紫外線硬化型 FRP による既存木造住宅の筋かい軸組要素の耐震補強 既存木造住宅の耐震補強工法の開発（その1）

SEISMIC STRENGTHENING FOR BRACED FRAME STRUCTURE OF EXISTING WOODEN HOUSES USING ULTRAVIOLETRAYED-HARDENING FRP Development of seismic strengthening method for existing wooden houses (Part 1)

松本 慎也*, 大久保 孝昭**, 渡辺 康明***

Shinya MATSUMOTO, Takaaki OHKUBO and Yasuaki WATANABE

The purpose of this study is to develop the new seismic strengthening method of existing wooden houses. In this study, the fiber reinforced plastics (FRP) are used as the reinforcement material. This FRP hardens by irradiating the ultraviolet ray. In this study, we develop a good workability seismic strengthening method for existing wooden houses by using this FRP sheet. As a result, we were able to develop the new reinforcement design for the braced frame structural wall of the element ultimate strength (the wall ultimate strength factor) as over 4.0(kN/m) which was target value in this study.

Keywords: *Wooden house, Seismic strengthening, Ultravioletrayed-hardening, FRP, Non-reinforced concrete*

木造住宅, 耐震補強, 紫外線硬化, FRP, 無筋コンクリート

1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震は、断層による直下型地震であり、マグニチュード7.3、最大震度は7という非常に規模の大きな地震であった。建築物の倒壊も多く、その被害の多くは1981年の建築基準法改正以前の建造物が占め、中でも在来軸組工法を用いた木造住宅の被害は特に深刻だった¹⁾。また、2007年能登半島地震、2007年新潟県中越沖地震などの地震でも、木造住宅に大きな被害が発生し、我が国では既存木造住宅の耐震安全性を確保するための耐震補強技術を確認することが重要な課題であると言える。現在、国や地方自治体によって、耐震改修に対する助成制度など、住宅の耐震補強の促進に関する様々な取り組みが進められているものの、今なお補強工法のコスト面や施工性の問題等により戸建て木造住宅の耐震改修には多くの課題が存在する。

本研究は、戸建て木造住宅に対する施工性を重視した耐震補強技術を開発することを目的として実施するものである。特に木造住宅では、既存の基礎が無筋である場合や劣化している場合があり、耐力が高すぎないことが求められ、既存の基礎の状況に応じて、耐力を調節する必要がある。本研究では、補強材として、紫外線の照射を受けることで硬化が始まる繊維補強樹脂（Fiber Reinforced Plastics：以後FRPと記す）に着目し、この紫外線硬化型FRPシートを用いて施工性にすぐれた既存木造住宅の耐震補強工法の開発を目指す。既往の研究^{5)~9)}では、アラミド繊維やポリエステル繊維、ガラス繊維を用いたFRPに関する研究が行われており、特にアラミ

ド繊維を用いた補強工法は木造住宅の補強工法として実用化されている⁵⁾。これに対し本研究で用いるFRPシートは、ガラス繊維またはビニロン繊維の補強材に、エポキシアクリレート樹脂と紫外線硬化開始剤を含浸させた紫外線硬化型FRPシートである。このFRPシートは、紫外線（波長315～400nm）の照射を受けることで重合反応が開始して硬化するFRPシートである。このFRPシートは、施工現場に紫外線を遮蔽した状態で搬入し、所定の部位に貼り付け作業を行った後に、紫外線蛍光灯（ブラックライト）などを用いて紫外線を強制照射することで、短期間で施工を完了することのできる特徴を有した補強材料である。本FRPシートを用いた補強工法は、硬化前の柔らかいシート状態で施工を行うため、補強部位の形状や寸法に応じた加工が容易に行える点に新規性がある。また、通常の常温硬化型FRPシートによる補強では、接着剤でシートを完全に補強対象に貼り付けることで補強効果が発揮するのに対し、紫外線硬化型FRPシートは、紫外線によって、補強繊維のまわりにある樹脂そのものが硬化をするので、シート全体を完全に補強対象物に貼り付けず、一部分が部材からはみ出して空中に浮いた状態でも硬化可能である。したがって木造仕口のような、細い部位に張り付ける際でも、FRPシートを部材からはみ出して施工することが可能であり、形状の複雑な部位への施工の自由度が高いという特徴がある。本研究では、伸び能力の必要な個所にはビニロン繊維、強度が必要な個所にはガラス繊維を使うなど、2種類の補強繊維を適材適所に使い分けることを検討して、大変形時（層間変形角1/15rad程度）

* 広島大学大学院工学研究院 助教・博士(工学)

** 広島大学大学院工学研究院 教授・工博

*** 旭化成ジオテック㈱

Assistant Prof., Faculty of Engineering, Hiroshima University, Dr. Eng.

Prof., Faculty of Engineering, Hiroshima University, Dr. Eng.

Asahi-Kasei Geotech

においてはシートが破断、剥離を生じずに耐力を維持することを目
標性能とし、要素基準耐力（壁強さ倍率）は 4.0(kN/m)程度を目安と
した補強仕様を検討した。

一般的な FRP 材料は、速度依存性を有することが指摘されており、
動的载荷による検証実験が必要であるが、本研究では、まずは木造
住宅の耐震補強材料として紫外線硬化型 FRP を使用するために必
要となる基礎的な特性を把握することに主眼を置き、各種基礎的試
験は静的载荷により実施した。速度依存性については、今後の検討
課題である。

