

# 限界耐力計算を用いた茅葺古民家の 耐震性能評価及び耐震補強計画案に関する考察

Evaluation on seismic performance of traditional house with thatched roof  
by "calculation of response and limit strength" and the retrofitting plan

富田直樹<sup>1</sup>・森 拓郎<sup>2</sup>・田中 圭<sup>3</sup>・清水秀丸<sup>4</sup>

Naoki Tomita, Takuro Mori, Kei Tanaka and Hidemaru Shimizu

<sup>1</sup>株式会社奥村組 広島支店 建築部 (〒730-0042 広島市中区国泰寺町1-7-22)

Engineer, Okumuragumi Corporation

<sup>2</sup>広島大学准教授 建築学専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

Associate Professor, Hiroshima University, Department of Architecture

<sup>3</sup>大分大学准教授 創生工学科 (〒870-1192 大分市大字旦野原700)

Associate Professor, Oita University, Department of Innovative Engineering

<sup>4</sup>椋山女学園大学講師 生活環境デザイン学科 (〒464-8662 名古屋市千種区星が丘元町17番3号)

Lecturer, Sugiyama Jogakuen University, Department of Human Environment Design

The number of traditional wooden houses with thatched roof at Shiwahori, Higashihiroshima city is decreasing due to decrease in the thatched roof craftsmen, change in lifestyle and values, and so on. This paper expressed the evaluation of seismic performance of traditional thatched house by "calculation of response and limit strength" method. As a result, the strength of one direction showed insufficient strength. Therefore the short length shear resisting wall using Oriented Strand Board is developed for keeping living functions. As a result, we presented the retrofitting plan using developed shear walls. In addition, the suggested plan was shown enough strength as continuation use.

**Keywords:** thatched roof, seismic performance, response and limit strength, retrofit

## 1. はじめに

東広島市志和堀には大小さまざまな茅葺古民家が現存している。その数は2003年に14棟残っていたが、2018年には6棟まで減少した。その理由の一部には、茅葺職人の減少、生活様式や茅葺古民家に対する価値観の変化などによると考えられる。これらには、茅場の確保や茅職人の育成など、短期間での改善が難しい問題も含まれている。しかし、建物の機能性の向上や耐震性能の確保、維持管理の改善などは、現状を調べ適切に対応することにより、その対策を提案することが可能となる。対象地域における茅葺古民家について、建築意匠、地域生活などに関する調査<sup>1)</sup>は実施されており、また本論文で対象としている建物においては、2016年から地域住民や周辺大学の学生有志による茅葺古民家の保存活動として、建物の活用方法について検討し、地域の図書館としての利用が試みられている。ただし、耐震性能の評価が一般の建築業者には難しいこと、用途に必要な機能性を確保できる耐震補強方法があまり提案されていないことなどが問題となり、耐震補強が進んでいない現状がある。そのため、用途に必要な空間を確保できる耐震補強方法の提案が重要となる。

そこで本研究では、東広島市志和堀に現存する茅葺古民家の1棟を対象として、まず建物の現状評価のために必要な情報を現地調査により集め、限界耐力計算<sup>1)</sup>による現状の耐震性能評価を試みる。そして、耐震補強計画を進めるために、機能性の確保が可能な袖壁タイプの耐震補強壁を提案し、その性能を評価する。最終的に提案する耐震補強壁を用いて耐震補強した場合の耐震性能を評価することで、十分な耐震性能を確保できることと現状の平面計画を維持できることを示すことを目的とする。本論は、これらの一連の試みについて報告するものである。

## 2. 対象建築物の構造詳細調査

### (1) 調査建物

本研究では、東広島市志和堀の茅葺古民家に現存する茅葺古民家のうち、上述の保存活動がおこなわれた図1と図2に示す建築物を調査対象とした。



図1 対象建築物外観



図2 対象建築物内観

### (2) 調査内容及び方法

現地調査は、所有者および使用者の了解を得て、天井板、畳、床板等の一部を撤去し、天井裏と居室部、床下に関する部材寸法などの建物性能評価に必要な情報を収集した。目視調査が不可能な構造部材の継手、仕口の仕様については、地元工務店への聞き取り調査を実施した。改修、増築の有無、間取りの変更の有無については、所有者、使用者または地元工務店への聞き取り調査を実施した。

