

# 建築構造用高強度780N/mm<sup>2</sup>級鋼材の溶接施工法

## STUDY ON WELDING PROCEDURES FOR HIGH-STRENGTH 780 N/mm<sup>2</sup> CLASS STEEL FOR BUILDING STRUCTURES

川又 哲也<sup>\*1</sup>, 嶋 徹<sup>\*2</sup>, 石田 正法<sup>\*3</sup>, 埴 亨<sup>\*1</sup>, 谷地 敏和 夫<sup>\*4</sup>,  
桑 素彦<sup>\*4</sup>, 得能 将紀<sup>\*1</sup>

Tetsuya KAWAMATA, Tooru SHIMA, Masanori ISHIDA, Tooru HANAWA, Kazuo YACHIUNE,  
Motohiko KUWA and Masaki TOKUNOU

In recent years, 780N/mm<sup>2</sup> class steel materials have been increasingly used for columns in high-rise buildings, which is effective in terms of architectural planning, as it allows for smaller and fewer columns. In the TODA BUILDING, 780 N/mm<sup>2</sup> steel is used for the long columns on the lower floors where high axial forces act, allowing large spaces to be created with small columns while ensuring a high level of safety. There are few cases in which 780 N/mm<sup>2</sup> class steel has been used in high-rise buildings, and welding construction tests are conducted for each building in which it is used, so a reliable welding construction method to ensure quality has not been established. Challenges in welding 780N/mm<sup>2</sup> class steel include setting the preheat temperature, maximum heat input, and interpass temperature, etc., according to the plate thickness, and preventing delayed cracking due to remaining diffusible hydrogen.

In this study, element experiments to prevent delayed cracking and welding construction tests using full-scale columns were conducted on the welded box section columns actually used in the TODA BUILDING. We provide an overview of these tests, discuss the results of mechanical tests and ultrasonic testing, and develop guidelines for actual construction.

**Keywords:** 780N/mm<sup>2</sup> class steel materials, Delayed cracking, Welding test, Ultrasonic inspection

780N/mm<sup>2</sup>級鋼材, 遅れ割れ, 溶接施工試験, 超音波探傷検査

### 1. はじめに

近年, 780N/mm<sup>2</sup>級鋼材は超高層鉄骨造の柱への適用研究が進んでおり, 柱断面の小サイズ化・柱本数の集約など建築計画上も効果を発揮する技術である。TODA BUILDINGでは, 鋼材, コンクリート, 鉄筋について高強度材料を適用する「高強度 Super CFT 工法」の最大強度である鋼材780N/mm<sup>2</sup>級鋼材+コンクリート Fc150 N/mm<sup>2</sup>を採用している。使用部位は高軸力が作用する低層階の長柱(図1)であり, 小さな柱断面で大空間を構築するとともに高い安全性を確保している。「高強度 Super CFT 工法」(図2)は, 2014年に構造評定(UHEC 評定一構26001)を取得したものであり, 2006年に構造評定を取得した「Super CFT 工法」を発展させ, 鉄骨材質を590N/mm<sup>2</sup>級鋼材以下から780N/mm<sup>2</sup>級鋼材以下, コンクリートの設計基準強度を Fc90 N/mm<sup>2</sup>以下から Fc150 N/mm<sup>2</sup>以下, 鉄筋材質を490N/mm<sup>2</sup>級以下から685N/mm<sup>2</sup>級以下まで大幅に適用範囲を広げて超高強度柱を実現したものである。

一方, 780N/mm<sup>2</sup>級鋼材については適用事例が少ないため, 事例毎に溶接施工試験を実施している状況であり, 品質確保のための確実な溶接施工法が確立されるまでには至っていない。課題として, 板厚に応じた予熱温度・最大入熱量・パス間温度等の溶接施工方法の確立や残存する拡散性水素による遅れ割れの防止などが挙げら

れる。一般に高強度鋼材ほど, 板厚が厚いほど高温の予熱が必要とされているが, 明確な基準は定められていない。そのため, TODA BUILDING で実際に使用する溶接組立箱形断面柱について溶接施工試験を行う計画を立

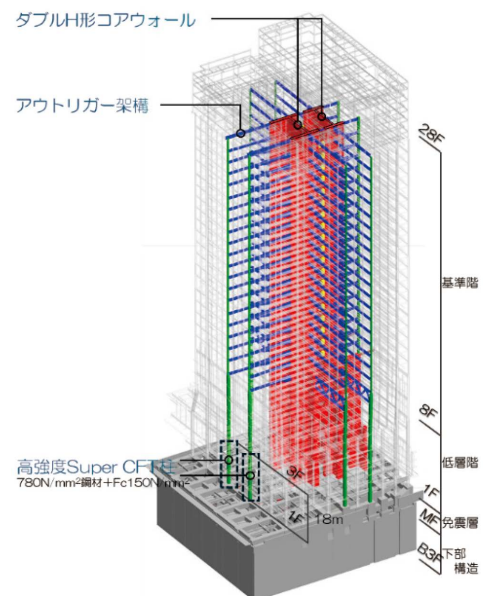


図1 鋼材 780N/mm<sup>2</sup> 級鋼材+コンクリート Fc150 の CFT 柱

\*1 戸田建設(株)本社構造設計部 修士(工学)

\*2 戸田建設(株)本社建築工事技術部 博士(工学)

\*3 戸田建設(株)本社建築工事技術部 修士(工学)

\*4 戸田建設(株)本社構造設計部 博士(工学)

Structural Design Dept., TODA CORPORATION, M. Eng.

Construction Technology Dept., TODA CORPORATION, D. Eng.

Construction Technology Dept., TODA CORPORATION, M. Eng.

Structural Design Dept., TODA CORPORATION, Dr. Eng.

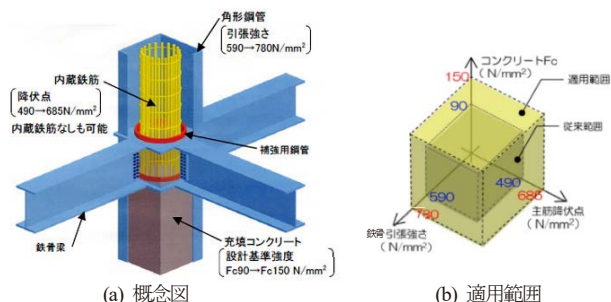


図2 高強度 Super CFT 工法

て、その前段階として、780N/mm<sup>2</sup>級鋼材と780N/mm<sup>2</sup>級鋼用溶接ワイヤー 4 銘柄について遅れ割れ防止を想定した溶接施工試験（遅れ割れ検証試験）を実施した。その後、実大柱を用いた溶接施工試験を実施した。

本報では、それらの試験の概要及び機械試験の結果を示し、更に超音波探傷試験に関する考察を述べる。

## 2. 遅れ割れ検証試験

### 2.1 遅れ割れ検証試験概要

試験体形状を図3に示す。溶接施工試験に用いた鋼材は、残留応力を考慮しYS（降伏点）が高めのJFE-HITEN 780M（JFE-HITEN 780TC-mod：建築構造用高強度780N/mm<sup>2</sup>鋼材）で、柱現場継手を想定して横向姿勢とし溶接長さを600mm、板厚は75mmとした。開先角度は30°、ルートギャップは7mmとした。裏当て金はFB-12×50（SN490B）を使用した（表1）。鋼材の化学成分、機械的性質（ミルシート値）を表2.1、表2.2に示す。溶接ワイヤーはA社2銘柄、B社2銘柄の計4銘柄とした。基本溶接施工条件は、大臣認定時の溶接施工指針<sup>1)</sup>（以下指針と称す）を参考に予熱温度75℃以上、パス間温度150℃以下、最大溶接入熱30kJ/cm以下とした。

試験パラメータはパス間温度と予熱温度とした（表3）。パス間温度については、溶接施工性向上を図る目的で200℃以下を加え、予熱の効果を確認するため、一部のワイヤーについて予熱を行わない条件を加えた。また、補修溶接を想定して、No.4試験体では一部にガウジ

