

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 13 日現在

機関番号：30108

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21760441

研究課題名（和文） 積雪地域における木造住宅の耐震補強促進に関する研究

研究課題名（英文） Study on promotion for seismic reinforcement of wood-frame houses built in snowy region

研究代表者

千葉 隆弘 (CHIBA TAKAHIRO)

北海道工業大学・空間創造学部・准教授

研究者番号：40423983

研究成果の概要(和文): 本研究では、積雪地域における木造住宅の耐震補強促進に資するための技術的資料を蓄積するため、積雪期の地震に対する木造住宅の耐震性について検討を行った。まず、耐震診断に基づき現況住宅の耐震性を把握するとともに、断熱改修が木造住宅の耐震性に及ぼす影響を検討した。次に、地震の揺れがきっかけで発生する屋根雪の動的挙動が木造住宅の地震応答に及ぼす影響を実験的および解析的に検討した。これらの検討の結果、断熱改修の方法によっては耐震性が向上し、雪荷重を考慮した耐震性の確保が可能となること、さらに、屋根雪の動的挙動には住宅の揺れを緩和させる効果を有していることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文): In this study, to accumulate technical data for promotion of seismic reinforcement on wood-frame houses built in snowy region, the author examined seismic performance of the houses during snow season. First, seismic performance in current state was examined based on seismic diagnosis. Relationship between insulation improvement and seismic performance of the houses was examined also. Then, relationship between seismic response of the houses and dynamic behavior of roof snow caused by strong motion was examined. As the results, it was possible to maintain the seismic performance considering snow load by the insulation improvement. And it was found that the dynamic behavior of roof snow decreased motion of the houses.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2010年度	300,000	90,000	390,000
2011年度	200,000	60,000	260,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：耐震設計

## 1. 研究開始当初の背景

2005年12月から2006年1月にかけての断続的な降雪によって日本海側沿岸の広範囲にわたって豪雪が発生した。豪雪に起因する死者数は戦後2番目の規模に達し、気象庁で

は「平成18年豪雪」と命名した。この豪雪による死者の内訳をみると、「屋根からの転落」や「屋根からの落雪」が大半を占め、屋根雪処理を行っている最中の事故であったことがわかる。一方、雪荷重による建築物の

倒壊は 18 棟であり、非常に少ない状況であった。ここで、近年発生した豪雪による建築物の倒壊状況をみると、1981 年の 56 豪雪以降、非常に少ない状況であるが、2005 年 1 月に新潟県で発生した豪雪では、約 100 棟の木造住宅が倒壊した。これら倒壊した住宅の 77%は、前年の 10 月に発生した新潟県中越地震により全壊と判定されていた。このような状況をみると、震災復興の途中で豪雪に遭遇していることから、地震と豪雪による複合災害の様相を呈している。従って、積雪地域の木造住宅では、積雪期の地震を想定して耐震性を確保することが肝要である。

枠組壁構法の住宅や品確法に基づいて設計された住宅では、雪荷重を住宅の重量に加算して求められた壁量を用いて耐震設計を行うことが可能となっている。しかし、建築基準法施行令第 46 条の壁量計算に基づいて設計された在来軸組構法住宅は、雪荷重が考慮されていない壁量を採用している可能性がある。さらに、2000 年以前に建築された木造住宅では、筋かい端部や柱頭・柱脚部の金物を取り付けられていないケースが多いことから、積雪期の地震に対する耐震性能は低い状況になっている可能性が高い。従って、現況の耐震性能を把握し、効果的な耐震補強を促進し、積雪期の地震に対する被害を緩和する取り組みが必須である。

