

特集：建設関連技術の最新動向

エレクトロスラグ溶接部のじん性

JFE スチール株式会社
 梅田 敏弘

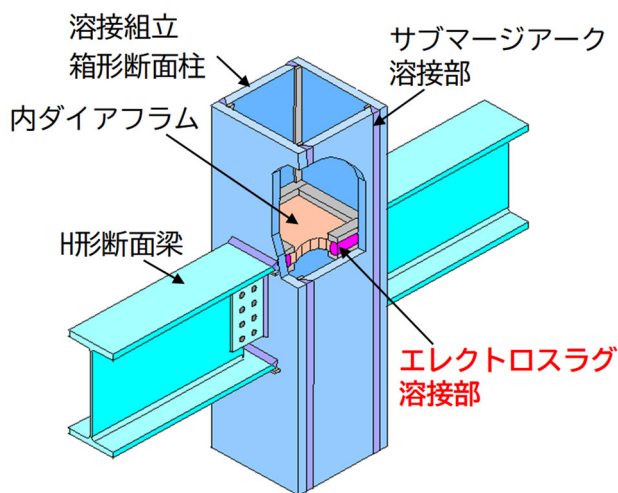
1. はじめに

建築鉄骨は柱や梁などの多数の構造部材で構成され、その多くが溶接接合されている。1995年の兵庫県南部地震では、この溶接部周辺を起点としたぜい性的破断が多数確認された¹⁾。建築鉄骨は、巨大地震時には部材の塑性化により地震のエネルギーを吸収することで、建物の揺れを抑え倒壊を防止するよう設計されるが、この地震では残留変形が小さく十分に塑性変形する前にぜい性破断したと考えられる溶接部が確認された。これは建築鉄骨の信頼性を大きく揺るがしかねない出来事であり、この地震以降、鉄骨部材が十分に塑性変形する前に溶接部がぜい性破断しないよう、各種溶接部における早期ぜい性的破断防止のための研究が進められている。

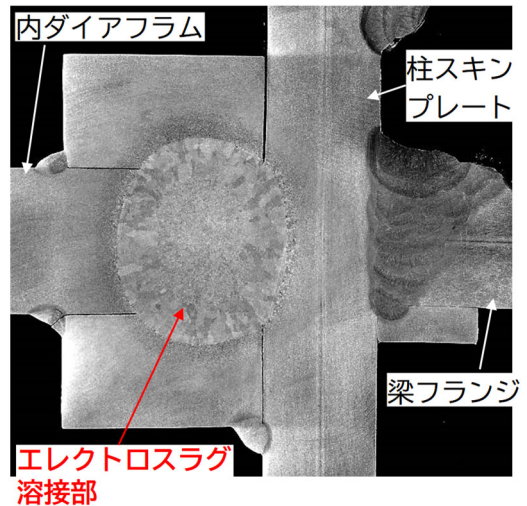
本稿では、近年の超高層建築に多用される溶接組立箱形断面柱のエレクトロスラグ溶接部について、早期のぜい性的破断を防止するための研究や試験方法について紹介する。

2. 溶接組立箱形断面柱のエレクトロスラグ溶接部

溶接組立箱形断面柱のエレクトロスラグ溶接部の周辺の形状を図1に示す。溶接組立箱形断面柱は鋼板4枚を溶接接合することで組み立てられた柱部材であり、高強度、厚肉の鋼板を用いることで高い剛性と耐力を確保することができるため、超高層建築でよく用いられている。梁フランジからの力を伝達するために、梁部材との接合部には内ダイアフラムが設けられる。この内ダイアフラムと溶接組立箱形断面柱の接合に非消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接法が用いられる。内ダイアフラムのエレクトロスラグ溶接の概略を図2に示す。この溶接法では、内ダイアフラム、柱スキンプレート、裏当て金に囲まれた開先内で熔融スラグを形成し、その中に非消耗ノズルを通して溶接ワイヤを送給し、主に熔融スラグの抵抗熱によって、溶接ワイヤと母材を熔融する。図2に示す通り、柱スキンプレートに孔が設けられ、箱形断面柱の内側に位置する前記開先部分が立向上進姿勢で溶接される。高能率であること、ノズルを揺動することで厚板の溶接にも対応できることなどがメリットとして挙げられる一方、内ダイアフラムの板厚が大きい場合は1000kJ/cmほどの大入熱溶接となるため、溶接部のじん性が低くなる点がデメリットとして挙げられる。



