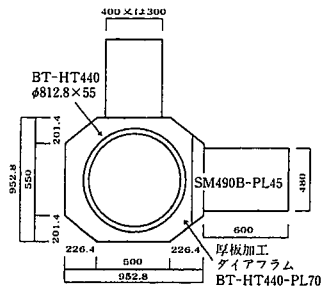
新日本製鐵の建築構造用590N鋼(BT-HT440)は熱処理を行った調質鋼で、その製造プロセスは圧延と熱処理を併用した方法による。BT-HT440鋼板の規格を表18に示す。適用板厚は19mm~100mmである。機械的性質は、降伏比を80%以下、降伏点又は耐力の上下限値の範囲を100N/mm²以下に制御し、シャルピー吸収エネルギーを0℃で47J以上に規定している。

F値は、降伏点又は耐力の下限値4.5t/cm²(440N/mm²)を採用しており、従来のSM570QのF値¹¹⁾が4.1t/cm²であるのに対して、0.4t/cm²の強度アップとなっている。また、保有水平耐力を求める際の材料強度はFの値に1.05を乗じた値としている。

(3) 建築構造用590N鋼の利用技術開発

貫通ダイヤフラムを有する鋼管柱の溶接継手性能を確認するために、φ812.8×55(径厚比D/t=14.8)のBT-HT440鋼管を使用して、図18に示すような柱梁仕口及び柱柱現場継手の実大試験体を製作し、引張試験、衝撃試験、溶接継手部硬さ試験¹²⁾を実施した。試験結果は、引張試験、衝撃試験及び硬さ試験結果をそれぞれ図19、20、21に示しているが、強度、靱性、溶接熱影響のすべてに十分な性能を有することが確認できた。

(4) 実用化例



(a) 柱梁仕口 (b) 柱柱現場継手

図18 実大溶接継手試験体

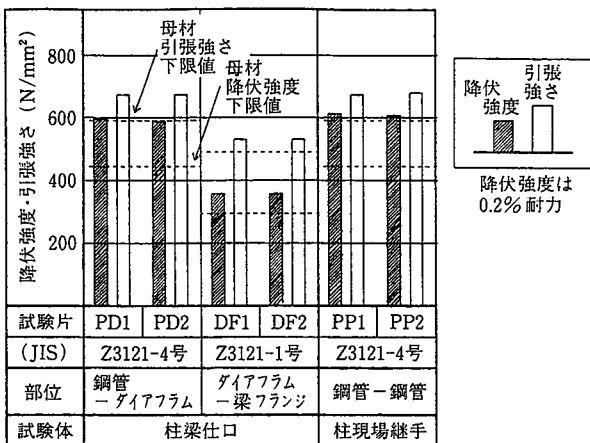


図19 溶接継手部の引張試験結果

BT-HT440の実用化例は、みなとみらい21中央地区25街区ランドマークタワー(1989年9月に個別評定取得、地上70階、延床面積23万m²)を始め、みなとみらい21中央地区24街区B棟(同1993年6月、地上28階、延床面積7万m²)、東日本旅客鉄道(株)本社ビル(同1994年2月、地上28階、延床面積6万m²)などがあり、低層階の鋼管柱や4面溶接ボックス断面柱として使用されている。

3.2 建築構造用780N鋼(商品名:BT-HT620;数値は降伏点又は耐力)

(1) 開発の経緯

土木構造物では、以前より590N鋼に限らず780N鋼クラスの鋼材も利用されてきているが、弾性域内での使用に留まっていた。一方、超高層建築物の柱材への使用を考えた場合、弾性設計を前提としても、柱脚部を始めとして柱が局部的に塑性化する可能性は大きく、このような部位では、780N鋼についても十分な塑性変形能力が