## 2. 研究の目的

本研究では、耐震性が低いと考えられる積雪地域の木造住宅について、耐震補強を促進させるための技術的資料を蓄積することを目的としている。

## 3. 研究の方法

本研究では、以下に示す方法に基づいて、積雪地域における木造住宅の耐震補強促進に関する技術的資料蓄積をはかる。

### (1) 外張り断熱耐力壁の性能評価実験

北海道の木造住宅における改修状況を見ると、外壁改修や断熱改修が盛んに実施されている。これらのうち、躯体内部に加えて外張り断熱を施工し、断熱性能の向上をはかる取り組みが実施されている。発砲系断熱材を用いた外張り断熱工法は、胴縁を介して高耐力ビスで構造用合板の外側に断熱材を留めつけるが、その際、高耐力ビスは構造用合板を貫通して躯体に留めつけられることから、合板の留めつけ箇所が増加し、耐震性の向上が期待できる。このようなことから本研究では、発砲系断熱材を用いた外張り断熱耐力壁の耐震性能を明らかにすることを目的に、水平載荷実験を行った。

### (2) 耐震診断に基づく耐震性能の評価

本研究では、札幌市における 76 棟の既存

住宅を対象に耐震診断を行い、積雪期の地震に対する木造住宅の耐震性について、実態把握を試みるとともに、外張り断熱耐力壁を適用した場合の耐震性を評価した。対象とした木造住宅は、いずれも 2 階建て在来軸組構法であり、屋根上の積雪深を 0.0m, 0.5m, 1.0m, 1.5m, および 2.0m と変化させて耐震診断を行った。さらに、耐震診断の評点は、柱頭・柱脚部の各種金物に応じて大きく変化することから、その接合部の仕様を変化させて耐震診断を行った。

### (3) 勾配屋根の屋根雪滑落と構造体の地震応答との関係に関する振動実験

積雪期の地震では、勾配屋根において、強い揺れがトリガとなって屋根雪が滑落する可能性がある。本研究では、小型の試験体を用いて振動実験を行い、屋根雪の滑落と構造体の地震応答との関係を検討した。試験体の大きさは、幅 350mm × 奥行 550mm であり、屋根葺材は塗装鋼板とした。屋根勾配は 3/10, 5/10, および 7/10 の 3 種類とし、屋根雪の重量は 10N, 30N, および 50N とした。実験は、試験体の応答倍率が約 2.0 となるように調和振動加振を行った。試験体の挙動は、加速度計により測定した。得られた加速度の波形から屋根雪の滑落と試験体の地震応答との関係を検討した。

### (4) 屋根雪の動的挙動を考慮した木造住宅の地震応答解析

本研究では、無落雪屋根で発生する屋根雪の滑動、および勾配屋根で発生する屋根雪の滑落を考慮した木造住宅の地震応答解析を行い、積雪期の地震に対する地震被害状況を分析した。過去の研究および本研究で実施した振動実験から屋根雪の滑動・滑落をモデル化し、これらの現象を組み込んだ振動方程式に基づいて地震応答解析を行った。解析の対象とした木造住宅は、本研究の耐震診断に用いた 76 棟の 2 階建て在来軸組構法住宅であり、屋根雪の深さは、0.0m, 0.5m, 1.0m, 1.5m, および 2.0m とした。また、屋根雪の動的挙動なし、無落雪屋根での滑動、および勾配屋根での滑落を考慮し、屋根雪の深さと屋根雪の動的挙動が木造住宅の被害状況に及ぼす影響を解析的に検討した。

## 4. 研究成果

### (1) 外張り断熱耐力壁の性能評価実験

本実験で対象とした試験体を図 1 に示す。図のように、幅 1,820mm × 高さ 2,730mm で厚さ 9mm の構造用合板を CN50@150 で留めつけた耐力壁を対象とした。この耐力壁の外側に厚さ 25mm, 75mm, および 100mm の発砲系断熱材 (XPS) を厚さ 18mm の胴縁を介して留めつけた。留めつけ方法は、高耐力ビスを用い、

