

特集：建築鉄骨

## 極厚柱の大入熱溶接部の脆性的破断防止について(ガイドライン)

日鉄テクノロジー株式会社  
鈴木 孝彦

### 1. はじめに

超高層建築物の下層階には、建物の自重を支え、大地震の揺れに耐えられるよう、厚板四枚を溶接で組み立てる溶接組立箱形断面柱（図 1 参照、以下、ボックス柱と略す）が用いられる。ボックス柱の製作にはサブマージアーク溶接やエレクトロスラグ溶接が適用されるが、これら大入熱溶接によって生じる溶接部の靱性低下が大地震時には脆性的破断を引き起こすのではないかと懸念が常にあった。そこで破断の発生条件を検討した一連の研究成果に基づき、日本鋼構造協会より「内ダイアフラム エレクトロスラグ溶接部の脆性的破断防止ガイドブック」が発刊された（文献①）。ここでは、その経緯と概要について紹介する。

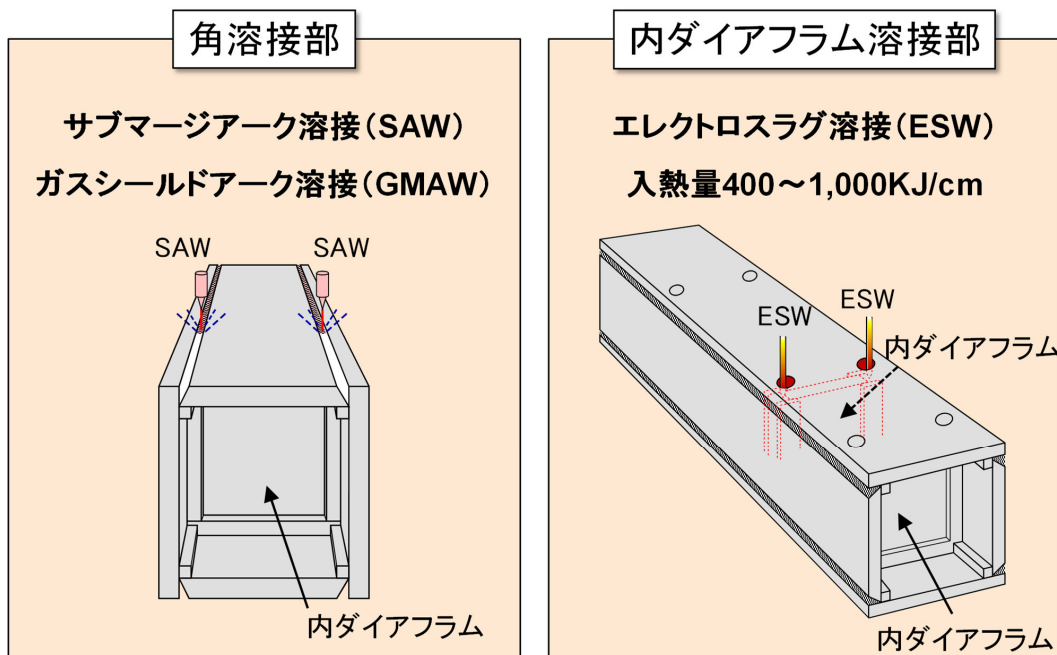


図 1 大入熱溶接を用いた溶接組立箱形断面柱（ボックス柱）の製作

### 2. ガイドブック発刊の経緯

図 2 に示すように、ボックス柱は H 形断面梁と剛結され、建物自重や地震荷重を基礎から地盤へと伝える。柱と梁との剛結には補強材として内ダイアフラムが必要で、その接合にはエレクトロスラグ溶接（以下、ESW）が用いられる。その後と同じ工場内、もしくは工事現場で CO<sub>2</sub> ガスシールドアーク溶接（以下、GMAW）による梁との接合が行われ、柱と梁は剛結となる。ボックス柱のスキンプレートの板厚が 36~100mm に対し、内ダイアフラムは 32~60mm が一般的であるが、時には 100mm にも及ぶことがあり、ESW の入熱の最大は 1,300kJ/cm にも達する。図 2 には、柱梁溶接接合