(a) 概略図



(b) 溶接部マクロ²⁾

図1 溶接組立箱形断面柱のエレクトロスラグ溶接部

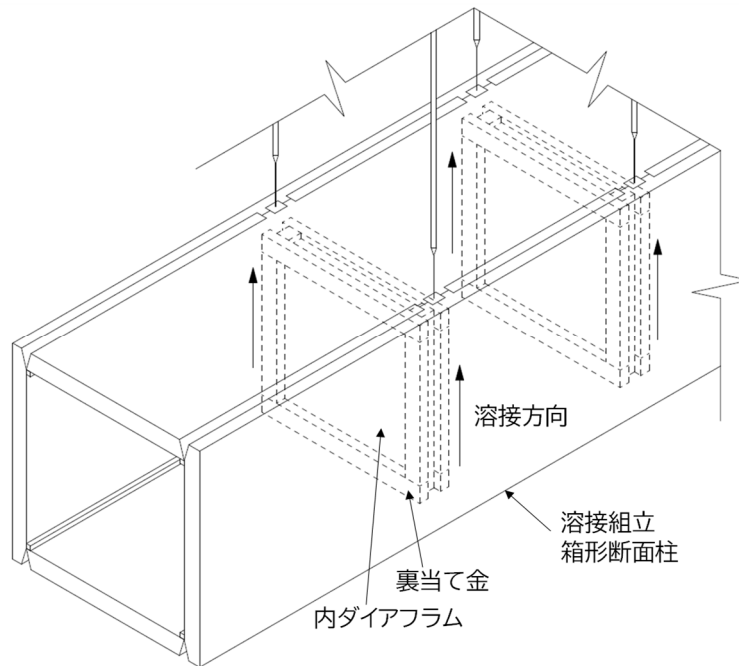
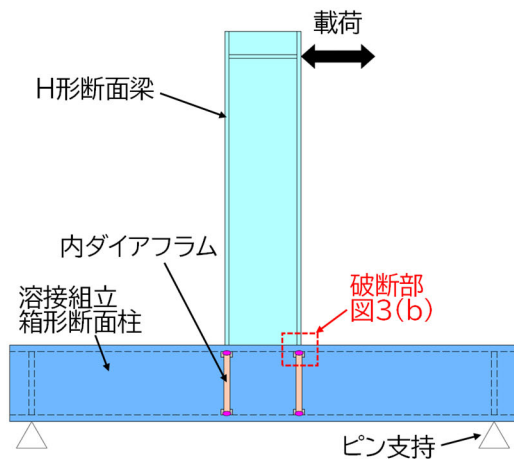
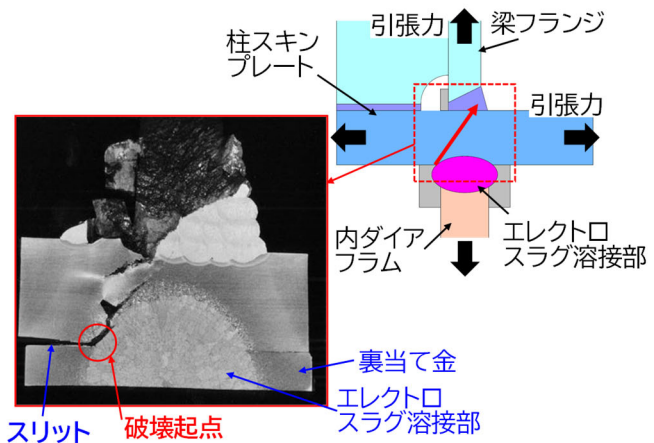


図2 内ダイアフラムのエレクトロスラグ溶接の概略図

エレクトロスラグ溶接部からの早期のぜい性的破断は実験で確認されている^{2~4)}。既往の構造実験における溶接組立箱形断面柱のエレクトロスラグ溶接部のぜい性的破断発生状況を図3に示す。溶接組立箱形断面柱とH形鋼梁からなる架構を対象とした構造実験において、梁フランジからの引張力により早期のぜい性的破断が生じた。内ダイアフラムのエレクトロスラグ溶接部には、裏当て金と柱スキンプレート間にスリットが存在し、図3(b)に示すようにこのスリットの先端がぜい性的破断の起点となった。また、シャルピー衝撃試験の結果、試験温度における溶接部のシャルピー吸収エネルギーが母材に比べて低いことが確認された⁵⁾。一般に、ぜい性破壊発生の主要因として、①応力集中部の存在、②引張応力の存在、③破壊じん性が低いことが挙げられ、内ダイアフラムのエレクトロスラグ溶接部では、①スリット先端の応力集中、②梁フランジからの引張力、③大入熱溶接により溶接部のじん性が低いことが早期のぜい性的破断の要因と考えられている。