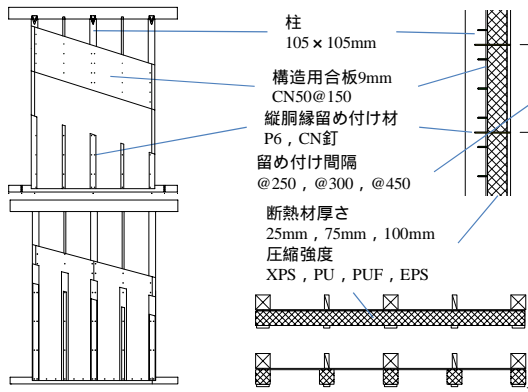


図1 水平荷重試験に用いた試験体

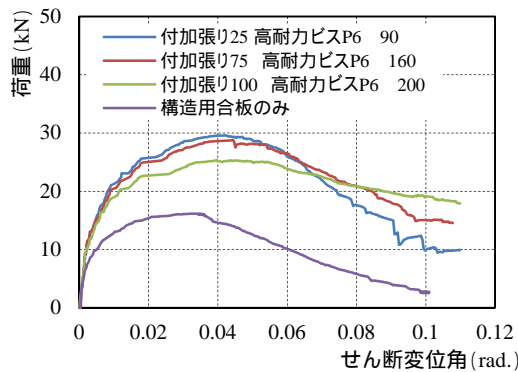


図2 水平荷重試験の結果

胴縁、断熱材、構造用合板の順にビスを貫通させて躯体に留めつけた。このような試験体を対象に、正負交番繰り返し荷重実験を行った。繰り返し履歴は、壁のせん断変形角が1/600, 1/450, 1/300, 1/200, 1/150, 1/100, 1/75, 1/50rad.の正負変形時とし、繰り返し回数は、履歴の同一変形段階で3回とした。最終段階には、耐力壁のせん断変形角が1/15rad.に達するまで加力した。

構造用合板のみの場合、および断熱材の厚さ25mm, 75mm, および100mmの場合の実験結果を図2に示す。なお、実験結果は骨格曲線で表している。図のように、構造用合板のみの場合は、骨格曲線から得られる壁倍率が約2.5となり、建築基準法に示されている値と同程度となった。これに対し、外張り断熱を施工した試験体をみると、構造用合板のみの場合に比べて耐力が増加しており、さらに、大変形時の耐力低下傾向が小さい、すなわち、地震エネルギー吸収能力が向上していることがわかる。断熱材の厚さの影響も小さく、建築基準法の壁倍率に換算した結果、約4.5となり、耐震診断で用いられる壁の強さ倍率に換算すると約9.5kN/mとなった。このように、外張り断熱耐力壁の耐震性能は、構造用合板に比べて格段に向上していることがわかる。これは、壁の変形時に発生する構造用

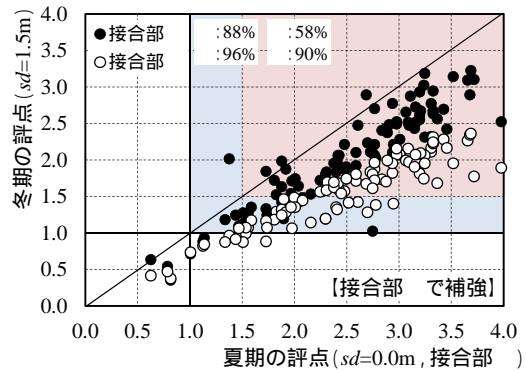
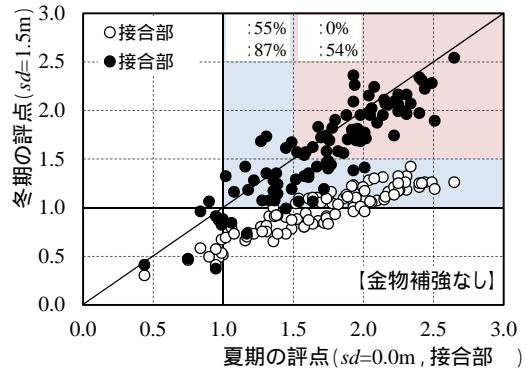