部の ESW から GMAW にわたる断面マクロを示している。ESW には施工上、当金が不可欠であるが、溶接後には、その当金が柱スキンプレートとの間で未溶着のスリットを作ることになり、応力集中の要因となっている。

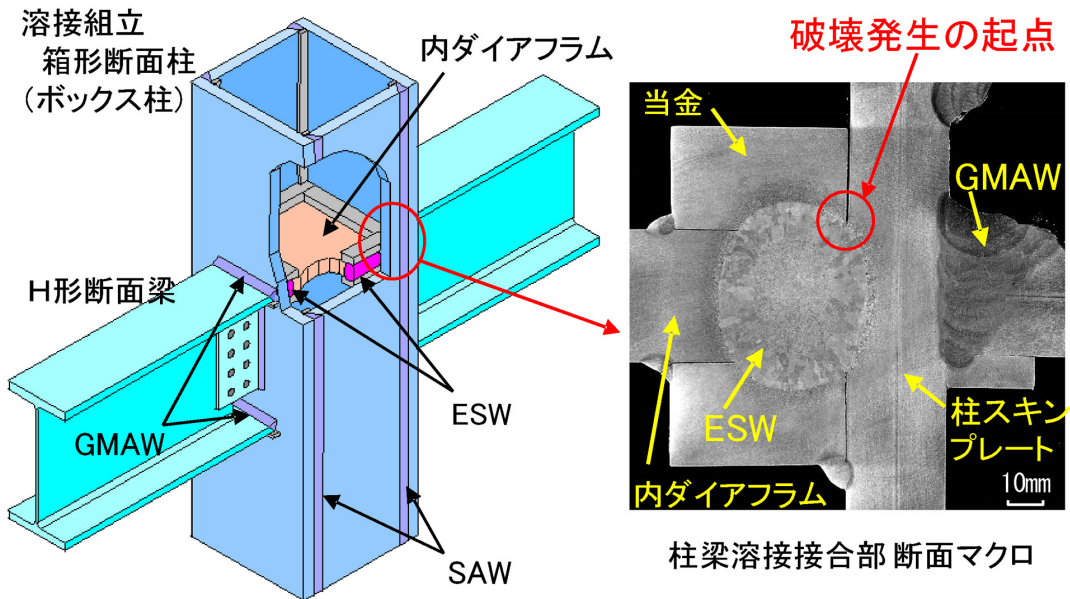


図 2 ボックス柱の柱梁溶接接合部の概要と破壊発生 の 起点

図 3 に、地震時の横揺れの際に ESW 部に作用する力を黒の矢印で模式的に示す。建物の自重を支える柱には、常時、圧縮力が作用しているが、横揺れが生じると、それに抵抗するために、部分的に引張力が作用する。脆性破壊は低靱性、切欠き、引張力の 3 つが重なり生じるが、このスリット先端部ではこの条件が全てそろふことになる。事実、地震時の状態を再現した柱梁接合部の構造実験では、実験時の試験体の温度を低くして ESW 部の靱性を低下させると、同図に示すようなスリット先端を起点とした脆性破壊が生じた (文献②)。

