

(技術資料)

伝統木造建築向けステルスブレース

橋田優人*¹

Stealth Brace for Traditional Wooden Architecture

Yuto HASHIDA

要旨

近年、地震被害により伝統木造建築の倒壊や損壊が増加している。これらの建物は壁が少なく開放的な造りが多いため、耐震補強が難しい。本稿では、要求される耐震性能に対して十分な降伏耐力、靱性（じんせい）、剛性を有する高強度の亜鉛めっき鋼線を用いた耐震補強方法を提案する。鋼線の両端部にはボタンヘッドと呼ばれる加工が施されており、引張荷重時にはボタンヘッドを介して鋼線が応力を負担する。圧縮荷重時には鋼線端部が抜け出すことにより、応力を負担せず、定着金具本体および柱梁部材に発生する応力の低減が期待できる。水平載荷試験の結果、提案する補強方法が十分な耐力と靱性を有することが確認された。今後、配置角度や定着金具をパラメーターとして、適用範囲の拡大を図る。

Abstract

In recent years, there has been an increasing incidence of traditional wooden architecture collapsing or suffering damage as a result of earthquakes. These buildings often have open structures with few walls, making their seismic reinforcement challenging. This paper proposes a seismic reinforcement method utilizing high-strength, Galvanized steel wire, which possesses sufficient yield strength, toughness, and rigidity to meet the required earthquake resistance performance. Both ends of each steel wire are processed with so-called button heads, allowing the steel wire to bear the stress through the button heads when a tensile load is applied. When a compressive load is applied, the steel wire-end escapes to avoid bearing stress. Therefore, it is expected that the stress generated in the metal-fitting body or column/beam members will be reduced. A horizontal load test has confirmed that the proposed reinforcement method yields sufficient strength and toughness. Going forward, the arrangement angle and fixing anchoring fittings will be employed as parameters to expand the scope of application.

検索用キーワード

伝統木造建築, 耐震補強, 亜鉛めっき鋼線, ピン接合, ボタンヘッド, 水平載荷試験, $\phi 7$ ステルスブレース[®]

まえがき = 日本は地震が頻発する国であり、1981年に導入された新耐震基準により、建築物の耐震性向上が求められてきた。しかし、それ以前に建てられた木造の重要文化財は耐震性能が不足し、大地震時の倒壊リスクが高い。過去の震災でも多くの伝統木造建築が被害を受け、その歴史的価値が失われる事例が報告されている。

現在、日本には約5,500棟の重要文化財建造物、約14,000棟の登録文化財建造物が存在し、これらの適切な保存と耐震補強が課題となっている。いっぽうで、文化財建造物は観光資源としての活用が進められており、多くの来訪者を迎えることから、安全性の確保が不可欠である。このため、文化財建造物の耐震補強の需要は今後も増加する見込みである。

しかし、文化財建造物の耐震補強には多くの課題がある。まず、補強設計およびその実施の認可には長期間を要し、迅速な対応が難しい傾向にある。旧有備館¹⁾のように、補強設計が完了していたにもかかわらず震災により倒壊した例もあり、迅速な対策の必要性が指摘されている。また、壁の少ない開放的な構造を持つ江戸時代後期の建築物などでは、景観や意匠を損なわずに耐震補強を行うことが困難である。既存の補強方法の一例とし

て、開口部の一部を犠牲にし、耐力壁を設置する方法や、面格子状の壁、鉄骨柱を用いる方法などがある。これらは建物の景観や意匠に影響をおよぼす可能性があり、文化的価値の保持との両立が難しい状況にある。このように、文化財の保存と耐震性能の確保を両立することが大きな課題となっている。この課題を解決するため、近年、新たな耐震補強技術の開発を進めている。その一例として、高強度の亜鉛めっき鋼線を用いた耐震補強方法である $\phi 7$ ステルスブレース[®]を紹介する。細径の鋼線を使用することで、設置に必要となる既存部材への削孔などの損傷を最小限に抑えつつ、狭い空間でも施工が可能である。また、鋼線の特性を活かし、引張荷重時に応力を負担して、圧縮荷重時には座屈による部材の損傷を防ぐ機構を備えている。