2. FRP 素材引張強度評価試験

2.1 試験方法概要

FRP シートの基礎的特性値を把握するために、FRP シートの素材引張
試験を実施した。試験に用いた FRP シートの繊維補強材の種類は、ガラ
ス繊維とビニロン繊維の 2 種類の補強材とした。試験片の種類を表 1 に
示す。GC は Glass Cross(ガラスクロス)、GUD は Glass Uni-Direction(ガ
ラスユニダイレクション)、VC は Vinylon Cross(ビニロンクロス)の略である。
また、各記号の最後の数字は単位面積あたりの繊維目付量の数値を表
している。補強繊維の配置は表 2 に示すような、直交 2 方向配置(クロス)
と、1 方向配置(ユニダイレクション)の 2 通りを検討対象とした。また、ビ
ニロンクロスに関しては、FRP シート 1 層の試験片(記号 VC8)と 2 層の試験
片(記号 VC8W)の 2 種類を検討した。

表 1 素材の引張試験体

試験体 記号	補強繊維の 種類	繊維の配置	繊維目付量 (g/m ²)	層数
GC6	G:ガラス繊維	C:クロス (直交 2 方向)	600	1
GUD12	G:ガラス繊維	UD:ユニ・ダイレクション (1 方向)	1278	1
VC8	V:ビニロン繊維	C:クロス (直交 2 方向)	840	1
VC8W	V:ビニロン繊維	C:クロス (直交 2 方向)	1680	2

表 2 繊維配置方向

	クロス C (直交2方向)	ユニ・ダイレクション UD (1方向)
繊維の 配置		
	◁ : 繊維が抵抗する方向	

素材引張試験における試験体の形状は、JIS K 7054-1995 に基づき、
図 1 に示すような B 形試験片（異方性材料）を作製して試験を行っ
た。加力方法は JIS 規格に準じ、载荷速度は、1±0.5mm/min とし、
試験体は、各種類 3 体ずつ作製した。

図 1 FRP 素材引張試験体の形状

表 3 に計測した試験体寸法のデータを示す。幅と厚さをそれぞれ
試験区間内の 3 箇所計測し、応力度を求めるために平均厚さ、平
均断面積を算定した。表中の計測点 1,3 は両標点の 5mm 内側の位
置、計測点 2 は標点中央である。後述の応力度の算出には、これら
の実測値における平均値を用いることとした。

表 3 試験体寸法

試験体名	測定点1 幅(mm)	測定点2 幅(mm)	測定点3 幅(mm)	測定点1 厚さ(mm)	測定点2 厚さ(mm)	測定点3 厚さ(mm)	平均幅 (mm)	平均厚さ (mm)	平均断面積 (mm ²)	最小断面積 (mm ²)
GC6-1	24.6	24.8	25.0	1.2	0.7	1.4	24.8	1.1	27.0	18.4
GC6-2	26.1	27.0	26.4	1.1	1.3	1.8	26.5	1.4	36.2	28.4
GC6-3	25.6	25.4	25.6	1.3	0.8	1.3	25.5	1.1	29.2	20.8
VC8-1	25.2	25.5	26.2	2.6	3.0	2.9	25.6	2.8	71.8	64.4
VC8-2	24.6	25.1	25.7	2.5	2.7	2.9	25.1	2.7	67.5	61.6
VC8-3	24.5	24.5	24.4	2.5	2.3	2.7	24.5	2.5	61.6	56.0
GUD12-1	25.6	25.8	26.3	2.4	2.1	2.4	25.9	2.3	59.0	53.2
GUD12-2	26.4	26.1	26.4	2.6	2.2	2.4	26.3	2.4	62.4	56.9
GUD12-3	25.9	25.7	25.6	2.7	2.2	2.4	25.7	2.4	62.6	56.9
VC8W-1	26.2	25.5	25.3	5.0	5.3	5.4	25.6	5.2	134.2	131.3
VC8W-2	26.0	26.1	26.3	5.2	5.1	5.1	26.1	5.2	134.8	133.7
VC8W-3	26.2	25.9	26.7	4.7	4.1	4.9	26.3	4.6	119.6	105.2

2.2 素材引張試験結果

各試験体の引張試験によって得られた荷重－変位関係を図 2 に
示す。同図は 3 体の試験片の結果を重ねて示している。これらの図
より、GUD12 試験体は VC8 試験体に比べて強度が大きく、伸び能
力は VC8 試験体の方が大きいことが確認された。なお、補強繊維が
ガラス繊維の試験体（GC6、GUD12）では最終的にシートが破断す
るまで、荷重に対しほぼ線形に変形が生じる特性であることが確認
された。これに対し、補強繊維がビニロン繊維の場合には、変位が
2mm 付近（ひずみ 10000μ 付近）で剛性が 1/3 倍程度減少する特性
があることが確認された。これはビニロン補強繊維がその周りを取り
まく樹脂（マトリックス）よりも柔らかいため生じているものと推測
されるが、設計ではこの 2 段階の剛性を適切に考慮する必要がある
と考えられる。特に耐震補強材としては大変形時の第 2 剛性が
重要であると言える。

各試験体の破断状況を写真 1～写真 4 に示す。GC6 試験体は、破
断位置周辺の樹脂が白濁し、繊維破断位置は一か所に集中している
のに対し、GUD12 試験体では加力方向の繊維量が多く、支配的であ
るため、破壊時には縦に裂けるような破壊状況となることが確認さ
れた。また、VC8 試験体、VC8W 試験体は、FRP シート全体が白濁
しながら、大きな伸び変形をした後破断に至ることが確認された。

