

公益財団法人 建築技術教育普及センター 令和7年度調査・研究助成  
地震で被災した伝統的建造物群保存地区における建築構造的復旧支援システムの構築  
～伝統的木造住宅の地震で折損した柱の補強方法に関する実験的研究～

関西大学 西川 英佑  
野村 建太

## 1 序論

令和6年(2024年)1月1日に発生した令和6年能登半島地震において、能登半島の建造物が被災し、その中には多くの伝統木造住宅も多く含まれた。本研究では建物被害の中で、特に倒壊に結び付く柱の仕口位置での折損や割裂といった被害に着目し、その補修方法を検討する。

文献2、3の中では、柱の破損メカニズムを解明するために仕口を設けた柱に軸力をかけた状態での柱曲げ試験を行っているが、仕口部の横架材の影響など未解明な部分が多い。また、実験で折損させた柱に添え板や添え柱で補強を行いその補強性能を確認したが、折損柱の残留耐力のバラツキが大きく、補強効果による性能向上分のみを正確に把握できなかった。さらに、補強後の柱の目標性能に応じた補強効果の評価手法が確立できていなかった。

そこで本研究では、柱に軸力を加えた状態での破損メカニズムを検証する載荷実験を行い(第2章)、補強後の柱の目標性能を2段階設定しそれらに応じた補強効果の評価手法を策定し(第3章)、文献2で検証した補強方法に加え、新しい補強方法も提案し、折損柱が抵抗しない形で載荷実験を行い、その補強効果を評価する(第4章)。

## 2 補強前の既存柱の折損に関する実験

### 2.1 実験概要

本研究では実際の建物の柱には軸力が作用しているため補強前の試験体に対して軸力を考慮した実験を行う。試験体の全長を図1に仕口寸法を図8にそれぞれ示す。試験体の仕口は軸力の影響を受けやすい四方差しで行う。

作用させる軸力は、繊維直交方向の木材(ヒノキ)の短期許容支圧応力度(7.47N/mm<sup>2</sup>)と柱・桁の接触面積(柱断面積からほぞ面積を除いた面積)から求めた60.8kNを参考に、60kNとする。なお、実際の伝統木造住宅においては柱一本あたりが負担する建物重量が平屋建てで13.1kN程度、二階建ての一階で20.7kN程度であり、これに対して大きな荷重となっている。

柱曲げ試験のセットアップを図2に示す。中央一点載荷とし、柱の仕口に差し込んだ差鴨居を再現した部材を上から万能試験機で載荷した。万能試験機内のロードセルで載荷荷重を、柱下側に設置した変位計(ワイヤーゲージ)により載荷位置変位を計測した。軸力は柱片側端部に設置した油圧ジャッキで与え、軸力をターンバックルに設置したひずみゲージで測定し、実験中に軸力が一定になるように調節を行った。