本稿では、提案する補強方法の基本的な力学特性を把握するため、実規模の試験体を用いた水平載荷試験を実施し、その有効性を報告する。本技術は、開放的な建築の特性を保ちつつ耐震性能を高め、文化財建造物の安全性向上と文化的価値の継承に寄与する新たな選択肢とし

脚注) $\phi 7$ ステルスブレースは神鋼鋼線工業(株)の登録商標である。

*¹ 神鋼鋼線工業(株) 生産本部 加工品技術部

て期待される。

1. 提案する補強方法

鋼線および接合金物（端末金具と定着金具）により構成されている。補強方法の概要を図1に示す。定着金具と土台の木材とは、コーチスクリュー・ボルトを用いて固定する。端末金具の挙動を図2に示す。圧縮荷重時には、鋼線端部が抜け出し荷重を負担しない構造となり、鋼線の直線性を保持することで面外へのはらみ出しを抑制する。障子や躯体（くたい）の損傷回避が期待され、地震時などの引張力に対して効果的に働く構造となる。また、高角度での圧縮時には、端末金具が鋼線とともに飛び出す場合があるため、端末金具にテーパ加工を施し、復元性を確保している。

本稿で提案する補強方法は、構造形式に応じて3種類に分類される。それぞれの定着金具の構造を図3²⁾、図4²⁾、図5²⁾に示す。

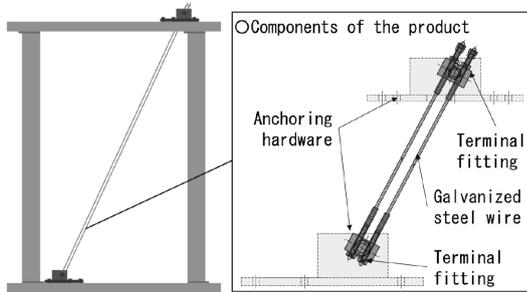


図1 補強方法概要図
Fig.1 Overview of reinforcement methods

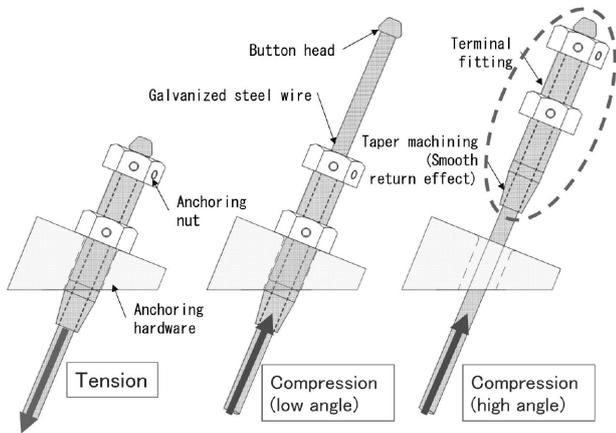
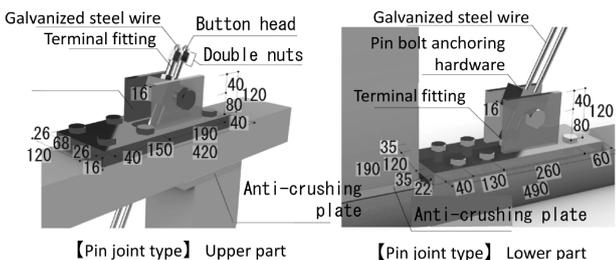


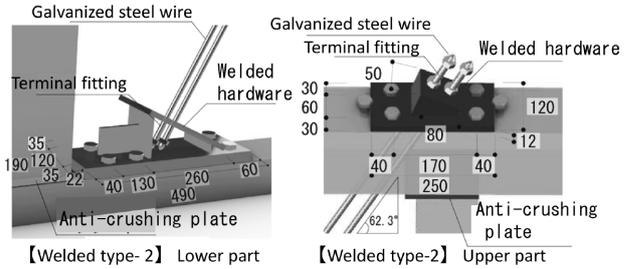
図2 引張および圧縮荷重下における端末金具の挙動
Fig.2 Behavior of terminal hardware under tensile and compressive conditions