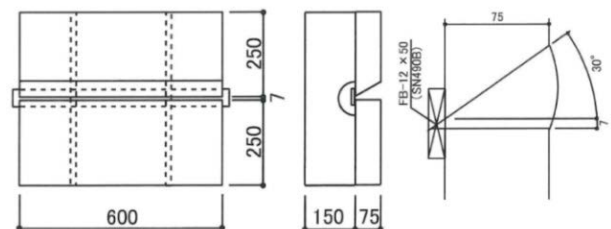


図3 試験体形状

表1 使用鋼材

| 部位   | 板厚 (mm) | 材質            | メーカー     |
|------|---------|---------------|----------|
| 柱    | 75      | JFE-HITEN780M | JFE スチール |
| 裏当て金 | 12      | SN490B        | JFE スチール |
| 拘束板  | 16      | SS400         | 日本スチール   |

ングを行い予熱温度115℃以上とし、再溶接することとしている。

使用溶接ワイヤーの化学成分及び機械的性質（ミルシート値）を表4.1、表4.2に示す。機械試験は丸棒引張試験、シャルピー衝撃試験、硬さ試験を実施した。試験片採取位置を図4、図5に示す。

### 2.2 機械試験結果

表5に機械試験結果一覧を示す。

引張試験結果は全ての試験片について、母材780 N/mm<sup>2</sup>鋼材の規格下限値（YS：630N/mm<sup>2</sup>，TS：780N/mm<sup>2</sup>）を満足した。表5、図6～図9に溶接材料ごとの硬さ試験結果を示す。ただし、凡例は、○は基準、□はパス間温度200℃，△は予熱なし，×は補修溶接部を表している。また、No.8の測定位置28～34mm間で手直し溶接を行ったため、数値が局所的に大きい。図7を見ると、No.5，No.6（溶接材料A社②）でばらつきが小さく、他

表2.1 JFE-HITEN780M 化学成分

| 化学成分           | C    | Si   | Mn  | P     | S     | Ceq  | Pcm  |
|----------------|------|------|-----|-------|-------|------|------|
| JFE-HITEN 780M | 0.08 | 0.18 | 1.2 | 0.003 | 0.001 | 0.58 | 0.26 |

表2.2 JFE-HITEN780M 機械的性質

| 機械的性質 | 引張試験                    |                           |        | 衝撃試験      |                 |        |  |
|-------|-------------------------|---------------------------|--------|-----------|-----------------|--------|--|
|       | 耐力 (N/mm <sup>2</sup> ) | 引張強さ (N/mm <sup>2</sup> ) | 伸び (%) | 試験温度 (°C) | 個々 (J)          | 平均 (J) |  |
| 規格値   | ≥685                    | 780~930                   | ≥16    | -35       | —               | ≥47    |  |
| 実績    | 835                     | 864                       | 24.5   | -40       | 223   215   214 | 217    |  |

表3 使用溶接材料及び試験パラメータ

| No. | 試験体    | 規格                       | バス間<br>温度 (℃) | 予熱<br>(℃) | 入熱<br>(kJ/cm) |
|-----|--------|--------------------------|---------------|-----------|---------------|
| 1   | A80-1  | JIS Z 3312 G78A2UCN4M4T  | ≦ 150         | ≧ 75      | ≦ 30          |
| 2   | A80-10 |                          |               | 無し        |               |
| 3   | A80-2  |                          | ≦ 200         | ≧ 75      |               |
| 4   | A80-2A |                          |               | ≧ 115     |               |
| 5   | A82-1  | JIS Z 3312 G78A2UCN5M3T  | ≦ 150         | ≧ 75      |               |
| 6   | A82-2  |                          | ≦ 200         |           |               |
| 7   | B80-1  | JIS Z 3312 G78A2UCN5M3T  | ≦ 150         |           |               |
| 8   | B80-2  |                          | ≦ 200         |           |               |
| 9   | B82-1  | JIS Z 3312 G78JA2UCN5M3T | ≦ 150         |           |               |
| 10  | B82-10 |                          | 無し            |           |               |
| 11  | B82-2  |                          | ≦ 200         | ≧ 75      |               |

表4.1 溶接ワイヤー 化学成分

| 化学成分 | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Cu   | Ni   | Mo   | Ti   |
|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| A80  | 0.07 | 0.66 | 1.84 | 0.009 | 0.009 | 0.22 | 2.17 | 0.66 | 0.12 |
| A82  | 0.08 | 0.71 | 1.92 | 0.006 | 0.008 | 0.22 | 2.39 | 0.74 | 0.18 |
| B80  | 0.08 | 0.8  | 1.85 | 0.007 | 0.005 | 0.22 | 2.56 | 0.48 | 0.14 |
| B82  | 0.08 | 0.81 | 1.85 | 0.003 | 0.001 | 0.3  | 2.62 | 0.56 | 0.14 |

表4.2 溶接ワイヤー 機械的性質

| 機械的性質 | 引張試験                    |                           |        | 衝撃試験      |              |        |  |
|-------|-------------------------|---------------------------|--------|-----------|--------------|--------|--|
|       | 耐力 (N/mm <sup>2</sup> ) | 引張強さ (N/mm <sup>2</sup> ) | 伸び (%) | 試験温度 (°C) | 個々 (J)       | 平均 (J) |  |
| A80   | 826                     | 902                       | 19     | -20       | 74   74   75 | 74     |  |
| A82   | 884                     | 932                       | 21     | -20       | 88   96   88 | 91     |  |
| B80   | 720                     | 824                       | 22     | -20       | 77   74   74 | 75     |  |
| B82   | 822                     | 896                       | 20     | -20       | 90   95   98 | 94     |  |

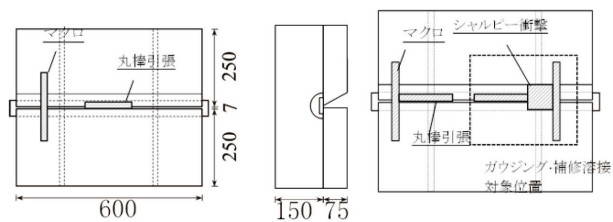


図4 試験片採取平面位置 (単位: mm)

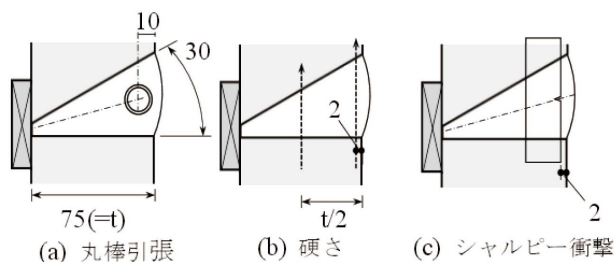


図5 試験片採取断面位置 (単位: mm)

表5 機械試験結果一覧

| No. | 試験体                  | 溶接材料 | 規格                          | パス間温度<br>(℃) | 予熱<br>(℃) | 入熱<br>(kJ/cm) | 引張試験                                     |                            |           | 硬さ試験              |                    |
|-----|----------------------|------|-----------------------------|--------------|-----------|---------------|------------------------------------------|----------------------------|-----------|-------------------|--------------------|
|     |                      |      |                             |              |           |               | YS <sup>※1</sup><br>(N/mm <sup>2</sup> ) | TS<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 伸び<br>(%) | 表面2mm<br>Max (Hv) | t/2 位置<br>Max (Hv) |
| 1   | A80-1                | A 社① | JIS Z 3312<br>G78A2UCN4M4T  | ≦150         | ≧75       | ≦30           | 796                                      | 854                        | 21.3      | 383               | 376                |
| 2   | A80-10               |      |                             |              | 無し        |               | 831                                      | 884                        | 18.8      | 346               | 366                |
| 3   | A80-2                |      |                             | ≦200         | ≧75       |               | 790                                      | 843                        | 21.6      | 388               | 358                |
| 4   | A80-2A <sup>※2</sup> |      |                             |              | ≧115      |               | 741                                      | 799                        | 20.8      | 372               | —                  |
| 5   | A82-1                | A 社② | JIS Z 3312<br>G78A2UCN5M3T  | ≦150         | ≧75       |               | 789                                      | 851                        | 21.7      | 366               | 359                |
| 6   | A82-2                |      |                             | ≦200         |           |               | 842                                      | 892                        | 21.4      | 375               | 336                |
| 7   | B80-1                | B 社① | ≦150                        | 844          |           |               | 920                                      | 19.1                       | 374       | 355               |                    |
| 8   | B80-2                |      | ≦200                        | 821          |           |               | 883                                      | 20.1                       | 395       | 370               |                    |
| 9   | B82-1                | B 社② | JIS Z 3312<br>G78JA2UCN5M3T | ≦150         |           |               | 956                                      | 1013                       | 19.4      | 360               | 352                |
| 10  | B82-10               |      |                             | ≦200         | 無し        |               | 934                                      | 982                        | 16.3      | 354               | 345                |
| 11  | B82-2                |      |                             | ≦200         | ≧75       |               | 861                                      | 924                        | 21.8      | 388               | 408                |