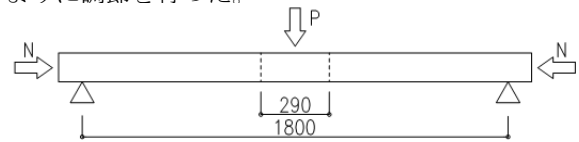


図1 実験(仕口)寸法 載荷位置

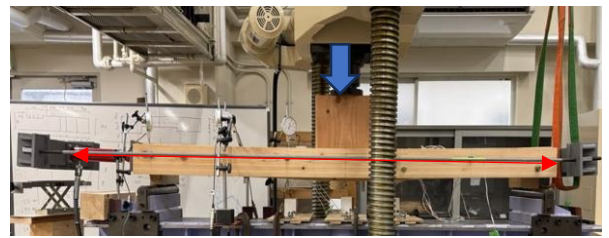


図2 実験の様子

### 2.2 既存柱の破壊性状に対する軸力の影響

既存柱の破壊性状に対する軸力の影響を調べるため、軸力を与えた状態の試験を1体、軸力なしの状態の試験を3体行った。図3に結果を示す。

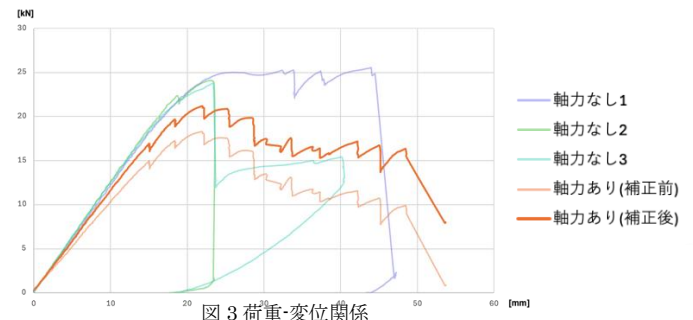


図3 荷重-変位関係

軸力無しの試験の結果にはバラツキがあり、軸力ありの試験は1体しか行っていないためバラツキの有無は現段階で不明であるが、軸力ありは、軸力なしに比べて剛性が低く、耐力も軸力無しの25kN程度と比べて18kN程度と小

さい。次に、軸力ありの実験結果について、軸力によって付加的に仕口部に加わる曲げモーメントを中央載荷位置の荷重に置き換え載荷荷重に加えることで、軸力なしの状態と比較できるように補正し、同図に示す。補正した場合でも軸力ありの耐力は軸力なしと比較して小さく、軸力による付加曲げ以外にも軸力の影響で仕口部の破壊が生じやすくなっていることがわかる。

### 2.3 軸力に対する横架材の影響

2.2 で指摘した仕口部の破壊に対する軸力の影響をさらに検証するため、柱の仕口に横架材のほぞを差した試験体と差していない試験体に対して、軸力ありの状態の試験を行う (図 4)。各試験の荷重-変形関係を図 5 に、破壊後の状況を図 6、7 に示す。



図 4 実験前仕口部

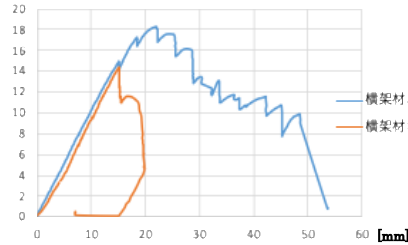


図 5 荷重-変形関係

実験の結果、横架材ありの試験体は、最大荷重が横架材なしの試験体に比べ小さく、破壊時の変形も小さかった。図 6 に示すように、横架材なしの試験体では仕口の圧縮側部分が圧縮および座屈によって破壊した。一方で、図 7 に示すように、横架材ありの試験体でも仕口の圧縮側部分で多少の圧縮破壊が生じているが、脆性的な破壊は免れている。多少の隙間が生じていても横架材のほぞが仕口に入っていることで仕口部の脆性的な破壊を防止するのに有効であることを示唆している。



図 6 座屈の様子

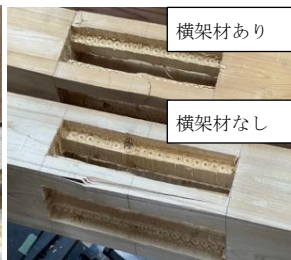


図 7 破壊後の様子

## 3 補強後の柱の目標性能に関する考察

### 3.1 目標設定

折損柱の多くは垂壁付独立柱の垂壁下高さで生じているが、柱の補強後の性能としては、大きく二つに分けることができ、(a)垂壁付独立柱として地震力に抵抗できるよう曲げ性能を回復するレベルと、(b)柱として地震時に大きく変形しても鉛直支持能力を失わないレベルがある。

### 3.2 曲げ性能の回復レベル

(a)に関しては、(a-1)柱が折損する前の状態まで回復するレベル、すなわち垂壁下の差鴨居等の横架材の仕口によって断面欠損のある柱の曲げ耐力を目標性能とする場合と、(a-2)土壁等である垂壁のせん断耐力に柱が耐えうる曲げ耐力を目標性能とする場合の 2 段階を設定する。

(a-1)に関しては、輪島市黒島地区で被害調査を行った建物の差鴨居四方差しの 5 寸角の柱の仕口位置の断面 (図 8) をもとに、柱に対して仕口形状が同寸もしくは相似であると仮定し、柱の断面係数および曲げ耐力を求め表 1 にまとめた。なお、材料基準強度にはヒノキ無等級の基準曲げ強度 (26.7N/mm<sup>2</sup>) を使用した。断面係数率: Za (断面欠損ありの断面係数) / Z (断面欠損なしの断面係数) は全て一般的に設計に用いられる 75% を下回る結果となった。