### (3) 調査データ

#### a) 建物形状

現在の建物形状を図3と図4に示す。図3に示すとおりけた行方向6間、張り間方向4間程度に対して、2行3列の計6部屋が配置されている平屋である。下屋部分は何度か増築を繰り返した結果、図4に示す現在のような形状になったと考えられる。具体的には、南面の庭に面して出入口を設け、室3は元々土間であり、現在の台所付近にはかまどがあった。室1、4、5は建設当時から畳間の居室として利用されてきた。室2は、以前の所有者が使用していた当時は畳間や農作業用に板間として利用していたことが実測および所有者への聞き取り調査から確認された。また、居室と居室の間は襖又は障子で仕切られており、下屋の増築部分とは引き戸で仕切られている。また、各居室には差鴨居をもつ垂れ壁が設けられていた。

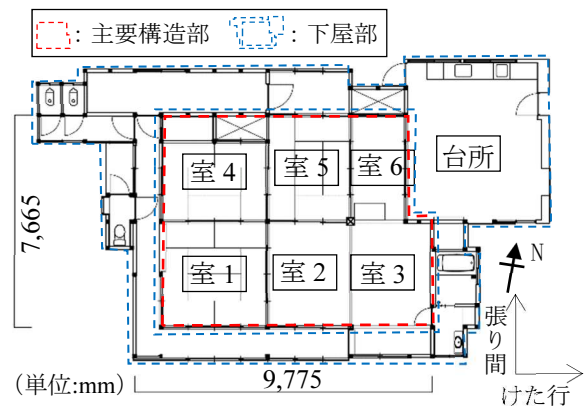


図3 現在の平面図

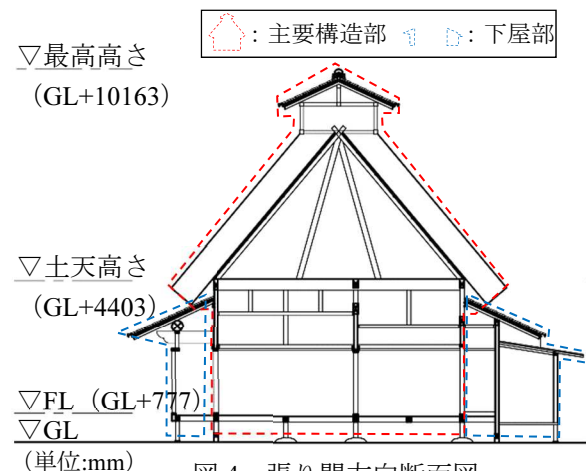


図4 張り間方向断面図

## b) 天井裏及び床下

天井裏には、図5に示すスギ丸太（φ40mm程度）の上に竹と藁、土で構成される土天が、主要構造部全体を塞ぐ形で60mmの厚さで張られていた。また、基礎は主要構造部の外周部分の基礎および室3の元土間部分の基礎は、図6に示すような延石基礎を用いており、その他には図7に示すような束石を用いていた。室内から見えない箇所の接合部には、木材を切り欠いて載せただけというような簡易な仕口が用いられていた。



図5 土天



図6 延石基礎



図7 束石

## 3. 現状の耐震性能評価

### (1) 限界耐力計算を用いる理由

本研究では、耐震診断法として建築基準法施行令第3章第8節第1款の3に定める限界耐力計算<sup>2)</sup>により対象建築物の耐震性能を評価する。なぜなら、建築物のような伝統的な木造住宅の耐震性能に関する一連の実験報告<sup>3)</sup>があり、終局層間変形角が1/15rad程度の十分な変形能力を保持していると考えうる建築物について、限界耐力計算が大地震時の耐震性能を適切に評価することができることが報告されているためである。またこの方法であれば、現状の耐震性能を評価する際に、対象建築物の部材の腐朽や土壁の劣化状況等による耐力性能の低減も考慮することが可能となることも挙げられる。

### (2) 応答計算

#### a) 対象建築物の諸元および耐震要素の選定と配置

計算に必要な建物諸元は、実測調査の結果をもとに算出し、屋根勾配と萱の厚さなど実測できなかった項目については作成した1/50の模型を用いて導出し、表1にまとめた。建物のモデル化にあたり、耐震性能の評価範囲は、図4と図8に示す主要構造部のみとし、建物の構造高さは柱脚下端から土天下端までの4.17mとした。建物重量も下屋を除く主要構造部のみとし、文献<sup>4)</sup>および建築基準法令84条に基づき固定荷重および積雪荷重を計算し435.6kNとした。この内訳を表2に示す。また、耐震要素は実測より差鴨居と土壁の2種類を主な要素として選定した。この土壁については、図9と図10に示す模式図のような小壁と全面土壁の2種類に分類し、各架構の実測値を用いて復元力特性を計算した。なお、それぞれの配置を図8に示す。

