

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420594

研究課題名(和文) 豪雪地帯の既存木造建築物の倒壊を防止する耐雪補強設計法の開発

研究課題名(英文) Retrofit design to prevent collapse of existing wooden buildings in heavy snowfall area

研究代表者

西村 督(Nishimura, Toku)

金沢工業大学・環境・建築学部・教授

研究者番号：30367445

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、小屋組と桁行架構間の破壊を含む仕口耐力を考慮し、過大な積雪荷重に対して豪雪地帯の木造建築物の倒壊を防止する補強法を提案した。補強法は割裂が生じる可能性がある小屋梁端部に紫外線硬化型FRPシートを巻く補強法である。腰掛兜蟻仕口部のせん断試験結果から、以下の事項を明らかにした。(1)対象とした腰掛兜蟻仕口の破壊過程は、兜下部が割裂し、兜の耐力が低下した後に蟻部がせん断変形、せん断破壊し、最終的に腰部がせん断割裂する。(2)紫外線硬化型FRPシートによるせん断補強方法は、耐力の向上と最大耐力後の靱性に寄与する。

研究成果の概要(英文)：In this study, we propose a retrofit design to prevent collapse existing wooden buildings in heavy snowfall area. The proposed reinforcement is bind ultraviolet rayed-hardening fiber reinforcement sheets at roof beam ends. In the shear force test, the following facts are identified: (1) the failure process is the cleavage of half-blind dovetail joint, the shear deformation and shear fracture of dovetail joint and the cleavage of base-part. (2) the shear reinforcement with ultraviolet rayed-hardening fiber reinforcement sheets functions as improvement of strength and toughness in post-peak range.

研究分野：建築構造

キーワード：積雪荷重 木造家屋 倒壊 耐雪設計 腰掛兜蟻仕口 割裂 FRPシート せん断補強

1. 研究開始当初の背景

2005年12月から2006年2月の平成18年豪雪では、新潟県の間山部で積雪深が4mを越え、約190世帯が孤立するまでに至り、石川県山間部で木造建物の全壊被害が報告されている¹⁾。この全壊被害のあった地域は、例年積雪深100cmを超える豪雪地帯であり、屋根雪下ろしの習慣はあるが過疎・高齢化が進み、高齢者一人暮らしの場合、屋根雪下ろしが困難という問題を抱えている。多雪地帯の建物は、過大な積雪荷重に対する荷耐力を備えていると思われるが、写真1.1の家屋は桁行架構が倒壊し、小屋組が崩落した。積雪荷重による構造物の崩壊の様相は、一般に連鎖的かつ破局的である。



写真 1.1 家屋の倒壊

積雪荷重を受ける木造建築物の倒壊挙動には、木造軸組の剛性、特に接合部の剛性評価が大きく影響する。更に座屈が伴う場合、どの接合部の剛性変化が急激な架構の耐力低下、そして崩壊に直結しているかを注意深く検討する必要がある。実大木造建築物の倒壊原因を、座屈挙動を含めた観点から扱った研究は極めて少ない。本申請者らは写真1.1の木造建築物の被害原因を解明するために、損壊調査結果を考察した。また仕口部での応力伝達モデルを組み込んだ複合非線形解析法を用いて、境界条件と小屋組-軒桁、軒桁-柱仕口の剛性評価に関するパラメータスタディーを実施し、被災建物の倒壊原因を以下に要約した²⁾。

- [1] 倒壊の主原因は全体架構の曲げ振れモードによる不安定分岐座屈と推測される。
 - [2] 兜蟻仕口部近傍における小屋梁端部のせん断割裂破壊は座屈前に生じ、その破壊が架構の座屈を促したと考えられる。
- これら2項目は力学的観点から倒壊原因を説明した先駆的な研究成果である。

2. 研究の目的

しかし倒壊原因を特定し、倒壊防止策を検討するための課題が残されている。本研究の目的は、小屋組と桁架構間の仕口耐力を考慮し、過大な積雪荷重に対して豪雪地帯の木造建築物の倒壊を防止する軸組補強設計法の開発にある。具体的な研究達成目標は、小屋組と桁行架構との兜蟻仕口に着目し、1)兜蟻