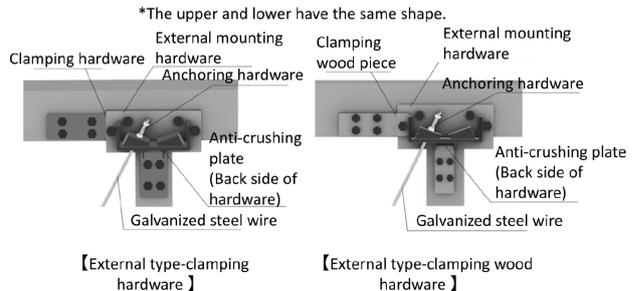
【Pin joint type】 Upper part 【Pin joint type】 Lower part
図3 定着金具形状【ピン接合型】
Fig.3 Shapes of Anchorage Fittings【pin joint type】

1.1 亜鉛めっき鋼線の特徴

補強材として用いる亜鉛めっき鋼線は、通常、複数本を束ねて斜張橋などの橋梁ケーブルに使用されている実績のある製品である。今回はこれを1本単位で用いる構法とし、その優れた機械的性能を活かすものである。鋼線の応力-ひずみ曲線を図6に、機械的特性を表1に示す。降伏荷重はSS400の約5倍、引張強さはSS400の約4倍を示し、破断伸びは約4%であり、木材の変形にも追従可能である。



【Welded type-2】 Lower part 【Welded type-2】 Upper part
図4 定着金具形状【溶接型-2本】
Fig.4 Shapes of anchorage fittings【welded type - 2 wires】



*The upper and lower have the same shape.
【External type-clamping hardware】 【External type-clamping wood hardware】
図5 定着金具形状【面外型-金具押え】、【面外型-木片押え】
Fig.5 Shapes of anchorage fittings【External type - clamping hardware】、【External type - clamping wood hardware】

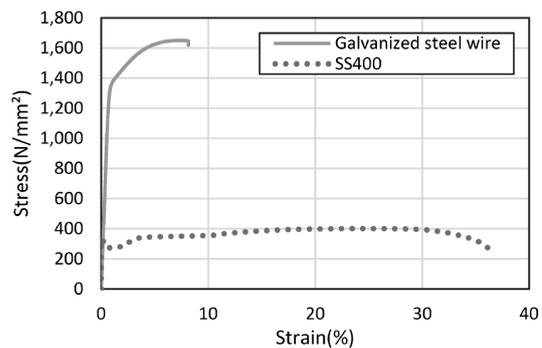


図6 応力-ひずみ曲線
Fig.6 Stress - strain curve

表1 亜鉛めっき鋼線の機械的特性
Table 1 Mechanical properties of galvanized steel wire

Property	Value	
Nominal cross-sectional area (mm ²)	38.48	
Unit mass (kg/km)	301	
Tensile strength	Tensile load (kN)	(60.3)
	Tensile stress (N/mm ²)	1,570
Yield strength	Yield load (kN)	(44.5)
	Yield stress (N/mm ²)	1,160
Elongation at break	Elongation (%)	4.0
	Gauge length (mm)	250
Elastic modulus (N/mm ²)	(196,000)	

また、鋼線端部の定着方法には「ボタンヘッド加工(図7)」を採用している。これは冷間加工により突起(ボタンヘッド)を形成し、その部分で支圧定着するものである。この方式により、端末金具との圧着が不要となり、引張荷重時のみ機能する合理的な定着構造となる。

1.2 ピンボルト接合を用いた補強方法

2本の鋼線および定着金具により構成される。2本の鋼線は上方で横架材を貫通し、ピン機構を有する定着金具に接合することで、変形時も軸方向力のみを負担する。本補強方法を【ピン接合型】と称する。

1.3 溶接金具を用いた補強方法

定着金具は、鋼線の初期角度(本稿では 62.3°)に合わせて傾斜した金具を、溶接により一体化し、横架材との接合は【ピン接合型】と同様とした。【ピン接合型】と比較して、金具サイズと重量が約60%程度に抑えられる。