表1 建物諸元

重量(kN)	435.6
階高(m)	4.17
地域係数Z	1.0
Gsの算出法	簡略計算 第2種地盤

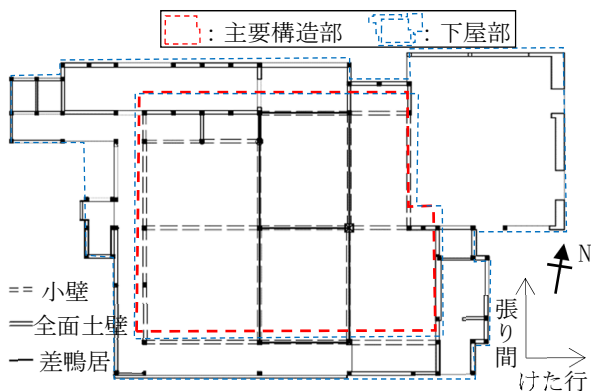


図8 耐震要素配置図

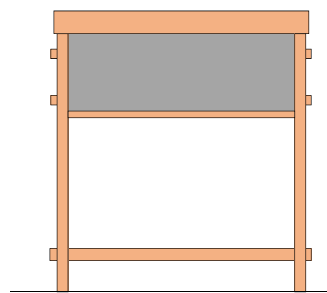


図9 小壁模式図

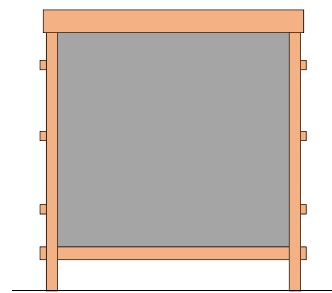


図10 全面土壁模式図

表 2 建物重量内訳

固定荷重							
部位	部材	単位荷重N/m <sup>2</sup>	面積(m <sup>2</sup> )	倍率係数	W(kN)	Σ W(kN)	合計(kN)
屋根	茅葺(基準葺厚を0.6mとし 葺厚によって調整する)	1,500	71.22	1.94	228.48	263.74	
	小屋組	450	71.22	1.10	35.26		
木造のもや	もやの支点間の距離が2m 以下の場合	50	71.22	1.10	3.92	3.92	
天井	さお縁	300	71.22	1.10	23.50	23.50	
壁	土壁(t=84mm(中塗りを含む))	830	79.57	1.54	101.71	101.71	392.87
積雪荷重							
		単位荷重(N/m <sup>2</sup> )	面積(m <sup>2</sup> )	垂直積雪量(cm)	W(kN)	Σ W(kN)	合計(kN)
		20	71.22	30	42.73	42.73	42.73
建物重量							
							合計(kN)
							435.60

b) 設計クライテリア

建物の耐震性能を評価するとき、建物の構造特性を勘案して損傷限界や安全限界変位を設定し、その限界変位内に応答値が納まることを目標とする。本研究では、対象建築物が築約100年と伝統的な建築物であることから、文献<sup>2)</sup>と同様に損傷限界変形角を1/120rad、安全限界変形角を1/15rad以下と設定した。

c) 建物の復元力特性

建物の復元力特性は、木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル<sup>2)</sup>に示す差鴨居と土壁の復元力特性を用い、実測値による壁長さや差鴨居の寸法による線形補正から各架構の復元力特性を算出し、その合算値を各構面における復元力特性として図11に示した。

加えて、検定項目として伝統的な木造建築物で見られる腐朽等による耐力低減と独立柱の曲げ破壊の検定についても実測調査値をもとに検討した。芝尾らの研究<sup>3)</sup>によると柱・土台接合の腐朽などにより耐震壁の耐震性能が20%程度低下することなどが報告されている。これを用いて図12に示すように湿気等により腐朽の可能性がみられる柱を含む架構に対しては、その劣化度は低いと考え、1/120radと1/60rad時の耐力低下を柱1本当たり5%とし、柱脚下端が直接土台に接している柱については水分による劣化リスクを勘案して柱1本当たり5%の耐力低下を見込んだ。また、独立柱の曲げの検定については、小壁の耐力要素の性能に合わせて発生する曲げ応力について曲げ破壊しないかどうかを検定した。