※1: 降伏応力は0.2%オフセット耐力を用いる。

※2: 図4に示す対象の溶接部について、深さ60mm以上をガウジングした後、補修溶接を行う。

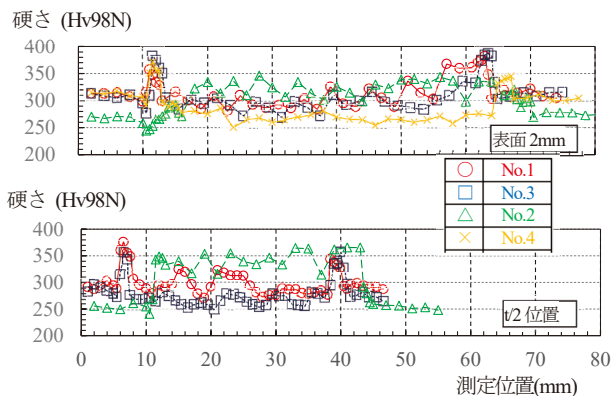


図6 溶接材料: A 社①

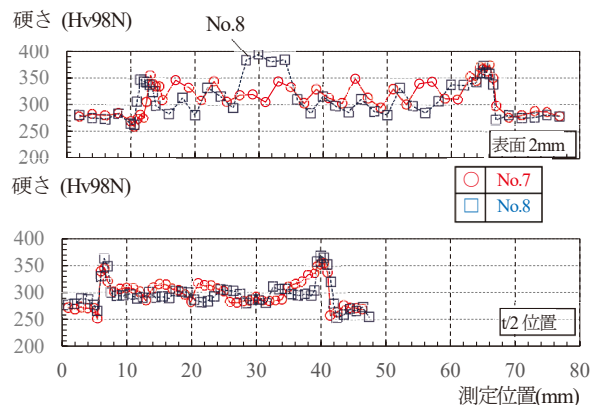


図8 溶接材料: B 社①

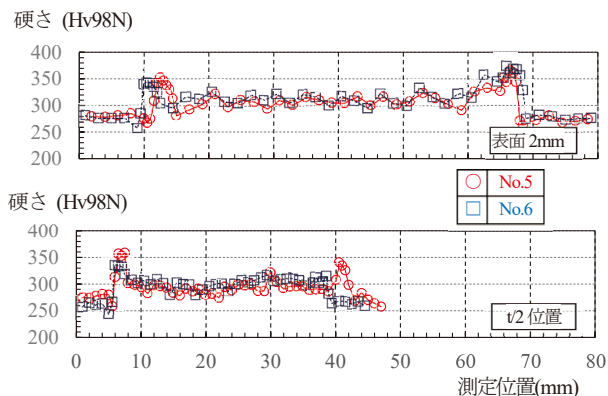


図7 溶接材料: A 社②

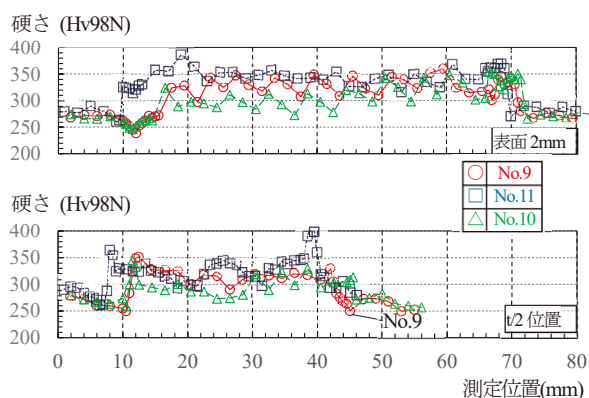


図9 溶接材料: B 社②

の試験体と比べて全体的に低く推移している。また、図 9 より、No.11（パス間温度200℃）の t/2位置（408Hv）で最も高くなっており、その他の試験体ではパス間温度による差異は明確にみられなかった。また、図 6、図 9 に示す予熱条件に着目すると、No.2は No.1より t/2位置で全体的に高めに推移し、No.10は No.9と比べて全体的に低くなった。補修溶接部のシャルピー衝撃試験結果としては試験片 3 本の平均値は111 Jであり、良好な結果が得られた。

## 2.3 超音波探傷試験結果

溶接部の UT 検査の実施は、溶接欠陥を検出するとともに、溶接完了後に経過時間を変えて UT を繰り返すことによって、遅れ割れが発生しているかどうか確認することを主目的とした。さらに、建築学会規準に基づいた斜角一探触子法とフェーズドアレイ（以下「PAUT 法」と略す）を比較し、確実に溶接欠陥を検出する方法の検討を行った。なお、初回試験は溶接完了後 24 時間から 96 時間以内に UT を行ったものであり、最終回試験は溶接完了後 1 ヶ月程度経過してから超音波探傷試験を行ったものである。時間の経過による欠陥寸法の変化に関して、斜角一探触子法では欠陥高さ（深さ方向の寸法）を測定することは困難なため、欠陥指示長さの変化を記録した。欠陥高さの変化に関しては PAUT 法の表示画面の円弧状の指示の 2 つの分離及びその間隔の拡大によって求めた。

斜角一探触子法の結果は初回と最終回の欠陥指示長さが変化していないことから、進展するような割れ（遅れ割れ）は発生していないものと考えられる。また、PAUT 法による結果も測定された欠陥高さの変化がないことから今回の試験における溶接条件では進展するような割れ（遅れ割れ）は発生していないものと確認できた。

## 3. 実大柱を用いた溶接施工試験

### 3.1 試験体概要

#### 3.1.1 試験体形状・開先形状

図10に溶接試験体形状を、図11に開先形状を示す。試験体は実大の溶接組立箱形断面柱1000mm×1000mmとし、炭酸ガスシールドアーク溶接（以下 GMAW と称す）により内ダイアフラム及び外ダイアフラムを接合した。

柱－柱継手は、溶接姿勢を工場下向と現場横向とし、全て GMAW とした。柱角継手は、V 形開先でルートギャップを9mm とし、開先深さ20mm 程度までを下盛り GMAW 後、表層までを多層のサブマージアーク溶接とした。外ダイアフラムは K 形開先の部分溶込み溶接、内ダイアフラムと柱継手はレ形30° 開先とした。外ダイアフラムの板厚、開先形状は文献 2）に基づき定めた。

#### 3.1.2 使用鋼材

表 6 に使用した鋼材一覧を、表 7 に鋼材の化学成分と機械的性質（ミルシート値）を示す。

柱スキンプレートには、板厚60mm の建築構造用低降

伏比780N/mm<sup>2</sup>級鋼材 JFE-HITEN780TC を使用した。また、内ダイアフラムには板厚65mm の HBL385B を、外ダイアフラムには板厚100mm の HBL440B を使用した。

#### 3.1.3 使用溶接材料

表 8 に使用溶接ワイヤーの化学成分と機械的性質（ミルシート値）を示す。GMAW 用ワイヤーは、遅れ割れ検証試験と同様に A 社の 2 銘柄（A80、A82）及び B 社の 2 銘柄（B80、B82）の計 4 銘柄とし、ワイヤー銘柄により溶接部の性能に差異が生じるかを確認する。現場横向姿勢については、入熱が下向姿勢に比較して小さいため、強度の高い A82、B82は使用せず、A80、B80について、パス間温度を150℃以下、200℃以下と設定した。こ