鋼線は上方で横架材を貫通し、金具に固定されている。本補強方法を【溶接型】と称する。

1.4 面外取付金具を用いた補強方法

本方法は、既存部材への加工を最小限とし、簡易な施工性能を追求するため、横架材に鋼線を貫通させず、躯体の面外に取り付けることのできる形状とした。1本の鋼線および面外定着金具を用いて構成され、横架材および土台の側面に金具が取り付けられている。鋼材が横架材を貫通しないため、既存部材の加工は最小限に抑えられる特徴を有する。また、金具または木片を定着金具に添えることで、せん断力に抵抗する機構とした。本補強方法をそれぞれ【面外型-金具押え】、【面外型-木片押え】と称する。

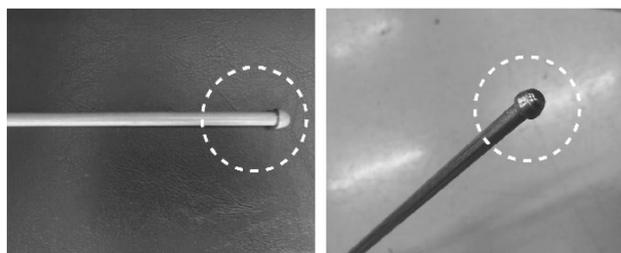


図7 ボタンヘッド
Fig.7 Button head

2. 水平載荷試験

2.1 試験方法

本稿では、提案する補強手法の構造的挙動を確認する目的で、木造軸組架構を対象とした水平載荷試験を実施した。試験時の補強方法概要図を図8²⁾、試験体の高さおよび幅を表2²⁾、材料寸法を表3²⁾に示す。鋼線の本数は、構造安定性や応力分散の観点、本数による挙動の違いを把握する目的から、補強形式ごとに選定した。【ピン接合型】では安定性確保のため2本構成とし、【溶接型】では鋼線本数による違いを検証するため、1本および2本で試験を実施した。【面外型-金具押え】および【面外型-木片押え】では、構造保持の限界を考慮し、1本構成での試験に留めた。

試験体は、ピン接合型が3体、その他はそれぞれ1体ずつ製作した。試験は『木造軸組工法住宅の許容応力度設計(2017年度版)』に準拠し、タイロッド方式による荷重の加え方を採用した。

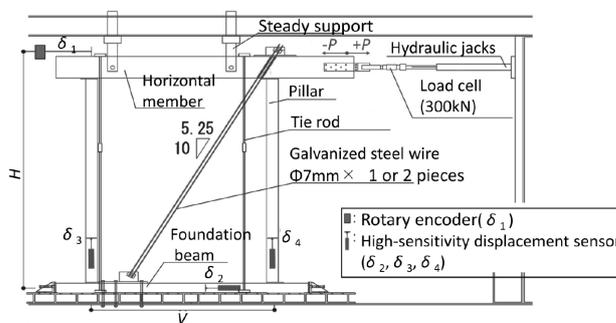


図8 補強方法概要図

Fig.8 Overview of reinforcement methods

表2 試験体寸法一覧

Table 2 Dimensions of test specimens

	H (mm)	V (mm)
【Pin joint type】	2,760	1,820
【Welded type-1】	2,730	1,820
【Welded type-2】	2,760	1,820
【External type-clamping hardware, clamping wood hardware】	2,730	1,177

表3 材料寸法

Table 3 Material dimension

	【Pin joint type】	【Welded type-1】 / 【Welded type-2】	【External type-clamping hardware, clamping wood hardware】
Foundation beam (Douglas fir/E110)	120 × 120 × 2,180		120 × 120 × 1,897
Horizontal member (Douglas fir/E110)	210 × 270 × 3,000	210 × 210 × 3,000 210 × 270 × 3,000	210 × 210 × 2,357
Right pillar (Cedar wood/E70)	120 × 120 × 2,561		120 × 120 × 2,685
Left pillar (Cedar wood/E70)	120 × 120 × 2,541		
Galvanized steel wire	φ 7-3,280 × 2	φ 7-3,126 × 1 φ 7-3,207 × 2	φ 7-2,926 × 1