仕口破壊をシミュレートできる解析モデルの構築 (平成25年度)、2)全体架構の崩壊モード評価法の構築 (平成26年度)、3)仕口の局部破壊と架構の座屈に対する耐雪補強設計法の確立 (平成27年度) である。

3. 研究の方法

平成25年度の研究課題は、上記1)の破壊を考慮した兜蟻仕口の解析モデルの構築であったが申請時の研究計画を再考し、一部を見直した。兜蟻仕口の数値解析モデルより先行して、柱の振り抵抗モデルを構築するため、ほぞの長さをパラメータとする接合部の振り実験を実施した。

平成26年度に計画していた崩壊モード評価に関する検証実験を実施する前に、想定される崩壊モードに共通する破壊が小屋梁端部仕口の割裂破壊であることを特定した。その結果、崩壊モードの評価に先んじて崩壊につながる破壊を防止する補強法の提案を優先し、計画していた実験を中止した。

平成27年度は平成26年度に提案した小屋梁端部の補強方法の効果を実証するための実験を実施し、小屋梁端部仕口の破壊過程を考察した。

4. 研究成果

4.1 ほぞの長さをパラメータとしたほぞ仕口の振り剛性と耐力評価に関する実験³⁾

本研究では、柱ほぞ仕口の振れ抵抗メカニズムを解明するために、ほぞの長さをパラメータとし、柱-土台で構成される試験体の振れ実験を行う。実験結果から、振り剛性、最大耐力、ほぞの損傷の様相を考察する。

4.1.1 実験概要

実験では、ほぞ接合された短柱-土台の試験体に対し、柱頭にトルクを与え、柱を同心軸回りに回転させ、柱-土台間のほぞ仕口の振れ抵抗を調査する。

土台はボルトで床と固定されている。2つの溝形鋼 (I-100×50×5×7.5) を鋼板 (PL-t6×100×220) でつないだ“日”状の治具を柱に載せ、2つの油圧ジャッキで治具端部に強制変位を与える (写真2.1)。治具中央の鋼板にφ24の鋼製回転軸が付いている。ジャッキの力が回転軸回りの偶力となるように、回転軸は反力壁に固定された支持材 (P-φ60.5) と治具をつないでいる。溝形鋼の距離は柱断面寸法の120mmであり、柱を溝形鋼で挟み、柱頭に治具が置かれている。柱はロードセル、ジャッキの重さの半分、治具の重量(約360N)を鉛直荷重として受ける。柱と治具とは金物等で繋結されていない。回転量が大きくなると載荷点間の投影距離が短くなる。このとき、ジャッキとロードセル間、回転軸と支持部材間に付加曲げが生じないようにピン接合としている。

載荷プログラムは、押し側と引き側のジャッキの力が同じ大きさになるように、毎秒約10Nの単調載荷とした。ジャッキのストロー

ク限界は 100mm である。

試験体は表 2.1 に示すほぞの長さが 40, 80, 120mm の 3 種類を各 3 体準備した。試験体寸法と加力位置を図 2.1 に示す。

4.1.2 まとめ

実験結果から得られた主たる結果を以下に記す。

- [1] ほぞの長さが長い方が振り剛性、最大耐力、耐力低下は大きく、逆に残留回転角は小さい。この結果は、ほぞの長さによって弾性変形と塑性変形の割合が異なるためと考えられる。
- [2] ほぞの損傷として、隅部の破損、ほぞ付け根の割裂、繊維方向・半径方向の割裂が確認された。ほぞ隅部の破損は、ほぞの長さが 80mm を超えると現れない。
- [3] ほぞの捩れに関する力学モデル（振りモーメントー振り回転角関係）は、ほぞの力学モデルは初期剛性 k_1 、勾配変更回転角 θ_1 、第二分枝勾配 k_2 、最大耐力 T_{max} 、耐力低下 ΔT の 5 つのパラメータで設定できる。最大耐力はほぞの割裂破壊条件、耐力低下量は割裂破壊までの捩れ変形による弾性歪エネルギー量から定められる。

4.2 小屋梁端部仕口のせん断補強に関する載荷実験^{9),10)}

既存木造家屋の耐雪補強法の一つの方針は、架構の座屈耐力を低下させ、部材間の応力伝達を不可能とする仕口部の破壊の防止である。梁-桁仕口部の耐力評価は例えば文献 4)~6) に示されている。