図3 耐震診断の結果

合板の浮きを断熱材が押さえ、その合板を留めつけている釘の性能が十分に発揮されたためであると考えられる。

このように、高耐力ビスを用いた外張り断熱工法は、構造用合板の耐震性能を向上させる効果を有していることが明らかとなった。

## (2) 耐震診断に基づく耐震性能の評価

本研究では、前述の実験で明らかとなった外張り断熱耐力壁を適用した場合の耐震性能を耐震診断に基づいて評価した。対象とした木造住宅は、札幌市に建築された76棟の2階建て在来軸組構法とし、前述した外張り断熱耐力壁を住宅の外周部に適用することを想定した。屋根雪の深さは、0.0m, 0.5m, 1.0m, 1.5m, および2.0mとし、柱頭・柱脚部の接合部仕様は、耐震診断法に基づき、接合部、およびとした。なお、接合部は、建築基準法告示に準拠した仕様で、接合部の強度が確保されるため、壁の耐力が低減されない仕様である。接合部は、CP-T等で補強された接合部で、接合部ほど強度は高い状態である。接合部は、かすがいや釘留め程度で、接合部の強度がほとんどなく、壁の耐力が大きく低減される接合部である。

屋根雪の深さを札幌市の設計用積雪深に近似した1.5mとした場合を対象に、夏期の評点と冬期の評点とを比較した結果を図3に示す。なお、接合部で金物補強なしの場合と接合部で補強した場合の2種類を対象と

し、冬期の評点は、夏期の接合部と同様の状態と、雪荷重による柱の押さえつけ効果によって接合部仕様が1ランク上昇（接合部は接合部に、接合部は接合部に上昇）することを想定した場合を示している。図のように、夏期の冬期のいずれも接合部の場合をみると、外張り断熱耐力壁を適用しても評点1.0を下回る住宅が多く、冬期の評点はさらに小さくなる傾向を示す。夏期と冬期のいずれも評点1.0を上回る住宅は、全体の55%を占める程度である。次に、雪荷重によって冬期の接合部が から に上昇することを想定した場合をみると、夏期と冬期の評点が近似する傾向を示し、全体の87%が評点1.0を上回り、評点1.5を上回る住宅は全体の54%を占めた。次に、接合部 で補強した場合の夏期と冬期の評点を比較した結果をみると、夏期と冬期のいずれも接合部 とした場合は、夏期に比べて冬期の評点が小さくなる傾向を示すものの、全体の88%は評点1.0を上回っている。これに対し、評点1.5を上回る住宅は全体の58%となり、評点1.0を上回る場合に比べて比率の減少傾向が顕著となる。雪荷重による柱の押さえつけ効果を考慮して冬期の接合部仕様が から に上昇することを想定した場合をみると、夏期に比べて冬期の評点が若干小さくなる傾向を示すが、評点1.5を上回る住宅は全体の90%を占めるようになる。

以上の結果をみると、外張り断熱耐力壁を適用した場合、金物補強なしの場合においても評点1.0以上を確保できる可能性が高いことが明らかとなった。一方、評点1.5以上を確保しようとする場合は、CP-T等によって柱頭・柱脚部を補強する必要がある。

### (3) 勾配屋根の屋根雪滑落と構造体の地震応答との関係に関する振動実験

本研究では、勾配屋根で発生する屋根雪の滑落が構造体の地震応答に及ぼす影響を把握することを目的に、振動実験を行った。図4に、実験状況および測定した加速度時刻歴を示す。図のように、大きさ350mm×550mmの勾配屋根試験体に自然雪を堆積させて振動実験を行った。実験で得られた加速度時刻歴をみると、1秒程度滑動した後に全ての屋根雪が滑落した。滑落後の加速度をみると、滑落前に比べて減少する傾向を示した。次に、屋根勾配と屋根雪の滑落速度との関係を図5に示す。なお、図中には、自然滑落した際の滑落速度を併せて示した。図のように、屋根勾配および屋根雪重量の増加に伴い滑落速度が増加する関係がみられ、振動時の滑落速度は、自然滑落に比べて速くなる傾向を示す。次に、屋根勾配と滑落前の応答に対する滑落後の比率との関係を図6に示す。図のように、屋根勾配の増加に伴い比率が減少する関係