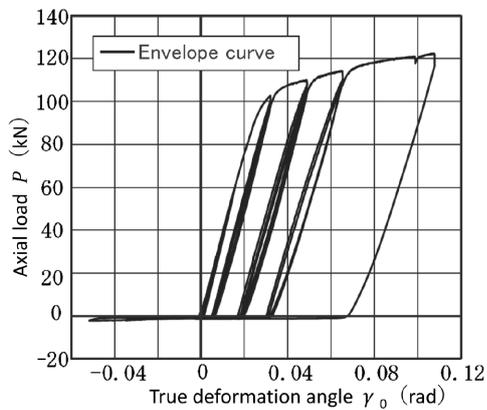


図9 ピン接合型 履歴性状

Fig.9 Pin joint type hysteresis characteristics

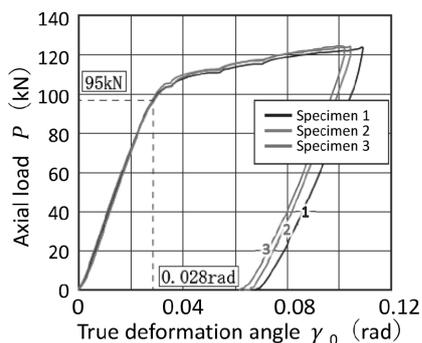


図10 ピン接合型 包絡線

Fig.10 Pin joint type envelope curve

荷重は、変形角 γ を1/450から1/15までの8段階で鋼線に引張力が発生する方向を「正方向」と定義し正負交番荷重を各ステップで3回ずつ繰り返して行った。これに続き、1/10 radに至るまで、正方向への単調荷重を実施した。

また、鋼線を2本使用する試験体については、横架材の割裂を防ぐ目的で梁成（はりせい）を210 mmから270 mmに増加させた。

2.2 試験結果および考察

【ピン接合型】の履歴性状を図9²⁾、【ピン接合型】、【溶接型】、【面外型】の包絡線を図10²⁾、図11²⁾、図12²⁾に示す。各補強方法において、それぞれの試験結果を比較・整理した結果、以下の共通した挙動および特性が確認された。

いずれの補強方法においても、荷重初期には線形的な荷重-変形関係を示し、鋼線の降伏荷重に達するまで明瞭な剛性を有することが確認された。具体的には、【ピン接合型】では約95 kN（2本）、【溶接型】では約45 kN（1本）、約98 kN（2本）となった。【面外型】では約45 kN（1本）で降伏が確認されており、降伏荷重まではほぼ直線的に荷重が増加していることが明らかとなった。

つぎに、鋼線の降伏後には各試験体ともに剛性の低下が見られ、塑性挙動への移行が生じていた。しかし、いずれの場合においても急激な耐力の低下や、局所的な破壊に伴う構造性能の著しい損失は認められなかった。このことから、各補強方法は降伏以降も一定の荷重を負担