仕口耐力が評価できるならば、必要耐力を確保する補強法が必要となる。蟻仕口の脆性破壊モードは男木、女木の割裂破壊である。小屋梁の繊維方向に生じる割裂で曲げに関する断面性能が急激に低下する。男木側の断面性能の急激な低下を防止するために、図 2.2 に示す小屋梁端部に補強シートを設ける⁷⁾。補強シートの例として文献 8) で検討されている硬化特性を有する FRP シートが考えられる。

本研究では、小屋梁-桁梁間の仕口部のせん断試験を行い、文献 7) で提示されたせん断補強法の効果を確認する。

4.2.1 実験方法

図 2.3 に試験体の寸法を示す。梁材の長さは 605mm、桁材は 800mm で材種は米松である。仕口は腰掛兜蟻仕口であり、仕口各部の寸法を図 2.4 と表 2.2 に示す。補強シートには写真 2.3 に示す紫外線硬化型 FRP シート⁸⁾（以降 FRP シート）を使用した。FRP シートを桁側面から 10mm 離れた位置に梁に巻く。試験体の種類を表 2.3 に示す。実験パラメータは FRP シートの幅、重ね代の長さである。基本試験体としてシート幅 80mm、重ね代 50mm, 20mm を A シリーズ（写真 2.2, 2.3）、B シリーズはシート無し、C シリーズはシート幅 40mm で重ね代 50mm, 20mm、D シリーズはシート幅 80mm、重ね代両側面 150mm で

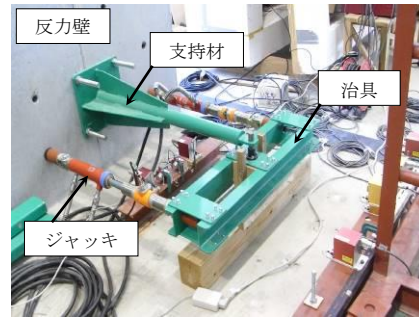


写真 2.1 治具と載荷装置

表 2.1 試験体

| 試験体 | 材種 | ほぞ長 L (mm) | ほぞ幅 B (mm) | ほぞ厚 t (mm) |
|------|----|-----------------|-----------------|-----------------|
| L40 | 杉 | 40 | 90 | 40 |
| L80 | | 80 | | |
| L120 | | 120 | | |

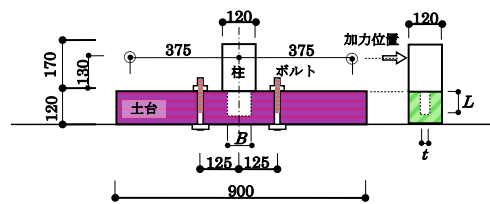


図 2.1 試験体

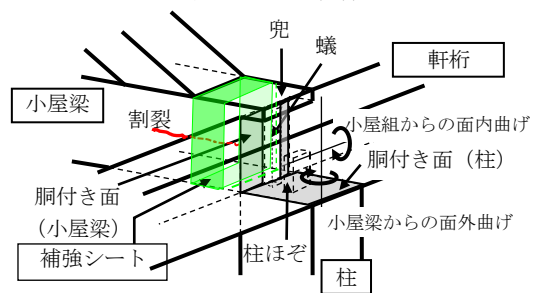


図 2.2 小屋梁-軒桁端部のせん断補強

ある（図 2.5）。FRP シートの繊維方向は写真 2.2 に示す巻く方向と一致させている。試験体は桁を試験機に直接置き、梁は水平を保つために桁の内側側面から 370mm の位置に添え板の鋼板（幅の中央：写真 2.2 参照）を置き、その上に載せている。加力は写真 2.2 に示した桁外側の側面から 250mm の位置に加力用の鋼板(30×100×120)を介して、図 2.6 の矢印方向に強制変位 1.0mm/min で与えた。最大変位を 40mm とし、それ以前に明確な耐力低下を示し、荷重上昇が現れない場合はその時点で実験を終了した。歪ゲージは加力方向の梁断面の歪を計測するために、図 2.4 に示す小屋梁側面に貼り、その番号を図 2.7 に示す。

