
高強度・高靱性 590 MPa 鋼 (SA440) を使用した建築鉄骨の加工条件の究明

Study of the Fabrication Method of 590 MPa Steel (SA440) with High Tensile Strength and High Ductility

泉 祐司 (Yuji Izumi) 藤野 博 (Hiroshi Fujino) 中島 松重 (Matsushige Nakajima)

要旨：

新しい高強度・高靱性の 590 MPa 鋼 (SA440 鋼) は焼入—二相域焼入—焼戻しという特殊な熱処理を行う調質鋼であり、一般の鋼材に比べて溶接施工が著しく難しい材料である。本材料を使用した建築鉄骨の場合、塑性加工や大入熱溶接により母材の優れた性能が低下する恐れがあり、これを避けるための施工方法が課題となっていた。今回、ベンディングにより製造される板巻管と 4 面成形ボックスにおいて、諸々の材料試験・施工試験を行い、本来の材料が持つ高性能を加工後の鉄骨においても実現させるための加工条件の究明を行った。その結果塑性加工を受ける板巻き鋼管の造管後の機械的性能を熱処理を行うことにより母材同等レベルにできることを確認した。また、ボックスの施工試験を通じて健全な溶接継手を確保できることを確認した。

Synopsis：

"Harumi 1-choume development" is a big project which includes three high rise buildings (height over 150 m) and ten middle/low rise buildings in Tokyo. The structural steel frame of these high rise buildings was designed involving box sections and pipes using a new steel material SA440 which has 590 MPa tensile strength. The box section has been manufactured by welding with much higher heat input after assembling steel plates, and the pipe section has been manufactured by bending a steel plate. SA440 is a particular material manufactured by undergoing heat treatment, including double quenching and tempering. The upper and lower limits of the yield strength (YP) and tensile strength (TS), and also yield ratio (YP/TS) are strictly regulated for this material. However, after the fabrication of this steel with much heat input or plastic deformation, there was a fear that the property of the material might have varied and YP, TS and YR might have exceeded the specified extent. In order to meet the requirement after the fabrication, we studied the heat treatment process of the pipe products, manufactured by bending, and the manufacturing process for the box products through production tests. From the result of these experiments, we studied the conditions of heat treatment and welding process which comply with the requirements. Consequently, Kawasaki

Steel confirmed that it can ensure good mechanical property of pipes to which heat treatment is applied after receiving plastic deformation, and also obtain a good weld metal of the fabricated box section.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

高強度・高靱性 590 MPa 鋼 (SA440) を使用した 建築鉄骨の加工条件の究明*

川崎製鉄技報
32 (2000) 2, 139-143

Study of the Fabrication Method of 590 MPa Steel (SA440) with High Tensile Strength and High Ductility



泉 祐司
Yuji Izumi
橋梁・鉄構事業部 鉄
構部 主査(課長)



藤野 博
Hiroshi Fujino
川鉄テクノリサーチ
(株) 技術支援センタ
ー 主任研究員 (部
長)



中島 松重
Matsushige Nakajima
川鉄メタルファブリカ
(株) 副部長

要旨

新しい高強度・高靱性の 590 MPa 鋼 (SA440 鋼) は焼入-二相域焼入-焼戻しという特殊な熱処理を行う調質鋼であり、一般の鋼材に比べて溶接施工が著しく難しい材料である。本材料を使用した建築鉄骨の場合、塑性加工や大入熱溶接により母材の優れた性能が低下する恐れがあり、これを避けるための施工方法が課題となっていた。今回、ベンディングにより製造される板巻管と 4 面成形ボックスにおいて、諸々の材料試験・施工試験を行い、本来の材料が持つ高性能を加工後の鉄骨においても実現させるための加工条件の究明を行った。その結果塑性加工を受ける板巻き鋼管の造管後の機械的性能を熱処理を行うことにより母材同等レベルにできることを確認した。また、ボックスの施工試験を通じて健全な溶接継手を確保できることを確認した。

Synopsis:

"Harumi 1-choume development" is a big project which includes three high rise buildings (height over 150 m) and ten middle/low rise buildings in Tokyo. The structural steel frame of these high rise buildings was designed involving box sections and pipes using a new steel material SA440 which has 590 MPa tensile strength. The box section has been manufactured by welding with much higher heat input after assembling steel plates, and the pipe section has been manufactured by bending a steel plate. SA440 is a particular material manufactured by undergoing heat treatment, including double quenching and tempering. The upper and lower limits of the yield strength (YP) and tensile strength (TS), and also yield ratio (YP/TS) are strictly regulated for this material. However, after the fabrication of this steel with much heat input or plastic deformation, there was a fear that the property of the material might have varied and YP, TS and YR might have exceeded the specified extent. In order to meet the requirement after the fabrication, we studied the heat treatment process of the pipe products, manufactured by bending, and the manufacturing process for the box products through production tests. From the result of these experiments, we studied the conditions of heat treatment and welding process which comply with the requirements. Consequently, Kawasaki Steel confirmed that it can ensure good mechanical property of pipes to which heat treatment is applied after receiving plastic deformation, and also obtain a good weld metal of the fabricated box section.

1 はじめに

晴海一丁目地区の再開発は、高さ 150 m 超えの高層棟 3 棟ならびにその他の中層棟、低層棟 10 棟を建設する延べ床面積 50 万 m² の大規模開発である。このうち、高層棟 3 棟の鉄骨の重要部分にはこれまであまり使用実績のない 590 MPa 鋼 (SA440 鋼) が使用されている。この SA440 鋼は 1996 年に建設省大臣認定を受けた新しい材料であり、当該プロジェクト以前には数件の適用事例があるのみ

で建築鉄骨に使用するための諸々の技術データが不足していた。一般的に SA440 鋼に限らず鋼材は鉄骨に加工される過程で、塑性加工や溶接入熱による影響により本来の材料が持つ性能に比べ局所的な性能劣化を引き起こし、建物全体の耐震性能を低下させることが考えられる。また、SA440 鋼は熱処理を施した高強度鋼であるため、他の鋼材に比べ溶接施工が著しく難しく完全な溶接施工条件が確立しているとは言えなかった。そのため当該プロジェクトの設計者である(株)日建設計としても、本来の材料が持つ高性能を加工後の鉄骨においても実現させるべく今回諸々の材料試験ならびに施工試験の実施を要求している。今回川崎製鉄は当該プロジェクトのうち Z 棟 ((株)大林組 JV 工区:鉄骨 18000 t) のうち 3000 t を受注し、

*平成12年2月24日原稿受付

上記の材料試験・施工試験を行った。この結果を報告するものである。

2 SA440 鋼の特徴

焼入 (Q) — 二相域焼入 (Q') — 焼戻 (T) という特殊な熱処理を行う調質鋼であり、降伏点 (YP)、引張強度 (TS) がレンジで規制されており、降伏比も 80% 以下に規定されている。また、590 MPa 級の極厚 H 形鋼も時期を同じくして開発され川崎製鉄の規格として RT440 と名付けられている。ただし、厚板の SA440 が QQ' T 材であるのに対し、極厚 H 形鋼の RT440 は成分と制御圧延により規格値を達成する材料である (Table 1)。

3 実施試験概要

Table 2 に実施した材料試験・施工試験を示す。

4 試験内容

上記の試験のうち、特に鋼管材料試験と BOX 施工試験について内容を説明する。

4.1 SA440C 鋼管材料試験

4.1.1 試験目的

SA440C 鋼は、焼入—二相域焼入—焼戻 (QQ'T) という特殊な熱処理を行う調質鋼であり、降伏点 (YP)・引張強度 (TS) がレンジで規制されており、降伏比 (YR) も 80% 以下と規定されている。

このような材料をベンディングやプレスにより塑性加工を行った場合、加工硬化による YP、TS、YR の上昇が懸念される。今回「晴海一丁目再開発」において 600φ×70 の鋼管柱が設計されており、造管後の材料特性を母材の性能と同等とする厳しい仕様となっている。この条件を満足するためには、造管後 (板巻き後) 熱処理 (SR) を行う必要があるが、本調質鋼に対する熱処理条件はこれまで一切知見がなく、本研究において要求性能を満足する条件を究明した。