(a) 架構実験の概略図



(b) エレクトロスラグ溶接部のマクロ⁵⁾

図3 溶接組立箱形断面柱のエレクトロスラグ溶接部のぜい性的破断発生状況

3. エレクトロスラグ溶接部の耐力とじん性の関係

前述のように、内ダイアフラムは梁フランジからの力を伝達するために設けられるため、エレクトロスラグ溶接部には梁フランジからの引張力に対して十分な耐力が要求される。エレクトロスラグ溶接部の耐力とじん性の関係について分析するために、エレクトロスラグ溶接継手を対象とした引張荷重実験が既往の研究で行われた^{6~8)}。エレクトロスラグ溶接継手の引張荷重実験の概略を図4に示す。試験体はエレクトロスラグ溶接部の内ダイアフラム、梁フランジ、柱スキンプレートを切り出した十字形の継手であり、実験では柱スキンプレートの引張力を与え、破断するまで梁フランジに引張荷重を作用させる静的な単調引張荷重が行われた。溶接部のじん性が主な実験パラメータであり、実験では試験体のエレクトロスラグ溶接部周囲を冷却ボックスで覆い、液体窒素により溶接部周囲を所定の温度に冷却することでじん性を変化させた。

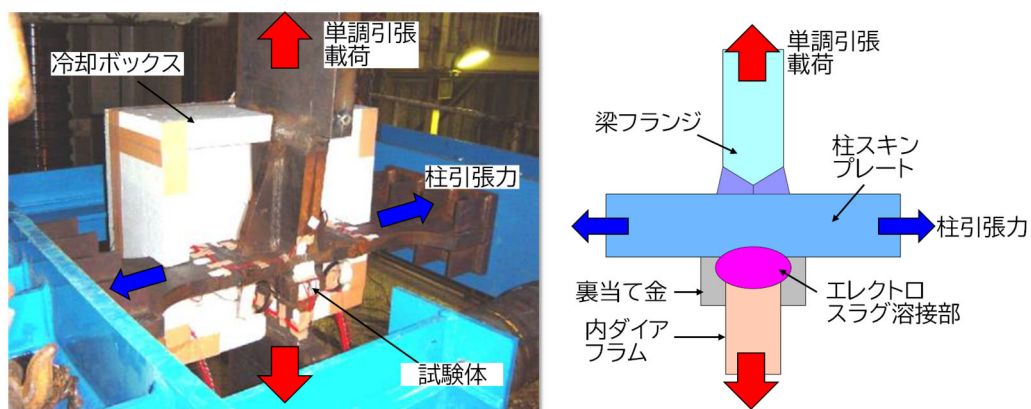


図4 エレクトロスラグ溶接継手の引張荷重実験の概略図

一般的に使用される 490N/mm^2 級鋼によるエレクトロスラグ溶接部を対象とした荷重実験で得られた耐力とじん性の関係を図5に示す。縦軸の耐力は梁フランジからの引張荷重の最大値をぜい性的破断の起点となるスリット部の断面積で除して得られるスリット位置での応力 $w \sigma_{max}$ を内ダイア

フラム母材の降伏応力 $d\sigma_y$ で除した値（破断応力度）を、横軸のじん性は破壊起点であるエレクトロスラグ溶接部の载荷温度におけるシャルピー吸収エネルギー ${}_vE_t$ を示している。ここで、破壊じん性は本来応力拡大係数や CTOD などの破壊力学パラメータで表されるものであるが、建築鉄骨の分野においてはシャルピー吸収エネルギーで規定されることが多いため、この実験もシャルピー吸収エネルギーで整理されている。横軸のシャルピー吸収エネルギー ${}_vE_t$ は、破面観察で確認されたぜい性的破断の起点位置における溶接線に直交する断面のマクロ観察により、ぜい性的破断の起点と考えられる DEPO、BOND あるいは HAZ の値を示している。実験では溶接部のシャルピー吸収エネルギーが低い場合に、スリット先端を起点とした早期のぜい性的破断が生じることで耐力が低下する傾向が確認された。図5に示す耐力とシャルピー吸収エネルギーの関係から、エレクトロスラグ溶接部に作用させる応力の上限値の目安が表1に示すようにまとめられた⁹⁾。