4.2.2 実験結果

FRP シートの有無

図 2.8 に A, B シリーズの荷重 P -加力位置の梁の鉛直変位 v の関係を示す。いずれの試験体も荷重が約 20kN、鉛直変位 2.5mm の時に亀裂音が生じ、目視で兜下部の繊維方向への割裂を確認した。荷重の増加と共に割裂長

さも増加し、荷重変位曲線の勾配が低下する。鉛直変位 7.5mm 前後で更に勾配は緩やかになる。FRP シートを巻いていない B シリーズの試験体 B1, B2, B3 はそれぞれ 56, 53, 48kN の最大荷重を経て、その後、鉛直変位の増加と共に荷重は低下する。最大荷重を示した位置を図 2.6 中の▼で示す。最大荷重時の鉛直変位は B1 で約 13mm、B2 は 29mm、B3 は 27mm である。一方 A シリーズは、鉛直変位が 7.5mm 以降は 10kN 以上の荷重上昇を示す。A1, A2, A3 の試験体はそれぞれ 72, 78, 63kN の最大荷重を示した。その後、A1 と A3 についてはそれぞれ鉛直変位 28mm と 24mm でシートの梁下面の重ね代部分が剥がれ、急激に荷重が低下する。シートが重ね代で剥がれた位置を△で示す。A2 の試験体はシートが剥がれることはなく、最大荷重を経てから、鉛直変位の増加と共に荷重は徐々に低下するが、急激な荷重低下は現れない。いずれの試験体も最大荷重以降、荷重変位曲線は負の勾配を示す。シートが剥がれた以外で荷重が約 5kN 低下する位置を▲で示す。明らかに FRP シートの有無は最大耐力の向上に寄与している。

FRP シートの幅の影響

図 2.9 に A, C シリーズの荷重 P -梁の鉛直変位 v 関係を示す。幅 40mm でシートを巻いた C1, C2, C3 の最大荷重はそれぞれ 55, 64, 72kN であるが、その後、C2 と C3 については、鉛直変位が増加しても急激な荷重の低下は見られず、ほとんど一定である。C1 については、鉛直変位が 28mm の時に梁下面の FRP シートの重ね代部分が剥がれ、急激に荷重が低下する。シートの幅の長短による影響は加力範囲では見られない。A2 と同様、シートが剥がれなければ C シリーズでも最大耐力後の急激な荷重低下は現れない。

FRP シートの重ね代の影響

図 2.10 に A, D シリーズの荷重 P -梁の鉛直変位 v 関係を示す。80mm の幅で重ね代を左右 150mm のシートを巻いた D1, D2 はそれぞれ 69, 60kN の最大荷重を経て、その後、鉛直変位の増加と共に荷重は若干低下したが、シートの剥がれや破断は見られない。図 2.9 に示したシートが剥がれなかった C2, C3 と比較して同様の荷重変位曲線を示す。重ね代の長さが荷重変位曲線に及ぼす影響は、実験の加力範囲では見られない。

梁の歪と破壊性状

図 2.11~2.13 に各歪と梁の鉛直変位 v との関係を示す。図 2.11 より断面の上側 (図 2.7 の歪 3) に位置する兜の板厚内の歪は、加力初期段階で引張側となるが、兜に割裂が生じる $v=2.5\text{mm}$ 以降、FRP シートを巻いた A シリーズ、FRP シートを巻いていない B シリーズとも歪値は低下する。A シリーズは鉛直変位の増加と共に歪量は圧縮側に増加する傾向がみられる。一方 B シリーズは歪値の増減はあるが A シリーズと比較して値は小さい。

図 2.12 は断面中央の歪 4-梁の鉛直変位 v 関係である。A シリーズは鉛直変位が 2.5mm

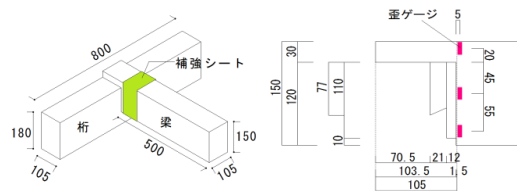


図 2.3 試験体の寸法 図 2.4 梁端部の寸法

表 2.2 仕口の寸法

| a | b | c | d | e | f | g | h | i | j |
|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|----|
| 105 | 150 | 105 | 33 | 21 | 12 | 5.4 | 77 | 110 | 30 |

a:梁幅 b:梁成 c:腰幅 d:蟻幅 e:蟻掛長さ f:蟻掛長さ g:蟻角 h:蟻成 i:腰成 j:兜成 単位(mm, deg)