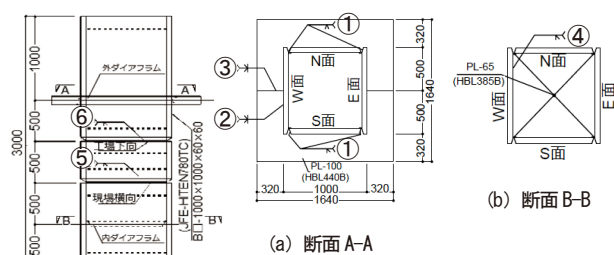


図 10 溶接試験体形状

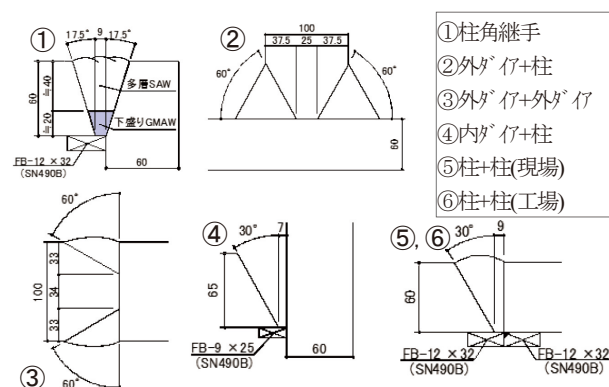


図 11 開先形状

表 6 使用鋼材一覧

| 部位       | 板厚<br>(mm) | 規格             | メーカー     |
|----------|------------|----------------|----------|
| 柱スキンプレート | 60         | JFE-HITEN780TC | JFE スチール |
| 内ダイアフラム  | 65         | HBL385B        | JFE スチール |
| 外ダイアフラム  | 100        | HBL440B        | JFE スチール |
| 裏当て金     | FB-12×32   | SN490B         | 日本スチール   |
| 形状保持板    | 12         | SS400          | JFE スチール |

表 7 鋼材の化学成分・機械的性質

| 規格             | 化学成分 (%) × 10 <sup>-2</sup> |    |     |     |     |     |     | 機械的性質 |     |    |                 |
|----------------|-----------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|----|-----------------|
|                | C                           | Si | Mn  | P   | S   | Ceq | Pcm | Ys    | Ts  | EL | vE <sub>0</sub> |
| JFE-HITEN780TC | 10                          | 21 | 100 | 0.4 | 0.1 | 56  | 26  | 631   | 786 | 24 | 286             |
| HBL385B        | 14                          | 34 | 135 | 1.0 | 0.1 | 39  | 22  | 445   | 578 | 32 | 252             |
| HBL440B        | 8                           | 6  | 149 | 0.4 | 0.2 | 45  | 19  | 482   | 611 | 28 | 293             |

※ Ys, Ts:降伏点, 引張強さ (N/mm<sup>2</sup>), EL:伸び (%), vE<sub>0</sub>:0℃シャルピー衝撃値 3 本平均値 (J)

れは指針におけるパス間温度管理値が150℃以下とさせていること、及び遅れ割れ検証試験の結果からパス間温度を200℃以下としても溶接部の性能に明確な差異が見受けられなかったことから設定した。

## 3.2 溶接条件

### 3.2.1 入熱・パス間温度管理

表9に溶接条件の設定値を示す。入熱、パス間温度管理値は、指針に基づいて設定しており、角継手サブマージアーク溶接の入熱上限は780N/mm<sup>2</sup>級鋼の過去の施工実績から100kJ/cmとしている。さらに、表10に溶接条件の実行値を示す。表中の電流、電圧は溶接時の最大値、

最小値、溶接速度は全パスの平均値、入熱量は中間層の平均値、パス間温度は最大値を示す。全て表9に示す溶接条件の範囲内とすることができている。

### 3.2.2 予熱

表9に各溶接部位における予熱温度を示す。予熱はガス炎加熱による。780N/mm<sup>2</sup>級鋼に関わる全ての溶接部の予熱温度は、指針に基づき75℃以上としている。なお、組立て溶接及び補修溶接の予熱温度は本溶接に示す値より40℃高い115℃以上の設定とした。

### 3.2.3 後熱

780N/mm<sup>2</sup>級鋼用の溶接材料で施工した GMAW 部は、遅

表8 使用溶接ワイヤーの化学成分・機械的性質

| 溶接材料 | 規格<br>(JIS Z 3312) | 化学成分 (%) ×10 <sup>-2</sup> |    |     |     |     |    |     |    |    | 機械的性質 |     |    |                 |
|------|--------------------|----------------------------|----|-----|-----|-----|----|-----|----|----|-------|-----|----|-----------------|
|      |                    | C                          | Si | Mn  | P   | S   | Cu | Ni  | Mo | Ti | Ys    | Ts  | EL | vE <sub>0</sub> |
| A80  | G78A2UCN4M4T       | 7                          | 66 | 184 | 0.9 | 0.9 | 22 | 217 | 66 | 12 | 826   | 902 | 19 | 74              |
| A82  |                    | 8                          | 71 | 192 | 0.6 | 0.8 | 22 | 239 | 74 | 18 | 884   | 932 | 21 | 91              |
| B80  | G78A2UCN5M3T       | 8                          | 80 | 185 | 0.7 | 0.5 | 22 | 256 | 48 | 14 | 720   | 824 | 22 | 75              |
| B82  | G78JA2UCN5M3T      | 8                          | 81 | 185 | 0.3 | 0.1 | 30 | 262 | 56 | 14 | 822   | 896 | 20 | 94              |

※ Ys, Ts : 降伏点, 引張強さ (N/mm<sup>2</sup>), EL : 伸び (%), vE<sub>0</sub> : 0℃シャルピー衝撃値 (J)

表9 溶接条件 (設定値)

| 継手部位               |       | 溶接法         | 溶接材料                                         | ワイヤ径 | 入熱<br>(kJ/cm) | パス間温度<br>(℃) | 予熱<br>(℃) |
|--------------------|-------|-------------|----------------------------------------------|------|---------------|--------------|-----------|
| 柱スキンプレート角継手溶接      | NW 線  | 下盛り<br>GMAW | A80                                          | φ1.2 | ≦30           | ≦150         | 75≦       |
|                    | NE 線  |             | A82                                          |      |               |              |           |
|                    | SW 線  |             | B80                                          |      |               |              |           |
|                    | SE 線  |             | B82                                          |      |               |              |           |
|                    | 4 線共通 | 表層<br>SAW   | JIS Z 3183<br>S80J4-H4相当<br>US-80LT/PF-H80AK | φ4.8 | ≦100          | ≦250         | 75≦       |
| 角継手補修溶接部           | NW 線  | 下盛り<br>GMAW | A80                                          | φ1.2 | ≦30           | ≦200         | 115≦      |
| 柱現場継手<br>(横向姿勢)    | W 面   | GMAW        | A80                                          | φ1.2 | ≦30           | ≦200         | 75≦       |
|                    | E 面   |             |                                              |      |               | ≦150         |           |
|                    | N 面   |             | B80                                          |      |               | ≦150         |           |
|                    | S 面   |             |                                              |      |               | ≦200         |           |
| 柱現場継手補修溶接部         | W 面   | GMAW        | A80                                          | φ1.2 | ≦30           | ≦200         | 115≦      |
| 柱工場継手<br>(下向姿勢)    | W 面   | GMAW        | A80                                          | φ1.2 | ≦30           | ≦150         | 75≦       |
|                    | E 面   |             | A82                                          |      |               |              |           |
|                    | N 面   |             | B82                                          |      |               |              |           |
|                    | S 面   |             | B80                                          |      |               |              |           |
| 外ダイアフラム＋柱溶接部       |       | GMAW        | JIS Z 3312<br>G59JA1UC3M1T<br>KC-60          | φ1.2 | ≦30           | ≦350         | 75≦       |
| 外ダイアフラム＋外ダイアフラム溶接部 |       | GMAW        |                                              | φ1.2 | ≦30           | ≦350         | 無し        |
| 内ダイアフラム＋柱溶接部       |       | GMAW        | JIS Z 3312 YGW18<br>KC-55G                   | φ1.4 | ≦30           | ≦250         | 75≦       |