4.1.2 要求性能

Table 3 に高性能 590 MPa 鋼の要求性能を示す。

4.1.3 試験内容

- (1) 実際の管を造管する前に予備試験として、外径 700φ×板厚 60 mm に相当する曲率 ($t/D = 9.4\%$) で鋼板のプレス曲げを行い、これから試験体を探ることとした。
- (2) 実際の造管加工は、冷間 (常温) 加工と温間加工の両方の可能性が考えられるため、予備試験材も両方のタイプの試験材を造ることとした。温間加工の場合は、母板の焼戻温度 550°C を超えないよう配慮した。
- (3) SR 温度は 550°C~680°C と広範囲にとり、試験結果をテンパーパラメーターで整理し最適条件を見極める手順とした。SR 保持時間も重要な要因であるが、大まかな狙いの SR 条件を探し出すため保持時間を 10 min とした。
- (4) その結果、加工方法が冷間加工と温間加工の 2 種類、SR 温度が加工のままも含めて 6 段階、試験片形状が 4 号と 12A 号の 2 種類の 24 種類の組合せの試験を行った。
- (5) その後追加試験として、SR620°C および 650°C で 2.5 h 保持する最終確認を行っている。

4.1.4 試験結果

- (1) SR により YP、TS とともに低下するが、YP は 680°C SR でも母材水準までは戻らない。したがって YR は 80~85% に推移し SR 温度をさらに高くしても TS が下がるため YR を 80% 以下とすることは難しい。
- (2) Fig. 1 および 2 に示すように、テンパーパラメーター (TP) で整理すると、TP = 18~18.5 の間が最も安定しており、十分要求性能を満足できる。
- (3) 冷間と温間加工の有為な差は見られないが、温間加工の方が性能値のばらつきは少ない。
- (4) シャルピー衝撃値は加工のままでも大きな劣化は見られず、SR 実施により母材レベルまで改善される。

4.2 BOX 施工試験

4.2.1 試験目的

過去に数工事 SA440 鋼材を使用した実績はあるが、今回のよう

Table 1 Specification of 590 MPa steel

	Yield strength (0.2%) (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Yield ratio (%)	Elongation (JIS type 4) (%)	Charpy V-notch (0°C) (J)
SA440C	440~540	590~740	Max. 80	Min. 20	Min. 47
RT440C	440~560	590~740	Max. 80	Min. 20	Min. 47

Table 3 Requirements of fabricated pipes

	Yield strength (0.2%) (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Yield ratio (%)	Elongation (JIS type 4) (%)	Charpy V-notch (0°C) (J)
SA440C plate	440~540	590~740	Max. 80	Min. 20	Min. 47
SA440C pipe	440~560	590~740	Max. 85	Min. 20	Min. 47

Table 2 Contents of the experiments

	Content	Purpose of the test
Material experiments	Test for SA440C plate	Investigation of the property of L, C, Z
	Test for extremely thick TMCP H-section (RT325C)	As above
	Test for extremely thick RT440C H-section	As above
	Test of the bending pipe using SA440C plate	As above
Procedure experiments	Test of BOX section using SA440C	Investigation of the manufacturing and welding procedure
	Test of BH section using SA440C	As above
	Test of pipe section as bending using SA440C	As above

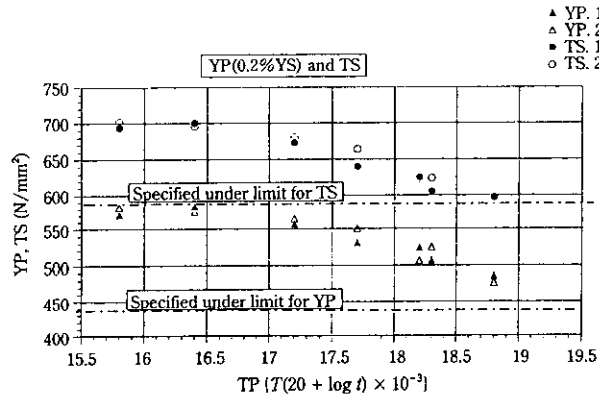


Fig. 1 Mechanical properties of SA440C pipe products after warm bending (YP and TS)

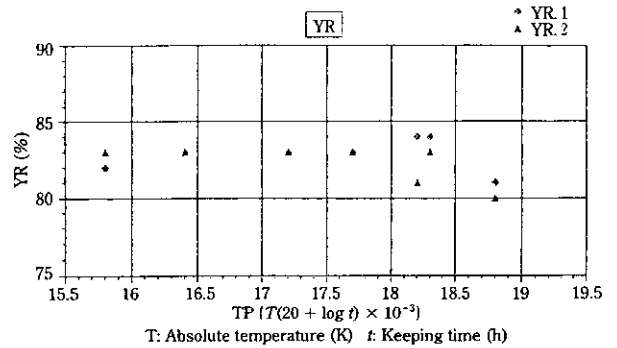


Fig. 2 Mechanical properties of SA440C pipe products after warm bending (YR)

