

歴史的建造物を支えるチタン

Historical Architecture Improved by Titanium

江 尻 憲 泰*

Norihiro EJIRI

抄 録

我が国の歴史的建造物の多くが木造であり、その建造年も数百年から千年以上に及ぶものがある。意外にも、これらの建築では接合部材として鉄材が多用されている。しかし鉄は腐食しやすく、既に接合部材としての機能を失っているものも見受けられている。歴史的建造物を更に後世に残すには、鉄に代わる材料の開発が有効である。20 世紀になって利用されるようになったチタンは軽く、強く、低い熱伝導率と高い耐食性を持つ材料である。木材との相性は鉄よりも優れているものと考えられ、筆者はいくつかの歴史的建造物の耐震補強に用いてきた。本稿ではその中から 4 つの事例をあげ、建材としてのチタンの可能性を述べている。

Abstract

Most of the historical architecture in Japan is wooden made, some structures had stood many centuries and in some cases, even more than 1 000 years. Unexpectedly, iron materials were used for joint purposes within these constructions. Since iron is susceptible to corrosion, some joint parts made by these material have already lost their properties and functions. In order to keep the historical architecture for the coming generations, the development of new materials that can substitute the iron is effective. In the 20th century, the titanium had begun to be used. This material is light and strong; furthermore, it has low thermal conductivity and high corrosion resistance. It seems that it is more suitable the usage of titanium in wooden structures, rather than iron. The author has been using the innovative material for seismic retrofit and reinforcement of historical buildings. In this article, the possibility of using titanium as a construction material is described by explaining four examples.

日本における歴史的建造物（伝統建築）は、数百年の歴史を持つ建造物のことと一般的には考えられている。近年では、築 50 年程度の鉄筋コンクリート造や鉄骨造の建物でも歴史的な価値が見いだされ始めているが、基本的には木造の建物が多く、最古の建物は法隆寺の五重塔で 1300 年前の建設とされる。これら歴史的建造物に鉄材は使われていないと言われているが、私が今までに調査した歴史的建造物は、思っている以上に多くの鉄材が使われていた。そして、鉄材は腐食により機能していない場合も散見された。

木材は腐朽することで耐久性の無い材として認識されているが、実は日本で一番古い建物は木造である。木造建築を数百年以上存続させるためには、それに追従する性能を持った材が望まれる。チタンは優れた耐食性を持つ金属で

あることは、周知の事実であるが、その他に歴史的建造物に使用する材として適している理由がある。

チタン合金の熱伝導率は文献により数値が若干異なるが、約 $8.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ で鉄鋼の $1/8$ である。木材は $0.15 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ なので、結露の可能性が鉄鋼に比べると格段に少なくなる。また、線膨張係数が鉄鋼に比べると小さい。木材の線膨張係数の資料や研究事例は少ないが、歴史的建造物は仕口や継ぎ手に隙があるために温度変化による構造体自体の変化は少ないと考えられる。異種部材で補強する場合は、木自体の伸縮以上に異種部材で構造体を変形させることになるため、できるだけ温度変化が少ない材の方が適している。鉄鋼系の材料で補強をする場合は、木材が軽いためにその重量の増加は非常に影響が大きい。極端な時には、補強材料の重量増分で地震力が大きくなり更に補強材の断面を大

* 江尻建築構造設計事務所 主宰, 日本女子大学 家政学部 住居学科 教授 東京都文京区目白台 2-8-1 〒112-8681

表 1 チタン合金の物性
Physical properties of titanium alloy

	α - β Titanium	β Titanium	Steel
Thermal conductivity (W/m·K) (20°C)	7.5	8.08	63 (SPCC)
Coefficient of linear expansion ($1 \times 10^{-6}/K$) (20°C)	8.8	8.5	12.0 (SPCC)
Specific strength	$202 \leq$	157–199	51–65 (SS400) $t=5$

出典：一般社団法人日本チタン協会 HP より http://www.titan-japan.com/technology/physical_properties.html

t: thickness



写真 1 信州善光寺経蔵小屋組全景
Panoramic view of roof system of Sutra Repository,
Zenkoji Temple



写真 3 床下補強された構造体の外観（清水寺舞台下）
External view of reinforced deck supporting structure
(Kiyomizu Stage, Kiyomizu-dera Temple)



写真 2 同上部材チタン合金シート巻き付け
Titanium alloy sheet wrapped member shown on Photo 1



写真 4 同上補強材の接合部（チタン合金ボルト）
Reinforced member joint of structure shown on Photo 3
(using titanium alloy bolt)

きくしなければならぬという矛盾に陥る。その点、チタン合金の比強度は鉄鋼の約 3 倍なので、1/3 の重量で補強が可能となる。チタン合金は、1) 耐久性、2) 熱伝導率、3) 線膨張係数、4) 比強度の側面から鉄鋼系材料の中では、歴史的建造物補強に最も適していると言える（表 1 参照）。

補足的なことであるが、釘は錆びた方が木材へ食いつきが良くなり抜けにくくなると言われている。構造計算上釘は、高力ボルト摩擦接合のように錆により接合強度が期待されることは無く、木部へのめり込みが基本的なメカニズムと考えられている。将来、錆の効果が証明されるかもしれないが、現在では、接合材料は錆びていない方が良いと判断される。

