

溶接管理技術者の体験紹介

「国宝及び重要文化財厳島神社東回廊ほか3棟建造物
保存修理工事」におけるステンレス鋼の活用

株式会社アロイ
森 岡 豊

1. はじめに

木造建築の維持管理を考えた場合、色とりどりの景観を織りなす日本の四季は、寒暖差、湿度変化といったダメージ要因となる。加えて、海風の影響や、台風に地震といった自然災害の多い日本は、建造物にとって極めて劣悪な環境といえる。そのような環境の中、悠久の時を超えあり続ける日本の木造文化的建造物は、世界的にも認められており、後世に受け継がれていくべき遺産である。自然災害の甚大化に直面している日本においては、その維持管理の重要性がいよいよ増しており、そのために、古式伝統工法に囚われず、近代工法が採用される例も増えてきているが、本論文のテーマである「国宝及び重要文化財厳島神社東回廊ほか3棟建造物保存修理工事」（以下 本工事と略）においては、支柱に足るクスノキの自然木が入手困難であるという問題なども絡みあい、ステンレス鋼を活用する工法が採用された。

本工事は、公益財団法人 文化財建造物保存技術協会（以下 文建協と略）主導のもと進められており、これまで当社がステンレス鋼構造において、文建協に協力してきたことも考慮され、厳島神社のシンボルとも云える大鳥居と、本社殿回廊部分の耐震補強工事に参画した。

昨年度、歴史的建造物へのステンレス鋼の適用の意義が認められ、**図1**に示すように、本工事がステンレス協会によるステンレス協会 優秀賞を受賞した。



図1 2024年ステンレス協会賞 優秀賞¹⁾

2. ステンレス鋼採用について

① 大鳥居耐震補強工事

大鳥居の建造された時期は不明であるが、最も古い記録では平安時代までさかのぼる。そして、現在の大鳥居は1875年に再建された9代目で、幾度も修復を重ねながら守られてきたものである。今代大鳥居の補強工事が始まったのは2019年で、当初の予定工期は1年半と見積もられていたが、大鳥居は予想以上に深刻な状態で、その支柱は、腐蝕や海虫、シロアリの被害により、倒壊の恐れさえ感じさせる傷みを抱え、工期は未定となり、前例を見ない70年ぶりの大規模な修復となった。

その支柱を補強する継ぎ用金物として、スーパーステンレス鋼 SUS312L を提案し採用されるに至ったが、その要点は以下3つ。

- ・東西の支柱は、元からクスノキを金物で継いだ物であり、傷んで脆弱となった支柱を補強するために、従来の継ぎ金物よりさらに強度が必要であった。
- ・継ぎ用金物は施工後、クスノキの矧木で周りを覆うため、できるだけ薄くなるよう比強度が高いことが求められた。
- ・海上にある鳥居であり、海水の干満、浸食を受け、更にはマスキングされた支柱内部に金属が埋没している状態は、雨水による洗浄効果も期待できない過酷な環境となることが予想され、高耐食の鋼材である必要があった。

② 回廊耐震補強工事

本社殿回廊の柱については、大鳥居のような補修ではなく、木造建築の耐震性能の向上を目的としてステンレス鋼が採用された。採用に至る要点は以下2つ。

- ・海上を走る回廊であり、補強すべき柱は潮風に常時晒され、そして干満に併せ海水にも晒されるため、耐食性が重要であった。
- ・工事は干潮時に回廊下部にもぐり込み、人に頼った施工を行う必要があり、補強部材は人力で運搬可能なよう軽量化が求められた。

以上耐食性と高強度による薄肉化の条件を満たす、ステンレス鋼のうち高強度な二相ステンレス鋼の中から、リーニ二相ステンレス鋼 SUS821L1 を提案し採用された。

表1に、採用された2種のステンレス鋼と、比較としてSS400及び汎用ステンレス鋼であるSU304、SUS316の機械的性質及び耐食性の指標の一つである孔食指数を示す。

表 1 炭素鋼及びステンレス鋼の機械的性質と PREN

特徴\鋼種		SS400	SUS304	SUS316	SUS312L	SUS 821L1
降伏力又は0.2%耐力 (N/mm ²)		245 以上	205 以上	205 以上	300 以上	400 以上
引張強さ (N/mm ²)		400~510	520 以上	520 以上	650 以上	600 以上
硬さ(HBW)		—	187 以下	187 以下	223 以下	290 以下
孔食指数(PREN)		—	18.0	22.6	41.4	24.9
孔食指数に影響を与える成分 (%)	Cr	—	18.0~20.0	16.0~18.0	19.0~21.0	20.5~21.5
	Mo	—	—	2.0~3.0	6.0~7.0	0.6 以下
	N	—	—	—	0.16~0.25	0.15~0.20