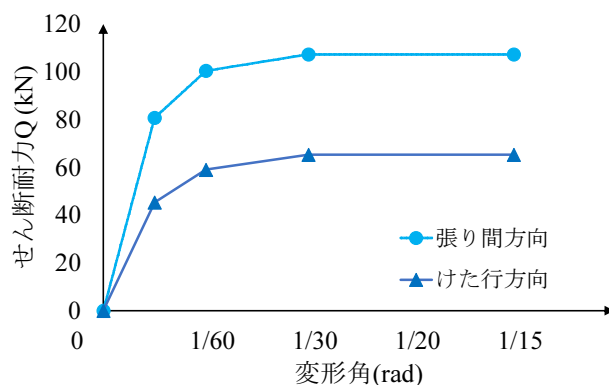


図 11 現状の復元力特性



図 12 腐朽した柱脚部



### (3) 応答結果

限界耐力計算による現状の耐震性能評価の各構面の応答結果を図13と図14に示す。計算の結果、張り間方向は、図13に示すとおり極めて稀に発生する地震に対する応答層間変形角は、1/19radとなり設計クライテリアを満足していたが、稀に発生する地震に対しては1/114radとなり設計クライテリアを満足しなかった。一方で、けた行方向は、図14に示すとおり極めて稀に発生する地震に対する応答値がなく、稀に発生する地震に対しては1/86radと両地震に対する応答値がともに設計クライテリアを満足しなかった。また、応答計算に伴い張り間方向とけた行方向ともに各架構における柱の曲げ破壊が起こらないことを確認した。以上の結果より、けた行方向では大地震時に対象建築物の倒壊の危険性があることがわかった。

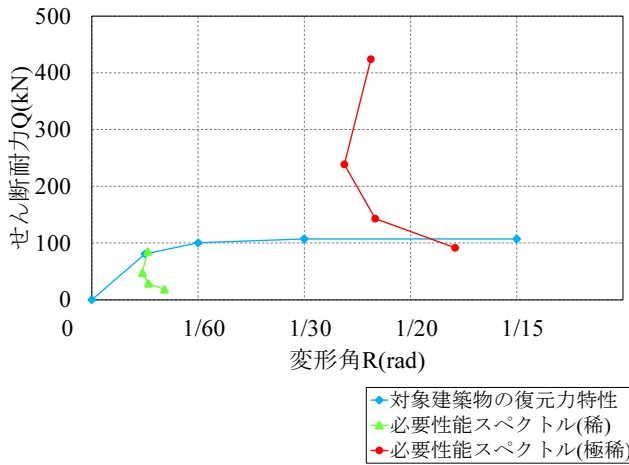


図13 現状の張り間方向の応答値

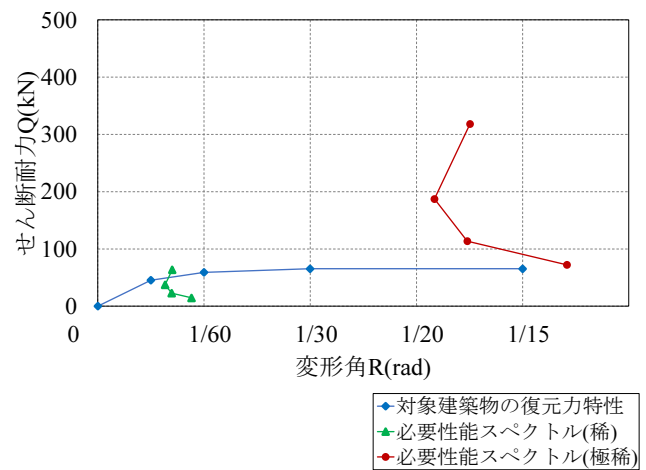


図14 現状のけた行方向の応答値

## 4. 耐震補強用袖壁の耐力実験

### (1) 実験概要

現状の平面計画を維持できる耐震補強壁を提案することを目的として、薄い削片状にした木片（Strand）を配向（Oriented）させて積層、接着剤で高温圧縮した比較的軽量でクギの保持力も高い木質ボードであるOriented Strand Board（通称OSB）を用いた袖壁の耐震性能を評価した。また、提案する耐震補強用袖壁の復元力特性を得ることも目的とした。