上記の利点を考慮し、歴史的建造物に採用した事例を紹介する。

最初に、信州善光寺経蔵の小屋組の水平剛性補強に用いた事例（写真 1、写真 2）を紹介する。本事例では、チタン

シートを用いて接合金物を木材に固定している。巻き付けると金属表面積が大きくなるためにできるだけ結露の生じにくいチタンシートを採用した。通常、このような巻き付けは、炭素繊維シートやアラミド繊維シートが用いられるが、接着剤を用いるために小屋組の中での施工が非常に難しい。箱形の鋼板で挟み込むこともあるが、寸法がまちまちの既設部材に合わせて接合金物を製作することは非常に大変な作業となる。チタンシートは、寸法の違う部材への追従性が高く、強度は巻き数で制御することができる。

2 番目の事例（写真 3、写真 4）は、小屋組環境ではなく外部に用いられた事例である。可能な限り耐久性の高い補強とするため、炭素繊維より線と組み合わせた。チタンの丸棒を雌ねじ加工し、片側にチタン合金のボルトを取り付け、反対側に炭素繊維より線を接着剤にて固定している。チタンボルトを鍛造で製作したことや、炭素繊維より線の付着性能を向上させるために雌ねじ加工を行ったことから

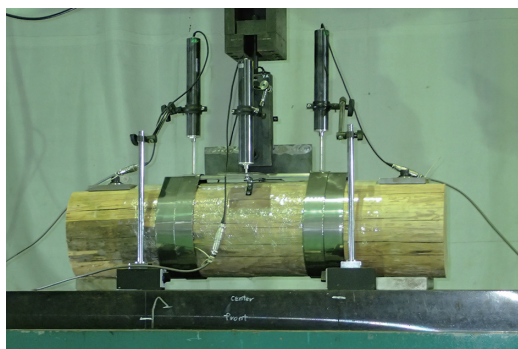


写真5 チタン合金シートの強度実験
Strength test of titanium alloy sheets

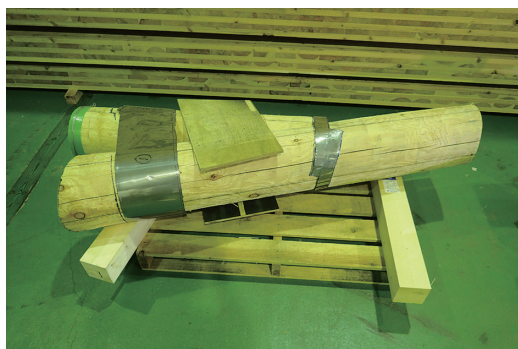


写真6 載せかけ梁の補強試験体
Specimen of reinforced beam joint

接合部の引張り試験により強度を確認している。この事例では、先ほどのチタン合金の特徴に更に利点加わる。電気を通しやすい炭素繊維に対して、鉄鋼系材料では電位差腐食が心配されるが、チタン合金は高い電気抵抗により電位差腐食が生じない。超長期耐久性が要求される歴史的建造物にとって非常に重要な性質であり、異種材料を組み合わせる上で最適な材料である。

3番目は、チタンシートの追従性に期待し載せかけ梁の固定に用いた事例(写真5, 写真6)である。歴史的建造物は、整形に製材された材ばかりではなく、丸太に近い形状で用いることも多い。載せかけ部は地震時に部材がずれてしまう可能性があり、チタンシートの追従性を利用し不整形な2材をつなげている。

4番目は、富岡倉庫の事例(写真7, 写真8)である。この事例ではボルトと炭素繊維より線との接合部にチタン管、レンガの開き止めにチタンプレートとチタンボルトを使った。本補強はデザイン性が要求されているためにできる限



写真7 富岡3号倉庫補強
Reinforcement of Tomioka Warehouse No.3



写真8 富岡1号倉庫補強
Reinforcement of Tomioka Warehouse No.1

り接合形状を小さくする必要がありチタンの比強度の大きさは有効となる。

最後に、ここで紹介した事例は、チタン合金シート、チタン合金ボルト、チタン合金鋼管(炭素繊維接合用)であるが、実は部分的な適用に過ぎない。そのプロジェクト毎に様々な経済性、納期、関係者の理解度等々純粋に構造的な性能以外の部分でその採用の可否が決まってくる現状があり、できるだけ多くの事例を積み重ね、普及材(流通材)となって欲しいと願っている。

なお、歴史的建造物にチタン合金を使う利点をもう一つ挙げたいと思う。チタンは、20世紀以前には無く、また、建造物に使われ始めたのは、21世紀であると言ってもおかしくない。歴史的建造物補強では、可逆性を期待するのであるが、チタンは今の時代の製品であることが後世の人々に判別可能であり、鉄鋼に比べ、補強履歴の記録(記憶)という点において可逆性にも優れている。



江尻憲泰 Norihiro EJIRI
江尻建築構造設計事務所 主宰,
日本女子大学 家政学部 住居学科 教授
東京都文京区目白台2-8-1 〒112-8681