図 2 FRP 素材試験体の荷重－変位関係

写真 1 ガラスクロス（GC6）試験体の破断性状

写真 2 ガラスユニダイレクション（GUD12）試験体の破断性状

写真 3 ビニロンクロス（VC8）試験体の破断性状

写真 4 ビニロンクロス 2 層（VC8W）試験体の破断性状

表 4 に FRP 素材引張実験によって得られた各 FRP シートの最大荷重, 最大荷重時変位 (試験機増分ストローク変位), 最大荷重時ひずみ (試験機増分ストローク変位を試験体基準長 120 mm で除した値により算出), 単位幅あたりの耐力の各 3 試験体の平均値を示す。実験から得られた最大荷重 (3 試験体の平均値) は, GC6 試験体では 4.54 kN, GUD12 試験体では 25.8 kN, VC8 試験体は 4.76 kN, VC8W 試験体では 8.62kN であった。GUD12 試験体の繊維目付量は 1278g/m² であり GC6 試験体の繊維目付量は 600 g/m² であるが, GC6 試験体は補強繊維配置が 2 方向配置 (クロス) であるので, 補強繊維の 1/2 は加力直交方向に向いている。そのため, 加力に対して抵抗する補強繊維量は実質的に半分の値となり, GUD12 と GC6 の加力方向に対する補強繊維量は 4.26 倍の差となることになる。しかしながら実験による最大荷重を比べると, GUD12 は GC6 の 5.68 倍の値となっており, 単純計算による繊維量の比 (4.26 倍) よりも, 実験による最大荷重は大きな値を示した。これは, GUD12 では繊維が 1 方向に整然と配置されているため, 直交する繊維の影響が小さく, 各補強繊維が荷重に対し有効に作用するためであると考察される。

表 4 FRP シート素材引張試験結果 (3 試験体の平均値)

試験体 記号	最大荷重 (kN)	最大荷重時 変位(mm)	最大荷重時 ひずみ(%) ^(注1)	単位幅あたりの 耐力(N/mm)
GC6	4.54	3.89	3.24	178
GUD12	25.8	7.61	6.34	994
VC8	4.76	24.3	20.2	190
VC8W	8.62	26.2	21.8	331

(注1)試験機増分ストローク変位を試験体基準長 120mm で除した値により算出

実験から得られた FRP シート (1 層) に対する単位幅当たりの破断耐力は, GC6 試験体では 178 N/mm, GUD12 試験体では 994 N/mm, VC8 試験体は 190 N/mm であった。また VC8W 試験体は VC8 シートを 2 層に重ね合わせた試験体であり, 単位幅あたりの耐力は 331 N/mm となり, VC8 試験体の 1.74 倍の値であった。すなわち, VC8 を 2 層重ね合わせた試験体の耐力は 2 倍よりも 1 割弱程度小さな値となることが示された。また, 最大荷重時ひずみは, それぞれ, GC6 試験体は 3.24%, GUD12 試験体は 6.34%, VC8 試験体は 20.2%, VC8W 試験体は 21.8% であった。以上の結果より, 本実験では, GUD12 試験体は VC8 試験体の約 5.2 倍の破断耐力 (最大荷重) を有し, VC8 試験体は GUD12 試験体の約 3.2 倍の伸び能力 (最大荷重時ひずみ) があることが確認された。

表 5 FRP シート素材引張試験結果 (3 試験体の平均値)

試験体 記号	FRP シート全断面に対して		補強繊維断面に対して	
	最大 応力 (N/mm ²)	FRP シート ヤング係数 (N/mm ²)	最大補強 繊維応力 (N/mm ²)	補強繊維 ヤング係数 (N/mm ²)
GC6	150	9510	1510	95700
GUD12	421	17200	1980	81100
VC8	71.1	1430 462 ※	588	11800 3820 ※
VC8W	66.5	1180 445 ※	513	9170 3420 ※

※左: ひずみ 0~10% 域 | 右: 20~30% 域

表 5 に各試験体の最大応力 (FRP シート全断面積に対して算出した値), FRP シートヤング係数 (FRP シート全断面積に対して算出した値), 最大補強繊維応力 (補強繊維の断面積に対して算出した値), 補強繊維ヤング係数 (補強繊維断面積に対して算出した値) を示す。前述のように, ビニロン補強繊維試験体では破断に至るまでに大きく 2 段階の剛性特性を示すことから, ヤング係数に関しては, ひずみ 0~10% 域と 20~30% 域それぞれについて算出値を示す。これらの計算には表 3 に示した平均厚さ, 平均断面積を用いた。

3. 対木材面外接着力評価試験 (直接面外引張接着試験)

3.1 試験方法概要

木材の表面仕上げの仕様を決定するために, 直接面外引張試験を行った。図 3 に試験体および試験概要図を示す。試験は建研式引張試験機を用いて行った。試験体は, 100×100×40mm のスギ材を母材 (表面含水率: 平均 12.3%, 最小 10.4%, 最大 15.2%) とし, その母材の板目側の中央に 40×40mm の FRP シートを施工する。図 3 右図は試験体の断面図及び加力方向を示しており, 母材に施工した FRP シートに引張試験用金属治具を接着剤によって取り付け, 図に示す矢印方向 (面外方向) に加力し, FRP シートに面外引張力を与え, その値を計測した。

図 3 試験体および試験概要図

本実験の実験因子及び水準の一覧を表 6 に示す。これらの実験因子と水準に基づいて、A～F の試験体を作製した。表 7 に試験体一覧を示す。なお、それぞれの仕様について、試験体を 3 体ずつ作製した。

因子	検討項目	水準	概要
表面仕上げ	表面の平滑度の検討	かなな仕上げ	木材を製材直後の状態で施工を行うもの。
		グラインダ仕上げ	表面をグラインダを使用し、目荒らしを行った上で施工するもの。 なお、グラインダの目は80番のものを使用し、研磨時間は1分前後とした。
プライマ	使用するプライマの影響の検討	2液型	主剤と硬化促進剤を使用した2液混合のベースプライマを使用するもの。
		1液型	1液のみで使用できるベースプライマを使用するもの。なお、このプライマは湿潤面対応型である。
シートの種類	使用するシートの検討	GC (ガラスクロス)	木材にガラスクロスを接着した場合の接着力の検討。
		VC (ビニロクロス)	木材にビニロクロスを接着した場合の接着力の検討。
含水	雨天時の施工の検討	標準	木材の表面含水率が約15%前後の状態をプライマで施工する。
		湿潤	木材の表面が雨水等によって濡れている状態を想定したもの。母材に濡れたウエスを掛け、5分間放置した後に、表面の余剰水分を拭き取り、その後にプライマを塗布する。