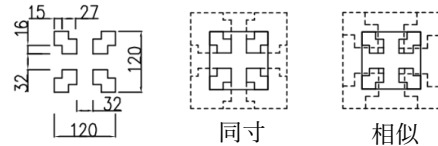


図 8 四方差仕口寸法と別断面での仕口

表 1 柱の断面と根拠の違いによる曲げ耐力

根拠	寸法	Z	Za	Za/Z	Ma1
	mm	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	%	kNm
現地調査	120角	288	153	53	4.1
同寸	135角	410	249	61	6.6
同寸	150角	563	371	66	9.9
相似	135角	410	218	53	5.8
相似	150角	563	236	42	6.3

次に(a-2)について、垂れ壁のせん断耐力は式 1 から、その時に柱の必要曲げ耐力は式 2、図 9 から算出した。壁厚 60mm としたときの壁長さおよび垂壁 (L) ・階高の比率 (h<sub>2</sub>/h) を変化させたときの柱の必要曲げ耐力を表 2 にまとめる。なお、垂れ壁は土壁とし、その基準耐力は 4.8kN/m (文献 2) とした。また、柱を 120 角・150 角 (仕口相似) の (a-1) と比較した。同図における赤色は柱 120 角の時に、緑色は柱 150 角の時に垂れ壁の破壊が先行することを表す。柱径が大きくなることで、(a-1) を満足すれば同時に (a-2) を満たすことになることが分かる。

$$Ma1 = f_b \times Z_a \dots (\text{式 1}), Ma2 = Q \times h_2 \times h_1 / h \dots (\text{式 2})$$

表 2 プロポーションの違いによる垂れ壁の曲げ耐力

Ma2	h <sub>2</sub> /h [%]				
	20	25	30	35	
L	1.365	2.9	3.4	3.8	4.0
	1.820	3.8	4.5	5.0	5.3
[m]	2.275	4.8	5.6	6.3	6.6
	2.730	5.7	6.7	7.5	7.9

### 3.3 鉛直荷重支持能力の維持レベル

(b)に関しては、地震時の変形として限界耐力計算時の倒壊限界変形角となる 1/20 とそれに余裕度を持たせた

1/10 の二段階の変形能力を求める。大変形時にはP-δ効果により柱に曲げが加わるので、それに抵抗する耐力も必要となる。

実験時の載荷点の変位  $\delta 2$  は柱の仕口部の回転によるものと曲げ変形によるものの和、建物の層間変形は柱の仕口部の回転によるものと垂れ壁下の柱の曲げによるもの、垂れ壁のせん断変形によるものの和となるが、本報においては、どちらにおいても柱の仕口部の回転による変形が主となると考え、垂壁高さ  $h2$  と階高  $h$  の比率が 1 : 3 の建物を想定した (図 9)。この場合、建物層間変形角  $\theta$  は実験における変形角  $\theta 2$  の 4/3 倍となり、建物層間変形角  $1/20 \cdot 1/10$  に対応する実験時の変形角  $\theta 2$  は  $1/26.7$  ( $\delta 2=33.7\text{mm}$ )  $\cdot 1/13.3$  ( $\delta 2=67.7\text{mm}$ ) となる。P-δ効果による柱の曲げ  $M3$  は軸力ありの実験では再現されていると考え、軸力なしの実験では  $\delta$  に軸力  $N$  に相当する力を乗じたものとなる。(式 3、図 9)

$$M3 = N \times L = (N \times h \times h2) \times (h \times \theta) / (h^2 + \delta^2) \dots (\text{式 3})$$