表 2.3 試験体の種類

| 試験体記号 | シートの幅(mm) | シートの重ね代(mm) |
|-------|-----------|-------------|
| B1~B3 | | |
| A1~A3 | 80 | 梁側面 50 |
| C1~C3 | 40 | 梁下面 20 |
| D1~D2 | 80 | 梁両側面 150 |

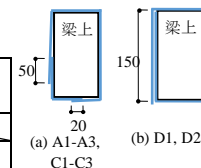


図 2.5 シートの重ね代



写真 2.2 FRP シートの位置 (A シリーズ)



写真 2.3 重ね代

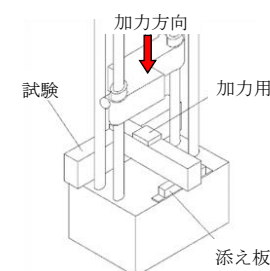


図 2.6 加力方法

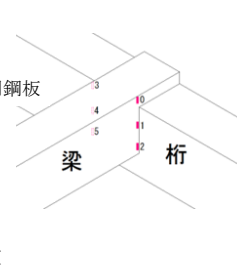


図 2.7 歪ゲージの番号

までわずかに引張歪が生じている。兜に割裂が生じ始めてから歪は圧縮側に上昇し、 $v=7.5\text{mm}$ 以降は緩やかに増加、もしくはほぼ一定値を保つ。歪ゲージの位置は図 2.4, 2.7 より梁の図心付近であり、蟻を介して力を伝達する位置である。鉛直変位が 7.5mm~12.5mm まで歪がわずかしこ増加せず、その後、減少に転じた理由は $7.5\text{mm} < v < 12.5\text{mm}$ では蟻のせん断変形が進行し、その後、蟻の破壊が生じたと考えられる。図 2.8~2.10 で $v=7.5\text{mm}$ 以降の荷重変位曲線で緩やかな勾配を示すことと対応している。

図 2.13 は断面下側の歪 5-梁の鉛直変位 v 関係である。図 2.13 より FRP シートを巻いた A シリーズの試験体で図 2.12 の中央歪同様、兜に割裂が発生した後、歪は圧縮側に増

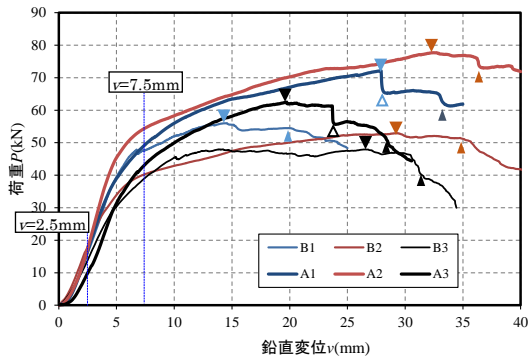


図 2.8 荷重 P - 梁の鉛直変位 v 関係 (FRP シートの有無)

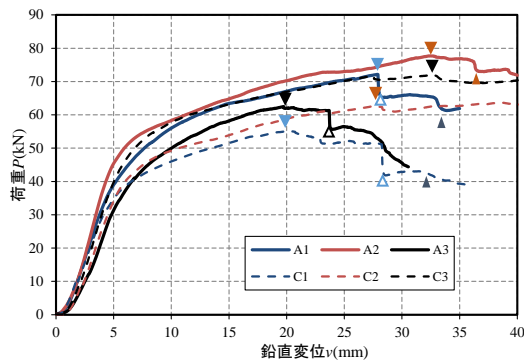


図 2.9 荷重 P - 梁の鉛直変位 v 関係 (FRP シートの幅)

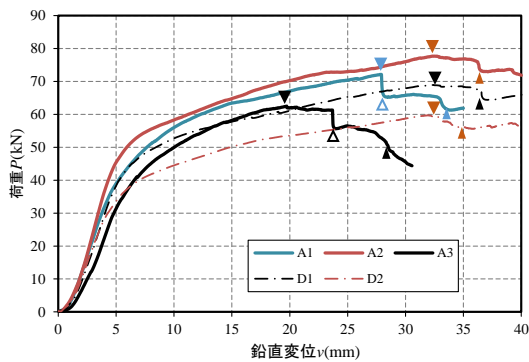


図 2.10 荷重 P - 梁の鉛直変位 v 関係 (FRP シートの重ね代)