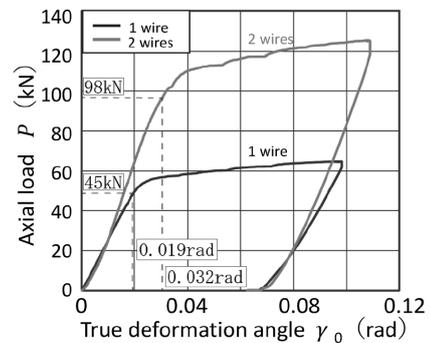


図11 溶接型（1，2本）包絡線

Fig.11 Welded type (1, 2 Wires) envelope curve

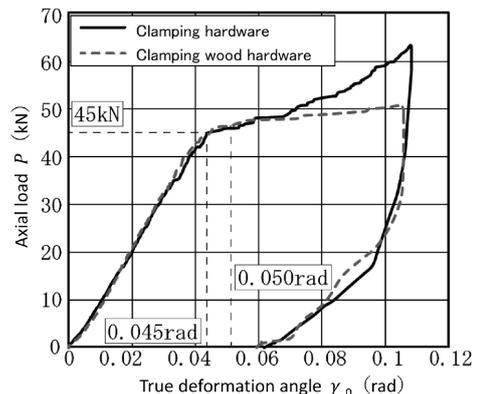


図12 面外型（金具押え，木片押え）包絡線

Fig.12 External type (clamping hardware, clamping wood hardware) envelope curve

し続ける能力を有しており、延性に富んだ靱性能（変形性能）が確保されていることが示された。

さらに、最大荷重に至る過程において、鋼線の規格破断荷重付近に達しても、端末金具や定着金具、木部（柱梁材）において著しい損傷や破壊は確認されず、十分な構造安全性を保持していた。また、圧縮側荷重時における挙動として、各補強方式とも定着部で鋼線やボルトが接合部から抜け出す傾向が見られた。この現象によって鋼線が荷重を負担しなくなることが明瞭に把握されており、補強部材の作用メカニズムに関する知見が得られた。

以上のことから、3種類の補強方法はいずれも、荷重初期の明瞭な剛性、鋼線の明確な降伏挙動、および降伏後の高い靱性能を有していることが判明した。

3. 各補強方法の特性値の算出と評価

3.1 特性値の算出方法および概要

水平荷重試験の結果から作成したバイリニア型のモデル化³⁾と置換結果を図13²⁾に示し、短期基準せん断耐力および各特性値の算出結果を表4に示す。

3.2 特性値に関する考察

図13より【ピン接合型】および【溶接型】と【面外型】の組み合わせでは、それぞれに類似した挙動が見られることが確認されたので、以下に示す。

終局変位はいずれの構造形式も1/20 (rad) から1/10 (rad) の範囲内であることが確認され、これは「極めてまれに発生する地震（大地震）」時の安全限界（層間変