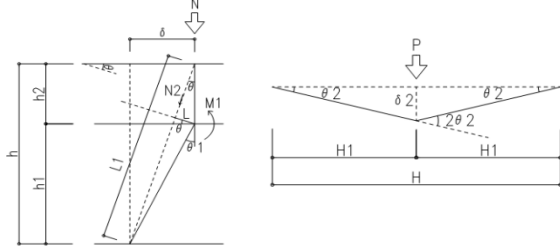


図 9 垂壁付独立柱と実験の変形角関係

### 3.4 まとめ

(a)および(b)をまとめた補強材の性能評価指標として変形角-曲げ応力関係の色別の範囲 (図 10) による。

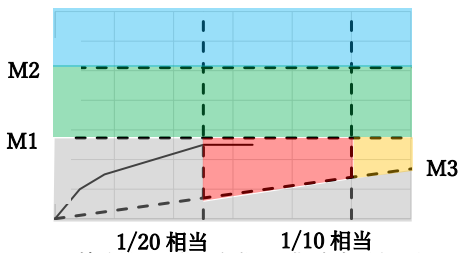


図 10 補強材の性能評価指標 曲げ-変形角関係

M1 と M2 はそれぞれ 3.2 に記載した (a-1) による曲げ耐力と (a-2) による曲げ耐力の小さい方を M1、大きい方を M2 として建物の形状によって変化する。緑色の範囲は既存柱の曲げ耐力を上回ったこと、水色の範囲は垂れ壁付き独立柱の性能を最大限活用できることを示し、赤色と黄色の範囲は変形追従能力有りをそれぞれ示す。特に赤色、黄色について実際の建物補強計画での活用方法として別スパンで壁補強を行い、耐震性能を満足させ垂壁付独立柱には軸力保持能力のみを期待する場合に有効であ

る。4 章では階高  $h=2730\text{mm}$ 、内法高  $h1=1820\text{mm}$ 、垂壁高  $h2=910\text{mm}$ 、壁厚  $t=60\text{mm}$ 、垂壁長  $L=1820\text{mm}$ 、軸力  $N=20\text{kN}$ 、柱断面 120mm 角の建物を想定し、図中に黒破線で示す。

## 4 折損柱の補強方法に関する実験

### 4.1 実験概要

文献 2 の実験では、柱を一度折損させ、それに補強を施し試験を行っていたが、本研究では、折損柱の残存耐力のバラツキによる実験結果への影響を除くため、既存柱を中央で切断し、それに補強を施した上で試験を行った。また、文献 3 で使用した軸力付加の接合治具を改良し、添え柱等の断面の大きな補強材を付けた状態でも軸力を加えられるようにした。

補強方法としては、折損柱の補強に用いられることの多い添え柱補強に加え、流通性や施工性に優れるアルミアングルを用いた補強方法を提案し、各補強方法の効果を実験により検証した。

### 4.2 添え柱補強

添え柱補強では折損柱に同断面の柱を添え、ビス (PS8-230) によって固定する試験体と貫通ボルト (M12) によって固定する試験体の二種類を作成し (図 11)、それぞれに対して軸力ありの状態と軸力なしの状態を実験を行い比較した。図 12 に結果を、図 13 に破壊性状を示す。ビス固定の試験体・ボルト固定の試験体ともに、軸力ありの状態は、軸力なしの状態に比べて初期剛性は高いが、耐力はわずかに低かった。軸力ありの状態の初期剛性が高くなる要因は、折損柱の中央の切断面において軸力が加わることで曲げ抵抗が生じたためと考えられる。

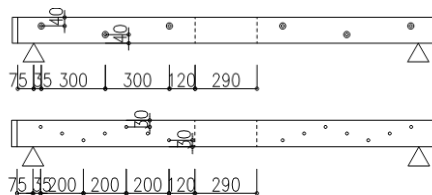


図 11 ボルト固定 (上)ビス固定(下)



図 13 破壊性状 (ビス固定)

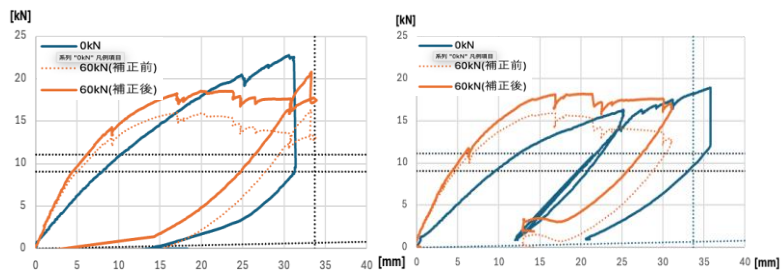


図 12 荷重-変位関係 (左:ビス固定、右:ボルト固定)