表10 溶接条件 (実行値)

| 継手部位       |     | 溶接法    |    | ワイヤ径    | 溶接条件 (実行値) |           |                        |                        |                     |
|------------|-----|--------|----|---------|------------|-----------|------------------------|------------------------|---------------------|
|            |     |        |    |         | 電流<br>(A)  | 電圧<br>(V) | 溶接<br>速度平均<br>(cm/min) | 入熱<br>中間層平均<br>(kJ/cm) | パス間温度<br>最大値<br>(℃) |
| 柱角継手       | 表層  | 多層 SAW |    | L: φ4.8 | 750        | 32        | 33~66                  | 43.5~86.9              | 247                 |
|            |     |        |    | T: φ4.8 | 700        | 34        |                        |                        |                     |
|            | 下盛り | GMAW   | 下向 | φ1.2    | 280~350    | 35~40     | 28.4                   | 26.4                   | 149                 |
|            | 補修  | GMAW   | 下向 | φ1.2    | 320~350    | 35~38     | 35.3                   | 22.0                   | 147                 |
| 柱継手工場溶接部   |     | GMAW   | 下向 | φ1.2    | 290~330    | 36~38     | 40.7                   | 18.1                   | 148                 |
| 柱継手現場溶接部   |     | GMAW   | 横向 | φ1.2    | 220~320    | 20~38     | 45.7                   | 14.4                   | 147 19              |
| 柱継手現場補修溶接部 |     | GMAW   | 横向 | φ1.2    | 240~310    | 32~37     | 44.6                   | 15.1                   | 199                 |

れ割れ防止を目的とした後熱を行った。後熱はセラミック製のヒーターにより150℃～200℃を2時間実施した。

### 3.2.4 補修溶接

780N/mm<sup>2</sup>級鋼溶接部に欠陥が生じた場合を想定し、角継手溶接部と柱継手現場溶接部を対象に補修溶接を実施した。ガウジング深さは60mm以上とし、ガウジング底範囲を250mm以上とした。なお、柱継手現場溶接部の補修溶接の溶接金属引張試験とシャルピー衝撃試験は、ボックス柱試験体から採取しきれなかったため、遅れ割れ検証試験の柱現場継手から採取した。

## 3.3 機械試験概要

### 3.3.1 試験項目

表11に機械試験項目一覧を示す。試験対象とした溶接部は、柱角継手、柱現場継手、柱工場継手、内ダイアフラム、外ダイアフラムである。また、超音波探傷試験は、遅れ割れ発生を確認するため、溶接完了後の48時間、96時間、10日、1ヵ月経過してから行うこととした。機械試験項目は溶接金属引張試験、溶接継手引張試験、シャルピー衝撃試験、マクロ・硬さ試験である。シャルピー衝撃試験については、遷移温度を確認し、溶接部靱性の評価指標とするために、試験温度0℃、-20℃、-40℃、

表 11 機械試験項目一覧

| 検査項目                                    | 部位                                         |      |                        | 使用ワイヤー<br>(パス間温度)          |                                        |             |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------|------|------------------------|----------------------------|----------------------------------------|-------------|
| 超音波探傷検査                                 | BOX 角継手 (全線), 補修溶接部                        |      |                        | －                          |                                        |             |
|                                         | 柱継手 (工場・現場), 現場継手補修溶接部                     |      |                        |                            |                                        |             |
|                                         | 内ダイアフラム溶接部                                 |      |                        |                            |                                        |             |
| 溶接金属引張試験<br>JIS Z 3111<br>A1号試験片        | 柱角継手 NW 溶接線                                |      | SAW                    | US-80LT/PF-H80AK           |                                        |             |
|                                         | 柱角継手 NW, NE, SW, SE 溶接線                    |      | 下盛り<br>GMAW            | A80, A82, B80, B82 (≦150℃) |                                        |             |
|                                         | 柱角継手 NW 線補修溶接部                             |      | GMAW<br>補修溶接           | A80 (≦150℃)                |                                        |             |
|                                         | 外ダイアフラム＋柱溶接部                               |      | GMAW                   | KC-60 (≦350℃)              |                                        |             |
|                                         | 内ダイアフラム＋柱溶接部                               |      | GMAW                   | KC-55G (≦250℃)             |                                        |             |
|                                         | 柱現場継手 W, S 面                               |      | GMAW                   | A80, B80 (≦200℃)           |                                        |             |
|                                         | 柱現場継手 E, N 面                               |      | GMAW                   | A80, B80 (≦150℃)           |                                        |             |
|                                         | 柱工場継手 W, E, N, S 面                         |      | GMAW                   | A80, A82, B82, B80 (≦150℃) |                                        |             |
|                                         | 柱現場継手溶接線補修溶接部                              |      | GMAW                   | A80 (≦200℃)                |                                        |             |
| 溶接継手引張試験<br>JIS Z 3121<br>1A 号準拠試験片     | 柱現場継手 W, S 面                               |      | GMAW                   | A80, B80 (≦200℃)           |                                        |             |
|                                         | 柱現場継手 E, N 面                               |      | GMAW                   | A80, B80 (≦150℃)           |                                        |             |
|                                         | 柱工場継手 W, E, N, S 面                         |      | GMAW                   | A80, A82,B82, B80 (≦150℃)  |                                        |             |
| シャルピー衝撃試験<br>JIS Z 2242<br>V ノッチ<br>試験片 | 柱角継手表層－7mm<br>NE 溶接線                       | DEPO | 0, －20, －40, －60, －80℃ | SAW                        | US-80LT/ PF-H80AK                      |             |
|                                         |                                            | BOND | 0℃                     |                            |                                        |             |
|                                         |                                            | HAZ  | 0℃                     |                            |                                        |             |
|                                         | 柱角継手 GMAW-SAW<br>境界部 NW, NE,<br>SW, SE 溶接線 | DEPO | 0, －20, －40, －60, －80℃ | GMAW－SAW<br>境界部            | 下盛り GMAW A80, A82, B80, B82<br>(≦150℃) |             |
|                                         |                                            | BOND | 0℃                     |                            |                                        |             |
|                                         |                                            | HAZ  | 0℃                     |                            |                                        |             |
|                                         | 柱角継手 NW 線<br>補修溶接部                         |      | DEPO                   | 0℃                         | GMAW<br>補修溶接部部                         | A80 (≦150℃) |
|                                         | 柱現場継手 W, S 面                               | DEPO | 0, －20, －40, －60, －80℃ | GMAW                       | A80, B80 (≦200℃)                       |             |
|                                         |                                            | BOND | 0℃                     |                            |                                        |             |
|                                         |                                            | HAZ  | 0℃                     |                            |                                        |             |
|                                         | 柱現場継手 E, N 面                               | DEPO | 0, －20, －40, －60, －80℃ | GMAW                       | A80, B80 (≦150℃)                       |             |
|                                         |                                            | BOND | 0℃                     |                            |                                        |             |
|                                         |                                            | HAZ  | 0℃                     |                            |                                        |             |
|                                         | 柱現場継手補修溶接部                                 |      | DEPO                   | 0℃                         | GMAW<br>補修溶接部                          | A80 (≦200℃) |
|                                         | 柱工場継手<br>W, E, N, S 面                      | DEPO | 0, －20, －40, －60, －80℃ | GMAW                       | A80, A82, B82, B80 (≦150℃)             |             |
| BOND                                    |                                            | 0℃   |                        |                            |                                        |             |
| HAZ                                     |                                            | 0℃   |                        |                            |                                        |             |
| マクロ<br>硬さ試験                             | 柱角継手 NW, NE, SW, SE 溶接線                    |      | GMAW＋SAW               | A80, A82, B80, B82 (≦150℃) |                                        |             |
|                                         | 柱角継手 NW 線補修溶接部                             |      | GMAW<br>補修溶接           | A80 (≦150℃)                |                                        |             |
|                                         | 外ダイアフラム＋柱溶接部                               |      | GMAW                   | KC-60 (≦350℃)              |                                        |             |
|                                         | 内ダイアフラム＋柱溶接部                               |      | GMAW                   | KC-55G (≦250℃)             |                                        |             |
|                                         | 柱現場継手 W, S 面                               |      | GMAW                   | A80, B80 (≦200℃)           |                                        |             |
|                                         | 柱現場継手 E, N 面                               |      | GMAW                   | A80, B80 (≦150℃)           |                                        |             |
|                                         | 柱工場継手 W, E, N, S 面                         |      | GMAW                   | A80, A82, B82, B80 (≦150℃) |                                        |             |
|                                         | 柱現場継手溶接線補修溶接部                              |      | GMAW                   | A80 (≦200℃)                |                                        |             |