3. 施工について

ステンレス中厚板で広く使用される SUS304 などの汎用的なオーステナイトステンレス鋼に比べ、スーパーステンレス鋼及び二相ステンレス鋼は、施工上で高いレベルの管理が要求される鋼種である。鋼材の特性を十分に理解し、完成品として現場で性能を発揮させるために、施工法については事前検討を十分に重ね、確認試験も行いながら施工を進めた。

① 大鳥居耐震補強工事

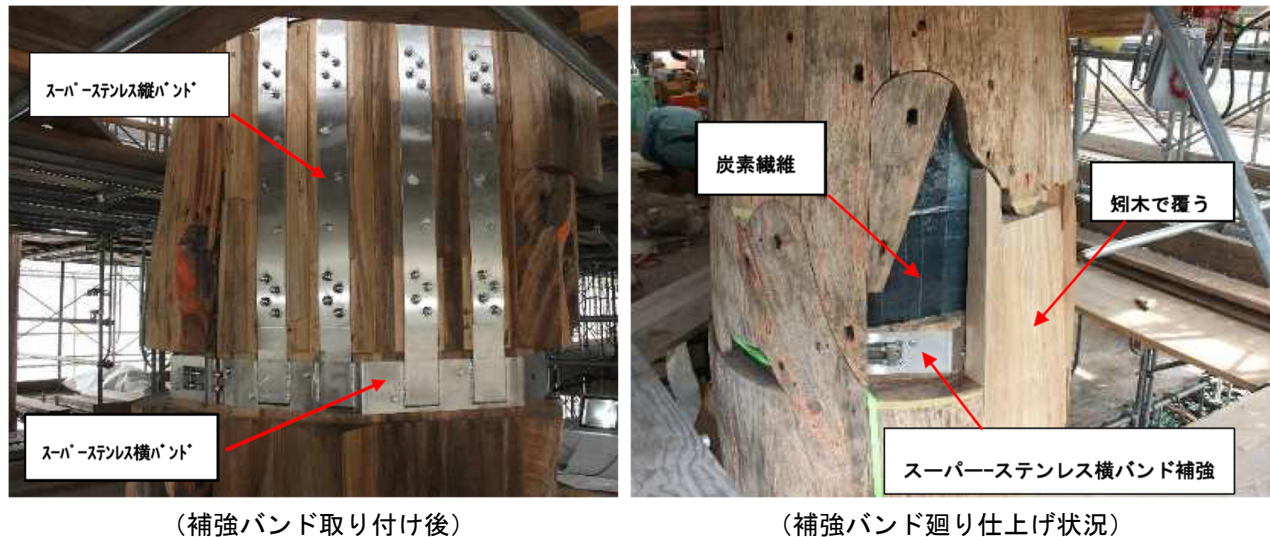
大鳥居の中で当社が施工する部位は、**図 2** に示すように、主柱の継ぎ部分の補強バンドと、袖貫材の補強部材である。



図 2 大鳥居の全景 Photo : ALLOY corp.

図3に、大鳥居の継ぎ用補強バンドの施工状況を示す。補強バンドは主柱継ぎ目部分上下をリング状の SUS 材で巻取り、フラットバーで連結するものである。主柱は自然木であることから、もともと真円には程遠いものであったが、腐食した部分を削り取り、健全な部分のみとなった不定形の主柱を 3D で計測し、3D データを基に補強バンドを成形していくという、継ぎ目上下に排するバンドの位置関係を構造部材として形に落とし込むのに労力を要した。

補強バンドの溶接は Ni 基合金の溶加棒を用いたティグ溶接による隅肉溶接で施工を行った。適度な拘束は行ったが、溶接面の清掃を十分に行い、事前テストで計画した条件通りの施工を行うことで、溶接上の問題は発生しなかった。



(補強バンド取り付け後)

(補強バンド廻り仕上げ状況)