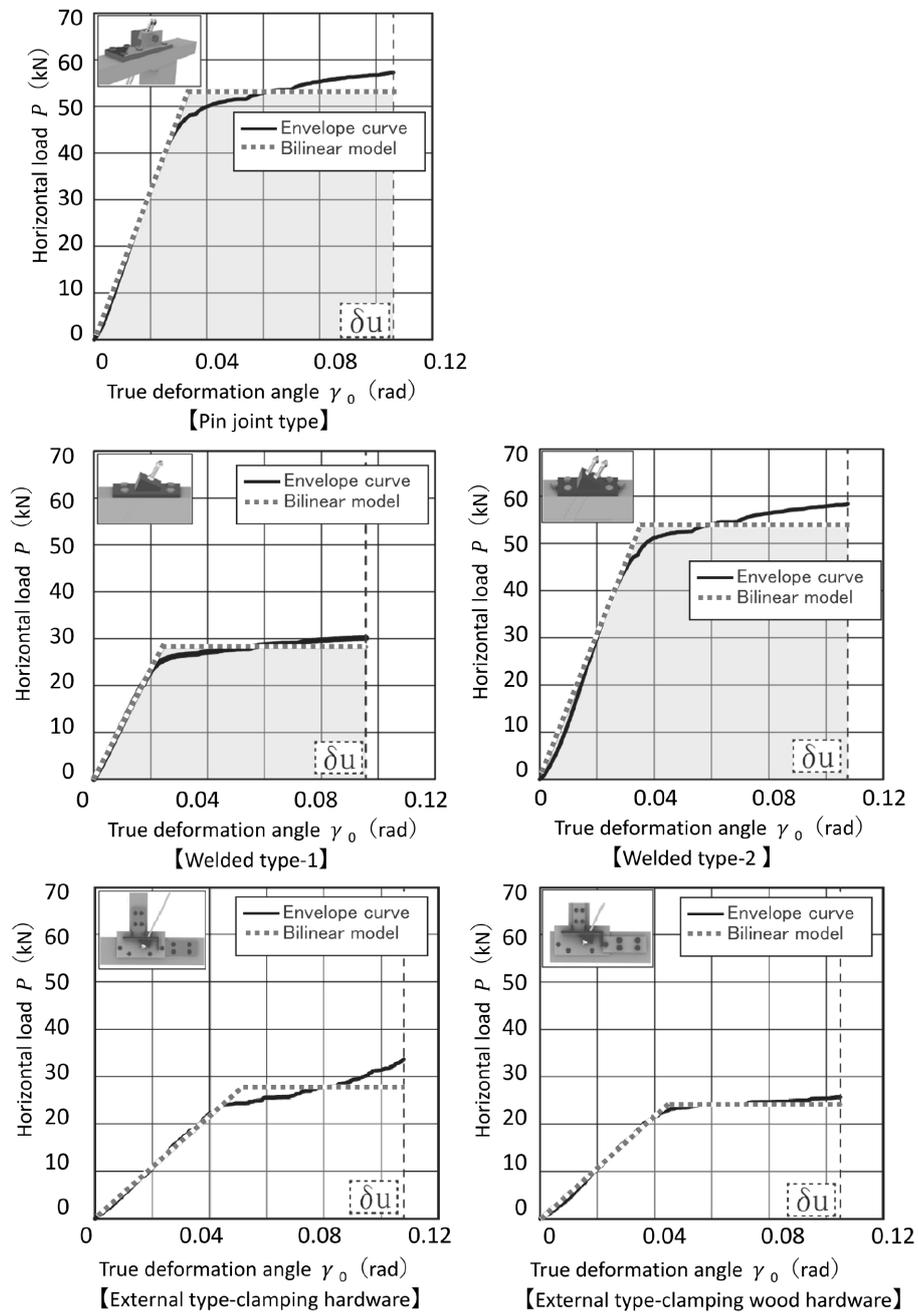


図13 バイリニア型のモデル化と置換結果 (P- δ 関係)
 Fig.13 Bilinear model and substitution results (P- δ relationship)

表4 特性値の算出結果
 Table 4 Calculation of characteristic values

	【Pin joint type】			【Welded type】		【External type】	
	First unit	Second unit	Third unit	1 wire	2 wires	Clamping hardware	Clamping wood hardware
Initial stiffness K (kN/mm)	0.547	0.549	0.539	0.415	0.529	0.190	0.190
Yield strength P_y (kN)	42.15	39.68	40.60	22.81	39.43	23.08	19.17
Yield displacement δ_y (rad)	0.027	0.025	0.026	0.020	0.026	0.043	0.036
Ultimate strength P_u (kN)	53.20	53.58	53.54	28.23	53.97	27.73	24.19
Ultimate displacement δ_u (rad)	0.106	0.098	0.104	0.096	0.108	0.108	0.105
Plasticity ratio μ	3.163	2.914	3.040	3.924	3.050	2.099	2.340
Structural characteristic coefficient D_s	0.433	0.455	0.444	0.382	0.443	0.559	0.521
Short-term standard shear strength P_0 (kN)	8.613			7.699	6.697	3.138	2.723

* The gray shading indicates the test of a single steel wire.

形角 $1/30\sim 1/20$ rad)を満たしていることを意味する。したがって、ある程度の損傷を許容したうえで、補修による再利用が可能であると考えられる。

とくに【面外型】はほかの形式と比較して、初期剛性および短期基準せん断耐力が相対的に低い傾向を示した。この原因としては、金具の取り付け部や押え材付近における初期変形角からの局所的なめり込み、さらに上部横架材(上台梁)のねじれおよび偏心による影響が考えられる。しかしながら、 $1/10$ radの変形時点においても明確な耐力低下は確認されず、変形への追従性が高く、靱性(変形性能)のある構造特性を有している。このことから、既存の木造躯体における局所的な破損の抑制を目的とした補強手法として有効性が認められる。

4. 適用事例(好文亭)