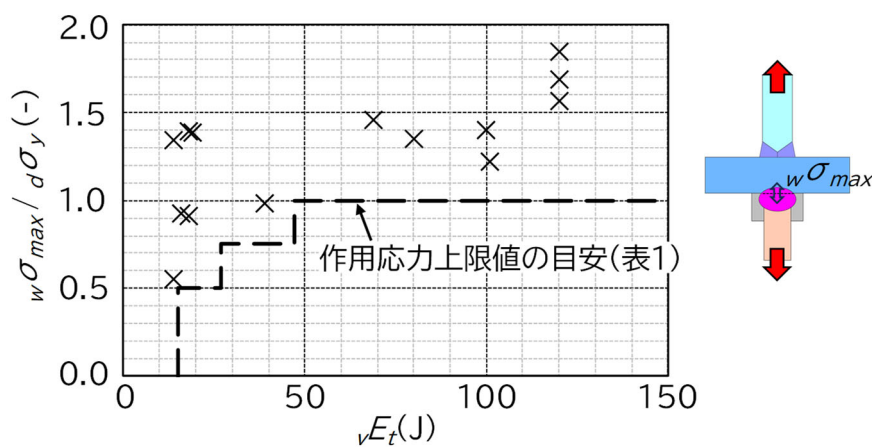


図5 490N/mm²級鋼によるエレクトロスラグ溶接継手の破断応力度とシャルピー吸収エネルギーの関係

表1 破壊じん性に応じた内ダイアフラムの作用応力の上限値の目安

エレクトロスラグ溶接部のじん性レベル ${}_vE$	15J 以上	27J 以上	47J 以上
作用応力の上限値の目安 ${}_d\sigma$	$0.5 \times F$	$0.75 \times F$	$1.0 \times F$

F : ダイアフラムの設計基準強度

表1に示すエレクトロスラグ溶接部の作用応力の上限値の目安は、図5に記載の490N/mm²級鋼によるエレクトロスラグ溶接部を対象とした実験結果をもとに決められているが、近年の国内の超高層建築では柱に590N/mm²級鋼などの高強度鋼材が適用されることも多い。そのため、高強度鋼材によるエレクトロスラグ溶接部の耐力とじん性についても研究が進められている¹⁰⁾。590N/mm²級鋼によるエレクトロスラグ溶接部を対象とした载荷実験(図4)で得られた耐力とじん性の関係を図6に示す。実験数は限られているものの、590N/mm²級鋼によるエレクトロスラグ溶接部を対象とした実験においても、490N/mm²級鋼によるエレクトロスラグ溶接継手を対象とした実験と同様の耐力とじん性の関係が確認されており、表1に示すエレクトロスラグ溶接部の作用応力の上限値の目安を上回る結果が得られている。