### (2) 試験体概要

試験体の寸法および樹種を表3に、部材寸法を表4に、また試験体の寸法およびほぞ加工を図15および図16に示す。本試験体は、OSBと多数の釘で構成されており、釘のせん断性能によって耐力が決定されるため、ばらつきは大きくないと判断し、試験体は一体とした。

表3 耐震袖壁の諸元および材料

試験体名	寸法(mm)		釘		樹種 (柱, 土台, 間柱, 横棧等)	仕口	柱頭柱脚金物(kN) 間柱-梁, 間柱-土台	張り方
	幅	高さ	種類	ピッチ(mm)				
耐震補強②(袖壁)	1820	2730	N50	100	スギ	短ほぞ	6.7×2	片面張り

表4 部材寸法

部材名	幅(mm)	せい(mm)
梁	105	180
土台	105	105
柱	105	105
間柱	60	105

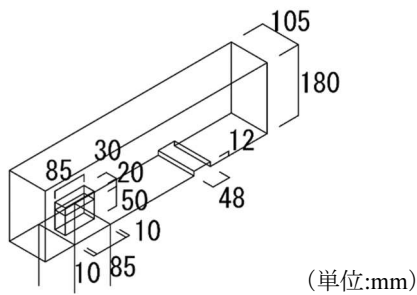


図15 柱ほぞと間柱用切り欠きの形状と寸法

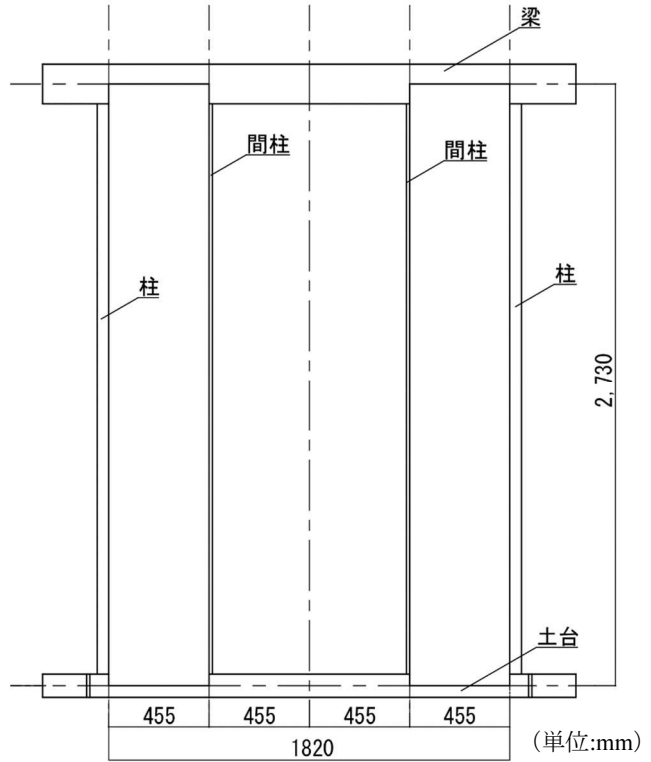


図16 試験体図

### (3) 実験方法

実験方法は、「木造軸組工法住宅の許容応力度設計 2章 木造軸組工法住宅の各部要素の試験方法と評価方法<sup>6)</sup>」に準拠し、加力スケジュールは見かけのせん断変形角が、1/450、1/300、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50、1/30radの正負変形時で3回繰り返し加力とした。その後、試験体の見かけの変形角が1/15radに達するまで加力した。また、本研究では図17に示す載荷式を採用し、試験体への積載荷重は文献<sup>7)</sup>より算出した柱1本当たり630kgをもとに2Pの寸法に合わせて、1,890kgとした。