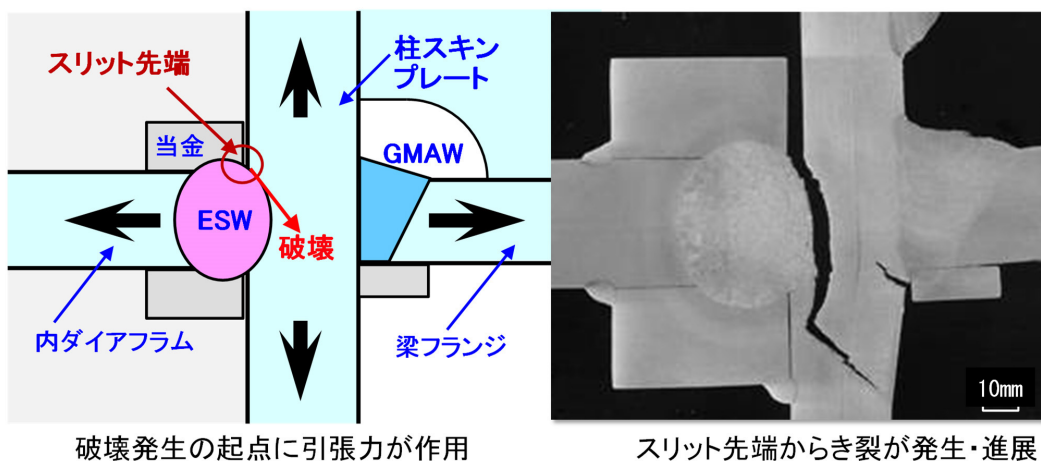


図 3 当金のスリット先端からの脆性破壊の発生

これを受けて、日本鉄鋼連盟「四面ボックス柱溶接接合部必要靱性に関する研究」委員会では構造実験や数値解析による検討が行われ、脆性的破断の発生条件が絞り込まれた (例えば文献③)。その後、得られた結果を基にして、破断を防止するための設計と施工に関する留意事項がガイドブックに

まとめられた。経済性と効率性から確立されたボックス柱の設計と製作の現状を踏まえれば、脆性破壊の3つの条件はいずれも排除できない。そのためガイドブックでは、ESW部の靱性レベルの実態を踏まえてスリット先端部に作用する引張応力のレベルを低く抑えることを、破断防止の基本的な考え方としている。

### 3. ガイドブックの概要

ガイドブックは、1) 破断防止の簡易検討、2) 破断防止の詳細検討、3) ESW部の靱性の評価方法、の3つからなる。1)、2)は接合部の設計に関するもので、ESW部の靱性レベルを設定して破断の危険性を確認する。3)は設定したESW部の靱性が実際の溶接施工条件の下で確保されているかを確認するものである。以下に、各々の概要を示す。

#### 1) 破断防止の簡易検討

簡易検討では、後述するように、3本1組で行ったシャルピーVノッチ衝撃試験での吸収エネルギーの平均値をESW部の靱性レベルと称し、この靱性レベルに応じて検討を行う。図4に簡易検討フローを示す。

衝撃試験温度 0°Cで 27J を標準的な靱性レベルとし、内ダイアフラムに作用する応力が上限値 (240N/mm<sup>2</sup>) を超えないことを確認することが基本となっている。ただし、建物の構造上、一部の柱梁接合部で作用応力が 240 N/mm<sup>2</sup> を超えてしまう場合には、フローに従って靱性レベル 47J を選択し、その柱スキンプレートには 47J を確保できる鋼材・溶材・溶接条件を採用することになる。一方で、内ダイアフラムに比べ柱スキンプレートの板厚が薄く、27J を確保することが困難である場合には、靱性レベル 15J を許容し、作用応力を 160 N/mm<sup>2</sup> 以下に低減した接合部の設計を行うことになる。