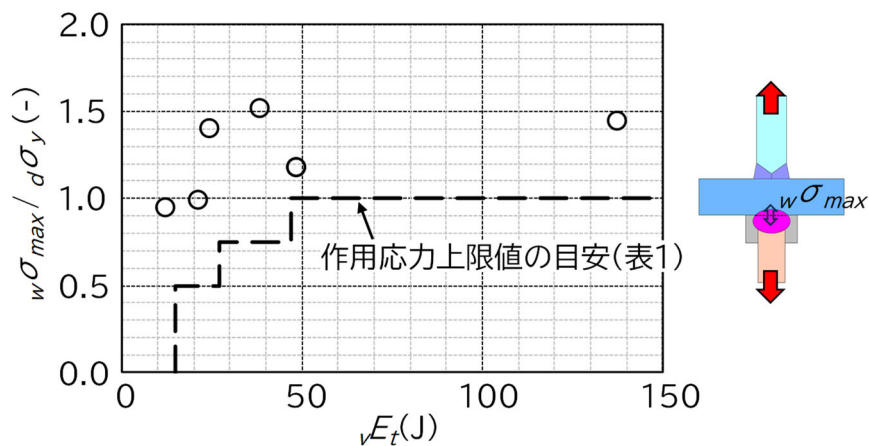


図6 590N/mm²級鋼によるエレクトロスラグ溶接継手の破断応力度とシャルピー吸収エネルギーの関係

4. エレクトロスラグ溶接部の引張試験およびシャルピー衝撃試験

エレクトロスラグ溶接部からの早期のぜい性的破断を防止するためには、溶接部に作用する力が表1に記載の値以下となるように設計されることに加えて、エレクトロスラグ溶接部で所定の強度とじん性が確保されることが重要である。そのため、内ダイヤフラムの接合にエレクトロスラグ溶接を用いる場合、所定の材料とプロセスにより施工されることで強度とじん性が確保されることを確認するための溶接施工試験が行われることが多い。

溶接施工試験における溶接部の強度、じん性の試験および評価方法は文献11に示されている。文献11に記載のエレクトロスラグ溶接部の引張試験片およびシャルピー衝撃試験片の採取位置を図7に示す。引張試験では、開先中央位置から JIS Z3111 A1 号引張試験片を1本採取し、常温下の降伏応力および引張強さが、ダイヤフラムの鋼材規格の降伏応力および引張強さの下限値以上であることが要求される。シャルピー衝撃試験では、ぜい性的破断の起点となるスリット近傍における溶接金属 (DEPO)、ボンド部 (BOND)、熱影響部 (HAZ) から JIS Z3111 Vノッチ試験片を各3本採取し、0°Cでのシャルピー吸収エネルギーの3本平均が表1に基づき 27J または 47J 以上であることが要求されることが多い。

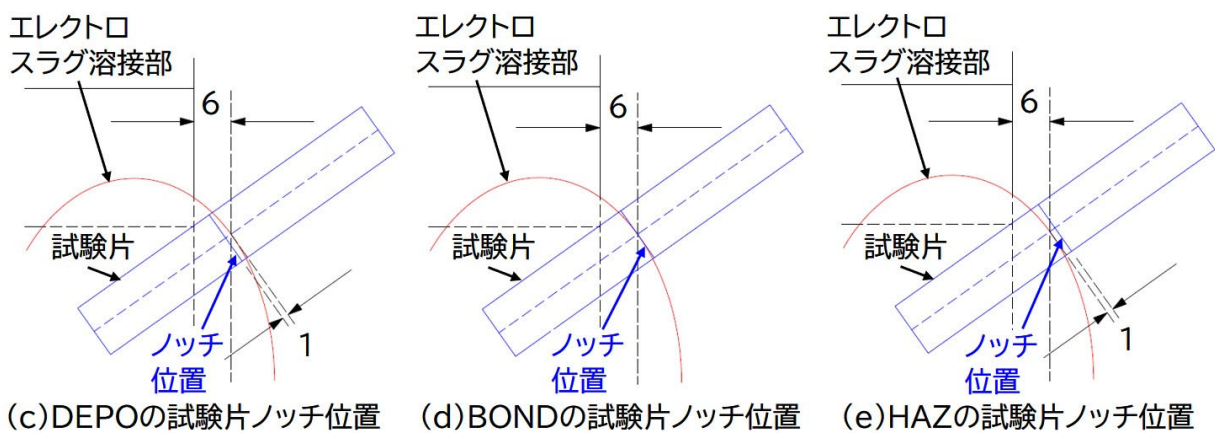
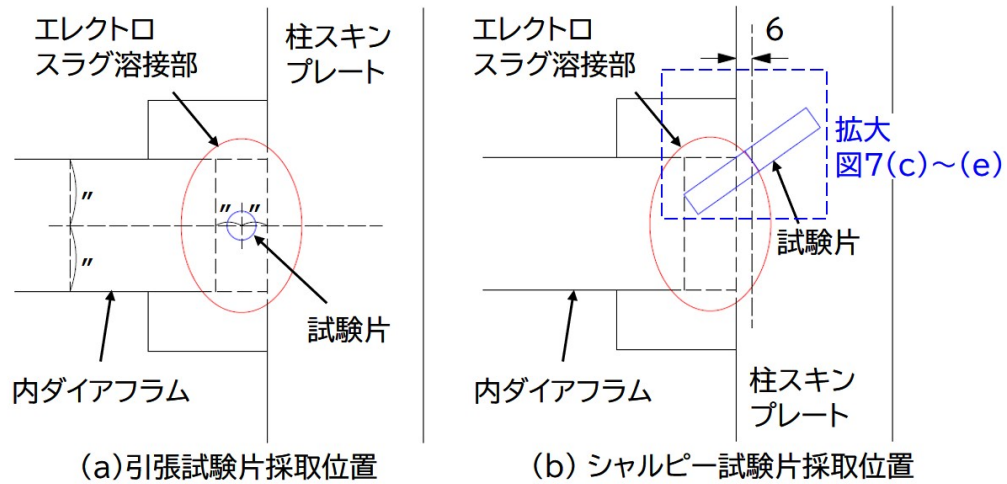