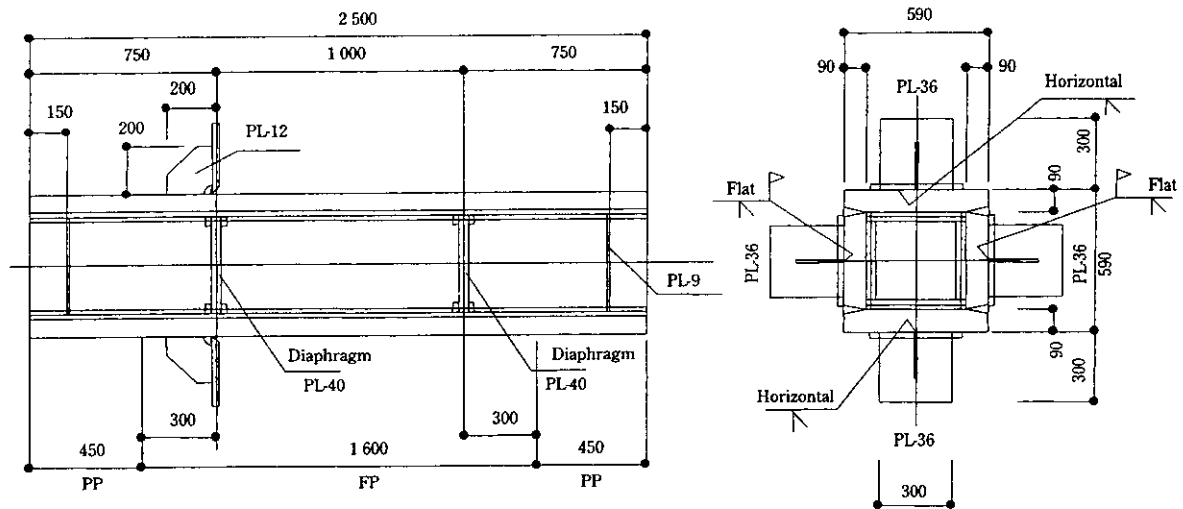


Fig. 3 Specimen

Table 4 Mechanical property and chemical composition of the material

Thickness (mm)	Material	Location	Yield strength (N/mm²)	Tensile strength (N/mm²)	Elongation (%)	Charpy V-notch (0°C) (J)	Chemical composition (mass%)					
							C	Si	Mn	P	S	Ceq.
90	SA440C	Skin plate	462	650	30	256	0.13	0.25	1.40	0.008	0.001	0.44
40	SA440B	Diaphragm	475	630	32	314	0.11	0.23	1.39	0.008	0.001	0.41
36	SA440B	Beam flange	478	629	32	309	0.11	0.23	1.39	0.008	0.001	0.41

な 590 MPa 鋼で 90 mm という極厚鋼板を用いた 4 面ボックス柱の製作実績はないため、実大ボックスによる溶接性に関する施工試験を行い溶接継手性能を確認した。

4.2.2 試験内容

(1) 試験体

試験は、Fig. 3 に示す柱、梁の接合部を実大試験体をモデルとして 1 体製作した。Table 4 に使用した鋼材の化学成分と機械的性質を示す。

(2) 溶接条件

角溶接はサブマージアーク溶接、ダイヤフラムはエレクトロスラグ溶接、仕口フランジ溶接は CO₂ 半自動溶接で行った。

Table 5 に使用した溶接材料を、Table 6 に溶接条件を示す。

(3) 試験項目

溶接終了後、外観試験、超音波探傷試験を行った後、Fig. 4 に示す位置から各種試験片を採取して継手性能の調査を行った。

4.2.3 試験結果

(1) 外観検査、超音波探傷試験

(社)日本建築学会 JASS6 鉄骨工事の「鉄骨精度検査基準」および「鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規準・同解説」により溶接部の検査を行った結果、いずれの溶接部にも有害な欠陥は認められなかった。