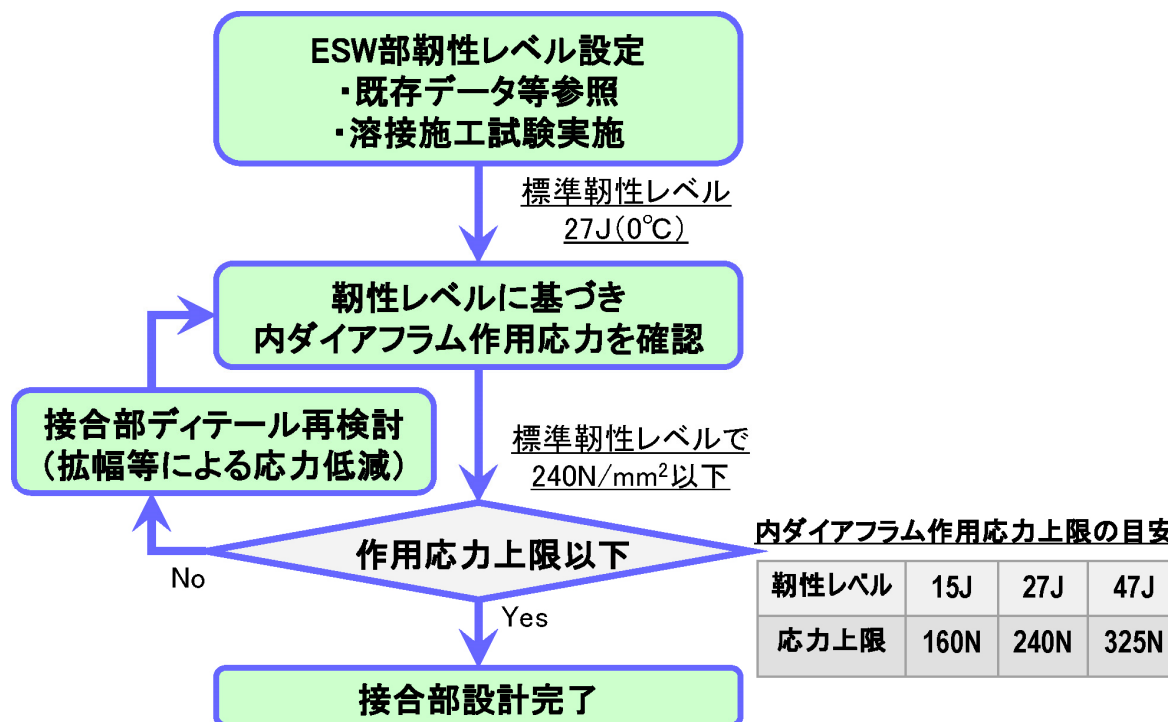


図4 破断防止の簡易検討フロー

## 2) 破断防止の詳細検討

前述の簡易検討で用いる内ダイアフラムの作用応力は、梁から作用する引張力を内ダイアフラムの断面積で除して求めた平均的な応力である。実際には、内ダイアフラムに作用する応力は均一ではなく、柱と梁の断面寸法の違いなどにより、破壊の起点に作用する局所的な応力は異なる。そのため、破断の危険性をより詳細に検討できるよう、最大主応力に基づく詳細検討フローが設けられている（図5）。

検討フローは、①内ダイアフラムに生じる応力の算定、②破壊起点に作用する最大主応力の算定、③脆性破壊を回避するための要求靱性の決定、の3つの手順で構成されている。設計条件から手順①、②、③によって必要耐力を算出し、ESW部の靱性レベルから算定される限界耐力と比較する。必要耐力が限界耐力以下であれば破断の危険性は低いとして検討は終了となり、逆の場合には接合部ディテールや靱性レベルの見直しを行うこととなる。