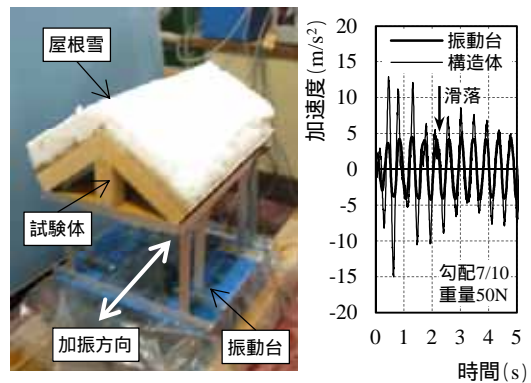


図4 実験状況と加速度時刻歴

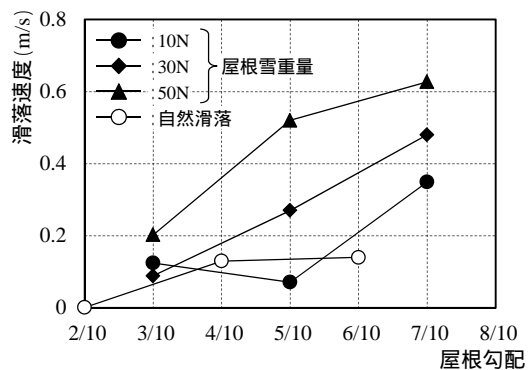


図5 屋根勾配と滑落速度との関係

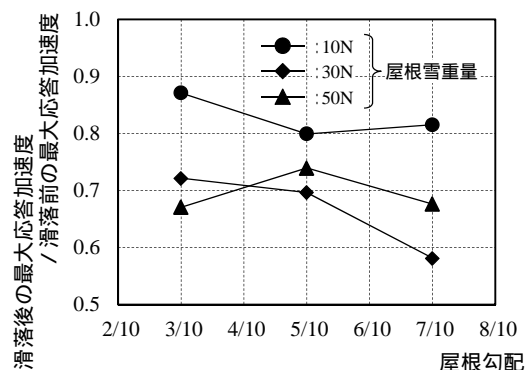


図6 屋根勾配と応答減少比率との関係

が概ね確認できる。

以上の結果をみると、屋根雪が滑落することによって構造体が軽くなり、地震応答が減少する傾向がみられ、その傾向は、屋根雪重量の増加に伴い顕著となることが明らかとなった。

### (4) 屋根雪の動的挙動を考慮した木造住宅の地震応答解析

本研究では、過去の研究や本研究で対象とした屋根雪の滑動および滑落を考慮した地震応答解析を行い、積雪期の地震に対する木造住宅の被害状況を検討した。解析モデルは質点系であり、屋根雪と屋根葺材との摩擦係