(2) 引張試験

仕口部のダイヤフラムと梁十字継手部の試験結果を Table 7 に、溶接金属部の引張試験結果を Table 8 に示す。いずれも母材規格値を満足した。

Table 5 The welding condition applied to the experiments

Welding procedure	Welding position	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)	Preheating (°C)
Submerge arc weld	Flat	1 200~2 000	38~54	15~40	150~500	Min. 80
Electroslag weld	Vertical	360~420	46~56	1.5~3.0	400~700	Non
CO ₂ gas metal arc weld	Flat	260~340	30~40	15~50	10~50	Min. 60
	Horizontal	260~340	28~36	12~60	10~50	

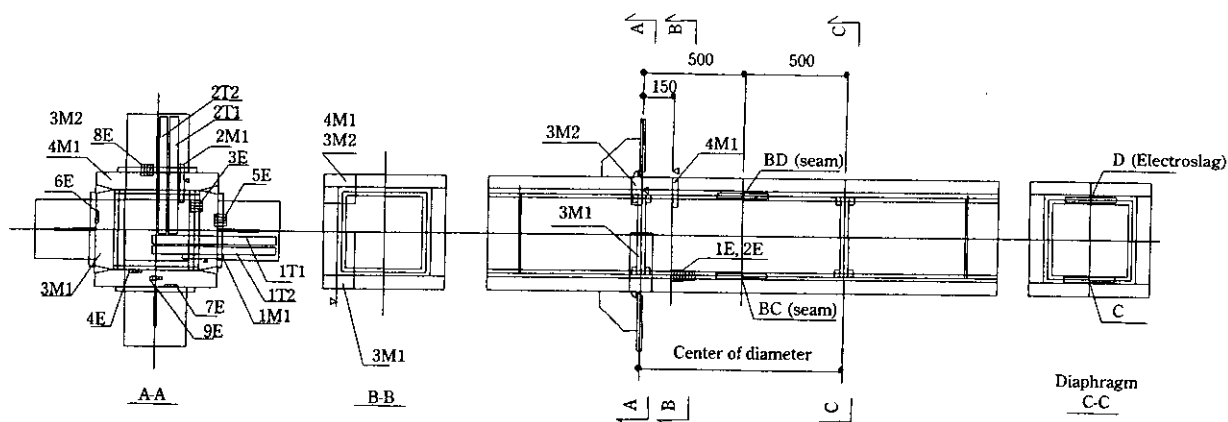


Fig. 4 Location of test pieces

Table 6 Welding material used

Location	Welding methoding	Welding material Wire Flux
Seam welds	Submerge arc welding	KW-101B KB-50I 5.1, 6.4φ
Diaphragm welds	Electroslag welding	KW-101B KF-100 1.6φ
Beam flange welds	CO ₂ gas metal arc welding	YM-60C — 1.2φ

Table 7 Results of the tensile test as the cross section

No. of TP	Tensile strength (N/mm ²)	Fracture position
1T1	656	Base metal
1T2	655	Base metal
2T1	650	Base metal
2T2	650	Base metal

Table 8 Results of the tensile test for welds

No. of TP	Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Remarks
BC	445	599	32	Seam welds
BD	498	599	28	Seam welds
C	444	601	28	Electroslag welds
D	444	601	28	Electroslag welds