試験体名	仕様							
	表面仕上げ		プライマ		シート種類		含水率	
	グラインダ仕上げ	かなな仕上げ	1液型	2液型	GC6	VC8	標準	湿润
A(標準)	○		○		○		○	
B(カンナ)		○	○		○		○	
C(2液)	○			○	○		○	
D(VC)	○		○			○	○	
E(湿润)	○		○		○			○
F (湿润+2液)	○			○	○			○

図 4 に各試験体の試験結果の比較を示す。以下に、面外接着力評価試験から得られた知見を示す。

- 以上の結果より、表面仕上げはグラインダ仕上げ（目荒らし）、プライマは1液型（ウレタン樹脂）を実験における標準仕様とした。

前節に示した直接面外引張接着試験により「表面仕上げ」、「プライマ種別」、「木材の表面含水状態」の影響を調査し、その基本特性を把握した。本節では FRP シートのせん断接着特性をシート種別ごとの相対的な評価を行う目的で、JCI 式 2 面せん断試験体²⁾を参考に、図 5 に示すような試験体を作製した。この試験体は 100×100×450mm のスギ材（表面含水率：平均 11.8%，最小 8.9%，最大 13.5%）を木口面で突き合わせ、その両側 2 面に 50×750mm の FRP シートを施工している。実験に用いる FRP シートは、GC6、VC8、GUD12、VC8W（VC8 の 2 層貼り）の 4 種類で、このシートの種類を実験因子とし、それぞれ 3 体ずつ試験体を作製した。また、試験区間以外での剥離を防止するため、補強用の FRP シートを非試験区間に施工した。試験体に加工した直径 ϕ 30mm の穴に治具を挿入し、図 5 に示す矢印方向に加力を行い、FRP シートと木材との接着界面にせん断力を作用させた。なお、計測項目は荷重、ストローク変位、各部のひずみであり、ひずみの計測位置は図 6 に示すように、試験シートの中央部・母材の境界上から 20mm 間隔で計 10 か所計測した。

母材の両面のうち片面（あるいは両面）の FRP シートが完全に剥離あるいは破断した時に計測した荷重とした。

(b) 最大付着応力 (τ_y)

FRP シートと木材間で面内方向に力がかかる場合、その付着力はせん断力に対して抵抗する。その面内方向に発生する最大せん断力を、最大付着応力とする。

図 7 ひずみ分布図 (例: GC6)

図 7 にひずみ分布の例を示す。図は、計測したひずみの値と、そのひずみ計測位置の母材境界からの距離（以降、材軸方向位置）との関係をプロットすることにより得られるグラフである。試験区間内では、FRP シートに作用している引張応力に応じて、ひずみが一定になる区間と、材軸方向にひずみが増加する増加区間が現れる。このひずみの増加区間が連続繊維シートからコンクリートへの付着応力伝達区間である。

ここで、最大付着応力 τ_y (N/mm²) は、連続繊維シートのひずみ分布図から得られるひずみ増加区間でのひずみ勾配: $\Delta\epsilon_F/S_g$ を用いて、次式で与えられる。

$$\tau_y = \frac{\Delta\epsilon_F E_F A_F}{S_g b} \quad (1)$$

ここに、

$\Delta\epsilon_F$: ひずみ増加区間での隣り合うゲージのひずみ値の差

E_F : 連続繊維補強材の弾性係数 (N/mm²)

(ガラス繊維 74000N/mm², ビニロン繊維 4500N/mm²)

A_F : 連続繊維補強材の断面積 (mm²)

S_g : ひずみゲージの貼付け間隔 (mm)

b : 連続繊維シートの幅 (mm)

(c) 有効付着長さ (l_y)

連続繊維シートの付着耐力は、貼付け面積（長さ）に依存することが、既往の研究からも分かっている。しかし、ある一定以上の長さになると、付着耐力が増加せず、一定の値に収束する傾向にある。すなわち、1 方向の力に対して抵抗できるシートの長さは、限られているといえる。そこで、この付着力が有効に働いている付着長さを有効付着長さ l_y (mm) とする。この l_y は、最大荷重 P_{max} と(1)式から得られる最大付着応力 τ_y を用いて、次式で与えられる。

$$l_y = \frac{P_{max}}{2\tau_y b} \quad (2)$$

(d) 界面剥離破壊エネルギー (G_F)

界面剥離破壊エネルギーは、界面剥離が生じるために必要な単位付着面積当たりのエネルギー量を指す。この数値は、母材と連続繊維シートの剥離現象を破壊力学的に取り扱ったパラメータであり、付着特性の定量的な評価には課題があるものの、シート種別に対する相対的な評価に用いることができる。界面剥離破壊エネルギー G_F は次式で与えられる。

$$G_F = \frac{P_{max}^2}{8b^2 E_F t} \quad (3)$$

ここに、 P_{max} : 最大荷重 (N)

E_F : 連続繊維補強材の弾性係数 (N/mm²)

t : 連続繊維の厚さ (mm) ($=nw/\rho$)

n : 連続繊維シートの積層数

w : 連続繊維シートの繊維目付量 (g/mm²)

ρ : 連続繊維補強材の密度 (g/mm³)

4.3 試験結果及び考察

図 8 に (a) 最大荷重、(b) 最大付着応力、(c) 有効付着長さ、(d) 界面剥離破壊エネルギーの試験結果の比較を示す。なお、グラフに示す試験結果の数値は、実験因子ごとにそれぞれ作製した 3 体の試験体の平均値である。