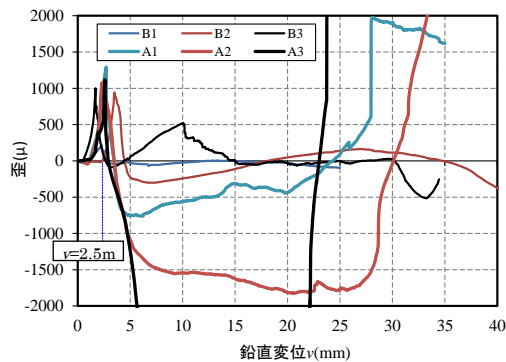


図 2.11 断面上側歪 3 - 梁の鉛直変位 v 関係

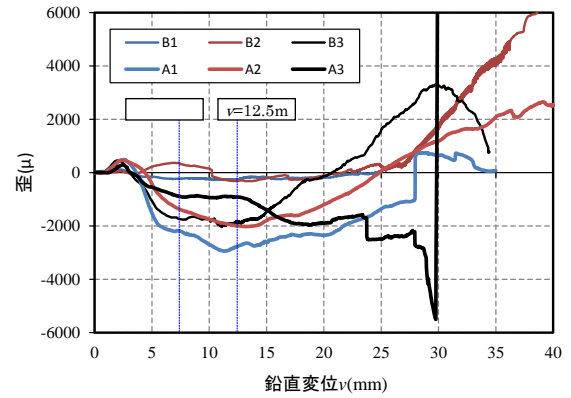


図 2.12 断面中央歪 4 - 梁の鉛直変位 v 関係

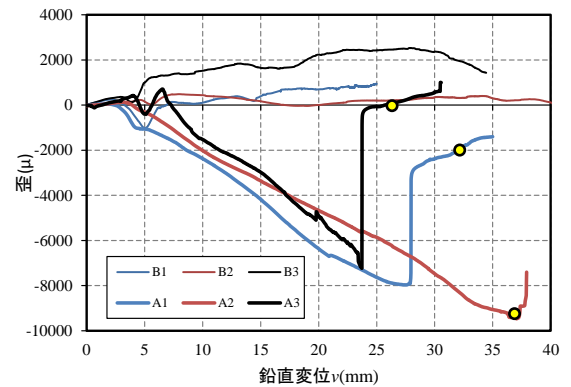


図 2.13 断面下側歪 5 - 梁の鉛直変位 v 関係

加する。ただし、中央の歪と異なり梁下の歪は単調に増加する。A1, A3 は図 2.8 の Δ に示す FRP シートが剥がれて歪は急激に低下する。FRP シートが剥がれなかった A2 は荷重が低下する 37mm 付近で歪が低下した。B シリーズの実験結果は、中央の歪の変化と類似しており、B3 以外はほとんど歪が生じていない。歪 5 の位置は腰の下側付近である。この歪は鉛直変位とともに増加するが、FRP シートが剥がれた A1, A3 の位置を除き、図 2.13 の黄色の \circ で示した位置で歪が低下する。この位置は図 2.8~2.10 の \blacktriangle で示した荷重がわずかに低下する位置である。この状態で腰部が塑性変形し、剛性が低下したためと考えられる。

実験結果から梁-桁仕口のせん断加力時の破壊過程は、

- ①鉛直変位の増加と共に兜が持ち上がり割裂が生じ、
- ②その後、蟻のせん断変形と破壊、
- ③最終的に腰の損傷と推察される。FRP シートは、小屋梁の割裂破壊後、兜の曲げ変形を拘束することで、せん断抵抗断面の欠損を抑え、急激な耐力低下を防止していると考えられる。