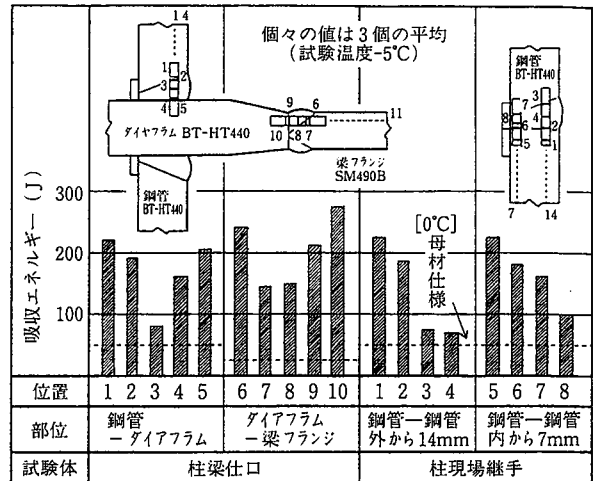
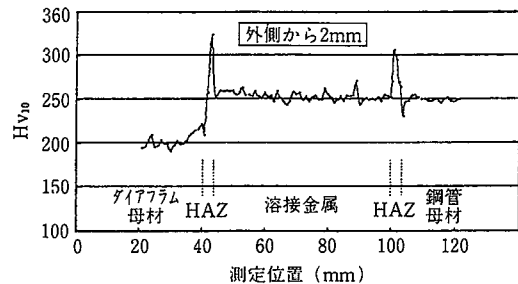
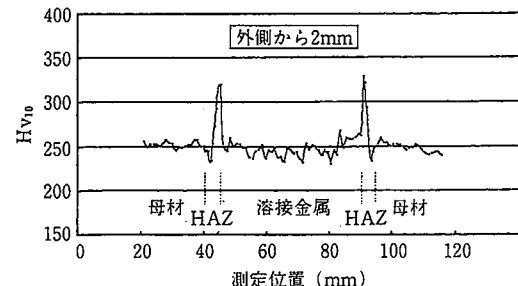


図20 シャルピー衝撃試験結果



(a) 柱梁仕口(鋼管-ダイヤフラム)



(b) 柱柱現場継手(鋼管-鋼管)

図21 硬さ試験結果

必要である。しかしながら、従来の780N 鋼では降伏比90%以上と塑性変形能力に乏しく、また、建築鉄骨で一般化してきた大入熱溶接への対応の研究も必要であった。

新日本製鐵では、研究開発の結果、これらの課題に応える建築構造用780N 鋼の実用化を行い、材料規格、設計・施工要領、F 値、構造ランク別幅厚比等についてまとめたので、その一端を紹介する。なお、本鋼材の使用に当たっては、590N 鋼(BT-HT440)の場合と同様に建設大臣認定が必要である。

(2) 建築構造用780N 鋼の特長

建築構造用780N 鋼(BT-HT620)は、高強度及び低降伏比を確保するために、製造プロセスにおいてTMCPを応用した焼入-二相域加熱-急冷-焼戻し処理を採用すると共に、溶接割れ防止予熱温度を低減(すなわち熱影響部の硬さをできる限り低く)するために、成分設計においてCを低くし、Bを添加せず、Cuで強度確保を補い、かつ熱影響部衝撃特性を考慮してNiを添加したものである。BT-HT620鋼板の(社内)規格を表19に示す。適用板厚は25mm~100mmである。機械的性質は、降伏比を85%以下に制御し、シャルピー吸収エネルギーを0℃で47J以上に規定している。

F値は、降伏点又は耐力の下限値6.3t/cm²(620N/mm²)を採用しており、引張強度が490N級の鋼材のF値¹³⁾が3.3t/cm²であるのに対して約2倍の強度アップとなっている。また、保有水平耐力を求める際の材料強度はFの値に1.05を乗じた値としている。

図22にY形溶接割れ試験結果を示す。なお、ここでは、大入熱溶接熱影響部の低温衝撃特性を確保することに重点を置いた成分系のA鋼(Bが添加された従来の焼入れ性を重視した成分系に更にNiを

表 19 BT-HT620鋼板の規格

(a) 化学成分(重量%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	Ceq
≤0.16	≤0.35	0.60~1.60	≤0.030	≤0.015	0.15~1.50	0.70~2.00	0.30~0.80	0.20~0.60	≤0.05	≤0.60	≤0.60

・Ceq=C+Si/24+Mn/6+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14
 ・必要に応じその他の合金元素を添加する

(b) 機械的性質

引張試験				衝撃試験	
降伏点又は耐力 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	降伏比 %	伸び %	試験温度 ℃	吸収エネルギー J (3個の平均値)
≥620	780~930	≤85	≥16	0	≥47

・引張試験は試験片JIS4号、C方向による。
 ・衝撃試験は試験片JIS4号(2mmV)、L方向による。

[溶接条件]