図3 大鳥居の継ぎ用補強バンド施工状況²⁾

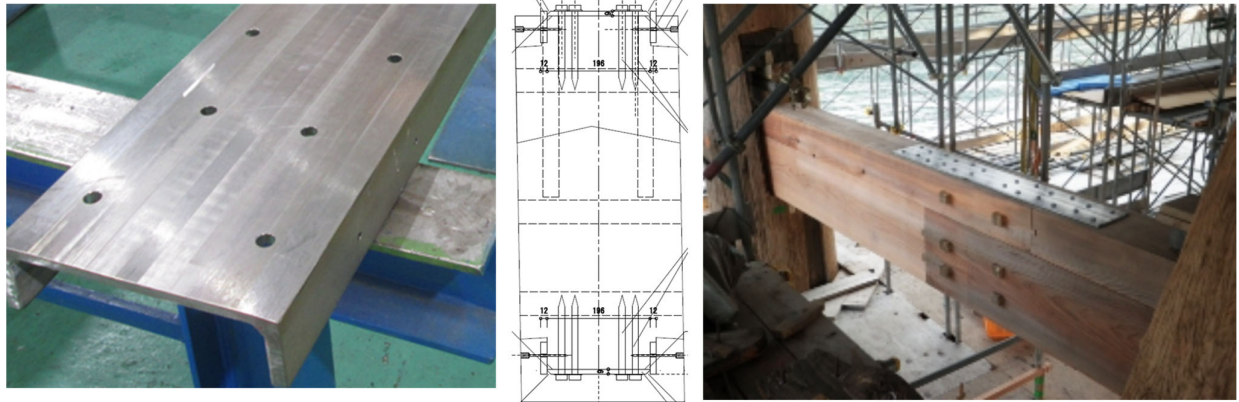
袖貫補強材は、図4に示すように、本来の袖貫角木材に対し、SUS312L の溶接溝形鋼(チャンネル材)をボルトで縫い留め挟み込むことにより、強度負担を担う部分となる。SUS312L の圧延形鋼は存在しないため、原寸に合わせて当社が溝形鋼の製作を行った。フランジ 2 枚とウェブ 1 枚の鋼板を組合せ、溶接施工するもので、ウェブ材の両長手部分を片面開先取りし、外面片側開先、内面隅肉溶接とし、溶接量が比較的大きいことよりミグ溶接を採用した。本補強材においても、試験体を用い事前確認の上、施工要領を作成し、その施工方法に従い溶接を行ったが、開先面側の溶接部に割れが生じた。割れ感受性の高いインコネル 625 を溶材に使用しての溶接であり、溶接終端部に割れが発生していたことから高温割れ等が予想されるが、割れの発生原因と考えられる点を以下に示す。

- ・事前確認テストの試験体(溶接長 200mm)は、実製品(溶接長約 2000mm)と比較すると短尺であるため、試験体と実製品の施工とでは、凝固速度など相違が生まれた。

- ・袖貫補強材の溶接順序は、図5に示すように、開先面から溶接した後、反対面内側の隅肉溶接を施工した。完成品の形状を確保するため、最終隅肉溶接後の角変形により、フランジ-ウェブ角度が 90 度となるよう施工したため、開先側溶接部を広げる応力が大きく働いた。

- ・第一工程の開先面側は、ミグ溶接による大入熱で 1 パスの溶接であり、開先内の溶接ということもあり、急冷による組織の偏析が生じたことが考えられる。

試験体による事前テストで、施工方法に問題が無いと判断してしまい、実製品で考えられるリスクに考えが及ばなかったのが反省点である。蛇足ではあるが、割れが生じた部分は適切に除去を実施し、ティグ溶接にて補修溶接を行った。



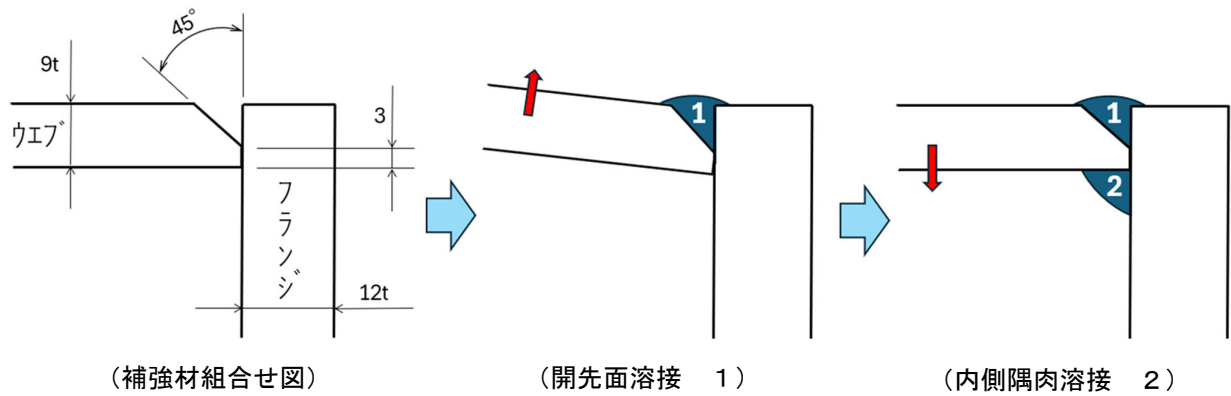
(補強材製作状況)

Photo : ALLOY corp.