図 8 2 面せん断接着試験の結果比較 (3 体平均値)

表 8 2 面せん断接着試験結果一覧

試験体	P_{max} kN	P_s N/mm	G_F N/mm	τ_y N/mm ²	l_y mm
GC6-1	16.3	163	1.52	5.73	28.4
GC6-2	17.0	170	1.66	4.74	35.8
GC6-3	17.2	172	1.70	4.63	37.1
最小値	16.3	163	1.52	4.63	28.4
平均	16.8	168	1.62	5.03	33.8
最大値	17.2	172	1.70	5.73	37.1
標準偏差	0.490	4.90	0.094	0.606	4.730
変動係数	0.029	0.029	0.058	0.120	0.140
係数k	3.152	3.152	3.152	3.152	3.152
ばらつき係数	0.908	0.908	0.817	0.621	0.559
基準値	15.3	153	1.327	3.12	18.9
注) k=3.152(n=3)信頼水準75%の95%下側許容限界値					
試験体	P_{max} kN	P_s N/mm	G_F N/mm	τ_y N/mm ²	l_y mm
VC8-1	11.9	119	4.91	1.19	100.0
VC8-2	16.1	161	8.87	2.18	73.8
VC8-3	13.2	132	6.01	1.82	72.7
最小値	11.9	119	4.91	1.19	72.7
平均	13.7	137	6.59	1.73	82.2
最大値	16.1	161	8.87	2.18	100.0
標準偏差	2.105	21.05	2.044	0.497	15.495
変動係数	0.153	0.153	0.310	0.287	0.189
係数k	3.152	3.152	3.152	3.152	3.152
ばらつき係数	0.517	0.517	0.023	0.094	0.405
基準値	7.1	71	0.151	0.16	33.3
注) k=3.152(n=3)信頼水準75%の95%下側許容限界値					
試験体	P_{max} kN	P_s N/mm	G_F N/mm	τ_y N/mm ²	l_y mm
GUD12-1	29.0	290	1.14	2.29	126.7
GUD12-2	28.7	287	1.11	2.98	96.4
GUD12-3	32.2	322	1.39	3.72	86.4
最小値	28.7	287	1.11	2.29	86.4
平均	30.0	300	1.21	3.00	103.1
最大値	32.2	322	1.39	3.72	126.7
標準偏差	1.916	19.16	0.158	0.716	20.974
変動係数	0.064	0.064	0.130	0.239	0.203
係数k	3.152	3.152	3.152	3.152	3.152
ばらつき係数	0.798	0.798	0.591	0.247	0.339
基準値	23.9	239	0.717	0.74	37.0
注) k=3.152(n=3)信頼水準75%の95%下側許容限界値					
試験体	P_{max} kN	P_s N/mm	G_F N/mm	τ_y N/mm ²	l_y mm
VC8W-1	25.8	258	11.40	6.35	40.5
VC8W-2	26.6	266	12.19	4.70	56.6
VC8W-3	26.5	265	12.06	6.42	41.2
最小値	25.8	258	11.40	4.70	40.5
平均	26.3	263	11.88	5.83	46.1
最大値	26.6	266	12.19	6.42	56.6
標準偏差	0.471	4.71	0.424	0.973	9.090
変動係数	0.018	0.018	0.036	0.167	0.197
係数k	3.152	3.152	3.152	3.152	3.152
ばらつき係数	0.944	0.944	0.888	0.474	0.379
基準値	24.8	248	10.549	2.76	17.5
注) k=3.152(n=3)信頼水準75%の95%下側許容限界値					

表 8 に、各試験体における、 P_{max} : 最大耐力(kN)、 P_s : 単位幅あたりの耐力(N/mm)、 G_F : 界面剥離破壊エネルギー(N/mm)、 τ_y : 最大付着応力(N/mm²)、 l_y 有効付着長さ(mm)を示す。また、統計的処理に基づく信頼水準 75%の 95%下限許容限界値 (試験体数 $n=3$) をせん断接着耐力の基準値として計算した。

以下に、面内接着力評価試験によって得られた知見をまとめる。

- 1) 最大付着応力は、VC8W が最大となった。また、2.1 節に示した素材引張試験の結果と比較すると、最大付着応力と FRP シートの種類には、多少の傾向の類似はあるものの完全な相関性は見られなかった。
- 2) 有効付着長さは、GUD12 が最も長く、続いて VC8, VC8W, GC6 の順であった。したがって、GUD12 は貼り付け長さを最も大きく確保する必要がある。
- 3) 界面剥離破壊エネルギー（単位付着面積当たりのエネルギー）は VC8W が最も大きい。これは FRP シート自体の伸び能力が高いために破壊に大きなエネルギーが必要となるためと考えられる。また、VC8W の試験体の破壊面は、目視では、1 層目と 2 層目の FRP における接着界面ではなく、FRP と母材（木材）との接着界面における界面破壊が確認されたため、2 層貼りシートの一体性が確認された。

表 9 2 面せん断接着試験結果のまとめ

		ガラスクロス (GC6)	ビニロンクロス (VC8)	ガラスユニダイ レクション (GUD12)	ビニロンクロス2層 (VC8W)
単位幅当たりのせん断 接着耐力(N/mm)	平均値	168	137	300	263
	最小値	163	119	287	258
	基準値	153	71	239	248
有効付着長さ(mm)	平均値	34	82	103	46
	最小値	28	73	86	41
	最大値	37	100	127	57