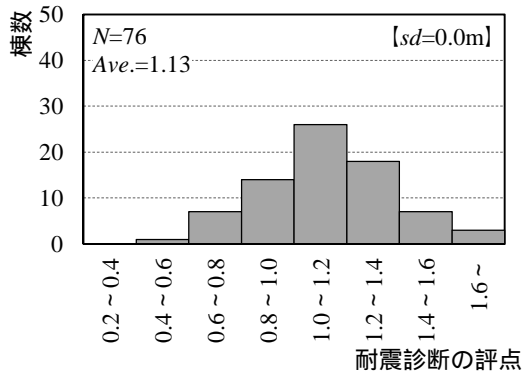


図7 解析の対象とした住宅の評点（現況）

数は 0.15 として解析した。解析の対象とした木造住宅は、耐震診断で用いた 76 棟の既存 2 階建て在来軸組構法住宅とし、住宅の剛性は、耐震診断で得られた評点に基づいて設定した。復元力特性については、バイリニア型とスリップ型を重ね合わせた弾塑性モデルとした。また、外張り断熱耐力壁を適用した場合も対象とした。屋根雪が 0.0m の場合における各住宅の評点(現況)を図 7 に示す。図のように、評点の平均値は 1.13 であり、評点のバラツキは正規分布に従っている。これらの住宅を対象に、規模の異なる 43 の観測波を用い、これらの観測波ごとに住宅の被害率を算定した。なお、住宅の安全限界変位は  $1/20\text{rad}$  とした。また、屋根雪の深さは 0.0m, 0.5m, 1.0m, 1.5m, および 2.0m とし、屋根雪の動的挙動は、「動的挙動なし」、「無落雪屋根での滑動」、および「勾配屋根での滑落」とした。

動的挙動なしの場合における PGV (地震動の最大速度) と倒壊率との関係を図 8 に示す。図のように、現況の場合をみると、屋根雪の深さの増加に伴い被害が拡大する傾向がみられる。次に、外張り断熱耐力壁で補強した場合をみると、屋根雪なしの場合は、ほとんどの住宅で安全限界変位に達しなかった。しかし、屋根雪が作用した場合をみると、被害は急激に拡大する傾向を示す。このように、屋根雪の動的挙動が発生しない場合は、補強した場合においても、屋根雪によって急激に被害が拡大することがわかる。次に、無落雪屋根での滑動を考慮した場合の PGV と倒壊率との関係を図 9 に示す。図のように、現況および補強のいずれにおいても、屋根雪の深さの増加に伴う被害の拡大傾向が小さく、動的挙動なしに比べて住宅の揺れが小さくなっている。

以上の結果をみると、強い揺れによって発生する屋根雪の動的挙動は、住宅の揺れを緩和する効果があることが明らかとなった。

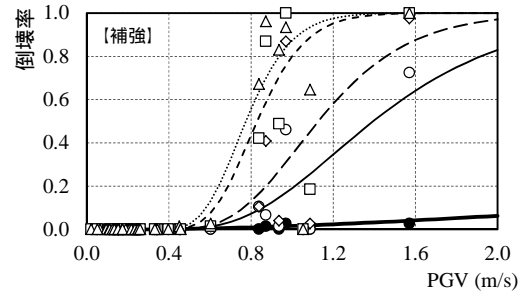
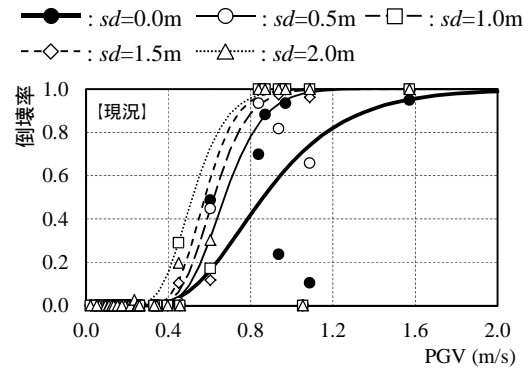