(補強材概略図)

(補強材取付状況)³⁾

図 4 袖貫補強材



(補強材組合せ図)

(開先面溶接 1)

(内側隅肉溶接 2)

図 5 袖貫補強材溶接施工順序

② 回廊耐震補強工事

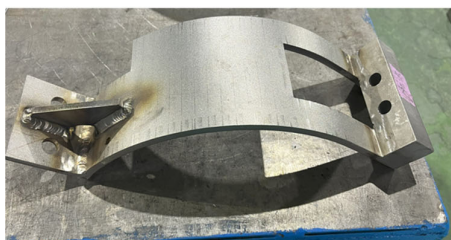
本社殿回廊の補強工事は、回廊の柱同士を連結する部材の製作であった。図 6 に、本社殿回廊の耐震補強工事の概要を示す。主な溶接は、ティグ溶接による T 継手であり、オーステナイト系ステンレス鋼に対し、二相ステンレス鋼を採用することにより、設計板厚 9 t を 6 t へ薄肉化し、約 3 割の軽量化を果たすことを目的とするため、溶接施工方法については、完全溶込み溶接を選択した。施工方法については事前テストを実施することで、問題点をクリアーできる見込みであったが、継手効率 100% で板厚計算可能にすることが、薄肉化を図る上で重要であり、溶接部の保証をどのように行うのかが、本部材施工における一番の課題となった。

T 継手であるため放射線透過試験では簡便な方法が取れず、掛かる時間とコストも現実的では無いことより、超音波探傷検査で実施していく方針とした。しかしながら、超音波探傷検査においては、二相ステンレス鋼の検査基準が確立されておらず、一般社団法人日本鋼構造協会(以下 JSSC と略)の「ステンレス建築構造溶接部の超音波探傷検査基準」⁴⁾ を引用しようとしたが、柱状エコーの影響を加味した同基準においては、9 t 以上の板厚に対して規定している点が問題となった。よって、対象板厚 6 t 及び二相ステンレス鋼の超音波検査の妥当性を検証するため、テストサンプルによる確認を

重ねて、その検証結果により有効な手段を確立していった。そして本検証結果により検査基準を設け、検査方法の承認を頂くこととなった。

二相ステンレス鋼及び板厚6tの探傷をより確実にするため、JSSC基準と比較し変更した内容を、以下3点報告する。

- ・使用する鋼材 SUS821L1 6t という本工事使用鋼材に限定したこと。
- ・浅い位置の欠陥を正確に検出するために、二振動子の縦波探触子 (5C10×5LAD70 SUS) を使用したこと。
- ・裏表両面からの検査が可能であるため、ノイズ、減衰、音速変化を考慮し、0.5 スキップの直射検査を採用し、1.0 スキップは使用しないこと。



(補強材製作状況)



(本社殿回廊風景)



(本社殿回廊耐震補強工事現地状況)

図6 本社殿回廊の耐震補強工事概要 Photo : ALLOY corp.

4. おわりに

現在も巖島神社の耐震化工事は行われているが、大鳥居は2023年初めに修復した姿を皆の前に現わし、図7に示すように、同年に行われたG7首脳の日産自動車訪問ニュースは記憶に新しい。



図7 G7首脳による巖島神社訪問⁵⁾

本工事のステンレス鋼活用の評価がなされるのは時を待たなければならないが、木材や炭素鋼で補えない環境において、ステンレス鋼の利用価値は高まっていくものと考えている。文化庁は不特定の人が入り出す文化財建造物について、所有者等に対して耐震診断及び耐震補強の実施等の重要性等を周知するため、その指針を示しており、歴史的工法のみでは性能を担保できない場面は今後とも発生してくると予想される。特に観光に供する文化財においては、被災による影響が甚大となることも予想され、その修復、耐震工事において、ステンレス部材が目に見えない部分で活躍していただろう。歴史的建造物が恒久的に維持され、存続していく未来の実現に向け、今後とも協力していくためにも、環境に応じた鋼材の提案から、素材に応じた溶接方法の確立や、その環境性能の検証活動を進めていくつもりである。

参考文献

- 1) ステンレス協会公式サイト：<https://www.jssa.gr.jp/prize/20/20-1/yusyu5.html>
- 2) 厳島神社公式サイト：<https://www.itsukushimajinja.jp/jp/construction.html>
- 3) 株式会社増岡組公式サイト：https://www.masuoka-g.co.jp/technology/itsukushima_shrine/repair/otorii2/
- 4) (一社) 日本鋼構造協会：ステンレス建築構造溶接部の超音波探傷検査基準
- 5) 外務省公式サイト：https://www.mofa.go.jp/mofaj/page1_001687.html

<略歴>

森岡 豊 (もりおか ゆたか)

1988年 大王製紙株式会社入社

1993年 株式会社アロイ 生産技術部入社

2025年 同 取締役専務執行役員製造本部長 技術部長

現在に至る

<保有関連資格>

- ・溶接管理技術者 特別級
- ・ステンレス建築構造物製作管理技術者