図7 引張試験片およびシャルピー衝撃試験片採取位置

5. 高 HAZ じん性鋼によるエレクトロスラグ溶接部のじん性

内ダイアフラムの板厚が大きいことで入熱を大きくする必要がある場合、粗大な HAZ 組織が形成されてじん性が低くなる傾向にある。また、柱の板厚が小さい場合も、溶接部の冷却速度が小さくなりじん性が低くなる傾向にある¹²⁾。このようなエレクトロスラグ溶接部のじん性が低くなりうる場合においてもじん性を確保する手段の一つとして、高 HAZ じん性鋼¹³⁾の利用が挙げられる。

図8に、高 HAZ じん性鋼を用いたエレクトロスラグ溶接部の0°Cシャルピー吸収エネルギー(3本平均値)を一般鋼と比較して示す。一般鋼に比べて高 HAZ じん性鋼では特に BOND や HAZ のシャルピー吸収エネルギーが高い。これは、高 HAZ じん性鋼ではオーステナイト粒の粗大化抑制や粒内組織制御などにより、大入熱溶接の熱影響部のじん性が確保されるためである。図8では、DEPOのじん性も一般鋼に比べて高 HAZ じん性鋼を用いた方が高いが、これは大入熱のエレクトロスラグ溶接は母材の希釈が大きいいため、DEPOのじん性にも影響を及ぼしたものと考えられる。このことから、高 HAZ じん性鋼とそれに合わせた溶接材料を用いることで、大入熱のエレクトロスラグ溶接部でもじん性を確保することが可能となる。