### 3.3.2 試験片採取位置

### 3.3.3 試験片形状・寸法

### 3.4 試験結果

### 3.4.1 マクロ試験結果

### 3.4.2 硬さ試験結果

表12に硬さ試験結果を示す。角継手部の下盛り GMAW、表層 SAW では、下盛り GMAW 部での溶接材料の違いによる硬さの差はほとんど見られなかった。角継手補修溶接では、表層部においてパス間温度が全体的に高めとなったため、最高硬さが314Hvと低めの値となった。柱の現場継手と工場継手において、溶接材料の差異、及び柱現場継手のパス間温度による顕著な差異は見られなかった。

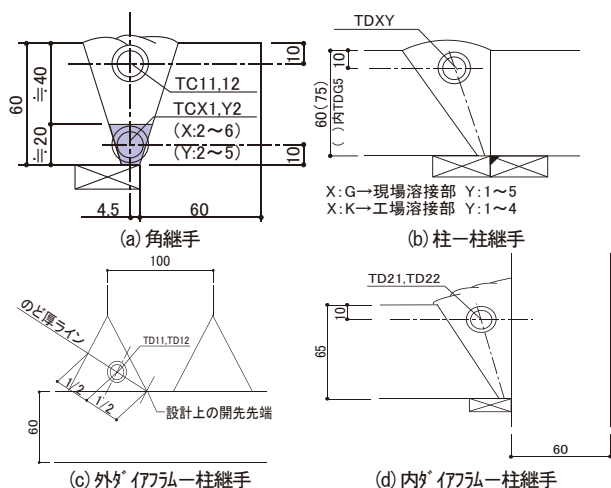


図 12 丸棒引張試験 (JIS Z 3111A1 号試験片)

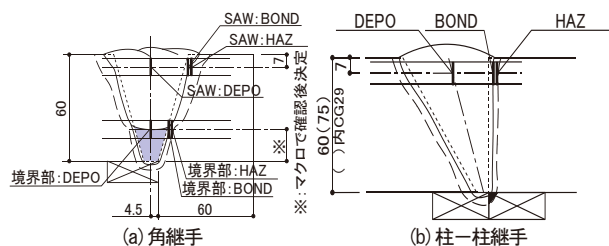


図 13 シャルピー衝撃試験 (JIS Z 2242 V ノッチ試験片)

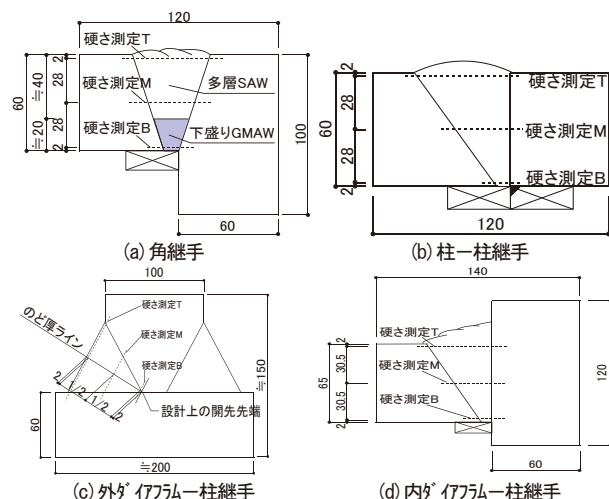


図 14 マクロ・硬さ試験

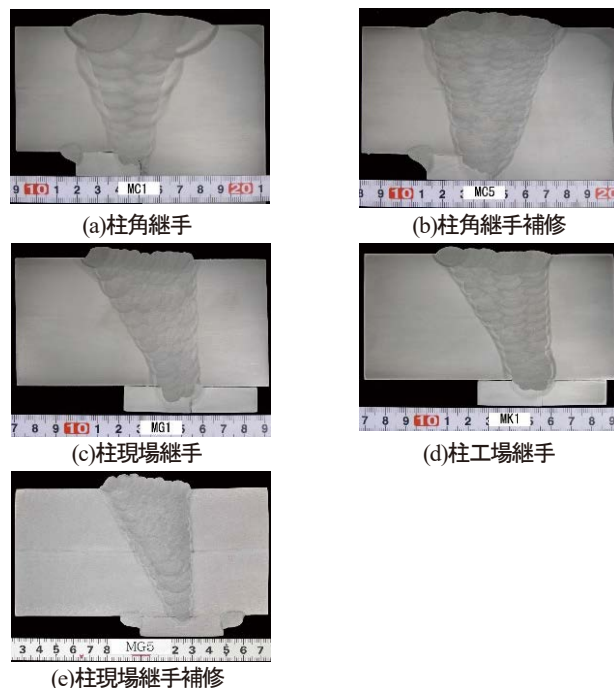


図 15 マクロ写真

表 12 マクロ・硬さ試験結果

| 部位                   | 溶接材料<br>パス間<br>温度 | マクロ試験                       | 硬さ試験     |           |          |           |
|----------------------|-------------------|-----------------------------|----------|-----------|----------|-----------|
|                      |                   |                             | 測定<br>位置 | 表面<br>2mm | 板厚<br>中央 | 裏面<br>2mm |
| 柱角継手<br>GMAW+<br>SAW | A80<br>≤150℃      | ブローホール<br>: 0.5×1,<br>0.3×1 | MAX      | 349       | 317      | 319       |
|                      |                   |                             | MIN      | 245       | 219      | 244       |
|                      | A82<br>≤150℃      | 欠陥なし                        | MAX      | 344       | 302      | 334       |
|                      |                   |                             | MIN      | 240       | 228      | 239       |
|                      | B80<br>≤150℃      | スラグ巻込み<br>: 0.4×1           | MAX      | 342       | 308      | 339       |
|                      |                   |                             | MIN      | 248       | 236      | 235       |
|                      | B82<br>≤150℃      | 欠陥なし                        | MAX      | 350       | 320      | 327       |
|                      |                   |                             | MIN      | 232       | 230      | 238       |
| 柱角継手<br>補修 GMAW      | A80<br>≤150℃      | 欠陥なし                        | MAX      | 314       | 335      | 322       |
|                      |                   |                             | MIN      | 231       | 219      | 232       |
| 柱現場継手<br>GMAW        | A80<br>≤200℃      | 欠陥なし                        | MAX      | 376       | 343      | 319       |
|                      |                   |                             | MIN      | 254       | 245      | 220       |
|                      | A80<br>≤150℃      | スラグ巻込み<br>: 0.5×1           | MAX      | 376       | 347      | 347       |
|                      |                   |                             | MIN      | 250       | 215      | 204       |
|                      | B80<br>≤150℃      | 欠陥なし                        | MAX      | 372       | 349      | 330       |
|                      |                   |                             | MIN      | 245       | 220      | 237       |
|                      | B80<br>≤200℃      | 欠陥なし                        | MAX      | 373       | 342      | 349       |
|                      |                   |                             | MIN      | 321       | 242      | 224       |
| 柱工場継手<br>GMAW        | A80<br>≤150℃      | 欠陥なし                        | MAX      | 369       | 308      | 325       |
|                      |                   |                             | MIN      | 234       | 226      | 231       |
|                      | A82<br>≤150℃      | ブローホール<br>: 0.5×1           | MAX      | 369       | 344      | 326       |
|                      |                   |                             | MIN      | 228       | 232      | 237       |
|                      | B82<br>≤150℃      | 欠陥なし                        | MAX      | 364       | 336      | 329       |
|                      |                   |                             | MIN      | 261       | 225      | 236       |
|                      | B80<br>≤150℃      | 欠陥なし                        | MAX      | 375       | 349      | 317       |
|                      |                   |                             | MIN      | 258       | 235      | 240       |
| 柱現場<br>継手補修<br>GMAW  | A80<br>≤200℃      | 欠陥なし                        | MAX      | 372       | —        | —         |
|                      |                   |                             | MIN      | 251       | —        | —         |
| 外ダイア<br>フラム<br>GMAW  | KC-60<br>≤350℃    | 欠陥なし                        | MAX      | 353       | 283      | 377       |
|                      |                   |                             | MIN      | 205       | 207      | 202       |
| 内ダイア<br>フラム<br>GMAW  | KC-55G<br>≤250℃   | 欠陥なし                        | MAX      | 330       | 309      | 301       |
|                      |                   |                             | MIN      | 175       | 162      | 185       |