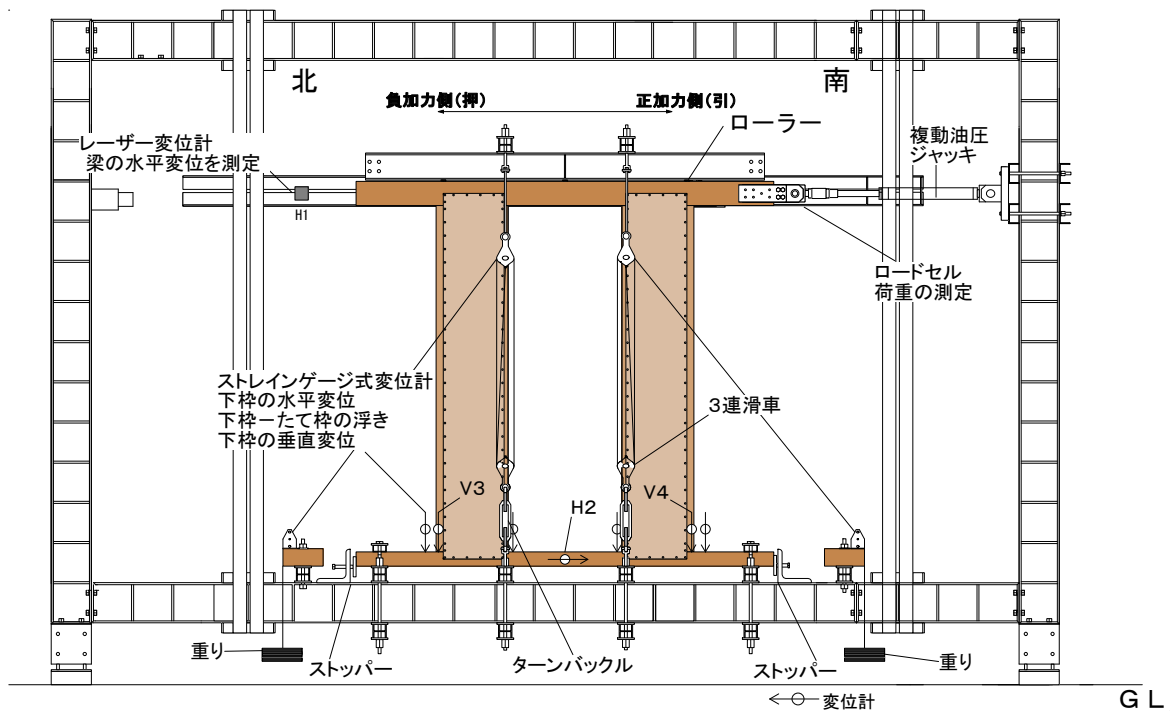


図17 試験体設置図

#### (4) 実験結果

実験から得られた荷重変形角関係を図18に示す。また包絡線処理した荷重変形角関係と特定変形角（1/120rad、1/60rad、1/30rad、1/15rad）に対する耐力を図19に示す。特定変形角の算出については、図19に示すようにR軸および変形角1/15（rad）と骨格曲線（復元力特性）の各特定変形角で囲まれた面積がR軸および変形角1/15（rad）と包絡線とで囲まれた面積とほぼ等しいように決めた。この結果、表5に示すとおり壁倍率4.5の性能があること、図19に示すとおり1/15rad以上の大きな変形まで耐力を有することが確認できた。これらを勘案して、伝統的な建築物への補強用壁として用いることが可能であると判断した。

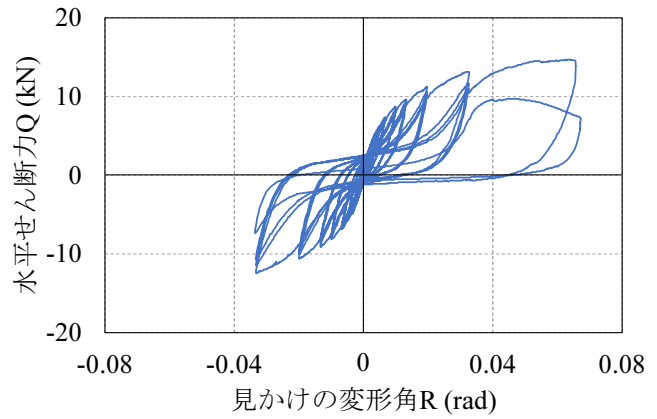


図18 荷重変形角関係

表5 壁倍率の算定

試験体名	OSB袖壁
有効壁長(m)	0.91
$P_y$ (kN)	8.79
$P_{max} \times 2/3$ (kN)	9.80
$P_u \times 0.2\sqrt{2\mu - 1}$ (kN)	7.01
$P_{1/120}$ (kN)	8.10
$\mu = \delta u / \delta v$	3.94
$P_a = P_0$ (kN)	8.10
壁倍率	4.5