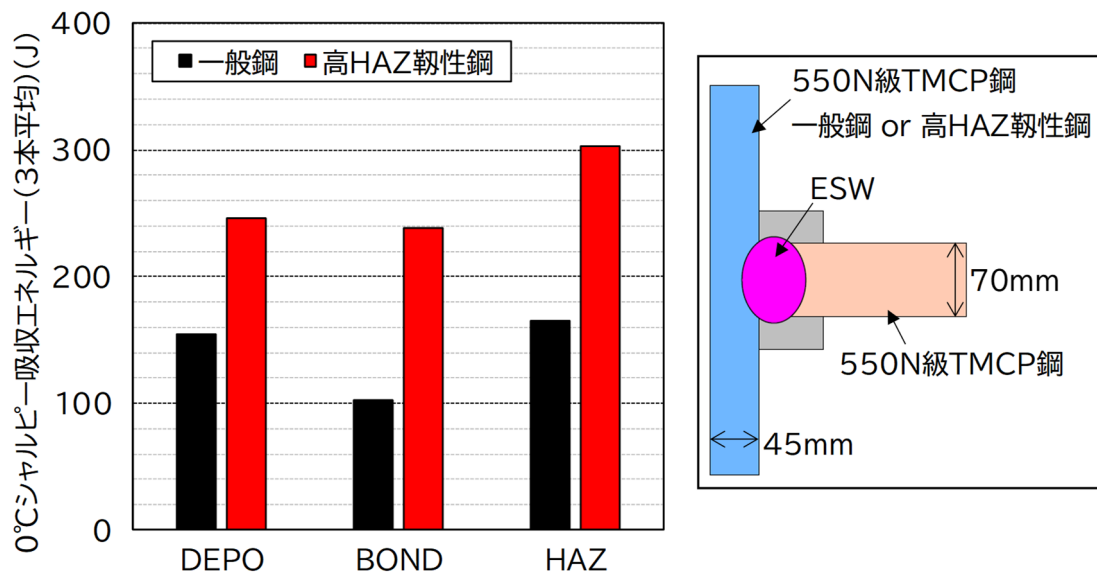


図8 高HAZじん性鋼と一般鋼によるエレクトロスラグ溶接部のシャルピー吸収エネルギーの比較¹²⁾

6. まとめ

本稿では、建築鉄骨の溶接組立箱形断面柱に適用されるエレクトロスラグ溶接に要求されるじん性、溶接施工試験における試験・判定方法、高HAZじん性鋼によるエレクトロスラグ溶接部のじん性について記載した。大入熱での溶接となり溶接部からの早期のぜい性的破断の恐れがあることが指摘されているものの、近年、建物の高層化に伴い鉄骨部材の大断面・厚肉化が進む中、エレクトロスラグ溶接は建築鉄骨生産の高効率化に大きく貢献している溶接法である。そして、本稿に記載したような構造性能と破壊じん性の関係などの要求性能に関する研究、溶接施工試験方法の整備、溶接部の高靱化技術が、高い耐震安全性が要求される建築鉄骨へのエレクトロスラグ溶接の適用を可能としている。今後更なる研究開発を通じて、建築鉄骨の生産を支える溶接技術の発展に向けて取り組んでまいりたい。

参考文献

- 1) 日本建築学会近畿支部鉄骨構造部会, 1995年兵庫県南部地震 鉄骨造建物被害調査報告書, 1995
- 2) 「四面ボックス柱溶接接合部の必要靱性に関する研究」委員会 「建築構造用鋼材の強度と必要靱性」委員会 報告資料, 2007
- 3) 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台実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol.67(2002), No.551, pp.141-148
- 4) 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, 鋼構造論文集, Vol.17(2010), No.68, pp.85-100
- 5) 島貫広志, 鈴木孝彦, 東清三郎, 内ダイアフラムのエレクトロスラグ溶接部から脆性破壊した鋼構造柱梁接合部試験体の調査—その1 溶接接合部の材料特性—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2003, pp.877-878
- 6) 下川弘海, 宋勇勲, 鈴木孝彦, 一戸康生, 藤原一成, 田淵基嗣, 岡本晴仁, 森田耕次, エレクトロスラグ溶接部の破壊性状に関する研究, 鋼構造論文集, Vol.12(2005), No.46, pp.7-18

- 7) 下川弘海, 森田耕次, 寺田慎平, 萱森陽一, 鈴木孝彦, 石井匠, 波川智明, 田淵基嗣, エレクトロスラグ溶接部の破壊性状に関する研究 その 10, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2007, pp.785-786
- 8) 石井匠, 藤澤一善, 下川弘海, 横山幸夫, 森田耕次, エレクトロスラグ溶接部の破壊性状に及ぼす溶け込み形状の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2006, pp.537-538
- 9) 一般社団法人日本鋼構造協会, 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)
- 10) 一般社団法人日本鋼構造協会, 高強度鋼材の各種溶接部の必要性能の明確化に関する研究報告書, JSSC テクニカルレポート, No.128(2023)
- 11) 一般社団法人日本鋼構造協会, 建築鉄骨溶接部の機械的性質の標準試験マニュアル ～引張試験・シャルピー衝撃試験～, JSS IV 13-2025(2025)
- 12) 梅田敏弘, 宋勇勲, 大庭諒介, 沖晃司, 藤沢清二, 波川智明, 石井匠, 森田耕次, 柱スキンプレーットの板厚が溶接組立箱形断面柱のエレクトロスラグ溶接部の靱性に及ぼす影響, 鋼構造論文集, Vol.30(2023), No.118, pp.29-43
- 13) 木村達己, 角博幸, 木村靖, 溶接部靱性に優れた建築用高張力鋼板と溶接材料—大入熱溶接部の高品質化を実現する JFEWEL 技術—, JFE 技報, No.5(2004), pp.38-44

<略歴>

梅田敏弘 (うめだ としひろ)

2013年3月 京都大学工学部建築学科 卒業
2015年3月 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 修了
2015年4月 JFE スチール株式会社 入社 スチール研究所土木・建築研究部 配属
2024年3月 大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻 博士(工学)取得
2025年 JFE スチール株式会社スチール研究所インフラ建材研究部 主任研究員
現在に至る