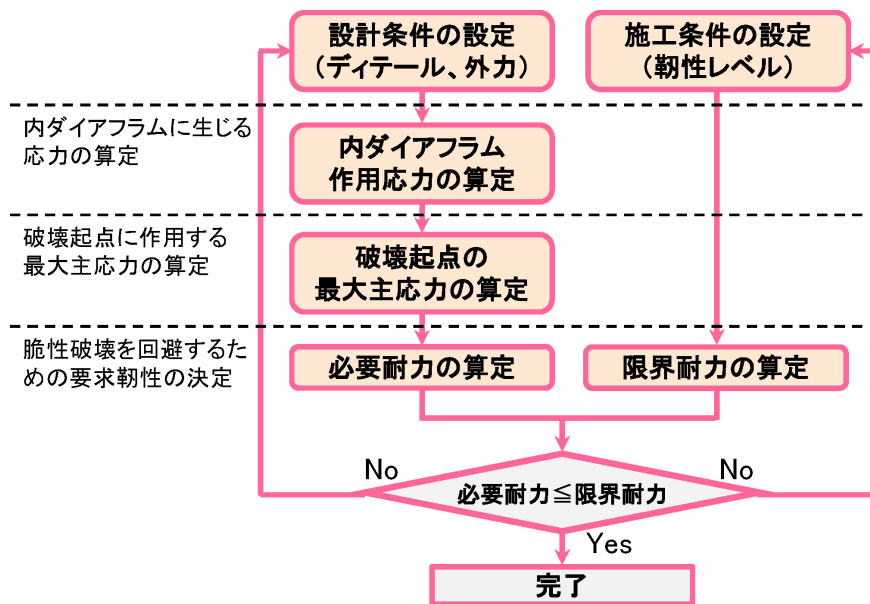


図5 破断防止の詳細検討フロー

## 3) ESW部の靱性レベルの評価方法

ESW部の靱性は溶接施工試験での衝撃試験で評価される。施工試験では、工事に使用する鋼材、溶接材料、溶接施工条件で溶接施工試験体が製作され、そのESW部から衝撃試験片が採取される。ESW部では試験片のノッチ位置により靱性値が大きく異なることが知られており、そのばらつきも大きい。それまで、試験片の採取要領や製作要領については必ずしも統一されていなかったが、破壊の起点はスリット先端のESWの融合境界部（ボンド部：Bond）で、溶接金属（Depo）もしくは溶接熱影響部（HAZ）で破壊が進展することから、ガイドブックでは靱性レベルの評価方法が以下のよう定められた。

試験片は図6に示す位置から採取し、下記の3つの異なるノッチ位置で試験を行う。

- a) Bond：柱スキンプレートと溶接金属との融合境界部
- b) HAZ1：ボンド部から柱スキンプレート側に1mm離れた位置
- c) Depo1：ボンド部から溶接金属側に1mm離れた位置

各ノッチ位置で3本の試験を行い、シャルピー吸収エネルギーの平均値を求める。その平均値の中で、最も低い平均値がESW部の靱性レベルとなる。衝撃試験の試験温度は0°Cを基本とするが、建物の使用環境条件が大きく異なる場合には、試験温度を使用環境に合わせることをとする。

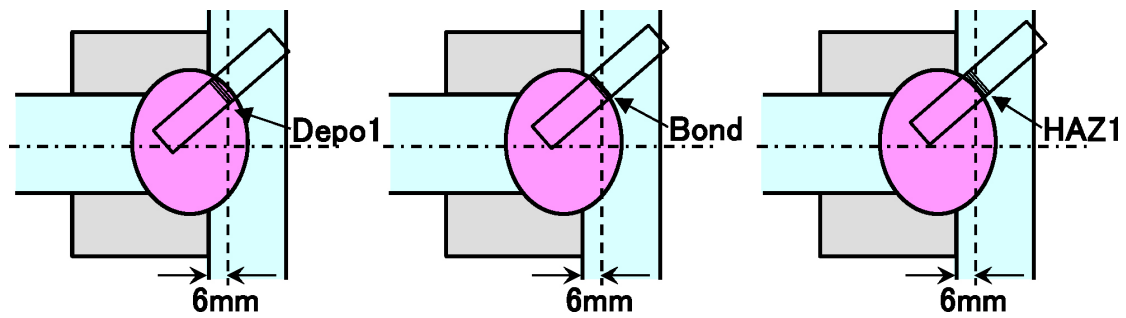


図 6 ESW 部靱性レベルを評価するためのシャルピー衝撃試験片の採取・製作要領

#### 4. おわりに

ガイドブックは 490 N/mm<sup>2</sup> 級鋼の ESW 部を対象としている。一方、高層化、巨大化を続ける超高層ビルでは、550, 590 N/mm<sup>2</sup> 級鋼の使用が一般的になっている。そのため、490 N/mm<sup>2</sup> を超える高強度鋼に対する破断防止技術の整備が継続して行われている。

#### 参考文献

- ① 日本鋼構造協会：内ダイアフラム エレクトロスラグ溶接部の脆性的破断防止ガイドブック，JSSC テクニカルレポート No.110，2016 年
- ② 秋山宏，山田哲，松本由香，竹内徹，杉本浩一：鋼構造柱梁改良接合部の終局耐震性に関する実大振動実験，日本建築学会構造系論文集，第 551 号，pp.141-148，2002 年 1 月
- ③ 宋勇勲，石井匠，下川弘海，鈴木孝彦，萱森陽一，原田幸博，森田耕次：柱梁部分骨組架構モデルのエレクトロスラグ溶接部の破壊性状に関する研究，日本鋼構造協会鋼構造論文集，第 17 巻，第 68 号，pp.85-100，2010 年 12 月

<略歴>

**鈴木 孝彦（すずき たかひこ）**

1986 年 新日本製鐵株式会社 入社

2016 年 日鉄テクノロジー株式会社 転籍 富津事業所  
現在に至る