### 3.4.3 溶接金属引張試験結果

表13に溶接金属引張試験結果一覧を、図16 (a) に柱角継手の下盛り GMAW 部の結果を、図16 (b) に柱現場継手部 (横向姿勢) の結果を、図16 (c) に柱工場継手部 (下向姿勢) の結果をワイヤー銘柄、パス間温度ごとに示す。

機械試験結果では、溶接材料A80を用いた角継手 GMAW 下盛り部、角継手補修溶接部、柱工場継手の3体で引張強さが780N/mm<sup>2</sup>級鋼の母材規格値である780N/mm<sup>2</sup>を下回った。これらは、いずれも下向姿勢溶接で、パス間温度150℃以下で管理を行った部位であった。

その他の試験片は、いずれも母材規格値を満足した。横向姿勢で施工する現場溶接部については、A80、B80ともに、パス間温度200℃以下で施工しても溶接金属の耐力、引張強さが母材規格値を満足しており、現場におけるパス間温度は、200℃としても問題ないと考えられる。なお、溶接材料で比較すると、耐力、引張強さとも

B82>A82≒B80>A80の順であった。また、柱と外ダイアフラム、及び柱と内ダイアフラムの溶接部では、いずれも母材 (ダイアフラム) の規格下限値を上回ることが確認できた。

### 3.4.4 溶接金属引張試験結果

表13に溶接継手引張試験結果一覧を、図17 (a) に柱現場継手部の結果を、図17 (b) に柱工場継手部の結果を溶接材料、パス間温度ごとに示す。いずれも母材規格値 (780N/mm<sup>2</sup>) を満足していることを確認した。溶接金属引張試験結果で低値を示した A80による継手は、溶接金属又は溶接金属を含む母材で破断した。A80を用いた下向き姿勢溶接部の溶接金属は他の溶接材料より引張強さが低いことが考えられる。

### 3.4.5 シャルピー衝撃試験結果

表13にシャルピー衝撃試験結果を示す。試験結果は、0℃では全て780N/mm<sup>2</sup>級鋼の母材規格値47Jを満足している。また、図18にシャルピー衝撃試験結果の遷移曲線を示す。ここで、実線は各温度のシャルピー衝撃値を、破線は各温度の脆性破面率を表している。破面遷移温度は、780N/mm<sup>2</sup>級の溶接材料では、角継手 SAW 部で約-50℃、角継手下盛り GMAW+表層SAW 部で-20℃~-40℃、柱現場継手 (横向姿勢) 溶接部で-60℃~-80℃、柱工場継手 (下向姿勢) 溶接部で-50℃~-60℃であった。GMAW+表層 SAW では、SAW の熱影響により、全体的に下盛り GMAW 部溶接金属の靱性が低下したため、破面遷移温度が高くなったと考えられる。

### 3.4.6 超音波探傷試験結果

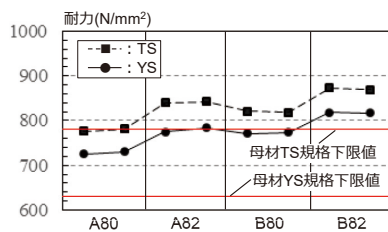
超音波探傷試験は、780N/mm<sup>2</sup>級鋼材用の溶接材料で施工した部位に関しては、遅れ割れが懸念されていたので、溶接完了後48時間後、96時間後の2回試験を実施した。また、事前に780N/mm<sup>2</sup>級鋼材は STB 試験片と音速差がある (音速が遅くなる) ことが確認されていたので、JIS Z 3060: 2015「鋼溶接部の超音波探傷試験方法」の STB 音速比による探傷屈折角の補正 (探傷屈折角を小さくする) を行った。試験結果は、溶込不良、融合不良と思われる許容欠陥が数箇所確認されたが、懸念された遅れ割れ及びビード横割れに関しては、探触子の斜め平行走査や PAUT 法を行って確認したが、48時間後試験、96時間後試験ともに検出されなかった。

PAUT 法及び斜角一探触子法における探触子の走査方法を図19に示す。

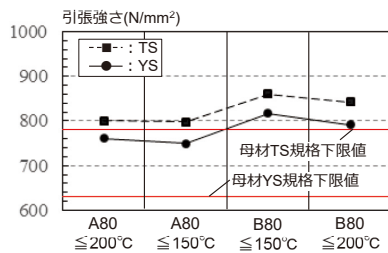
表 13 溶接部の機械試験結果（丸棒引張，継手引張，シャルピー衝撃）

| 部位               | 溶接材料<br>パス間<br>温度     | 溶接丸棒引張 |     |     |    |    | 溶接継手引張 |            | シャルピー衝撃3 本平均値 (J) |      |      |      |      |      |     |
|------------------|-----------------------|--------|-----|-----|----|----|--------|------------|-------------------|------|------|------|------|------|-----|
|                  |                       | 本数     | YS  | TS  | EL | φ  | TS     | 破断位置       | DEPO              |      |      |      |      | BOND | HAZ |
|                  |                       |        |     |     |    |    |        |            | 0℃                | −20℃ | −40℃ | −60℃ | −80℃ | 0℃   | 0℃  |
| 柱角継手<br>SAW 部    | US-80LT/ PF-<br>H80AK | 1 本目   | 687 | 816 | 25 | 66 | —      |            | 167               | 145  | 95   | 52   | 27   | 161  | 212 |
|                  |                       | 2 本目   | 692 | 814 | 24 | 67 |        |            |                   |      |      |      |      |      |     |
| 柱角継手<br>GMAW 部   | A80≦150℃              | 1 本目   | 725 | 776 | 23 | 63 | —      |            | 83                | 68   | 49   | 24   | 15   | 205  | 223 |
|                  |                       | 2 本目   | 730 | 781 | 23 | 66 |        |            |                   |      |      |      |      |      |     |
|                  | A82≦150℃              | 1 本目   | 775 | 840 | 21 | 65 | —      |            | 69                | 59   | 38   | 22   | 12   | 235  | 238 |
|                  |                       | 2 本目   | 784 | 843 | 23 | 63 |        |            |                   |      |      |      |      |      |     |
|                  | B80≦150℃              | 1 本目   | 771 | 821 | 22 | 62 | —      |            | 79                | 75   | 54   | 27   | 12   | 173  | 223 |
|                  |                       | 2 本目   | 774 | 819 | 22 | 62 |        |            |                   |      |      |      |      |      |     |
|                  | B82≦150℃              | 1 本目   | 818 | 873 | 22 | 64 | —      |            | 67                | 46   | 35   | 26   | 14   | 196  | 291 |
|                  |                       | 2 本目   | 817 | 870 | 22 | 64 |        |            |                   |      |      |      |      |      |     |
| 柱角継手<br>補修 GMAW  | A80≦150℃              | 1 本のみ  | 690 | 749 | 22 | 66 | —      |            | 98                | —    |      |      |      |      |     |
| 柱現場継手<br>GMAW    | A80≦200℃              | 1 本のみ  | 761 | 800 | 22 | 65 | 825    | 溶接金属       | 104               | 101  | 57   | 35   | 38   | 86   | 311 |
|                  | A80≦150℃              | 1 本のみ  | 749 | 798 | 22 | 67 | 820    | 母材         | 115               | 105  | 81   | 47   | 24   | 140  | 246 |
|                  | B80≦150℃              | 1 本のみ  | 817 | 861 | 21 | 62 | 825    | 母材         | 94                | 79   | 64   | 50   | 29   | 167  | 292 |
|                  | B80≦200℃              | 1 本のみ  | 792 | 843 | 20 | 64 | 817    | 母材         | 106               | 89   | 65   | 50   | 42   | 254  | 260 |
| 柱工場継手<br>GMAW    | A80≦150℃              | 1 本のみ  | 685 | 746 | 24 | 65 | 803    | 溶接金属<br>母材 | 117               | 92   | 64   | 34   | 19   | 113  | 316 |
|                  | A82≦150℃              | 1 本のみ  | 806 | 863 | 20 | 63 | 816    | 母材         | 89                | 76   | 62   | 43   | 17   | 190  | 294 |
|                  | B82≦150℃              | 1 本のみ  | 875 | 953 | 21 | 63 | 821    | 母材         | 104               | 83   | 56   | 43   | 23   | 286  | 262 |
|                  | B80≦150℃              | 1 本のみ  | 793 | 852 | 20 | 62 | 810    | 母材         | 96                | 83   | 57   | 46   | 24   | 173  | 299 |
| 柱現場継手<br>補修 GMAW | A80≦200℃              | 1 本のみ  | 741 | 799 | 21 | 64 | —      |            | 111               | —    |      |      |      |      |     |
| 外ダイアフラム<br>GMAW  | KC-60≦350℃            | 1 本目   | 625 | 685 | 26 | 64 | —      |            | —                 |      |      |      |      |      |     |
|                  |                       | 2 本目   | 608 | 669 | 25 | 62 |        |            |                   |      |      |      |      |      |     |
| 内ダイアフラム<br>GMAW  | KC-55G≦250℃           | 1 本目   | 544 | 609 | 28 | 72 | —      |            | —                 |      |      |      |      |      |     |
|                  |                       | 2 本目   | 542 | 609 | 28 | 68 |        |            |                   |      |      |      |      |      |     |