水戸偕楽園内に建つ好文亭⁴⁾は江戸時代後期に徳川斉昭によって設計された歴史的建築物である。図14に外観写真を示す。千波湖や筑波山に近接しており、三階からは風光明媚な景観が望める、開放的な構造と繊細な意匠が特徴である。本建築物は、開口部が多いため壁量が少なく、大地震時に倒壊の恐れがあると判定され、 $\phi 7$ ステルスブレース[®]での耐震補強が実施された。本物件での、面格子で耐震補強した場合のイメージ図と、 $\phi 7$ ステルスブレース[®]の設置写真を図15に示す。 $\phi 7$ ステルスブレース[®]の使用により、建設当時の景観を保ちながら、耐震補強がなされていることがわかる。2021年度に耐震補強が完了し、利用者の安全が確保されたことにより、現在は通年型での「呈茶サービス」が提供可能となっている。現在、同様の角度にて設計織込がなされている物件が2件あり、文化財建築への利用が広がりつつある。



図14 好文亭の外観
Fig.14 Exterior of the Kobuntei

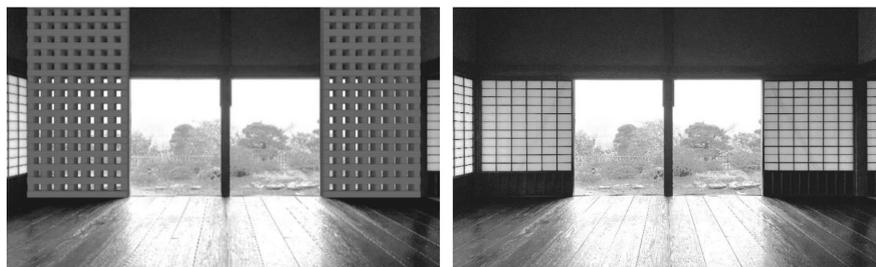


図15 好文亭における補強方法による景観
・左：面格子(イメージ図) ・右： $\phi 7$ ステルスブレース[®](設置写真)
Fig.15 Landscape of reinforcement methods at Kobuntei
left: Lattice window (image) right: $\phi 7$ stealth brace[®] (installation photo)

5. 結論

本稿では、3種類の補強方法について水平荷重試験を実施し、いずれも初期剛性、降伏挙動、靱性能に優れた構造特性を有することを確認した。これらの結果は、文化財建築における耐震補強の新たな選択肢として有効であることを示している。

一般的に行われている耐震補強の手法としては、開口部の一部を犠牲にして耐力壁を設置する方法や、採光や通風を確保しつつ補強できる面格子状の壁や鉄骨柱を用いる方法などが知られている。しかし、これらの手法では、建築の意匠に何らかの影響をおよぼすことは避けがたい。いっぽうで、障子は全面的な開口を持ちながらも、開けた際には2枚が重なって片側に寄せられる。この特性を活かし、2枚の障子の隙間に補強材を配置することで、従来の景観を損なうことなく耐震性能の向上を図ることも可能となる。実際に好文亭では、 $\phi 7$ ステルスブレース[®]を用いて、建設当時の景観を保ちながらの耐震補強がなされた。

むすび=以上の結果を踏まえ、今後の展開として以下の取り組みを予定している。まず、梁スパンの変更により生じる各種角度に対して追加確認試験を実施し、製品の対応可能範囲の拡大を図る。併せて、得られた結果をもとに標準化を進めるとともに、製品特性を分かりやすく整理したリーフレットを作成する。また、設計事務所や文化財保護機関などへの情報提供を行うことで、 $\phi 7$ ステルスブレース[®]の認知度向上と採用促進を目指す。

参考文献

- 1) (株)文化財保存計画協会. 史跡及び名勝「旧有備館および庭園」災害復旧事業(保存修理工事)報告書. 2016, 大崎市教育委員会, 169p.
- 2) 岩田あすかほか. 2022年度第93回日本建築学会関東支部研究報告集. 2023-03, p.361-364.
- 3) 木造軸組工法住宅の許容応力度設計改訂委員会. 木造軸組工法住宅の許容応力度設計. 第1版, 公財 日本住宅・木材技術センター, 2017, p.295-304.
- 4) 茨城県土木部. なるほど公共事業(令和4年度版). 2023-03. <https://www.pref.ibaraki.jp/doboku/kanri/kikaku/naruhodo/2022.html>, (参照2025-05-16)