(3) マクロ試験

Photo 1~3 に、角溶接部と仕口部のダイヤフラムと梁十字継手部の断面マクロを示す。いずれも良好な溶込みが得られ、内部欠陥は認められなかった。

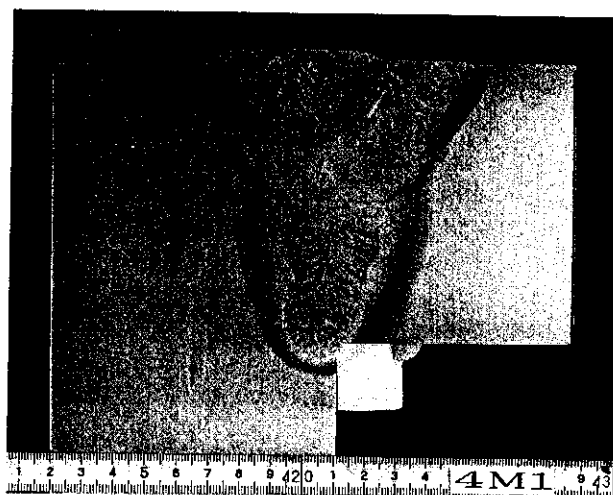


Photo 1 Seam weld

(4) 衝撃試験

角溶接部、エレクトロスラグ溶接部、仕口フランジ溶接部の溶接金属および熱影響部の衝撃試験結果を Table 9 に示す。いずれも判定値を満足した。

(5) 硬さ試験

仕口部のダイヤフラムと梁十字継手部の板厚 $t/2$, $t/4$ について、断面硬さ分布をビッカース荷重 98 N で測定した。いずれも最大硬さ 250 Hv 程度で規格値 $350 \pm \text{Hv}$ を満足した。

5 おわりに

5.1 鋼管材料試験

実際の造管は $550^\circ\text{C} \pm 30^\circ\text{C}$ で行い SR 条件を $630^\circ\text{C} \times 2.5\text{h}$ と選

Table 9 Results of the Charpy V-notch tests

TP mark	Location of notch	Charpy V-notch (0°C) (J)	TP mark	Location of notch	Charpy V-notch (0°C) (J)	TP mark	Location of notch	Charpy V-notch (0°C) (J)
1E	Weld metal of seam	39 (≥ 20)	4E	HAZ of ESW	101	7E	HAZ of beam flg.	241 (≥ 47)
2E	HAZ of seam	110	5E	Weld metal of beam flg.	80 (≥ 47)	8E	Weld metal of beam flg.	137 (≥ 47)
3E	Weld metal of ESW	51 (≥ 15)	6E	HAZ of beam flg.	250 (≥ 47)	9E	Base metal	220 (≥ 47)

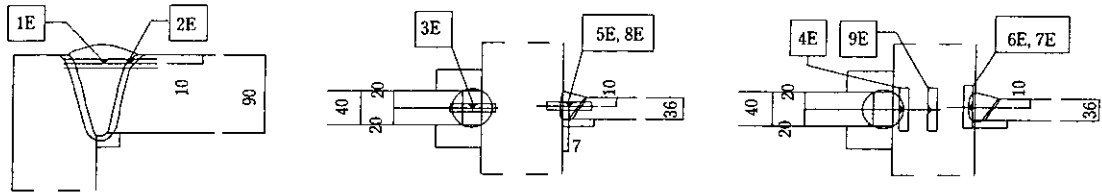
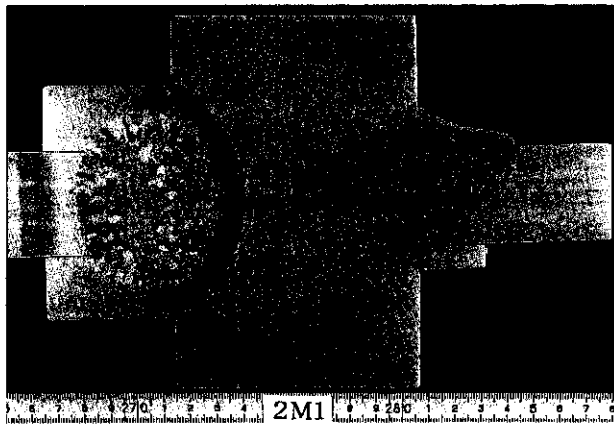
Photo 2 Electroslag weld + CO₂ gas metal arc weld (flat)Photo 3 Electroslag weld + CO₂ gas metal arc weld (horizontal)

Table 10 Test results of pipes after heat treatment

700 ϕ $\times$ 60	Yield strength (0.2%) (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Yield ratio (%)	Elongation (JIS type 12A) (%)	Charpy V-notch (0°C) (J)
	504	618	82	46	288

定した。(テンパーパラメーターは 18.2 に相当する。) 造管後の試験結果を Table 10 に示す。

なお JIS4 号 (丸鋼試験片) 試験片では、局所的な特性を拾うためややばらつきが大きくなり、実施試験は JIS12A 号 (全厚試験片) を用いている。

5.2 BOX施工試験

本工事の地下部の構真柱に SA440 鋼材の 90 mm 極厚鋼板を使用した 4 面ボックス柱の溶接性に関する施工試験を行った結果、溶接継手性能は良好であることが確認できた。

5.3 その他の試験

その他の材料試験並びに鋼管柱などの施工試験についても良好な結果を得ている。