ビス固定とボルト固定による違いは、軸力なしの状態においてはボルト固定の試験体の方が初期剛性は小さいが、軸力ありの状態においては違いがみられない。これはボルト固定の場合に下孔の遊びがあることで剛性が低くなる一方、軸力をかけるとこの遊びが詰まることで違いがなくなっていると考えられる。

耐力に関してはビス固定の方がボルト固定よりも大きくなったが、破壊性状はどちらも接合具付近の添え柱の割裂となっており、耐力の差は添え柱に使用した木材の材料強度のバラツキによるものと考えられる。

ビス固定は、下孔不要のためボルト固定より施工性が高く、上記の結果より補強効果はボルト固定とさほど違いがないため、より有用である。

### 4.3 アルミアングル補強

アルミアングル補強では、アルミアングル材 (L-40x40x3) を折損柱の四隅に沿わせ、ビス(TK5-105)を用いて固定した(図14)。図15に実験の様子、図16に結果を示す。なお、図16中の軸力ありの状態は軸力載荷装置が外れたため実験を終了している。

4.2と同様に軸力ありの状態は軸力なしの状態に比べ初期剛性が高く、耐力は低い。添え柱補強と比較すると、アルミアングル補強は変形20mm程度まで剛性が低いが、耐力および破壊時の変形は格段に大きい。

破壊性状は、アルミアングルが引張側で伸長し、圧縮側で座屈を生じ、最終的に引張側端部のビスがせん断破壊した(図17)。

以上より、アルミアングル補強は添え柱補強に比べ変形能力および耐力の点で優れ、補強効果が大きい。

## 5 結果と展望

本研究では軸力を加えた状態での仕口を有する柱の曲げ試験を行い、柱軸力により仕口部の破壊が生じやすくなること、横架材のほぞを差すことで脆性的な破壊を免れることを明らかにした。折損した柱の補強に関しては、曲げ耐力回復レベルと鉛直荷重支持レベルの二段階の目標性能を設定し、それぞれの評価値を提案した。

補強方法に関しては一般的によく用いられる添え柱補強に加えアルミアングル補強を提案し、各種補強の効果を実験で検証した。添え柱補強においてはボルト固定・ビス固定を比較し後者の方が有用であること、アルミア

ングル補強は変形性能・耐力ともに優れていることを指摘した。

[参考文献]

- 1) 文化庁：重要文化財（建造物）耐震基礎診断実施要領, 2012.
- 2) 野村建太・松本颯太・松井基嗣・瀧野敦夫・西川英佑・榎井健：令和6年能登半島地震における輪島市黒島地区の被害調査と復旧支援 その10 折損した断面欠損を有する柱の補強方法（2025年日本建築学会・大会梗概集・p 625-626）
- 3) 松井基嗣・瀧野敦夫・西川英佑・野村建太・森拓郎：令和6年能登半島地震における輪島市黒島地区の被害調査と復旧支援 その9 断面欠損を有する柱の曲げ実験（2025年日本建築学会・大会梗概集・p 625-626）

[謝辞] 本研究は、調査や試験体の作成の一部に公益財団法人建築技術教育普及センター（令和7年度）の調査・研究助成を受けて行われた。ここに感謝の意を表す。

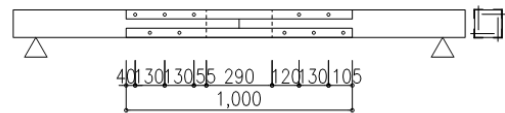


図14 アルミアングル補強



図15 実験の様子



図17 破壊性状の様子

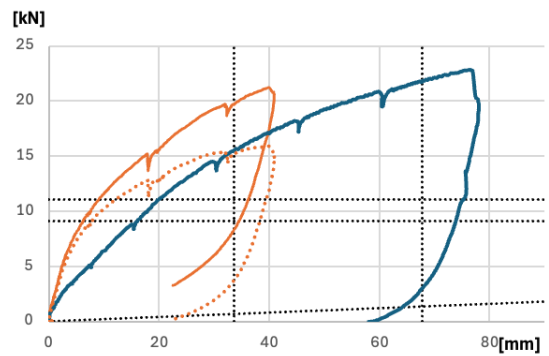


図16 荷重-変位関係