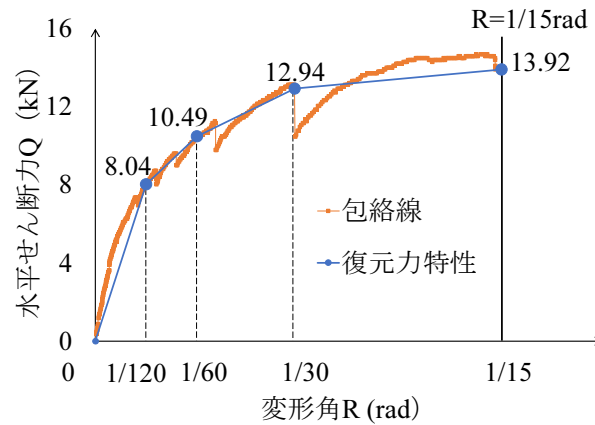


図19 袖壁の復元力特性

### 5. 対象建築物の耐震補強効果

#### (1) 耐震補強の方針

耐震補強時の設計クライテリアは現状の耐震性能評価と同様とした。耐震性能を向上させる手段として、一般的に建物重量の軽減と耐震要素の増設の2点が挙げられる。本研究では、茅葺古民家の保全活動を持続させた上で耐震補強するために、土天を剥がすこと等による建物重量の軽減はおこなわないものとした。また、補強計画を行う配慮として現状の茅葺古民家の利用状況として重要となる室1-6の平面計画を維持すること、十分な自然採光を確保することとし、図20に示す耐震補強計画を提案する。

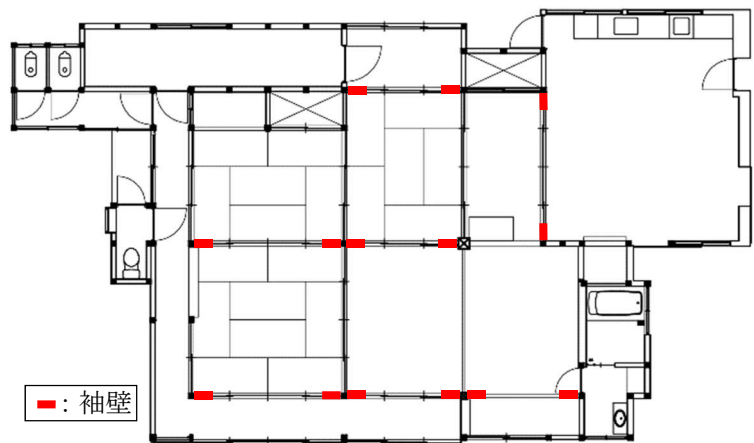


図20 耐震補強用袖壁の増設配置図

このとき対象建築物に対する耐震補強用袖壁の設置は、下端（足固め）と上端（差鴨居や梁）で拘束することとする。袖壁の復元力特性については、ラーメンフレームと同様にフレーム当たりの評価とし、耐力は柱間の寸法に比例しないとした。そのため、各架構における耐震要素の合算は、文献2)等)に示されている現状の耐震性能評価と同様に、耐震要素の合算値とした。

## (2) 応答結果

耐震補強用袖壁を用いた場合について各構面において検討した結果を、図21と図22に示す。両図に示すとおり、OSBの利点である軽さと袖壁耐力壁の高い剛性によって、上述の補強条件を満足することが可能であることがわかった。このとき応答層間変形角は、稀に発生する地震と極めて稀に発生する地震の各地震に対して張り間方向は $1/123\text{rad}$ と $1/20\text{rad}$ となり、けた行方向は $1/124\text{rad}$ と $1/22\text{rad}$ となった。特に倒壊の危険性があったけた行方向の層間変形は、補強前と比較して、変形が約31~41%低減された。また、耐震補強後の張り間方向とけた行方向ともに柱の曲げ破壊が起こらないことを確認した。