2 面せん断接着試験結果から、各シート仕様に対する単位幅当たりのせん断接着耐力と有効付着長さを表 9 にまとめる。設計では、単位幅当たりのせん断接着耐力は試験体のばらつきを考慮して算出した基準耐力で評価することを基本とし、GUD12 は 239N/mm、VC8W は 248N/mm の値を用いる。シートの貼り付け長さ（有効付着長さ）は 3 試験体におけるの最大値以上になるように、貼り付け長さを確保することとした。

以上の結果から、次節に示す木造軸組の面内せん断試験においては、以下の方針で、補強仕様を選定した。

1. 各仕口部の補強は、荷重に対しシート剥離が生じないように接着面積を確保する。GUD12 の場合は有効付着長さ 127mm 以上、VC8W は 57mm 以上確保するように貼り付け面積を設計する。
2. 柱-土台仕口部における補強は、伸び能力よりも強度を重視し、シート種別はガラス繊維を基本とする。
3. 筋かい仕口部における補強は、強度よりも伸び能力を重視し、シート種別はビニロン繊維を基本とする。

4.3 屋外暴露試験

経年変化に対する FRP シートの接着力の劣化特性を考察するための参考データとして、屋外暴露試験を実施した。試験体は塗装等の仕上げは行わず、4.1 節に示した 2 面せん断接着試験体（GC6 シート）を 3 体作成し、東広島市において日射、風雨を直接受ける屋外環境に 3 か月間暴露した。そして前節と同様に接着耐力を評価した。表 10 に暴露試験体における 2 面せん断接着試験結果を示す。暴露した試験体における最大荷重 P_{max} の基準値（統計的処理に基づく信頼水準 75% の 95% 下限許容限界値）は 13.7kN であり、暴露しなかった試験体の 15.3kN に比べ 1 割程度減少する結果であった。

GC6 シート以外のシートの特性値や実際の使用環境に相当する経年劣化特性を考察するためには、今後さらなるデータの蓄積が必要である。

表 10 2 面せん断接着試験（GC6）・屋外暴露試験結果

試験体	P_{max} kN	P_s N/mm
GC6R-1	15.2	152
GC6R-2	16.1	161
GC6R-3	16.6	166
最小値	15.2	152
平均	16.0	160
最大値	16.6	166
標準偏差	0.721	7.21
変動係数	0.045	0.045
係数k	3.152	3.152
ばらつき係数	0.857	0.857
基準値	13.7	137

5. 木造軸組の面内せん断試験

5.1 実験の概要

図 9 試験体形状および計測位置

図 10 基礎部配筋図

本研究では図 9 に示すような、基礎コンクリート立ち上がり部を有する筋かい耐力壁を作成し、木造軸組工法住宅の許容応力度設計³⁾に示される「木造軸組工法住宅の各部要素の試験方法と評価方法」に基づいた無載荷式による面内せん断試験を実施した。図 10 に基礎部配筋図を示す。

木造軸組の作成にあたり、1980 年代以前の既存木造住宅を安全側に評価する実験となることを意図して、部材断面は、柱 90×90mm（スギ・背割り材）、土台 90×90mm（スギ・背割り材）、筋かい 30×90mm（ベイツガ）、梁 90×150mm（ベイツガ）とした。また、部材の接合部には性能認定金物等は使用せずに、かすがいおよび釘斜め打ちとした簡易な接合部仕様を補強対象とした。また、柱脚部に

ホールダウン金物は使用せずに、開発する補強仕様が柱の引き抜きにも抵抗することを確認するための加力試験とした。

本実験では、上部構造の木造軸組部の補強効果のみを分離して検討するために、基礎コンクリート部材は無筋コンクリートとせず、設計基準強度 $F_c=21\text{N/mm}^2$ とした普通強度のコンクリートを使用し、主筋 2-D13 (SD295)、せん断補強筋 9-D10 (SD295) による配筋とした鉄筋コンクリート部材とした (図 10 参照)。変位等の各計測位置は、図 9 に示す通りである。

本研究では施工性に優れた補強仕様を開発するため、FRP シートによる補強は、室外側又は室内側のみから施工が行えるワンサイド施工が可能な仕様を検討している。本実験では、基礎的な実験結果を元に以下に示す補強タイプのことなる 3 種類の補強仕様を検討した。各補強タイプは I 強度抵抗型、II 靱性抵抗型、III 強度・靱性抵抗型であり、表 11 に試験体一覧を示す。各試験体ともに柱仕口補強の仕様は共通とし、筋かい仕口補強の仕様のみを変更している。各試験体の詳細を以下に述べる。

試験体 I (強度抵抗型) では筋かい仕口補強には強度の高い GUD12 (貼り付け幅 150mm、非接着区間長 400mm+剥離想定区間長 100mm) を使用している (図 12 参照)。試験体 II (靱性抵抗型) では筋かい仕口補強には靱性の高い VC8W (貼り付け幅 150mm、非接着区間長 400mm+剥離想定区間長 100mm) を使用している (図 13 参照)。

試験体 III (強度・靱性抵抗型) では筋かい仕口補強には、1 層目に VC8 (貼り付け幅 150mm、非接着区間長 400mm+剥離想定区間長 100mm)、2 層目に GC6 (貼り付け幅 70mm、非接着区間長 500mm) を使用している (図 14 参照)。

表 11 試験体一覧

試験体名	補強タイプ	柱仕口補強	筋かい仕口補強
試験体 I	強度抵抗型	GC6-1 層	GUD12-1 層
試験体 II	靱性抵抗型	GC6-1 層	VC8-2 層
試験体 III	強度・靱性抵抗型	GC6-1 層	VC8-1 層 (下層) +GC6-1 層 (上層)