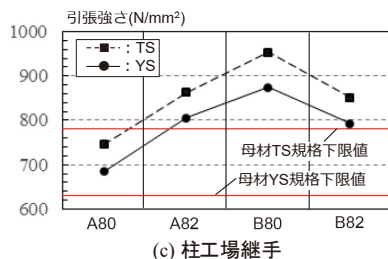
※ Ys, Ts : 降伏点, 引張強さ (N/mm<sup>2</sup>), EL : 伸び (%),  $\phi$  : 絞り (%)



(a) 柱角継手下盛GMAW部

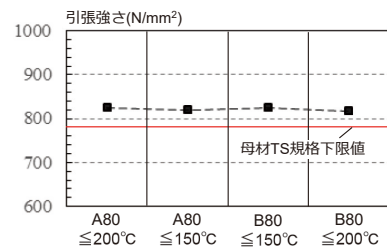


(b) 柱現場継手

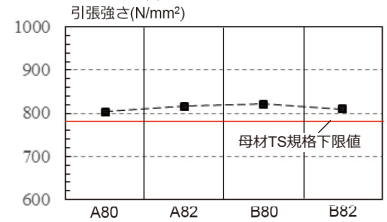


(c) 柱工場継手

図 16 丸棒引張試験結果



(a) 柱現場継手



(b) 柱工場継手

図 17 継手引張試験結果

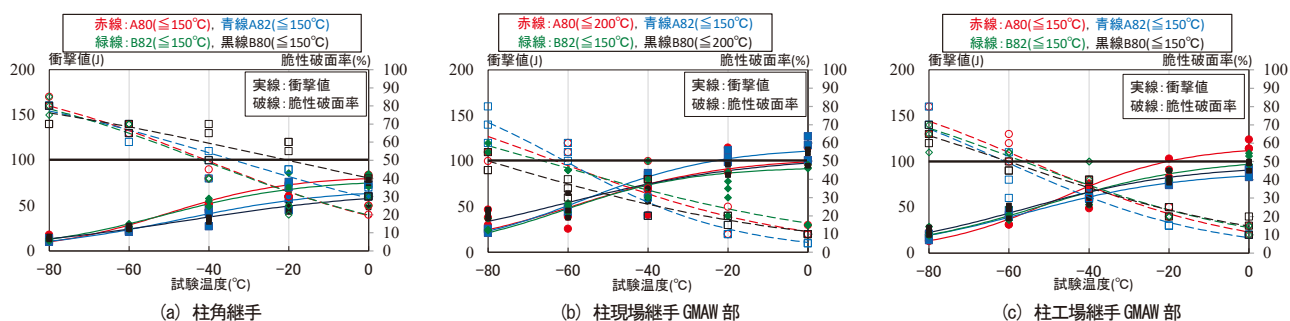


図 18 シャルピー衝撃試験結果による遷移曲線

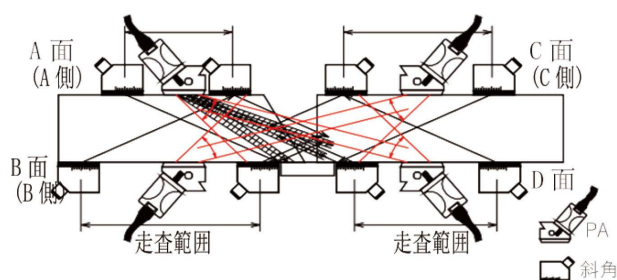


図 19 探触子の走査

#### 4. おわりに

780N/mm<sup>2</sup>級鋼の溶接施工法を確立するため、遅れ割れ検証実験および実大柱の溶接施工試験を実施し、780N/mm<sup>2</sup>級鋼用溶接ワイヤー（A80, A82, B80, B82）及びパス間温度をパラメータとして、柱角継手下盛り溶接、柱工場継手、柱現場継手における比較検証を実施し、以下のことを確認した。

- 1) 柱工場継手では、A80にて指針に基づく入熱30kJ/cm以下、パス間温度150℃以下の施工を行ったとしても、溶接金属強度が母材規格値を下回る結果が確認された。その他の溶接材料と溶接条件の組合せでは母材規格値を満足する結果が得られた。
- 2) 入熱が低い横向姿勢では、A80, B80を用いてパス間温度を200℃以下としても、溶接金属の引張試験強度は母材規格値を確保できた。なお、遅れ割れ検証試験において、A82を使用した場合にも同様の結果が確認された。
- 3) 遅れ割れ検証試験において、B82を使用した場合、引張強さが950N/mm<sup>2</sup>を超え、遅れ割れの発生リスクが高まることが確認された。

従って、B82は溶接姿勢に関わらず原則使用しないものとし、下向姿勢ではA82, B80を、横向姿勢ではA80, A82, B80を用いるなど、溶接姿勢ごとに溶接材料を使い分ける方法が有効と考えられる。

上記の知見で得られた溶接姿勢と溶接条件の組合せを表14に示す。なお、柱角継手の補修溶接については、今後A80以外での適用を検討する必要がある。

本研究で得られた知見を活用し、使用する溶接材

表 14 溶接姿勢と溶接条件の組合せ

| 溶接姿勢 | 溶接材料             | 入熱 (kJ/cm) | パス間温度 (℃) |
|------|------------------|------------|-----------|
| 横向き  | A80 (A82, B80も可) | ≤20        | ≤200      |
| 下向き  | A82, B80         | ≤30        | ≤150      |



写真 1 0節柱製作状況



写真 2 1節柱製作状況

料と溶接条件、及び超音波探傷検査方法を決定し、「780N/mm<sup>2</sup>級鋼材溶接施工指針」を策定した。TODA BUILDINGでは、780N/mm<sup>2</sup>級鋼材を使用した鉄骨柱の工場製作(写真1, 写真2)及び工事現場溶接において、本指針にて定めた溶接施工及び超音波探傷検査を実施した。今後の780N/mm<sup>2</sup>級鋼材の溶接施工にも本研究成果に展開していく所存である。

#### 参考文献

- 1) JFE スチール株式会社：建築構造用低降伏比780N/mm<sup>2</sup>鋼材 JFE-HITEN780TB, JFE-HITEN780TC, 溶接施工指針, 2007.8
- 2) 木下智裕, 大庭諒介, 吹田啓一郎, 聲高裕治, 松尾真太郎, 村上行夫：高強度鋼箱形断面柱を用いた外ダイアフラム形式柱梁接合部の繰返し載荷実験, その2 計算結果と実験結果の対応, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III, pp.745-746, 2015.9