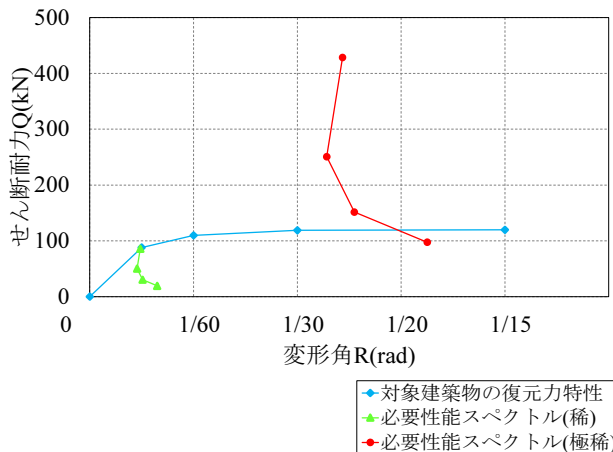


図21 袖壁補強後の張り間方向の応答値

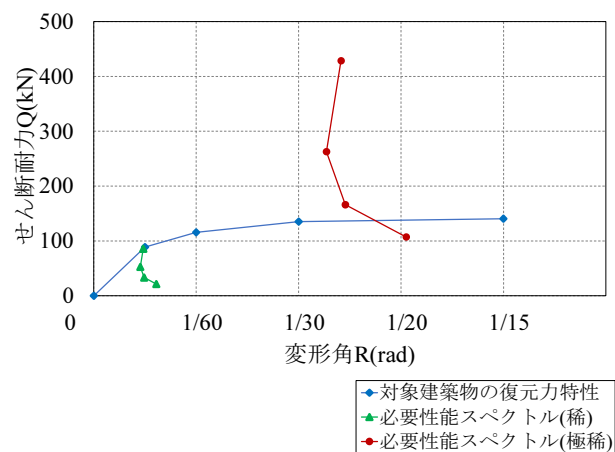


図22 袖壁補強後のけた行方向の応答値

## 6. まとめ

本研究では、実測値を用いて対象とする茅葺古民家の現状の耐震性能評価と耐震補強案の提案を実施した。現状の耐震性能評価の結果、主にけた行方向の耐震性に問題があることがわかった。現状の平面計画の維持と自然採光を確保しながら耐震性能を向上させることを目的として提案した耐震補強用袖壁は、高い耐震性能を有することが確認できた。また、この耐震補強壁を用いた耐震補強案を用いた耐震性能評価の結果では、現在の用途において必要とされる機能の維持と自然採光の確保が可能を維持しながら要求される耐震性能を実現することができた。

また今後、より汎用性の高い茅葺古民家の耐震補強方法を確立するためには、東広島市志和堀に現存する対象建築物以外の茅葺古民家、元々茅葺であった古民家や志和堀以外の茅葺古民家の耐震性能評価の蓄積および実際に耐震補強をおこなう際の耐震壁の設置方法案の蓄積が必要と考える。

**謝辞：**本研究においては、広島大学工学部建築構造力学研究室の諸氏に協力を頂きました。対象建築物の実測の際には、所有者である広島大学工学部の杉川幸太助教、(株)井上工務店の井上富雄氏に大変お世話になりました。また、袖壁の耐力実験では、大分大学理工学部創生工学科建築学コース田中研究室の皆様、(株)林田順平商店の皆様にご多大なるご尽力頂きました。心より感謝を申し上げます。

## 参考文献

- 1) (財)都市農山漁村交流活性化機構企画編集：平成14年度茅葺古民家に関する調査研究報告書, pp168-169, 2003.3
- 2) 木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル編集委員会：伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアル 限界耐力計算による耐震設計・耐震補強設計法, (株)学芸出版社, 2015.2
- 3) 日本建築学会近畿支部「1995年兵庫県南部地震－木造建物の被害－」, 1995.9
- 4) 一般社団法人日本建築学会編：建築物荷重指針・同解説 (2015) , pp129-140, 2015.2
- 5) 芝尾真紀, 西野進, 森拓郎, 田中圭, 他5名：強制腐朽処理を壁脚部に施した耐力壁の残存耐力性能 その3 腐朽範囲の違いが残存耐力に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp.61-62, 2017.7
- 6) 木造軸組工法住宅の許容応力度設計改訂委員会編集：木造軸組工法住宅の許容応力度設計, 2017
- 7) 青井秀樹, 他4名：木造住宅の構造部材に生じる各種応力の許容応力度に対する割合 (第1報) 一般地域に建設された住宅の柱と土台, 木材学会誌, Vol.54, No.4, pp.208-215, 2008