図 12 接合部における FRP シート接着状況、押さえ金物

加力方法は、正負交番繰り返し加力とし、繰り返し履歴は、見掛けのせん断変形角が 1/450, 1/300, 1/200, 1/150, 1/100, 1/75, 1/50rad の正負変形時に行い、繰り返し加力は履歴の同一変形段階で 3 回の繰り返し加力を行った。今回の実験では、FRP シートには面外力に対する剥離を防止する目的で、部材を巻き込んで FRP シートを貼りつけられる個所には、シート形状を広げて部材側面まで巻きつけるような仕様とし、それが困難な個所には、抑え金物をスクリーネ

図 11 試験体 I (強度抵抗型) の補強仕様

図 13 試験体 II（靱性抵抗型）の補強仕様

図 14 試験体 III（強度・靱性抵抗型）の補強仕様

ジで止めつける仕様としており（図 12 参照）、圧縮材の座屈に伴う面外剥離の影響は小さいとして、引張片筋かいの単独性能のみを検討することとし、圧縮側での筋かいの破壊を回避するために、筋かい材が圧縮加力となるときの見掛けのせん断変形角は $1/120\text{rad}$ までとする加力方法を採用した。なお、見掛けのせん断変形角 γ は、 $\gamma = \{DG1 - (DG2 - DG3)\} / h$ により算出した。ここに、DG1, DG2, DG3 は図 9 に示した変位計の計測値（単位 mm）であり、 h は階高（ $h = 2730\text{mm}$ ）である。

5.2 実験結果

補強効果の比較のために、無補強試験体（筋かい斜め釘打ち仕様）の荷重変形角関係を図 15 に示す。筋かい仕口部を止めつけている斜めに打った釘（3 本）が抜けて終局状況に至る耐力に乏しい破壊形式であった。

図 15 無補強試験体の荷重変形角関係

また、図 16 に試験体 I（強度抵抗型）、図 17 に試験体 II（靱性抵抗型）、図 18 に試験体 III（強度・靱性抵抗型）の荷重変形角関係を示す。これらの結果における各試験体の荷重－見掛けのせん断変形角関係の包絡線を図 19 に示す。各試験体を比べると、試験体 I は強度が最もある仕様であり、試験体 II は靱性がある仕様であることがわかる。また、試験体 III は、初期剛性は、試験体 II に比べ若干あるものの、結果として強度はあまり期待できない結果であった。また、表 12 に各試験体の最終的な破壊状況を示す。試験体 I は筋かい側定着部のシート剥離、試験体 II、試験体 III は基礎側定着部のシート破断であった。

図 16 試験体 I（強度抵抗型）の荷重変形角関係

図 17 試験体 II（靱性抵抗型）の荷重変形角関係

図 18 試験体 III（強度・靱性抵抗型）の荷重変形角関係

図 19 各試験体の包絡線の比較

表 12 最終的な破壊状況

試験体名	試験体 I	試験体 II	試験体 III
破壊箇所写真			
位置	筋かい柱脚側 FRP シート	筋かい柱脚側 FRP シート	筋かい柱脚側 FRP シート
状態	筋かい側定着部 シート剥離	基礎側定着部 シート破断	基礎側定着部 シート破断

軸組の補強耐力評価

軸組頂部の桁に水平力 P が加わった時、縦横比が 3:1 (2730:910) のトラス構造としてモデル化を行うと、柱および筋かいには図 20 に示すように柱に $3P$ の圧縮力、筋かいに $\sqrt{10}P$ の引張力が発生する。すなわち、筋かいの軸力を N とすると、水平力 P との関係は次式となる。

$$P = N / \sqrt{10} \quad (4)$$

図 20 軸組内の軸力分布

筋かい接合部を FRP により補強した際の軸方向力から(4)式を用いて軸組の最大耐力 P_{max} を簡易に評価することを試みる。試験体 I は、筋かい接合部に GUD12 シートを幅 150mm で施工しているので、前節までに示した GUD12 の単位幅当たりのせん断接着耐力を 239N/mm 及び単位幅当たりの破断耐力を 994N/mm を用いて、シート剥離耐力、シート破断耐力を計算し、それらを N とし

て(4)式に代入することで、 P_{max} を算出する。試験体 II、試験体 III

についても同様に計算すると表 13 となる。表中、計算値における下線のある数値が、最小値であり、予測される破壊形式に対する耐力値である。試験体 I は、計算値における耐力は、シート剥離 11.34kN に対し、実験値の耐力は 12.75kN であった。試験体 II については、計算値による最終破壊はシート剥離であったが、実際には変形角 1/15rad を越えた変形角 (0.0727rad) において最終破壊としてはシート破断を生じた。最終破壊状況を目視で確認したところ、破断した FRP シートは大きくせん断を受けるようにずれて破断しており、軸方向の引張変形に加え、筋かい接合部が回転したことによる変形によって、破断が予測値よりも早期に生じたものと考察される。試験体 III については、GC6 と VC8 の組み合わせであるために予測が難しいが、計算値はそれぞれのシートに対する破断耐力を示している。

表 13 簡易耐力評価

試験体名 (筋かい補強仕様)	実験値		計算値		
	P_{max} (kN)	破壊 性状	シート 剥離(kN)	シート 破断(kN)	破壊 予測
試験体 I (GUD12 150 mm幅)	12.75	シート 剥離	<u>11.34</u>	47.1	シート 剥離
試験体 II (VC8W 150 mm幅)	11.25	シート 破断	<u>11.76</u>	15.7	シート 剥離
試験体 III (GC6 70 mm幅) (VC8 150mm 幅)	8.04	シート 破断	-	GC6 : <u>3.94</u>	シート 破断
	8.55			VC8 : <u>9.01</u>	

実験によって得られた耐力特性から算出した各試験体のせん断耐力を表 14 に示す。これらのせん断耐力は完全弾塑性モデルで評価した耐力 (単位 kN) を表し、 P_y は降伏耐力、 P_u は終局耐力、 P_{max} は最大荷重、 D_s は構造特性係数を表す。なお本実験では、各仕様につき試験体数を 1 試験体としたため、試験体のばらつきの影響は考慮できないため、ばらつき係数は 1 として各耐力を算出している。実施工において結果を評価するためには、試験体数を複数体検討し、適切にばらつき係数を評価する必要がある。