図8 PGV と倒壊率との関係（挙動なし）

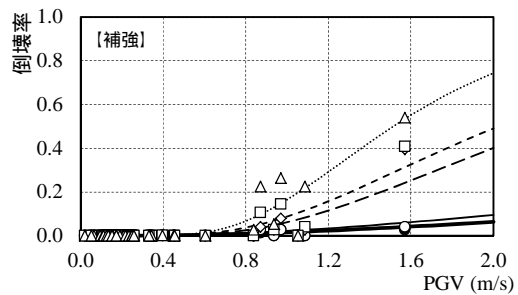
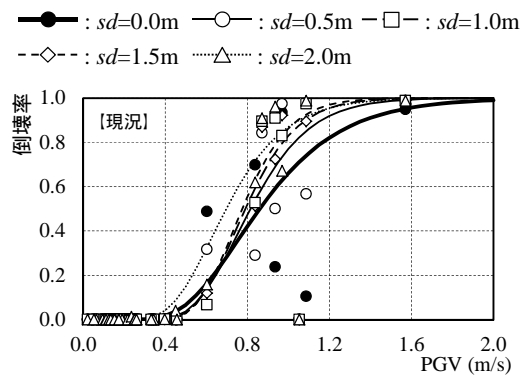


図9 PGV と倒壊率との関係（滑動あり）

##### 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 2 件)

千葉隆弘, 苔米地司, 高橋徹, 植松武是: 地震応答解析による屋根雪の動的挙動と木造住宅の地震応答との関係, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, Vol.74, No.644,

pp.1777-1784 , 2009.10

Chiba, T., Munakata, M., Tomabechi, T., Takahashi, T., Uematsu, T.: Study on seismic performance of wooden houses in snowy region by seismic response analysis In 2 stories wooden houses built in Sapporo -, Safety, Reliability, and Risk of structures, Infrastructures and Engineering System, 査読有, pp.3800-3805, 2009.9

の耐震改修効果 ,日本建築学会大会学術講演梗概集(東北),C-1 ,pp.299-300 ,2009.8

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

千葉 隆弘 (CHIBA TAKAHIRO)

北海道工業大学・空間創造学部・准教授

研究者番号 : 40423983

### [学会発表](計 20 件)

千葉隆弘,高橋徹,植松武是,苫米地司:積雪期の地震に対する木造住宅の耐震性に関する研究 - 屋根雪の動的挙動を考慮した場合における地震被害状況の検討 -, 雪氷研究大会(2011・長岡)講演要旨集, pp.4, 2011.9

植松武是,片山大輔,佐々木智和,千葉隆弘,平川秀樹,苫米地司:横胴縁仕様の外張り断熱耐力壁の開発,日本建築学会大会学術講演梗概集(関東),C-1, pp.43-44, 2011.8

渡部大地,千葉隆弘,植松武是,苫米地司:外張り断熱耐力壁による木造住宅の耐震補強効果に関する研究,日本建築学会大会学術講演梗概集(関東),C-1, pp.467-468, 2011.8

渡部大地,千葉隆弘,植松武是,苫米地司:木造住宅における外張り断熱耐力壁の耐震補強効果に関する研究,日本建築学会北海道支部研究報告集 No.84, pp.183-186, 2011.7

千葉隆弘,渡部大地,苫米地司,高橋徹,植松武是:勾配屋根における屋根雪挙動と構造体の応答性状について - 切妻屋根試験体を対象とした振動実験 -, 雪氷研究大会(2010・仙台)講演要旨集, p.225, 2010.9

植松武是,鎌田紀彦,片山大輔,佐々木智和,千葉隆弘:外張り付加断熱耐力壁の開発,日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸),C-1, pp.321-322, 2010.9

渡部大地,千葉隆弘,苫米地司,高橋徹,植松武是:屋根雪の挙動を考慮した木造住宅の耐震設計について - その1 解析による屋根雪の挙動と地震応答との関係 -, 雪氷研究大会(2009・札幌)講演要旨集, pp.24, 2009.9

千葉隆弘,渡部大地,苫米地司,高橋徹,植松武是:屋根雪の挙動を考慮した木造住宅の耐震設計について - その2 設計用積雪深に基づいた耐震設計法の提案 -, 雪氷研究大会(2009・札幌)講演要旨集, pp.25, 2009.9

植松武是,平川秀樹,千葉隆弘,片山大輔,佐々木智和,苫米地司,平井卓郎,戸田正彦,野田康信:外張り断熱による面材耐力壁