4.2.3 まとめ

本研究では、梁-桁間の仕口部のせん断試験を行い、紫外線硬化型 FRP シートが梁のせん断抵抗に及ぼす影響を確認した。

実験結果から得られた事項を以下に示す。
(1) 幅 80mm および 40mm で重ね代 50, 20mm

でシートを巻いた試験体のいくつかは梁下面のシートが剥がれ、その時は荷重が5～10kN急激に低下する。幅80mm、梁の両側面に重ね代150mmでシートを巻いた試験体は、シートの剥がれは見られず、急激な荷重の低下は見られなかった。

- (2) 梁側面に貼付した歪ゲージの変化から、対象とした腰掛兜蟻仕口の破壊過程は、兜下部が割裂し、桁によって兜が持ち上げられ、兜の耐力が低下した後に蟻部がせん断破壊し、最終的に腰部の損傷と考えられる。以上の実験結果から、FRPシートを梁端部に巻いたせん断補強方法は、耐力の向上と最大耐力後の靱性に寄与することを明らかにした。

<参考文献>

- ① 池本敏和、北浦勝、宮島昌克、18年豪雪の被害 石川県の被害、雪工学会誌、Vol.22、No.2、2006、132-133
- ② 西村督、池本俊一、後藤正美、過大な積雪荷重による木造建築物の倒壊挙動に関する考察、日本建築学会構造系論文集、第77巻、第672号、2012、239-248
- ③ 西村督、後藤正美、ほぞの長さをパラメータとしたほぞ仕口の振り剛性と耐力評価に関する実験、日本建築学会大会学術講演会、2014年9月13日、神戸大学(兵庫県)
- ④ 塚崎英世、梅津二郎、小松幸夫、プレカットシステムによる新形状腰掛蟻仕口の寸法・形状と強度特性の関係、日本建築学会構造系論文集、第686号、2013、809-816
- ⑤ 塚崎英世、河合直人、小松幸夫、前川秀幸、松留慎一郎、械加工能率を向上させた腰掛蟻仕口の強度特性に関する研究—寸法・形状の変化が強度特性に及ぼす影響—、日本建築学会構造系論文集、第79巻、第700号、2014、811-818
- ⑥ 塚崎英世、河合直人、小松幸夫、藤野栄一、前川秀幸、松留慎一郎、機械加工された腰掛蟻仕口のせん断耐力に関する研究—破壊性状に基づく設計式の検討—、日本建築学会構造系論文集、第80巻、第708号、2015、285-295
- ⑦ 後藤正美、西村督、蟻仕口の脆性破壊を防止する既存木造家屋の耐雪補強、日本建築学会大会学術講演、2015年9月5日、東海大学(神奈川県)
- ⑧ 松本慎也、大久保孝昭、渡辺康明、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、日本建築学会構造系論文集、第77巻、第672号、2012、221-230
- ⑨ 西村督、後藤正美、FRPシートを用いた小屋梁のせん断補強に関する載荷実験蟻仕口の脆性破壊を防止する既存木造家屋の耐雪補強、日本建築学会北陸支部大会、2016年7月24日、福井大学(福井県)
- ⑩ 西村督、後藤正美、FRPシートによる腰掛兜蟻仕口のせん断補強に関する考察、日本建築学会大会学術講演、2016年8月25日、福岡大学(福岡県)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0件)

[学会発表] (計 4件)

- ① 西村督、後藤正美、ほぞの長さをパラメータとしたほぞ仕口の振り剛性と耐力評価に関する実験、日本建築学会大会学術講演会、2014年9月13日、神戸大学(兵庫県)
- ② 後藤正美、西村督、蟻仕口の脆性破壊を防止する既存木造家屋の耐雪補強、日本建築学会大会学術講演、2015年9月5日、東海大学(神奈川県)
- ③ 西村督、後藤正美、FRPシートを用いた小屋梁のせん断補強に関する載荷実験蟻仕口の脆性破壊を防止する既存木造家屋の耐雪補強、日本建築学会北陸支部大会、2016年7月24日、福井大学(福井県)
- ④ 西村督、後藤正美、FRPシートによる腰掛兜蟻仕口のせん断補強に関する考察、日本建築学会大会学術講演、2016年8月25日、福岡大学(福岡県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西村 督 (NISHIMURA, Toku)
金沢工業大学・環境・建築学部建築学科・教授
研究者番号： 30367445

(2) 研究分担者

後藤 正美 (GOTO, Masami)
金沢工業大学・環境・建築学部建築学科・教授
研究者番号： 40170469