溶接方法	溶接棒	電流	電圧	速度	入熱
被覆アーク	L-80EL	170A	25V	15cm/min	17kJ/cm

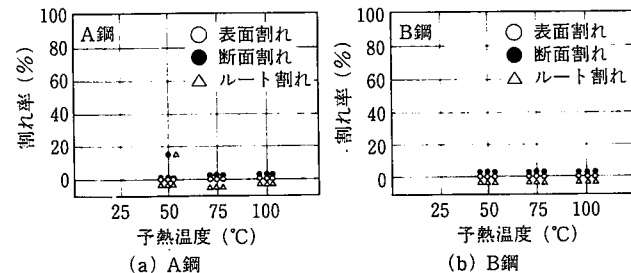


図22 Y形溶接割れ試験結果

加えたもの)と、溶接割れ防止予熱温度を低減することに主眼を置いたB鋼(BT-HT620鋼板)について、厚さ100mmの供試材の溶接性を確認した。試験結果は、割れ防止予熱温度はA鋼が75℃、B鋼が50℃以下であり、B鋼の割れ性の方が優れている。

(3) 建築構造用780N 鋼の利用技術開発

図23にBT-HT620鋼板を使用した箱形断面部材の柱圧縮曲げ試験結果¹⁴⁾を示す。なお、塑性変形率Rは、最大耐力から5%減少した時点の変形を降伏変形で除した値から1を引いたもので定義する。また、図中実線は、引張強度が490N級の鋼材の幅厚比¹²⁾に $\sqrt{\{(490\text{N級鋼材のF値}) / (\text{BT-HT620鋼板のF値})\}}$ を乗じて得られる幅厚比を表す。試験結果から、図中実線で表される幅厚比制限値でBT-HT620鋼板を用いた箱形断面柱の塑性変形能力を評価できることが分かった。

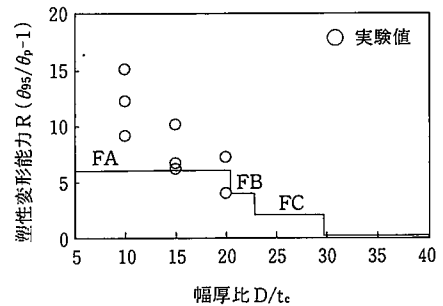


図23 箱形断面柱の塑性変形能力

4. 将来動向と結言

以上、建築構造用として開発、実用化された高張力鋼材及び高性能、高機能鋼材について述べた。最近、これらの鋼材の特長を上手に生かす使い方の研究開発が進んできた。例えば高張力鋼の架構骨組に極低降伏点鋼の制振ダンパーを組み込んで、高張力鋼の骨組を地震時にも弾性範囲にとどめ、耐震性能を大幅に向上させるような設計技術や、590N、780Nクラスの高張力鋼の鋼管の内部に高強度コンクリートを充填した合成構造の実用化等である。今後、開発された新しい鋼材の利用技術開発が積極的に進み、鉄骨建築の耐震性能の向上と、建設コスト削減につながっていくことが期待される。

参考文献

- 1) 大橋守 ほか：製鉄研究。(334), p.17(1989)
- 2) 萩原賢次 ほか：溶接学会誌。61(2), p.113(1992)
- 3) 永田匡宏 ほか：日本建築学会大会学術講演梗概集 構造。1994.9, p.1071
- 4) 小畑鐸二 ほか：日本建築学会大会学術講演梗概集 構造。1989.10, p.643,645,647, 1990.10, p.951,953, 1992.8, p.1041
- 5) 佐分利和宏 ほか：日本建築学会大会学術講演梗概集 構造。1994.9, p.1341
- 6) 山口種美 ほか：日本建築学会大会学術講演梗概集 構造。1994.9, p.1067
- 7) 大西宏平 ほか：コンクリート工学。31(10), p.28(1993)
- 8) 建設省建築研究所、鋼材倶楽部：高性能鋼利用技術指針。1994
- 9) 鋼材倶楽部：60キロ高性能鋼溶接施工指針。1993
- 10) 鋼材倶楽部：高性能鋼高力ボルト設計施工指針。1993
- 11) 日本建築学会：鋼構造設計標準・同解説。1973
- 12) 岡田忠義 ほか：日本建築学会大会学術講演梗概集 構造。1994.9, p.1235
- 13) 日本建築センター：建築物の構造規定。1994.9
- 14) 鈴木孝彦 ほか：日本建築学会大会学術講演梗概集 構造。1994.9, p.1173