表 14 基準せん断耐力 (単位: kN) (引張側)

試験体名	P_y	$(0.2/D_s)P_u$	$2/3P_{max}$	1/120rad 時 P
試験体 I	8.8	3.2	8.5	5.9
試験体 II	6.3	4.3	7.5	4.4
試験体 III	4.3	3.8	5.7	4.1

また、耐震補強設計に必要となる各試験体の要素基準耐力 (壁強さ倍率) (kN/m) および 要素基準剛性 (kN/rad./m) を表 15 に示す。基準耐力等の特性値は、圧縮側と引張側の両方の特性から評価する必要があり、本実験では、基礎特性を把握するために実施した基礎実験であるために、引張側の評価のみを行っているために、これらの数値は実設計に直接適用できない。今後の使用においては追加の性能実験が必要であるものの、参考値として、圧縮側を 1.96kN/m で仮定した際の圧縮側と引張側の平均基準耐力の値を表に示す。

表 15 要素基準耐力および要素基準剛性

試験体名	引張側		基準耐力※ (kN/m)
	基準耐力 (kN/m)	基準剛性 (kN/rad./m)	
試験体 I	3.5	744	2.7
試験体 II	4.7	459	3.3
試験体 III	4.2	533	3.1

※圧縮側基準耐力を 1.96kN/m と仮定したときの引張側と圧縮側の基準耐力の平均値

6. まとめ

紫外線硬化型 FRP による既存木造住宅の耐震補強工法を開発する目的で、以下の実験を実施した。

- 1. FRP 素材引張試験
- 2. 木材に対する面外接着力評価試験 (直接面外引張接着試験)
- 3. 木材に対する面内接着着力評価試験 (二面せん断接着試験)
- 4. 木造筋かい壁補強試験体の面内せん断試験

各項目に対するまとめを示す。

- 1.FRP 素材引張試験では、本実験で用いる FRP (VC:ビニロンクロス,GC:ガラスクロス, GUD:ガラスユニダイレクション) の破断耐力および伸び能力の基礎特性を調査した。
- 2. 木材に対する面外接着力評価試験では、下地の処理方法 (かんな仕上げ, グラインダー仕上げ) およびベースプライマ (エポシキアクリレート樹脂・2 液混合型プライマ, ウレタン樹脂・1 液型プライマ) の効果等を確認した。
- 3. 木材に対する面内接着着力評価試験では、木材に FRP を貼り付けた際のせん断接着耐力特性を調査した。
- 4.木造筋かい壁試験体の面内せん断試験では、コンクリート基礎を有する木造筋かい耐力壁試験体を作成し、最大耐力、最大変形性能等について検討し、本工法の耐震補強性能を検討した。

以上のように、本論文では、紫外線硬化型 FRP による既存木造住宅の筋かい軸組要素の耐震補強について検討し、基礎的な要素実験に基づき、補強コンセプトに従った耐力・靱性を有する補強仕様を確認した。その中で靱性抵抗型とした軸組補強 (試験体 II) が最も大きな要素基準耐力が得られ本研究の提案仕様とする。また今後設計のための許容応力度などを体系的に決定するためには、平成 13 年国交省告示 1024 号¹⁰⁾やあと施工アンカー・連続繊維補強設計・施工指針¹¹⁾を参考に検討を進める必要がある。

謝辞

本研究には池田祐樹氏 (旭化成株式会社 当時広島大学大学院生) の協力を得た。また、本研究の一部は科研費 (課題番号 21760432) の助成を受けたものである。末筆ながら謝意を表す。

参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会:阪神・淡路大震災調査報告 (建築編 -4), pp.61-196, 1998
- 2) 社団法人日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物の補強技術研究委員会報告書, 2003.7
- 3) 国土交通省住宅局建築指導課監修:財団法人日本住宅・木材技術センター企画編集・発行, 木造軸組工法住宅の許容応力度設計, 2006.11
- 4) 国土交通省住宅局建築指導課監修:木造住宅の耐震診断と補強方法-木造住宅の耐震精密診断と補強方法 (改訂版), 2004.7
- 5) 手塚純一:アラミド繊維シートを用いた木質接合部および耐震開口フレームに関する研究, 東京大学大学院博士論文, 2008.3
- 6) 手塚純一, 安藤直人:木質構造物において水平力に抵抗する開口フレームの研究開発, 木質構造研究会, 研究論文, Vol.20, No.5, pp.11-126, 2007.11
- 7) 前田匡樹, 佐藤晃章, 利根川純平, 堀則男, 五十嵐俊一, 五十田博, 白鳥行則, 五十嵐徹, 四釜美由紀:ポリエステル繊維物を用いた既存木造建物の耐震補強工法の開発 その1補強工法の概要と実験計画, 日本建築学会大会学術講演梗概集,構造 III, pp.131-132,2005.9
- 8) 三重野哲平, 朴志泳, ハセム アブドゥカー, 田中圭, 井上正文:GFRP シートを用いた木造住宅の耐震補強方法の開発 (その1) モルタルの影響を除いた場合の補強効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集,構造 III, pp.243-244,2008.9
- 9) 宇根田作成, 松野一成, 角徹三, 惣郷怜子, 栗川洸二:ガラス繊維シートを用いた既存木造住宅の耐震補強法の開発, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第 31 巻, 2008.3
- 10) 平成 13 年国交省告示 1024 号
- 11) 国交省告示:施工アンカー・連続繊維補強設計・施工指針, 2006.7

(2011年 4 月11日原稿受理, 2011年11月 9 日採用決定)